



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μίμηση της Συμπεριφοράς Αποικίας Μυρμηγκιών για την
Ανάθεση και Χρονοδρομολόγηση Εργασιών σε Πολύπλοκα
Δίκτυα Υπολογιστών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

Νικολάου Π. Πρέβε

Αθήνα, Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Μίμηση της Συμπεριφοράς Αποικίας Μυρμηγκιών για την
Ανάθεση και Χρονοδρομολόγηση Εργασιών σε Πολύπλοκα
Δίκτυα Υπολογιστών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

Νικολάου Π. Πρέβε

Συμβουλευτική Επιτροπή : Εμμανουήλ Ν. Πρωτονοτάριος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γρηγόριος Μέντζας, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δημήτριος Ασκούνης, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 19^η Ιουλίου 2012.

.....
Εμμανουήλ Ν. Πρωτονοτάριος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Βασίλειος Λούμος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Θεοδώρα Βαρβαρίγου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

.....
Γρηγόριος Μέντζας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δημήτριος Ασκούνης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αναστάσιος Δουλάμης
Επικ. Καθηγητής Πολυτεχνείο
Κρήτης

.....
Χαράλαμπος Πατρικάκης
Επικ. Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Πειραιά

Αθήνα, Ιούλιος 2012

.....
Νικόλαος Π. Πρέβε
© 2012 – 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.

*«Στους γονείς μου οφείλω το ζην και
στους δασκάλους μου το εύ ζην!»*

Μέγας Αλέξανδρος 356π.Χ.-323π.Χ.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Οι δυσκολίες που αντιμετώπισα στην περίπου δεκαετή πορεία μου στο Ε.Μ.Π. ξεπεράστηκαν με σκληρή δουλειά βελτιώνοντας σημαντικά τις γνώσεις μου και τις ερευνητικές μου ικανότητες στο ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο των Δικτύων Επικοινωνιών του Τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής που τόσο αγάπησα όλα αυτά τα χρόνια που ήμουν στο Ε.Μ.Π.

Το επιστέγασμα της προσπάθειας που οδήγησε στη συγγραφή της παρούσας διδακτορικής διατριβής δεν θα ήταν δυνατόν να επιτευχθεί αν όλα αυτά τα χρόνια δεν είχα την αμέριστη συμπαράσταση και καθοριστική καθοδήγηση αρκετών ανθρώπων.

Οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Εμμανουήλ Ν. Πρωτονοτάριο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου επιλέγοντάς με ως υποψήφιο διδάκτορα. Ως επίσης για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια δίνοντάς μου τη δυνατότητα να ασχοληθώ και να εμβαθύνω στο γνωστικό αντικείμενο της επιλογής μου.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω θερμά και τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς εισηγητικής μου επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Γρηγόριο Μέντζα και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Δημήτριο Ασκούνη που ήταν πάντοτε διαθέσιμοι για την επίλυση οποιουδήποτε προβληματισμού μου καθώς και για τη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια όλων αυτών των ετών.

Στα χρόνια που πέρασα στο Ε.Μ.Π. και στο εργαστήριο Τηλεπικοινωνιών εκτός από τους πολλούς και ξεχωριστούς ανθρώπους που γνώρισα κατά περιόδους θα ήθελα να αποδώσω ευχαριστίες στους Δρ. Νικόλαο και Αναστάσιο Δουλάμη και Χαράλαμπο Πατρικάκη για την απρόσκοπτη επιστημονική καθοδήγηση και ηθική υποστήριξη που αφειδώς μου παρείχαν συμβάλλοντας καθοριστικά σε όλη την πορεία μου έως την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Ολοκληρώνοντας, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη αγάπη και υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Νικόλαος Π. Πρέβε

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	19
1.1 Το Τεχνολογικό Πλαίσιο	19
1.2 Αντικείμενο – Στόχος	20
1.3 Συνεισφορά	21
1.4 Διάθρωση της Διατριβής	23
1.5 Αναφορές	25
2. Δίκτυα Πλέγματος.....	27
2.1 Εισαγωγή	27
2.2 Ιστορική Αναδρομή.....	28
2.3 Ορισμός Δικτύων Πλέγματος.....	30
2.4 Επισκόπηση Αρχιτεκτονικής των Δικτύων Πλέγματος.....	32
2.5 Δυνατότητες Δικτύων Πλέγματος.....	37
2.5.1 Πλήρης Εκμετάλλευση Πόρων	39
2.5.2 Παράλληλη Υπολογιστική Επεξεργασία	40
2.5.3 Συνεργασία Εικονικών Πόρων.....	40
2.5.4 Συμμετοχή σε Εικονικούς Οργανισμούς.....	41
2.5.5 Εξισορρόπηση Πόρων.....	42
2.5.6 Καλύτερη Διαχείριση.....	42
2.5.7 Επιλεκτική Παραχώρηση Πόρων.....	42
2.5.8 Αξιοπιστία.....	43
2.5.9 Ποιότητα Εξυπηρέτησης.....	43
2.6 Κατηγοριοποίηση Δικτύων Πλέγματος.....	44
2.6.1 Πλέγματα Υπολογιστικής Ισχύος.....	45
2.6.2 Πλέγματα Δεδομένων	46
2.6.3 Πλέγματα Υπηρεσιών	46
2.7 Εφαρμογές των Δικτύων Πλέγματος.....	47
2.8 Σύγκριση με Συναφείς Τεχνολογίες.....	49
2.9 Αναφορές.....	51
3. Εξισορρόπηση Φόρτου Υπολογιστικού Πλέγματος με βάση τη Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών	55
3.1 Εισαγωγή	55
3.2 Νοημοσύνη Σμήνους	57
3.2.1 Αποικίες Μυρμηγκιών	58
3.2.2 Τεχνητές Αποικίες Μυρμηγκιών.....	60
3.2.3 Αλγόριθμος Συστήματος Μυρμηγκιών	63

3.3 Υπολογιστικό Πλέγμα και Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών.....	68
3.4 Σχετικές Εργασίες	70
3.5 Εξισορροπημένος Χρονοπρογραμματισμός κατά ACO	72
3.5.1 Εξισορροπημένος ACO Αλγόριθμος	73
3.5.2 Πρακτική Αξιοποίηση του ACO Αλγορίθμου	80
3.6 Πειραματικά Αποτελέσματα	84
3.6.1 Πειραματική Διάταξη.....	84
3.6.2 Στατική Αξιολόγηση Συστήματος.....	86
3.6.3 Δυναμική Αξιολόγηση Συστήματος.....	88
3.7 Συμπεράσματα.....	91
3.8 Αναφορές.....	92
4. Σύστημα Συλλογής, Επεξεργασίας και Απεικόνισης Περιβαλλοντικών Δεδομένων σε Διαδίκτυο Αισθητήρων με Πλέγμα	97
4.1 Εισαγωγή	98
4.2 Σχετικές Εργασίες	100
4.3 Τεχνολογικό Πλαίσιο Γεω-υποδομής.....	102
4.3.1 Διαδίκτυο Αισθητήρων	104
4.3.2 Δίκτυο Πλέγματος.....	107
4.3.3 Διαδικτυακή Υποδομή	108
4.4 Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα Διαδικτύου Αισθητήρων με Πλέγμα	108
4.4.1 Σύστημα Ελέγχου και Παρακολούθησης Κλιματικών Αλλαγών.....	110
4.4.2 Μοντέλο Πρόληψης και Προστασίας Περιβάλλοντος.....	113
4.5 Πειραματικά Αποτελέσματα	118
4.5.1 Πειραματική Διάταξη.....	120
4.5.2 Πειραματική Αξιολόγηση Διαδικτύωσης Ενοποιημένης Υποδομής.....	132
4.6 Συμπεράσματα.....	140
4.7 Αναφορές.....	142
5. Συγκλίνον Δίκτυο Πλέγματος Υγείας SEGEDMA και Διαχείριση Δεδομένων Σχεσιακών Βάσεων σε Περιβάλλον Διάχυτου Υπολογισμού	147
5.1 Εισαγωγή	149
5.2 Σχετικές Εργασίες	152
5.3 Σχεδιασμός Δικτύου Αισθητήρων με Πλέγμα Υγείας.....	154
5.3.1 Σχεδιαστικά Ζητήματα.....	155
5.3.2 Πλεγματική Διεπαφή για Αισθητήρες.....	156
5.3.3 Διασύνδεση Δικτύου και Πρωτοκόλλα.....	156
5.3.4 Κλιμακωσιμότητα	157
5.3.5 Διαθεσιμότητα Αισθητήρων	157
5.3.6 Ασφάλεια Υποδομής.....	158
5.3.7 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS).....	158
5.3.8 Σενάριο Χρήσης.....	158
5.3.9 Αρχιτεκτονική Βάσης Δεδομένων	160
5.4 Συγκλίνον Δίκτυο Πλέγματος Υγείας SEGEDMA	163

5.4.1 Στοιχεία Μεσισμικού Διακομιστών Μεσολάβησης	168
5.4.2 Μοντέλο Διαχείρισης Δεδομένων	170
5.4.3 Διασύνδεση Τοπικών Πληροφοριακών Συστημάτων Υγειονομικής Περιθαλψης και Σύστημα Αλληλεπίδρασης	173
5.5 Πειραματικά Αποτελέσματα	179
5.5.1 Πειραματική Διάταξη.....	179
5.5.2 Μετρική Αξιολόγηση Ανάκτησης Δεδομένων.....	182
5.6 Συμπεράσματα.....	185
5.7 Αναφορές.....	187
6. Συμπεράσματα.....	193
6.1 Εισαγωγή	193
6.2 Συμβολή Εργασίας στην Έρευνα	193
6.3 Προοπτικές – Μελλοντικές Επεκτάσεις	195

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Επισκόπηση Πλεγματικής Τεχνολογίας.....	32
Σχήμα 2: Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων Δικτύου Πλέγματος.....	33
Σχήμα 3: Τυπική Δομή ενός Δικτύου Πλέγματος.....	36
Σχήμα 4: Αρχιτεκτονική Δικτύων Πλέγματος.....	45
Σχήμα 5: Συμπεριφορά Αληθινών Μυρμηγκιών.....	59
Σχήμα 6: Συμπεριφορά Τεχνητών Μυρμηγκιών.....	62
Σχήμα 7: Κατανομή Πόλεων και Βέλτιστη Λύση στο Πρόβλημα TSP.....	64
Σχήμα 8: Χρόνοι Ολοκλήρωσης και Εκτέλεσης Εργασιών.....	74
Σχήμα 8: Αρχιτεκτονική Grid Συστήματος.....	75
Σχήμα 9: Σχέση Συστήματος Μυρμηγκιών και Υποδομή Πλέγματος.....	76
Σχήμα 10: Η Ελληνική Υποδομή Πλέγματος HellasGrid.....	81
Σχήμα 11: Επεξεργαστικές Δυνατότητες του κάθε Κόμβου (WN).....	84
Σχήμα 12: Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης ανά Εργασία με Όμοια Μεγέθη (Μεθ. Πινάκων).....	86
Σχήμα 13: Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης ανά Εργασία με Όμοια Μεγέθη (Γραμμικός Προγρ/σμος).....	87
Σχήμα 14: Τυπική Απόκλιση Φόρτου με Όμοια Μεγέθη (Μεθ. Πινάκων).....	87
Σχήμα 15: Τυπική Απόκλιση Φόρτου με Όμοια Μεγέθη (Γραμμικός Προγρ/σμος).....	88
Σχήμα 16: Συνολικός Χρόνος Εκτέλεσης με Μεικτά Μεγέθη (Μεθ. Πινάκων).....	88
Σχήμα 17: Συνολικός Χρόνος Εκτέλεσης με Μεικτά Μεγέθη (Γραμμικός Προγρ/σμος).....	89
Σχήμα 18: Τυπική Απόκλιση Φόρτου με Μεικτά Μεγέθη (Μεθ. Πινάκων).....	89
Σχήμα 19: Τυπική Απόκλιση Φόρτου με Μεικτά Μεγέθη (Γραμμικός Προγρ/σμος).....	90
Σχήμα 20: Ενοποιημένο Πλαίσιο Εργασίας Διαδικτύου Αισθητήρων με Πλέγμα.....	103
Σχήμα 21: Κόμβος Αισθητήρα.....	105
Σχήμα 22: Αρχιτεκτονική ενός Ασύρματου Κόμβου Αισθητήρα.....	105
Σχήμα 23: Ενοποιημένη Υποδομή Πλέγματος με Διαδίκτυο Αισθητήρων.....	109
Σχήμα 24: Αρχιτεκτονική Διαδικτύου Αισθητήρων και Διασύνδεση με την Υποδομή Πλέγματος.....	111
Σχήμα 25: Ενοποιημένο Δίκτυο Ελέγχου και Παρακολούθησης Περιβάλλοντος.....	112
Σχήμα 26: Ιεραρχική Ανάκτηση Δεδομένων.....	114
Σχήμα 27: Δομή Δεδομένων Μοντέλου Πρόληψης και Προστασίας Περιβάλλοντος.....	115
Σχήμα 28: Μοντέλο Ανακτημένων Δεδομένων.....	117
Σχήμα 29: Αλγόριθμος Συστήματος Ελέγχου και Παρακολούθησης Περιβάλλοντος.....	117
Σχήμα 30: Ασύρματη Μονάδα Tmote Sky.....	119
Σχήμα 31: Διάταξη TYMO σε Επίπεδο Δικτύου.....	120
Σχήμα 32: Επισκόπηση Αποστολής-Λήψης ΜΗ Μηνυμάτων.....	122
Σχήμα 33: Διάγραμμα Ροής Συστήματος.....	123
Σχήμα 34: Διεπαφή Read.....	123
Σχήμα 35: Επισκόπηση Κινητός Μέσος Όρος.....	126
Σχήμα 36: Σχεσιακό Μοντέλο Βάσης Δεδομένων Μετρήσεων Αισθητήρων.....	130
Σχήμα 38: Διαγράμματα Μετρήσεων Θερμοκρασίας Αισθητήρων.....	133
Σχήμα 37: Διαγράμματα Μετρήσεων Υγρασίας & Μετρήσεων Πραγματικής Υγρασίας Αισθητήρων.....	134
Σχήμα 38: Διαγράμματα Μετρήσεων Ολικής Ηλιακής Ακτινοβολίας (TSR).....	135
Σχήμα 39: Διαγράμματα Μετρήσεων Ενεργής Φωτοσυνθετικής Ακτινοβολίας (PAR).....	135
Σχήμα 40: Διαγράμματα Μετρήσεων Εσωτερικής Τάσης.....	136

Σχήμα 41: Διαγράμματα Μετρήσεων Εσωτερικής Θερμοκρασίας.....	137
Σχήμα 42: Διαγράμματα Δεικτών Ισχύος Ληφθέντος Σήματος (RSSI).....	137
Σχήμα 43: Μετρήσεις Προέλευσης Πακέτων Βάσης-Αισθητήρα.....	138
Σχήμα 44: Αναπαράσταση Μετρήσεων Διαδικτύου Αισθητήρων με Πλέγμα σε GUI.....	139
Σχήμα 45: Σενάριο Χρήσης και Υποδομή Πλέγματος Υγείας.....	159
Σχήμα 46: Συνδυασμός Τεχνολογίας Αποθηκευτικών Μέσων.....	161
Σχήμα 47: Αρχιτεκτονική Συγκλίνοντος Δικτύου SEGEDMA.....	165
Σχήμα 48: Μοντέλο Διαστροφάτωσης Ενοποιημένου Δικτύου.....	167
Σχήμα 49: Αρχιτεκτονική Σύνθεση Μεσισμικού Διακομιστών Μεσολάβησης.....	168
Σχήμα 50: Σχεδιασμός του Στοιχείου Διαχείρισης Δεδομένων.....	172
Σχήμα 51: Διασύνδεση Πληροφοριακών Συστημάτων Υγειονομικής Περίθαλψης με το Δίκτυο Πλέγματος.....	175
Σχήμα 52: Σύστημα Αλληλεπίδρασης Περίθαλψης.....	176
Σχήμα 53: Σχεσιακό Μοντέλο Βάσης Δεδομένων.....	178
Σχήμα 54: Απεικόνιση Ανάκτησης Δεδομένων σε GUI.....	180
Σχήμα 55: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με Ίδια Παράλληλη Επερώτηση (Cold Cache).....	183
Σχήμα 56: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με 5 Διαφορετικές Παράλληλες Επερωτήσεις (Cold Cache).....	183
Σχήμα 57: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με Ίδια Παράλληλη Επερώτηση (Warm Cache).....	184
Σχήμα 58: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με 5 Διαφορετικές Παράλληλες Επερωτήσεις (Warm Cache).....	184
Σχήμα 59: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με Μία και με Δύο Διαφορετικές Παράλληλες Επερωτήσεις (TinyDB).....	185

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Αποικίες Μυρμηγκιών.....	68
Πίνακας 2: Ο Προτεινόμενος Εξισορροπημένος ACO Αλγόριθμος Χρονοπρογραμματισμού Εργασιών.....	78
Πίνακας 3: Αρχική Κατάσταση Πόρων.....	79
Πίνακας 4: Ανανεωμένη Κατάσταση του κάθε Πόρου μετά την Εκτέλεση της j_3	79
Πίνακας 5: Ελληνικοί Κόμβοι που συμμετέχουν στο EGEE.....	81
Πίνακας 6: Μορφή jdl αρχείου.....	82
Πίνακας 7: Συσχετίσεις Τιμών-Τομέων.....	115
Πίνακας 8: Αλληλεξαρτήσεις Τομέων-Τιμών.....	116
Πίνακας 9: Μορφή Επερώτησης Θερμοκρασίας.....	181

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ταχεία ανάπτυξη της επιστήμης των υπολογιστών αδιαμφισβήτητα τις τελευταίες δεκαετίες σημείωσε αλματώδη πρόοδο στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και δικτύων. Η ραγδαία εξέλιξη της επιστήμης των υπολογιστών και η διείσδυσή τους στην καθημερινή ζωή των ανθρώπων τα τελευταία έτη ξεπέρασε κατά πολύ τις προσδοκίες των παρόχων Διαδικτύου και των εταιριών παραγωγής υπολογιστών. Ο αυξανόμενος αριθμός χρηστών έχει ως αποτέλεσμα παρά την αντίστοιχη ανάπτυξη των επικοινωνιακών δικτύων και την συνεχόμενα αυξανόμενη ζήτηση σε υπολογιστικούς πόρους και υπολογιστικές υπηρεσίες υψηλής απόδοσης.

Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις που συγκέντρωσαν το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στον τομέα των δικτύων σχετίζεται με πολύπλοκες δικτυακές υλοποιήσεις όπως είναι οι υποδομές υπολογιστικού πλέγματος (*grid*) που αποτελούν τον κυριότερο απόγονο των παράλληλων και κατανεμημένων συστημάτων. Ένα υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από πολλά υπολογιστικά συστήματα διασυνδεδεμένα μεταξύ τους με δίκτυο υψηλών ταχυτήτων. Ο στόχος του υπολογιστικού πλέγματος είναι ο διαμοιρασμός των πόρων ώστε κάθε είδους υπολογιστικά συστήματα που συμμετέχουν να λειτουργούν σαν ένας εικονικός, πολύ ισχυρός υπολογιστής.

Συνεπώς σαν κύριο χαρακτηριστικό τους τα πολύπλοκα δίκτυα υπολογιστών έχουν την αποκεντριοποιημένη δομή και τους ανεξάντλητους υπολογιστικούς πόρους. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα υπολογιστικά πλέγματα, το οποίο αποτελεί το κύριο αντικείμενο εξέτασης της παρούσας διατριβής είναι αυτό της διαδικτύωσής τους με διαφορετικές δικτυακές τεχνολογίες καθώς και η ευρεία χρησιμοποίησή τους σε ποικίλα επιστημονικά πεδία πέραν της επιστήμης των υπολογιστών. Με την επίλυση του περιορισμού των υπολογιστικών πόρων που υφίσταται το ενοποιημένο δίκτυο πρέπει να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη λειτουργία του με εξασφαλισμένη ποιότητα υπηρεσίας QoS (*Quality-of-Service*) παρέχοντας ποικίλες υπολογιστικές υπηρεσίες υψηλής απόδοσης. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι θα παρέχονται στο χρήστη υπηρεσίες δίχως προβλήματα, όπως π.χ. επιτυχή διεκπεραίωση όλων των αιτημάτων προς το δίκτυο, χωρίς αποτυχημένες προσπάθειες και καθυστερήσεις. Εκτός από την επιτακτική ανάγκη για νέους μηχανισμούς και νέες τεχνικές που απαιτούνται για την καλύτερη αξιοποίηση των πόρων ενός διασυνδεδεμένου υπολογιστικού πλέγματος δεν έχουν προταθεί αρκετοί μηχανισμοί βελτιστοποίησης του ενοποιημένου περιβάλλοντος ώστε η συγκεκριμένη τεχνολογία να είναι σε θέση να επιφέρει τα μέγιστα αναμενόμενα αποτελέσματα. Ακόμη και αν ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί πρέπει να επιλυθούν πλήρως περιορισμοί που σχετίζονται με την επεκτασιμότητα, κλιμακωσιμότητα (*scalability*), διαθεσιμότητα (*availability*) και την κινητικότητα (*mobility*) μέσα στο ενοποιημένο περιβάλλον υπολογιστικού πλέγματος.

Η επίλυση των παραπάνω περιορισμών επέρχεται με τη διασύνδεση του υπολογιστικού πλέγματος με διάφορων ειδών ασύρματα δίκτυα, όπως είναι τα ασύρματα τοπικά δίκτυα IEEE 802.11x γνωστά και ως

WLANs και τα IEEE 802.15.4 ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (*Wireless Sensor Networks, WSNs*). Όπως είναι ήδη γνωστό τα ασύρματα δίκτυα προσφέρουν κυρίως ευελιξία χρηστών μέσω των ασυρμάτων ζεύξεων. Οι ζεύξεις τους επηρεάζονται από την απώλεια σήματος, τις παρεμβολές, το μήκος ζεύξης, το θόρυβο, την ισχύ του πομπού, την υπολογιστική ισχύ και την μνήμη αυτών. Η ενοποίηση ενός διασυνδεδεμένου υπολογιστικού πλέγματος με οποιοδήποτε τύπου ασυρμάτου δικτύου έχει ως στόχο να προσφέρει απεριόριστες δυνατότητες στην νέα ενοποιημένη υποδομή εξασφαλίζοντας επεκτασιμότητα, κλιμακωσιμότητα, διαθεσιμότητα και κινητικότητα χρηστών επιλύοντας ταυτόχρονα και τους περιορισμούς που έχουν τα δύο δίκτυα. Η εισαγωγή της τεχνολογίας του ασυρμάτου μέσου στις διάφορες υποδομές πλέγματος αποσκοπεί εκτός από την επίλυση των παραπάνω περιορισμών στην ενσωμάτωση υπηρεσιών που έχουν αυξημένη απαίτηση σε δικτυακούς και επεξεργαστικούς πόρους αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα και των δύο ενοποιημένων δικτύων. Η διασύνδεση δύο διαφορετικών δικτύων, των υπολογιστικών πλεγμάτων και των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, έχει ως αποτέλεσμα τη μέγιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι εν λόγω δικτυακές τεχνολογίες ενώ ταυτόχρονα στοχεύει στην ευρεία διάδοση και χρήση της πλεγματικής τεχνολογίας.

Ως συνέπεια, με την ενοποίηση δύο διαφορετικών δικτύων, οδηγούμαστε σε νέους περιορισμούς που οφείλονται στο νέο ετερογενές περιβάλλον που σχηματίζεται και η νέα υποδομή έχει ως κύριο χαρακτηριστικό της τη διαλειτουργικότητα. Έτσι προκύπτει η επιτακτική ανάγκη για την δημιουργία νέων τεχνικών και δυναμικών μηχανισμών που να επιλύουν γρήγορα και αποτελεσματικά όλους τους περιορισμούς που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη ενοποίηση. Η διαλειτουργικότητα που χαρακτηρίζει αυτό το νέο δίκτυο αποτελώντας τη βάση της απρόσκοπτης λειτουργίας του δικτύου είναι μία δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία για τον σχεδιαστή του δικτύου, ο οποίος θα πρέπει να αναπτύξει επιτυχώς νέους μηχανισμούς ενοποιώντας το δίκτυο και εξασφαλίζοντας την ποιότητα QoS των διαφόρων υπηρεσιών που αυτό ενσωματώνει. Παρά τις τεράστιες δυνατότητες που παρέχονται από τα δίκτυα πλέγματος, ένεκα της επίλυσης του περιορισμού της επεξεργαστικής και αποθηκευτικής ισχύς από μόνα τους παρουσιάζουν μία υστέρηση στην πρόγνωση ειδικών καταστάσεων, όπως οι φυσικές καταστροφές, μόλυνση περιβάλλοντος και σεισμοί όπου η επικοινωνία είναι πολύ σημαντική.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται την επινόηση, ανάπτυξη και μελέτη ενός ενοποιημένου πολύπλοκου δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων με στόχο μία ομογενοποιημένη και βελτιστοποιημένη υποδομή που παρέχει ανεξάντλητη υπολογιστική και αποθηκευτική ισχύ στους χρήστες της οποιαδήποτε μέσα στο δίκτυο. Δεδομένου των προβλημάτων των υπαρχόντων μεθόδων διαδικτύωσης, προκύπτει η επιτακτική ανάγκη μίας ενοποιημένης υποδομής που να εξασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα, επεκτασιμότητα, κλιμακωσιμότητα, ευελιξία, διαθεσιμότητα και την κινητικότητα των χρηστών μέσα στο δίκτυο. Επίσης, πέραν από το ενοποιημένο δίκτυο, ένας επιπλέον στόχος της διατριβής αποτελεί η επέκταση και εφαρμογή των δικτύων πλέγματος εκτός από την επιστήμη των υπολογιστών σε διαφορετικές επιστημονικές περιοχές όπως είναι η γεωεπιστήμη και βιοιατρική. Το ενοποιημένο πλαίσιο, οι μηχανισμοί και οι τεχνικές που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή σχεδιάστηκαν με επίκεντρο την υποστήριξη της ευελιξίας (*flexibility*) της υποδομής πλέγματος (*grid*) και με γνώμονα τον ανθρωποκεντρικό

(*user-centric*) χαρακτήρα σχεδίασης. Η ολοκληρωμένη πρότυπη υποδομή έχει ως επίκεντρο τις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη αντιμετωπίζοντας τον με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του.

Η συμβολή της διατριβής εστιάζεται στην εισαγωγή ενός νέου αλγορίθμου εμπνευσμένου από τη φύση καθώς και στην ανάπτυξη νέων αρχιτεκτονικών-τεχνικών ενοποίησης που προάγουν τη διαλειτουργικότητα ενός πολύπλοκου δικτύου υπολογιστών ενώ χρησιμοποιούν την ήδη υπάρχουσα τεχνολογία ασυρμάτων μέσων. Δίδοντας έτσι τη δυνατότητα ο κάθε χρήστης να έχει πρόσβαση σε εξατομικευμένες υπηρεσίες και εφαρμογές που παρέχονται αδιάλειπτα και οπουδήποτε μέσα στο δίκτυο. Επιπλέον, δίδεται έμφαση στην διάταξη της αρχιτεκτονικής που αναπτύχθηκε και στο μοντέλο διαλειτουργικότητας καλύπτοντας τις ανάγκες δικτυακών εφαρμογών που υλοποιούνται μέσα στο νέο ετερογενές περιβάλλον. Προάγοντας ταυτόχρονα τη διαχείριση των πληροφοριών του ενοποιημένου δικτύου αξιοποιώντας έτσι στο έπακρο τις δυνατότητες που αυτό προσφέρει.

Επίσης εισάγεται ένας νέος αλγόριθμος που έχει ως στόχο τη βέλτιστη κατανομή των υπολογιστικών πόρων μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα. Η τεχνική που προτείνεται βασίζεται στη μέθοδο βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών (*Ant Colony Optimization, ACO*). Ο νέος αλγόριθμος που παρουσιάζεται ανήκει στην κατηγορία ACO μιμούμενος τη συλλογική συμπεριφορά που εμφανίζουν τα μυρμηγκία κατά την αναζήτηση και συγκομιδή τροφής επιτυγχάνοντας έτσι τη βέλτιστη κατανομή πόρων και εξισορρόπηση φόρτου μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα. Επιπλέον, στα πλαίσια της διατριβής αναπτύσσεται η ευελιξία της υποδομής βασισμένη σε σχεδιασμένες δικτυακές αρχιτεκτονικές και εφαρμογές που αξιολογούνται σε προσομοιώσεις ειδικών καταστάσεων μετατρέποντας το υπολογιστικό πλέγμα σε ένα ευέλικτο, ευπροσάρμοστο και απαραίτητο εργαλείο για την ανάλυση επιστημονικών μετρήσεων.

Η καινοτομία της υποδομής έγκειται στο ότι αντεπεξέρχεται προσαρμοζόμενη επιτυχώς σε κάθε εφαρμογή για την επίλυση προβλημάτων σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία όπου τα συμβατικά μετρικά συστήματα κρίνονται ανεπαρκή. Γεγονός που καθιστά επιτακτική την χρήση του δικτύου πλέγματος σε εφαρμογές ιατρικών πληροφοριακών συστημάτων, σε συστήματα προστασίας περιβάλλοντος και πρόγνωσης σεισμών που σκοπό έχουν την ταχεία λήψη αποφάσεων. Συνεπώς, το προτεινόμενο ενοποιημένο περιβάλλον επεκτείνει τις δυνατότητες που παρέχονται από τη χρήση υποδομών πλέγματος με το να υποστηρίζει τη συνεχή διεξαγωγή μετρήσεων, καταγραφών, επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Οι υπηρεσίες που υλοποιήθηκαν και ενσωματώθηκαν στο ενοποιημένο πρωτότυπο δίκτυο πλέγματος επιβεβαιώθηκαν μέσα από προσομοιώσεις και πραγματικές διατάξεις χρήσης για κάθε εφαρμογή χωριστά. Τέλος, αναλύονται οι πειραματικές διατάξεις, τα πεδία εφαρμογών και τα σενάρια δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις αξιολογώντας ταυτόχρονα την υφιστάμενη υποδομή που σχεδιάστηκε, στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, για κάθε περίπτωση χωριστά.

1. Εισαγωγή

1.1 Το Τεχνολογικό Πλαίσιο

Η ραγδαία εξέλιξη που σημειώθηκε την τελευταία δεκαετία στον τομέα των παράλληλων και καταναμημένων συστημάτων αποτέλεσε τη γενεσιουργό αιτία των δικτύων πλέγματος (*grid computing*). Η αμείωτη ζήτηση των συνεχώς αυξανόμενων χρηστών που απαιτούσαν όλο και περισσότερους υπολογιστικούς πόρους για την επίλυση πολύπλοκων υπολογιστικών προβλημάτων τους ανάγκασε να αναζητήσουν λύση στα συστήματα πλέγματος, γνωστά ως “Grids”. Το κίνητρο ήταν η συνεχής απαίτηση της επιστημονικής κοινότητας και των χρηστών για άφθονη επεξεργαστική ισχύ καθώς και για ανεξάντλητους αποθηκευτικούς πόρους, γεγονός που υποβοηθήθηκε κυρίως από την συνεχή αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και από εφαρμογές που είχαν υψηλές απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ.

Η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος ή δικτύων καταναμημένης υπερυπολογιστικής ισχύος (*grid*) παρουσιάζει μία αποκεντριοποιημένη δομή που βασίζεται στην αρχιτεκτονική του διαμοιρασμού των πόρων μεταξύ διασυνδεδεμένων ετερογενών συστημάτων. Μέσω αυτής της αρχιτεκτονικής, οι εφαρμογές και τα ετερογενή συστήματα δύναται να διαμοιράζονται με διαφάνεια υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους, συσκευές και υπηρεσίες δημιουργώντας έτσι ένα εικονικό ενοποιημένο σύστημα. Σε επίπεδο αρχιτεκτονικής, τα κύρια πλεονεκτήματα μίας υποδομής πλέγματος σχετίζονται με την ετερογένεια των διαμοιραζόμενων πόρων που δύναται να έχουν υλοποιηθεί σε διαφορετικές πλατφόρμες, αρχιτεκτονικές υλικού–λογισμικού, γλώσσες προγραμματισμού και να ανήκουν σε διαφορετικούς διαχειριστικούς τομείς (*administrative domains*) που βρίσκονται σε απομακρυσμένες γεωγραφικές τοποθεσίες.

Σαν κύριο στόχο ένα δίκτυο πλέγματος έχει τη συλλογή, συνάθροιση και το διαμοιρασμό των πόρων από γεωγραφικά απομακρυσμένους αυτόνομους πόρους που πραγματοποιείται εν ώρα εκτέλεσης της υποβαλλόμενης εργασίας στο δίκτυο με βάση την διαθεσιμότητα, την χωρητικότητα, την απόδοση, τους πόρους και τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών. Ένας απλουστευμένος ορισμός που παρέχεται περιγράφοντας την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος είναι ο εξής: “*Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός υπολογιστικού πλέγματος είναι ότι οι πόροι του δεν διαχειρίζονται τοπικά, χρησιμοποιούνται ανοικτά πρότυπα καθώς επιτυγχάνεται σημαντική ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών [1]*”.

Για περίπου μία δεκαετία αναπτύσσονται εφαρμογές που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα πλέγματος υποστηρίζουν τις ιδιαίτερες ανάγκες των χρηστών ή ομάδες χρηστών με κοινά ενδιαφέροντα δημιουργώντας έτσι εξατομικευμένες υποδομές. Παρόλο που συνεχώς αυξάνεται η χρήση των δικτύων πλέγματος σε όλες τις επιστήμες, τα στοιχεία δείχνουν ότι δεν αξιοποιείται πλήρως αυτή η τεχνολογία ούτε και οι δικτυακές υποδομές της [2]. Η εξατομίκευση μίας υποδομής πλέγματος από μία ομάδα χρηστών και η αποκλειστική χρήσης της για την επίλυση ενός και μόνο επιστημονικού προβλήματος έχει σαν συνέπεια την περιορισμένη εκμετάλλευση των πόρων του δικτύου. Γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με τον πρωταρχικό στόχο των

δικτύων πλέγματος που ήταν η δημιουργία μίας ενοποιημένης παγκόσμιας υποδομής που θα παρείχε στους χρήστες της υπολογιστική ισχύ κατά απαίτηση (*computing power on demand*) [3].

Μέχρι σήμερα διάφορες ομάδες εργασίας έχουν πραγματοποιήσει προσπάθειες για μία ενοποιημένη υποδομή αλλά η ανάγκη για δημιουργία νέων μηχανισμών και τεχνικών διαλειτουργικότητας, βέλτιστης κατανομής και εντοπισμού πόρων είναι ακόμη εμφανή [4]. Ωστόσο, στο χώρο της επιστήμης των υπολογιστών, συγκεκριμένα των δικτύων, η διάδοση και εφαρμογή των δικτύων πλέγματος σε ενοποιημένες και συγκλίνουσες υπολογιστικές υποδομές τείνει να είναι καθολική. Παρατηρείται μία τάση σύγκλισης των υποδομών πλέγματος με άλλα δίκτυα, όπως τα δίκτυα ομότιμων κόμβων (*peer-to-peer, P2P*) και τα δίκτυα υπολογιστικού νέφους (*cloud computing*), δημιουργώντας έτσι ένα νέο ενοποιημένο δίκτυο με αποκεντρωμένη δομή [5] [6] [7]. Η σύγκλιση διαφορετικών δικτυακών τεχνολογιών σε ένα και μόνο δίκτυο αποσκοπεί στη δημιουργία ενός ενοποιημένου και πολυχρηστικού δικτύου που θα παρέχει ολοκληρωμένες υπηρεσίες και εφαρμογές αυξάνοντας τον ανταγωνισμό στην τηλεπικοινωνιακή αγορά [8] [9]. Ταυτόχρονα, το συγκλίνον δίκτυο ενοποιώντας διαφορετικές εφαρμογές και υπηρεσίες σε ένα ενιαίο δίκτυο έχει ως κύριο πλεονέκτημα να επιτρέπει στους χρήστες του να έχουν πρόσβαση όπου κι αν αυτοί βρίσκονται μέσα στο δίκτυο [9].

1.2 Αντικείμενο – Στόχος

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, είναι η επινόηση, ανάπτυξη και μελέτη ενός ενοποιημένου πολύπλοκου δικτύου που βασίζεται στην προσέγγιση της συγκλίνουσας τεχνολογίας παρέχοντας μία ενοποιημένη πολύπλοκη υποδομή που έχει ως βάση την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος, ενώ ταυτόχρονα ενσωματώνει ολοκληρωμένες υπηρεσίες και εφαρμογές λαμβάνοντας υπόψη τις εξατομικευμένες απαιτήσεις του εκάστοτε χρήστη. Η παροχή εξατομικευμένων υπηρεσιών συνίσταται στην ευελιξία, επεκτασιμότητα και προσαρμοστικότητα του πολύπλοκου δικτύου με βάση τις εξατομικευμένες ανάγκες και προτιμήσεις του κάθε χρήστη ξεχωριστά.

Η παρούσα διατριβή έχει ως απώτερο στόχο την ανάπτυξη μίας ενοποιημένης, ομογενοποιημένης και βελτιστοποιημένης πολύπλοκης δικτυακής υποδομής που θα είναι σε θέση να παρέχει ανεξάντλητη υπολογιστική και αποθηκευτική ισχύ στους χρήστες της οπουδήποτε κι αν βρίσκονται μέσα στο δίκτυο. Έτσι, γίνονται καινοτόμες προτάσεις για την εισαγωγή νέων μηχανισμών και τεχνικών με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση του ενοποιημένου πολύπλοκου δικτύου ώστε να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητά του επιλύοντας πλήρως οποιοδήποτε περιορισμό προκαλεί η ετερογένεια των διαφορετικών δικτυακών πόρων μέσα στο νέο ενοποιημένο περιβάλλον.

Επιπλέον, στόχος της διατριβής μέσω των νέων μηχανισμών και τεχνικών που αναπτύσσονται είναι να αναθεωρήσει τον τρόπο διαμοιρασμού των υπολογιστικών πόρων μέσα στο πλέγμα, επιτυγχάνοντας την αύξηση της συνολικής υπολογιστικής ικανότητας και την ενσωμάτωση νέων υπηρεσιών μέσα στο ενοποιημένο περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψη το σκοπό που προορίζεται η εκάστοτε υποδομή πλέγματος και

δίχως να παραμερίζονται οι εξατομικευμένες ανάγκες των χρηστών. Σαν συνέπεια αυτού, εξετάζονται οι τεχνικές διαδικτύωσης και διαμοιρασμού πόρων μέσα στα δίκτυα πλέγματος ενώ παρουσιάζεται ένας νέος αλγόριθμος βελτιστοποίησης ACO βασισμένος στις αποικίες μυρμηγκιών, επιτυγχάνοντας την βέλτιστη κατανομή των πόρων ως προς τις υποβαλλόμενες εργασίες με σκοπό την εξισορρόπηση φόρτου μέσα στο δίκτυο πλέγματος.

Πέραν των προτεινόμενων τεχνικών και μηχανισμών διαδικτύωσης που εξετάζονται, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκαν σε επίπεδο λογισμικού διάφορες εφαρμογές που στόχο έχουν να υποστηρίξουν αλλά και να επιβεβαιώσουν τη διαλειτουργικότητα της υποδομής πλέγματος. Οι εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στοχεύουν στο να εισάγουν και να αποδείξουν τη χρησιμότητα της πλεγματικής τεχνολογίας σε ποικίλα επιστημονικά πεδία πέραν της επιστήμης των υπολογιστών.

Τέλος, η αξιολόγηση των προτεινόμενων μηχανισμών και των τεχνικών βασίζονται σε προσομοιώσεις και σε πραγματικά σενάρια χρήσης της πολύπλοκης υποδομής, ενώ εξετάζονται και συγκρίνονται πειραματικά με σκοπό την επαλήθευση της διαλειτουργικότητας της υποδομής.

1.3 Συνεισφορά

Η διατριβή προτείνει ουσιαστικές προσεγγίσεις σε μείζονα θέματα των πολύπλοκων δικτύων. Δεδομένης της πολυπλοκότητας του αντικειμένου, προτείνονται σημαντικές καινοτομίες με σκοπό την διαλειτουργικότητα, εισαγωγή και εφαρμογή της πλεγματικής τεχνολογίας στις ασύρματες τεχνολογίες σε ποικίλα επιστημονικά πεδία πέραν της επιστήμης των υπολογιστών. Κύριος στόχος είναι η καθολική αποδοχή και χρήση των πολύπλοκων δικτύων σε ποικίλα επιστημονικά πεδία με σκοπό την πλήρωση των επιτακτικών αναγκών για διασυνδεδεμένες υποδομές με ανεξάντλητους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους. Επιπλέον, μέσω της εφαρμογής των πολύπλοκων δικτύων στις ήδη υπάρχουσες δικτυακές υποδομές και σε άλλα επιστημονικά πεδία επιτυγχάνεται μόχλευση των ωφελειών που αυτά προσφέρουν.

Βασισμένη στους ανωτέρω στόχους, οι καινοτομίες της διατριβής παρουσιάζονται συνοπτικά στους παρακάτω κύριους άξονες:

- Προτείνει την εφαρμογή της τεχνολογίας που ενσωματώνουν τα πολύπλοκα δίκτυα σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία πέραν της επιστήμης των υπολογιστών. Θέτοντας έτσι ως βάση τα δίκτυα πλέγματος, πραγματοποιείται εξατομίκευση της υποδομής για κάθε ανάγκη ξεχωριστά λαμβάνοντας πάντα ως επίκεντρο τις ιδιαίτερες ανάγκες του χρήστη ενώ ταυτόχρονα αξιολογείται το προτεινόμενο πλαίσιο ως προς τη συνεισφορά του σε ποικίλα επιστημονικά πεδία και στην επίλυση πολύπλοκων επιστημονικών προβλημάτων ή υπολογισμών. Επιπλέον, εφαρμόζεται στην ιατρική επιστήμη και στην γεωεπιστήμη, αποδεικνύοντας τη χρηστικότητά του σε κάθε επιστημονικό πεδίο ξεχωριστά. Οι λύσεις που δίδονται από τις εκάστοτε αναπτυσσόμενες εφαρμογές βασίζονται σε ανοιχτές τεχνολογίες, τεχνολογίες XML και πρότυπα αμιγώς παραμετροποιήσιμα. Επίσης, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης εφαρμογής είναι ότι παρέχεται ενιαία διεπαφή για όλες σχεδόν τις

εφαρμογές, υπηρεσίες προάγοντας την διαλειτουργικότητα και διευκολύνοντας την ενσωμάτωση διαφόρων εφαρμογών στο σύστημα.

- Προτείνει μία καινοτόμο αρχιτεκτονική σχεδιασμού διαδικτύωσης ενός πολύπλοκου δικτύου που έχει ως βάση το υπολογιστικό πλέγμα και τις τεχνολογίες ασυρμάτου μέσου. Σκοπός αυτού είναι να προσδώσει επιπλέον χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα στο δίκτυο πλέγματος που αρχικά είτε δεν διέθετε είτε είχε περιορισμένες δυνατότητες. Τέτοια χαρακτηριστικά σχετίζονται με την επεκτασιμότητα, κλιμακωσιμότητα, προσαρμοστικότητα, ευελιξία, διαθεσιμότητα και κινητικότητα. Επιτυγχάνοντας έτσι το ενοποιημένο δίκτυο να έχει υβριδική δομή ευνοώντας τη χρήση αμφίδρομων υπηρεσιών και εφαρμογών που αρχικά είτε δεν ήταν διαθέσιμες είτε δεν ήταν διαλειτουργικές.
- Προτείνει τη χρήση και τη σύγκλιση με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, με στόχο τη λήψη και καταγραφή μεγάλου όγκου μετρήσεων όπου η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται σε πραγματικό χρόνο και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική και αποθηκευτική ισχύ. Γεγονός που είναι ανέφικτο στα δίκτυα αισθητήρων ένεκα των περιορισμένων πόρων τους, ενώ το δίκτυο πλέγματος αδυνατεί να λαμβάνει μετρήσεις από το φυσικό περιβάλλον και από απομακρυσμένους ασύρματους πόρους.
- Προτείνει ένα πλαίσιο που σκοπό έχει να καλύψει τις ανάγκες διασύνδεσης και διαλειτουργικότητας που δημιουργούνται από την ετερογένεια του νέου ενοποιημένου δικτύου. Προκειμένου να ξεπερασθεί το πρόβλημα της διαλειτουργικότητας, εισάγεται μία νέα τεχνική προσέγγιση που βασίζεται σε διακομιστές μεσολάβησης (*proxy servers*). Σκοπός αυτού είναι η εξασφάλιση της ομοιογένειας μέσα στο νέο πολύπλοκο δικτυακό περιβάλλον αποκρύπτοντας οποιαδήποτε ασυμβατότητα υλικού (*hardware*) ή λογισμικού (*software*) που υπάρχει παρέχοντας έτσι στον χρήστη την έννοια μίας ολοκληρωμένης υποδομής.
- Προτείνει αρχιτεκτονικές σύγκλισης ενδυναμώνοντας τον διαμοιρασμό πόρων μέσα σε ένα ολοκληρωμένο δυναμικό περιβάλλον που έχει σαν δίκτυο κορμού (*backbone*) το υπολογιστικό πλέγμα. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί πύλες δικτύου (*gateways*) για την πρόσβαση στους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους του διασυνδεδεμένου δικτύου πλέγματος, δημιουργώντας ένα ενοποιημένο πλαίσιο παροχής και διαμοιρασμού πόρων οπουδήποτε μέσα στο ενοποιημένο δίκτυο.
- Προτείνει έναν ACO αλγόριθμο που βασίζεται στη μιμητική συμπεριφορά των αποικιών που σχηματίζουν τα μυρμήγκια. Σκοπός του είναι να επιλύει συνεχή προβλήματα χρονοδρομολόγησης και κατανομής των διαμοιραζόμενων πόρων που εμφανίζονται μέσα στο πολύπλοκο δίκτυο επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα εξισορρόπηση φόρτου μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα. Επίσης, πραγματοποιείται σύγκριση με τους ήδη χρησιμοποιούμενους αλγορίθμους με στόχο να μετρηθεί η αποδοτικότητά του.

1.4 Διάθρωση της Διατριβής

Ο πυρήνας των κεφαλαίων προέρχεται από ποικίλες ερευνητικές εργασίες που έχουν δημοσιευθεί κατά την διάρκεια της ενασχόλησης με το ερευνητικό αντικείμενο των πολύπλοκων δικτύων στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Η διατριβή απαρτίζεται από 6 κεφάλαια που διαρθρώνονται ως εξής:

Στο **1ο Κεφάλαιο** της διατριβής, διατυπώνεται με σαφήνεια το αντικείμενό της, περιγράφεται η δομή της και παρουσιάζονται οι καινοτομίες τις οποίες εισάγει η διατριβή.

Στο **2ο Κεφάλαιο** γίνεται μία επισκόπηση της τεχνολογίας των δικτύων υπολογιστικού πλέγματος τα οποία βρίσκονται και στο επίκεντρο της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής. Παρουσιάζονται οι στόχοι των δικτύων πλέγματος, μερικές εφαρμογές τους και οι κυριότερες αρχιτεκτονικές τους.

Στο **3ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται μία τεχνική βέλτιστης κατανομής των υπολογιστικών πόρων μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα. Αναλύεται η μεθοδολογία βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών. Προτείνεται και αξιολογείται ένας μιμητικός αλγόριθμος που ανήκει στους ACO αλγόριθμους βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών (*Ant Colony Optimization, ACO*). Ως στόχο έχει τη βελτιστοποίηση του δικτύου δια μέσου του χρονοπρογραμματισμού και ανάθεσης εργασιών (*job scheduling and assignment*) ώστε να επιλυθούν προβλήματα που σχετίζονται με την κατανομή πόρων, στοχεύοντας ταυτόχρονα στην εξισορρόπηση του συνολικού φόρτου μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα. Επίσης αναπτύσσεται συγκριτική μελέτη ως προς την αποτελεσματικότητά του σε σχέση με τους χρησιμοποιούμενους μέχρι στιγμής αλγόριθμους.

Στο **4ο Κεφάλαιο** υιοθετείται η προσέγγιση ενός πολύπλοκου δικτύου που αποτελείται από ένα ενοποιημένο δίκτυο αισθητήρων με υπολογιστικό πλέγμα, όπου αυτή εν συνεχεία εφαρμόζεται μέσα σε ένα Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα (*Geographic Information System, GIS*) που αναπτύχθηκε για αυτόν το σκοπό. Η εισαγωγή της πλεγματικής τεχνολογίας στα GIS συστήματα έχει ως σκοπό τη δημιουργία ενός ενοποιημένου δικτύου που θα είναι ικανό να αναλύει, αποθηκεύει, επεξεργάζεται και να λαμβάνει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο από το γεωγραφικά διεσπαρμένο δίκτυο αισθητήρων με απώτερο στόχο την προστασία του περιβάλλοντος. Η συλλογή, αποθήκευση, διανομή, ανάκτηση, ανάλυση και απεικόνιση των γεωγραφικά συσχετισμένων πληροφοριών που πραγματοποιείται από τα επιμέρους δίκτυα αισθητήρων γίνεται με τη χρήση μίας εφαρμογής γραφικού περιβάλλοντος (*Graphical User Interface, GUI*) που αναπτύχθηκε για το συγκεκριμένο σκοπό, εξυπηρετώντας ταυτόχρονα την απρόσκοπτη παρακολούθηση (*monitoring*) και το συντονισμό των κατανεμημένων πόρων μέσα στην ενοποιημένη υποδομή σε πραγματικό χρόνο.

Στο **5ο Κεφάλαιο** παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική σχεδιασμού και διαδικτύωσης του υπολογιστικού πλέγματος με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (*Wireless Sensors Networks, WSNs*). Το παρόν κεφάλαιο προτείνει μία ολοκληρωμένη πρωτότυπη πλατφόρμα SEGEDMA (*SEnsor Grid Enhancement Data Management*), η οποία αναπτύσσει ένα συγκλίνον δίκτυο πλέγματος που εμπεριέχει ένα σύστημα από κόμβους του ασύρματου δικτύου αισθητήρων που είναι διασυνδεδεμένοι με το δίκτυο πλέγματος παρέχοντας έτσι πλήρη κάλυψη και πρόσβαση σε ανεπτυγμένες ιατρικές υπηρεσίες μέσα σε περιβάλλον διάχυτου υπολογισμού. Πρόκειται για μία πλατφόρμα που στόχο έχει την παρακολούθηση (*monitoring*) ασθενών,

επεξεργασία, ανάλυση, καταγραφή ιατρικών αρχείων και περιστατικών σε πραγματικό χρόνο (*real-time*). Επίσης, προτείνεται η σύγκλιση του ενοποιημένου δικτύου πλέγματος με αισθητήρες με τα κατά τόπους διασυνδεδεμένα ιατρικά πληροφοριακά συστήματα με σκοπό την περαιτέρω επέκταση και παροχή επιπλέον υπηρεσιών στο ενοποιημένο δίκτυο ενώ παρουσιάζονται επιλεγμένες υπηρεσίες πιλοτικής εφαρμογής.

Στο **6ο Κεφάλαιο** ανακεφαλαιώνονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και αναφέρονται οι μελλοντικές επεκτάσεις που δημιουργούν νέα πεδία για περαιτέρω έρευνα στον τομέα των πολύπλοκων δικτύων.

1.5 Αναφορές

- [1] I. Foster, “*What is the Grid? A Three Point Checklist*”, Argonne National Laboratory, University of Chicago, USA, Retrieved from: <http://www.mcs.anl.gov/~itf/Articles/WhatIsTheGrid.pdf>, 2002
- [2] A. Iosup, D. H. J. Epema, T. Tannenbaum, M. Farrellee, M. Livny, “*Inter-operating Grids through delegated matchmaking*”, In Proc. of ACM/IEEE Conference on Supercomputing (SC 2007), pp. 1–12, New York, USA. ACM Press, 2007
- [3] I. Foster, C. Kesselman, “*The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure*”. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1999
- [4] B. Boghosian, P. Coveney, S. Dong, L. J. S. Finn, G. E. Karniadakis, N. T. Karonis, “*Nektar, SPICE and Vortronics: Using Federated Grids for Large Scale Scientific Applications*”, In Proc. of IEEE Workshop on Challenges of Large Applications in Distributed Environments (CLADE), pp. 34–42, IEEE Computer Society, Paris, France, 2006
- [5] I. Foster, A. Iamnitchi, “*On Death, Taxes, and the Convergence of Peer-to-Peer and Grid Computing*”, Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol. 2753, pp. 118–128, 2003
- [6] P. Rost, R. Boutaba, K. Doppler, A. Gumaste, “*Recent Advances in Network Convergence*”, Journal of Computer Networks, vol. 55, pp. 1455–1458, 2011
- [7] W. C. Chung, C. J. Hsu, Y. H. Lin, K. C. Lai, Y. C. Chung, “*G2G: A Meta-Grid Framework for the Convergence of P2P and Grids*”, International Journal of Grid and High Performance Computing, vol. 2(3), pp. 1–16, 2010.
- [8] C. White, “*Data Communications and Computer Networks: A Business User's Approach*”, Course Technology 6th Ed., U.S.A, 2010
- [9] Cisco Systems Inc., Retrieved from: <http://www.cisco.com>

2. Δίκτυα Πλέγματος

2.1 Εισαγωγή

Στην εποχή μας είναι γεγονός ότι υπάρχει συνεχής αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, η αυξανόμενη χρήση υπολογιστών και η ευρεία διάδοση του Διαδικτύου έχει οδηγήσει την τηλεπικοινωνιακή αγορά στην αναζήτηση νέων και πιο αποδοτικών υπολογιστικών πόρων. Αυτό το γεγονός αποτέλεσε κίνητρο για την ερευνητική κοινότητα και για τις επιχειρήσεις να στραφούν στη δημιουργία μη τετριμμένων πολύπλοκων δικτυακών υποδομών όπως είναι η τεχνολογία πλέγματος (*grid computing*).

Σε επίπεδο χρηστών υπάρχει συνεχής αναζήτηση περισσότερων υπολογιστικών πόρων για την επίλυση προβλημάτων που απαιτούν πολύπλοκους υπολογισμούς. Παρατηρείται όμως το εξής φαινόμενο ότι η μεμονωμένη χρήση υπολογιστών έχει ως αποτέλεσμα την υπερφόρτωση του συστήματος, την επανεκκίνησή του σε κάποιες περιπτώσεις αλλά και την μακρόχρονη εκτέλεση πολύπλοκων υπολογισμών που ενδέχεται να διαρκέσουν μέρες ή ακόμα και εβδομάδες μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την παραγωγικότητα. Είναι προφανές ότι οι χρήστες οφείλουν να εστιάσουν όχι μόνο στη διαθεσιμότητα των υπολογιστικών πόρων αλλά και στην αρχιτεκτονική σχεδίαση συστημάτων που συντελούν στην βελτίωση της παραγωγικότητας.

Σε επίπεδο επιχειρήσεων, δεν υφίσταται επιχείρηση η οποία να μην υπόκειται σε περιορισμούς υπολογιστικών πόρων. Το κόστος αυτών των πόρων αποτελεί κρίσιμη προτεραιότητα και κάθε επιχειρηματικός οργανισμός θα πρέπει να φροντίζει την βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων του. Βέβαια, εκτός από το κόστος αναβάθμισης υλικού (*hardware*) το οποίο θα υποστηρίξει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος, οι διαχειριστές συστημάτων θα πρέπει να λάβουν υπόψη τους ότι πρέπει υπάρχει ενιαία δομή λογισμικού και υλικού ανεξάρτητα από το κάθε σύστημα. Ένα τέτοιο σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να διαχειρίζεται δυναμικά το φόρτο εργασίας που υπάρχει μέσα στο δίκτυο, γεγονός που είναι πλέον εφικτό με τη χρήση της τεχνολογίας των δικτύων πλέγματος (*grid computing*).

Ως εκ τούτου, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία συνεχόμενη αύξηση του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας σε θέματα τα οποία αφορούν την ανάπτυξη και επέκταση των δικτύων πλέγματος σε ποικίλα επιστημονικά πεδία και εφαρμογές. Η τάση αυτή οφείλεται στα σημαντικά πλεονεκτήματα που εμφανίζουν αυτού του τύπου τα δίκτυα με κυριότερα να είναι η διάθεση απεριόριστων υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων, η επιτακτική τους χρήση σε σύνθετες και υπολογιστικά απαιτητικές εφαρμογές, ο διαμοιρασμός πόρων σε πολλαπλούς χρήστες διαφορετικών κοινοτήτων με ετερογενή πεδία εφαρμογών και ποικίλη γεωγραφική κατανομή, εξασφάλιση αξιόπιστων υπηρεσιών που προσφέρουν συνεχή και προβλεπόμενη απόδοση στους χρήστες, ασφαλής και καθολική πρόσβαση μέσω της χρήσης μεσισμικού (*middleware*) με έμφαση στο λογισμικό ανοικτού κώδικα (*open source*). Για τους ίδιους λόγους παρατηρείται παράλληλα και αύξηση της εμπορικής εκμετάλλευσης εφαρμογών οι οποίες στηρίζονται στα δίκτυα πλέγματος.

Παρόλα τα πλεονεκτήματά τους όμως, τα δίκτυα αυτά παρουσιάζουν και σημαντικές ερευνητικές προκλήσεις οι οποίες οφείλονται κατά κύριο λόγο στην πολυπλοκότητα της δομής τους. Μερικά κύρια ζητήματα που αναδύονται με τη χρήση των δικτύων πλέγματος σχετίζονται: (i) Με τον αποτελεσματικό σχεδιασμό αρχιτεκτονικών που υποστηρίζουν τη διαλειτουργικότητα μέσα στο κατανεμημένο δίκτυο, (ii) Την ανάγκη δημιουργίας νέων μηχανισμών και τεχνικών διαχείρισης των διαθέσιμων πλεγματικών πόρων που στόχο έχουν τη βέλτιστη αξιοποίησή τους και (iii) Τη δημιουργία μίας ευέλικτης πλεγματικής υποδομής που θα προωθεί τη χρήση και εφαρμογή αυτής σε ποικίλα επιστημονικά πεδία και εφαρμογές. Τα προαναφερθέντα ζητήματα θα βρεθούν στο επίκεντρο της παρούσας διατριβής.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή στα δίκτυα πλέγματος και δίνεται ο ορισμός τους. Επίσης παρουσιάζεται μία επισκόπηση της κύριας αρχιτεκτονικής δομής τους, οι δυνατότητές τους καθώς και οι κυριότερες εφαρμογές τους.

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Το ιστορικό των τεχνολογιών διασύνδεσης των υπολογιστών αρχίζει στις αρχές της δεκαετίας του 1970 στην Αμερική από την ερευνητική ομάδα ARPA (*Advanced Research Projects Agency*) που είχε δημιουργηθεί από την αμερικανική κυβέρνηση για στρατιωτικούς σκοπούς. Από αυτήν την ομάδα αναπτύχθηκαν πολλά σημαντικά πρωτόκολλα και δικτυακές τεχνολογίες όπως το Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης και το Πρωτόκολλο Διαδικτύου TCP/IP (*Transmission Control Protocol/ Internet Protocol*). Υπό την καθοδήγηση και συμβολή ερευνητών από διάφορα πανεπιστήμια η έρευνα κατέληξε στη δημιουργία του πρώτου δικτύου υπολογιστών, προάγγελο του Διαδικτύου, γνωστό ως ARPANET, με ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων στα 50 kbps. Η ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα των δικτύων υπολογιστών συνεχίστηκε, με αποτέλεσμα την δημιουργία του NSFNET (*National Science Foundation Network*) δικτύου στα 56Kbps που συνέδεε τα πέντε NSF κέντρα υπερ-υπολογιστών.

Ως συνέχεια και εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών δύναται να θεωρηθεί το πρόγραμμα Condor [1] του πανεπιστημίου του Wisconsin της Αμερικής. Το σύστημα αυτό είναι ένας “διαχειριστής φόρτου εργασίας” (*workload manager*), με δυνατότητες παρακολούθησης και διαχείρισης πόρων, και δρομολόγησης εργασιών ενώ αποτελεί το πρώτο πρόγραμμα με κατεύθυνση προς την αξιοποίηση των υπηρεσιών δικτύου πλέγματος (*Grid*).

Το αρχικό όραμα του *Grid* είχε ως στόχο τη δημιουργία ενός πανίσχυρου υπολογιστικού πλέγματος το οποίο θα αποτελούνταν από πολλά μικρότερα υπολογιστικά πλέγματα διασυνδεδεμένα μεταξύ τους, συνθέτοντας ένα παγκόσμιο πλεγματικό δίκτυο υπολογιστών το οποίο δύναται να λειτουργήσει ως ένας τεράστιος υπολογιστικός πόρος. Αν και μέχρι στιγμής απέχουμε από το αρχικό όραμα, πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχουν ήδη εκατοντάδες υπολογιστικά πλέγματα παγκοσμίως και κάθε ένα από αυτά έχει δημιουργηθεί για να υποστηρίξει μία συγκεκριμένη ομάδα ερευνητών ή μία συγκεκριμένη ομάδα χρηστών. Ταυτόχρονα

όμως υπάρχει αμείωτο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας που εργάζεται σε παγκόσμιο επίπεδο για την επίτευξη του συγκεκριμένου σκοπού.

Η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος προέκυψε από το συνδυασμό μίας σειράς υπαρχόντων τεχνολογιών. Η ανάπτυξη της πλεγματικής τεχνολογίας βασίστηκε κυρίως στις τεχνολογίες των κατανεμημένων συστημάτων (*distributed computing*), στην τεχνολογία κρυπτογραφίας και ασφάλειας, και στην τεχνολογία εικονικοποίησης (*virtualization technology*). Ωστόσο, τεράστια συνεισφορά στην ανάπτυξη των δικτύων πλέγματος είχε ο Παγκόσμιος Ιστός (*World Wide Web*), διότι δίχως αυτόν η σύνδεση των γεωγραφικά διασκορπισμένων συστημάτων, τα οποία αποτελούν τη βάση του Grid θα ήταν αδύνατη. Επίσης βασικό ρόλο στην ανάπτυξη του Grid άσκησε το λειτουργικό σύστημα Linux που είναι και το προτιμώμενο για πολλά πειράματα μεγάλων ερευνητικών έργων. Επιπλέον, η γλώσσα προγραμματισμού *Java* συνέβαλε στην ανάπτυξη των δικτύων πλέγματος καθώς επιτρέπει την αποδοτική ανάπτυξη εφαρμογών που πρόκειται να εκτελεστούν σε ένα τέτοιο δυναμικό περιβάλλον. Είναι εξαιρετικά προσαρμοσμένη στη φιλοσοφία της συγκεκριμένης τεχνολογίας και για αυτόν το λόγο η πλειονότητα των εφαρμογών που αναπτύσσονται για τα δίκτυα πλέγματος είναι βασισμένες στη συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού.

Παρόλο που η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος προέκυψε από το συνδυασμό των παραπάνω τεχνολογιών, η χρήση του τα τελευταία χρόνια είναι πολλαπλάσια σε σχέση με τη χρήση του αμέσως μετά την εμφάνιση των παραπάνω τεχνολογιών. Ο λόγος είναι ότι τα τελευταία χρόνια είχαμε ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών μονάδων, αύξηση των τρόπων και της ποιότητας επικοινωνίας η οποία είναι απαραίτητη για τη συνεργασία μεταξύ των χρηστών που εκτελούν εργασίες σε πολύπλοκα υπολογιστικά συστήματα και κυρίως η αύξηση της ταχύτητας των δικτύων υπολογιστών και η ευκολότερη πρόσβαση σε αυτά.

Η εξάλειψη της γεωγραφικής απόστασης η οποία εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του δικτύου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για την εύρυθμη λειτουργία μίας τέτοιου τύπου δικτυακής τεχνολογίας. Για να έχει νόημα η χρήση του υπολογιστικού πλέγματος για την εκτέλεση εργασιών απαιτούνται δίκτυα υψηλών ταχυτήτων για τη διασύνδεση των κατανεμημένων πόρων. Έτσι, η μεταφορά των δεδομένων είναι ταχύτατη και επιπλέον η καθυστέρηση στην επικοινωνία ελάχιστη, πράγμα που ευνοεί την συνεργασία σε πραγματικό χρόνο. Σε περίπτωση που η ταχύτητα δικτύου είναι περιορισμένη ή χαμηλή, έχουμε αυξημένο χρόνο μεταφοράς δεδομένων, με συνέπεια η εκτέλεση εργασιών σε απομακρυσμένους υπολογιστικούς πόρους να μην είναι αποτελεσματική.

Η ανάπτυξη δικτύων υψηλών ταχυτήτων και η ανάγκη για μεγάλη επεξεργαστική ισχύ οδήγησε σε έντονη ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα των τεχνολογιών δικτύων πλέγματος. Η έρευνα αυτή κατέληξε σε ενδιαφέροντα αποτελέσματα με σημαντικά προγράμματα τα: LEGION [2], SRB (*Storage Resource Broker*) [3], Globus [4]. Το πρώτο βασίζεται στην ιδέα του εικονικού υπολογιστή (*virtual computer*), όπου όλοι οι πόροι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και εμφανίζονται στον χρήστη ως μία εικονική μηχανή (*virtual machine*). Τα κύρια μειονεκτήματα όμως αυτής της προσέγγισης ήταν η πολύπλοκη υλοποίηση σε σχέση με την μικρή αποδοτικότητα που είχε. Το SRB [3] αποτέλεσε μία πλατφόρμα διαχείρισης αποθηκευτικών πόρων που υποβοήθησε αρκετά την ανάπτυξη των τεχνολογιών πλέγματος, αφού αντιμετώπισε επιτυχώς τα

οποιαδήποτε προβλήματα μεταφοράς δεδομένων υπήρχαν μέχρι στιγμής μέσα σε περιβάλλον πλέγματος (*grid*).

Τέλος, το κυρίαρχο και το πιο διαδεδομένο σύστημα διαχείρισης υπηρεσιών είναι το Globus Toolkit [4] και στόχο είχε την επίτευξη της προτυποποίησης των πρωτοκόλλων ασφαλείας, της μεταφοράς δεδομένων, της ανακάλυψης πόρων και της εκτέλεσης εργασιών. Το ενδιάμεσο λογισμικό (*middleware*) στο οποίο βασίζεται η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος παρέχει την αναγκαία διαλειτουργικότητα ώστε να συνεργάζονται τα κατανεμημένα συστήματα σε ένα ομοσπονδιακό περιβάλλον (*federated environment*). Το Globus Toolkit προσφέρει όλες τις εφαρμογές, τα εργαλεία και τις υπηρεσίες για την υλοποίηση ενός συστήματος υπολογιστικού πλέγματος ενώ υποστηρίζεται από την κοινότητα Globus Alliance [4].

2.3 Ορισμός Δικτύων Πλέγματος

Ο όρος “*Grid*” (Πλέγμα) παραπέμπει σε μία γεωγραφικά διασπαρμένη και ετερογενή συλλογή μηχανών διασυνδεδεμένων μέσω ενός ιδιωτικού δικτύου ή του Διαδικτύου οι οποίες παρέχουν στους χρήστες τους ένα σύνολο υπηρεσιών. Συνεπώς, πρόκειται για μία συλλογή ανεξάρτητων υπολογιστών, συνήθως από διαφορετικούς διαχειριστικούς τομείς. Σε όλους εκτελείται ένα κοινό επίπεδο ενδιάμεσου λογισμικού ώστε οι εφαρμογές και οι χρήστες να δύναται να προσπελάζουν όλους τους πόρους με ομοιόμορφο τρόπο. Έτσι ο χρήστης αντιλαμβάνεται την εν λόγω υποδομή σαν έναν ενιαίο εικονικό υπερυπολογιστή στον οποίο υποβάλλει εργασίες προς εκτέλεση χωρίς να ενδιαφέρεται που θα εκτελεστούν καθώς το δίκτυο υποστηρίζει διάφορα είδη πόρων, όπως μονάδες επεξεργασίας, μονάδες αποθήκευσης, λογισμικό και άλλα. Ο διαμοιρασμός των πόρων έχει ως στόχο να βοηθήσει στην ανάπτυξη μίας πληθώρας επιστημονικών εφαρμογών μεγάλης κλίμακας. Οι εφαρμογές αυτές ένεκα του μεγάλου όγκου δεδομένων που χειρίζονται χρειάζονται τεράστια υπολογιστική ισχύ. Ένα δίκτυο πλέγματος έχει τη δυνατότητα να τους παρέχει στους χρήστες του μέσω του διαμοιρασμού των πόρων χιλιάδων υπολογιστών.

Η εισαγωγή για τη δημιουργία υπολογιστικών πλεγμάτων πραγματοποιήθηκε κυρίως από την επιστημονική κοινότητα με σκοπό να δοθεί λύση στο πρόβλημα της εξεύρεσης πόρων υψηλής επεξεργαστικής ισχύος, οι οποίοι είναι απαραίτητοι κυρίως για την διεξαγωγή πολύπλοκων προσομοιώσεων, εφαρμογών με υψηλές απαιτήσεις σε επεξεργαστική ισχύ, και για ανάλυση τεράστιου όγκου δεδομένων που προκύπτουν από διάφορα επιστημονικά πειράματα. Αναφορικά, μερικά από τα σημαντικότερα επιστημονικά πειράματα που έχουν ως βάση τους την πλεγματική τεχνολογία είναι το Large Hardon Collider (*LHC*) του CERN [5], το Grid Physics Network (*GriPhyN*) [6], το NEES (*Network for Earthquake Engineering and Simulation*) [7] και το ευρείας κλίμακας Enabling Grids for E-science (*EGEE*) [8] [9]. Ο επιταχυντής LHC του CERN υπολογίζεται ότι κατά την λειτουργία του παράγει περίπου 15 Petabytes δεδομένων ετησίως, όπου σε αυτά τα δεδομένα έχουν πρόσβαση χιλιάδες επιστήμονες από όλο τον κόσμο, ενώ η ανάλυσή τους πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την υπολογιστική υποδομή που έχει δημιουργηθεί για το συγκεκριμένο σκοπό [10].

Ο όρος “Grid” εμφανίζεται για πρώτη φορά στα μέσα του 1990 με σκοπό να δηλώσει μία προτεινόμενη καταναεμημένη υπολογιστική υποδομή που χρησίμευε σε προηγμένες επιστημονικές και υπολογιστικές εφαρμογές. Η επιλογή του όρου “Grid” εκφύεται ως αναλογία με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος (*electrical power grid*). Η γενική ιδέα βασιζόταν στο ότι η πρόσβαση σε υπολογιστική ισχύ από ένα υπολογιστικό πλέγμα θα είναι τόσο απλή όσο και η πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια από ένα δίκτυο παροχής ηλεκτρικού ρεύματος.

Κατά τη διάρκεια των ετών, από τη γένεση των δικτύων πλέγματος μέχρι σήμερα έχουν προταθεί αρκετοί ορισμοί. Δεδομένου ότι υπάρχει μεγάλος αριθμός προγραμμάτων σε όλο τον κόσμο που ασχολείται με την ανάπτυξη δικτύων πλέγματος για διαφορετικούς σκοπούς σε διάφορα στάδια, οι ορισμοί που έχουν εμφανιστεί είναι πολλοί. Προσπαθώντας να συγκεκριμενοποιήσουμε τον παραπάνω όρο, παρακάτω παραθέτουμε τους εξής επικρατέστερους ορισμούς σχετικά με τον όρο “Grid” (δίκτυα πλέγματος) που έχουν κυριαρχήσει στο χώρο της επιστήμης των υπολογιστών μέχρι τη δεδομένη στιγμή.

Μία υποδομή που κάνει δυνατή την ενσωματωμένη, τη συνεργατική χρήση των δικτύων υπολογιστών, των βάσεων δεδομένων και των επιστημονικών οργάνων που ανήκουν και διοικούνται από πολλούς διαφορετικούς οργανισμούς [4].

Ορίζεται ως η δυνατότητα όπου με τη χρήση ενός συνόλου ανοικτών προτύπων και πρωτοκόλλων, ο χρήστης δύναται να αποκτήσει πρόσβαση σε εφαρμογές και δεδομένα, επεξεργαστική ισχύ, αποθηκευτική ικανότητα και μία απέραντη σειρά άλλων υπολογιστικών πόρων μέσω του Διαδικτύου. Το Grid είναι ένα είδος παράλληλου και καταναεμημένου συστήματος που κάνει δυνατή την συλλογή, συνάθροιση και διαμοιρασμό πόρων, οι οποίοι βρίσκονται διεσπαρμένοι σε πολλαπλές διαχειριστικές περιοχές, με βάση τη διαθεσιμότητα, τη χωρητικότητα, την απόδοση, και το κόστος τους καθώς και με βάση τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών [11].

Τρία χαρακτηριστικά μπορούν να προσδιορίσουν ένα δίκτυο σαν υπολογιστικό πλέγμα. Ότι οι υπολογιστικοί πόροι δεν διαχειρίζονται κεντρικά. Η χρήση ανοικτών προτύπων. Επίτευξη σημαντικής ποιότητας υπηρεσιών [12].

Το υπολογιστικό πλέγμα είναι ένας τύπος παράλληλου και καταναεμημένου συστήματος που κάνει δυνατή την εν ώρα εκτέλεσης συλλογή, συνάθροιση και διαμοιρασμό πόρων από γεωγραφικά απομακρυσμένους αυτόνομους πόρους με βάση τη διαθεσιμότητα, τη χωρητικότητα, την απόδοση, και το κόστος τους καθώς και με βάση τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών των χρηστών [13].

Ως Grid ορίζεται μία υπηρεσία που διαμοιράζει την υπολογιστική ισχύ και την αποθηκευτική ικανότητα διαμέσου του Διαδικτύου [14].

2.4 Επισκόπηση Αρχιτεκτονικής των Δικτύων Πλέγματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, η τεχνολογία υπολογιστικού πλέγματος (*grid*) είναι μία προσέγγιση της σύστασης δυναμικά δομημένων περιβαλλόντων που χρησιμοποιούν διεσπαρμένους γεωγραφικά και οργανωτικά υπολογιστικούς πόρους. Ο όρος υπολογιστικό πλέγμα (*grid*) περιλαμβάνει το σύνολο της υποδομής (υλικό και λογισμικό) και των απαραίτητων υπηρεσιών για τη δημιουργία ενός ενιαίου γεωγραφικά διεσπαρμένου υπερ-υπολογιστικού περιβάλλοντος. Δηλαδή, τα συστήματα τεχνολογιών πλέγματος ακολουθούν τις αρχές των κατανεμημένων συστημάτων, δημιουργώντας εφαρμογές που επεκτείνονται από τα στενά όρια ενός οργανισμού. Οι υπολογιστικοί πόροι (*computing resources*) που συνδυάζουν δύναται να προέρχονται από διαφορετικούς οργανισμούς, τόσο σε επιχειρησιακό όσο και σε διαχειριστικό επίπεδο. Στο **Σχήμα 1** παρουσιάζεται μία επισκόπηση της αρχιτεκτονικής του δικτύου πλέγματος.

Ο διαμοιρασμός των πόρων δεν αφορά μόνο την ανταλλαγή δεδομένων αλλά και την άμεση πρόσβαση σε υπολογιστικές μονάδες, υπηρεσίες, λογισμικό, δεδομένα και άλλους πόρους. Ο διαμοιρασμός θα πρέπει να είναι ελεγχόμενος, με τους παρόχους και τους χρήστες των πόρων μέσα στο δίκτυο πλέγματος να ακολουθούν πρωτόκολλα τα οποία καθορίζουν με σαφήνεια τι πρέπει να μοιραστεί, ποιος επιτρέπεται να διαμοιράσει και ποιες είναι οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται ο διαμοιρασμός. Έτσι η ομαδοποίηση των χρηστών σε Εικονικούς Οργανισμούς (*Virtual Organizations, VO*s), έχει ως σκοπό την υποστήριξη της λειτουργίας εξουσιοδότησής τους.



Σχήμα 1: Επισκόπηση Πλεγματικής Τεχνολογίας

Η ιδέα των εικονικών οργανισμών αποτελεί τη βάση με την οποία δίδονται οι ρόλοι πρόσβασης μέσα στο δίκτυο πλέγματος. Εκτείνονται έξω από τα στενά όρια του οργανισμού και επιτρέπουν την δημιουργία εικονικών οργανισμών-συνόλων (*VO*s) που περιλαμβάνουν χρήστες και πόρους τα οποία αποτελούν μέρος των οργανισμών που συμμετέχουν στο πλέγμα. Επιτρέπουν στους χρήστες τους να διαμοιράζονται τους πόρους με βάση συγκεκριμένες πολιτικές ανά *VO*, μέσω των οποίων επιτρέπεται η δημιουργία εικονικών επιστημονικών κοινοτήτων, οι οποίες χρησιμοποιούν υπολογιστικούς πόρους κατανεμημένους σε όλο τον κόσμο και έχουν κοινούς επιστημονικούς σκοπούς. Έτσι ένας εικονικός οργανισμός αποτελείται από ένα σύνολο χρηστών ή/και ιδρυμάτων που ανήκουν σε διαφορετικούς φυσικούς οργανισμούς και έχουν κοινούς

κανόνες διαμοιρασμού των πόρων [20]. Παραδείγματα των VOs είναι τα όργανα, συσκευές, υπολογιστές που διαθέτουν για την εκτέλεση ενός συνεργατικού πειράματος, όπως π.χ. το πείραμα Compact Muon Solenoid (CMS) [21] του Large Hadron Collider (LHC) του CERN ή επίσης τα μέλη μία κοινοπραξίας που έχουν σκοπό να κατασκευάσουν ένα αεροπλάνο κ.ά. Οι VOs είναι δυνατόν να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους ως προς το σκοπό, την εμβέλεια, το μέγεθος, τη δομή και την κοινωνική τους σύνθεση.

Για να υποστηριχθεί η δημιουργία των VOs πρέπει να δημιουργηθεί μία λογική οντότητα μέσα στην οποία οι πόροι να δύναται ανακάλυψης και διαμοιρασμού, όπως ακριβώς εάν βρισκόντουσαν μέσα σε έναν οργανισμό. Για αυτόν το λόγο τα δίκτυα πλέγματος προσδιορίζουν και παρέχουν ένα σύνολο από συγκεκριμένα πρωτόκολλα, ενδιάμεσο λογισμικό, εργαλεία και υπηρεσίες που έχουν αναπτυχθεί με βάση αυτά τα πρωτόκολλα. Επιπλέον, η διαλειτουργικότητα και η ασφάλεια αποτελούν σημαντικές προϋποθέσεις για την αρχιτεκτονική του δικτύου πλέγματος (*grid*), για τον προφανή λόγο ότι οι καταναμημένοι πόροι προέρχονται από διαφορετικούς διαχειριστικούς τομείς (*administrative domains*), όπου έχουν παγκόσμιες και τοπικές αρχές χρήσης ενώ διαφοροποιούνται σε σχέση με τη διαθεσιμότητα και τις δυνατότητές τους.



Σχήμα 2: Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων Δικτύου Πλέγματος

Τα συστήματα τεχνολογιών πλέγματος παρέχουν πρωτόκολλα και υπηρεσίες σε 5 διαφορετικά επίπεδα [22], όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.

- *Επίπεδο Υποδομής*: Το επίπεδο Υποδομής παρέχει πόρους όπως είναι οι επεξεργαστικές-υπολογιστικές μονάδες (*CPUs*), αποθηκευτικές μονάδες, συσκευές δικτύων κ.τ.λ. που δύναται να διαμοιραστούν οι χρήστες μέσα στο δίκτυο πλέγματος, χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα ανωτέρων επιπέδων. Οι οντότητες στο επίπεδο Υποδομής υλοποιούν τοπικές, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του πόρου, λειτουργίες ως αποτέλεσμα εντολών που προέρχονται από τα υψηλότερα επίπεδα. Συνεπώς υπάρχει μία στενή αλληλεξάρτηση μεταξύ των δυνατοτήτων των πόρων στο επίπεδο Υποδομής και των υπηρεσιών που παρέχονται στα υψηλότερα επίπεδα. Η ύπαρξη πολύπλοκων λειτουργιών στο επίπεδο Υποδομής επιτρέπουν την παροχή εξεζητημένων υπηρεσιών διαμοιρασμού. Έτσι για παράδειγμα οι πόροι με δυνατότητες κράτησης (*reservation*) για μελλοντική χρήση, δίδουν

την δυνατότητα στα υψηλότερα επίπεδα να χρησιμοποιήσουν ομαδικά και να συντονίσουν τους πόρους με τέτοιο τρόπο που θα ήταν αδύνατον χωρίς τις δυνατότητες αυτές.

- *Επίπεδο Συνδεσιμότητας*: Το επίπεδο συνδεσιμότητας καθορίζει βασικά πρωτόκολλα επικοινωνίας και πιστοποίησης ταυτότητας (*authentication*), εργαλεία απαραίτητα για τις συναλλαγές του δικτύου πλέγματος πάνω από ένα δίκτυο δεδομένων. Τα πρωτόκολλα πιστοποίησης ταυτότητας χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες επικοινωνίας παρέχοντας ασφαλής μηχανισμούς με τη χρήση κρυπτογραφίας για την πιστοποίηση της ταυτότητας χρηστών και πόρων. Πιο συγκεκριμένα οι απαιτήσεις επικοινωνίας περιέχουν μηχανισμούς μεταφοράς δεδομένων, δρομολόγησης και ονοματοδοσίας (*addressing*). Για αυτούς τους σκοπούς πολλοί συνδυασμοί πρωτοκόλλων θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ένεκα της ευρείας διάδοσης των πρωτοκόλλων της στοίβας TCP/IP. Η χρήση αυτών των πρωτοκόλλων παρέχει λύση σε οποιουσδήποτε προβληματισμούς αλλά σαφέστατα όμως σε αρκετές συναλλαγές χρησιμοποιείται το GSI (*Grid Security Infrastructure*) πρωτόκολλο [22].
- *Επίπεδο Πόρων*: Το επίπεδο διαμοιρασμού πόρων (*resources*) έχει δημιουργηθεί επάνω από το επίπεδο Συνδεσιμότητας και επιτρέπει στον πιστοποιημένο χρήστη να χειριστεί τους απομακρυσμένους πόρους του δικτύου και τις υπηρεσίες. Ο ρόλος αυτού του επιπέδου είναι η διαπραγμάτευση, η αρχικοποίηση, η επίβλεψη, ο έλεγχος, η λογιστική και η πληρωμή της διαμοίρασης ενεργειών σε μεμονωμένους πόρους [23]. Η χρήση του GRAM (*Grid Resource Access and Management*) πρωτοκόλλου σε αυτό το επίπεδο έχει σκοπό την κατανομή των υπολογιστικών πόρων και τον έλεγχο των υπολογισμών σε αυτούς τους πόρους, ενώ το GridFTP χρησιμοποιείται για πρόσβαση στα δεδομένα επιτυγχάνοντας μεγάλη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων [22].
- *Επίπεδο Συγκεντρωτικών Υπηρεσιών*: Το επίπεδο αυτό περιέχει πρωτόκολλα και υπηρεσίες που δεν συσχετίζονται με κανένα συγκεκριμένο πόρο αλλά με συλλογές πόρων. Επειδή οι οντότητες αυτού του επιπέδου βρίσκονται σε αρκετά υψηλό επίπεδο, δύναται να υλοποιήσουν προχωρημένες συμπεριφορές διαμοιρασμού δίχως να απαιτούν νέες ιδιότητες από τους πόρους στο Επίπεδο Υποδομής. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών είναι:
 - Υπηρεσίες καταλόγου ή ευρετηρίου (*directory services*): Επιτρέπουν στους συμμετέχοντες σε ένα VO την ανακάλυψη και τις ιδιότητες των διαμοιραζόμενων πόρων.
 - Υπηρεσίες ταυτόχρονη δέσμευσης πόρων και χρονοπρογραμματισμού: Επιτρέπουν στους συμμετέχοντες ενός VO να ζητήσουν την δέσμευση ενός ή περισσοτέρων πόρων και να καθοριστεί η σειρά και ο χρόνος εκτέλεσης των εργασιών στους πόρους αυτούς. Τέτοιες υπηρεσίες προσφέρει το Condor-G και το Nimrod-G.
 - Υπηρεσίες παρακολούθησης και διάγνωσης: Επιτρέπουν την ανίχνευση λαθών, σφαλμάτων υπερφόρτωσης στους πόρους ή κακόβουλες επιθέσεις.
 - Υπηρεσίες αντιγράφων ασφαλείας δεδομένων: Επιτρέπουν την αντιγραφή των δεδομένων με σκοπό την αύξηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας αυτών.

- ο Υπηρεσίες χρέωσης και πληρωμής σε συλλογικό επίπεδο: Συλλέγουν πληροφορίες χρήσης των πόρων και δύναται για παράδειγμα να μην επιτρέπουν την χρήση πόρων σε κάποιο χρήστη που έχει υπερβεί το μέγιστο επιτρεπτό όριο. Τέτοιες υπηρεσίες προσφέρει το CAS (*Community Authorization Service*) [22].
- *Επίπεδο Εφαρμογής*: Είναι το υψηλότερο επίπεδο όπου εκτελούνται οι εφαρμογές των χρηστών και χρησιμοποιεί τα κατώτερα επίπεδα για την εκτέλεση των κατανεμημένων εργασιών. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η ανάπτυξη Διεπαφής Προγραμματισμού Εφαρμογών (*Application Programming Interfaces, API*) και πακέτα ανάπτυξης λογισμικού (*Software Development Kit, SDK*) δύναται να υποστηρίξουν τη γρήγορη ανάπτυξη πλεγματικών εφαρμογών και συνεπώς την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος γενικότερα. Δύο παραδείγματα είναι οι grid πύλες (*portals*) και η ροή πλεγματικών εργασιών (*grid workflow*) [22].

Το πλεγματικό περιβάλλον είναι ένα κατεξοχήν δυναμικό δικτυακό περιβάλλον και η διαλειτουργικότητα των υπηρεσιών απαιτεί τον καθορισμό προτυποποιημένων πρωτοκόλλων. Μία ανοιχτή αρχιτεκτονική βασισμένη σε κοινά πρότυπα προσφέρει επεκτασιμότητα, κινητικότητα, διαλειτουργικότητα και διευκολύνει την κατανομή των πόρων. Έτσι εισάγεται η έννοια του πλεγματικού μεσισμικού (*grid middleware*), το οποίο εμπεριέχει τα πρωτόκολλα, τις διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (*APIs*) και τα πακέτα ανάπτυξης λογισμικού (*SDK*), λειτουργώντας ως ένα ενδιάμεσο στρώμα ανάμεσα στις υπηρεσίες και το κατανεμημένο περιβάλλον.

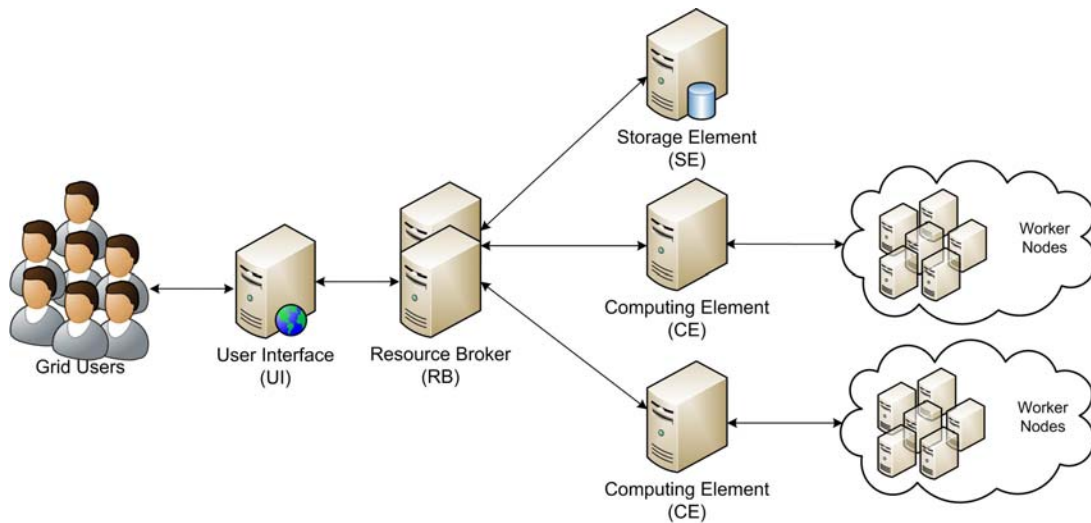
Το μεσισμικό (*middleware*) είναι ένα λογισμικό το οποίο συνδέει στοιχεία λογισμικού ή εφαρμογές και αποτελείται από ένα σετ υπηρεσιών οι οποίες επιτρέπουν σε πολλαπλές διαδικασίες, οι οποίες εκτελούνται σε ένα ή περισσότερους υπολογιστές, να αλληλεπιδρούν. Επίσης το μεσισμικό αποκρύπτει την πολυπλοκότητα των πόρων παρέχοντας στους χρήστες ένα ομοιογενές περιβάλλον τυποποιημένων διεπαφών. Οι μεσισμικές υπηρεσίες παρέχουν ένα πιο λειτουργικό σετ διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών, σε σχέση με τις υπόλοιπες πλεγματικές υπηρεσίες, με σκοπό να επιτρέπουν σε μία εφαρμογή να:

- Εντοπίζεται με διαφάνεια στο δίκτυο, ενώ παρέχεται αλληλεπίδραση με άλλη υπηρεσία ή εφαρμογή.
- Είναι ανεξάρτητη από τις υπηρεσίες δικτύου.
- Είναι αξιόπιστη και πάντα διαθέσιμη σε σύγκριση με το λειτουργικό σύστημα και τις υπηρεσίες δικτύου.

Το σημαντικότερο μεσισμικό ή ενδιάμεσο λογισμικό που χρησιμοποιείται ευρέως σε υποδομές πλέγματος είναι το gLite [24], το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου LCG/EGEE [5] [8] [25]. Στο **Σχήμα 3** απεικονίζεται η ενδεικτική δομή ενός υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιεί το gLite.

Η πρόσβαση στον τελικό χρήστη του δικτύου πλέγματος προσφέρεται μέσω της διεπαφής χρήστη (*User Interface, UI*). Συνήθως είναι ένας υπολογιστής στον οποίο έχουν εγκατασταθεί τα εργαλεία πρόσβασης ως Command Line Interface (*CLI*). Εναλλακτικά το UI μπορεί να είναι μία διαδικτυακή (*web*) εφαρμογή, όπως το Ganga [26] και το GridSphere [27] γεγονός που επιτρέπει την ταυτοποίηση του χρήστη στο υπολογιστικό πλέγμα, την προβολή των πόρων που είναι κατάλληλοι για την εκτέλεση μίας συγκεκριμένης εργασίας (*job*),

την υποβολή εργασιών προς εκτέλεση, την ακύρωση εργασιών, την ανάκτηση του αποτελέσματος ολοκληρωμένων εργασιών κτλ.



Σχήμα 3: Τυπική Δομή ενός Δικτύου Πλέγματος

Το Computing Element (CE), αντιπροσωπεύει ένα υπολογιστικό πόρο (*resource*) στο δίκτυο πλέγματος, ο οποίος δύναται να είναι μία συστοιχία υπολογιστών (*cluster*) ή ένα σύνολο από τοπικούς υπολογιστικούς κόμβους που ονομάζονται Worker Nodes (WNs). Το CE δύναται να προσφέρει υπηρεσίες (*services*) όπως: το Grid Gate (GG) που είναι η γενική διεπαφή (*interface*) πρόσβασης στους WNs ή στη συστοιχία υπολογιστών, την Υπηρεσία Παρακολούθησης και Ανίχνευσης (*Information and Monitoring Services*) που ενημερώνει το δίκτυο πλέγματος για την κατάσταση του CE και το Τοπικό Σύστημα Διαχείρισης Πόρων (*Local Resource Management System, LRMS*) το οποίο είναι το *batch system* που φροντίζει την εκτέλεση των εργασιών που υποβάλλονται στο CE. Παραδείγματα του LRMS είναι το Condor [1] [28], το OpenPBS [29] και το Torque [30].

Οι Worker Nodes (WNs) είναι οι κόμβοι του δικτύου πλέγματος όπου εκτελούνται οι εργασίες των χρηστών. Έχουν εγκατεστημένο ειδικό λογισμικό που τους επιτρέπει να συνεργάζονται με το CE που ανήκουν. Το Storage Element (SE), προσφέρει μία ομογενοποιημένη διαπροσωπία προς τους αποθηκευτικούς πόρους. Οι αποθηκευτικοί πόροι σε ένα δίκτυο πλέγματος είναι συνήθως σειρές από δίσκους (*disk arrays*) ή αποτελείται από μαζικό σύστημα αποθήκευσης (*Mass Storage Systems, MSS*) που συνδυάζει δίσκους και αποθηκευτικές ταινίες. Στο SE προσφέρεται η υπηρεσία (*service*) Storage Resource Manager (SRM), η οποία διαχειρίζεται τους αποθηκευτικούς πόρους προσφέροντας δυνατότητες όπως κράτηση (*reservation*) αποθηκευτικού χώρου, μεταφορά από δίσκο σε ταινία, μεταφορά από SE σε SE κτλ. Οι πιο διαδεδομένες υλοποιήσεις του SRM είναι το gLite Disk Pool Manager [31] και το CASTOR (*CERN Advanced STORAGE manager*) [32]. Τα πρωτόκολλα μεταφοράς που χρησιμοποιεί το SRM είναι το GridFTP [33] και το Remote File I/O (RFIO) του CASTOR [32].

Ο κόμβος ο οποίος φιλοξενεί την υπηρεσία Workload Management System (*WMS*), καλείται Resource Broker (*RB*) [34]. Το *WMS* δέχεται τις εργασίες (*jobs*), των χρηστών αναλαμβάνει να τις αποστείλει σε κατάλληλα *CEs* ανακτώντας το αποτέλεσμα της εκτέλεσής τους. Οι εργασίες περιγράφονται με την γλώσσα Job Description Language (*JDL*) και υποβάλλονται μέσω της διεπαφής χρήστη (*User Interface, UI*) στο *WMS*. Το *WMS* χρησιμοποιεί την υπηρεσία *MatchMaker* για ανακαλύψει που και σε ποιο *CE* και *WNs* θα αποστείλει την κάθε εργασία ώστε να τηρηθούν οι προδιαγραφές όπως ορίζονται στην περιγραφή της εργασίας, στο *JDL*.

Η Υπηρεσία Παρακολούθησης και Ανίχνευσης (*Information and Monitoring Services*) υπάρχει σε όλους τους κόμβους ενός δικτύου πλέγματος και επιτρέπει την ανακάλυψη των πόρων και την ανάκτηση πληροφοριών σχετικές με την κατάστασή τους. Η δομή των δεδομένων για την παρακολούθηση και ανακάλυψη των πόρων του δικτύου πλέγματος δύναται να υποστηριχθεί από το *GLUE Schema* [35]. Συγκεκριμένη υλοποίησή του είναι το *MDS (Monitoring and Discovery Service)* [36] του *Globus Toolkit* [4].

2.5 Δυνατότητες Δικτύων Πλέγματος

Ένα σύστημα υπολογιστικού πλέγματος δύναται να καλύψει μία ευρεία γκάμα απαιτήσεων μίας επιστημονικής κοινότητας ή επιχείρησης επιλύοντας αρκετούς περιορισμούς που σχετίζονται με την επεξεργαστική και αποθηκευτική ισχύ. Ένα δίκτυο πλέγματος αποτελείται κυρίως από μία συλλογή μηχανημάτων που αναφέρονται ως κόμβοι (*nodes*), πόροι (*resources*), μέλη (*members*), δωρητές (*donors*), πελάτες (*clients*), οικοδεσπότες (*hosts*). Όλοι συνεισφέρουν σε ένα συνδυασμό πόρων οι οποίοι αποτελούν το πλέγμα και δύναται να χρησιμοποιούνται από όλους τους χρήστες του εκτός και αν έχουν καθοριστεί διάφοροι περιορισμοί. Οι δυνατότητες των δικτύων πλέγματος αποτελούνται και στηρίζονται κυρίως στους διαθέσιμους πόρους τους.

Η υπολογιστική ισχύς που παρέχεται από τους επεξεργαστές των διασυνδεδεμένων μηχανημάτων του πλέγματος είναι ο πιο συνηθισμένος πόρος. Οι επεξεργαστές αυτοί δύναται να ποικίλουν σε αρχιτεκτονική, ταχύτητα, λογισμικό, μνήμη, αποθηκευτικό χώρο και δυνατότητες διασύνδεσης. Υπάρχουν πολλοί τρόποι που αφορούν την αξιοποίηση των υπολογιστικών πόρων μέσα στο πλέγμα (*grid*). Ο πιο απλός είναι η εκτέλεση μίας υπάρχουσας εφαρμογής πλέγματος σε ένα διαφορετικό μηχανήμα. Ένας δεύτερος είναι η χρήση σε μία εφαρμογή που είναι σχεδιασμένη να δύναται να χωριστεί σε μέρη που εκτελούνται παράλληλα σε δύο ή περισσότερα μηχανήματα. Τέλος, ένας τρίτος τρόπος είναι σε εφαρμογές που χρειάζεται να εκτελεστούν πολλές φορές, κάτι που δύναται να γίνει ταυτόχρονα σε διαφορετικά μηχανήματα.

Ο δεύτερος πιο κοινός πόρος που χρησιμοποιείται σε ένα πλέγμα είναι ο αποθηκευτικός χώρος. Ένα πλέγμα που παρέχει την δυνατότητα ενοποίησης των αποθηκευτικών πόρων καλείται πλέγμα δεδομένων (*data grid*). Κάθε μηχανήμα στο πλέγμα παρέχει συνήθως μέρος της αποθηκευτικής του ικανότητας για χρήση από το πλέγμα, είτε μόνιμα είτε προσωρινά. Αυτό δύναται να αφορά τη μνήμη που συνδέεται με τον επεξεργαστή ή δύναται να είναι δευτερεύον αποθηκευτικός χώρος όπως σκληροί δίσκοι ή άλλα μέσα μόνιμης

αποθήκευσης. Τα δευτερεύοντα μέσα αποθήκευσης σε ένα πλέγμα δύναται να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους ώστε να αυξηθεί η συνολική χωρητικότητα, απόδοση, διανομή, και αξιοπιστία των δεδομένων. Πολλά συστήματα δικτύων πλέγματος που χρησιμοποιούν δικτυακά συστήματα αρχείων όπως τα AFS (*Andrew File System*), NFS (*Network File System*), DFS (*Distributed File System*) και GPFS (*General Parallel File System*). Τα συστήματα αυτά προσφέρουν ποικιλία δυνατοτήτων στον τομέα των επιδόσεων, της ασφάλειας και της αξιοπιστίας. Η χωρητικότητα δύναται να αυξηθεί χρησιμοποιώντας τον χώρο αποθήκευσης σε πολλά διασυνδεδεμένα μηχανήματα με τη χρήση ενός συστήματος αρχείων, όπως αυτά αναφέρθηκαν παραπάνω. Κάθε αρχείο ή βάση δεδομένων δύναται να χωρίζεται σε διάφορα αποθηκευτικά μέσα και μηχανήματα εξαλείφοντας το πρόβλημα των περιορισμών μέγιστου μεγέθους που υπαγορεύουν τα συνηθισμένα συστήματα αρχείων. Οι χρήστες του δικτύου πλέγματος αντιλαμβάνονται ότι τα δεδομένα ανήκουν στον ίδιο εικονικό χώρο παρά το γεγονός ότι αυτά δύναται να βρίσκονται διασκορπισμένα σε διάφορα σημεία του πλέγματος. Στις βάσεις δεδομένων τα πλεονεκτήματα είναι ακόμα περισσότερα αφού πλέον αντί για πολλές μικρές βάσεις δεδομένων μπορούμε να έχουμε μία μεγαλύτερη στο δίκτυο πλέγματος υποστηρίζοντας καλύτερα λειτουργίες που σχετίζονται με την πρόσβαση και την αναζήτηση. Περισσότερο αναπτυγμένα συστήματα αρχείων δύναται αυτόματα να κρατούν αντίγραφα ορισμένων δεδομένων ώστε να αυξάνεται η αξιοπιστία και οι επιδόσεις του συστήματος. Με τη χρήση ενός ευφυούς χρονοπρογραμματιστή (*intelligent grid scheduler*) δύναται να καθοριστούν συγκεκριμένες συσκευές αποθήκευσης ώστε τα δεδομένα να αποθηκεύονται βάσει προτύπων χρήσης (*usage patterns*). Με βάση αυτά τα πρότυπα οι υποβαλλόμενες εργασίες θα εκτελούνται στα μηχανήματα που περιέχουν τα δεδομένα ή σε μηχανήματα που είναι άμεσα διασυνδεδεμένα με αυτά.

Οι επιδόσεις ενός συστήματος πλέγματος που υλοποιεί ένα τέτοιο σύστημα αρχείων μπορούν επίσης να αυξηθούν με χρήση του χωρίσματος δεδομένων (*data striping*). Με τη συγκεκριμένη τεχνική με κατάλληλο χώρισμα δεδομένων σε διάφορα αποθηκευτικά μέσα και μηχανήματα επιτυγχάνεται μεταφορά δεδομένων με μεγαλύτερους ρυθμούς από αυτούς που δύναται να επιτύχει οποιοδήποτε μεμονωμένο μέσο. Σε περιπτώσεις απαιτητικών εφαρμογών που είναι αναγκαίο να επιτευχθεί υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, η συγκεκριμένη δυνατότητα είναι πολύ σημαντική. Τέλος, ένα σύστημα αρχείων πλέγματος υλοποιεί τεχνικές για την επαναφορά χαμένων δεδομένων από οποιαδήποτε είδους σφάλμα ή βλάβη υλικού, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου πλέγματος.

Άλλος ένας σημαντικός πόρος πλέγματος είναι η ικανότητα μετάδοσης δεδομένων. Αυτό περιλαμβάνει επικοινωνία μέσα στα όρια ενός πλέγματος ή και έξω από αυτό. Οι εσωτερικές επικοινωνίες είναι σημαντικές για την αποστολή εργασιών και των απαιτούμενων δεδομένων στους κόμβους του πλέγματος. Μερικές εργασίες απαιτούν την επεξεργασία μεγάλης ποσότητας δεδομένων που δύναται να βρίσκονται σε απομακρυσμένα μηχανήματα. Το εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο για τέτοιες επικοινωνίες είναι κρίσιμος πόρος και δύναται να περιορίσει τη χρησιμοποίηση του πλέγματος. Η εξωτερική επικοινωνία με το Διαδίκτυο είναι σημαντική σε πολλές περιπτώσεις όπως π.χ. στην περίπτωση υλοποίησης μηχανών αναζήτησης. Τα μηχανήματα του πλέγματος δύναται να έχουν το καθένα τη δική του σύνδεση στο Διαδίκτυο εκτός από την μεταξύ τους διασύνδεση στα όρια του πλέγματος. Όταν οι συνδέσεις αυτές δεν μοιράζονται το ίδιο

επικοινωνιακό μονοπάτι, τότε προσθέτουν στο συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης για πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Επιπλέον, οι εφεδρικοί επικοινωνιακοί δίαυλοι είναι πολλές φορές απαραίτητοι για την αντιμετώπιση πιθανών βλαβών στο δίκτυο ή/και ένεκα αυξημένης επικοινωνιακής κίνησης δεδομένων. Με τη χρήση του κατάλληλου συστήματος διαχείρισης δικτύου είναι δυνατόν να απεικονισθεί η τοπολογία του δικτύου πλέγματος και να εντοπισθούν τα σημεία της επικοινωνιακής συμφόρησης. Αυτές οι πληροφορίες δύναται να χρησιμοποιηθούν κυρίως όταν εξετάζονται πιθανές αναβαθμίσεις υλικού.

Επίσης, πόρος ενός δικτύου πλέγματος δύναται να αποτελέσει και οποιοσδήποτε άλλος μη πληροφοριακός εξοπλισμός που είναι διασυνδεδεμένος με το δίκτυο πλέγματος, όπως π.χ. ιατρικά μηχανήματα. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι διαχειριστές του δικτύου πλέγματος δημιουργούν ένα τεχνητό τύπο πόρων που χρησιμοποιείται από τους χρονοπρογραμματιστές για να αναθέσουν τις υποβαλλόμενες εργασίες σύμφωνα με τους προκαθορισμένους κανόνες πολιτικής ή οποιουδήποτε άλλους περιορισμούς. Έτσι κάποια μηχανήματα του πλέγματος δύναται να περιοριστούν στο να δέχονται μόνο εργασίες που αφορούν ιατρική έρευνα ή άλλα. Για παράδειγμα, να χρησιμοποιούνται μόνο για στρατιωτικούς σκοπούς αποκλείοντας οποιαδήποτε άλλη εργασία. Για δύναται εφαρμογής τέτοιου είδους πολιτικές διαμοιρασμού θα πρέπει να διαμορφωθεί από τους διαχειριστές μία ανάλογη ταξινόμηση σε κάθε είδος εργασίας και μέσω της διαδικασίας πιστοποίησης των χρηστών να παρέχεται πρόσβαση μόνο σε εξουσιοδοτημένους χρήστες.

2.5.1 Πλήρης Εκμετάλλευση Πόρων

Η βασική χρήση ενός υπολογιστικού πλέγματος είναι η εκτέλεση μίας εφαρμογής (*application*) σε ένα απομακρυσμένο μηχάνημα. Το μηχάνημα στο οποίο λειτουργεί συνήθως η εφαρμογή δύναται να είναι απασχολημένο ή να χρησιμοποιεί ήδη το μέγιστο της ισχύος του. Έτσι η εφαρμογή δύναται να εκτελεσθεί σε κάποιο άλλο διασυνδεδεμένο αδρανές (*idle*) μηχάνημα μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα. Για να συμβεί αυτό πρέπει η εφαρμογή να είναι δυνατόν να εκτελεστεί σε απομακρυσμένο μηχάνημα και το απομακρυσμένο αυτό μηχάνημα να ικανοποιεί τις απαιτήσεις αυτής τόσο σε υλικό όσο και σε λογισμικό για την εκτέλεση της εφαρμογής.

Στις περισσότερες επιχειρήσεις και οργανισμούς υπάρχει πολύ μεγάλος αριθμός υπολογιστικών πόρων που υπολειτουργούν ή δεν αξιοποιούνται καθόλου. Αυτό συμβαίνει διότι τα περισσότερα μηχανήματα είναι απασχολημένα λιγότερο από 5% του χρόνου, ενώ ακόμα και μηχανήματα-εξυπηρετητές (*servers*) είναι συχνά αδρανής. Έτσι λοιπόν το δίκτυο πλέγματος δημιουργεί και θέτει ένα ενιαίο πλαίσιο αξιοποίησης όλων των υποχρησιμοποιούμενων ή ανεκμετάλλευστων υπολογιστικών πόρων αυξάνοντας την αποτελεσματικότητά τους.

2.5.2 Παράλληλη Υπολογιστική Επεξεργασία

Από τις πιο διαδεδομένες δυνατότητες του υπολογιστικού πλέγματος είναι η παράλληλη επεξεργαστική ικανότητα (*parallel CPU capacity*). Πολλές επιστημονικές εφαρμογές όπως είναι η βιοιατρική, τα οικονομικά μοντέλα, η επεξεργασία κινούμενης εικόνας έχουν ιδιαίτερα μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ.

Οι εφαρμογές αυτές έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι χρησιμοποιούν αλγόριθμους οι οποίοι δύναται να χωριστούν σε ανεξάρτητα κομμάτια που εκτελούνται ταυτόχρονα. Μία εφαρμογή πλέγματος υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μεγάλος αριθμός μικρότερων εργασιών ή ως υποεργασίες, (*subjobs*) όπου κάθε μία εκ των οποίων δύναται να εκτελείται σε διαφορετικό μηχάνημα του υπολογιστικού πλέγματος. Όσο λιγότερο εξαρτημένες είναι αυτές οι υποεργασίες μεταξύ τους, τόσο πιο κλιμακούμενη (*scalable*) δύναται να γίνει η εφαρμογή. Η τέλεια κλιμακούμενη εφαρμογή εκτελείται x φορές γρηγορότερα αν χρησιμοποιεί y παράλληλους επεξεργαστές.

Αυτό βέβαια σπάνια συμβαίνει στην πράξη, διότι ο αλγόριθμος δεν είναι δυνατόν να χωρίσει την εφαρμογή σε απεριόριστο αριθμό ανεξάρτητων εκτελέσιμων κομματιών, οπότε περιορίζεται σημαντικά η δυνατότητα της παράλληλης επεξεργασίας. Ένα δεύτερο εμπόδιο είναι αν τα κομμάτια δεν είναι πλήρως ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε δύναται να προκληθούν «συγκρούσεις» (*collisions*) περιορίζοντας το βαθμό της παράλληλης επεξεργασίας. Οπότε, για παράδειγμα, εάν όλες οι υποεργασίες πρέπει να διαβάσουν και να γράψουν από το ένα κοινό αρχείο ή μία βάση δεδομένων, τα όρια πρόσβασης του αρχείου ή της βάσης δεδομένων γίνονται ο περιοριστικός παράγοντας στο βαθμό παράλληλης επεξεργασίας που δύναται να επιτευχθεί. Ακόμα, κάποια συνήθη πιθανά εμπόδια είναι όταν απαιτείται επικοινωνία μεταξύ των εργασιών, η περιορισμένη χωρητικότητα δικτύου, τα πρωτόκολλα συγχρονισμού, το εύρος ζώνης εισόδου-εξόδου οργάνων και συσκευών αποθήκευσης, καθώς και οι λανθάνουσες καταστάσεις που παρεμβαίνουν στις απαιτήσεις πραγματικού χρόνου.

2.5.3 Συνεργασία Εικονικών Πόρων

Μία ακόμη συνεισφορά του υπολογιστικού πλέγματος είναι η δυνατότητα για συνεργασία μεταξύ ενός ευρύτερου κοινού. Παλιότερα κάτι ανάλογο συνέβαινε και με τα κατανομημένα υπολογιστικά συστήματα, το υπολογιστικό πλέγμα όμως επεκτείνει κατά πολύ τις δυνατότητες συνεργασίας αφού τις προσφέρει σε μεγαλύτερο κοινό ενώ τα πρότυπα που διαθέτει κάνουν ετερογενή υπολογιστικά συστήματα να συμπεριφέρονται ως ένα μεγάλο εικονικό σύστημα που διαθέτει μεγάλη ποικιλία εικονικών πόρων.

Ο διαμοιρασμός των εικονικών πόρων περιλαμβάνει αρχικά δεδομένα, είτε με τη μορφή αρχείων είτε βάσεων δεδομένων. Το τελευταίο χαρακτηρίζεται ως δίκτυο πλέγματος δεδομένων (*data grid*) και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι πολλά. Τα δεδομένα δύναται να διαμοιράζονται μεταξύ των συστημάτων που αποτελούν το δίκτυο πλέγματος (*grid*) κάνοντας δυνατή τη μετάδοση με μεγαλύτερες ταχύτητες μέσα από υλοποιημένες τεχνικές. Επίσης, είναι μεγαλύτερες οι δυνατότητες ασφάλειας αφού σε ορισμένα σημεία

του δικτύου πλέγματος διατηρούνται αντίγραφα ασφαλείας (*backup*) των κρίσιμότερων δεδομένων. Τέλος, εκτός από τα δεδομένα τα συστήματα του δικτύου πλέγματος δύναται να διαμοιράζονται και άλλου είδους πόρους όπως, π.χ. ειδικός εξοπλισμός, λογισμικό, υπηρεσίες, άδειες λογισμικού, και εύρος ζώνης .

2.5.4 Συμμετοχή σε Εικονικούς Οργανισμούς

Βασική είναι η ιδέα των Εικονικών Οργανισμών (*Virtual Organizations, VOs*), όπου μέσω των οποίων δίνονται οι ρόλοι πρόσβασης μέσα στο δίκτυο πλέγματος. Εκτείνονται έξω από τα στενά όρια του οργανισμού και επιτρέπουν την δημιουργία συνόλων από Εικονικούς Οργανισμούς (*VOs*) που περιλαμβάνουν χρήστες και πόρους όπως είναι υπολογιστές, αποθηκευτικός χώρος, βάσεις δεδομένων κ.τ.λ., τα οποία είναι μέρος των οργανισμών που συμμετέχουν στην υποδομή του δικτύου πλέγματος. Επιτρέπουν στους χρήστες τους να διαμοιράζονται τους πόρους με βάση συγκεκριμένες πολιτικές ανά VO, μέσω των οποίων επιτρέπεται η δημιουργία εικονικών επιστημονικών κοινοτήτων, οι οποίες χρησιμοποιούν υπολογιστικούς πόρους καταναμημένους σε όλο τον κόσμο και δύναται να έχουν κοινούς επιστημονικούς σκοπούς.

Εφόσον οι χρήστες του πλέγματος δύναται να οργανωθούν δυναμικά σε διάφορους VOs, όπου κάθε VO έχει διαφορετική πολιτική λειτουργίας ως εκ τούτου δύναται να διαμοιραστούν τους πόρους τους συλλογικά ως ένα ακόμα μεγαλύτερο πλέγμα, δηλαδή ως ένα υπερσύνολο των προηγούμενων.

Η κοινή χρήση αφορά αρχικά δεδομένα υπό μορφή αρχείων ή βάσεων δεδομένων. Ένα πλέγμα δεδομένων δύναται να επεκτείνει τις ικανότητες των δεδομένων με διάφορους τρόπους. Αρχικά, τα αρχεία ή οι βάσεις δεδομένων δύναται να εκταθούν μεταξύ ποικίλων συστημάτων και να προσφέρουν νέες δυνατότητες σε σύγκριση με οποιοδήποτε απλό σύστημα. Μία τέτοια έκταση των δεδομένων σε διάφορα σημεία του πλέγματος δύναται να βελτιώσει τους χρόνους μεταφοράς δεδομένων μέσω χρήσης τεχνικών απογύμνωσης (*striping techniques*). Τα δεδομένα δύναται να αντιγραφούν σε διάφορα σημεία του πλέγματος και να χρησιμεύσουν ως αντίγραφα ασφαλείας.

Η κοινή χρήση δεν περιορίζεται μόνο σε δεδομένα, αλλά περιλαμβάνει πολλούς άλλους πόρους, όπως ήδη έχει αναφερθεί. Όλοι οι διαθέσιμοι πόροι μέσα σε μία υποδομή πλέγματος εικονικοποιούνται (*virtualize*) για να προσδώσουν μία πιο ομοιόμορφη διαλειτουργικότητα μεταξύ των ετερογενών πόρων και μελών του πλέγματος.

Οι συμμετέχοντες και οι χρήστες του πλέγματος δύναται να είναι μέλη διάφορων πραγματικών και εικονικών οργανισμών. Το πλέγμα δύναται να υποβοηθήσει στην επιβολή κανόνων ασφάλειας μεταξύ τους και να εφαρμόσει πολιτικές οι οποίες δύναται να επιλύσουν προτεραιότητες τόσο για τους πόρους όσο και για τους χρήστες.

2.5.5 Εξισορρόπηση Πόρων

Ένα δίκτυο πλέγματος συνενώνει μεγάλο αριθμό πόρων από μεμονωμένα μηχανήματα για τη δημιουργία ενός μεγαλύτερου συνολικού εικονικού πόρου. Οι εφαρμογές που είναι ειδικά σχεδιασμένες να λειτουργούν σε περιβάλλον πλέγματος, δύναται να επιτύχουν εξισορρόπηση των πόρων αποστέλλοντας τις υποεργασίες για εκτέλεση σε μηχανές με χαμηλή αξιοποίηση. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό γνώρισμα του πλέγματος είναι άκρως εμφανές σε καταστάσεις μέγιστης δραστηριότητας μέσα στα τμήματα ενός μεγαλύτερου οργανισμού. Σε μία τέτοια κατάσταση, πλήρους φόρτου, δύναται να καθοδηγηθούν οι εργασίες σε σχετικά μη απασχολημένα μηχανήματα του πλέγματος ή σε περιπτώσεις που όλα τα μηχανήματα του πλέγματος είναι ήδη πλήρως απασχολημένα, οπότε χαμηλότερης προτεραιότητας εργασίες που εκτελούνται αναστέλλονται προσωρινά ή ακυρώνονται ώστε να ελευθερωθούν πόροι για την εκτέλεση εργασιών υψηλότερης προτεραιότητας.

2.5.6 Καλύτερη Διαχείριση

Η ενοποίηση των πόρων μέσα σε ένα υπολογιστικό πλέγμα και ο χειρισμός ετερογενών συστημάτων με ενιαίο τρόπο δημιουργεί νέες δυνατότητες για καλύτερη διαχείριση, μεγαλύτερων και ακόμη πιο κατανεμημένων-γεωγραφικά διεσπαρμένων υποδομών. Αφού είναι σχετικά εύκολο να απεικονιστεί η χωρητικότητα και η αξιοποίηση των πόρων του πλέγματος, γεγονός που διευκολύνει τον έλεγχο των δαπανών των υπολογιστικών πόρων στα πλαίσια ενός μεγαλύτερου οργανισμού.

Η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος προσφέρει την δυνατότητα διαχείρισης των προτεραιοτήτων μεταξύ διαφορετικών έργων (*projects*), διότι στο παρελθόν κάθε έργο (*project*) έπρεπε να διαθέτει αυτόνομους υπολογιστικούς πόρους καθώς τα έξοδα που εμπλεκόντουσαν μόνο με αυτό. Συχνά οι πόροι που διατίθενται σε ένα έργο μπορεί να υποχρησιμοποιούνται τη στιγμή που κάποιο άλλο χρειάζεται περισσότερους πόρους ένεκα απροσδόκητων καταστάσεων. Έχοντας λοιπόν τη συνολική εικόνα που μπορεί να προσφέρει ένα δίκτυο πλέγματος, είναι ευκολότερος ο έλεγχος και η διαχείριση τέτοιων καταστάσεων.

2.5.7 Επιλεκτική Παραχώρηση Πόρων

Στον κόσμο των επιχειρήσεων το χαρακτηριστικό αυτό της τεχνολογίας των δικτύων πλέγματος είναι άκρως πολύτιμο. Συχνά σε επιχειρήσεις κατά την υλοποίηση ενός μεγάλου έργου (*project*) συμβαίνει αρκετά συχνά διοικητικές αποφάσεις να αλλάζουν την προτεραιότητα αυτού και να πρέπει να ολοκληρωθεί μέσα σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Έτσι, για παράδειγμα αποφασίζεται ότι η παραγωγή ενός προϊόντος πρέπει να επιτευχθεί πολύ πιο γρήγορα ώστε να εμφανισθεί στην αγορά πριν τους ανταγωνιστές του (*fastest time to market*). Μία

αρχιτεκτονική πλέγματος δύναται υπό προϋποθέσεις να ικανοποιήσει μία τέτοια κατάσταση. Βέβαια, θα πρέπει το μέγεθος των εργασιών να είναι εκ των προτέρων γνωστό και αυτές να δύναται διαχωρισμού σε μικρότερες υποεργασίες. Μία πλεγματική υποδομή με σωστό προγραμματισμό δύναται να διαθέσει μεγάλο αριθμό πόρων στο συγκεκριμένο έργο, δίνοντας του προτεραιότητα σε σχέση με άλλες εργασίες, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο μικρότερος χρόνος ολοκλήρωσής του.

Επιλεκτική παραχώρηση των πόρων θα μπορούσε να γίνει σε ένα δίκτυο πλέγματος και με άλλα κριτήρια όπως, π.χ. μειώνοντας τις συγκρούσεις και ελαχιστοποιώντας τον επικοινωνιακό φόρτο μέσα στο πλέγμα, όταν οι εργασίες επικοινωνούν η μία με την άλλη, με το Διαδίκτυο ή με αποθηκευτικούς πόρους.

2.5.8 Αξιοπιστία

Τα συμβατικά υπολογιστικά συστήματα χρησιμοποιούν ακριβό υλικό (*hardware*) για να αυξήσουν την αξιοπιστία τους. Χρησιμοποιούν ολοκληρωμένα κυκλώματα με επιπλέον λειτουργίες για να επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα και να υλοποιούν δυνατότητες ανάκτησης σε περιπτώσεις πιθανού σφάλματος στο υλικό. Τα μηχανήματα αυτά χρησιμοποιούν επίσης δύο ή περισσότερους επεξεργαστές με ανεξάρτητες λειτουργίες ώστε να είναι δυνατή η αντικατάστασή τους, ενώ λειτουργούν οι υπόλοιποι. Επίσης χρησιμοποιούνται εναλλακτικά συστήματα τροφοδοσίας και ψύξης ώστε να είναι δυνατή η αδιάλειπτη λειτουργία τους σε περίπτωση που διακοπεί η κύρια τροφοδοσία τους. Οι παραπάνω παράμετροι δύναται να καταστήσουν τα συστήματα πολύ αξιόπιστα αλλά με αντίτιμο το πολύ υψηλό κόστος.

Η προσέγγιση στον τομέα της αξιοπιστίας, όσον αφορά την τεχνολογία του δικτύου πλέγματος, βασίζεται σε φθηνά μηχανήματα που είναι γεωγραφικά διεσπαρμένα μεταξύ τους. Έτσι αν σε μία τοποθεσία συμβεί απώλεια τροφοδοσίας ή άλλου είδους πρόβλημα, τα υπόλοιπα τμήματα του δικτύου πλέγματος δεν θα επηρεαστούν και οι εργασίες θα αναπροσαρμοστούν αυτόματα ώστε να εκτελεσθούν στα υπόλοιπα μηχανήματα. Άλλωστε, αντίγραφα των υψηλής προτεραιότητας εργασιών είναι δυνατόν εκ των προτέρων να εκτελούνται σε περισσότερα του ενός μηχανήματα έτσι ώστε η πιθανή απώλεια ενός μηχανήματος να μην αποτελέσει πρόβλημα.

2.5.9 Ποιότητα Εξυπηρέτησης

Η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος δύναται να παρέχει στο χρήστη ποιότητα εξυπηρέτησης η οποία καθορίζεται ανάλογα με τις ανάγκες του. Στην περίπτωση αυτή, η ποιότητα εξυπηρέτησης προσδιορίζεται από τη συμφωνία επιπέδου υπηρεσίας (*Service Level Agreement, SLA*). Συγκεκριμένα, η συμφωνία επιπέδου υπηρεσίας καθορίζει την ελάχιστη ποιότητα εξυπηρέτησης, διαθεσιμότητας κ.τ.λ. που περιμένει ο χρήστης και τις χρεώσεις που του επιβάλλονται για τις υπηρεσίες αυτές. Για παράδειγμα, οι χρήστες υποβάλλουν τις εργασίες τους και αφού λάβουν το αποτέλεσμα της εκτέλεσης αυτών να καθορίζεται με βάση κάποιο κριτήριο

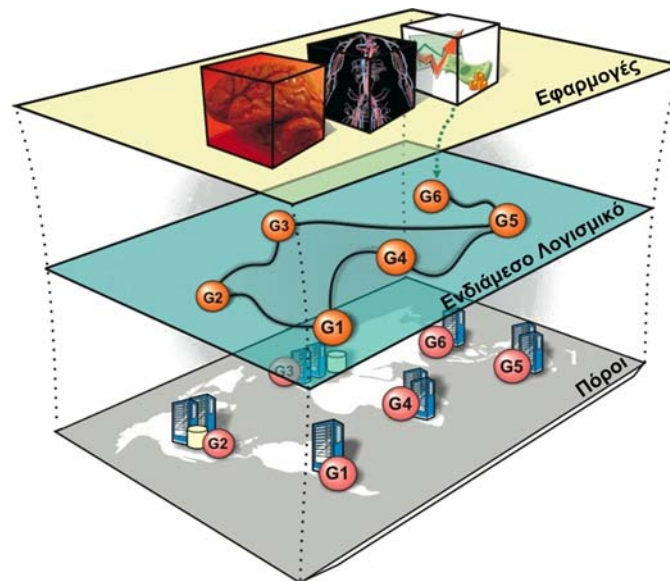
όπως ο χρόνος εκτέλεσης των υποβαλλόμενων εργασιών και η ποιότητα της μετέπειτα εξυπηρέτησης. Επιπλέον, ένας χρήστης δύναται να έχει απαιτήσεις άμεσης εκτέλεσης της εργασίας που υποβάλλει.

Σε μία συγκεκριμένη εργασία δύναται να δοθεί από τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού του δικτύου πλέγματος μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες. Οπότε ο χρήστης δύναται να αξιοποιήσει καλύτερα τις υπηρεσίες του δικτύου πλέγματος για μία εφαρμογή πραγματικού χρόνου και συνεπώς να έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης από άλλους χρήστες. Έτσι, ο χρονοπρογραμματιστής (*scheduler*) του δικτύου πλέγματος δύναται να δώσει στη συγκεκριμένη εργασία μεγαλύτερη προτεραιότητα από τις άλλες εργασίες κι έτσι είναι σε θέση να παρέχει την απαραίτητη ποιότητα εξυπηρέτησης στον χρήστη της εφαρμογής πραγματικού χρόνου.

Ένας τρόπος με τον οποίο δύναται να διασφαλιστεί η ποιότητα εξυπηρέτησης είναι η διατήρηση μερικών πόρων του δικτύου πλέγματος για συγκεκριμένες εργασίες. Δηλαδή, οι παρακρατηθέντες πόροι να είναι υπεύθυνοι για την εκτέλεση μίας συγκεκριμένης κατηγορίας εργασιών. Έτσι, αν κάποιος χρήστης υποβάλλει μία τέτοια εργασία, χρησιμοποιούνται οι πόροι του πλέγματος που έχουν διατηρηθεί για την εκτέλεσή της. Αν κάποιος από τους πόρους που έχουν διατηρηθεί για τις εργασίες αυτές είναι ελεύθεροι, τότε δύναται να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση οποιασδήποτε εργασίας υποβάλλεται στο δίκτυο πλέγματος. Ωστόσο, αν κάποια στιγμή υπάρξει απαίτηση των πόρων από κάποια από τις εργασίες που τους έχουν διατηρήσει για την εκτέλεσή τους, η τρέχουσα εργασία που χρησιμοποιεί τους πόρους της δίνει τη θέση της. Ενώ η εργασία που διακόπηκε τοποθετείται στην ουρά εργασιών μαζί με τις πληροφορίες της κατάστασης ολοκλήρωσής της. Η εργασία δύναται να χρονοπρογραμματιστεί ξανά όταν υπάρξουν διαθέσιμοι πόροι στο δίκτυο πλέγματος.

2.6 Κατηγοριοποίηση Δικτύων Πλέγματος

Ένας αρχικός διαχωρισμός και προσδιορισμός των δικτύων πλέγματος πραγματοποιείται με βάση που ανήκουν, αν είναι δηλαδή ιδιωτικά επιστημονικά-ερευνητικά υπολογιστικά πλέγματα (*scientific/research compute grids*) ή χρήσης τεχνολογικής υποδομής (*utility grids*). Ως επί το πλείστον, εξετάζοντας τις σημαντικότερες κατηγορίες πλεγμάτων που χρησιμοποιούνται είναι: (i) Για να συναθροίσουν την υπολογιστική ισχύ (*computing grids*), (ii) Τα Δεδομένα (*data grids*) και (iii) Τις Υπηρεσίες, με εκτενέστερη ανάλυση αυτών να ακολουθεί στη συνέχεια.



Σχήμα 4: Αρχιτεκτονική Δικτύων Πλέγματος

2.6.1 Πλέγματα Υπολογιστικής Ισχύος

Τα πλέγματα υπολογιστικής ισχύος (*computing grids*), εστιάζουν στην εκμετάλλευση της αχρησιμοποίητης υπολογιστικής ισχύος που διαθέτουν τα διασυνδεδεμένα μηχανήματα της υποδομής πλέγματος. Μέχρι πρόσφατα χρησιμοποιούνταν κυρίως από επιστημονικές κοινότητες που είχαν ως σκοπό την έρευνα. Σήμερα εξελίσσονται διαρκώς και χρησιμοποιούνται για την εξερεύνηση πετρελαίου και αερίου, την ανακάλυψη νέων φαρμάκων και την δημιουργία ψηφιακού περιεχομένου. Χρησιμοποιούνται λοιπόν για να αθροίσουν τη δύναμη χιλιάδων προσωπικών αλλά και κεντρικών υπολογιστών, με συνέπεια να δημιουργούν ένα περιβάλλον που δύναται να παρέχει επίπεδα απόδοσης υπερυπολογιστών με κόστος πολύ μικρότερο από την αγορά ενός υπερυπολογιστή.

Μερικά από τα ποία γνωστά επιστημονικά και ερευνητικά πλέγματα υπολογιστικής ισχύος (*computing grids*) είναι τα ακόλουθα. Στο Seti@Home Project [15] οι χρήστες συμμετέχουν μέσω του Διαδικτύου εκτελώντας στον υπολογιστή τους ένα δωρεάν πρόγραμμα που μεταφορτώνει και αναλύει ραδιοτηλεσκόπια δεδομένα. Η επιτυχία του SETI@Home οδήγησε στην ανάπτυξη του BOINC (*Berkeley Open Infrastructure for Network Computing*) [16], μία πλατφόρμα λογισμικού που επιτρέπει την εθελοντική και κατά επιλογή συμμετοχή σε πολλαπλά ερευνητικά πλέγματα με αντικείμενο την αστρονομία, φυσική, χημεία (Spinhenge@home, QuantumMonteCarlo@Home, Einstein@home, LHC@home, SETI@home), τα μαθηματικά, παιχνίδια στρατηγικής (SZTAKI Desktop Grid, Riesel Sieve, Rectilinear Crossing Number, Chess960@home), τη βιολογία και φαρμακολογία (SIMAP, Rosetta@home, World Community Grid, Tanpaku, Predictor@home, Malariaccontrol.net) και την γεωεπιστήμη (BBC Climate Change Experiment, Climateprediction.net, Seasonal Attribution Project). Εν συνέχεια, το GIMPS (*Great Internet Mersenne Prime Search*) [17] ερευνητικό πρόγραμμα με αντικείμενο τον υπολογισμό των Mersenne πρώτων αριθμών. Το

NASA IPG (*Information Power Grid*) [18] που διασυνδέει εξοπλισμό με τα κατά τόπους υπολογιστικά κέντρα της NASA μετατρέποντάς τα σε υπερυπολογιστές που διαθέτουν επιστημονικά όργανα και terabyte δεδομένων σε ένα ενιαίο, υπολογιστικό περιβάλλον. Τέλος είναι το World Community Grid [19] είναι μία προσπάθεια για τη δημιουργία του μεγαλύτερου δημόσιου, δημόσιου δικτύου υπολογιστικού πλέγματος για ανθρωπιστικούς σκοπούς υποστηρίζοντας δράσεις όπως, το Help Defeat Cancer, Human Proteome Folding, FightAIDS@Home.

2.6.2 Πλέγματα Δεδομένων

Τα πλέγματα δεδομένων (*data grids*) εστιάζουν στην ανάλυση δεδομένων καθώς συγκεντρώνουν πόρους για την εξερεύνηση βάσεων δεδομένων με σκοπό να ενισχύσουν δραστηριότητες που σχετίζονται με την υποστήριξη αποφάσεων και εξόρυξης δεδομένων. Γεγονός που τα καθιστά αρκετά δημοφιλή στην οικονομική κοινότητα διότι χρησιμοποιούνται για την διενέργεια χρηματοοικονομικών αναλύσεων και αναλύσεων χαρτοφυλακίων (*financial and portfolio analysis*). Η χρήση ενός πλέγματος δεδομένων από ένα οικονομικό πληροφοριακό σύστημα δύναται να παράγει μία ανάλυση αποθεματικού σε τρομερά μικρό χρονικό διάστημα. Με αυτόν τον τρόπο, οι χρήστες της υποδομής μπορούν να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους αποκτώντας συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι ανταγωνιστών που δεν κάνουν χρήση της υποδομής.

Δύο γιγαντιαίοι τραπεζικοί οργανισμοί που αξιοποιούν πλήρως την τεχνολογία των πλεγμάτων δεδομένων είναι η HSBC και η Deutsche Bank. Η HSBC χρησιμοποιεί αριθμό την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος σε όλο τον κόσμο διασυνδέοντας όλα τα παραρτήματά της και χρησιμοποιούνται κυρίως από τα τμήματα επενδύσεων του τραπεζικού οργανισμού. Όπου σαν κύριο σκοπό έχουν την ανάλυση παραγώγων και την ανάλυση κινδύνου, καθώς αυτά απαιτούν μεγάλα ποσά υπολογιστικής δύναμης που μόνο τα πλέγματα δεδομένων μπορούν να προσφέρουν, με μικρό συγκριτικά κόστος. Επίσης, η Deutsche Bank χρησιμοποιεί τα πλέγματα δεδομένων για την ανάλυση κινδύνου χαρτοφυλακίων αφού μόνο το παράρτημά της στη Νέα Υόρκη εξετάζει καθημερινά πάνω από 1000 σενάρια για την ανάλυση της παγκόσμιας αγοράς παρουσιάζοντας τα αποτελέσματά στο τέλος κάθε ημέρας.

2.6.3 Πλέγματα Υπηρεσιών

Τα πλέγματα υπηρεσιών (*service grids*), παρέχουν υπηρεσίες και ποιότητα εξυπηρέτησης στους χρήστες ανάλογα με τις ανάγκες τους. Η συγκεκριμένη κατηγορία υποδιαιρείται, στα συνεργατικά δίκτυα πλέγματος (*collaborative grids*), τα δίκτυα πλέγματος πολυμέσων (*multimedia grids*) και τα δίκτυα πλέγματος κατά απαίτηση (*on-demand grids*).

Τα δίκτυα πλέγματος πολυμέσων (*multimedia grids*) παρέχουν μία υποδομή που υποστηρίζει τις εφαρμογές πολυμέσων πραγματικού χρόνου ενώ απαιτεί ποιότητα εξυπηρέτησης σε πολλαπλές διαφορετικές

μηχανές. Ενώ τα δίκτυα πλέγματος κατά απαίτηση (*on-demand grids*) προσθέτουν δυναμικά νέους πόρους μέσα στην υποδομή πλέγματος για την παροχή νέων υπηρεσιών.

Τα συνεργατικά δίκτυα πλέγματος (*collaborative grids*), που είναι και τα σημαντικότερα αυτής της υποδιαίρεσης, συνδέουν τους χρήστες και τις εφαρμογές σε συνεργατικές ομάδες επιτρέποντας πραγματικού χρόνου αλληλεπίδραση μεταξύ χρηστών και εφαρμογών μέσω του εικονικού χώρου εργασίας που διαθέτουν επιτρέποντας την κοινή χρήση αρχείων δεδομένων και προσομοιώσεων. Η βιομηχανία κατασκευών χρησιμοποιεί την ανεξάντλητη ισχύ επεξεργασίας που προσφέρει η πλεγματική τεχνολογία για να υποστηρίξει την μοντελοποίηση και το σχεδιασμό σύνθετων προϊόντων. Γεγονός που είναι ιδιαίτερα εμφανές στις αυτοκινητιστικές και αεροδιαστημικές βιομηχανίες όπου τα συνεργατικά πλέγματα χρησιμοποιούνται ως μέσα ενίσχυσης για την σύνθετη εργασία του σχεδιασμού ή για να παρέχουν ικανότητες συνεργασίας μεταξύ των τμημάτων σε μία αλυσίδα σχεδιασμού. Τόσο η Boeing Company όσο και η Airbus, οι μεγαλύτερες αεροδιαστημικές βιομηχανίες που παράγουν εμπορικά και στρατιωτικά αεροσκάφη, ηλεκτρονικά συστήματα και τμήματα από αμυντικά συστήματα, πυραύλους, δορυφόρους κ.ά. χρησιμοποιούν συνεργατικά πλέγματα με στόχο να ελαττώσουν τους χρόνους σχεδιασμού, ανάπτυξης και υλοποίησης προϊόντων. Αυτό συμβαίνει διότι οι σχεδιαστές που αναπτύσσουν τα διαφορετικά μέρη ενός αεροπλάνου δύναται να βρίσκονται οπουδήποτε στον κόσμο και να χρειάζεται συνεχής διαμοιρασμός πληροφοριών καθώς εργάζονται για την τελική συναρμολόγησή του.

2.7 Εφαρμογές των Δικτύων Πλέγματος

Η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος αναμφισβήτητα βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη, για αυτόν το λόγο ασχολούνται κυρίως επιστήμονες και προγραμματιστές με τη συγκεκριμένη τεχνολογία. Παρά ταύτα χρήζει ιδιαίτερης αποδοχής και εφαρμογής από διάφορους χρήστες και οργανισμούς διότι δημιουργούνται καινούργιες συνθήκες επικοινωνίας που προωθούν τη συνεργασία και την αλληλεπίδραση. Εν συνεχεία πραγματοποιείται μία παρουσίαση των πλεονεκτημάτων που υπάρχει από τη χρήση της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

- *Επιστημονική Κοινότητα.* Οι επιστήμονες μέσω των δικτύων πλέγματος ασχολούνται με προβλήματα που έχουν τεράστιες απαιτήσεις σε υπολογιστική δύναμη και αποθηκευτικούς χώρους κάτι που δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί δίχως τις σημερινές υποδομές. Επιπλέον δύναται να έχουν πρόσβαση και να χρησιμοποιούν απομακρυσμένες εφαρμογές λογισμικού, αισθητήρες, τηλεσκόπια και προηγμένες συσκευές οπτικοποίησης και εφαρμογές χρηστών. Εμπλουτίζοντας έτσι τα τεχνολογικά μέσα που έχει στη διάθεση του ένας ερευνητής, μηδενίζονται οι αποστάσεις και διευκολύνεται η επικοινωνία μεταξύ ποικίλων επιστημονικών κοινοτήτων. Επιστήμες που έχουν υιοθετήσει και ωφελούνται άμεσα από τη χρησιμοποίηση της υποδομής πλέγματος είναι η βιοιατρική, η φαρμακευτική, η μετεωρολογία, η αστρονομία, η φυσική, η νανοτεχνολογία καθώς και επιστήμη των υλικών.

- *Επιχειρήσεις.* Οι μεγαλύτερες επιχειρήσεις στην εποχή μας είναι πολυεθνικές και λειτουργούν με εγκαταστάσεις, δεδομένα, πόρους και υπαλλήλους που είναι διασκορπισμένοι σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές. Μία υποδομή πλέγματος επιτρέπει την συσσώρευση των στοιχείων αυτών και τη δημιουργία εγκαταστάσεων που μπορούν να επιτρέψουν υπολογισμούς μεγάλης κλίμακας που χρησιμοποιούν γεωγραφικά καταμεμημένα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο οι επιχειρήσεις θα μπορούν να συνεργαστούν με απομακρυσμένους κατασκευαστές και εφοδιαστές ώστε να ενημερωθούν και να οργανώσουν τις καταναλωτικές συνήθειες κάθε γεωγραφικής περιοχής ξεχωριστά σχεδιάζοντας τις ανάλογες τοπικές στρατηγικές παραγωγής.
- *Ηλεκτρονικό Εμπόριο.* Η ταχύτατη ανάπτυξη του ηλεκτρονικού εμπορίου (*e-commerce*) μέσω του Διαδικτύου στις μέρες μας οδήγησε τους χρήστες ώστε να έχουν πρόσβαση σε ποικίλες υπηρεσίες και προϊόντα. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των δικτύων πλέγματος ένας καταναλωτής δύναται να επικοινωνεί με τον αντίστοιχο πωλητή προϊόντων μέσω εικονοροής πραγματικού χρόνου, δίχως καθυστερήσεις ή διακοπές στη μετάδοση, σαν να βρίσκονται και οι δύο στον ίδιο φυσικό χώρο παρά γεγονός ότι βρίσκονται σε διαφορετική γεωγραφική τοποθεσία.
- *Κυβερνήσεις.* Μία κυβέρνηση αντιμετωπίζει καταστάσεις που σχετίζονται με φυσικές καταστροφές, πολεοδομικές κατασκευές ή οικονομικά μοντέλα. Οι χρήστες που αναλαμβάνουν τη λύση αυτών των προβλημάτων δύναται να ωφεληθούν μέσω της πρόσβασης σε τεράστια υπολογιστική δύναμη από εθνικές ή ξένους πόρους ώστε να την χρησιμοποιήσουν όποτε αυτό κρίνεται αναγκαίο.
- *Εκπαίδευση.* Ένα δίκτυο πλέγματος δύναται να προσφέρει διάφορες νέες υπηρεσίες για εκπαιδευτικούς σκοπούς που θα κυμαίνονται από διαδραστικές παρουσιάσεις βίντεο και τηλεδιασκέψεις έως εκπαίδευση από απόσταση και εικονικά δωμάτια διαλέξεων. Έτσι, οποιοσδήποτε χρήστης δύναται να παρακολουθεί μαθήματα που διδάσκονται σε μία μακρινή πόλη ή ακόμα και διαφορετική από αυτόν χώρα δίχως να χρειάζεται να μετακινείται από τον χώρο διαμονής του. Επίσης, μία επιχείρηση θα είναι σε θέση να εκπαιδεύει τους υπαλλήλους της σε οποιοδήποτε αντικείμενο κρίνεται απαραίτητο δίχως να χρειάζεται να μετακινηθούν στην τοποθεσία που λαμβάνει τόπο η διάλεξη.
- *Περιβάλλον.* Με την βοήθεια της τεχνολογίας πλέγματος δύναται να υπάρξει σαφής πρόγνωση και αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με την έγκαιρη προστασία του περιβάλλοντος. Για την επιτυχή πρόγνωση και αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων είναι απαραίτητη η συλλογή και η ανάλυση δεδομένων σύμφωνα με επιστημονικές μεθόδους και μοντέλα. Ως γνωστόν τα προβλήματα αυτά επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες με συνέπεια τα δεδομένα των μετρήσεων να ποικίλουν ανάλογα τη γεωγραφική τοποθεσία. Με τη χρήση της υποδομής πλέγματος δύναται η εφαρμογή πολύπλοκων μοντέλων υψηλής υπολογιστικής απαίτησης που σκοπό έχουν τις ακριβείς προγνώσεις, κάτι που υστερούν αισθητά οι υπάρχουσες υποδομές.

2.8 Σύγκριση με Συναφείς Τεχνολογίες

Όπως ήδη έχει αναφερθεί η τεχνολογία του δικτύου πλέγματος δύναται να θεωρηθεί ως η πιο πρόσφατη και πλήρης εξέλιξη μεταξύ παρόμοιων αναπτυσσόμενων τεχνολογιών και υλοποιήσεων. Αυτά είναι τα καταναμημένα υπολογιστικά συστήματα (*distributed computing*), ο Παγκόσμιος Ιστός (*World Wide Web*), τα δίκτυα ομότιμων οντοτήτων (*peer-to-peer, P2P*) και οι τεχνολογίες εικονικοποίησης πόρων (*virtualization technologies*). Ωστόσο, ως κυρίαρχος απόγονος αυτής της τεχνολογίας έχει χαρακτηριστεί η τεχνολογία υπολογιστικού νέφους (*cloud computing*) που θεωρείται και ως η εξέλιξή του. Παρόλα αυτά υπάρχουν σαφείς διαφορές του δικτύου πλέγματος με συναφείς τεχνολογίες που το κατατάσσουν σε ξεχωριστό επιστημονικό πεδίο της επιστήμης των υπολογιστών και αναλύονται παρακάτω.

Σε σύγκριση με τον *Παγκόσμιο Ιστό (World Wide Web)*, έτσι και μέσα σε ένα δίκτυο πλέγματος η πολυπλοκότητα της δομής του παραμένει κρυμμένη από τον χρήστη ο οποίος απολαμβάνει μία απλοποιημένη και διαφανή υπηρεσία. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι στον Παγκόσμιο Ιστό καθίσταται ικανή μόνο η επικοινωνία μεταξύ χρηστών του και η πρόσβαση σε πληροφορία, ενώ σε περιβάλλοντα υπολογιστικού πλέγματος είναι επίσης δυνατή η πλήρης συνεργασία και ο διαμοιρασμός πόρων με σκοπό την επίλυση προβλημάτων.

Ένα κοινό των ομότιμων δικτύων (*P2P*) με τα δίκτυα πλέγματος είναι ότι επιτρέπει στους χρήστες την πρόσβαση και την κοινή χρήση αρχείων. Η βασική διαφορά τους είναι ότι δεν περιορίζεται σε αρχεία, αλλά επιτρέπει την κοινή πρόσβαση ή/και χρήση ποικίλων πόρων, μεταξύ πολλών χρηστών ταυτόχρονα (*many-to-many sharing*). Επίσης, σε ένα *P2P* δίκτυο επιδιώκεται συνήθως η ανωνυμία των χρηστών των κόμβων του δικτύου. Αυτή η ιδέα προωθήθηκε κυρίως ένεκα της φύσης των πιο διαδεδομένων εφαρμογών της *P2P* τεχνολογίας, που είναι οι εφαρμογές απομακρυσμένου διαμοιρασμού αρχείων (*remote file sharing*). Αντίθετα, τα υπολογιστικά πλέγμα παρέχει πιστοποίηση του εκάστοτε χρήστη που είναι απαραίτητη ώστε να λάβει εξουσιοδότηση χρήσης των πόρων του πλέγματος, διαδικασία που δεν αφήνει περιθώρια για τη διατήρηση της ανωνυμίας.

Όμοια με τις συστοιχίες υπολογιστών (*clusters*) και τις τεχνολογίες καταναμημένων υπολογιστικών συστημάτων (*distributed computing*), το υπολογιστικό πλέγμα συναθροίζει υπολογιστικούς πόρους. Διαφέρει όμως με την τεχνολογία των συστοιχιών υπολογιστών στο ότι μπορεί να συναθροίσει πόρους οι οποίοι είναι διεσπαρμένοι τόσο διοικητικά όσο και γεωγραφικά. Στις συστοιχίες υπολογιστών υπάρχει ομοιότητα μεταξύ των κόμβων, των επεξεργαστών αλλά και του λειτουργικού συστήματος που είναι διασυνδεδεμένοι. Οι πόροι μίας συστοιχίας υπολογιστών ανήκουν σε έναν μόνο διαχειριστικό χώρο και διαχειρίζονται μέσω του διαχειριστή του κεντροποιημένου συστήματος. Το ίδιο ισχύει και για την δέσμευση πόρων. Αντίθετα ένα υπολογιστικό πλέγμα, χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια, υπάρχουν διαφορετικοί διαχειριστικοί χώροι, οργανισμοί και κάθε κόμβος έχει ένα δικό του διαχειριστή πόρων. Μία ακόμη διαφορά έχει να κάνει με τη στατικότητα μίας συστοιχίας υπολογιστών, δεδομένου ότι μέσα σε μία συστοιχία υπολογιστών ο αριθμός των κόμβων ή γενικότερα των πόρων είναι σταθερός. Βέβαια, είναι δυνατόν να προστεθούν κόμβοι αλλά αυτές οι

αλλαγές γίνονται σπάνια και συνήθως προκαλούν διακοπή της λειτουργίας της συστοιχίας υπολογιστών παρόλο που η συχνότητα των αλλαγών στη δομή της συστοιχίας δύναται να είναι πολύ μικρή σε σχέση με το χρόνο λειτουργίας μίας εφαρμογής. Σε ένα υπολογιστικό πλέγμα, η προσθήκη και η απομάκρυνση πόρων είναι μία συνηθισμένη και επιθυμητή διαδικασία η οποία δεν διακόπτει τη λειτουργία του συστήματος και δύναται να πραγματοποιηθεί αρκετές φορές κατά τη διάρκεια λειτουργίας μίας εφαρμογής.

Επιπρόσθετα, μία συστοιχία υπολογιστών αποτελείται από περιορισμένο αριθμό κόμβων οι οποίοι βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις ο ένας από τον άλλο. Οι κόμβοι αυτοί είναι κυρίως υπολογιστές υψηλών δυνατοτήτων. Αντιθέτως, οι κόμβοι ενός πλέγματος εκτείνονται μέσα σε μία ευρεία γεωγραφική περιοχή και δύναται να αποτελούνται από μηχανήματα μέσων επιδόσεων. Επιπλέον, σε αντίθεση με ένα υπολογιστικό πλέγμα, μία συστοιχία υπολογιστών έχει περιορισμένες δυνατότητες ως προς την επέκτασή του. Η ανάγκη να βρίσκονται σχετικά κοντά ο ένας κόμβος με τον άλλον, αλλά και η πτώση της απόδοσης του δικτύου δεν επιτρέπει μεγάλο αριθμό κόμβων σε σχέση με αυτόν που παρατηρούμε σε ένα υπολογιστικό πλέγμα που δύναται να φθάσει σε μερικές χιλιάδες μηχανήματα. Βέβαια, αρκετά υπολογιστικά πλέγματα εμπεριέχουν κόμβους οι οποίοι στην πραγματικότητα είναι συστοιχίες υπολογιστών. Χρησιμοποιώντας το κατάλληλο λογισμικό-μεσισμικό, ο χρήστης του πλέγματος δεν χρειάζεται να γνωρίζει τη δομή του κόμβου. Μερικές συστοιχίες υπολογιστών χρησιμοποιούν τον δικό τους χρονοδρομολογητή ο οποίος σε συνεργασία με τον διαχειριστή πόρων κατανέμει τις εργασίες, που φθάνουν στον κόμβο, στους υπολογιστές που αποτελούν τη συστοιχία υπολογιστών. Σε ένα δίκτυο πλέγματος αρκεί ένα μηχανήμα να είναι ορατό από τους υπόλοιπους κόμβους του πλέγματος ώστε να αναλάβει την κατανομή των εργασιών μέσα σε αυτό.

Σε σύγκριση με τις τεχνολογίες εικονικοποίησης (*virtualization technologies*) οι οποίες επιτρέπουν την εικονικοποίηση σε ένα και μόνο σύστημα, το πλέγμα δύναται να επεκταθεί στην εικονικοποίηση πλειάδας ετερογενών και γεωγραφικά διεσπαρμένων συστημάτων.

Τέλος, συγκρινόμενο με την τεχνολογία υπολογιστικού νέφους (*cloud computing*), το δίκτυο πλέγματος εστιάζει στην υποδομή που παρέχει υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους, σε αντίθεση με το υπολογιστικό νέφος που έχει οικονομικά κίνητρα και στοχεύει στην παροχή περισσότερων πόρων και υπηρεσιών. Παρόλο που το δίκτυο πλέγματος αποτελεί τη ραχοκοκαλιά (*backbone*) του υπολογιστικού νέφους έχουν βασικές διαφορές στην αρχιτεκτονική τους, στην διαχείριση των πόρων, στον προγραμματισμό, στις εφαρμογές και την ασφάλεια.

2.9 Αναφορές

- [1] Condor[®] Project, Condor High Throughput Computing, Retrieved from: <http://www.cs.wisc.edu/condor>
- [2] A. S. Grimshaw, W. A. Wulf, J. C. French, A. C. Weaver, P. F. Reynolds Jr., “*Legion: The Next Logical Step Towards a Nationwide Virtual Computer*”, Technical Report CS-94-21, Department of Computer Science, University of Virginia, Charlottesville, VA, USA, 1994, Retrieved from: <http://www.legion.virginia.edu/papers/CS-94-21.pdf>
- [3] Storage Resource Broker, SRB, San Diego Supercomputing Center, Retrieved from: <http://www.sdsc.edu/srb>
- [4] The Globus Alliance, Retrieved from: <http://www.globus.org>
- [5] Large Hardon Collider (LHC), Retrieved from: <http://lhc.web.cern.ch/lhc>
- [6] Grid Physics Network (GriPhyN), Retrieved from: <http://www.griphyn.org>
- [7] Network for Earthquake Engineering and Simulation (NEES), <http://www.nees.org>
- [8] Enabling Grids for E-science (EGEE), <http://www.eu-egee.org>
- [9] EGEE Summary, Retrieved from: http://www.euegee.org/fileadmin/documents/publications/EGEEIII_Publishable_summary.pdf
- [10] Worldwide LHC Computing Grid, Retrieved from: <http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/Computing-en.html>
- [11] IBM, “*IBM Solutions Grid for Business Partners: Helping IBM Business Partners to Grid-enable Applications for the Next Phase of E-Business on Demand*”, Retrieved from: www.ibm.com
- [12] I. Foster, “*What is the Grid? A Three Point Checklist*”, Argonne National Laboratory, Retrieved from: <http://www.mcs.anl.gov/~itf/Articles/WhatIsTheGrid.pdf>, 2002.
- [13] B. Rajkumar, V. Srikumar, “*A Gentle Introduction to Grid Computing and Technologies*”, CSI Communications, vol. 29(1), pp. 9–19, 2005.
- [14] CERN GridCafe, Retrieved from: <http://gridcafe.web.cern.ch>
- [15] Seti@Home Project, Retrieved from: <http://setiathome.berkeley.edu>
- [16] Berkeley Open Infrastructure for Network Computing (BOINC), Retrieved from: <http://boinc.berkeley.edu>
- [17] Great Internet Mersenne Prime Search (GIMPS), Retrieved from: <http://www.mersenne.org>
- [18] NASA Information Power Grid, Retrieved from: <http://www.ipg.nasa.gov>

-
- [19] World Community Grid, Retrieved from: www.worldcommunitygrid.org
- [20] I. Foster, C. Kesselman, S. Tuecke, “*The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations*”, International Journal of Supercomputer Applications, vol. 15(3), 2001.
- [21] Compact Muon Solenoid (CMS), Retrieved from: <http://cms.web.cern.ch/cms/index.html>
- [22] I. Foster, Y. Zhao, I. Raicu, S. Lu, “*Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared*”, In Proc. of IEEE Workshop on Grid Computing Environments, pp. 1–10, 2008.
- [23] M. Armbrust, A. Fox, R. Griffith, A. D. Joseph, R. H. Katz, A. Konwinski, G. Lee, D. A. Patterson, A. Rabkin, I. Stoica, M. Zaharia, “*Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing*”, UC Berkeley Technical Report UCB/EECS 2009-28, Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley, 2009, Retrieved from: <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-28.pdf>
- [24] gLite – Lightweight Middleware for Grid Computing, Retrieved from: <http://glite.cern.ch>
- [25] E. Laure, C. Gr. S. Fisher, A. Frohner, P. Kunszt, A. Krenek, O. Mulmo, F. Pacini, F. Prelz, J. White, M. Barroso, P. Buncic, R. Byrom, L. Cornwall, M. Craig, A. Di Meglio, A. Djaoui, F. Giacomini, J. Hahkala, F. Hemmer, S. Hicks, A. Edlund, A. Maraschini, R. Middleton, M. Sgaravatto, M. Steenbakkens, J. Walk, A. Wilson, “*Programming the Grid with gLite*”, Journal of Computational Methods in Science and Technology, vol. 12, 2006.
- [26] Ganga, Retrieved from: <http://ganga.web.cern.ch/ganga>
- [27] GridSphere Portal Framework, Retrieved from: <http://www.gridisphere.org/gridsphere/gridsphere>
- [28] M. Litzkow, M. Livny, M. Mutka, “*Condor - A Hunter of Idle Workstations*”, In Proc. of IEEE 8th International Conference of Distributed Computing Systems, pp. 104–111, 1988
- [29] Open PBS, Retrieved from: <http://www.openpbs.org>
- [30] G. Staples, “*TORQUE Resource Manager*”, In Proc. of the 2006 ACM/IEEE Conference on Supercomputing ACM, New York, 2006, DOI: 10.1145/1188455.1188464
- [31] G. A. Stewart, D. Cameron, G. A. Cowan, G. McCance, “*Storage and Data Management in EGEE*”, In Proc. of the 5th Australasian Symposium on ACSW Frontiers, Australian Computer Society vol.68, pp. 69–77, 2007.
- [32] J. P. Baud, B. Couturier, C. Curran, J. D. Durand, E. Knezo, S. Occhetti, O. Barring, “*CASTOR Status and Evolution*”, In Proc. of International Conference for Computing in High-Energy and Nuclear Physics, pp. 2, 2003.

-
- [33] W. Allcock, J. Bester, J. Bresnahan, A. Chervenak, L. Liming, S. Tuecke “*GridFTP: Protocol Extensions to FTP for the Grid*”, Argonne National Laboratory, University of Chicago, 2003, Retrieved from: <http://www.gridforum.org/documents/GFD.20.pdf>
- [34] G. Avellino, S. Beco, B. Cantalupo, A. Maraschini, F. Pacini, M. Sottilaro, A. Terracina, D. Colling, F. Giacomini, E. Ronchieri, et al, “*The DataGrid Workload Management System: Challenges and Results*”, Journal of Grid Computing, vol. 2(4), pp. 353–367, 2004
- [35] S. Andreozzi, S. Burke, F. Ehm, L. Field, G. Galang, B. Konya, M. Litmaath, P. Millar, J. P. Navarro, “*Glue Specification v.2.0*”, Open Grid Forum Specification, 2009, Retrieved from: <http://www.ogf.org/documents/GFD.147.pdf>
- [36] GT Information Services: Monitoring & Discovery System (MDS), Retrieved from: <http://www.globus.org/toolkit/mds/>

3. Εξισορρόπηση Φόρτου Υπολογιστικού Πλέγματος με βάση τη Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών

3.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της επιστήμης των υπολογιστών έφερε στο προσκήνιο προβλήματα που σχετίζονται με την βέλτιστη λειτουργία τους. Γεγονός που κάνει επιτακτική την ανάγκη για ανάπτυξη ολοένα και πιο αποδοτικών μεθόδων βελτιστοποίησης που δύναται να επιλύουν προβλήματα που εμφανίζονται σε διάφορες εφαρμογές, γρήγορα και με ανάλογο υπολογιστικό κόστος. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ένα πρόβλημα στο οποίο ζητείται η καλύτερη δυνατή λύση ανάμεσα σε όλες τις διαθέσιμες λύσεις.

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί πολλοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που σχετίζονται με τα δίκτυα πλέγματος, με συνέπεια να αλληλοκαλύπτονται αφού ο ένας καλύπτει τα κενά του άλλου επιλύοντας προβλήματα που παλαιότερα θεωρούνταν δύσκολα να επιλυθούν. Η ποικιλία των ακολουθούμενων μεθόδων οφείλεται στην ποικιλία των προβλημάτων, διότι κάθε μέθοδος προσφέρεται για συγκεκριμένους τύπους προβλημάτων. Για αυτόν το λόγο διάφοροι κλάδοι της επιστήμης της πληροφορικής αλλά και των μαθηματικών προσέγγισαν με διαφορετικό τρόπο η κάθε μία τα συγκεκριμένα προβλήματα. Παρόλα αυτά ο κύριος σκοπός τους αφορούσε την επίλυση των εμφανιζόμενων προβλημάτων μέσω της βελτιστοποίησης.

Η πολυπλοκότητα ενός προβλήματος είναι ισοδύναμη με την πολυπλοκότητα του βέλτιστου αλγόριθμου που επιλύει το συγκεκριμένο πρόβλημα. Ένα πρόβλημα είναι εύκολο εάν υπάρχει κάποιος αλγόριθμος πολυωνυμικού χρόνου που να το επιλύει. Αντίθετα, ένα πρόβλημα είναι δύσκολο εάν δεν υπάρχει τέτοιος αλγόριθμος που να οδηγεί στην επίλυσή του. Η θεωρία πολυπλοκότητας των προβλημάτων ασχολείται με προβλήματα απόφασης. Ένα πρόβλημα απόφασης έχει πάντα μία καταφατική ή μία αρνητική απάντηση. Όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης δύναται να μειωθούν σε προβλήματα απόφασης. Ένα σημαντικό θέμα της υπολογιστικής θεωρίας είναι η κατηγοριοποίηση των προβλημάτων με βάση την πολυπλοκότητά τους. Μία κατηγορία πολυπλοκότητας αντιπροσωπεύει όλα τα προβλήματα που δύναται να επιλυθούν χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο ποσό υπολογιστικών πόρων. Οι δύο σημαντικές κατηγορίες πολυπλοκότητας προβλημάτων είναι η P (*Polynomial*) και η NP (*Non-deterministic Polynomial*).

Η κατηγορία πολυπλοκότητας P αντιπροσωπεύει το σύνολο των προβλημάτων απόφασης τα οποία δύναται να επιλυθούν από μία ντετερμινιστική μηχανή σε πολυωνυμικό χρόνο. Ένας αλγόριθμος είναι πολυωνυμικός για ένα πρόβλημα απόφασης A εάν η χειρότερή του πολυπλοκότητα οριοθετείται από μία πολυωνυμική συνάρτηση $p(n)$ όπου n αντιπροσωπεύει το μέγεθος του στιγμιότυπου εισόδου I . Έτσι, η κατηγορία P αντιπροσωπεύει το σύνολο των προβλημάτων όπου υπάρχει ένας γνωστός αλγόριθμος πολυωνυμικού χρόνου που αναφέρεται στην επίλυση του προβλήματος. Τα προβλήματα που ανήκουν στην κατηγορία P είναι σχετικά εύκολα να λυθούν.

Η κατηγορία πολυπλοκότητας NP αντιπροσωπεύει το σύνολο των προβλημάτων απόφασης για τα οποία στις περιπτώσεις που η απάντηση είναι καταφατική, δύναται να επαληθευτεί σε πολυωνυμικό χρόνο ότι είναι πράγματι καταφατική. Τα προβλήματα αυτής της κατηγορίας δύναται να επιλυθούν σε πολυωνυμικό χρόνο από έναν μη-ντετερμινιστικό αλγόριθμο. Ένας μη-ντετερμινιστικός αλγόριθμος περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα σημεία επιλογής στα οποία είναι πιθανές πολλαπλές διαφορετικές διαδρομές χωρίς να είναι διαθέσιμη κάποια πληροφορία και επιλέγεται με εικασία τη σωστή διαδρομή.

Τα NP -hard (*Non-deterministic Polynomial-time hard*) προβλήματα είναι προβλήματα βελτιστοποίησης των οποίων τα σχετικά προβλήματα απόφασης είναι NP -complete. Τα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης πραγματικού κόσμου είναι NP -hard και δεν υπάρχουν αποδεδειγμένοι αποδοτικοί αλγόριθμοι που να είναι κατάλληλη για την επίλυση τους. Τα συγκεκριμένα προβλήματα χρειάζονται εκθετικό χρόνο για να επιλυθούν βέλτιστα αλλά οι μεταερευτικές (*metaheuristics*) μέθοδοι αποτελούν μία σημαντική εναλλακτική λύση για την επίλυση αυτής της κατηγορίας προβλημάτων.

Μία ευρετική μέθοδος (*heuristic*) είναι μία τεχνική σχεδιασμένη να επιλύει ένα πρόβλημα με υποθέσεις και όχι ακολουθώντας κάποιο προκαθορισμένο τρόπο επίλυσης. Η χρήση αυτών των μεθόδων έγκειται στο ότι επιταχύνουν τη διαδικασία ανεύρεσης μίας αρκετά καλής λύσης σε περιπτώσεις όπου μία εξαντλητική αναζήτηση είναι άσκοπη κερδίζοντας έτσι σε υπολογιστική ισχύ ή εννοιολογική απλότητα εις βάρος της ακρίβειας του αποτελέσματος. Συχνά οι λύσεις που παράγουν οι ευρετικές μέθοδοι είναι αποδεκτές ως προς ένα ορισμένο πρόβλημα ή επιλύουν ένα πιο απλό πρόβλημα που περιέχει τη λύση ενός πιο πολύπλοκου προβλήματος, σε αντίθεση με τις μεταερευτικές μεθόδους που παρέχουν βέλτιστες λύσεις σε συγκεκριμένα προβλήματα.

Οι μεταερευτικές μέθοδοι ανήκουν στην κατηγορία των ευρετικών μεθόδων και βασίζονται επάνω σε ελάχιστες ή καθόλου υποθέσεις σχετικά με το πρόβλημα που επιλύουν ενώ αναλύουν ευρύς χώρους αναζήτησης για υποψήφιες λύσεις. Σημαντικό τους πλεονέκτημα είναι ότι παραδίδουν τη λύση του προβλήματος σε λογικό χρόνο δίχως όμως να υπάρχει εγγύηση ότι θα βρεθούν καθολικές βέλτιστες λύσεις. Βέβαια, η ολοένα και αυξανόμενη χρήση τους σε πολλές εφαρμογές δείχνει την αποτελεσματικότητα και απόδοσή τους ως προς την επίλυση μεγάλων και δύσκολων προβλημάτων.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία αύξηση των προτεινόμενων αλγορίθμων που βασίζονται σε διαδικασίες εμπνευσμένες από τη φύση και βρίσκουν εφαρμογή σε αρκετά διαφορετικές επιστημονικά πεδία. Τα προβλήματα που εμφανίζονται στη φύση είναι τύπου NP -hard Συνδυαστικά Προβλήματα Βελτιστοποίησης (*Combinatorial Optimization Problems, COP*) ή μοντελοποιούνται από συνεχείς συναρτήσεις που εμφανίζουν ένα μεγάλο πλήθος τοπικά βέλτιστων λύσεων, δυσκολεύοντας έτσι την επίλυσή τους με τη χρήση κλασικών αιτιοκρατικών μεθόδων. Για αυτόν το λόγο η έρευνα κατευθύνθηκε προς τους στοχαστικούς ευρετικούς αλγόριθμους και ειδικότερα σε αυτούς που εμπνέονται από φυσικά, κοινωνικά ή βιολογικά φαινόμενα [1] [2]. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των αλγορίθμων είναι να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά βέλτιστες λύσεις και να δύναται να εντοπίσουν την περιοχή της ολικά βέλτιστης λύσης, συνήθως μετά από ένα μεγάλο αριθμό εκτιμήσεων.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της διατριβής θα παρουσιάσουμε έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών (*ant algorithm*) μέσα σε ένα περιβάλλον υπολογιστικού πλέγματος. Ο προτεινόμενος ACO (*Ant Colony Optimization*) αλγόριθμος έχει ως στόχο να ελαχιστοποιήσει το συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης (*makespan*) των υποβαλλομένων εργασιών (*jobs*) μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα βελτιστοποιώντας με αυτόν τον τρόπο τη λειτουργία του δικτύου μέσω της εξισορρόπησης φόρτου. Επίσης, η διεξαγωγή προσομοιώσεων του προτεινόμενου ACO αλγόριθμου αποσκοπεί στην ανάπτυξη συγκριτικής μελέτης ως προς την αποτελεσματικότητά του με ευρέως διαδεδομένους αλγορίθμους που δύναται να χρησιμοποιηθούν σε μία υποδομή πλέγματος.

3.2 Νοημοσύνη Σμήνους

Ο άνθρωπος πάντα μελετούσε και παρουσίαζε έντονο ενδιαφέρον για τη φύση και το ζωικό βασίλειο, με κυριότερο αντικείμενο θαυμασμού και περιέργειάς του να αποτελεί ο τρόπος επικοινωνίας και οργάνωσης των κοινωνιών τους. Κατόπιν πολλών μελετών διάφοροι ερευνητές κατέληξαν ότι τα κοινωνικά έντομα (*social insects*), όπως είναι τα μυρμήγκια, οι τερμίτες, οι μέλισσες και οι σφήγκες ζουν σε δομημένες και οργανωμένες αποικίες ενώ η γενικότερη συμπεριφορά τους κατευθύνεται από την ανάγκη επιβίωσης της ομάδας και όχι του μεμονωμένου ατόμου [3]. Κάθε μεμονωμένο έντομο, από όλα τα είδη των εντόμων, εμφανίζει αρκετά περίπλοκη δομή χρησιμοποιώντας πληθώρα αισθητηρίων οργάνων ώστε να συγκεντρώνει πληροφορίες από το περιβάλλον του και να λαμβάνει τις ανάλογες αποφάσεις.

Η νοημοσύνη σμήνους (*swarm intelligence*) είναι μία καινοτόμα μεταφορά σε επίπεδο υπολογισμού και συμπεριφοράς για την επίλυση αποκεντρωμένων προβλημάτων, εμπνευσμένη από το βιολογικό παράδειγμα διαφόρων κοινωνικών εντόμων και από φαινόμενα όπως η δημιουργία αγέλης, κοπαδιού, σμήνους στους σπονδυλωτούς οργανισμούς [3]. Ο όρος νοημοσύνη σμήνους αναφέρεται σε ένα κλάδο της τεχνητής ζωής ο οποίος στηρίζεται στη μελέτη της συλλογικής συμπεριφοράς σε μη κατανεμημένα, αυτό-οργανωμένα (*Self-Organization, SO*) συστήματα [29]. Ενώ ως σμήνος (*swarm*) ορίζεται οποιαδήποτε χαλαρά δομημένη συλλογή αλληλεπιδρόντων διαμεσολαβητών [30].

Η μελέτη της συμπεριφοράς των κοινωνικών εντόμων αποκάλυψε ότι η συνεργασία σε επίπεδο αποικίας βασίζεται στην αυτο-οργάνωση [3] και στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων προκύπτει από αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεμονωμένων ατόμων. Αν και αυτές οι αλληλεπιδράσεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους δύναται να είναι απλές όλες μαζί μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα που σχετίζονται με την επιβίωσή τους. Αυτή η συλλογική συμπεριφορά που προκύπτει από μία ομάδα κοινωνικών εντόμων καλείται νοημοσύνη σμήνους. Μία από τις πρώιμες μελέτες της νοημοσύνης σμήνους ασχολήθηκε με την αναζήτηση τροφής από τα μυρμήγκια καθώς αυτά θεωρούνται το πιο επιτυχημένο είδος εντόμων διότι έχουν υπάρχουν επάνω στον πλανήτη μας πάνω από 100 εκατομμύρια χρόνια έχοντας αποικήσει κάθε μέρος του [4].

Στην εξεύρεση τροφής τους καθώς και στην εξεύρεση της συντομότερης διαδρομής τα μυρμήγκια απλώς ακολουθούν το μονοπάτι που χάραξε ένα άλλο μυρμήγκι. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται και επιτυγχάνεται πάντα από τα μυρμήγκια διότι στο πέρασμα τους υπάρχει η έκκριση της φερομόνης (*pheromone*) που προσελκύει τα υπόλοιπα μυρμήγκια, εξού και ο σχηματισμός της γραμμής μετακίνησής τους. Η ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας επιτυγχάνεται δίχως την ανάγκη κάποιου αρχηγού ή κεντρικής διοίκησης. Η ίδια στρατηγική ακολουθείται επίσης για την διαδικασία εύρεσης της συντομότερης διαδρομής ανάμεσα στη φωλιά και στην ανευρεθείσα τροφή τους. Σημαντικό είναι ότι η όλη διαδικασία χαρακτηρίζεται από ευελιξία (*flexibility*), προσαρμοστικότητα (*adaptability*) και στιβαρότητα (*robustness*) καθώς αυτά προσαρμόζονται στις εκάστοτε συνθήκες του περιβάλλοντος καθώς ολοκληρώνουν επιτυχώς οποιαδήποτε συλλογική εργασία ακόμα και αν κάποια άτομα δεν είναι ικανά για αυτήν.

3.2.1 Αποικίες Μυρμηγκιών

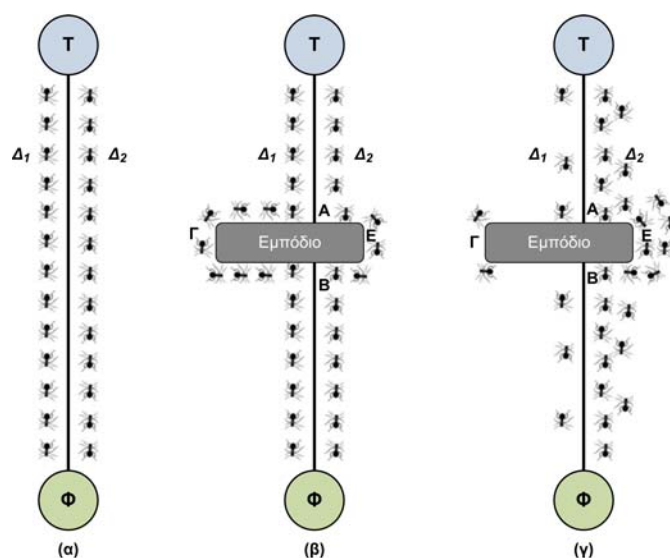
Στο φυσικό κόσμο, τα μυρμήγκια περιφέρονται τυχαία και όταν βρουν τροφή επιστρέφουν στην αποικία τους, δημιουργώντας μονοπάτια φερομόνης (*pheromone trails*). Αν άλλα μυρμήγκια βρουν ένα τέτοιο μονοπάτι είναι πιθανό να μην συνεχίσουν να κινούνται τυχαία, αλλά να ακολουθήσουν το μονοπάτι, επιστρέφοντας και ενισχύοντάς το αν βρουν τροφή. Ωστόσο, με το πέρασμα του χρόνου τα μονοπάτια φερομόνης αρχίζουν να εξατμίζονται κι έτσι μειώνεται η δύναμη που έχουν να προσελκύουν άλλα μυρμήγκια.

Όσο περισσότερο χρόνο παίρνει σε ένα μυρμήγκι να ταξιδέψει το μονοπάτι και να επιστρέψει πίσω, τόσο περισσότερο χρόνο έχει η φερομόνη να εξατμιστεί. Αντίθετα, ένα μικρό μονοπάτι διασχίζεται πιο συχνά έχει ως συνέπεια η πυκνότητα της φερομόνης να γίνεται υψηλότερη στα σύντομα μονοπάτια από ότι στα μεγαλύτερα. Η εξάτμιση της φερομόνης έχει επίσης το πλεονέκτημα της αποφυγής της σύγκλισης σε μία τοπικά βέλτιστη λύση. Εάν δεν υπήρχε καθόλου εξάτμιση, τα μονοπάτια που επιλέχτηκαν από τα πρώτα μυρμήγκια θα ήταν ιδιαίτερα ελκυστικά για τα επόμενα. Σε αυτή την περίπτωση η εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης θα περιοριζόταν. Έτσι όταν ένα μυρμήγκι βρει ένα σύντομο μονοπάτι από την αποικία στην πηγή τροφής, τα υπόλοιπα μυρμήγκια είναι πιθανό να ακολουθήσουν αυτό το μονοπάτι και στο τέλος όλα τα μυρμήγκια θα ακολουθούν ένα μοναδικό μονοπάτι. Η ιδέα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με αποικία μυρμηγκιών (*ACO*) βασίστηκε σε αυτήν τη συμπεριφορά.

Για να επιτευχθεί μία συλλογική εργασία πρέπει να εξασφαλισθεί πρώτα η επικοινωνία μεταξύ των μυρμηγκιών. Η επικοινωνία που έχουν είναι είτε άμεση είτε έμμεση. Στην άμεση επικοινωνία τους κυρίως λαμβάνουν μέρος τα αισθητήρια όργανά τους, η οπτική ή χημική επαφή των εντόμων και οι ανταλλαγές τροφής ή υγρών μεταξύ τους. Αντίθετα, η έμμεση επικοινωνία βασίζεται στις μεταβολές του περιβάλλοντος από τα έντομα και την ανίχνευση των μεταβολών αυτών από τα ίδια ή από άλλα έντομα της αποικίας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας εργασίας είναι η εναπόθεση φερομόνης από τα μυρμήγκια στο έδαφος κατά τη μεταφορά τροφής στη φωλιά. Η εναπόθεση της φερομόνης είναι δυνατόν να εντοπιστεί και από τα υπόλοιπα μέλη της αποικίας τα οποία δρουν ανάλογα. Η διαδικασία αυτή της έμμεσης επικοινωνίας καλείται

στιγμεργία (*stigmergy*) [5], προερχόμενη από το στίγμα και έργο, όρος που εισήχθη για πρώτη φορά από τον Grassé [6]. Συνεπώς, η στιγμεργία είναι μία έμμεση μη-συμβολική μορφή επικοινωνίας που διαμεσολαβείται από το περιβάλλον, δηλαδή τα μυρμηγκια δύναται να ανταλλάζουν πληροφορίες τροποποιώντας το περιβάλλον τους.

Συγκεκριμένα, ο Grassé παρατήρησε τη διαδικασία δημιουργίας φωλιάς στους τερμίτες *Bellicositermes Natalensis* και *Cubitermes* [6]. Κατά τη διαδικασία χτισίματος φωλιάς οι τερμίτες εναποθέτουν τυχαία στην περιοχή που πρόκειται να κατασκευασθεί η φωλιά τους χωμάτινα σφαιρίδια εμπλουτισμένα με τη φερομόνη τους. Οι επόμενοι τερμίτες ανιχνεύουν τα σφαιρίδια αυτά και εναποθέτουν το δικό τους δίπλα στα υπόλοιπα. Με αυτό τον τρόπο σχηματίζονται σωροί από χωμάτινα σφαιρίδια. Όταν για τυχαίους λόγους κάποιος από αυτούς τους σωρούς ξεπεράσει ένα ορισμένο μέγεθος, δηλαδή υπάρξει μία συγκεκριμένη συσσώρευση ποσότητας φερομόνης, τότε το γεγονός αυτό αποτελεί ένα νέο σημαντικό ερέθισμα που κινητοποιεί τους τερμίτες να εναποθέσουν τα επόμενα χωμάτινα σφαιρίδια στο σωρό αυτό ώστε να σχηματιστεί μία στήλη. Αργότερα, θα σχηματιστούν τα τόξα που ενώνουν τις στήλες μεταξύ τους και τελικά θα δημιουργηθεί η φωλιά. Αν όμως ο πληθυσμός των τερμιτών δεν είναι αρκετά μεγάλος, τότε ένεκα της εξάτμισης της φερομόνης δεν συσσωρεύεται ποτέ η απαιτούμενη ποσότητα σφαιριδίων και της ανάλογης φερομόνης που θα ενεργοποιήσει την επόμενη φάση της κατασκευής της φωλιάς [4] [6] [7]. Μέσα από αυτήν τη διαδικασία συμπεραίνουμε ότι η στιγμεργική πληροφορία είναι τοπική, γεγονός που συνεπάγεται ότι δύναται να είναι προσβάσιμη μόνο από αυτά τα μυρμηγκια που επισκέπτονται το γεωμετρικό τόπο στον οποίο απελευθερώθηκε η φερομόνη.



Σχήμα 5: Συμπεριφορά Αληθινών Μυρμηγκιών

Η επιτυχημένη διεκπεραίωση της διαδικασίας εύρεσης τροφής και επιστροφής πίσω στη φωλιά που απεικονίζεται στο Σχήμα 5 γίνεται με βέλτιστο τρόπο και βασίζεται στην αυτο-οργάνωση (SO) που διαθέτουν οι αποικίες μυρμηγκιών. Στο Σχήμα 5(α) απεικονίζεται το μονοπάτι που ακολουθούν τα μυρμηγκια ανάμεσα

στη φωλιά (Φ) τους και την τροφή (T) τους. Στο **Σχήμα 5(β)** παρεμβάλλεται ένα εμπόδιο και τα μυρμήγκια το προσπερνούν ακολουθώντας ένα από τα δύο διαφορετικά μονοπάτια με ίση πιθανότητα. Στο **Σχήμα 5(γ)** έχουν εντοπίσει το συντομότερο μονοπάτι που έχει την περισσότερη εναπόθεση φερομόνης οπότε και επιλέγουν αυτό για τις μετακινήσεις τους. Αυτό συμβαίνει διότι τα μυρμήγκια που αντιλαμβάνονται την εναπόθεση φερομόνης και τείνουν να ακολουθούν τα μονοπάτια στα οποία η συγκέντρωσή της είναι μεγαλύτερη.

Στα μοντέλα αυτο-οργάνωσης (SO) γίνεται η βασική θεώρηση ότι το κάθε άτομο-έντομο είναι ένας απλός «πράκτορας» (*agent*) που δύναται να διεκπεραιώσει μόνο απλές λειτουργίες. Στην θεώρηση αυτή δεν λαμβάνεται υπόψη η περίπλοκη δομή του μεμονωμένου εντόμου, δηλαδή ποια αισθητήρια όργανα χρησιμοποίησε και γιατί. Τα SO μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί με βάση την παραπάνω θεώρηση επιβεβαιώνουν ότι είναι δυνατόν να εμφανιστούν περίπλοκες συλλογικές συμπεριφορές σε μία αποικία εντόμων. Αναλυτικότερα, η αυτο-οργάνωση είναι ένα σύνολο δυναμικών μηχανισμών με τους οποίους σχηματίζονται δομές σε ένα σύστημα από αλληλεπιδράσεις των συνιστωσών του [3]. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές στηρίζονται καθαρά σε τοπικές πληροφορίες χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τη συνολική εικόνα του συστήματος.

3.2.2 Τεχνητές Αποικίες Μυρμηγκιών

Η αρχική επινόηση και εισαγωγή του συγκεκριμένου αλγορίθμου από το φυσικό κόσμο στον ψηφιακό έγινε από τον Dorigo [8] και τους συνεργάτες του. Ο αρχικός τους σκοπός ήταν να επιλύσουν με τη χρήση ενός εναλλακτικού αλγορίθμου το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή (*Travelling Salesman Problem, TSP*). Δηλαδή, ένας περιπλανώμενος πωλητής πρέπει να βρει την ελάχιστη διαδρομή που θα διατρέξει προκειμένου να επισκεφθεί όλες τις πόλεις n μέσα σε μία χώρα από μία φορά την καθεμία. Εμπνευσμένοι από διάφορες επιστημονικές μελέτες και κυρίως του Deneubourg [9] [10] [11] που αναφέρονταν στη συμπεριφορά και στην αυτο-οργάνωση αποικιών μυρμηγκιών κατά τη διάρκεια εύρεσης τροφής, δημιούργησαν έναν πρωτοποριακό αλγόριθμο συστήματος μυρμηγκιών (*Ant System, AS*) [8] [12] που βασίστηκε στην έμμεση επικοινωνία των μυρμηγκιών μέσω της φερομόνης κατά την αναζήτηση και συλλογή τροφής.

Ο αλγόριθμος AS βασιζόμενος στο υπολογιστικό πλαίσιο των μυρμηγκιών, κατά την εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ της φωλιάς τους και της τοποθεσίας της τροφής, επιτυγχάνει να επιλύει διακριτά προβλήματα όπως το TSP με πολύ καλά αποτελέσματα. Ως αποτέλεσμα είχε τη δημιουργία μίας σειράς βελτιωμένων εκδοχών του, *Ant Colony System (ACS)* [13], *AS-rank* [14], *ANT-Q* [15], *Max-Min Ant System (MMAS)* [16], οι οποίοι βρίσκουν πολλαπλές εφαρμογές σε πληθώρα θεωρητικών και τεχνικών προβλημάτων [3] [7].

Στο παρόν κεφάλαιο 3 της διατριβής ασχολούμαστε με τα τεχνητά μυρμήγκια (*artificial ants*) έχοντας ως βάση τη μεθοδολογία βελτιστοποίησης με αποικίας μυρμηγκιών (*Ant Colony Optimization, ACO*). Έτσι θα

παρουσιασθεί ένας ACO αλγόριθμος που στόχο έχει τη βέλτιστη κατανομή πόρων του υπολογιστικού πλέγματος επιτυγχάνοντας μέσω αυτού την εξισορρόπηση φόρτου μέσα στο δίκτυο συμβάλλοντας ταυτόχρονα στη βέλτιστη λειτουργία του. Για αυτόν το λόγο πρέπει να μετατρέψουμε τα φυσικά βιολογικά μοντέλα σε τεχνητά αλγοριθμικά μοντέλα ώστε να επιτευχθεί η εφαρμογή τους σε περιβάλλον υπολογιστικού πλέγματος. Σκοπός της μετατροπής είναι ο εφοδιασμός με τα απαραίτητα υπολογιστικά εργαλεία για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης μέσα στο πλέγμα. Πριν αναλυθεί αυτό το ζήτημα περαιτέρω θα πρέπει να πραγματοποιηθούν ορισμένες παραδοχές. Προφανώς, τα τεχνητά μυρμηγκία (*artificial ants*) αποτελούν μία απλοποίηση των πραγματικών μυρμηγκιών αλλά θα εμπλουτιστούν ταυτόχρονα με επιπρόσθετες ιδιότητες που δεν εμφανίζονται στα φυσικά μυρμηγκία και θα παραμετροποιούνται ανάλογα το αντίστοιχο πρόβλημα επίλυσης που καλούνται να βελτιστοποιήσουν μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα.

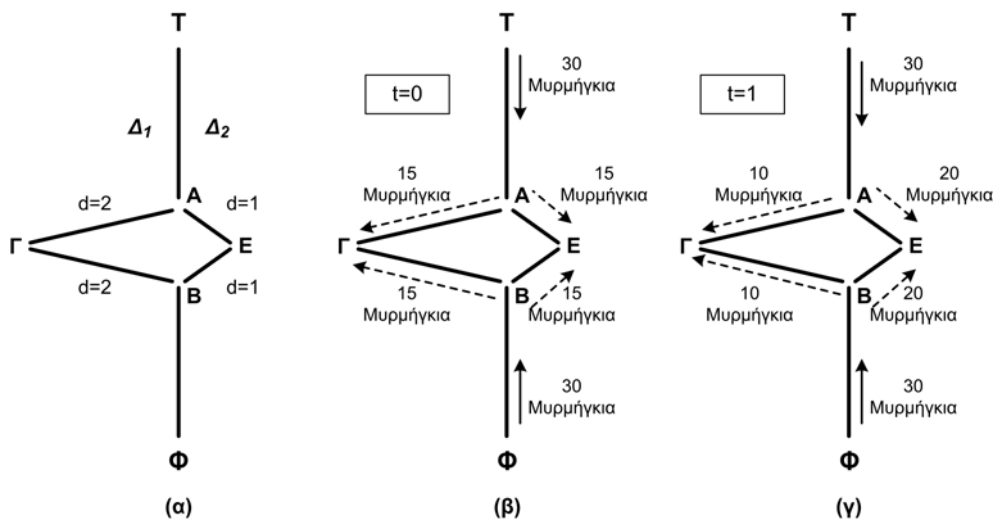
Οι ομοιότητες των τεχνητών μυρμηγκιών με τα φυσικά είναι οι εξής [7]:

- *Αποικία ή Πληθυσμός.* Όπως στα φυσικά μυρμηγκία έτσι και στα τεχνητά υπάρχει μία αποικία ατόμων τα οποία συνεργάζονται προκειμένου να δημιουργήσουν μία συγκεκριμένη δομή στο σύστημά τους. Η δομή αυτή στα υπό μελέτη προβλήματα, στην παρούσα διατριβή, αντιστοιχεί στην εύρεση βέλτιστης λύσης μέσα σε περιβάλλον υπολογιστικού πλέγματος. Ο πληθυσμός των τεχνητών μυρμηγκιών είναι μία παράμετρος η οποία είναι σε άμεση συνάρτηση με το είδος του προβλήματος.
- *Φερομόνη.* Ορισμένα είδη πραγματικών μυρμηγκιών εναποθέτουν φερομόνη στο έδαφος κατά την κίνησή τους. Ομοίως και τα τεχνητά μυρμηγκία εναποθέτουν στις διάφορες θέσεις τις οποίες επισκέπτονται μία συγκεκριμένη αριθμητική πληροφορία, την τεχνητή φερομόνη, οπότε δημιουργούνται μονοπάτια φερομόνης. Αυτή η αριθμητική πληροφορία θα εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα της τροφής που έχουν εντοπίσει, δηλαδή την επίδοση, καθώς και την προηγούμενη ιστορία του τεχνητού μυρμηγκιού ενώ θα είναι προσβάσιμη και από τα υπόλοιπα μέλη της αποικίας εγκαθιδρύοντας με αυτόν τον τρόπο έμμεση επικοινωνία, δηλαδή τη στιγμεργία [5]. Τέλος, η τεχνητή φερομόνη όπως και η φυσική πρέπει να εξατμίζεται έτσι ώστε να υπάρχει αρνητική ανάδραση και να μην εγκλωβίζονται τα άτομα σε τοπικά βέλτιστες λύσεις.
- *Απόφαση.* Όπως τα φυσικά έτσι και τα τεχνητά μυρμηγκία αποφασίζουν την επόμενη κίνησή τους βασισμένα σε κάποια στοχαστικότητα. Τα δεδομένα που έχουν στη διάθεσή τους είναι καθαρά τοπικά στο χώρο και το χρόνο. Αναλυτικότερα, τα μυρμηγκία είτε πραγματικά είτε τεχνητά δεν έχουν γνώση του τι συμβαίνει σε κάποιο άλλο σημείο όπου δραστηριοποιούνται τα υπόλοιπα μυρμηγκία της αποικίας αλλά ούτε και τη γενικότερη κατάσταση της αποικίας. Επίσης, δεν γνωρίζουν τι έγινε τις προηγούμενες χρονικές στιγμές στο σημείο όπου βρίσκονται αλλά ούτε δύναται να προβλέψουν μελλοντικές καταστάσεις.

Τέλος, τα τοπικά δεδομένα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: (i) Τα δεδομένα που είναι γνωστά εκ των προτέρων στο φυσικό μοντέλο είναι η μορφολογία του εδάφους, ενώ στο τεχνητό περιβάλλον η ευριστική

πληροφορία (*heuristic information*) όπου στο πρόβλημα TSP είναι η συνάρτηση της απόστασης των πόλεων και (ii) Τα δεδομένα από τις τοπικές αλλαγές στο περιβάλλον, όπως είναι τα μονοπάτια φερομόνης.

Με βάση την παραπάνω προσέγγιση μετατρέπουμε το φυσικό μοντέλο (βλ. Σχ. 5) σε παραδοχή τεχνητών μυρμηγκιών (*artificial ants*) εξάγοντας το **Σχήμα 6**. Το **Σχήμα 6(α)** απεικονίζει τον αρχικό γράφο με τις αποστάσεις. Το **Σχήμα 6(β)** τη χρονική στιγμή $t=0$, δεν υπάρχει ίχνος στις άκρες του γράφου και συνεπώς τα μυρμηγκία δύναται να επιλέξουν να πάνε αριστερά ή δεξιά με ίση πιθανότητα. Το **Σχήμα 6(γ)** τη χρονική στιγμή $t=1$, το ίχνος είναι εντονότερο στις συντομότερες άκρες οι οποίες ως εκ τούτου γίνονται προτιμητέες από την πλειοψηφία των μυρμηγκιών.



Σχήμα 6: Συμπεριφορά Τεχνητών Μυρμηγκιών

Έστω L_i η αριστερή διαδρομή (Δ_1) και R_i η διαδρομή (Δ_2) αντίστοιχα. Τα μυρμηγκία που έχουν επιλέξει την αριστερή και τη δεξιά διαδρομή αντίστοιχα μετά το πέρας της κίνησης του i -οστού μυρμηγκιού, θα έχουμε $i = L_i + R_i$ όπου θα είναι ο συνολικός αριθμός των μυρμηγκιών που έχουν περάσει το σημείο επιλογής διακλάδωσης A . Τότε η πιθανότητα P_L το επόμενο μυρμηγκί ($i+1$) να επιλέξει την αριστερή διαδρομή (Δ_1) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_L = \frac{(k + L_i)^n}{(k + L_i)^n + (k + R_i)^n} = 1 - P_R \tag{1}$$

Όπου n η παράμετρος που καθορίζει το βαθμό μη-γραμμικότητας της συνάρτησης επιλογής. Μεγάλη τιμή του n συνεπάγεται ότι μικρή διαφοροποίηση στα επίπεδα φερομόνης στις δύο διαδρομές αυξάνει κατά πολύ την πιθανότητα επιλογής ενός κλάδου εκ των δύο από το επόμενο μυρμηγκί.

Όπου k η παράμετρος που ποσοτικοποιεί το βαθμό ελκυστικότητας μίας διαδρομής που δεν έχει εναποτεθεί φερομόνη. Όσο μεγαλύτερη τιμή έχει η παράμετρος k τόσο μεγαλύτερη ποσότητα φερομόνης απαιτείται ώστε η επιλογή ενός κλάδου να μην είναι πλέον τυχαία. Η επιλογή όμως μίας από τις δύο διαδρομές του μυρμηγκιού του **Σχήματος 6** θα δοθεί από την παρακάτω σχέση.

$$L_{i+1} = \begin{cases} L_i+1 & \text{αν } \delta \leq P_L \\ L_i & \text{αν } \delta > P_L \end{cases} \quad \text{και} \quad R_{i+1} = \begin{cases} R_i+1 & \text{αν } \delta > P_L \\ R_i & \text{αν } \delta \leq P_L \end{cases} \quad (2)$$

όπου δ είναι μία τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανεμημένη στο διάστημα $[0,1]$.

Τέλος, στα τεχνητά μυρμήγκια μπορούν να προσθέτουν προαιρετικά επιπλέον ικανότητες εστιάζοντας στα εξής:

- *Μνήμη*: Σκοπός της είναι να θυμούνται τα «μυρμήγκια» τις προηγούμενες πράξεις τους μέσω διαδικασιών όπως είναι η λίστα μνήμης (Tabu List) στο TSP ή άλλες χρήσιμες πληροφορίες.
- *Όραση και Αισθητήρια Όργανα*: Με σκοπό να εκμεταλλεύονται καλύτερα τις πληροφορίες του περιβάλλοντος και να είναι σε θέση να υπολογίσουν εκ των προτέρων τις αποστάσεις των πόλεων στο TSP και όχι αφού έχουν ολοκληρώσει μία διαδρομή.
- *Διάκριση Χώρου-Χρόνου*: Επιλύει διακριτά προβλήματα όπως είναι οι κινήσεις των μυρμηγκιών στο TSP που είναι διακριτές από πόλη σε πόλη και πραγματοποιούνται σε διακριτές χρονικές στιγμές.
- *Εναπόθεση Φερομόνης*: Τα φυσικά μυρμήγκια εναποθέτουν συνεχώς φερομόνη σε αντίθεση με τα τεχνητά που δύναται να δοθεί η ικανότητα εναπόθεσης φερομόνης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.
- *Αλγόριθμοι*: Υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης αλγορίθμων για τη βελτίωση της απόδοσης του συστήματος.

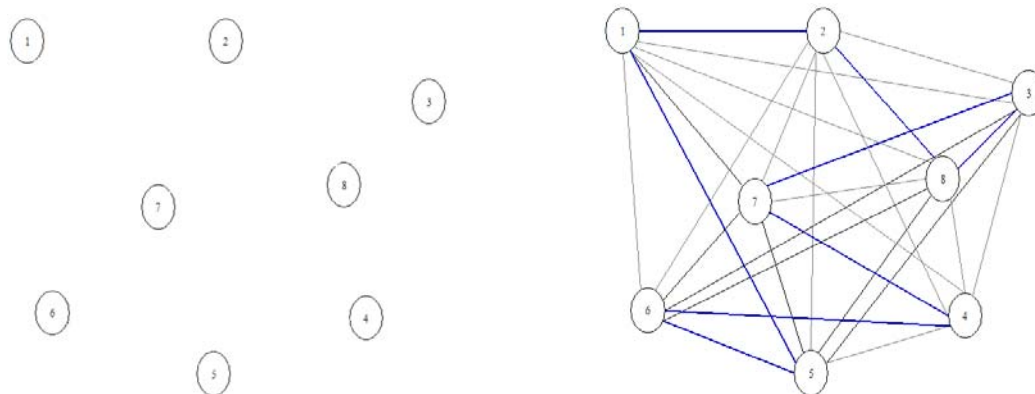
3.2.3 Αλγόριθμος Συστήματος Μυρμηγκιών

Όπως ήδη έχει αναφερθεί προηγουμένως, ο πρώτος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε με σκοπό τη βελτιστοποίηση με αποικίες μυρμηγκιών ήταν ο AS (*Ant System*) που επινοήθηκε και προτάθηκε από τον M. Dorigo και τους συνεργάτες του [8]. Βέβαια από τη στιγμή της παρουσίας του έχουν αναπτυχθεί διάφορες παραλλαγές και τροποποιήσεις του [13] [15] [16] που σκοπό έχουν να επιλύσουν ή να βελτιστοποιήσουν την απόδοσή του.

Η πρώτη του εφαρμογή έγινε στο πρόβλημα TSP, δηλαδή την αναζήτηση της βέλτιστης χαμιλτονιανής διαδρομής σε έναν γράφο πόλεων. Σημειώνοντας δε, ότι ο αλγόριθμος AS δεν είχε σαν κύριο σκοπό την επίλυση του TSP προβλήματος. Η επιλογή και εφαρμογή του AS σε αυτό το πρόβλημα έγινε σε αναλογία με το πραγματικό φυσικό φαινόμενο αναζήτησης της βέλτιστης διαδρομής των μυρμηγκιών μεταξύ της φωλιάς μίας αποικίας και της ανευρεθείσας τροφής.

Το ζητούμενο σε ένα πρόβλημα TSP, όπως αυτό απεικονίζεται στο **Σχήμα 7** είναι η εύρεση της συντομότερης διαδρομής που συνδέει n πόλεις. Ο μόνος περιορισμός που τέθηκε είναι ότι η κάθε πόλη πρέπει να περιλαμβάνεται μία φορά στη διαδρομή και ότι η διαδρομή πρέπει να είναι κλειστή, δηλαδή ο περιπλανώμενος πωλητής πρέπει να επιστρέψει στην αρχική του πόλη από όπου ξεκίνησε. Οι αποστάσεις μεταξύ των πόλεων δεν είναι απαραίτητο να είναι συμμετρικές. Αν η απόσταση από την πόλη i στη j δύναται

να είναι διαφορετική από την απόσταση από την j πόλη στην i , τότε αυτό καλείται Ασύμμετρο Πρόβλημα Περιπλανώμενου Πωλητή (*Asymmetric Traveling Salesman Problem, ATSP*).



Σχήμα 7: Κατανομή Πόλεων και Βέλτιστη Λύση στο Πρόβλημα TSP

Η κάθε λύση για το TSP σχηματίζεται με τη διαδοχική μετάβαση των τεχνητών μυρμηγκιών από τη μία πόλη στην άλλη με κάποια πιθανότητα. Η διαδρομή ολοκληρώνεται όταν το τεχνητό μυρμήγκι επιστρέψει στην αρχική πόλη όπου και βαθμολογείται η λύση που έχει επιτύχει με κριτήριο το συνολικό μήκος της διαδρομής ενώ προστίθεται η ανάλογη φερομόνη στο μονοπάτι που ακολούθησε. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε μυρμήγκι της αποικίας μέχρι να συμπληρωθεί ο ζητούμενος αριθμός επαναλήψεων. Μία επανάληψη (*iteration*) πραγματοποιείται όταν όλα τα μυρμήγκια ολοκληρώσουν τα ταξίδια (*tours*) τους. Επίσης, η ολοκλήρωση μίας επανάληψης ισοδυναμεί με τη διέλευση μίας χρονικής μονάδας. Συνεπώς, όταν αναφερόμαστε στη χρονική στιγμή t προϋποθέτουμε ότι έχουν ολοκληρωθεί t επαναλήψεις.

Σε κάθε περίπτωση εφαρμογής οποιουδήποτε αλγορίθμου για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος, χρειάζεται να γίνουν ορισμένες επιλογές και συμβάσεις ως προς τον τρόπο που θα αλληλεπιδρά η διαδικασία βελτιστοποίησης με το φυσικό πρόβλημα. Τα δύο σημεία στα οποία πρέπει να γίνει αυτό είναι η καθοδήγηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης οδηγώντας έτσι στην κατασκευή νέων δυνατών λύσεων και δεύτερον η συνάρτηση κόστους που αξιολογεί μία λύση και ενημερώνει τον αλγόριθμο για την καταλληλότητά της. Στο πρόβλημα TSP, η σύνδεση της βελτιστοποίησης με το φυσικό πρόβλημα είναι ιδιαίτερα απλή και προφανής. Δηλαδή, ο αλγόριθμος λειτουργεί εσωτερικά με διαδρομές μεταξύ σημείων ενώ η αξιολόγηση των λύσεων είναι ιδιαίτερα εύκολη αφού απαιτείται απλά ο υπολογισμός της συνολικής απόστασης. Ως εκ τούτου ο αλγόριθμος, δηλαδή οι διαδρομές μυρμηγκιών χρειάζονται πολύ μικρές παρεμβάσεις για να μετασχηματισθεί σε διαδρομές επάνω στο γράφο του προβλήματος, ενώ για την αξιολόγηση αρκεί μία άθροιση των επιμέρους αποστάσεων.

Κάθε σύνδεσμος μεταξύ δύο πόλεων περιγράφεται από ένα ζεύγος (i, j) που υποδηλώνει την i -οστή πόλη αρχής και την j -οστή πόλη τερματισμού. Ο Dorigo διαπίστωσε ότι $m=n$, δηλαδή ο αρχικός πληθυσμός m των ψηφιακών-τεχνητών μυρμηγκιών πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των πόλεων n του προβλήματος. Σε

περιπτώσεις όπου ο πληθυσμός της αποικίας είναι μεγάλος τότε πραγματοποιείται σύγκλιση σε τοπικά βέλτιστα, ενώ αν είναι πολύ μικρός δεν λειτουργεί η στιγμεργετική επικοινωνία μεταξύ των μυρμηγκιών.

Η τοποθέτηση των μυρμηγκιών δύναται να πραγματοποιηθεί με τυχαίο τρόπο στις πόλεις είτε το καθένα σε μία διαφορετική πόλη ως αφετηρία της διαδρομής του. Η πόλη αυτή καταγράφεται ως νούμερο «ένα» στη λίστα μνήμης (*tabu list*) κάθε μυρμηγκιού. Η λίστα μνήμης (*tabu list*) είναι μία λίστα που περιέχει τις πόλεις που έχει ήδη επισκεφθεί το μυρμήγκι έτσι ώστε αυτές να αποκλειστούν από τις επόμενες δυνατές επιλογές του. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου AS, είναι ότι η δημιουργία της συνολικής διαδρομής γίνεται μέσω της διαδοχικής επιλογής συνδέσμων και όχι πόλεων.

Κάθε μυρμήγκι k κατά την επανάληψη t που βρίσκεται στην πόλη i επιλέγει την επόμενη πόλη j που θα επισκεφθεί με βάση τον τυχαίο-αναλογικό κανόνα μετάβασης (*random proportional transition rule*), που εκφράζει την πιθανότητα το μυρμήγκι k να μετακινηθεί από την πόλη i στην j τη χρονική στιγμή t . Ο τυχαίο-αναλογικός κανόνας μετάβασης δίνεται να καθορισθεί από την παρακάτω σχέση.

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}(t)]^\beta} & \text{αν } j \notin J_i^k \\ 0 & \text{αν } j \in J_i^k \end{cases} \quad (3)$$

όπου J_i^k είναι οι πόλεις που έχει ήδη επισκεφθεί το μυρμήγκι k όταν βρίσκεται στην πόλη i του *tabu list*, $\eta_{ij}(t)$ είναι η *ορατότητα* (*visibility*) και ορίζεται ως το αντίστροφο της απόστασης μεταξύ των πόλεων i και j , δηλαδή $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$.

Η ορατότητα εκφράζει την ευρετική προτίμηση (*heuristic desirability*) ως επόμενου σταθμού της πόλης j όταν το μυρμήγκι βρίσκεται στην πόλη i και βασίζεται καθαρά σε τοπικές πληροφορίες. Η πληροφορία αυτή είναι αναλλοίωτη στο TSP καθώς δεν μεταβάλλεται κατά την επίλυση του προβλήματος, δηλαδή $\eta_{ij}(t) = \eta_{ij}$.

Όπου $\tau_{ij}(t)$ είναι η ποσότητα της φερομόνης που βρίσκεται στην ακμή που ενώνει τις πόλεις i και j . Η πληροφορία αυτή έχει γενικό χαρακτήρα καθώς εκφράζει την τρέχουσα γνώση από την εμπειρία, δηλαδή τη φερομόνη όλης της αποικίας των μυρμηγκιών. Κατά τη χρονική στιγμή $t=0$ που είναι η πρώτη επανάληψη, η φερομόνη τίθεται σε κάθε ακμή ij σε μία αρχική τιμή τ_0 πάρα πολύ μικρή. Η σχέση των α και β παραμέτρων καθορίζει τη συνολική συμπεριφορά του αλγορίθμου, καθορίζονται από τον χρήστη του συστήματος και εξαρτώνται από το εκάστοτε πρόβλημα που τίθεται προς επίλυση. Οπότε, για $\alpha=0$ ο αλγόριθμος δεν χρησιμοποιεί την εμπειρία της αποικίας, δηλαδή τη φερομόνη και επομένως μετατρέπεται σε έναν «άπληστο» αλγόριθμο (*greedy algorithm*) καθώς βασίζεται μόνο σε τοπικά δεδομένα, έχοντας πολλαπλά σημεία εκκίνησης αφού κάθε μυρμήγκι ξεκινάει το ταξίδι (*tour*) του από διαφορετική πόλη. Ενώ για $\beta=0$ ο αλγόριθμος έχει την τάση να συγκλίνει γρήγορα προς τοπικά βέλτιστα.

Η εναπόθεση του ίχνους φερομόνης απαιτεί την αξιολόγηση της κάθε λύσης ώστε να καθορισθεί η ποσότητα εναπόθεσής της. Ως εκ τούτου, το ίχνος φερομόνης είναι δυναμικό και μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Η ποσότητα που παράγει κάθε λύση k δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L^k(t) & \text{αν } (i,j) \in T^k(t) \\ 0 & \text{αν } (i,j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (4)$$

όπου L^k είναι το συνολικό μήκος του ταξιδιού $T^k(t)$ του μυρμηγκιού k , ενώ εναποτίθεται σε όλους τους συνδέσμους (i,j) που περιλαμβάνει αυτή. Η σταθερή παράμετρος Q ορίζεται από τον χρήστη αλλά δεν επηρεάζει την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου με συνέπεια να μην περικλείεται σε άλλους αλγόριθμους. Στους συνδέσμους που δεν ανήκουν στην λύση k η συνεισφορά αυτής είναι μηδενική και τελικά η συνολική εναπόθεση φερομόνης σε έναν κύκλο είναι το άθροισμα όλων των μυρμηγκιών που δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (5)$$

Ενώ παράλληλα με την δημιουργία νέου ίχνους φερομόνης εξατμίζεται το παλαιότερο και η ανανέωση της φερομόνης μετά από κάθε κύκλο διαμορφώνεται σύμφωνα με τη σχέση.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad \text{με } \rho \quad 0 \leq \rho < 1 \quad (6)$$

Ο Dorigo αναπαράγοντας και προσαρμόζοντας την έννοια του ελιτισμού [8] όπως αυτή χρησιμοποιείται στους εξελικτικούς αλγορίθμους εισήγαγε την ιδέα των ελιτιστικών μυρμηγκιών (*elitist ants*) στον αλγόριθμο AS δημιουργώντας τον αλγόριθμο AS_e . Σε αυτήν την περίπτωση ένας επιπλέον αριθμός μυρμηγκιών, έστω e , ενισχύει την βέλτιστη διαδρομή T_{best} που έχει βρεθεί έως και την τρέχουσα επανάληψη t με επιπλέον φερομόνη ίση με eQ/L_{best} . Συνεπώς, η προηγούμενη Εξ. 6 μετασχηματίζεται στον κανόνα ελιτιστικής ενημέρωσης της φερομόνης (*elitist pheromone update rule*) που δίδεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) + e\Delta\tau_{ij}^e(t) \quad (7)$$

όπου,

$$\Delta\tau_{ij}^e(t) = \begin{cases} Q/L_{best}(t) & \text{αν } (i,j) \in T_{best}(t) \\ 0 & \text{αν } (i,j) \notin T_{best}(t) \end{cases} \quad (8)$$

με $L_{best}(t)$ το μήκος της ολικά βέλτιστης διαδρομής μέχρι τη χρονική στιγμή t και $T_{best}(t)$ η αντίστοιχη σειρά των πόλεων.

Ο AS ένεκα της ευελιξίας του φυσικού μοντέλου στο οποίο βασίζεται είναι ευπροσάρμοστος. Το γεγονός αυτό τον κάνει άμεσα αξιοποιήσιμο σε δυναμικώς μεταβαλλόμενα προβλήματα, δηλαδή σε προβλήματα στα οποία η ευρετική πληροφορία, δηλαδή η ορατότητα μεταβάλλεται.

Η στασιμότητα (*stagnation*) στους διακριτούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών (*Ant Colony Optimization, ACO*) ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία όλα τα μυρμήγκια ακολουθούν την ίδια διαδρομή. Κατά τη στασιμότητα το χρησιμοποιούμενο μονοπάτι ενισχύεται συνεχώς με νέα φερομόνη εγκλωβίζοντας όλα τα μυρμήγκια στην ίδια διαδρομή χωρίς δυνατότητα διαφυγής. Η στασιμότητα δύναται να θεωρηθεί ως επιθυμητή στην περίπτωση που τα μυρμήγκια εντόπιζαν την ολικά βέλτιστη διαδρομή. Σε κάθε άλλη περίπτωση, πρέπει να γίνονται προσπάθειες αποτροπής εμφάνισης στασιμότητας κατά την επίλυση ενός προβλήματος.

Αν αποφευχθεί η εμφάνιση στασιμότητας χρησιμοποιώντας κατάλληλες μεθόδους, όπως είναι π.χ. ο υψηλός ρυθμός εξάτμισης της φερομόνης, τότε ο αλγόριθμος ψάχνει πάντοτε για νέες λύσεις όπως προκύπτει και από τον αριθμό διακλάδωσης των κόμβων (*node branching number*) [3]. Ο αριθμός διακλάδωσης των κόμβων μίας πόλης είναι ο αριθμός των ακμών που συνδέουν την πόλη αυτή με τις υπόλοιπες και που έχουν ποσότητα φερομόνης μεγαλύτερη από ένα όριο. Όταν έχει επέλθει στασιμότητα τότε ο αριθμός αυτός ισούται με 2 σε κάθε πόλη, δηλαδή η μία ακμή είναι αυτή που οδηγεί το μυρμήγκι στην πόλη και η άλλη αυτή που το απομακρύνει.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο του αλγορίθμου AS είναι η άμεση και εύκολη εφαρμογή της παράλληλης επεξεργασίας βελτιώνοντας κατά πολύ την απόδοσή του. Η διαδρομή κάθε μυρμηγκιού ή μίας ομάδας μυρμηγκιών είναι δυνατόν να υπολογίζεται από διαφορετικούς επεξεργαστές οι οποίοι ανταλλάσσουν δεδομένα ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η μελέτη της βέλτιστης πολιτικής ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ Πολλαπλών Αποικιών των Μυρμηγκιών (*Multi Colony Ant Algorithms*) έχει ως αποτέλεσμα να δραστηριοποιούνται παράλληλα σε διαφορετικούς επεξεργαστές [18].

Η παράλληλη εκτέλεση πολλών ανεξάρτητων αλγορίθμων MMAS (*Max-Min Ant System*) σε σχέση με μία μεγάλη εκτέλεση του ίδιου αλγορίθμου στον ίδιο υπολογιστικό χρόνο, έχει ως αποτέλεσμα η παράλληλη εκτέλεση να παράγει καλύτερα αποτελέσματα στον ίδιο υπολογιστικό χρόνο ιδίως όταν κάθε ανεξάρτητος αλγόριθμος MMAS (*Max-Min Ant System*) εκτελείται με διαφορετικές παραμέτρους [19]. Αυτή η τακτική κάνει ιδιαίτερα εύρωστο (*robust*) τον αλγόριθμο εμφανίζοντας βέλτιστη απόδοση σε διαφορετικά προβλήματα. Ακόμη ένα συμπέρασμα που εξάγεται από αυτή την εργασία είναι ότι για την καλύτερη απόδοση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών (*Ant Colony Optimization, ACO*) είναι απαραίτητη η επαναρχικοποίησή τους σε περίπτωση που δεν εντοπίζουν νέα βέλτιστη λύση. Το τελευταίο ισοδυναμεί με παράλληλη εκτέλεση του αλγορίθμου.

Αφού όλα τα μυρμήγκια ολοκληρώσουν τα ταξίδια (*tours*) τους σε κάθε επανάληψη, τότε προστίθεται φερομόνη σε κάθε μονοπάτι ανάλογα με την επίδοση του κάθε μυρμηγκιού. Σημαντικός παράγοντας στην όλη διαδικασία είναι και η εισαγωγή ενός παράγοντα σχετικού με την εξάτμιση της φερομόνης. Κατά αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ενίσχυση των αρχικών τυχαίων διακυμάνσεων. Έτσι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών δύναται να συνοψισθεί στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Αποικίες Μυρμηγκιών

-
1. Θέτουμε τη φερομόνη στην αρχική της τιμή είτε σε μία πολύ μικρή τιμή είτε σε μία τυχαία τιμή σε όλα τα μονοπάτια που συνδέουν τις πόλεις μεταξύ τους. Υπολογίζουμε όλες τις αποστάσεις των πόλεων. Επιλέγουμε τυχαία την πόλη-αφετηρία της διαδρομής κάθε μυρμηγκιού και την τοποθετούμε στην λίστα της μνήμης του.
 2. Για κάθε μυρμήγκι, επιλέγουμε την επόμενη πόλη που θα επισκεφθεί με βάση τον τυχαίο αναλογικό κανόνα μετάβασης (Εξ. 3) μέχρι να ολοκληρώσει τη διαδρομή του επισκεπτόμενο κάθε πόλη μία μόνο φορά όπου τελικά θα επιστρέψει στην αφετηρία του.
 3. Καταγράφουμε την καλύτερη διαδρομή που βρέθηκε.
 4. Ανανεώνουμε τη φερομόνη στα μονοπάτια που επισκέφτηκαν τα μυρμήγκια με βάση τον κανόνα ανανέωσης της φερομόνης. Σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθούν ελιτιστικά μυρμήγκια, τότε στην Εξ. 7 έχουμε $e=0$.
 5. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το Βήμα 2 μέχρι έως ότου ολοκληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων ή να επιτευχθεί ένα κριτήριο σύγκλισης.
-

3.3 Υπολογιστικό Πλέγμα και Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών

Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα έχει εστιάσει τις προσπάθειές της στο αρχικό όραμα των δικτύων πλέγματος, που είναι μία παγκόσμια διαδίκτυωμένη και ενοποιημένη υποδομή πλέγματος. Βέβαια απέχουμε αρκετά από αυτόν το στόχο αλλά η ολοένα αυξανόμενη διάδοση του Διαδικτύου, η εύκολη πρόσβαση σε υπολογιστικά συστήματα με αυξημένη επεξεργαστική ισχύ και η απότομη αύξηση του εύρους ζώνης σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους παραγωγής τους κατέφεραν να αλλάξουν την επιστήμη των υπολογιστών. Ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων μαζί με την εξέλιξη των κατανεμημένων συστημάτων υποβοήθησαν στη δημιουργία των δικτύων πλέγματος (*Grids*), έτσι όπως τα γνωρίζουμε σήμερα.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος χρησιμοποιεί τους κατανεμημένους ετερογενείς πόρους για να επιτύχει την επίλυση πολύπλοκων υπολογιστικών προβλημάτων. Η επιστημονική κοινότητα είχε πάντοτε αυξημένες ανάγκες σε υπολογιστική και αποθηκευτική ισχύ. Τα υπολογιστικά πλέγματα έλυσαν επιτυχώς αυτόν τον περιορισμό. Οι κυριότερες κατηγορίες που διαχωρίζονται τα δίκτυα πλέγματος είναι τα πλέγματα υπολογιστικής ισχύος και δεδομένων

Παρόλα αυτά πρέπει εστιάσουμε σε τομείς όπως του δικτύου και των διαμοιραζόμενων πόρων με σκοπό με σκοπό να επιτύχουμε καλύτερη απόδοση αυτών μέσα σε ένα δίκτυο πλέγματος. Αυτός ο λόγος έγκειται στο ότι αν οι διαμοιραζόμενοι πόροι ή/και το δίκτυο είναι ασταθές τότε θα έχει ως συνέπεια οι υποβαλλόμενες εργασίες να αποτυγχάνουν ή ο χρόνος υπολογισμού αυτών να είναι υπερβολικά μεγάλος. Για αυτόν το λόγο παρουσιάζεται η επιτακτική ανάγκη ύπαρξης ενός αποτελεσματικού αλγορίθμου

χρονοπρογραμματισμού εργασιών (*job scheduling*) ο οποίος θα είναι σε θέση να επιλύει επιτυχώς τα συγκεκριμένα προβλήματα.

Στο φυσικό περιβάλλον, τα μυρμήγκια έχουν τρομερή δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ τους συνδυάζοντας ταυτόχρονα μία εκπληκτική ικανότητα στην ανεύρεση της βέλτιστης διαδρομής που διανύουν με σκοπό να βρουν την τροφή τους. Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου, θα παρουσιασθεί ένας αλγόριθμος εξισορρόπησης φόρτου που βασίζεται στη βελτιστοποίηση με αποικίες μυρμηγκιών (*Ant Colony Optimization, ACO*) επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα το βέλτιστο χρονοπρογραμματισμός εργασιών μέσα σε ένα περιβάλλον υπολογιστικού πλέγματος (*Grid*). Η κύρια συμβολή του προτεινόμενου αλγορίθμου που θα παρουσιάσουμε έγκειται στην εξισορρόπηση φόρτου μέσα σε ολόκληρο το δίκτυο πλέγματος που επιτυγχάνεται δια μέσου της ελαχιστοποίησης του χρόνου εργασιών (*makespan*) ως προς το σύνολο των υποβιβλημένων εργασιών στο δίκτυο [20].

Ο χρονοπρογραμματισμός εργασιών (*job scheduling*) μέσα σε ένα δίκτυο πλέγματος αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα απόδοσης του συνολικού δικτύου. Για να πετύχουμε πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων που παρέχονται από την συγκεκριμένη τεχνολογία χρειαζόμαστε έναν αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού εργασιών που θα υποβάλλει επιτυχώς τις εργασίες των χρηστών στους πόρους του δικτύου. Ο κατά ACO αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού εργασιών που θα παρουσιασθεί στη συνέχεια έχει ως στόχο την εξισορρόπηση φόρτου μέσα σε ολόκληρο το δίκτυο πλέγματος, καθώς θα φέρει εις πέρας όλες τις υποβαλλόμενες εργασίες σε όσον το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα επιτρέπει η κατάσταση του δικτύου [20]. Σε δυναμικά δικτυακά περιβάλλοντα όπως το συγκεκριμένο, αλγόριθμοι όπως ο FCFS (*First Come First Serve, FCFS*) και ο SJF (*Shortest Job First, SJF*) δεν κρίνονται επαρκείς.

Ένα δίκτυο πλέγματος δύναται να απαρτίζεται από μερικούς υπολογιστές έως μερικές εκατοντάδες χιλιάδες υπολογιστών ενώ είναι αδύνατον για τους χρήστες του δικτύου να αναθέτουν εργασίες στους πόρους του πλέγματος χειροκίνητα. Για αυτόν το λόγο υπάρχει η επιτακτική ανάγκη για χρησιμοποίηση νέων αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού εργασιών (*job scheduling*) παρόλο που έχουν προταθεί διάφοροι όλα αυτά τα έτη. Το χαρακτηριστικό ενός κατάλληλου αλγορίθμου για τα δίκτυα πλέγματος είναι ότι μπορεί να προσαρμόζει την χρονοπρογραμματιστική στρατηγική του ανάλογα με το περιβάλλον του δικτύου και τους τύπους των υποβαλλομένων εργασιών. Η χρήση ενός δυναμικού αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού εργασιών σαν τον ACO κρίνεται επιτακτική στα δίκτυα πλέγματος.

Στο παρόν κεφάλαιο θα εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών (*ACO*) σε περιβάλλον υπολογιστικού πλέγματος. Αρχικά, υποθέτουμε ότι κάθε εργασία αντιστοιχεί σε ένα μυρμήγκι και ο αλγόριθμος στέλνει τα μυρμήγκια να ψάξουν για τροφές. Επίσης, τροποποιούμε τη λειτουργία της καθολικής (*global pheromone*) και τοπικής φερομόνης (*local pheromone*) του ACO αλγορίθμου με σκοπό να την εξισορρόπηση φόρτου για κάθε πόρο του δικτύου. Στο παρόν κεφάλαιο συγκρίνουμε την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου με άλλους αλγόριθμους που έχουν προταθεί όλα αυτά τα έτη. Αυτοί είναι: BACO [48], IACO (*Improved ACO*) [21], FPLTF (*Fastest Processor to Largest Task First*) [22], δυναμικός FPLTF (*Dynamic FPLTF*) [23], Sufferage [23] και ανάμεσα σε μία τυχαία επιλογή αυτών (*Random*). Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της πειραματικής διάταξης εξάγουμε το συμπέρασμα ότι ο

προτεινόμενος ACO αλγόριθμος επιτυγχάνει βέλτιστη κατανομή πόρων μέσα σε ένα πλεγματοειδές περιβάλλον εξισορροπώντας το φόρτο εργασιών καλύτερα από τους υπόλοιπους χρονοπρογραμματιστικούς αλγορίθμους.

3.4 Σχετικές Εργασίες

Οι ACO αλγόριθμοι έχουν γίνει αρκετά δημοφιλείς στην επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με τον χρονοπρογραμματισμό εργασιών [26] [27] [28] ενώ υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα. Υπάρχουν αρκετά διαφορετικά είδη ACO αλγορίθμων με τους πιο ευρέως διαδεδομένους τους Ant Colony System (ACS) [15], Max-Min Ant System (MMAS) [16], Rank-based Ant System (RAS) [24], Fast Ant System (FANT) [25] και Elitist Ant System (EAS) [8].

Ο αλγόριθμος ACS βασίζεται σε μία ψευδοτυχαία τεχνική ώστε να επιτυγχάνει μείωση του χρόνου υπολογισμού των μονοπατιών που θα επιλεγθούν και ενημερώνει τη φερομόνη του βέλτιστου μονοπατιού μόνο, υποβοηθώντας έτσι τα μυρμηγκία να βρουν το βέλτιστο μονοπάτι. Ο MMAS βασίζεται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών περιορίζοντας τη φερομόνη, ενώ της θέτει τιμή μεγαλύτερη ή ίση με το κατώτατο όριο (*Min*) και μικρότερη ή ίση με το ανώτατο όριο (*Max*). Με δεδομένο ότι οι τιμές καθορίζονται από το χρήστη. Ο RAS αλγόριθμος ταξινομεί τα μυρμηγκία ανάλογα με το μέγεθος του ταξιδιού που διανύουν αφού όλα ολοκληρώσουν τα ταξίδια τους. Υποθέτοντας ότι το πρώτο μυρμηγκί βρίσκει το συντομότερο μονοπάτι για να ολοκληρώσει το ταξίδι του ενώ το τελευταίο πραγματοποιεί το ταξίδι του χρησιμοποιώντας το μεγαλύτερο μονοπάτι. Ενώ κάθε μυρμηγκί εναποθέτει διαφορετική ποσότητα φερομόνης στο μονοπάτι. Η κεντρική ιδέα του αλγορίθμου είναι ότι το συντομότερο μονοπάτι θα έχει περισσότερη φερομόνη οπότε θα προσελκύσει και περισσότερα μυρμηγκία επιτυγχάνοντας έτσι τη βέλτιστη λύση σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Ο αλγόριθμος FANT χρησιμοποιεί ένα μυρμηγκί σε κάθε επανάληψη (*iteration*) και εφαρμόζοντας την τοπική έρευνα (*local search*) του μυρμηγκιού παράγεται η βέλτιστη λύση. Η εφαρμογή της τοπικής έρευνας (*local search*) έχει ως αφετηρία την διαδρομή που έχει ήδη κατασκευάσει ένα μυρμηγκί. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δεν εφαρμόζει την τεχνική εξάτμισης φερομόνης αλλά την ενημέρωσή της μετά από κάθε επανάληψη (*iteration*). Ο EAS αλγόριθμος ενισχύει μόνο τη φερομόνη του βέλτιστου μονοπατιού με σκοπό να προσελκύσει περισσότερα μυρμηγκία στην συγκεκριμένη διαδρομή.

Παρόλα αυτά έχουν παρουσιαστεί πολλές μελέτες σχετικά με το χρονοπρογραμματισμό εργασιών (*job scheduling*) και τη βελτιστοποίηση με τις αποικίες μυρμηγκιών (ACO) σε περιβάλλοντα υπολογιστικού πλέγματος [21]. Οι περισσότερες από αυτές βασίζονται στον ACO αλγόριθμο αλλά διαφοροποιούνται ως προς την ενημέρωση, το συντελεστή και την ενίσχυση της φερομόνης. Στο [31] χρησιμοποιούνται πολλαπλά είδη μυρμηγκιών για να βρεθεί το βέλτιστο μονοπάτι δρομολόγησης μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα. Η ιδέα τους βασίστηκε στο να βρεθούν πολλαπλοί διαθέσιμοι πόροι ώστε να πραγματοποιηθεί εξισορρόπηση αυτών μέσω του χρονοπρογραμματισμού εργασιών. Η έρευνά τους βασίστηκε στην παραμετροποίηση της φερομόνης του κάθε μυρμηγκιού με αποτέλεσμα να βρίσκονται πολλαπλά μονοπάτια συμπεριλαμβανομένου

και του συντομότερου μονοπατιού από όλα τα παραμετροποιημένα μυρμήγκια. Παρά τη διαφορετικότητα της προσέγγισης που χρησιμοποιήσαν το αποτέλεσμα ήταν το ίδιο, δηλαδή η χρήση πολλών παραμετροποιημένων μυρμηγκιών είχε το ίδιο αποτέλεσμα με την περίπτωση που χρησιμοποιούσαν μόνο ένα είδος μυρμηγκιού. Επίσης ένα κύριο μειονέκτημα αυτής της μελέτης ήταν η δυσκολία μέτρησης της απόδοσης του κάθε διαφορετικού είδους μυρμηγκιών που χρησιμοποιήσαν.

Στο [32] προτείνεται ένας υβριδικός ACO αλγόριθμος με διαφορετική ορατότητα (*visibility*) στο *job-shop scheduling* πρόβλημα. Ο υβριδικός ACO αλγόριθμος βασίζεται σε δύο μέρη. Πρώτον στηρίζεται στον βασικό αλγόριθμο ACO και δεύτερον η τοπική έρευνα (*local search*) ενσωματώνεται στον αλγόριθμο ACO. Επίσης όταν ο αλγόριθμος ACO εκτελεσθεί πλήρως τότε όλα τα μυρμήγκια έχουν ολοκληρώσει τα ταξίδια τους. Πέραν του TSP προβλήματος, ο ACO χρησιμοποιείται για προβλήματα που σχετίζονται με το *flow-shop* πρόβλημα [33], τον χρονοπρογραμματισμό έργων (*project presentation scheduling*) [34], το πρόβλημα χρωματισμού γράφων (*graph coloring problem*) [35], το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (*vehicle routing problem*) [36].

Εν αντίθεση, με το χρονοπρογραμματισμό εργασιών (*job scheduling*) που έχει μελετηθεί αρκετά μέσα στην επιστήμη των υπολογιστών [37] και με την ανάλογη παραμετροποίηση εφαρμόζεται επιτυχώς σε περιβάλλοντα πλέγματος. Ο FPLTF (*Fastest Processor to Largest Task First*) [38] αλγόριθμος χρονοπρογραμματίζει εργασίες στους πόρους σύμφωνα με το φόρτο (*workload*) των εργασιών (*tasks*) μέσα στο δίκτυο πλέγματος. Αυτός ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη του δύο κύριους παράγοντες, την ταχύτητα της κεντρικής μονάδας επεξεργαστή (*CPU speed*) των πόρων και τον φόρτο των εργασιών (*tasks*). Έτσι ο FPLTF ταξινομεί τις εργασίες (*tasks*) και τους πόρους ανάλογα τον φόρτο εργασιών αναθέτοντας τη μεγαλύτερη εργασία στην ταχύτερη διαθέσιμη πηγή. Σε περίπτωση που υπάρχουν πολλές εργασίες με μεγάλο φόρτο η απόδοσή του αλγορίθμου είναι πολύ μειωμένη. Ο Δυναμικός FPLTF (*Dynamic Fastest Processor to Largest Task First, DFPLTF*) [23] βασίζεται στον στατικό FPLTF δίνοντας υψηλότερη προτεραιότητα στις απαιτητικότερες εργασίες. Η διαφορά τους είναι ότι ο DFPLTF λαμβάνει υπόψη του πληροφορίες σχετικά με την ταχύτητα της κεντρικής μονάδας επεξεργαστή (*CPU speed*) των πόρων και τον φόρτο των εργασιών.

Ο αλγόριθμος Work Queue Replication (*WQR*) βασίζεται στον αλγόριθμο Work Queue (*WQ*) [23]. Ο WQR αναθέτει στον ταχύτερο επεξεργαστή περισσότερες εργασίες (*tasks*) από ότι σε έναν πιο αργό ενώ εφαρμόζει την τεχνική First-Come, First-Served (*FCFS*) και τυχαίας μεταφοράς προκειμένου να αναθέσει τις εργασίες στους πόρους. Ο WQR επαναλαμβάνει τις εργασίες έως ότου ανατεθούν επιτυχώς στους διαθέσιμους πόρους. Το ποσοστό της αντιγραφής (*replication*) των εργασιών καθορίζεται από το χρήστη. Όταν μία από τις επαναλήψεις τελειώσει, τότε ο χρονοπρογραμματιστής θα ακυρώσει τις υπόλοιπες επαναλαμβανόμενες εργασίες. Το μειονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ότι καταναλώνει πάρα πολύ χρόνο στην εκτέλεση και στη μεταφορά των εργασιών στους πόρους που αυτές θα εκτελεστούν.

Ο Min-Min [39] αλγόριθμος θέτει σε μεγαλύτερη προτεραιότητα τις εργασίες (*tasks*) που μπορούν να ολοκληρωθούν ταχύτερα. Η λειτουργία του βασίζεται στο ότι αναθέτει εργασίες σε πόρους οι οποίοι δύναται να τις εκτελέσουν γρηγορότερα. Ενώ ο Max-Min [39] θέτει σε υψηλότερη προτεραιότητα πρώτα τις εργασίες που έχουν το μικρότερο χρόνο ολοκλήρωσης, επικαλύπτοντας τις εργασίες που απαιτούν το μεγαλύτερο

χρόνο εκτέλεσης με αυτές που απαιτούν συγκριτικά πολύ μικρότερο χρόνο εκτέλεσης. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει μία μόνο εργασία που απαιτεί πολύ μεγάλο χρόνο εκτέλεσης, ο Min-Min θα εκτελέσει τις μικρές εργασίες παράλληλα και μετά θα εκτελέσει τη μακροπρόθεσμη. Ο Max-Min θα εκτελέσει τις μικρές διάρκειας εργασίες και τις μεγάλης διάρκειας εργασίες παράλληλα.

Ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού Round Robin (*RR*) ή χρονοπρογραμματισμός εξυπηρέτησης εκ περιτροπής *RR* είναι ένας από τους πιο δίκαιους αλγορίθμους. Ο *RR* χρησιμοποιεί τον μηχανισμό δακτυλίου, οπότε κάθε υποβαλλόμενη εργασία (*job*) στο υπολογιστικό πλέγμα έχει τον ίδιο χρόνο εκτέλεσης και θα εκτελεσθεί όταν έλθει η σειρά της. Εάν μία υποβαλλόμενη εργασία δεν δύναται να ολοκληρωθεί όταν έλθει η σειρά της, θα αποθηκευθεί ξανά στην ουρά αναμονής περιμένοντας τον επόμενο γύρο. Το πλεονέκτημα του αλγορίθμου *RR* είναι ότι κάθε υποβαλλόμενη εργασία θα εκτελεσθεί στη σειρά της δίχως να χρειάζεται να ολοκληρωθεί η προηγούμενη της αλλά όταν ο φόρτος στο δίκτυο είναι μεγάλος θα είναι αρκετά χρονοβόρο για να ολοκληρωθούν όλες οι υποβαλλόμενες εργασίες.

Ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού προτεραιότητας (*priority scheduling algorithm*) απονείμει σε κάθε υποβαλλόμενη εργασία (*job*) στο υπολογιστικό πλέγμα μία τιμή προτεραιότητας, όπου αυτή η τιμή εξαρτάται από τις υπολογιστικές απαιτήσεις της εκάστοτε υποβαλλόμενης εργασίας (*job*) που έχει σε *CPU*, σε μνήμη (*memory*) κ.τλ. Το κυριότερο μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι η ασταθής λειτουργία του και η πρόκληση στέρησης (*starvation*) σε περιπτώσεις πολύ απαιτητικών εργασιών (*jobs*) σε πόρους.

Ο *FCFS* (*First Come First Serve*) αλγόριθμος είναι ένας απλός αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού υποβαλλόμενων εργασιών (*jobs*). Η πρώτη εργασία (*job*) που θα υποβληθεί στο υπολογιστικό πλέγμα, θα εκτελεσθεί και πρώτη. Το κυριότερο πρόβλημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι το *Convoiy Effect*., δηλαδή οι μικρές διάρκειας εργασίες (*jobs*) αναμένουν τις μεγάλης διάρκειας εργασίες (*jobs*) γεγονός που έχει ως συνέπεια τον μεγάλο χρόνο αναμονής για την ολοκλήρωση των εργασιών και υπο-εκμετάλλευση των πόρων του υπολογιστικού πλέγματος [37].

3.5 Εξισορροπημένος Χρονοπρογραμματισμός κατά *ACO*

Οι υποδομές πλέγματος (*grids*) είναι ένα περιβάλλον όπου σπάνια υπάρχει ταύτιση του πραγματικού χρόνου εκτέλεσης μίας εργασίας (*job*) με τον εκτιμώμενο χρόνο εκτέλεσής της. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο προτεινόμενος εξισορροπημένος (*balanced*) αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού [20] με βάση τη βελτιστοποίηση με αποικίες μυρμηγκιών (*Ant Colony Optimization, ACO*) και προσομοιώθηκε σύμφωνα με την υποδομή πλέγματος του *HellasGrid* [40].

Ο αλγόριθμος *ACO* που παρουσιάζεται επιτυγχάνει να μειώσει το χρόνο επεξεργασίας των εκτελούμενων εργασιών (*jobs*) λαμβάνοντας υπόψη το φόρτο εργασίας του κάθε πόρου στο δίκτυο [20]. Η μεθοδολογία του προτεινόμενου αλγορίθμου βασίζεται στην τεχνική της μεταβολής πυκνότητας (*density*) της φερομόνης ανάλογα με την κατάσταση των πόρων της υποδομής πλέγματος (*grid*) ενώ εφαρμόζει παράλληλα τους μηχανισμούς της τοπικής ενημέρωσης της φερομόνης (*local pheromone update*) και της καθολικής

ενημέρωσης της φερομόνης (*global pheromone update functions*). Επιπλέον, ως στόχο έχει την μείωση του συνολικού χρόνου ολοκλήρωσης των εργασιών (*jobs*) ενώ εξισορροπεί το φόρτο του υπολογιστικού πλέγματος.

3.5.1 Εξισορροπημένος ACO Αλγόριθμος

Η λύση ενός προβλήματος μέσα στο κατανεμημένο περιβάλλον του υπολογιστικού πλέγματος επιτυγχάνεται με την ανάθεση εργασιών στους κόμβους του πλέγματος. Στην πιο απλή περίπτωση, η ανάθεση αυτή γίνεται με τυχαίο τρόπο, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά του πλέγματος δηλαδή των κόμβων και του δικτύου. Από μία τέτοια τυχαία κατανομή των εργασιών δεν μπορούμε να περιμένουμε τίποτα περισσότερο από επίσης τυχαία αποτελέσματα όσον αφορά την απόδοση της πλατφόρμας.

Όμως, το ζητούμενο από μία κατανεμημένη πλατφόρμα είναι να εκμεταλλεύεται κατά τον καλύτερο τρόπο τους πόρους του πλέγματος. Ο χρονοπρογραμματισμός (*scheduling*) αφορά την αντιστοίχιση των εργασιών στους κόμβους του πλέγματος ώστε να επιτυγχάνεται αυτό ακριβώς. Η λειτουργία αυτή επιτελείται από ειδικές εφαρμογές που καλούνται χρονοπρογραμματιστές (*schedulers*) και ανήκουν σε διάφορες κατηγορίες.

Η μεγιστοποίηση της απόδοσης του πλέγματος δεν είναι μία έννοια μονοσήμαντη. Εξετάζοντας τη δομή του πλέγματος από διαφορετικές οπτικές γωνίες καταλήγουμε σε διαφορετικές απόψεις για το τι σημαίνει μεγιστοποίηση της απόδοσης. Συνεπώς, ορισμένες φορές μας ενδιαφέρει να μεγιστοποιήσουμε το συνολικό αριθμό των εργασιών που εκτελούνται μέσα σε ένα χρονικό διάστημα, χωρίς να μας ενδιαφέρει, πότε, που και από ποιον εκτελούνται. Για αυτόν το σκοπό χρησιμοποιούνται οι χρονοπρογραμματιστές εργασιών (*job schedulers*) μέσα σε ένα δίκτυο πλέγματος.

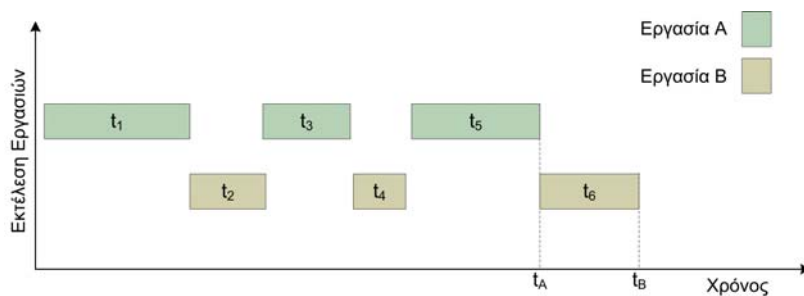
Μία διαφορετική έννοια της απόδοσης εισάγεται όταν μας ενδιαφέρει να μοιράσουμε δίκαια τους πόρους του πλέγματος. Αυτό σημαίνει ότι επιδιώκουμε να εξασφαλίσουμε ότι όλοι χρήστες θα έχουν την ίδια πιθανότητα να αποκτήσουν πρόσβαση στους πλεγματικούς πόρους και ότι αυτό θα συμβεί μέσα σε λογικό χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οι χρονοπρογραμματιστές πόρων (*resource schedulers*).

Αναγάγοντας την έννοια της απόδοσης στο επίπεδο της εφαρμογής, τότε υπεισέρχεται η έννοια των χρονοπρογραμματιστών εφαρμογής (*application schedulers*). Ο στόχος των χρονοπρογραμματιστών αυτού του είδους είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης μίας συγκεκριμένης εφαρμογής και όχι του πλέγματος συνολικά. Για το λόγο αυτό, η βελτιστοποίηση της απόδοσης μίας εφαρμογής δεν συνεπάγεται ότι το σύστημα θα εκτελέσει συνολικά τον βέλτιστο αριθμό εργασιών ή ότι η ανάθεση των πόρων του πλέγματος θα είναι δίκαιη ανάμεσα σε διαφορετικές εφαρμογές, αλλά μόνο ότι η εφαρμογή θα ολοκληρώσει τη λειτουργία της το συντομότερο δυνατό. Έτσι, είναι αρκετά δύσκολη η ταυτόχρονη λειτουργία χρονοπρογραμματιστών που ανήκουν σε διαφορετική κατηγορία, αφού οι αντικειμενικοί στόχοι τους βρίσκονται σε αντίθεση.

Η χρονοδρομολόγηση γίνεται με την επιλογή ενός ευρετικού αλγόριθμου, ο οποίος δέχεται ως παραμέτρους την κατάσταση του πλέγματος τη στιγμή του υπολογισμού ή ακόμη και κάποια πρόβλεψη για τη μελλοντική του κατάσταση. Συχνά ο αλγόριθμος αυτός δέχεται ως όρισμα και μία εκτίμηση για τις απαιτήσεις της εργασίας. Οι απαιτήσεις δύναται να είναι μεταφρασμένες σε χρόνο, μνήμη, επεξεργαστική ισχύ και άλλα μεγέθη καθώς και συνδυασμούς αυτών. Ο ευρετικός αλγόριθμος αποφασίζει σε ποιον κόμβο πρέπει να ανατεθεί η κάθε εργασία. Η απόφαση βασίζεται συνήθως στην ελαχιστοποίηση κάποιου μετρήσιμου ή εκτιμώμενου μεγέθους που αφορά τους πόρους του πλέγματος και την απόδοση της πλατφόρμας (*performance metrics*). Τέτοια μεγέθη είναι η αναμενόμενη χρονική διάρκεια της εκτέλεσης της εργασίας, η αναμενόμενη χρονική στιγμή του τέλους της εργασίας, η αναμονή μέχρι την έναρξη της εργασίας, ο χρόνος μεταφοράς στο δίκτυο κ.ά. Συχνά μας ενδιαφέρει ο χρόνος ανάμεσα στην αποστολή της πρώτης εργασίας εισόδου και την λήψη της τελευταίας εργασίας εξόδου (*makespan*).

Είναι σημαντικό να διευκρινισθεί η διαφορά ανάμεσα στην αναμενόμενη χρονική διάρκεια της εκτέλεσης μίας εργασίας και την αναμενόμενη χρονική στιγμή του τέλους μίας εργασίας. Για να γίνει αντιληπτή η διαφορά, πρέπει να σκεφθούμε ότι μία εργασία δεν απασχολεί τον επεξεργαστή συνεχόμενα. Συνήθως, η εκτέλεση της δύναται να διακοπεί ώστε να εξυπηρετηθούν άλλες εργασίες που έχουν υποβληθεί.

Στο **Σχήμα 8** η χρονική διάρκεια της εκτέλεσης της εργασίας A είναι ίση με $t_1+t_3+t_5$, ενώ η χρονική στιγμή του τέλους της είναι η t_A . Για την εργασία B η χρονική διάρκεια της εκτέλεσης είναι $t_2+t_4+t_6$ και η χρονική στιγμή του τέλους της είναι η t_B . Από το Σχ. 8 παρατηρούμε ότι η εργασία A απασχολεί τον επεξεργαστή για περισσότερο χρόνο από ότι η εργασία B , αφού ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης είναι μεγαλύτερος. Ωστόσο η χρονική στιγμή της ολοκλήρωσης της εργασίας A προηγείται της αντίστοιχης της B , με $t_A < t_B$.



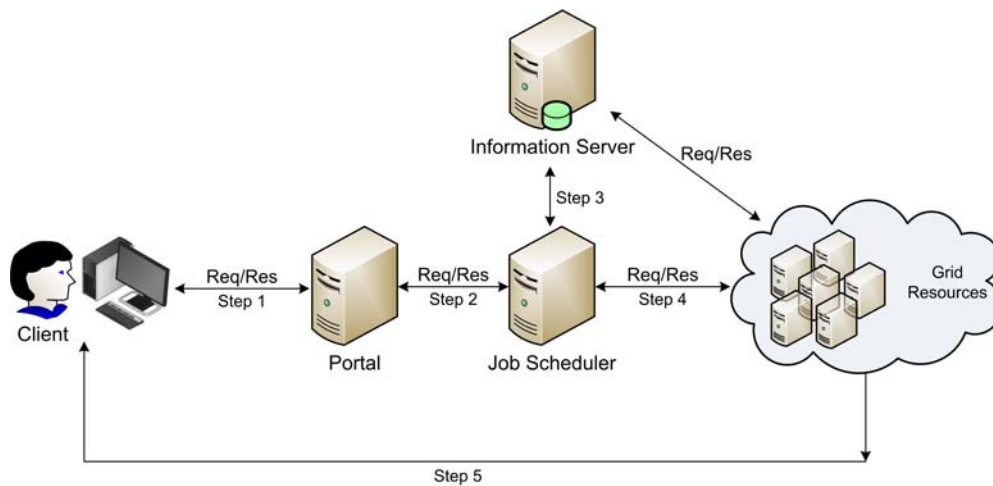
Σχήμα 8: Χρόνοι Ολοκλήρωσης και Εκτέλεσης Εργασιών

Συνεπώς, μέσα σε ένα περιβάλλον υπολογιστικού πλέγματος οι χρήστες αναμένουν οι εργασίες που υποβάλλουν προς αυτό να ολοκληρωθούν σε εύλογο χρονικό διάστημα, γεγονός που εξαρτάται από δύο σημαντικά κριτήρια. Το πρώτο κριτήριο βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του χρόνου ανάμεσα στην αποστολή της πρώτης εργασίας εισόδου και την λήψη της τελευταίας εργασίας εξόδου (*makespan*) το οποίο βοηθάει στη μέτρηση της *ρυθμαπόδοσης (throughput)* του συστήματος και το δεύτερο είναι ο συνολικός χρόνος αναμονής

για την ολοκλήρωση της εργασίας του χρήστη, δηλαδή ο *χρόνος ροής (flow time)*, που σχετίζεται με τις μετρήσεις Ποιότητας Υπηρεσίας (*QoS*) [41] [42].

Το μήκος μίας διεργασίας (*task*) αντιπροσωπεύεται από το φόρτο εργασίας και καθορίζεται από τον αριθμό των εργασιών (*jobs*) που πρέπει να εκτελεστούν στο υπολογιστικό πλέγμα. Η υπολογιστική ισχύς που παρέχεται από τις CPUs δύναται να καθοριστούν είτε ανάλογα με την υποβαλλόμενη εργασία είτε από τον χρήστη του πλέγματος, εφόσον αυτός το επιθυμεί. Σε περίπτωση που ο χρήστης χρησιμοποιήσει αρκετούς πόρους του υπολογιστικού δικτύου και αν είναι σύμφωνο με τις προκαθορισμένες πολιτικές του πλέγματος, τότε το τερματικό του θα παραχωρήσει πόρους σε αυτό.

Την χρησιμοποίηση ενός επεξεργαστή την καθορίζουμε με $u_{p,t}$, όπου p ο επεξεργαστής (*CPU*) και t ο χρόνος εκμετάλλευσής του. Σύμφωνα λοιπόν με τη διάρκεια της χρονικής εκμετάλλευσης και την επεξεργαστική ικανότητα ενός τερματικού μπορούμε να υπολογίσουμε τις επεξεργαστικές δυνατότητές του. Η συγκεκριμένη τιμή ικανότητας επεξεργασίας υποδεικνύει το φόρτο εργασίας που δύναται να ολοκληρωθεί από έναν επεξεργαστή ανά μονάδα χρόνου. Οπότε η πλεονάζουσα επεξεργαστική ισχύς της κάθε CPU χρήστη που δεν αξιοποιείται από αυτόν παραχωρείται στο υπολογιστικό πλέγμα. Ορίζοντας έτσι ως $s_{p,t}$ την ικανότητα του επεξεργαστή p κατά το μεσοδιάστημα $(t, t+1)$. Σε περίπτωση όμως που ο φόρτος εργασίας ενός χρήστη είναι μεγάλος ή το τερματικό του αποσυνδεθεί ή κλείσει για οποιοδήποτε λόγο τότε το $s_{p,t}$ είναι ίσο με 0.



Σχήμα 9: Αρχιτεκτονική Grid Συστήματος

Η αρχιτεκτονική της υποδομής πλέγματος του Σχήματος 9 όπου και απευθύνεται ο προτεινόμενος ισοζυγισμένος αλγόριθμος ACO αποτελείται από τέσσερις μηχανισμούς: (i) Την Πύλη (*Portal*) του δικτύου πλέγματος, (ii) Τον Εξυπηρετητή Πληροφοριών (*Information Server, IS*), (iii) Τον Χρονοπρογραμματιστή Εργασιών (*Job Scheduler*), (iv) Τους Πόρους του Υπολογιστικού Πλέγματος (*Grid Resources*).

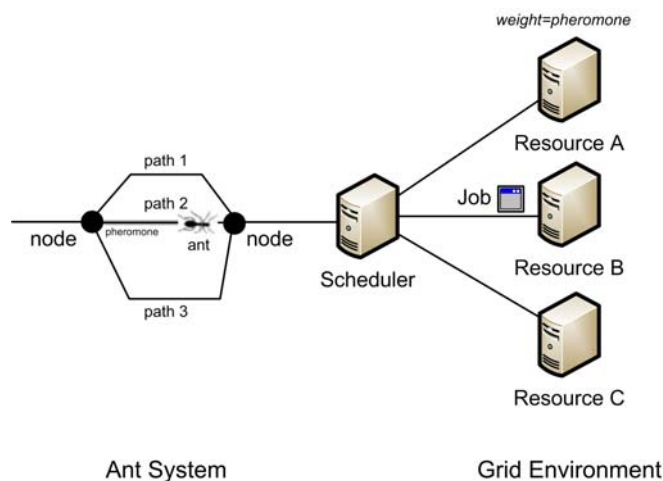
Η Πύλη (*Portal*) παρέχει το UI στον χρήστη για να μπορεί να εκτελέσει τις εργασίες του στο δίκτυο πλέγματος. Ο IS συλλέγει πληροφορίες για τους πόρους του δίκτυο χρησιμοποιώντας το NWS (*Network Weather Service*) [34]. Το NWS (*Network Weather Service*) [43] είναι ένα κατακευματισμένο σύστημα παρακολούθησης πόρων και πρόβλεψης, το οποίο έχει σχεδιαστεί με σκοπό τη δυναμική δέσμευση πόρων και

τη χρονοδρομολόγηση. Έτσι, το NWS με τη σειρά του ενημερώνει ξανά τον Εξυπηρετητή Πληροφοριών (IS) με μετρήσεις που παίρνει σε περιοδικά διαστήματα και αφορούν την τρέχουσα απόδοση των πόρων. Αυτό πραγματοποιείται με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων, ενώ παράγει δυναμικά προβλέψεις για μελλοντικές χρονικές στιγμές.

Ο Χρονοπρογραμματιστής Εργασιών (*Job Scheduler*) επιλέγει τους πιο κατάλληλους πόρους για να εκτελέσει τις απαιτούμενες εργασίες σύμφωνα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Τέλος, τα αποτελέσματα της εκτέλεσης αυτών αποστέλλονται πίσω στον χρήστη.

Για να καθορίσουμε τη σχέση του προτεινόμενου συστήματος με αποικίες μυρμηγκιών και του υπολογιστικού δικτύου, ορίζουμε τα ακόλουθα: (i) Ένα μυρμηγκί μέσα στο σύστημα μυρμηγκιών (αποικία) αντιστοιχεί σε μία εργασία (*job*) μέσα στο δίκτυο πλέγματος (*grid*), (ii) Η τιμή της φερομόνης σε κάθε μονοπάτι του συστήματος μυρμηγκιών, καλείται βάρος (*weight*), για κάθε πόρο του υπολογιστικού πλέγματος. Οπότε ένας πόρος με μεγάλη τιμή βάρους (*weight*) υποδηλώνει ότι ο συγκεκριμένος πόρος έχει καλύτερη υπολογιστική ισχύ από τους υπόλοιπους.

Το βάρος (*weight*) της φερομόνης για κάθε πόρο είναι αποθηκευμένο στον χρονοπρογραμματιστή (*scheduler*), όπου αυτός το χρησιμοποιεί ως παράμετρο του προτεινόμενου αλγορίθμου μας. Επίσης ο χρονοπρογραμματιστής επιλέγει έναν πόρο με την βοήθεια του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού όπου και του αποστέλλει τις υποβαλλόμενες εργασίες (*jobs*) στον επιλεγμένο πόρο διαμέσου της Διεπαφής Προγραμματισμού Εφαρμογών (*API*) του Globus Toolkit.



Σχήμα 10: Σχέση Συστήματος Μυρμηγκιών και Υποδομή Πλέγματος

Το Σχήμα 10 υποδεικνύει τη σχέση ανάμεσα στο σύστημα μυρμηγκιών και στο δίκτυο πλέγματος. Η αρχική τιμή της φερομόνης του κάθε πόρου για κάθε εργασία (*job*) είναι ίση με το Δείκτη της Φερομόνης. Όπου ο Δείκτης Φερομόνης του κάθε πόρου για κάθε εργασία (*job*) υπολογίζεται από την πρόσθεση του εκτιμώμενου χρόνου μετάδοσης και του αναμενόμενου χρόνου εκτέλεσης μίας υποβαλλόμενης εργασίας όταν αυτή αναθέτεται στον συγκεκριμένο πόρο.

Τον εκτιμώμενο χρόνο μετάδοσης τον καθορίζουμε $\frac{M_j}{Bandwidth_i}$, όπου M_j είναι το μέγεθος της υποβαλλόμενης εργασίας (*job*) j και $Bandwidth_i$ ως το εύρος ζώνης, όπου είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης μεταξύ του χρονοπρογραμματιστή (*scheduler*) και του πόρου. Ο Δείκτης Φερομόνης καθορίζεται από την εξής σχέση:

$$PI_{ij} = \left[\frac{M_j}{bandwidth_i} + \frac{T_j}{CPU_speed_i \times (1 - load_i)} \right]^{-1} \quad (9)$$

Όπου PI_{ij} είναι ο Δείκτης Φερομόνης της υποβαλλόμενης εργασίας (*job*) j που ανατίθεται στον πόρο i . Ως M_j ορίζεται το μέγεθος της υποβαλλόμενης εργασίας (*job*) j και T_j είναι ο χρόνος της CPU που χρειάζεται για την εργασία j , ισχύς_επεξεργαστή (CPU_speed_i), τρέχον φορτίο ($load_i$) και του εύρους ζώνης ($bandwidth_i$) ανάμεσα στον χρονοπρογραμματιστή και τον πόρο.

Οι τιμές που σχετίζονται με το φορτίο (*load*), το εύρος ζώνης και την ταχύτητα του επεξεργαστή (*CPU*) δύναται να ανευρεθούν με τη χρήση του NWS [43]. Ο Δείκτης Φερομόνης μας ενημερώνει όταν μία εργασία ανατίθεται σε έναν πόρο. Επίσης, λαμβάνουμε υπόψη την κατάσταση των πόρων, το μέγεθος των εργασιών και τον χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου πόρου για την εκτέλεση της εργασίας. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του PI_{ij} τόσο πιο αποδοτικός είναι ο πόρος i που εκτελεί την εργασία j .

Υποθέτοντας ότι υπάρχουν στο υπολογιστικό πλέγμα m πόροι (*resources*) και n εργασίες (*jobs*), τότε ο πίνακας (*matrix*) PI καθορίζεται ακολούθως.

$$PI = \begin{matrix} & \begin{matrix} j_1 & j_2 & \dots & j_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} r_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ r_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} PI_{11} & PI_{12} & \dots & PI_{1n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ PI_{m1} & PI_{m2} & \dots & PI_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

Σε κάθε επανάληψη (*iteration*), επιλέγουμε την μεγαλύτερη τιμή από τον πίνακα. Σημειώνοντας δε, ότι σε περίπτωση που υπάρχει οποιοσδήποτε περιορισμός στον χρονοπρογραμματισμό εργασιών (*job scheduling*) τον εφαρμόζουμε πριν από την χρήση του προτεινόμενου αλγορίθμου, ο οποίος επιλέγει ανάμεσα στις διαθέσιμες εργασίες (*jobs*) που παράγονται από τον χρονοπρογραμματιστή. Επιλέγοντας PI_{ij} η εργασία (*job*) j ανατίθεται στον πόρο i για να εκτελεσθεί. Μετά από την ανάθεση μίας εργασίας σε έναν πόρο, εφαρμόζουμε την Εξ. (9) στον επιλεγμένο πόρο για κάθε μία από τις μη αναθετημένες εργασίες στον PI πίνακα. Αυτή η διαδικασία καλείται γραμμή ενημέρωσης της τοπικής φερομόνης (*local row pheromone update*) [17].

Εν συνεχεία, η καθολική ενημέρωση φερομόνης (*global pheromone update*) επαναυπολογίζει ολόκληρο τον πίνακα PI , διαδικασία που εκτελείται όταν μία εργασία ολοκληρώνεται. Ωστόσο, για τον πόρο που ολοκλήρωσε την εκτέλεση αυτής της εργασίας, μετά την εφαρμογή της Εξ. (9), η νέα τιμή φερομόνης της

αντίστοιχης γραμμής θα πρέπει στη συνέχεια να πολλαπλασιαστεί με $(1 - \rho_i)$ με $1 > \rho_i \geq 0$, όπου ρ_i υποδηλώνει τη χρήση του πόρου i μετά την ολοκλήρωση της εργασίας j . Επίσης όταν χρησιμοποιείται τοπικός χρονοπρογραμματιστής (*local scheduler*) σε έναν πόρο, τότε το ρ_i δύναται να υποδείξει την μείωση προτεραιότητας μίας καινούργιας εργασίας μετά την ολοκλήρωση της εργασίας που έχει υποβληθεί από τον ίδιο χρήστη.

Η ενημέρωση της καθολικής φερομόνης αντικατοπτρίζει τις μεταβολές της κατάστασης του δικτύου και της κατάστασης των πόρων μετά την ολοκλήρωση μίας εργασίας. Επίσης, ενσωματώνει επιτυχώς τη δυναμική κατάσταση που επικρατεί στο περιβάλλον πλέγματος μέσα στον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού με αποτέλεσμα στον επόμενο γύρο να επιτύχει καλύτερη απόφαση.

Για m πόρους και n εργασίες, η ανάθεση της πρώτης εργασίας χρειάζεται να κανονικοποιήσει τον PI πίνακα των $n \times m$ τιμών. Για τη δεύτερη εργασία, μόνο $(n - 1)m$ τιμές παραμένουν στον PI πίνακα (βλ. Εξ. 10). Συνεπώς, το άθροισμα του συνόλου των τιμών του πίνακα PI καθορίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$m \times \sum_{i=1}^n i = \frac{mn(n+1)}{2} \quad (11)$$

Άρα, ο προτεινόμενος ACO έχει καλή κλιμακωσιμότητα (*scalability*), ακόμη και σε περίπτωση που n ή m αυξηθούν υπέρμετρα. Έτσι ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ο Προτεινόμενος Εξισορροπημένος ACO Αλγόριθμος Χρονοπρογραμματισμού Εργασιών

```

begin
  Initialize the parameters
  while (number of iteration is not satisfied) do
    place each ant to select first process
    while (stopping when all processes scheduled by each ant) do
      for each ant do
        retrieve the status of the resources according to formula (9)
        select the best resource for executing each job according to formula (10)
        select the next job according to the function introduced in (9)
        assign the selected job to the resource  $i_{best}^j$ 
        update the pheromone according to formula (7)
      end for
    end while
    while (removing the jobj from the unscheduled list to scheduled list) do
      for each jobj in the unscheduled list do
        select the next job according to (9)
        remove the job from the unscheduled list
        update the local (row) pheromone according to (9)
      end for
    end while
  end while
  print the best feasible solution by analyzing of all the ants scheduling list
end

```

Με βάση τα παραπάνω, υποθέτουμε ότι έχουμε 3 εργασίες (*jobs*) τις j_1, j_2, j_3 , προς εκτέλεση σε περιβάλλον υπολογιστικού πλέγματος και 3 πόρους (*resources*) r_1, r_2, r_3 . Υποθέτουμε ότι η αρχική κατάσταση του κάθε πόρου (Πίνακας 3), ενώ το μέγεθος της κάθε εργασίας (*job*) είναι 3 MB, 2 MB, και 1MB αντίστοιχα.

Πίνακας 3: Αρχική Κατάσταση Πόρων

	r_1	r_2	r_3
CPU speed (MHz)	3000	3200	2800
Φόρτος (Load)	25%	10%	30%
Εύρος Ζώνης (Bandwidth) Megabits/s	11.69	25.20	15.59

Ο αρχικός δείκτης φερομόνης για τον πίνακα PI σύμφωνα με την Εξ. 9 διαμορφώνεται ακολούθως.

$$PI = \begin{bmatrix} PI_{11} = 3.88 & PI_{12} = 5.82 & PI_{13} = 11.64 \\ PI_{21} = 8.33 & PI_{22} = 12.49 & PI_{23} = 24.99 \\ PI_{31} = 5.28 & PI_{32} = 7.91 & PI_{33} = 15.83 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Στην αρχή της εκτέλεσης μίας εργασίας (*job*) ο χρονοπρογραμματιστής (*scheduler*) επιλέγει τον μέγιστο δείκτη φερομόνης του PI matrix (Πίν. 12), που είναι το $PI_{23} = 24.99$. Συνεπώς επιλέγεται ο πόρος r_2 για την εκτέλεση της εργασίας j_3 . Μετά την ανάθεση της εργασίας j_3 στον πόρο r_2 ενημερώνονται, μέσω της τοπικής φερομόνης (*local pheromone*), οι τιμές του πίνακα στην δεύτερη γραμμή του r_2 για όλες τις εργασίες. Αφού η εργασία j_3 ανατέθηκε δεν χρειάζεται να την συμπεριλάβουμε περαιτέρω. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι ο φόρτος του πόρου r_2 μετά την ανάθεση της εργασίας j_3 μειώνεται κατά 30%, οπότε ο πίνακας PI διαμορφώνεται ως εξής:

$$PI = \begin{bmatrix} PI_{11} = 3.88 & PI_{12} = 5.82 \\ PI_{21} = 5.83 & PI_{22} = 8.74 \\ PI_{31} = 5.28 & PI_{32} = 7.91 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Τοπική ανανέωση} \\ \swarrow \end{array} \quad (13)$$

Εάν όμως ο πόρος r_2 ολοκληρώσει την εργασία j_3 πριν αρχίσει ο χρονοπρογραμματιστής εργασιών την ανάθεση της επόμενης εργασίας τότε έχουμε καθολική ενημέρωση (*global update*) όλων των τιμών του πίνακα με σκοπό να ληφθεί η ανανέωση της φερομόνης ώστε να υποβληθεί η επόμενη εργασία. Εν συνεχεία, η κατάσταση κάθε πόρου μετά την ολοκλήρωση της εργασίας j_3 και για την υποβολή της j_1 υποθέτουμε ότι μεταβάλλεται ακολούθως (Πίν. 4).

Πίνακας 4: Ανανεωμένη Κατάσταση του κάθε Πόρου μετά την Εκτέλεση της j_3

	r_1	r_2	r_3
CPU speed (MHz)	3000	3200	2800
Φόρτος (Load)	30%	20%	15%
Εύρος Ζώνης (Bandwidth) Megabits/s	10.47	20.79	13.90
ρ	0	0.05	0

Η τιμή εξάτμισης φερομόνης ρ (*pheromone evaporation*) των πόρων r_1 και r_3 είναι ίση με μηδέν διότι δεν τους έχουν ανατεθεί εργασίες (*jobs*) προς εκτέλεση. Πραγματοποιούμε την υπόθεση ότι η τιμή εξάτμισης της φερομόνης ρ του πόρου r_2 είναι 0.05. Οπότε από τον Πίνακα 4 εξάγουμε τον νέο πίνακα PI με την ανανέωση της καθολικής ενημέρωσης (*global update*) φερομόνης να διαμορφώνεται ακολούθως:

$$PI = \begin{bmatrix} PI_{11} = 3.47 & PI_{12} = 5.21 \\ PI_{21} = 6.53 & PI_{22} = 9.80 \\ PI_{31} = 4.61 & PI_{32} = 6.91 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Οι υπόλοιπες εργασίες που δεν έχουν εκτελεσθεί αναθέτονται στους πόρους με παρόμοιο τρόπο. Συνεπώς, όταν ο χρονοπρογραμματιστής εργασιών (*job scheduler*) αναθέτει μία εργασία σε έναν πόρο, η γραμμή του επιλεγμένου πόρου θα ενημερωθεί διαμέσου της λειτουργίας της τοπικής φερομόνης (*local pheromone*). Μετά την ολοκλήρωση μίας εργασίας από έναν πόρο, όλες οι τιμές του πίνακα PI ενημερώνονται από τη λειτουργία της καθολική ενημέρωσης φερομόνης (*global pheromone*).

Ο προτεινόμενος εξισορροπημένος αλγόριθμος με βάση τις αποικίες μυρμηγκιών (ACO) που παρουσιάζεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής δύναται αν εφαρμοσθεί και στην πλεγματική υποδομή του HellasGrid, όπως αυτή εξετάζεται ακολούθως.

3.5.2 Πρακτική Αξιοποίηση του ACO Αλγορίθμου

Αναμφισβήτητα, τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη των τεχνολογιών υποδομών πλέγματος (*grid*) στη χώρα μας ακολούθησε γοργούς ρυθμούς καθώς εντάθηκαν οι προσπάθειες παρακολούθησης των ευρωπαϊκών και διεθνών εξελίξεων στις τεχνολογίες αυτές. Παρακάτω παρουσιάζουμε την υποδομή του HellasGrid που αποτελεί την ελληνική υποδομή πλέγματος (*grid*). Το παρόν ερευνητικό έργο είναι υπεύθυνο για οποιαδήποτε δραστηριότητα εμπίπτει στο χώρο των δικτύων πλέγματος και έχει συμβάλει όσο κανένα άλλο στην ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών στη χώρα μας.

Η ελληνική υποδομή πλέγματος HellasGrid που απεικονίζεται στο **Σχήμα 11** είναι η μεγαλύτερη στην νοτιοανατολική Ευρώπη και μία από τις σταθερότερες υποδομές σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Παρέχει υπολογιστικές υπηρεσίες υψηλής απόδοσης και υψηλής διεκπεραιωτικής ικανότητας (*High Performance Computing - HPC, High Throughput Computing - HTC*) στην ελληνική ακαδημαϊκή και ερευνητική κοινότητα και καλύπτει πλήρως τις ανάγκες των Ελλήνων ερευνητών παρέχοντάς τους επαρκείς πόρους για την εκτέλεση των εργασιών (*jobs*) τους. Η συγκεκριμένη υποδομή αποτελείται, μέχρι στιγμής, από 12 υπολογιστικούς κόμβους που συνολικά αριθμούν πάνω από 1500 CPU cores και περίπου 150TB αποθηκευτικού χώρου [40]. Παρόλα αυτά, η υποδομή του HellasGrid συνεχώς διευρύνεται και εμπλουτίζεται με νέο εξοπλισμό ώστε να ανταποκρίνεται συνεχώς στις απαιτήσεις των χρηστών και να βρίσκεται στην αιχμή της τεχνολογικής εξέλιξης.



Σχήμα 11: Η Ελληνική Υποδομή Πλέγματος HellasGrid

Η Ελλάδα συμμετέχει στο πρόγραμμα EGEE (*Enabling Grids for E-sciencE*) τόσο με τις υποδομές που αναπτύχθηκαν μέσω του εθνικού προγράμματος HellasGrid όσο και με μεμονωμένες υποδομές που έχουν αναπτυχθεί από κάποια ελληνικά πανεπιστήμια και ερευνητικά ινστιτούτα. Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται συνοπτικά η κατάσταση των ελληνικών κόμβων της υποδομής του HellasGrid. Όπως φαίνεται, πολλά πανεπιστημιακά ιδρύματα επέλεξαν να υλοποιήσουν τις δικές τους συστοιχίες (*clusters*) υπολογιστών και να τα εντάξουν στο EGEE ως ξεχωριστούς κόμβους.

Πίνακας 5: Ελληνικοί Κόμβοι που συμμετέχουν στο EGEE

Κόμβος	Όνομα	CPUs Cores	Storage (TBs)	Τοποθεσία
HG-01-GRNET	isabella.grnet.gr	64	20	Αθήνα
HG-02-IASA	marie.hellasgrid.gr	120	4	Αθήνα
HG-03-AUTH	afrodit.hellasgrid.gr	120	6	Θεσσαλονίκη
HG-04-CTI-CEID	kallisto.hellasgrid.gr	120	4	Πάτρα
HG-05-FORTH	ariagni.hellasgrid.gr	120	4	Ηράκλειο
HG-06-EKT	athena.hellasgrid.gr	628	12	Αθήνα
GR-01-AUTH	grid.auth.gr	222	82	Θεσσαλονίκη
GR-04-FORTH-ICS	ics.forth.gr	10	-	Ηράκλειο
GR-06-IASA	ce02.marie.hellasgrid.gr	20	2	Αθήνα
GR-07-UOI-HEPLAB	physics.uoi.gr	28	20	Ιωάννινα
GR-09-UOA	di.uoa.gr	10	2	Αθήνα
GR-10-UOI	grid.uoi.gr	120	2	Ιωάννινα
Σύνολο		1582	158	

Για την απόκτηση πρόσβασης στην υποδομή απαιτείται αρχικά η έκδοση ενός ψηφιακού πιστοποιητικού X.509. Η απόκτηση του πιστοποιητικού γίνεται με τη συμπλήρωση της on-line αίτησης και έπειτα με την πιστοποίηση της ταυτότητας του χρήστη από την αρμόδια αρχή πιστοποίησης ανά περιοχή. Με την απόκτηση του πιστοποιητικού, ο χρήστης εισέρχεται στο VO του SEE (*Southern Eastern Europe*). Το συγκεκριμένο πιστοποιητικό του παρέχει πρόσβαση όχι μόνο στην υποδομή του HellasGrid αλλά και του EGEE.

Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, η αλληλεπίδραση με την υποδομή υποστηρίζεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι η απόκτηση απομακρυσμένης πρόσβασης (π.χ. SSH) σε κάποιο υπολογιστικό σύστημα το οποίο παρέχεται από το HellasGrid έχει εγκατεστημένο τη διεπαφή χρήστη (*User Interface, UI*) του gLite, ενώ ο δεύτερος είναι η εγκατάσταση του gLite τοπικά, διαδικασία δύσκολη για μη πεπειραμένους χρήστες. Η δυσκολία της εγκατάστασης του gLite έγκειται στο γεγονός ότι πρέπει να επιλυθούν πρώτα περιορισμοί που σχετίζονται με την εξάρτηση του λογισμικού καθότι απαιτείται ειδική διανομή Linux, συγκεκριμένα το Scientific Linux, καθώς και δεν υπάρχει διαθέσιμη έκδοση του gLite για άλλες πλατφόρμες όπως Windows ή Mac.

Το UI του gLite αποτελείται από ένα σύνολο εργαλείων γραμμής εντολών. Τα εργαλεία αυτά παρέχουν τη λειτουργικότητα για την αποστολή εργασιών και την ανάκτηση αποτελεσμάτων. Η απομακρυσμένη εργασία του χρήστη αποτελείται από ένα εκτελέσιμο αρχείο (.out) και ένα jdl (*job description language*) αρχείο. Το jdl αρχείο (Πίνακας 6) περιέχει πληροφορίες για την απομακρυσμένη εργασία, όπως το όνομα του αρχείου εισόδου του προγράμματος, του αρχείου εξόδου, την πολυπλοκότητα των υπολογισμών και άλλες πληροφορίες.

Πίνακας 6: Μορφή jdl αρχείου

```
Requirements = (other.GlueCEStateStatus == (Production:);
Rank = (-other.GlueCEStateEstimatedResponseTime);
Executable = poisson_cg;
StdOutput = stdout.log;
StdError = stderr.log;
InputSandbox={poisson_cg};
OutputSandbox = {stdout.log, stderr.log};
```

Ένα τυπικό σενάριο χρήσης του HellasGrid για την αποστολή μίας εργασίας δύναται να συνοψιστεί ως εξής:

- Ο χρήστης με τη βοήθεια της εντολής voms-proxy-init επικοινωνεί με τον VOMS (*Virtual Organization Membership Service*) εξυπηρετητή (*server*) για την έκδοση ενός προσωρινού πιστοποιητικού, το οποίο είναι έγκυρο για συγκεκριμένη διάρκεια ωρών που καθορίζεται από τον

ίδιο. Οι λόγοι, για την έκδοση αυτού του προσωρινού πιστοποιητικού είναι ότι αυτό χρησιμοποιείται από οντότητες του δικτύου πλέγματος (*grid*) ως αντιπρόσωπο του χρήστη για τη διαπραγμάτευση πόρων. Γεγονός που το κάνει ευάλωτο όσον αφορά τον τομέα της ασφάλειας, ένεκα του ότι μετακινείται πάνω από δημόσιο δίκτυο.

- Στην συνέχεια με τη χρήση της εντολής `glite-wms-job-submit`, ο χρήστης αποστέλλει την εργασία του (`*.out`), την οποία θέλει να εκτελέσει απομακρυσμένα, καθώς και το `jdk` file το οποίο περιέχει την περιγραφή της εργασίας καθώς και τυχόν αρχεία εισόδου του προγράμματος. Κατά το στάδιο αυτό, υπάρχει επικοινωνία με το διαχειριστεί φόρτου (*workload manager*) και έχουμε μεταφορά των παραπάνω αρχείων από την πλευρά του χρήστη στον WMS (*Workflow Management Systems*). Μετά την επιτυχημένη παράδοση της εργασίας (*job*) παίρνουμε ως αποτέλεσμα ένα μοναδικό αναγνωριστικό (`job_id`), το οποίο πρέπει να χρησιμοποιήσει αργότερα για την ενημέρωση της κατάστασης της εργασίας (*job*).
- Με την εντολή `glite-wms-job-status`, ο χρήστης ελέγχει περιοδικά την κατάσταση της εργασίας που έχει στο HellasGrid προς εκτέλεση. Οι πιθανές καταστάσεις μίας εργασίας είναι Ready, Scheduled, Submitted, Running, Finished και Failed.

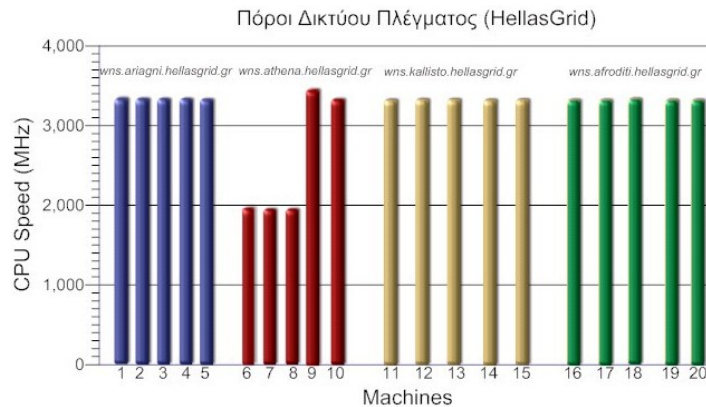
Μετά από τη μετάβαση της κατάστασης μίας εργασίας σε Finished, ο χρήστης μπορεί να επικοινωνήσει με τον WMS και να λάβει πίσω τα αποτελέσματά του μέσω της εντολής `glite-wms-job-output`. Όπως παρατηρήσαμε, η ανάπτυξη εφαρμογών για το HellasGrid με τα παραπάνω εργαλεία είναι δύσκολη. Η λειτουργικότητα που μας παρέχει το UI του gLite είναι περιορισμένη. Από την υποδομή του HellasGrid απουσιάζουν τα κατάλληλα APIs (*Application Programming Interfaces*) σε επίπεδα εφαρμογής, τα οποία θα κρύβουν τις παραπάνω λεπτομέρειες και θα κάνουν απλή την ανάπτυξη εφαρμογών σε αυτό, έτσι ώστε να διαδοθεί ευρέως στην επιστημονική κοινότητα.

Συγκεκριμένα για την αποστολή μίας εργασίας (*job*) στην υπολογιστική υποδομή του HellasGrid απαιτούνται τα παρακάτω βήματα:

1. Επικοινωνία με τον VOMS εξυπηρετητή για την έκδοση ενός προσωρινού πιστοποιητικού.
2. Αποστολή του εκτελέσιμου της εργασίας μας (`*.out`), τυχόν αρχείων εισόδου για το πρόγραμμά μας και του `jdk` αρχείου, το οποίο περιέχει πληροφορίες για την εργασία (*job*).
3. Επικοινωνία με το WMS παρέχει ένα API υλοποιημένο με βάση τις ασφαλείς υπηρεσίες Διαδικτύου (*secure Web Services*). Το API αυτό παρέχει υπηρεσίες για την αποστολή εργασιών και την επιστροφή αποτελεσμάτων.
4. Έπειτα από την παράδοση της εργασίας (*job*) απαιτείται η επικοινωνία με την *Logging and Bookkeeping Service*. Η υπηρεσία αυτή είναι υλοποιημένη ως *secure Web Services* και παρέχει μεθόδους για την ενημέρωση της κατάστασης της εργασίας.

3.6 Πειραματικά Αποτελέσματα

Η πλατφόρμα του υπολογιστικού πλέγματος HellasGrid [40] παρέχει υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους σε εξουσιοδοτημένους χρήστες με τη χρήση του Globus Toolkit [44]. Η συγκεκριμένη αποτέλεσε την βάση του προτεινόμενου αλγόριθμου που εφαρμόστηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης.



Σχήμα 12: Επεξεργαστικές Δυνατότητες του κάθε Κόμβου (*WN*)

Το συγκεκριμένο δίκτυο πλέγματος αποτελείται από 6 κόμβους όπου κάθε ένας από αυτούς διαθέτει τους δικούς του υπολογιστικούς πόρους. Ο ρόλος του χρονοπρογραμματιστή μέσα σε ένα δίκτυο πλέγματος είναι να αναθέτει αποτελεσματικά τις εργασίες στους διαθέσιμους πόρους της υποδομής. Για αυτόν το λόγο επιλέξαμε 20 κόμβους (*Worker Nodes, WNs*) από όλο το υπολογιστικό πλέγμα του HellasGrid με σκοπό να διενεργήσουμε την προσομοίωση του προτεινόμενου ισοζυγισμένου ACO αλγόριθμου. Στο **Σχήμα 12** απεικονίζονται οι επεξεργαστικές δυνατότητες (*CPU Speed*) του κάθε πόρου που ανακτήθηκαν με τη χρήση του NWS [43].

3.6.1 Πειραματική Διάταξη

Ο σκοπός της προσομοίωσης έγκειται στην αξιολόγηση του προτεινόμενου ACO αλγόριθμου που στόχο έχει την ελαχιστοποίηση του χρόνου ανάμεσα στην αποστολή της πρώτης και την ολοκλήρωση της τελευταίας εργασίας (*makespan*) εξισορροπώντας ταυτόχρονα το φόρτο εργασιών του υπολογιστικού πλέγματος. Η διαδικασία (βλ. Σχ. 9) που ακολουθείται όταν ένας χρήστης υποβάλλει το αίτημά του προς την υποδομή, συνοψίζεται ως εξής:

- Ο χρήστης του υπολογιστικού πλέγματος μέσα από το UI υποβάλλει προς την πύλη (*portal*) της υποδομής ένα αίτημα το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο εργασιών, το μέγεθος του *PI* πίνακα και τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού εργασιών (*job scheduler*).

- Ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού εργασιών παραλαμβάνει το μήνυμα από την πύλη και το χρησιμοποιεί ως παράμετρο για τον προτεινόμενο αλγόριθμο όπου αυτός με τη σειρά του διενεργεί τους αντίστοιχους υπολογισμούς. Ταυτόχρονα ο εξυπηρετητής πληροφοριών (*Information Server, IS*) παρέχει τις πληροφορίες που σχετίζονται με τους δικτυακούς πόρους στον χρονοπρογραμματιστή εργασιών.
- Ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος επιλέγει έναν πόρο για την υποβολή του αιτήματος-εργασίας με το να εντοπίσει την μεγαλύτερη τιμή του πίνακα *PI* μεταξύ των διαθέσιμων εργασιών που πρέπει να εκτελεστούν. Έπειτα πραγματοποιείται η ενημέρωση της τοπικής φερομόνης (*local pheromone update*).
- Όταν ένας πόρος ολοκληρώσει μία εργασία, πραγματοποιείται η ενημέρωση της καθολικής φερομόνης (*global pheromone*) και ο πόρος στέλνει τα τελικά αποτελέσματα πίσω στην πύλη. Εν συνεχεία, η πύλη τα αποστέλλει πίσω στο χρήστη όπου αυτός δύναται να τα επεξεργαστεί μέσα από το UI.
- Στο τελευταίο βήμα επαναλαμβάνονται ξανά όλα τα προηγούμενα βήματα ωσότου ολοκληρωθούν όλες οι εργασίες.

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα προτεινόμενου ACO αλγορίθμου προσομοιώθηκαν δύο προβλήματα. Το πρώτο είναι ο πολλαπλασιασμός των πινάκων και το δεύτερο είναι ο γραμμικός προγραμματισμός που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το GNU GLPK (*GNU Linear Programming Kit*) [45]. Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι μία μαθηματική τεχνική που μας εξασφαλίζει την βέλτιστη καταχώρηση των πόρων και επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση του χρόνου ολοκλήρωσης.

Ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος [20] προκειμένου να αξιολογηθεί ως προς την αποτελεσματικότητά του θα συγκριθεί με τους εξής αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού που χρησιμοποιούνται ευρέως μέσα σε ένα πλεγματοειδές περιβάλλον: (i) Τον BACO (*Balanced Ant Colony Optimization*) [49], (ii) Τον IACO (*Improved ACO*) [21], (iii) Τον FPLTF (*Fastest Processor to Largest Task First*) [22], (iv) Τον Δυναμικό DFPLTF (*Dynamic FPLTF*) [23], (v) Τον Sufferage [23] και (vi) μία τυχαία επιλογή κάθε φορά μεταξύ των συγκρινόμενων αλγορίθμων (*Random*).

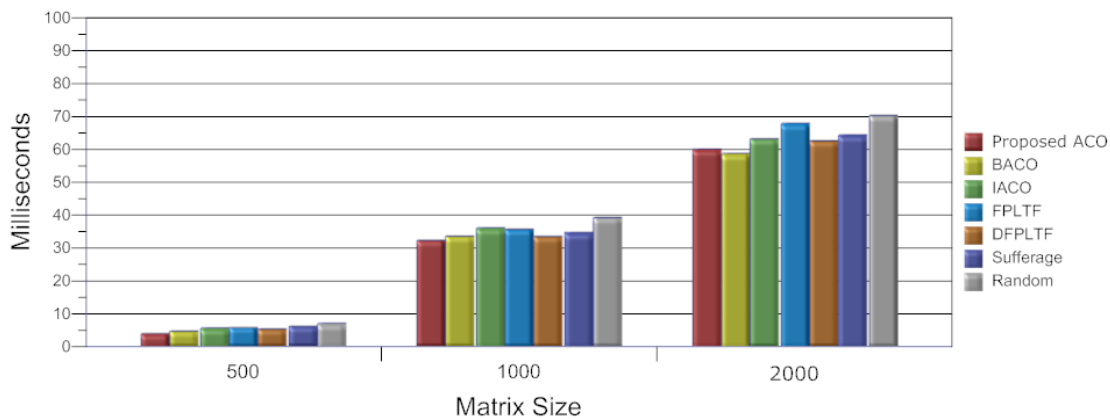
Αρχικά προσομοιώθηκαν 1000 εργασίες. Για τον πολλαπλασιασμό των πινάκων, το μέγεθος των πινάκων είναι 500×500 , 1000×1000 , 2000×2000 . Το μέγεθος της κάθε εργασίας εξαρτάται από το μέγεθος του πίνακά της. Συνεπώς, η αποστολή 500×500 πραγματικών αριθμών σε έναν πόρο για εκτέλεση αντιστοιχεί στο μέγεθος της εργασίας που είναι ίσο με $500 \times 500 \times 4$ bytes (976.5625 KB). Ο χρόνος εκτέλεσης ενός τετραγωνικού πίνακα έχει μία πολυπλοκότητα χρόνου $O(n^3)$, εμείς χρησιμοποιήσαμε αλγόριθμο πολυπλοκότητας $2n^3$ ως εκτιμώμενο χρόνο εκτέλεσης.

Για τον γραμμικό προγραμματισμό, το μέγεθος των περιορισμών είναι 200×200 , με 200 μεταβλητές και 200 περιορισμούς, 500×500 και 1000×1000 . Οπότε με πολυπλοκότητα $2n^3$ σε ένα πρόβλημα 200×200 , το μέγεθος εργασίας αντιστοιχεί σε $(200 \times 200 + 200) \times 4$ bytes. Προκειμένου το πρόβλημα του γραμμικού

προγραμματισμού να δύναται να λυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο εισάγουμε την ελλειψοειδή μέθοδο [46] [47]. Για την πολυπλοκότητα χρόνου της ελλειψοειδής μεθόδου χρησιμοποιούμε $200n^4$ ως εκτιμώμενο χρόνο εκτέλεσης για το πρόγραμμα γραμμικού προγραμματισμού GNU GLPK. Συνεπώς, 200 συντελεστές πολυπλοκότητας αντιστοιχούν σε $O(n^4)$ αλγόριθμο.

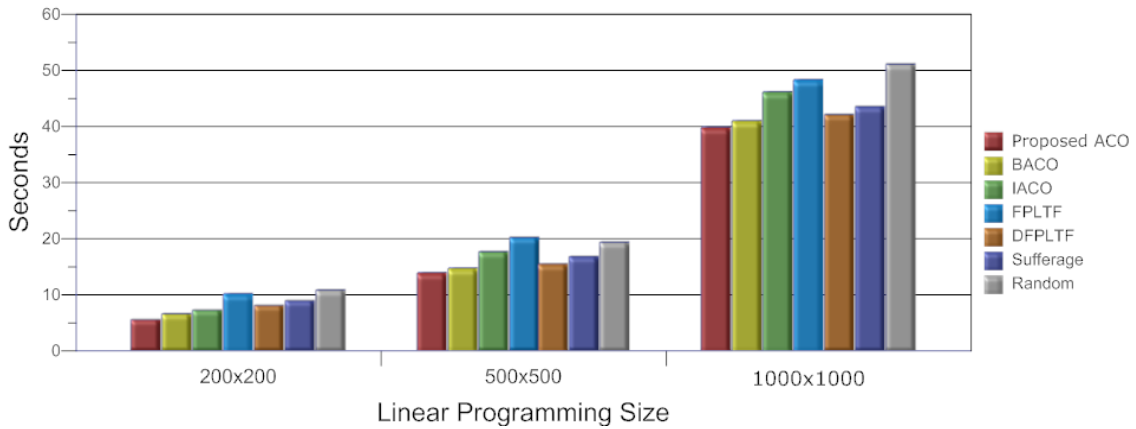
3.6.2 Στατική Αξιολόγηση Συστήματος

Στην παρούσα ενότητα της διατριβής παραθέτουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσής μας και τα συγκρίνουμε με τον αριθμό των εργασιών (*jobs*) που αναθέτονται σε κάθε πόρο, το μέσο χρόνο εκτέλεσης των εργασιών και την τυπική απόκλιση του φόρτου για κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Το μέγεθος των πινάκων και στις τρεις περιπτώσεις είναι ίδιο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, 500×500 , 1000×1000 , 2000×2000 , ενώ στο γραμμικό προγραμματισμό είναι 200×200 , 500×500 , 1000×1000 .



Σχήμα 13: Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης ανά Εργασία με Όμοια Μεγέθη (Μεθ. Πινάκων)

Τα αποτελέσματα του πολλαπλασιασμού ίδιου μεγέθους πινάκων και του γραμμικού προγραμματισμού απεικονίζονται στο Σχήμα 13 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μέσου χρόνου εκτέλεσης ανά εργασία (*job*) με τη μέθοδο του πολλαπλασιασμού πινάκων, ενώ το Σχήμα 14 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εφαρμογής στην περίπτωση του γραμμικού προγραμματισμού. Από τα αποτελέσματα εξάγουμε το συμπέρασμα ότι ο προτεινόμενος εξισορροπημένος ACO αλγόριθμος χρειάζεται λιγότερο χρόνο σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους για να εκτελέσει εργασίες ίδιου μεγέθους. Αυτό οφείλεται στο ότι ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος αξιοποιεί περισσότερο τους πόρους που έχουν αυξημένη υπολογιστική ισχύ και ελαφρύ φόρτο ώστε αυτοί να εκτελούν περισσότερες εργασίες. Για αυτόν το λόγο ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος έχει μικρό μέσο χρόνο εκτέλεσης ανά εργασία σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους.

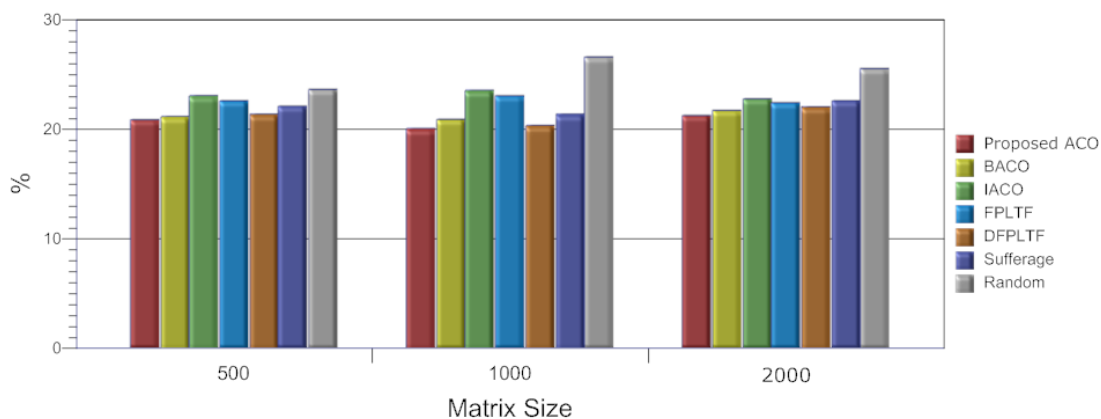


Σχήμα 14: Μέσος Χρόνος Εκτέλεσης ανά Εργασία με Όμοια Μεγέθη (Γραμμικός Προγρ/σμος)

Εν συνεχεία, έγινε τυχαίος δειγματοληπτικός έλεγχος του φόρτου παίρνοντας 10 μετρήσεις από κάθε πόρο κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της εργασίας και συγκρίνουμε ακολούθως την τυπική απόκλιση του φόρτου για την κάθε μέθοδο ξεχωριστά. Η τυπική απόκλιση δίδεται από την παρακάτω σχέση:

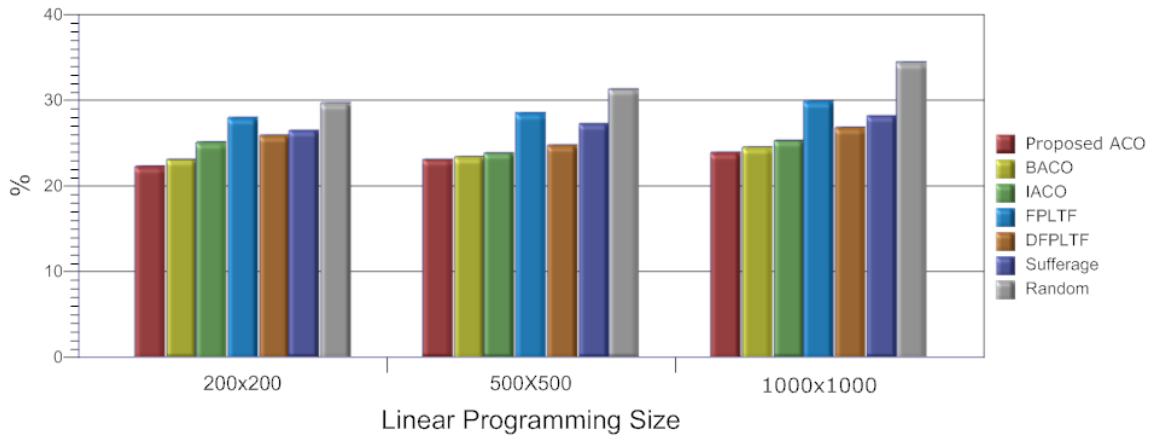
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (15)$$

Όπου σ είναι η τυπική απόκλιση με την ίδια μονάδα μέτρησης φόρτου, N ο αριθμός των πόρων, x_i είναι ο φόρτος του πόρου i , και \bar{x} είναι ο μέσος φόρτος όλων των πόρων.



Σχήμα 15: Τυπική Απόκλιση Φόρτου με Όμοια Μεγέθη (Μεθ. Πινάκων)

Το **Σχήμα 15** και το **Σχήμα 16** παρουσιάζουν τα ποσοστά της τυπικής απόκλισης του φόρτου για κάθε μέθοδο ξεχωριστά με τον προτεινόμενο ACO αλγόριθμο να έχει την μικρότερη τιμή. Γεγονός που συνεπάγεται ότι η διαφορά του φόρτου των πόρων είναι μικρή και ο φόρτος στους πόρους είναι ισορροπημένος.

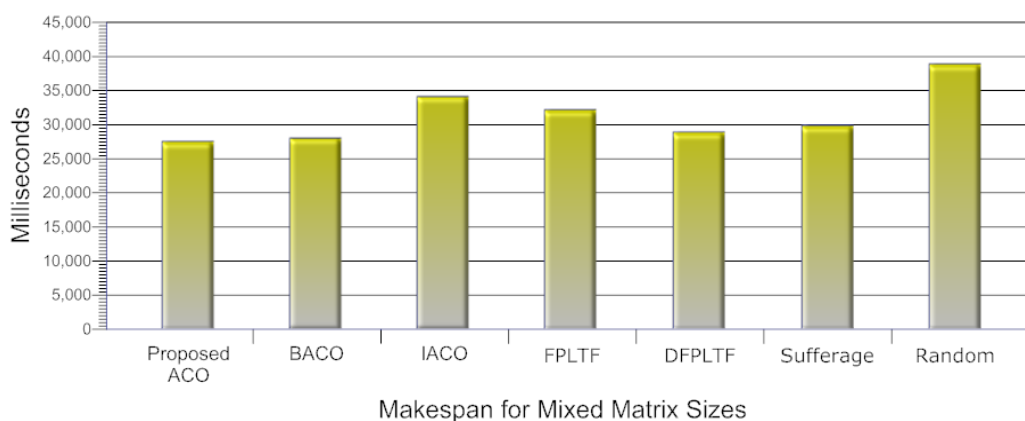


Σχήμα 16: Τυπική Απόκλιση Φόρτου με Όμοια Μεγέθη (Γραμμικός Προγρ/σμος)

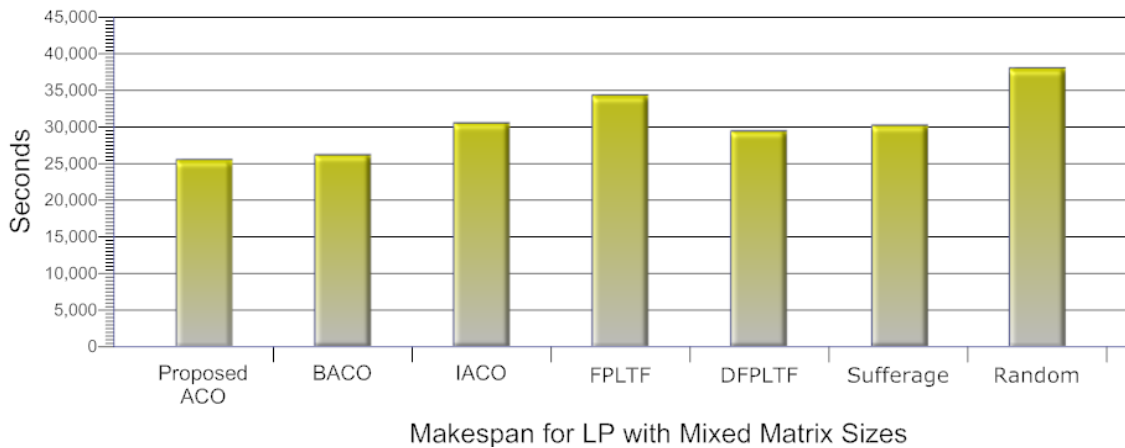
Εάν η τιμή της τυπικής απόκλισης μίας μεθόδου είναι μικρή, τότε αυτό συνεπάγεται ότι η διαφορά του κάθε φόρτου είναι μικρή. Επίσης, μικρή τιμή της τυπικής απόκλισης συνεπάγεται ότι ο φόρτος ολόκληρου του συστήματος είναι ζυγισμένος, όσο μικρότερη είναι η τιμή τόσο πιο ζυγισμένος είναι ο φόρτος του συστήματος.

3.6.3 Δυναμική Αξιολόγηση Συστήματος

Ο σκοπός της προσομοίωσης των μεικτών μεγεθών πραγματοποιείται διότι δύναται να υπάρχουν πολλές διαφορετικές εργασίες (*jobs*) μέσα σε ένα υπολογιστικό πλέγμα. Οπότε θα αναπτύξουμε θα πρέπει να εξετασθεί ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος μέσα σε ένα δυναμικό περιβάλλον υποβαλλόμενων εργασιών προκειμένου να αξιολογήσουμε και να συγκρίνουμε την απόδοσή του. Συνεπώς, επιλέγουμε 1000 εργασίες προς εκτέλεση και θέτουμε το κάθε μέγεθος στο 1/3 του συνολικού αριθμού των εργασιών. Οπότε οι εργασίες διαμορφώνονται ως εξής 333, 333, και 334 αντίστοιχα για το κάθε μέγεθος είτε του πίνακα πολλαπλασιασμού είτε του γραμμικού προγραμματισμού. Επίσης, συγκρίνουμε το συνολικό χρόνο εκτέλεσης εργασιών (*makespan*) και την τυπική απόκλιση του φόρτου της κάθε μεθόδου ξεχωριστά.

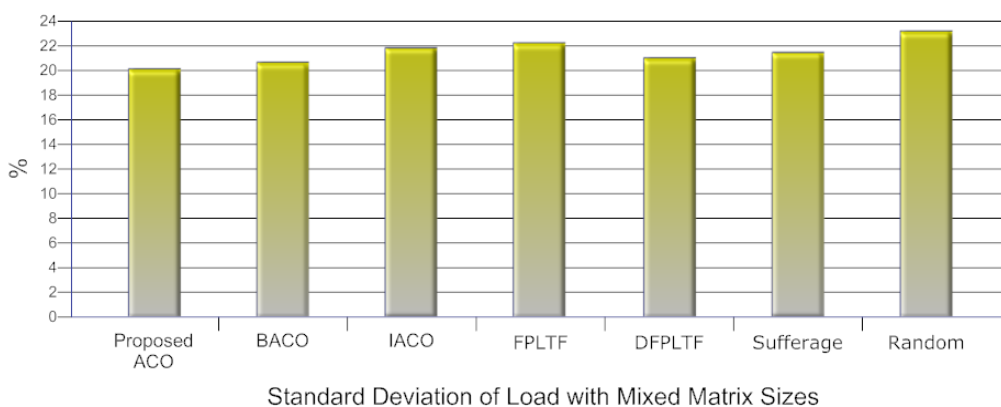


Σχήμα 17: Συνολικός Χρόνος Εκτέλεσης με Μεικτά Μεγέθη (Μεθ. Πινάκων)



Σχήμα 18: Συνολικός Χρόνος Εκτέλεσης με Μεικτά Μεγέθη (Γραμμικός Προγρ/σμος)

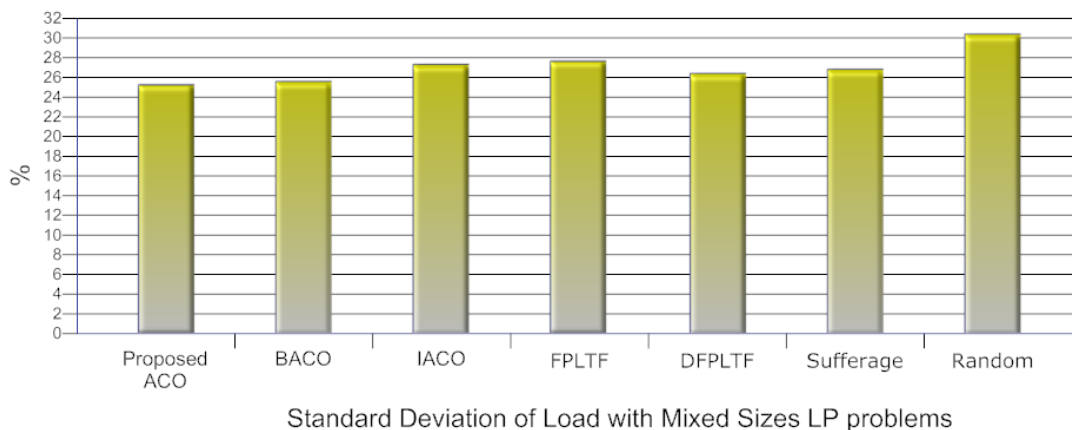
Τα αποτελέσματα του συνολικού χρόνου εκτέλεσης (*makespan*) της κάθε μεθόδου με μεικτά μεγέθη απεικονίζονται στα **Σχήματα 17** και **18**. Παρατηρήσαμε ότι ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος χρειάζεται λιγότερο χρόνο για να ολοκληρώσει όλες τις εργασίες (*jobs*). Επίσης, συμπεράναμε ότι λειτουργίες που σχετίζονται με την ενημέρωση της φερομόνης ανταποκρίνονται επιτυχώς. Ο BACO και ο IACO, εφαρμόζουν μεθοδολογίες ενίσχυσης και ποινής, αλλάζοντας τις μεταβλητές της φερομόνης που προκαθορίστηκαν από το χρήστη αγνοώντας την πραγματική κατάσταση των πόρων. Σε πόρους που έχουν μειωμένη απόδοση ή περιορισμένες υπολογιστικές ικανότητες οι δύο συγκρινόμενοι αλγόριθμοι ενισχύουν συνεχώς τη φερομόνη προς αυτούς. Συνεπώς, θα αναθέσει περισσότερες εργασίες σε αυτούς τους πόρους που έχουν υψηλότερες τιμές φερομόνης, με αποτέλεσμα να αυξηθεί ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης των υποβαλλόμενων εργασιών. Για αυτόν τον λόγο ο IACO έχει μεγαλύτερο συνολικό χρόνο εκτέλεσης (*makespan*) από τον προτεινόμενο αλγόριθμο.



Σχήμα 19: Τυπική Απόκλιση Φόρτου με Μεικτά Μεγέθη (Μεθ. Πινάκων)

Τα **Σχήματα 19** και **20** υποδεικνύουν τα αποτελέσματα της τυπικής απόκλισης για κάθε μέθοδο. Από αυτά παρατηρούμε ότι στην περίπτωση μικτών εργασιών (*jobs*) ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος πάλι έχει τη μικρότερη τυπική απόκλιση φόρτου. Η επιλογή του πόρου εξαρτάται από την κατάσταση των πόρων και

το μέγεθος των εργασιών. Αυτό σημαίνει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη την πραγματική κατάσταση των πόρων, γεγονός που παρατηρείται από τα αποτελέσματα επιτυγχάνοντας την εξισορρόπηση του φόρτου μέσα σε ολόκληρο το σύστημα.



Σχήμα 20: Τυπική Απόκλιση Φόρτου με Μεικτά Μεγέθη (Γραμμικός Προγρ/σμος)

Από τα αποτελέσματα, παρατηρούμε ότι ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος δύναται να επιτύχει τη βέλτιστη εξισορρόπηση ολόκληρου του υπολογιστικού πλέγματος σε κάθε περίπτωση σύμφωνα με τα παραπάνω σενάρια προσομοίωσης ενώ απαιτεί λιγότερο χρόνο για την εκτέλεση των εργασιών. Εξάγοντας το συμπέρασμα ότι ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος δύναται να διευθετήσει καταστάσεις με διαφορετικά μεγέθη εργασιών μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα και να επιτύχει-διατηρήσει εξισορρόπηση του φόρτου μέσα σε ένα υπολογιστικό πλέγμα εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τους υπόλοιπους συγκρινόμενους αλγορίθμους.

Εν αντίθεση, ο BACO και ο IACO έχουν περιορισμένη απόδοση διότι η πρόγνωση της κατάστασης των πόρων μέσω του μηχανισμού της ενημέρωσης της φερομόνης είναι μειωμένη. Η πρόγνωση σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιεί μεταβλητές ενίσχυσης-τιμωρίας των πόρων καθορισμένες από το χρήστη μετά από την ανάθεση των εργασιών ή την ολοκλήρωση αυτών. Μερικές φορές δυσλειτουργεί όταν οι τιμές της φερομόνης δεν αντιστοιχούν στην πραγματική κατάσταση των πόρων. Για αυτούς τους λόγους ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος αποδίδει καλύτερα από τους παραπάνω δύο συγκρινόμενους αλγορίθμους.

Ο DFPLTF (*Dynamic Fastest Processor to Largest Task First*) και ο Sufferage έχουν περίπου ταυτόσημη απόδοση όπου είναι άμεσα συγκρινόμενη με τον ACO αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής. Ωστόσο, ο IACO και ο DFPLTF δεν λαμβάνουν υπόψη τους το ζήτημα του εύρους ζώνης και υποθέτουν ότι τα δεδομένα είναι άμεσα διαθέσιμα στους πόρους, υπόθεση που μερικές φορές είναι αναληθή.

Ο FPLTF (*Fastest Processor to Largest Task First*) δύναται να έχει σχετικά περιορισμένη απόδοση εάν ο αριθμός των εργασιών είναι αρκετά μεγάλος και επιπλέον αναθέτει πάντα εργασίες στους πόρους με την υψηλότερη απόδοση, οι οποίοι ήδη μπορεί να έχουν βαρύ φόρτο. Ένεκα αυτής της λειτουργίας προκαλεί στο φόρτο του συστήματος μία ασύμμετρη κατάσταση απαιτώντας αρκετό χρόνο για να εκτελέσει τις εργασίες.

Ο Τυχαίος (*Random*) αλγόριθμος έχει τυχαία και διαφορετική απόδοση για κάθε περίπτωση χωριστά. Πέραν του συγκεκριμένου μειονεκτήματος, δεν λαμβάνει υπόψη του την κατάσταση των πόρων και το μέγεθος των εργασιών αναθέτοντας εργασίες στους πόρους τυχαία.

3.7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε ένας ACO αλγόριθμος με βάση τις αποικίες μυρμηγκιών που δύναται να επιλέγει βέλτιστους πόρους προς εκτέλεση των εργασιών, λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση των πόρων και το μέγεθος των υποβαλλόμενων εργασιών μέσα σε ένα περιβάλλον υπολογιστικού πλέγματος. Ορίστηκαν όλες οι απαραίτητες μετρικές προκειμένου να μπορέσει να γίνει μία ενδελεχής αξιολόγησή του ανάμεσα σε ευρέως διαδεδομένους αλγορίθμους. Ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος εξετάστηκε τόσο κάτω από στατικές συνθήκες φόρτου όσο και σε δυναμικές συνθήκες φόρτου. Η πραγματοποίηση προσομοιώσεων πέραν της επιβεβαίωσης για τη διαλειτουργικότητα του προτεινόμενου ACO αλγόριθμου, συγκρίθηκε με τους αλγορίθμους BACO [48], IACO [21], FPLTF [22], DFPLTF [23], Sufferage [24], και μία τυχαία επιλογή μεταξύ αυτών με στόχο να αποδειχθεί η χρηστικότητά του έναντι των προαναφερθέντων και ήδη χρησιμοποιούμενων αλγορίθμων.

Επιπλέον, παρουσιάστηκαν νέες τεχνικές που σχετίζονται με την ενημέρωση της τοπικής και της καθολικής φερομόνης καθώς υποστηρίχθηκε η εξισορρόπηση φόρτου μέσα στο δίκτυο. Η τεχνική της τοπικής φερομόνης ενημερώνει για την κατάσταση ενός επιλεγμένου πόρου μετά την ανάθεση εργασιών. Ενώ η τεχνική της καθολικής φερομόνης ενημερώνει για την κατάσταση του κάθε πόρου για όλες τις εργασίες μετά την ολοκλήρωση κάθε μίας από αυτές.

Με αυτόν τον τρόπο συνέβαλλε στην άμεση παροχή πληροφοριών που σχετίζονται με τους πόρους, σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας το ρόλο του χρονοπρογραμματιστή εργασιών βελτιστοποιώντας την ανάθεση της επόμενης εργασίας. Επίσης, τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος είναι σε θέση να επιτύχει βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανάθεσης εργασιών στους πόρους καθώς και εξισορρόπηση φόρτου ολόκληρου του δικτύου πλέγματος.

Τέλος, δόθηκε έμφαση στην λειτουργία του μηχανισμού φερομόνης μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα ο οποίος επανεξετάστηκε μέσω του παρουσιαζόμενου δείκτη φερομόνης που δύναται να χρησιμοποιηθεί τροποποιημένος για την επιλογή και πρόγνωση αποθηκευτικού χώρου σε δίκτυα δεδομένων.

3.8 Αναφορές

- [1] D. Corne, M. Dorigo, F. Glover, “*New Ideas in Optimization*”, 1st Edition, McGraw-Hill, 1999.
- [2] Z. Michalewicz, D. B. Fogel, “*How to Solve it: Modern Heuristics*”, 2nd Edition, Springer, 2004.
- [3] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, “*Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*”, 1st Edition, Oxford University Press, 1999.
- [4] M. Dorigo, E. Bonabeau, G. Theraulaz, “*Ant Algorithms and Stigmergy*”, *Future Generation Computer Systems*, vol. 16, pp. 851–871, 2000.
- [5] G. Theraulaz, E. Bonabeau, “*A Brief History of Stigmergy*”, *Artificial Life*, vol. 5(2), pp. 97–116, 1999.
- [6] P. P. Grassé, “*La Reconstruction du Nid et les Coordinations Interindividuelles chez Bellicositermes Natalensis et Cubitermes sp. La théorie de la Stigmergie: Essai d'Interprétation du Comportement des Termites Constructeurs*”, *Insectes Sociaux*, vol. 6(1), pp.41–80, 1959.
- [7] M. Dorigo, G. Di Caro, L.M. Gambardella, “*Ant Algorithms for Discrete Optimization*”, *Artificial Life*, vol. 5(2), pp. 137–172, 1999.
- [8] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni, “*The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents*”, *IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics*, vol. 26(1), pp. 29–41, 1996.
- [9] J. L. Deneubourg, S. Goss, N. Franks, J. M. Pasteels, “*The Blind Leading the Blind: Modeling Chemically Mediated Army Ant Raid Patterns*”, *Journal of Insect Behavior*, vol. 2(5), pp. 719–725, 1989.
- [10] J. L. Deneubourg, S. Aron, S. Goss, J. M. Pasteels, “*The Self-Organizing Exploratory Pattern of the Argentine Ant*”, *Journal of Insect Behavior*, vol. 3(2), pp. 159–169, 1990.
- [11] S. Goss, S. Aron, J. L. Deneubourg, J. M. Pasteels, “*Self-organized Shortcuts in the Argentine Ant*”, *Naturwissenschaften*, vol. 76(12), pp. 579–581, 1989.
- [12] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colorni, “*Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process*”, Technical Report 91-016 Rev., Politecnico di Milano, Italy, 1991. Retrieved from: http://pisis.unalmed.edu.co/vieja/cursos/analisis_decisiones/hormigas/ACO%20Publications.htm
- [13] M. Dorigo, L. M. Gambardella, “*Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem*”, *Biosystems*, vol. 43(2), pp. 73–81, 1997.
- [14] B. Bullnheimer, R. F. Hartl, C. Strauss, “*A New Rank-Based version of the Ant System: A Computational Study*”, *Central European Journal of Operations Research*, vol. 7(1), pp. 25–38, 1999.

- [15] M. Dorigo, L. M. Gambardella, “*Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*”, IEEE Transaction on Evolutionary Computing, vol. 1(1), pp. 53–66, 1997.
- [16] T. Stützle, H. H. Hoos, “*MAX-MIN Ant System*”, Future Generation Computer Systems, vol. 16(9), pp. 889–914, 2000.
- [17] M. Dorigo, T Stützle, “*Ant Colony Optimization*”, Bradford Books, The MIT Press, Massachusetts, USA, 2004.
- [18] M. Middendorf, F. Reischle, H. Schmeck, “*Information Exchange in Multi Colony Ant Algorithms*”, In Proc. of 15th IPDPS Workshops on Parallel and Distributed Processing, Springer-Verlag, pp. 645–652, 2000.
- [19] T. Stützle, “*Parallelization Strategies for Ant Colony Optimization*”, In A. Eiben, T. Bäck, M. Schoenauer, H. P. Schwefel (Eds), “*Parallel Problem Solving from Nature - PPSN V*”, LNCS vol. 1498, Springer-Verlag, pp. 722–731, 1989.
- [20] N. P. Preve, “*Balanced Job Scheduling Based on Ant Algorithm for Grid Network*”, International Journal of Grid and High Performance Computing (IJGHPC), vol. 2(1), pp. 34–50, 2010.
- [21] H. Yan, X. Q. Shen, X. Li, M. H. Wu, “*An Improved Ant Algorithm for Job Scheduling in Grid Computing*”, In Proc. of IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol 5, pp. 2957–2961, 2005.
- [22] D. Saha, D. Menasce, S. Porto, “*Static and Dynamic Processor Scheduling Disciplines in Heterogeneous Parallel Architectures*”, Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 28(1), pp. 1–18, 1995.
- [23] D. Paranhos da Silva, W. Cirne, F. Brasileiro, “*Trading Cycles for Information: Using Replication to Schedule Bag-of-Tasks Applications on Computational Grids*”, In Proc. of the International Conference on Parallel and Distributed Computing (Euro-Par 2003 Parallel Processing). In: H. Kosch, L. Böszörményi, H. Hellwagner (Eds.), Lecture Notes in Computer Science, vol. 2790, pp. 169–180, 2003.
- [24] B. Bullnheimer, R. F. Hartl, C. Strauss, “*A New Rank-based version of the Ant System: A Computational Study*”, Central European Journal for Operations Research and Economics, vol. 7(1), pp. 25–38, 1999.
- [25] E. D. Taillard, L. M. Gambardella, “*Adaptive Memories for the Quadratic Assignment Problem*”, Technical Report IDSIA-87-97, IDSIA (Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale), Lugano, Switzerland, 1997, Retrieved from: <http://www.dl.acm.org/citation.cfm?id=870516>.

- [26] Y. Du, Q. Zhang, Q. Chen, “*ACO-IH: An Improved Ant Colony Optimization Algorithm for Airport Ground Service Scheduling*”, In Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 1–6, 2008.
- [27] S. Lorpunmanee, M. N. Sap, A. H. Abdullah, C. C. Inwai, “*An Ant Colony Optimization for Dynamic Job Scheduling in Grid Environment*”, In Proc. of World Academy of Science: Engineering and Technology, vol. 23, pp. 314–321, 2007.
- [28] K. Thangavel, M. Karnan, P. Jegathan, A. I. Petha, R. Sivakumar, G. Geetharamani, “*Ant Colony Algorithms in Diverse Combinational Optimization Problems: A Survey*”, International Journal on Automatic Control and System Engineering, vol. 6(1), pp. 7–26, 2006.
- [29] G. Beni, J. Wang, “*Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems*”, NATO ASI Series, vol. 102(7), pp. 703–712, 1993.
- [30] J. Kennedy, R. C Eberhart, “*Swarm Intelligence*”, 1st Edition, The Morgan Kaufmann Series in Evolutionary Computation, Morgan Kaufmann, 2001.
- [31] K. M. Sim, W. H. Sun, “*Multiple Ant Colony Optimization for Network Routing*”, In Proc. of 1st IEEE International Symposium on Cyber Worlds, pp. 277-281, 2002.
- [32] J. Heinonen, F. Pettersson, “*Hybrid Ant Colony Optimization and Visibility Studies Applied to a Job-Shop Scheduling Problem*”, Applied Mathematics and Computation, vol. 187(2), pp. 989–998, 2007.
- [33] J. Li, W. Zhang, “*Solution to Multi-Objective Optimization of Flow Shop Problem based on ACO Algorithm*”, In Proc. of IEEE International Conference Computational Intelligence and Security, vol. 1, pp. 417–420, 2006.
- [34] E. Burke, G. Kendall, D. Silva Landa, R. O’Brien, E. Soubeiga, “*An Ant Algorithm Hyperheuristic for the Project Presentation Scheduling Problem*”, In Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computing, vol. 3, pp. 2263–2270, 2005.
- [35] E. Salari, K. Eshghi, “*An ACO Algorithm for Graph Coloring Problem*”, In Proc. of IEEE Congress on Computational Intelligence Methods and Applications, pp.5, 2005.
- [36] X. Zhang, L. Tang, “*CT-ACO-Hybridizing Ant Colony Optimization with Cycle Transfer Search for the Vehicle Routing Problem*”, In Proc. of IEEE Congress on Computational Intelligence Methods and Applications, pp. 6, 2005.
- [37] A. Silberschatz, G. Gagne, P. B. Galvin, “*Operating System Concepts*”, 8th Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- [38] D. Saha, D. Menasce, S. Porto, “*Static and Dynamic Processor Scheduling Disciplines in Heterogeneous Parallel Architectures*”, Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 28(1) pp. 1–18, 1995.

-
- [39] M. Maheswaran, S. Ali, H. J. Siegel, D. Hensgen, R. F. Freund, “*Dynamic Matching and Scheduling of a Class of Independent Tasks onto Heterogeneous Computing Systems*”, In Proc. of 8th IEEE International Heterogeneous Computing Workshop, pp. 30–46, 1999.
- [40] HellasGrid, Retrieved from: <http://www.hellasgrid.gr>
- [41] M. Maheswaran, S. Ali, H. J. Siegel, D. Hensgen, R. F. Freund, “*Dynamic Mapping of a Class of Independent Tasks onto Heterogeneous Computing Systems*”, Journal of Parallel and Distributed Computing, 59(2), pp. 107–131, 1999.
- [42] M. L. Pinedo, “*Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*”, 3rd Edition, New York: Springer, 2008.
- [43] Network Weather Service (NWS), Retrieved from: <http://nws.cs.ucsb.edu>
- [44] The Globus Toolkit, Retrieved from: <http://www.globus.org/toolkit>
- [45] GLPK – GNU Linear Programming Kit, Retrieved from: <http://www.gnu.org/software/glpk>
- [46] R. G. Bland, D. Goldfarb, M. J. Todd, “*Ellipsoid Method: A Survey*”, Operations Research, vol. 29(6), pp.1039–1091, 1981.
- [47] M. Grötschel, L. Lovász, A. Schrijver, “*The Ellipsoid Method and its Consequences in Combinatorial Optimization*”, Combinatorica, vol. 1(2), pp. 169–197, 1981.
- [48] R. S. Chang, J. S. Chang, P. S. Lin, “*An Ant Algorithm for Balanced Job Scheduling in Grids*”, Future Generation Computer Systems, vol. 25(1), pp. 20-27, 2009.

4. Σύστημα Συλλογής, Επεξεργασίας και Απεικόνισης Περιβαλλοντικών Δεδομένων σε Διαδίκτυο Αισθητήρων με Πλέγμα

Η ραγδαία εξέλιξη των ασύρματων τεχνολογιών και η σημαντική αύξηση των ασυρμάτων υπηρεσιών έχουν κάνει τις ασύρματες επικοινωνίες ένα ευρέως διαδεδομένο μέσο για τη μεταφορά πληροφορίας μέσα σε ποικίλους τομείς παρατήρησης. Επιπρόσθετα, η σύγχρονη τάση για ολοένα μεγαλύτερη ολοκλήρωση και μείωση του μεγέθους έχει δώσει τη δυνατότητα για ανάπτυξη πολλών συσκευών χαμηλού κόστους και ισχύος που υλοποιούν ένα πλήθος εφαρμογών. Πιο συγκεκριμένα, η ραγδαία ανάπτυξη των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων αλλά και της χρήσης των ραδιοσυχνοτήτων (*radio frequency, RF*) έχει επιτρέψει την ανάπτυξη χαμηλής ισχύος, κατάλληλων για δημιουργία δικτύων και χαμηλού κόστους μικροαισθητήρων.

Τα δίκτυα αισθητήρων έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας τα τελευταία έτη καθώς έχουν υιοθετηθεί από ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διαφορετικούς επιστημονικούς τομείς όπως είναι η υγεία, η διαχείριση κυκλοφορίας και η πρόγνωση του καιρού. Η χρήση των αισθητήρων ολοένα αυξάνεται γεγονός που οφείλεται στην ύπαρξη μικρών, μειωμένου κόστους και αξιόπιστων αισθητήρων που είναι ενεργειακά αυτόνομα καθώς παρέχουν επίσης τη δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας και δικτύωσης. Μέσα στο πλαίσιο που θέτουν τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (*WSNs*), παρέχουν πολλές δυνατότητες αυτού του είδους τα δίκτυα που δύναται να παραταχθούν ώστε να υποστηρίξουν μεγάλο αριθμό εφαρμογών.

Η θέση των κόμβων-αισθητήρων δεν χρειάζεται να σχεδιαστεί ή να προκαθοριστεί, γεγονός που επιτρέπει την τυχαία εναπόθεση των κόμβων σε περιοχές δύσβατες για τους ανθρώπους ή σε επιχειρήσεις αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών. Από την άλλη πλευρά, αυτό σημαίνει ότι τα πρωτόκολλα δικτύου και οι αλγόριθμοι των κόμβων πρέπει να έχουν την ικανότητα να οργανώνονται από μόνα τους. Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι η συνεργασία και επομένως η συνεχής επικοινωνία που λαμβάνει χώρα κυρίως μεταξύ των γειτονικών κόμβων. Ένα WSN δύναται να αποτελείται από ένα ή περισσότερους σταθμούς βάσης (*sink-base station*) και από μερικές δεκάδες ή χιλιάδες κόμβους-αισθητήρες, που συνδέονται μεταξύ τους με ένα ασύρματο μέσο και αναπτύσσονται σε ένα χώρο είτε μέσα στο υπό παρακολούθηση φαινόμενο είτε πολύ κοντά σε αυτό.

Κάθε κόμβος αισθητήρων συλλέγει δεδομένα τα οποία στη συνέχεια δρομολογούνται μέσω μίας διαδρομής πολλαπλών βημάτων (*multi-hop*) επικοινωνίας στη βάση, η οποία επικοινωνεί με τον τελικό χρήστη μέσω του Διαδικτύου ή άλλου είδους δικτύου. Ο κάθε κόμβος ενσωματώνει έναν επεξεργαστή που του παρέχει τη δυνατότητα, αντί να αποστέλλει απευθείας τα δεδομένα σε έναν καθορισμένο κόμβο που έχει αναλάβει την επεξεργασία τους, να χρησιμοποιεί πρώτα ο ίδιος τον επεξεργαστή του για την εκτέλεση καθορισμένων απλών υπολογισμών και στη συνέχεια να αποστέλλει μόνο τα απαραίτητα και μερικώς επεξεργασμένα δεδομένα.

Παρά τις συνεχείς προσπάθειες που έχουν γίνει για τη δικτύωση των αισθητήρων υπάρχει ακόμη η επιτακτική ανάγκη για νέους τρόπους διαδικτύωσης των ασύρματων αισθητήρων καθώς και ανάπτυξης εργαλείων που θα δύναται να παρέχουν βέλτιστη κατανόηση, διαχείριση και ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από αυτούς. Για αυτόν το λόγο, τίθεται το ζήτημα της ανάπτυξης και εφαρμογής κατάλληλων τεχνικών διασύνδεσης και διαχείρισης δεδομένων με σκοπό να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα και η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ των κόμβων των δικτύων αισθητήρων. Προς αυτήν την κατεύθυνση η ομαδοποίηση των δεδομένων και η επεξεργασία τους πρέπει να γίνεται με τρόπο που τα καθιστά πλήρως αξιοποιήσιμα από τις εφαρμογές και τις παρεχόμενες υπηρεσίες ενός δικτύου αισθητήρων. Η αρχιτεκτονική καθώς και ο σχεδιασμός του συστήματος διαχείρισης πρέπει να γίνεται με γνώμονα τους περιοριστικούς παράγοντες που θέτονται από τους αισθητήρες.

Συνεπώς, η επικοινωνία ανάμεσα στους αισθητήρες χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, διότι παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης και διαμόρφωσης των δικτύων αισθητήρων συμβάλλοντας έτσι στη διασύνδεσή τους με το Διαδίκτυο και την κατάλληλη απεικόνιση των δεδομένων τους. Συνεπώς, τα δεδομένα πραγματικού χρόνου είναι διαθέσιμα σε όλους τους χρήστες, μέσω των διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (*APIs*), οπουδήποτε κι αν βρίσκονται αυτοί μέσα στο δίκτυο. Προκειμένου να επιτευχθεί η κατάλληλη επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων, αυτά πρέπει να συλλέγονται και να αποθηκεύονται. Διάφορες τεχνικές για ομαδοποίηση των δεδομένων έχουν προταθεί, οι οποίες διαχωρίζονται σύμφωνα με τον τύπο του δικτύου και με βάση τις απαιτήσεις που θέτονται. Ωστόσο, τα συγκεντρωτικά στοιχεία είναι ανεπεξέργαστα δεδομένα δίχως να συμβάλλουν στη διαλειτουργικότητα του δικτύου. Η ορθή απεικόνιση και αναπαράσταση των δεδομένων είναι σημαντική διότι αυξάνει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των διαφόρων τύπων αισθητήρων παρέχοντας έτσι γενικές πληροφορίες για την κατάσταση του συνολικού δικτύου των αισθητήρων.

Διάφορες μέθοδοι επεξεργασίας δεδομένων που προέρχονται από ετερογενείς πηγές έχουν προταθεί όλα αυτά τα έτη που σκοπό έχουν να υποστηρίξουν την ανάλυση και τη σύγκριση δεδομένων από διάφορες εφαρμογές. Για αυτόν το λόγο το OGC (*Open Geospatial Consortium*) [1] παρουσίασε το SWE (*Sensor Web Enablement*) [2] και τη γλώσσα μοντελοποίησης SensorML [3] επιτυγχάνοντας το συγκεκριμένο σκοπό μέσω του καθορισμού των προδιαγραφών που πρέπει να πληρούν οι κόμβοι αισθητήρων, ενώ ταυτόχρονα τυποποιήθηκε η μορφή αναπαράστασης των δεδομένων. Επίσης σχεδιάστηκαν υπηρεσίες διαδικτύου που υποστηρίζουν την προσβασιμότητα και τη δυνατότητα ελέγχου των δεδομένων μέσω του Διαδικτύου. Το SWE αποτέλεσε μία ειδικού τύπου υποδομή που βασίζεται στο Διαδίκτυο με στόχο τη συλλογή, μοντελοποίηση, αποθήκευση, ανάκληση, διανομή, ανάλυση και απεικόνιση των δεδομένων και φαινομένων που εξετάζονται.

4.1 Εισαγωγή

Η ραγδαία εξέλιξη των WSNs δικτύων οδήγησε στη χρησιμοποίησή τους για την παρατήρηση και συλλογή δεδομένων από διάφορες γεωγραφικά διάσπαρτες περιοχές. Η συνεχής εξέλιξη των αισθητήρων σε

συνεργασία με τη μετάδοση των δεδομένων τους μέσα από το Διαδίκτυο παρουσίασε στο προσκήνιο ένα νέο τεχνολογικό εργαλείο που καλείται Διαδίκτυο Αισθητήρων (*Sensor Web*). Αυτά τα συστήματα δύναται να είναι ολόκληρα δίκτυα αισθητήρων που θεωρούνται ως απλοί κόμβοι και δύναται να επικοινωνούν και να διαχειρίζονται μέσα από το Διαδίκτυο.

Ένα Διαδίκτυο Αισθητήρων επικεντρώνεται στην ανταλλαγή των δεδομένων των αισθητήρων και στην κατάλληλη επεξεργασία τους ώστε να καταστούν πλήρως εκμεταλλεύσιμα συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη αντίληψη του περιβάλλοντός τους. Γεγονός που καθιστά την επεξεργασία των δεδομένων μείζονος σημασίας. Ο κύριος σκοπός αυτού του τύπου δικτύων είναι να λαμβάνουν κυρίως γεωφυσικές μετρήσεις υποστηρίζοντας την κατανόηση των φυσικών συνθηκών που επικρατούν σε απομακρυσμένες γεωγραφικά περιοχές καθώς να υποστηρίζουν τη λήψη μέτρων που στόχο έχουν την περαιτέρω προστασία του υπό παρακολούθηση φυσικού περιβάλλοντος.

Επιπλέον, η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση της επιστημονικής κοινότητας για παροχή αδιάλειπτων υπηρεσιών που σχετίζονταν με υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους συνέβαλλε στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των δικτύων πλέγματος (*grid*). Η συνάθροιση των κατανεμημένων πόρων μέσα σε ένα υπολογιστικό πλέγμα παρέχει σε τους απαραίτητους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους σε μία απαιτητική εφαρμογή που στόχο έχει να επιλύσει κάποιο επιστημονικό πρόβλημα.

Η γεωφυσική επιστήμη τα τελευταία χρόνια έχει αναπτύξει ποικίλα εργαλεία τα οποία έχει ενσωματώσει στην επιστήμη των υπολογιστών με στόχο να παρακολουθεί και να καταγράφει τις περιβαλλοντικές αλλαγές. Για την παρακολούθηση (*monitoring*) γεωφυσικών φαινομένων κυρίως χρησιμοποιούνται υποδομές ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων. Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες γεωφυσικές εφαρμογές περιλαμβάνουν τεχνικές που σχετίζονται με: (i) Την εξόρυξη δεδομένων και ανάλυση αυτών σε χρονοσειρές, (ii) Τη μοντελοποίηση και προσομοίωση μαθηματικών μοντέλων κινδύνου για πολλαπλά σενάρια εξέλιξης, (iii) Την παρακολούθηση περιοχών με σκοπό τη λήψη προληπτικών μέτρων, (iv) Την ανάπτυξη ευρείας κλίμακας προσομοιώσεων που επιτρέπουν την αλληλεπίδραση.

Τα συγκεκριμένα εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη γεωφυσική επιστήμη βασίζονται κυρίως σε δεδομένα που έχουν εισαχθεί σε αυτά τα συστήματα και είναι αποτέλεσμα μακροχρόνιων παρατηρήσεων, γεγονός που καθιστά επιτακτική την ανάγκη για χρήση των δικτύων πλέγματος ένεκα των αυξημένων απαιτήσεων που έχουν σε υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους. Επίσης τα χρησιμοποιούμενα μέχρι στιγμής ασύρματα δίκτυα αισθητήρων υπόκεινται σε περιορισμούς όπου για να επιλυθούν πρέπει αυτά να ενσωματωθούν με την τεχνολογία πλέγματος.

Ο όρος Διαδικτυακή υποδομή (*Cyberinfrastructure*) χρησιμοποιήθηκε από το Εθνικό Ίδρυμα Επιστήμης (*National Science Foundation, NSF*) [4] των Η.Π.Α για να περιγράψει τους πόρους της τεχνολογίας πληροφόρησης οι οποίοι χρησιμοποιούνται από ερευνητές, κλινικούς ερευνητές, μηχανικούς και γενικότερα από την επιστημονική κοινότητα με σκοπό τη δημιουργία νέας γνώσης. Συγκεκριμένα, το NSF ορίζει ως Διαδικτυακή υποδομή (*cyberinfrastructure*) την συνεργασία οργάνων, αισθητήρων, υπολογιστικών συστημάτων υπερυψηλής απόδοσης, συστημάτων αποθήκευσης μεγάλου όγκου δεδομένων, πόρων δεδομένων και δυνατοτήτων απεικόνισης, που συνδέονται άρρηκτα με δίκτυα υψηλών ταχυτήτων και

λειτουργούν με πολύ ανεπτυγμένα λογισμικά [4]. Αυτός ο όρος εσωκλείει χρήστες, διαδικασίες, πολιτικές ασφάλειας και δυνατότητες που υποστηρίζονται από την υποδομή καθώς αυτή παρέχει σε καταναμημένες επιστημονικές κοινότητες αδιάλειπτη πρόσβαση σε καταναμημένα δεδομένα με τη χρήση ενδιάμεσου λογισμικού.

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάζεται μία αρχιτεκτονική ενοποίησης της τεχνολογίας του Διαδικτύου Αισθητήρων (*Sensor Web*) με την υποδομή πλέγματος (*grid*), με στόχο την παρακολούθηση, καταγραφή και ανάλυση γεωφυσικών φαινομένων σε πραγματικό χρόνο πληρώντας ταυτόχρονα τις προδιαγραφές που τίθενται από το NSF [4] ώστε να χαρακτηριστεί ως Διαδικτυακή υποδομή (*cyberinfrastructure*). Μέσα στην ενοποιημένη υποδομή επιτυγχάνεται η αλληλεπίδραση του χρήστη με την περιβαλλοντική υποδομή εξασφαλίζοντας τη διασύνδεση των τοπικών και καταναμημένων ετερογενών πόρων του δικτύου μέσα από ένα δομημένο πλαίσιο, με αποτέλεσμα να παρέχει άφθονους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους στο χρήστη της.

Επίσης, ένας επιπλέον στόχος που επιτυγχάνεται μέσω της διαλειτουργικότητας των δύο ετερογενών δικτυακών τεχνολογιών είναι μία κλιμακούμενη, προσαρμοστική και εύρωστη ενοποιημένη υποδομή που υποστηρίζει την παρακολούθηση, αποθήκευση, επεξεργασία, διαχείριση, απεικόνιση και λήψη χωρικών δεδομένων από το φυσικό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο καταγράφοντας τις ποικίλες γεωφυσικές αλλαγές.

Τέλος, υιοθετείται η τεχνική που βασίζεται σε διακομιστές μεσολάβησης, όπως αυτή θα περιγραφεί εκτενέστερα και θα αξιολογηθεί στο Κεφ. 5, προκειμένου να αντιμετωπισθεί επιτυχώς το ζήτημα της διασύνδεσης και διαλειτουργικότητας μεταξύ των ετερογενών δικτυακών περιβαλλόντων. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση διασύνδεσης των ιατρικών πληροφοριακών συστημάτων με το ευρύ δίκτυο αισθητήρων με πλέγμα, σκοπός της συγκεκριμένης τεχνικής διαδικτύωσης είναι η εξασφάλιση της διαδικτύωσης και διαλειτουργικότητας σε ετερογενή δικτυακά περιβάλλοντα που μεταδίδουν δεδομένα μετρήσεων πραγματικού χρόνου με εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας (*QoS*).

4.2 Σχετικές Εργασίες

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές προσπάθειες από γεωλόγους και γεωφυσικούς επιστήμονες στον τομέα της παρακολούθησης και πρόγνωσης των περιβαλλοντικών αλλαγών της γης. Το παρόν επιστημονικό πεδίο αφήνει ανοικτά ζητήματα που σχετίζονται με την επιστήμη των υπολογιστών καθώς παρατηρούνται συνεχής ελλείψεις σε επίπεδο παρακολούθησης και μετρήσεων που συμβάλλουν στη διασύνδεση των επιστημόνων με το φυσικό περιβάλλον. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που πρέπει να ενσωματώνει ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (*Geographic Information System, GIS*) που βασίζεται στην τεχνολογία των αισθητήρων με στόχο την παρακολούθηση και πρόγνωση περιβαλλοντικών αλλαγών σχετίζονται με τη δυνατότητα αποθήκευσης και επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων καθώς και με την αυτόνομη λειτουργία του [5] [6].

Εν αντιθέσει, με τα Κατανεμημένα Δίκτυα Αισθητήρων (*Distributed Sensor Network, DSN*) που ορίζονται ως μία συλλογή από μεγάλο αριθμού ετερογενών και γεωγραφικά κατανεμημένων αισθητήρων οι οποίοι είναι διασυνδεδεμένοι μέσω ενός δικτύου που εξασφαλίζει αμφίδρομη επικοινωνία [7]. Μία διαφορετική προσέγγιση που παρουσιάζεται στο [8], όπου αναφέρεται ότι αυτού του είδους τα δίκτυα παρακολουθούν (*monitoring*) φαινόμενα μέσα σε ένα γεωγραφικό χώρο συλλέγοντας, καταγράφοντας και αναλύοντας χωρικά δεδομένα μέσω ενός Δικτύου Γεω-Αισθητήρων (*GeoSensor Network, GSN*). Ως γεω-αισθητήρες ορίζεται οποιαδήποτε συσκευή λαμβάνει περιβαλλοντικές μετρήσεις οι οποίες δύναται γεωγραφικής αναφοράς [9]. Σε περίπτωση που υπάρχει ενεργητική ή/και παθητική κινητικότητα (*mobility*) μέσα σε ένα δίκτυο γεω-αισθητήρων (*GSN*), τότε αυτό χαρακτηρίζεται ως κινητό (*mobile*) MGSN [8].

Διαχωρίζοντας τους επικρατέστερους ορισμούς που έχουν δοθεί μέχρι στιγμής, αναφέρουμε ότι ένα Κατανεμημένο Δίκτυο Αισθητήρων (*DSN*) το οποίο δεν περιλαμβάνει γεω-αισθητήρες δεν δύναται να χαρακτηριστεί ως Δίκτυο Γεω-Αισθητήρων (*GSN*). Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αυτού του κεφαλαίου χρησιμοποιεί αισθητήρες που λαμβάνουν μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας και ολικής ηλιακής ακτινοβολίας, συνεπώς διαθέτει τα κριτήρια ενός *GSN* δικτύου. Παρόλα αυτά, η επιστήμη των υπολογιστών έχει συνεισφέρει στη γεωφυσική επιστήμη μέσα από συστήματα που έχουν αναπτυχθεί με στόχο την παρακολούθηση περιβαλλοντικών αλλαγών, μικροκλιματικών αλλαγών καθώς και την παρατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος [10].

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση μικροκλιματικών αλλαγών σκοπό έχουν τη λήψη μετρήσεων υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, βαρομετρικής πίεσης και θερμοκρασίας από τροπικά δάση [11]. Ανάμεσα στις τεχνικές διασύνδεσης των γεω-αισθητήρων που έχουν προταθεί όλα αυτά τα έτη, ξεχωρίζουν το GlacsWeb [12] που παρακολουθεί τη συμπεριφορά της μάζας των πάγων για την καλύτερη κατανόηση του κλίματος της γης καθώς επίσης και το PODS [13] που σκοπό έχει την παρακολούθηση σπάνιων και των υπο-εξαφάνιση φυτικών ειδών μέσω ενός συστήματος οπτικής απεικόνισης το οποίο χρησιμοποιώντας αισθητήρες λαμβάνει ενδείξεις θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας. Επίσης, δίκτυα αισθητήρων για την προστασία του περιβάλλοντος χρησιμοποιήθηκαν για την παρακολούθηση πλημμύρων παράγοντας επιτυχώς προειδοποιήσεις ενώ ταυτόχρονα παρακολουθούσαν τη διάβρωση του υπεδάφους μικρών νήσων [14]. Επιπλέον, τα ασύρματα δίκτυα γεω-αισθητήρων έκαναν ακόμη πιο έντονη τη χρησιμότητά τους στη γεωφυσική επιστήμη μέσω ενός συστήματος ειδοποιήσεων που αναπτύχθηκε με σκοπό την τοπική εκτίμηση φυσικών κινδύνων για την προστασία από πιθανές πλημμύρες και βροχοπτώσεις [15].

Όσον αφορά τη χρήση των δικτύων πλέγματος στην γεωφυσική επιστήμη έχουν ασχοληθεί διάφορες επιστημονικές έρευνες κυρίως σε επιστημονικό ευρωπαϊκό επίπεδο, με κυριότερα να είναι τα ακόλουθα. Το ερευνητικό έργο DORII (*Deployment of Remote Instrumentation Infrastructures*) [16] στόχευε σε μία πλεγματική υποδομή που στο επίκεντρο είχε την τεχνολογία πλέγματος. Ο σκοπός αυτού ήταν η δημιουργία εικονικών οργανισμών, όπου οι χρήστες με τη χρήση της πλεγματικής υποδομής πραγματοποιούσαν προσομοιώσεις ευρείας κλίμακας. Παρόλα αυτά, τα προβλήματα διασύνδεσης που παρουσίασε η υποδομή την απέτρεψαν από το να ενταχθεί έγκαιρα μέσα στην Πανευρωπαϊκή υποδομή πλέγματος EGEE [17].

Η Γεω-Πλεγματική Υποδομή Παρατήρησης (*Global Earth Observation Grid, GEO*) [18] που αναπτύχθηκε είχε ως στόχο την ενοποίηση μεγάλου όγκου δεδομένων διαφορετικού φορμά που προερχόντουσαν από δορυφορικές εικόνες, γεωλογικά δεδομένα και μετρήσεις ανάγλυφου του εδάφους. Η ενοποίηση των δεδομένων βασίστηκε στη χρήση της τεχνολογίας πλέγματος καθώς ο χρήστης μέσω διεπαφών που αναπτύχθηκαν με επίκεντρο τις υπηρεσίες Διαδικτύου (*web services*) αποκτούσε πρόσβαση σε αυτά. Η αρχιτεκτονική του GEO βασίστηκε σε τέσσερα επίπεδα: (i) Υλικού, (ii) Αποθήκευσης, (iii) Υπηρεσιών Εφαρμογών, (iv) Διεπαφών Προγραμματισμού Εφαρμογών. Παρά την γεω-πλεγματική φύση της υποδομής δεν ενσωματώθηκαν ασύρματοι αισθητήρες στην κύρια υποδομή πλέγματος.

Προσπάθειες πραγματοποιήθηκαν στον τομέα πρόγνωσης και αντιμετώπισης των πλημμύρων μέσα από το ερευνητικό έργο Cowbridge [19]. Η συγκεκριμένη περιβαλλοντική υποδομή ενσωμάτωσε δίκτυα αισθητήρων σε μία συστοιχία (*cluster*) υπολογιστών μέσω μίας προσαρμοσμένης διεπαφής πλέγματος (*customized grid interface*). Η ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο υποστηρίχθηκε με τη χρήση ενός αλγορίθμου πρόγνωσης πλημμύρων που είχε αναπτυχθεί προκειμένου να προλαμβάνουν περαιτέρω φυσικές καταστροφές. Η παρούσα υποδομή υποστήριζε την επιλεκτική και δυναμική ανάθεση υπολογιστικών εργασιών (*jobs*) είτε στο δίκτυο αισθητήρων είτε στην υποδομή πλέγματος. Ένεκα της συγκεκριμένης προσέγγισης που είχε ως επίκεντρο, σαν αποτέλεσμα έφερε στο προσκήνιο προβλήματα που συσχετιζόντουσαν με τη βέλτιστη διαχείριση ενέργειας των αισθητήρων, την ανακάλυψη αισθητήρων (*sensors discovery*), την ασφάλεια καθώς και με τα πρωτόκολλα δρομολόγησης τους.

Η υποδομή αισθητήρων του SANY (*Sensors Anywhere*) [20] έχει ως σκοπό την παρατήρηση γεωλογικών φαινομένων προσπαθώντας να συμβάλλει στη διαλειτουργικότητα των *in-situ* αισθητήρων μεταξύ διαφόρων δικτύων αισθητήρων. Ως απώτερο σκοπό είχε την άμεση και αποτελεσματική χρήση των δεδομένων που προέρχονται από ετερογενείς και ασύμβατους μεταξύ τους ασύρματους αισθητήρες ενώ αυτά διαχειριζόντουσαν από περιβαλλοντικές εφαρμογές που είχαν αναπτυχθεί για την πρόγνωση κινδύνου από φυσικές καταστροφές. Για να επιτευχθεί ο παραπάνω σκοπός ορίστηκαν ανοικτά πρότυπα αρχιτεκτονικής και διαδικασίες μετάδοσης δεδομένων, γεγονός που καθιστά τη συγκεκριμένη υποδομή αξιοποιήσιμη από το πλαίσιο Παγκόσμιας Παρακολούθησης του Περιβάλλοντος και Ασφάλειας GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) [21]. Παρά ταύτα, η υποδομή SANY δεν εστίασε καθόλου αλλά ούτε ενσωμάτωσε οποιεσδήποτε δυνατότητες παρέχονται από την τεχνολογία πλέγματος.

4.3 Τεχνολογικό Πλαίσιο Γεω-υποδομής

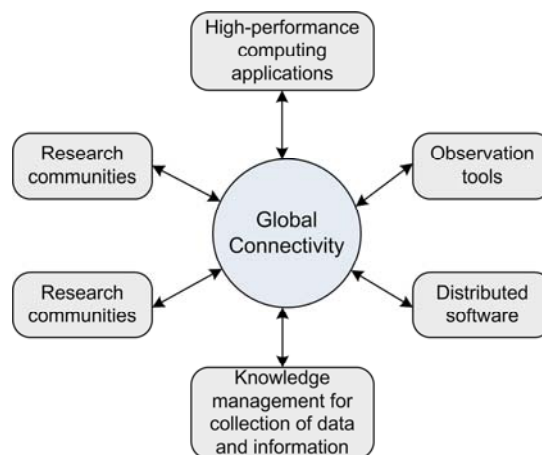
Σε αυτό το κεφάλαιο της διατριβής θα παρουσιασθεί συνοπτικά το τεχνολογικό πλαίσιο της γεω-υποδομής το οποίο υιοθετείται στα πλαίσια της αρχιτεκτονικής και της αξιολόγησης του προτεινόμενου ενοποιημένου γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (*GIS*) που έχει ως βάση του την πλεγματική τεχνολογία που αποσκοπεί στην ενημέρωση των χρηστών της υποδομής και στην προστασία του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο. Οι έννοιες οι οποίες υιοθετούνται είναι λίγο ως πολύ ίδιες με αυτές που

θα χρησιμοποιηθούν και στην προσέγγιση του Κεφ. 5 που εστιάζει στη διαλειτουργικότητα των ιατρικών πληροφοριακών συστημάτων με το ευρύ δίκτυο αισθητήρων με πλέγμα.

Οι επιστημονικές κοινότητες στις μέρες μας αυξάνονται συνεχώς ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μία συνεργατική και πολυδιάστατη σχέση καθώς διάφορα πανεπιστημιακά ιδρύματα συνδέονται μεταξύ τους παρόλο που δύναται να βρίσκονται σε διαφορετικές χώρες ή ακόμη και σε διαφορετικές ηπείρους. Οι τεχνολογίες Διαδικτύου παρέχουν τους κατάλληλους μηχανισμούς που επιτρέπουν στις ποικίλες ερευνητικές ομάδες που είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες να εργάζονται και να ανταλλάσσουν χρήσιμες πληροφορίες μεταξύ τους σαν να ήταν μία ενιαία ομάδα.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική υποδομή έχει ως στόχο τη διασύνδεση των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση γεω-φυσικών φαινομένων με την τεχνολογία υποδομής πλέγματος. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η παροχή με των απαραίτητων υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων στους χρήστες της υποδομής υποστηρίζοντας έτσι την αυξημένου όγκου αποθήκευση, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων από τους αισθητήρες καθώς και την πραγματοποίηση απαιτητικών σε πόρους προσομοιώσεων. Επίσης επιτυγχάνεται ο διαμοιρασμός των δεδομένων, των αποθηκευτικών και υπολογιστικών πόρων και των γεω-αισθητήρων μέσα στο ετερογενές περιβάλλον δημιουργώντας έτσι ένα εικονικό εργαστηριακό οργανισμό που υποστηρίζει την αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ των ερευνητικών ομάδων παρέχοντας ταυτόχρονα τις προδιαγραφές για καλύτερη αξιοποίηση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Η ανάγκη καθορισμού του τεχνολογικού πλαισίου προκύπτει ώστε οι χρήστες της υποδομής να μην αντιμετωπίζουν προβλήματα διαλειτουργικότητας μεταξύ των ετερογενών δικτυακών περιβαλλόντων. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική προσέγγιση αποσκοπεί στην παροχή μίας διαφανούς υποδομής ως προς τη λειτουργία της στον τελικό χρήστη αποφεύγοντας έτσι οποιουδήποτε περιορισμούς προκύπτουν από τη χρήση πολύπλοκων λογισμικών που παρά τις δυνατότητες που προσφέρουν για την επίλυση των περιορισμών ,από πλευράς διασύνδεσης των δικτυακών συστημάτων, δεν εγγυώνται την επεκτασιμότητα και την απρόσκοπτη λειτουργία του ενοποιημένου πλεγματοειδούς δικτύου.



Σχήμα 21: Ενοποιημένο Πλαίσιο Εργασίας Διαδικτύου Αισθητήρων με Πλέγμα

Το **Σχήμα 21** απεικονίζει συνοπτικά το πλαίσιο εργασίας επάνω στο οποίο βασίστηκε η προτεινόμενη ενοποιημένη υποδομή, υποδεικνύοντας τις απαιτήσεις που πρέπει αυτή να εκπληρώσει επιλύοντας ταυτόχρονα οποιουσδήποτε περιορισμούς ενώ εστιάζει στις εξής παραμέτρους:

- Υποστηρίζει και χρησιμοποιεί τους πόρους της υποδομής πλέγματος εξασφαλίζοντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών δικτυακών τεχνολογιών και εφαρμογών.
- Αναπτύσσεται μία εύχρηστη διεπαφή χρήστη (*user interface*) που διασφαλίζει την ακεραιότητα της υποδομής καθορίζοντας ποιοι χρήστες θα έχουν πρόσβαση και σε ποιους πόρους.
- Υποστηρίζει ποικίλες εφαρμογές, πολύπλοκες και απαιτητικές σε υπολογιστικούς πόρους προσομοιώσεις.
- Εστιάζει στην ανάγκη ενοποίησης και συνεργασίας μεταξύ ποικίλων εικονικών οργανισμών διαφορετικού επιστημονικού υποβάθρου αλλά κοινού ενδιαφέροντος.

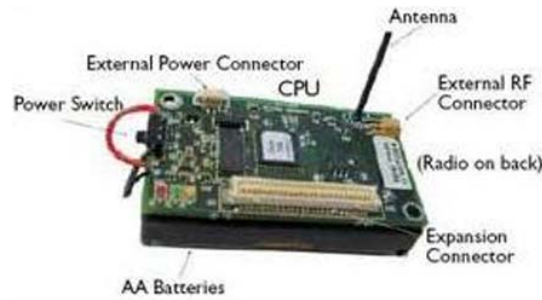
Η προτεινόμενη υποδομή δύναται να καλύψει τις απαιτήσεις των χρηστών ενώ υποστηρίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ ποικίλων ερευνητικών κοινοτήτων. Επιπλέον, μέσω της παρούσας αρχιτεκτονικής προωθείται η ευελιξία (*flexibility*) της υποδομής υποστηρίζοντας την υλοποίησή της σε ευρεία κλίμακα καθώς και την ανταλλαγή γνώσης μεταξύ επιστημονικών κοινοτήτων διαφορετικού προσανατολισμού.

Βασιζόμενοι στους παραπάνω λόγους η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ενοποίησης του *Διαδικτύου Αισθητήρων* με Πλέγμα ως Διαδικτυακή Υποδομή (*SensorWeb Grid Cyberinfrastructure*) [22], όπου πέραν της εξασφάλισης της διαλειτουργικότητας και διασύνδεσης των ετερογενών δικτυακών τεχνολογιών μέσα από το ενοποιημένο περιβάλλον της σχηματίζεται ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (*GIS*) το οποίο έχει ως επιπλέον στόχο την προστασία του περιβάλλοντος.

4.3.1 Διαδίκτυο Αισθητήρων

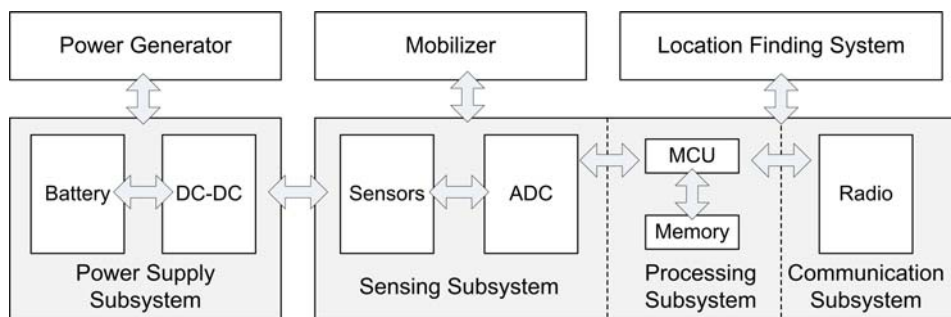
Μία υποδομή Διαδικτύου αισθητήρων (*sensor web*) αποτελείται από ασύρματους αισθητήρες που είναι γεωγραφικά κατανεμημένοι στο χώρο ενώ είναι σε θέση να λαμβάνουν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο από το φυσικό περιβάλλον μέσα στο οποίο έχουν παραταχθεί. Ένα Διαδίκτυο αισθητήρων, σύμφωνα με τον ορισμό που έχει δοθεί από τον OGC [1], αναφέρεται σε δίκτυα αισθητήρων που είναι προσβάσιμα μέσω του Διαδικτύου καθώς αυτά λαμβάνουν μετρήσεις όπου δύναται να αποκτηθεί πρόσβαση δια μέσου της χρήσης στάνταρ πρωτοκόλλων και διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (APIs) [2].

Ένας αισθητήρας αποτελείται από τέσσερα βασικά συστατικά: (i) Το υποσύστημα αισθητήρων (*sensing subsystem*), (ii) Το υποσύστημα επεξεργασίας των δεδομένων (*processing subsystem*), (iii) Το υποσύστημα της ασύρματης επικοινωνίας (*communication subsystem*), (iv) Το υποσύστημα παροχής ισχύος (*power supply subsystem*) [23].



Σχήμα 22: Κόμβος Αισθητήρα

Στο Σχήμα 23 που ακολουθεί απεικονίζονται τα πιο πάνω βασικά υποσυστήματα που συνθέτουν τον κόμβο-αισθητήρα (Σχήμα 22) καθώς ακολουθεί περιγραφή αυτών.



Σχήμα 23: Αρχιτεκτονική ενός Ασύρματου Κόμβου Αισθητήρα

Το υποσύστημα αισθητήρων (*sensing subsystem*) αποτελεί το μέσο με το οποίο ο κόμβος αντιλαμβάνεται το φυσικό κόσμο και σκοπός του είναι η μετατροπή ενός φυσικού ή χημικού μεγέθους σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο συνήθως πρόκειται για μία αναλογική τάση. Αποτελείται από τρία μέρη που είναι ο ηλεκτρονικός αισθητήρας, τα απαραίτητα ηλεκτρονικά για την προετοιμασία του σήματος και την τελική του μετατροπή σε τάση αν αυτό απαιτείται (*Signal-Conditioning*), και τέλος τον A/D μετατροπέα (*Analog to Digital Converter*) που υποστηρίζει τη ψηφιακή μετατροπή του αναλογικού σήματος τάσης. Πολλές φορές, αυτά τα τρία μέρη είναι δυσδιάκριτα αφού δύναται να ενσωματώνονται στο πακέτο του αισθητήρα ή/και του επεξεργαστή, αν πρόκειται για μικροελεγκτή.

Το υποσύστημα επεξεργασίας (*processing subsystem*) αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος και ο ρόλος του είναι να ελέγχει και να εκτελεί τις περισσότερες λειτουργίες του ασύρματου κόμβου. Μερικές από αυτές είναι ο έλεγχος και η δειγματοληψία των αισθητήρων, η επεξεργασία και προσωρινή αποθήκευση των δεδομένων καθώς και η λήψη αποφάσεων, η εκτέλεση των τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων και των αλγορίθμων δρομολόγησης και εξοικονόμησης ενέργειας. Η υπολογιστική απόδοση του κόμβου και οι ενεργειακές του απαιτήσεις καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από την επεξεργαστική μονάδα, η οποία και αποτελεί τον δεύτερο σε σειρά καταναλωτή ενέργειας του κόμβου, μετά το υποσύστημα ασύρματης επικοινωνίας. Πολλοί επεξεργαστές, μικροελεγκτές, DSPs ακόμα και FPGA είναι διαθέσιμοι στην αγορά και προσφέρονται για χρήση στους κόμβους-αισθητήρες, αλλά συνήθως χρησιμοποιούνται οι μικροελεγκτές.

Στους σύγχρονους μικροελεγκτές ενσωματώνονται μνήμες τύπου flash και RAM, A/D μετατροπείς και ψηφιακά I/O σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα χαμηλού κόστους. Η επιλογή του επεξεργαστή στηρίζεται σε παράγοντες όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι απαιτήσεις σε τάση λειτουργίας, το κόστος, η υποστήριξη περιφερειακών, ο χρόνος αφύπνισης και η ταχύτητα του.

Το υποσύστημα επικοινωνίας (*communication subsystem*) είναι το πλέον σημαντικό κομμάτι ενός κόμβου μίας και αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή ενέργειας, επηρεάζοντας έτσι την απόδοση του κόμβου αλλά και τη συνολική απόδοση του δικτύου. Θέματα που απασχολούν την έρευνα στον τομέα του υποσυστήματος μετάδοσης αφορούν την ακτίνα εκπομπής, τον τύπο διαμόρφωσης που χρησιμοποιείται καθώς και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Οι περισσότεροι ασύρματοι κόμβοι χρησιμοποιούν πομποδέκτες που λειτουργούν στην ISM (*Industrial, Scientific, Medical*) μπάντα, στις συχνότητες των 433.5–437.9 MHz, 868.0–868.6 MHz και 2400–2483.5 MHz. Χρησιμοποιούν δημοφιλείς μεθόδους διαμόρφωσης όπως OOK (*On/Off Key*), ASK (*Amplitude Shift Key*) και FSK (*Frequency Shift Key*). Η κατανάλωση ισχύος είναι σχεδόν ίδια κατά την εκπομπή και τη λήψη δεδομένων και κυμαίνεται στα 15–300 mW, ανάλογα με το ολοκληρωμένο, τη συχνότητα και τη μέθοδο που χρησιμοποιεί για την επικοινωνία. Η ακτίνα επικοινωνίας κυμαίνεται από τα 25–200 μέτρα, με το μέγιστο της ακτίνας επικοινωνίας να παρατηρείται σε εξωτερικούς χώρους, με οπτική επαφή. Οι ρυθμοί μετάδοσης που επιτυγχάνονται είναι της τάξης των 10–250 Kbps και πρόσφατα έως και 500Kbps [24].

Το υποσύστημα παροχής ισχύος (*power supply subsystem*) αποτελείται από μία μπαταρία και συνήθως και από ένα dc-dc converter. Σε αυτό το υποσύστημα εντοπίζεται η μεγάλη αδυναμία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Από τη στιγμή, που θα εγκατασταθεί ένα WSN σε έναν χώρο, προβλέπεται να λειτουργήσει, για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα δίχως να απαιτείται ανθρώπινη επίβλεψη. Αυτό σημαίνει, ότι θα πρέπει να διαχειριστεί τους ενεργειακούς του πόρους με τέτοιο τρόπο, ώστε να μεγιστοποιηθεί ο χρόνος ζωής του. Κύρια πηγή ενέργειας των κόμβων είναι οι μπαταρίες, οι οποίες συνήθως δεν είναι επαναφορτιζόμενες, αλλά έχουν προταθεί και μέθοδοι παραγωγής ενέργειας επάνω στον κόμβο και αποθήκευσής της σε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και υπερπυκνωτές, με σκοπό την παράταση του χρόνου ζωής του. Η ενεργειακή κατανάλωση είναι ο δείκτης εκείνος που θα καθορίσει την διάρκεια λειτουργίας του δικτύου.

Εκτός από τις προαναφερόμενες βασικές υπομονάδες που συνθέτουν τους κόμβους-αισθητήρες, μπορεί οι κόμβοι να ενσωματώνουν και επιπρόσθετες υπομονάδες όπως είναι η γεννήτρια ισχύος (*power generator*), το σύστημα κίνησης (*mobilizer*) και τα σύστημα εντοπισμού θέσης (*location finding system*).

Οι παραπάνω υπομονάδες είναι πιθανό να πρέπει να τοποθετηθούν σε μία μονάδα με μικρό μέγεθος. Το μέγεθος ενός κόμβου δύναται να συρρικνωθεί μέχρι και το μέγεθος ενός κόκκου σκόνης, παρότι πλήρως λειτουργικοί κόμβοι με αμιγώς μικροσκοπικές διαστάσεις δεν έχουν ακόμα κατασκευαστεί. Ενώ το κόστος των αισθητήρων κόμβων παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση καθώς αυτό εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος του δικτύου και την πολυπλοκότητα της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης συσκευής. Βέβαια οι περιορισμοί στο κόστος και στο μέγεθος των αισθητήρων κόμβων έχουν άμεση επίδραση στον περιορισμό των ενεργειακών τους πόρων, της μνήμης, της υπολογιστικής ισχύος τους και του εύρους ζώνης που χρησιμοποιούν.

4.3.2 Δίκτυο Πλέγματος

Η χρήση της τεχνολογίας πλέγματος στοχεύει στη υποστήριξη του ασύρματου δικτύου αισθητήρων παρέχοντας σε αυτό επαρκής υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους, καθώς έτσι είναι δυνατή η αποθήκευση δεδομένων μεγάλου όγκου που προέρχονται από τους αισθητήρες. Αυτός είναι ο κυριότερος λόγος ο οποίος πρέπει μία υποδομή πλέγματος να ενσωματωθεί στην ασύρματη τεχνολογία αισθητήρων, πέραν των υπολοίπων που έχουν ήδη αναφερθεί στα πλαίσια τη παρούσας διατριβής. Συνοπτικά, μία υποδομή πλέγματος είναι μία συλλογή από υπηρεσίες Διαδικτύου (*web services*) που παρέχει δυνατότητες ασφαλούς πρόσβασης σε υπερυπολογιστές, υπηρεσίες που σχετίζονται με όλους τους διαμοιραζόμενους πόρους μέσα στο δίκτυο, καθώς και πραγματοποίηση απαιτητικών σε πόρους εφαρμογών και προσομοιώσεων.

Τα τρία κυριότερα χαρακτηριστικά που διαμοιράζονται μεταξύ των χρηστών μέσα στην περιβαλλοντική υποδομή που παρουσιάζεται είναι το λογισμικό, τα δεδομένα, οι υπολογιστικοί και αποθηκευτικοί πόροι οι οποίοι μέσω της διαδικτύωσης που προτείνεται εξασφαλίζουν τη διασύνδεση και διαλειτουργικότητα του ενοποιημένου δικτύου. Ένεκα των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της υποδομής που παρουσιάζεται, οι μετρήσεις που λαμβάνονται από το δίκτυο αισθητήρων σχετίζονται με τη θερμοκρασία, υγρασία και την ένταση του φωτός. Αυτά τα δεδομένα αποθηκεύονται στην υποδομή πλέγματος ώστε να είναι διαθέσιμα συνεχώς από οποιοδήποτε χρήστη αυτής, έτσι ώστε να δύναται να τα επεξεργαστεί, αναλύσει και να τα χρησιμοποιήσει για την εφαρμογή περιβαλλοντικών προσομοιώσεων και όχι μόνο. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες που δίδονται από το λογισμικό, οι διάφορες ερευνητικές ομάδες δύναται να τροποποιούν ή να εφαρμόζουν το λογισμικό ενδιαφέροντος τους στην υποδομή πλέγματος. Οι υποβαλλόμενες εργασίες (*jobs*) προς το πλέγμα δύναται να υποβάλλονται μέσω διαδικτυακών διεπαφών (*web interface*) και να αναθέτονται σε υπολογιστικούς κόμβους ανάλογα με τη διαθεσιμότητα αυτών. Ενώ δίδεται η δυνατότητα τα αρχεία που παράγονται κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε εργασίας υποβάλλεται στο δίκτυο πλέγματος να αποθηκεύονται στην πλεγματική υποδομή και να διαγράφονται μετά από τη μεταφορά αυτών τοπικά στο μηχάνημα του χρήστη.

Η παρούσα αρχιτεκτονική προσέγγιση διαδικτύωσης της ενοποιημένης υποδομής πλέγματος με Διαδίκτυο αισθητήρων επιτρέπει την κλιμακωσιμότητα (*scalability*) του νέου δικτύου υποστηρίζοντας τη συνεχόμενη διαδικτύωση νέων αισθητήρων ή/και υποδομών πλέγματος, θέτοντας τη βάση για μία παγκόσμια υποδομή παρακολούθησης και προστασίας του περιβάλλοντος. Οι γεωγραφικά διεσπαρμένοι χρήστες της υποδομής μέσω του Διαδικτύου θα αποκτούν πρόσβαση στην υποδομή διασυνδεδεμένοι με το δίκτυο πλέγματος καθώς και με τα ποικίλα δίκτυα αισθητήρων της ενοποιημένης υποδομής, ώστε να είναι σε θέση να πληροφορηθούν σε πραγματικό χρόνο για τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν σε οποιαδήποτε επιλεγμένη τοποθεσία μέσα στη γεωγραφικά κατανεμημένη υποδομή.

4.3.3 Διαδικτυακή Υποδομή

Ένας δόκιμος και σαφής όρος της Διαδικτυακής υποδομής (*cyberinfrastructure*) που έχει διατυπωθεί από την επιστημονική κοινότητα, πέραν του όρου που προαναφέρθηκε από National Science Foundation [4], παρουσιάζεται στο [25] όπου ο συγκεκριμένος όρος αναφέρεται στη διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων μέσω δικτυακών συνδέσεων υψηλών ταχυτήτων (*high-speed networks*) που διαθέτουν μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικά συστήματα ενώ υποστηρίζεται η διασύνδεση και συνεργασία αυτών με όργανα, αισθητήρες καθώς παρέχονται δυνατότητες απεικόνισης των μετρήσεων μέσω ανεπτυγμένων λογισμικών. Συνεπώς, αυτού του είδους τα δικτυακά περιβάλλοντα εξασφαλίζουν τη μετάδοση πληροφορίας σε πραγματικό χρόνο μέσω του ασφαλούς πλαισίου που υποστηρίζουν. Επίσης υποβοηθούν την ασύγχρονη συνεργασία μεταξύ διαφόρων επιστημονικών κοινοτήτων επιτρέποντας σε αυτές το διαμοιρασμό των πόρων υλικού ή/και γνώσεως, παρατηρήσεων υποστηρίζοντας έτσι τους υπολογισμούς υψηλής αποδοτικότητας (*high-productivity computing*).

Υλοποιώντας μία διαδικτυακή υποδομή που ως σκοπό έχει την ενοποίηση της τεχνολογίας υπολογιστικού πλέγματος με το Διαδίκτυο Αισθητήρων πρέπει πρώτα να επιλυθούν περιορισμοί που σχετίζονται με τη διασύνδεση και διαλειτουργικότητα αυτών των ετερογενών δικτυακών τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, στόχος του παρόντος κεφαλαίου της διατριβής είναι η αποστολή των μετρήσεων στο σταθμό-βάση, η διαδικασία δρομολόγησης πολλαπλών κόμβων (*multi-hop routing*) μέσα στο δίκτυο αισθητήρων καθώς και η μετάδοση, αποθήκευση αυτών μέσα στην υποδομή πλέγματος. Εν συνεχεία, αναλύεται η μετατροπή των τιμών των μετρήσεων σε φυσικές μονάδες, η απεικόνισή τους στην κονσόλα του λειτουργικού καθώς και η εξαγωγή τους στη βάση δεδομένων του δικτύου πλέγματος.

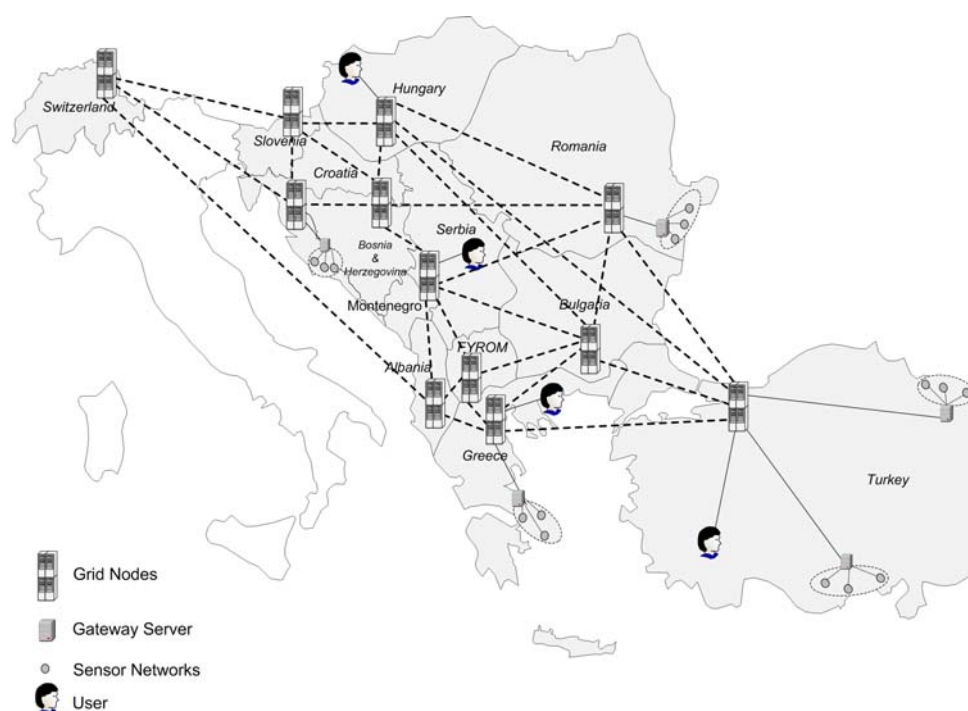
Τέλος, η γραφική αναπαράσταση της πληροφορίας στοχεύει στην πληρέστερη κατανόηση των μετρήσεων από το χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξαγωγή των μετρήσεων από τη βάση του πλέγματος με εφαρμογή που αναπτύχθηκε αποκλειστικά για το συγκεκριμένο σκοπό καθώς και με τη απεικόνιση των περιβαλλοντικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω διαγραμμάτων και GUI.

4.4 Γεωγραφικό Πληροφοριακό Σύστημα Διαδικτύου Αισθητήρων με Πλέγμα

Το δυναμικό και συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον της επιστημονικής έρευνας έχει πολυάριθμα χαρακτηριστικά που απαιτούν ένα συνδυασμό γνώσεων από διαφορετικά επιστημονικά πεδία. Η παρούσα προτεινόμενη υποδομή βασίζεται επάνω στην επιστήμη των υπολογιστών ενώ συνεισφέρει στη γεωφυσική επιστήμη. Ως σκοπό έχει την παροχή των απαραίτητων εργαλείων για την πρόγνωση και προστασία του περιβάλλοντος, γεγονός που επιτυγχάνεται μέσω της προτεινόμενης υποδομής πλέγματος καθώς αυτή ενοποιεί δεδομένα και ετερογενή δικτυακά συστήματα σε ένα εικονικό ενιαίο περιβάλλον υποστηρίζοντας ταυτόχρονα την αύξηση της παραγωγικότητας της γεωφυσικής έρευνας.

Όλες γεωφυσικές δραστηριότητες που παρακολουθούνται μέσω των ασυρμάτων αισθητήρων, τα δεδομένα που αυτοί παράγουν σε πραγματικό χρόνο πρέπει να απεικονίζονται μέσω γεωγραφικών χαρτών της εκάστοτε περιοχής ώστε να υπάρχει εμφανή αντιστοιχίση με τους αισθητήρες υποστηρίζοντας τη χωρο-χρονική εξέλιξη του φυσικού φαινομένου. Οι αποθηκευμένες μετρήσεις πρέπει και αυτές να δύνανται απεικόνισις μέσω γεωγραφικών χαρτών. Συνεπώς, πρέπει να εξασφαλισθεί η ενοποίηση των διαδικτυακών και πλεγματικών υπηρεσιών (*web & grid services*), η διαλειτουργικότητα του χρησιμοποιούμενου μεσισμικού, ο καθορισμός των μεταδεδομένων (*metadata*), καθώς και το σημασιολογικό (*semantic*) πλαίσιο πόρων και δεδομένων μέσα στο ετερογενές ενοποιημένο περιβάλλον. Επιλύοντας τους παραπάνω περιορισμούς εξασφαλίζουμε τη διαλειτουργικότητα και τη διασύνδεση των πόρων μέσα στο ενοποιημένο δίκτυο.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μία επισκόπηση της ενοποίησης των τοπικών ασυρμάτων αισθητήρων με την υποδομή πλέγματος νοτιοανατολικής Ευρώπης SEE-GRID-SCI (*SEE-GRID eInfrastructure for regional eScience*) [26], που ένας από τους σκοπούς που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη υποδομή είναι η προστασία του περιβάλλοντος, η πρόγνωση σεισμών και κλιματικών αλλαγών.



Σχήμα 24: Ενοποιημένη Υποδομή Πλέγματος με Διαδίκτυο Αισθητήρων

Η ενοποίηση της υποδομής πλέγματος με τα κατά τόπους γεωγραφικά διεσπαρμένα δίκτυα αισθητήρων επιτυγχάνεται με τη χρήση μίας πύλης δικτύου (*gateway*) που λειτουργώντας ως ενδιάμεσος εξυπηρετητής (*server*) επιτυγχάνοντας έτσι να αποκρύψει τις οποιεσδήποτε ετερογένειες υπάρχουν μέσα στα δύο διαφορετικά δικτυακά περιβάλλοντα. Η συγκεκριμένη τεχνική διασύνδεσης και εξασφάλισης της

διαλειτουργικότητας μεταξύ των δύο ετερογενών δικτύων βασίζεται στην εισαγωγή διακομιστών μεσολάβησης (*proxy servers*), όπως αυτή θα παρουσιασθεί αναλυτικότερα στο Κεφ. 5 συμπεριλαμβανομένης και της προσέγγισης των στοιχείων του εμπειροχόμενου μεσισμικού τους.

Οι εξουσιοδοτημένοι χρήστες της υποδομής δύνανται να έχουν πρόσβαση σε οποιοδήποτε δίκτυο αισθητήρων είναι διαθέσιμο μέσα στην υποδομή πλέγματος σε οποιοδήποτε σημείο κι αν αυτοί βρίσκονται μέσα στο πλέγμα. Μετά τη διαδικασία πιστοποίησης ταυτότητας του χρήστη, αυτός δύναται να ανακτήσει σε πραγματικό χρόνο περιβαλλοντικές μετρήσεις από τα δίκτυα αισθητήρων καθώς και να αναλύσει δεδομένα προηγούμενων μετρήσεων που είναι αποθηκευμένα στις βάσεις του πλέγματος. Αυτό δίδει τη δυνατότητα σε οποιονδήποτε εξουσιοδοτημένο χρήστη της υποδομής πλέγματος νοτιοανατολικής Ευρώπης, σε οποιαδήποτε χώρα κι αν αυτός βρίσκεται, να παρατηρεί, συλλέγει και αναλύει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων της Ελλάδος.

Για την επίτευξη της εν λόγω διαδικασίας στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί το περιβαλλοντικό σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης που απεικονίζει σε γεωγραφικούς χάρτες τις μετρήσεις των αισθητήρων εξυπηρετώντας το συγκεκριμένο σκοπό. Η υποδομή πλέγματος πέραν της χρήσης της ως επεξεργαστικός-αποθηκευτικός πόρος υποστηρίζει και τη διαδικασία πιστοποίησης των χρηστών. Τα μεγάλου μεγέθους παραγόμενα από τους αισθητήρες δεδομένα αποθηκεύονται στους πόρους της υποδομής πλέγματος, όπου δια μέσω του πλέγματος δίδεται η δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει αντίγραφα δεδομένων (*duplicate data*) στο λογαριασμό του ή/και τοπικά στο μηχάνημά του καθώς θα πραγματοποιεί προσομοιώσεις δίχως να υφίσταται οποιονδήποτε περιορισμό σχετικά με τις επεξεργαστικές απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής.

Συνεπώς, η χρήση και ενοποίηση της υποδομής πλέγματος σε γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών κρίνεται επιτακτική καθώς μέσα από την κατανομημένη αρχιτεκτονική δομή της επιτυγχάνεται μέρος της πρόσβασης στα γεωγραφικά διεσπαρμένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Γεγονός που θέτει την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος στο επίκεντρο υλοποίησης αυτού του είδους των ενοποιημένων υποδομών ευρείας κλίμακας υποστηρίζοντας τις ταυτόχρονα με άφθονους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους.

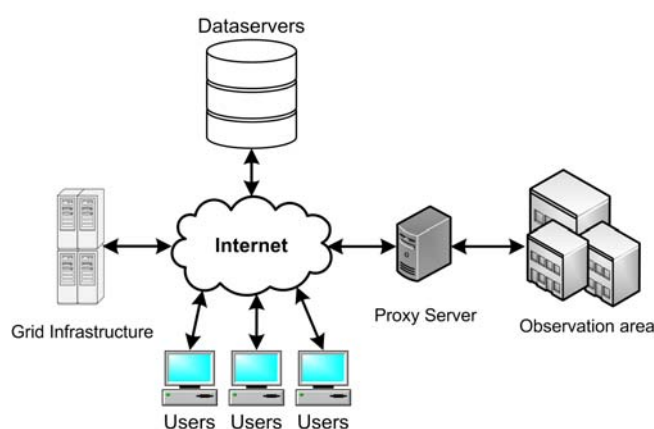
Ακολουθώντας αυτήν την προσέγγιση εμπλουτίζονται οι υπηρεσίες των δικτύων πλέγματος καθώς μέσω της επίλυσης των περιορισμών διασύνδεσης και διαδικτύωσης με ετερογενής δικτυακές υποδομές επεκτείνονται οι παρεχόμενες δυνατότητες των υποδομών πλέγματος ενώ ταυτόχρονα τίθεται η βάση για διασύνδεση των αισθητήρων και σε άλλα δίκτυα πλέγματος υποστηρίζοντας έτσι τη δημιουργία μίας παγκόσμιας υποδομής διαδικτύου αισθητήρων με πλέγμα που ως κύριο σκοπό της έχει την προστασία και παρακολούθηση του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο και σε πανευρωπαϊκό επίπεδο.

4.4.1 Σύστημα Ελέγχου και Παρακολούθησης Κλιματικών Αλλαγών

Η χρήση ενός διαδικτύου αισθητήρων με πλέγμα μέσω της αδιάλειπτης παρακολούθησης και συλλογής μετρήσεων από το φυσικό περιβάλλον, εξαιτίας της αυξημένης ευαισθησίας των αισθητήρων, συμβάλλει

στην μελέτη των κλιματικών αλλαγών από τους ερευνητές σε γεωγραφικά δυσπρόσιτες και απομακρυσμένες περιοχές. Οι αισθητήρες της ενοποιημένης υποδομής που σκοπό έχει την παρακολούθηση των κλιματικών αλλαγών λαμβάνουν μετρήσεις που σχετίζονται με τη θερμοκρασία, υγρασία και την ολική ηλιακή ακτινοβολία. Το σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης του περιβάλλοντος της προτεινόμενης υποδομής αποτελείται από τους αισθητήρες παρακολούθησης και το GUI του χρήστη που υποστηρίζει τη γραφική αναπαράσταση των μετρήσεων για καλύτερη κατανόηση.

Στο **Σχήμα 25** απεικονίζεται η διαδικασία πρόσβασης του χρήστη της πλεγματικής υποδομής και ο τρόπος ανάκτησης μετρήσεων από τους αισθητήρες. Αρχικά ο χρήστης από το τοπικό του μηχάνημα μέσω του Διαδικτύου συνδέεται στην υποδομή πλέγματος όπου αιτείται από τους διακομιστές μεσολάβησης (βλ. Κεφ. 4.4.1) της ενοποιημένης υποδομής την ανάκτηση των μετρήσεων από τους αισθητήρες.



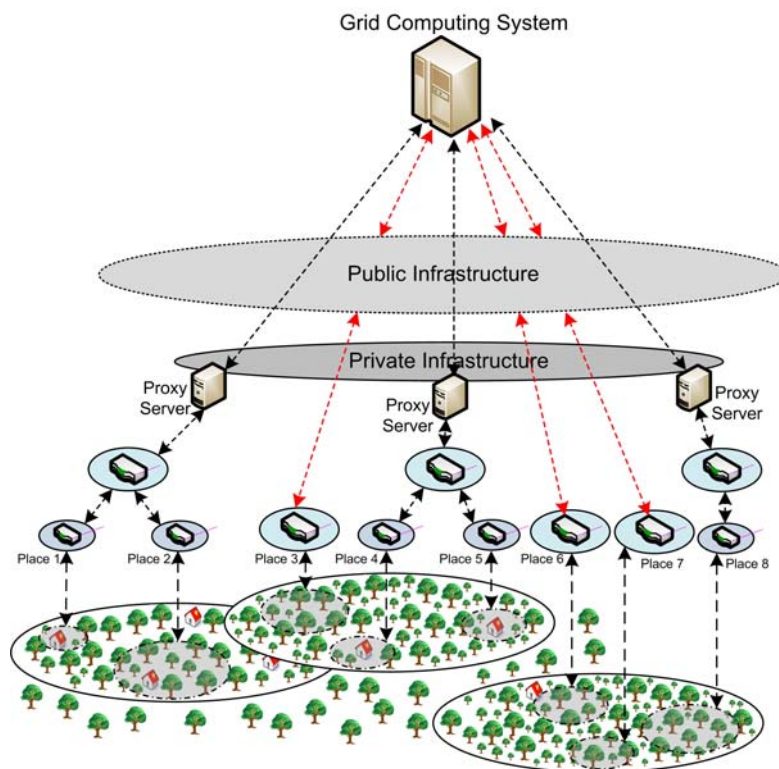
Σχήμα 25: Αρχιτεκτονική Διαδικτύου Αισθητήρων και Διασύνδεση με την Υποδομή Πλέγματος

Παρόλο που έχουν προταθεί λιγότες αρχιτεκτονικές ενοποίησης των δικτύων αισθητήρων με την τεχνολογία πλέγματος [27-31] είτε ακολουθήθηκε μόνο μία θεωρητική προσέγγιση είτε ήταν σε επίπεδο λογισμικού-μεσισμικού, γεγονός που αφήνει ανοικτό το ζήτημα υλοποίησης και ανάπτυξης τεχνικών διασύνδεσης ιδίως σε επίπεδο υλικού. Μέσω της χρησιμοποίησης του συστήματος ελέγχου της υποδομής υποστηρίζονται διαδικασίες χρηστών που σχετίζονται με τον έλεγχο των αισθητήρων, τον καθορισμό των μετρήσεων καθώς και την κατάσταση του ενοποιημένου δικτύου.

Το ενοποιημένο δίκτυο ελέγχου και παρακολούθησης περιβάλλοντος που απεικονίζεται στο **Σχήμα 26** στοχεύει στη συγκέντρωση πληροφοριών που σχετίζονται με τους αισθητήρες που έχουν παραταχθεί μέσα σε μία περιοχή, την αποθήκευση μετρήσεων και χαρτογραφημένων εικόνων της περιοχής καθώς και τη διαχείριση των δεδομένων μέσω του Διαδικτύου. Εστιάζοντας στη μοντελοποίηση των διαδικασιών του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου και παρακολούθησης εξάγουμε τα ακόλουθα μοντέλα. Το ιεραρχικό μοντέλο που ακολουθείται κατά τη διαδικασία πρόληψης και προστασίας περιβάλλοντος (βλ. **Σχήμα 27**) έχει ως κύριο στόχο τον καθορισμό των υπό παρακολούθηση περιοχών ως επικίνδυνες ή ως δυνητικά επικίνδυνες και το μοντέλο ανακτωμένων δεδομένων (βλ. **Σχήμα 28**) του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου και

παρακολούθησης. Η μοντελοποίηση των διαδικασιών αποσκοπεί στη δημιουργία αυτοματοποιημένης υπηρεσίας μηνυμάτων πρόληψης για τις δυνητικά επικίνδυνες περιοχές υποδεικνύοντας τις στους χρήστες.

Μετρήσεις που σχετίζονται με την επικινδυνότητα των περιοχών αποθηκεύονται στο μητρώο καταγραφής συμβάντων προτυποποιημένες κατά το SensorML [1] [3] πρότυπο υποστηρίζοντας την περιγραφή της ιδιότητας των αισθητήρων και τα μεταδεδομένα τους. Πέραν αυτού, το μητρώο καταγραφής συμβάντων χρησιμεύει ώστε ο χρήστης να εξετάζει ανά πάσα στιγμή την υφισταμένη σχέση ανάμεσα στη διάρκεια της ενέργειας των αισθητήρων και το χρονικό διάστημα του ρυθμού των μετρήσεων (*interval sampling rates*) [31]. Για αυτόν το λόγο πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στο χρονικό διάστημα που θα λαμβάνονται οι μετρήσεις. Συνεπώς καθορίζοντας αρκετά μικρό χρονικό διάστημα για τη λήψη μετρήσεων εξασφαλίζεται η άμεση απόκριση του συστήματος και πληροφόρησή του με συνεχείς μετρήσεις, γεγονός που έχει αρνητική επίδραση στην ενέργεια των αισθητήρων. Το μεγάλο χρονικό διάστημα μετρήσεων παρόλο που παρατείνει την ενέργεια των αισθητήρων δεν εξασφαλίζει την άμεση αντίδραση της υπηρεσίας μηνυμάτων πρόληψης καθώς και του συστήματος ελέγχου και παρακολούθησης περιβάλλοντος.



Σχήμα 26: Ενοποιημένο Δίκτυο Ελέγχου και Παρακολούθησης Περιβάλλοντος

Μία βέλτιστη προσέγγιση που δύναται να ακολουθηθεί κατά τον καθορισμό του χρονικού διαστήματος μετρήσεων δύναται να βασιστεί στο μητρώο καταγραφής του μοντέλου πρόληψης και προστασίας περιβάλλοντος που υποδεικνύει την επικινδυνότητα της παρακολουθούμενης περιοχής. Παρά ταύτα, ο καθορισμός του χρονικού διαστήματος λήψης μετρήσεων δύναται να μεταβληθεί από το χρήστη κατά βούληση. Όταν οι αισθητήρες παραλάβουν εντολή αλλαγής του διαστήματος λήψης μετρήσεων από το

χρήστη βρίσκονται σε sleep mode, διότι περιορίζει την κατανάλωση ενέργειας (*power-saving mode*), οπότε το διάστημα λήψης μετρήσεων μέχρι τη δεδομένη χρονική στιγμή είναι καθορισμένο από το *χρονοδιακόπτη (timer)*. Μετά την πραγματοποίηση λήψης μετρήσεων και την ολοκλήρωση μετάδοσης δεδομένων οι αισθητήρες επανέρχονται σε sleep mode κατάσταση εξοικονομώντας ενέργεια. Επίσης, το χρονικό διάστημα που θα πραγματοποιούνται οι μετρήσεις δύναται να καθοριστεί από τους διαχειριστές του συστήματος αναλόγως του ρυθμού παρακολούθησης ή/και επικινδυνότητας της εκάστοτε περιοχής.

Όταν το ενοποιημένο σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης περιβάλλοντος εντοπίσει τιμές στις μετρήσεις των αισθητήρων μεγαλύτερες από το προκαθορισμένο όριο τότε μεταβάλλει αυτόματα το χρονικό διάστημα που θα πραγματοποιούνται οι μετρήσεις κάνοντας το μικρότερο διότι αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης κάποιου επικίνδυνου συμβάντος για το περιβάλλον. Σε περίπτωση που επιβεβαιωθεί μία κατάσταση που έχει καθοριστεί ως επικίνδυνη τότε το σύστημα μέσω του μοντέλου πρόληψης και προστασίας περιβάλλοντος παράγει συνεχή μηνύματα πρόληψης ειδοποιώντας έτσι το χρήστη του συστήματος. Υπό αυτές τις συνθήκες όλες οι μετρήσεις που λαμβάνονται αποθηκεύονται στο δίκτυο πλέγματος όπου εισάγονται σε κώδικα λογισμικού καθώς επιχειρείται σε πραγματικό χρόνο μία βραχυπρόθεσμη πρόγνωση επί της εξέλιξης του φυσικού φαινομένου. Όταν διακοπεί η αυτοματοποιημένη διαδικασία παραγωγής μηνυμάτων πρόληψης είτε μέσω της μείωσης των τιμών των μετρήσεων είτε χειροκίνητα από το χρήστη τότε μειώνεται αυτόματα και σταδιακά το διάστημα λήψης μετρήσεων έως ότου οι αισθητήρες βρεθούν εκ νέου σε κατάσταση sleep mode εξοικονομώντας την ενέργεια τους.

4.4.2 Μοντέλο Πρόληψης και Προστασίας Περιβάλλοντος

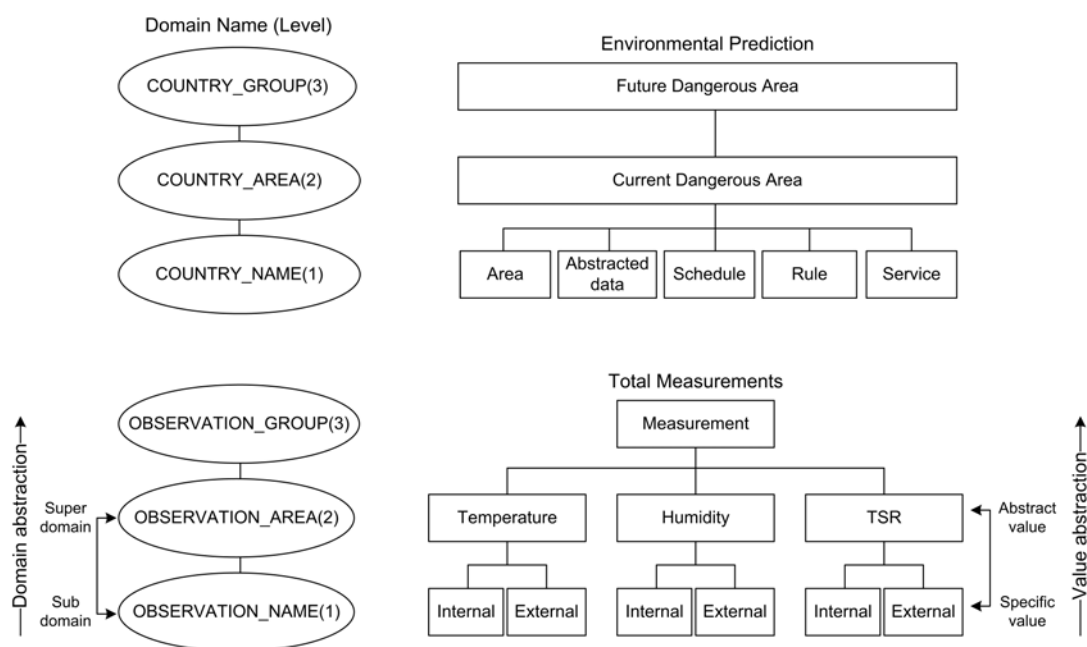
Στα πλαίσια της παρούσας υποενότητας της διατριβής θα παρουσιάσουμε το μοντέλο πρόληψης και προστασίας περιβάλλοντος που έχει ως στόχο την αύξηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος ελέγχου και παρακολούθησης μέσα στο ενοποιημένο δίκτυο. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω της βελτιστοποιημένης διαχείρισης δεδομένων που προέρχονται από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Το μοντέλο που αναπτύσσεται στη συνέχεια αποσκοπεί στον έλεγχο των τιμών που σχετίζονται με τις μετρήσεις του περιβάλλοντος και αν αυτές ξεπερνούν τις προκαθορισμένες τιμές τότε αποστέλλει μηνύματα ειδοποιήσεων στο χρήστη. Πέραν τούτου, η χρησιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου έγκειται στην ταυτόχρονη παρακολούθηση γεωγραφικών περιοχών με διαφορετικούς συντελεστές επικινδυνότητας η κάθε μία, επιτρέποντας έτσι τη θέσπιση διαφορετικών παραμέτρων-κανόνων για την κάθε γεωγραφική τοποθεσία ξεχωριστά.

Το μοντέλο πρόληψης και προστασίας περιβάλλοντος που απεικονίζεται στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζει τους κανόνες και τη σχέση που υπάρχει μεταξύ της δομής των δεδομένων και των υπό παρακολούθηση γεωγραφικών περιοχών. Επίσης μέσω αυτού παρέχεται η δυνατότητα καθορισμού διαφορετικών κανόνων για κάθε γεωγραφική τοποθεσία ξεχωριστά. Επιπλέον, η ιεραρχική συσχέτιση των ανακτωμένων δεδομένων του παρουσιαζόμενου μοντέλου αποσκοπεί στην ανάπτυξη λογικών σχέσεων

μεταξύ των αδόμετων και δυναμικών δεδομένων που συλλέγονται καθώς αυτά απεικονίζονται από το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS).

Η οργάνωση των δομών δεδομένων του συστήματος πρόληψης και προστασίας περιβάλλοντος εστιάζει σε δύο τύπους ανακτημένων ιεραρχιών: (i) Τιμών και (ii) Τομέων, όπως αυτές απεικονίζονται στο **Σχήμα 27**. Η ιεράρχηση ενός γενικού τομέα αποτελείται από επιμέρους τομείς που εμπεριέχουν συγκεκριμένες τιμές. Έτσι κατά την ιεραρχική ανάκτηση των τιμών κάθε συγκεκριμένη τιμή αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο τομέα υποδεικνύοντας έτσι τη συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ των τομέων και των τιμών του περιβαλλοντικού συστήματος προστασίας.

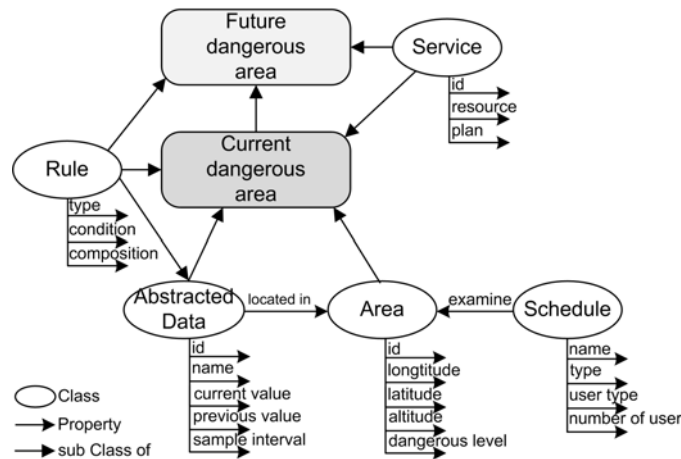
Όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 27**, ο τομέας OBSERVATION_AREA είναι υπερ-τομέας (*super-domain*) του OBSERVATION_NAME διότι οι ανακτημένες τιμές του υπο-τομέα (*sub-domain*) αντιστοιχούν σε τιμές που εμπεριέχονται στον υπερ-τομέα και για αυτόν το λόγο ο υπερ-τομέας OBSERVATION_AREA αντιστοιχίζεται στον κεντρικό τομέα όπου περικλείονται οι γενικευμένες τιμές.



Σχήμα 27: Ιεραρχική Ανάκτηση Δεδομένων

Ο κάθε τομέας είναι μοναδικός και ανήκει μόνο σε μία ιεραρχική διαδικασία ανάκτησης δεδομένων, ενώ οι ίδιες τιμές δύναται να ανήκουν σε πολλαπλές ιεραρχικές διαδικασίες και σε πολλαπλούς τομείς. Έτσι στο **Σχήμα 27** οι τιμές της θερμοκρασίας ανήκουν στο Σύνολο Μετρήσεων (*Total Measurements*) και στην Περιβαλλοντική Πρόγνωση (*Environmental Prediction*) μέσω της ιεράρχησης της υπο-κλάσης (*sub class*) (βλ. **Σχ. 28**) των τιμών των ανακτωμένων μετρήσεων (*abstracted data*) από τους αισθητήρες. Στην ιεραρχική ανάκτηση δεδομένων του Συνόλου Μετρήσεων, οι τιμές θερμοκρασίας ανήκουν στον τομέα OBSERVATION_AREA, ενώ στην ιεραρχία της Περιβαλλοντικής Πρόγνωσης ανήκουν στον τομέα της Τρέχουσας Επικίνδυνης Περιοχής (*Current Dangerous Area*).

Συνεπώς, η ιεραρχική ανάκτηση των τιμών αποσκοπεί στην αντιστοίχιση αυτών σε μία συγκεκριμένη τιμή ενός χαμηλότερου επιπέδου, η οποία ανήκει σε ένα υψηλότερο επίπεδο ανάκτησης δεδομένων. Οπότε οι μετρήσεις που ανακτώνται σχετικά με το επίπεδο επικινδυνότητας μίας γεωγραφικής τοποθεσίας ανήκουν στην παρακολουθούμενη γεωγραφική περιοχή ενώ αυτή υπάγεται στον τομέα των τρεχόντων επικίνδυνων περιοχών. Στο **Σχήμα 28** απεικονίζονται τα αδόμητα δεδομένα που ανακτώνται από τους αισθητήρες και σχετίζονται με το γεωγραφικό μήκος περιγράφουν την κλάση (*class*) μίας παρακολουθούμενης γεωγραφικής περιοχής.



Σχήμα 28: Δομή Δεδομένων Μοντέλου Πρόληψης και Προστασίας Περιβάλλοντος

Ο Πίνακας 7 μοντελοποιεί τις συσχετίσεις των ανακτωμένων αδόμητων δεδομένων που υπάρχουν μεταξύ των τιμών και των τομέων. Η πρωτεύουσα σχέση μεταξύ δύο συζευγμένων τομέων υποθέτεται ότι είναι μία-προς-μία και καλείται με το *n* επίπεδο κλάσης του υποτομέα σύμφωνα με τη διαφορά *n* του ανακτημένου επιπέδου.

Πίνακας 7: Συσχετίσεις Τιμών-Τομέων

Συσχέτιση	Αναπαράσταση
(1) 1-επίπεδο τομέα (<i>domain</i>) ανάκτησης δεδομένων	$D_i \Rightarrow D_{i+1}$ όπου D_i ο υποτομέας και D_{i+1} ο κύριος τομέας του
(2) 1-επίπεδο τιμής (<i>value</i>) ανάκτησης δεδομένων	$v_i^{j_i} \in^* v_{i+1}^{j_{i+1}}$ όπου $v_i^{j_i}$ είναι μία καθορισμένη τιμή και $v_{i+1}^{j_{i+1}}$ τα δεδομένα ανάκτησης
(3) n-επίπεδο τομέα (<i>domain</i>) ανάκτησης δεδομένων	$D_i \Rightarrow^n D_{i+n}$ s.t. $v_i^{j_i} \in^* v_{i+n}^{j_{i+n}}, v_i^{j_i} \in D_i, v_{i+1}^{j_{i+1}} \in D_{i+1}, \dots, v_{i+n}^{j_{i+n}} \in D_{i+n} \forall j_i$
(4) n-επίπεδο τιμής (<i>value</i>) ανάκτησης δεδομένων	$v_i^{j_i} \in^* v_{i+1}^{j_{i+1}}$ iff $\exists v_{i+1}^{j_{i+1}}, \dots, \exists v_{i+n-1}^{j_{i+n-1}}$ s.t. $v_i^{j_i} \in^* v_{i+1}^{j_{i+1}} \in^* v_{i+2}^{j_{i+2}} \in^* \dots v_{i+n-1}^{j_{i+n-1}} \in^* v_{i+n}^{j_{i+n}}$

Στον παραπάνω πίνακα, το D_i καθορίζει έναν τομέα του επιπέδου *i* από όπου ανακτώνται τα δεδομένα και $v_i^{j_i}$ είναι μία συγκεκριμένη τιμή του τομέα D_i . Οι σχέσεις (1) και (2) του Πίνακα 7 αντιπροσωπεύουν την τιμή

του I -επιπέδου και τις συσχετίσεις των ανακτωμένων τιμών του τομέα. Βασιζόμενοι στις συσχετίσεις των ανακτωμένων τιμών του I -επιπέδου, αντιστοίχως οι συσχετίσεις (3) και (4) του n -επιπέδου παρουσιάζουν τη γενικότερη συσχέτιση των ανακτωμένων τιμών.

Επειδή όμως τιμές που αναφέρονται όπως π.χ. στην τιμή της θερμοκρασίας υπάγονται σε πολλαπλές περιοχές, οι ανακτημένες τιμές και οι προκαθορισμένες τιμές από το χρήστη δεν είναι μοναδικές για την τιμή της θερμοκρασίας. Γεγονός που συνεπάγεται ότι πρέπει να εισάγονται στο σύστημα και επιπρόσθετες πληροφορίες που σχετίζονται με τον τομέα που ανήκουν, στη συγκεκριμένη περίπτωση με τον τομέα της Τρέχουσας Επικίνδυνης Περιοχής.

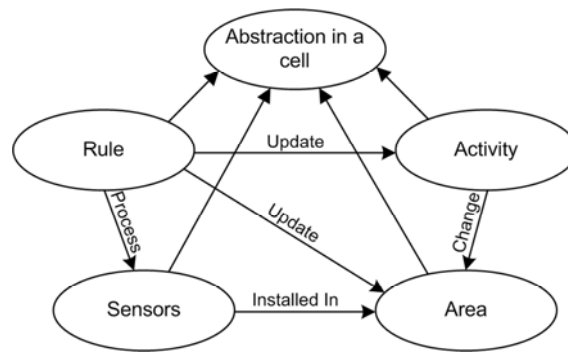
Ο Πίνακας 8 μοντελοποιεί τις λειτουργικές αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των τομέων και των τιμών μέσα στο σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης περιβάλλοντος που παρουσιάζεται στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου της διατριβής. Αναφερόμενοι στις αλληλεξαρτήσεις του αναφερόμενου πίνακα, ορίζεται η υπόθεση ότι το “ $A \rightarrow B$ ”, δηλαδή συνεπάγεται ότι το A προσδιορίζει μόνον ένα B , ενώ “ $A \rightarrow \rightarrow B$ ” συνεπάγεται ότι το A προσδιορίζει πολλαπλά B .

Πίνακας 8: Αλληλεξαρτήσεις Τομέων-Τιμών

	<i>Λειτουργική Αλληλεξάρτηση</i>	<i>Σχεσιακή Αναπαράσταση</i>
(1) Τομέας (Domain)/Υπερ-τομέας (Super-Domain)	$D_i \rightarrow D_{i+1}$ για D_i, D_{i+1} όπου $D_i \Rightarrow D_{i+1}$	<i>DOMAIN_ABSTRACTION</i>
(2) Τομέας (Domain)/Υπο-τομέας (Sub-Domain)	$D_i \rightarrow D_{i-1}$ για D_{i-1}, D_i όπου $D_{i-1} \Rightarrow D_i$	<i>DOMAIN_ABSTRACTION</i>
(3) Τιμή (Value)/ Ανακτώμενη Τιμή (Abstracted Value)	$(v_i^{j_i}, D_i) \rightarrow v_{i+1}^{j_{i+1}}$ για $v_i^{j_i}, v_{i+1}^{j_{i+1}}$ όπου $v_i^{j_i} \in^* v_{i+1}^{j_{i+1}}$	<i>VALUE_ABSTRACTION</i>
(4) Τιμή (Value)/ Προκαθορισμένη Τιμή (Specific Value)	$(v_i^{j_i}, D_i) \rightarrow \rightarrow v_{i-1}^{j_{i-1}}$ για $v_i^{j_i}, v_{i-1}^{j_{i-1}}$ όπου $v_{i-1}^{j_{i-1}} \in^* v_i^{j_i}$	<i>VALUE_ABSTRACTION</i>
(5) Σχέση/Χαρακτηριστικό	(Σχέση, Χαρακτηριστικό) \rightarrow Τομέας	<i>ATTRIBUTE_MAPPING</i>

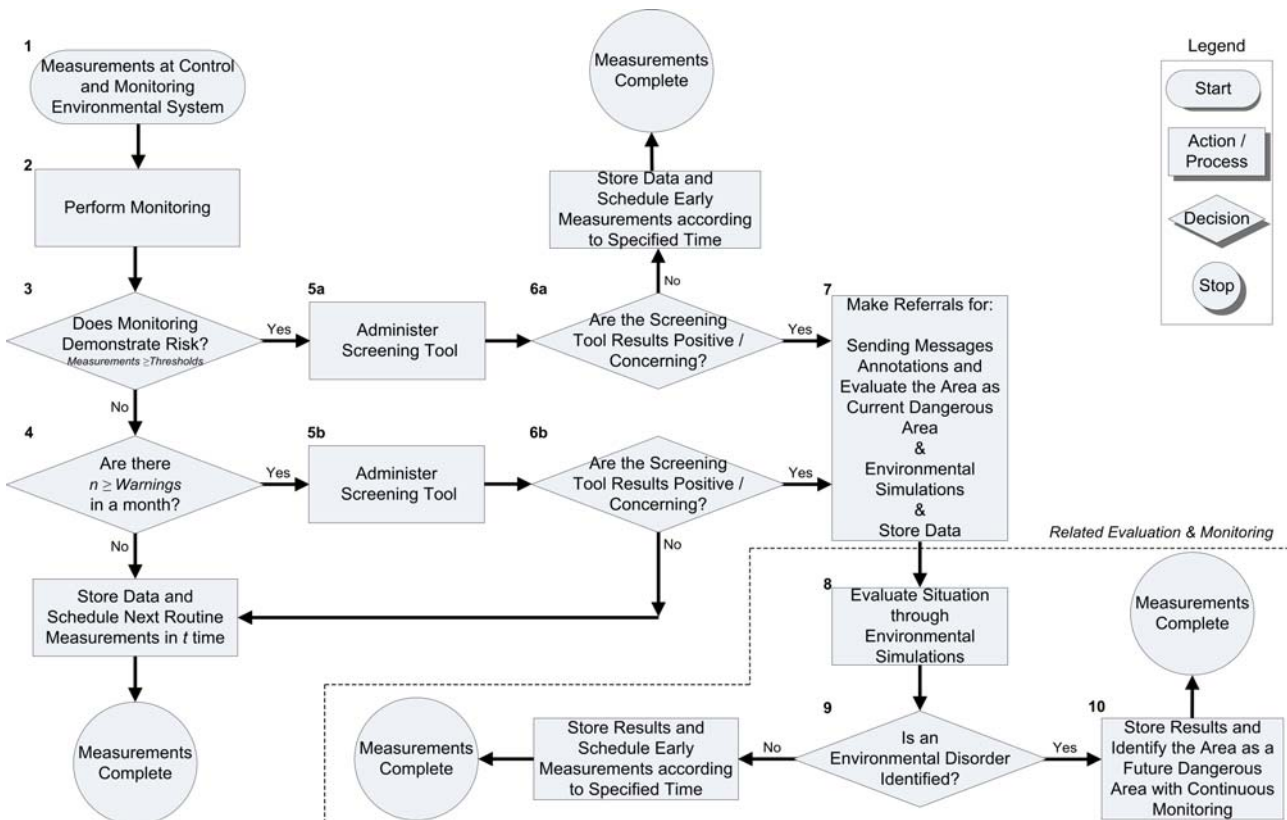
Οπότε από τις σχέσεις (1) και (2) του Πίνακα 8 εξάγεται το συμπέρασμα ότι εάν το όνομα ενός γενικού τομέα είναι γνωστό τότε ο υπερ-τομέας και ο υπο-τομέας του δύναται να αναγνωρισθούν από το σύστημα. Εν αντιθέσει, με τις σχέσεις (3) και (4) που υποδεικνύουν ότι για την αναγνώριση μίας ανακτημένης ή προκαθορισμένης τιμής που ανήκει στο ευρύτερο πλαίσιο μίας καθορισμένης τιμής προαπαιτείται απαραίτητη γνώση του ονόματος του τομέα. Η τελευταία αλληλεξάρτηση (5) του πίνακα υποστηρίζει την αναγνώριση του τομέα μίας ιδιότητας σχετικά με μία υποβαλλόμενη επερώτηση (*query*).

Συνεπώς, οι ανακτημένες τιμές του I -επιπέδου συσχετίζονται με τη θερμοκρασία του τομέα OBSERVATION_AREA καθώς αυτή η τιμή περιέχεται στον τομέα COUNTRY_AREA υπό τις μελλοντικές επικίνδυνες περιοχές. Επιπρόσθετα, τα υπόλοιπα σύνολα των τιμών του I -επιπέδου προσδιορίζονται και εξαρτώνται από την τιμή του τομέα, γεγονός που υποστηρίζει την αλληλεξάρτηση μέσα σε πολλαπλούς διαφορετικούς τομείς.



Σχήμα 29: Μοντέλο Ανακτημένων Δεδομένων

Οι ανακτημένες από τους αισθητήρες μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας, κ.ά μεταδίδονται από αυτούς στο σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης περιβάλλοντος όπου και υπάρχει γραφική απεικόνιση αυτών. Η μετάδοση των τιμών των μετρήσεων από τους αισθητήρες βασίζεται στο μοντέλο ανακτωμένων δεδομένων που απεικονίζεται στο Σχήμα 29, όπου οι μετρήσεις αποστέλλονται (*upload*) και αποθηκεύονται σε τακτά χρονικά διαστήματα μέσα στην υποδομή πλέγματος καθώς αυτή αποτελεί το δίκτυο κορμού της υποδομής. Όλα τα αποθηκευμένα δεδομένα της βάσης είναι προσβάσιμα στους χρήστες δια μέσου της MySQL και του GUI του χρήστη [32].



Σχήμα 30: Αλγόριθμος Συστήματος Ελέγχου και Παρακολούθησης Περιβάλλοντος

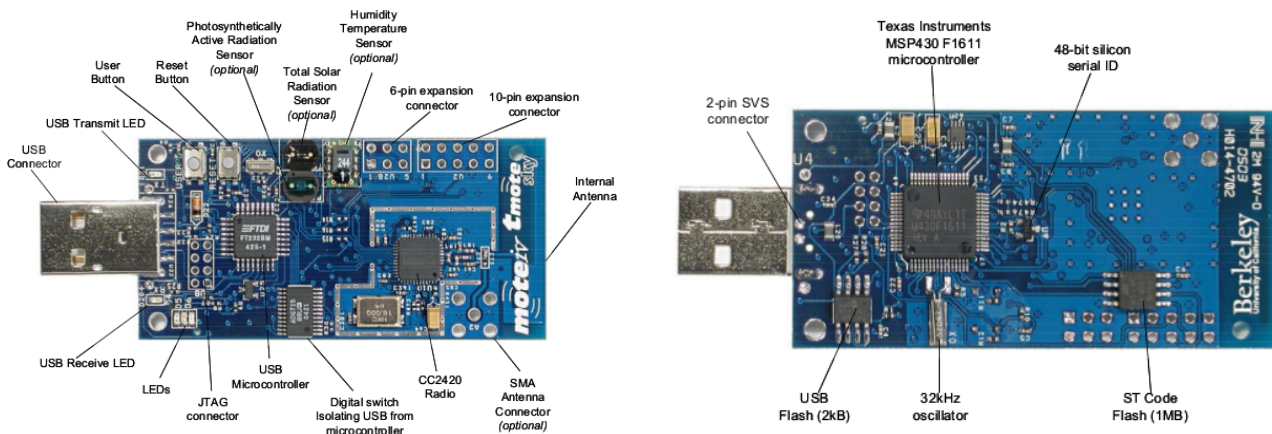
Στο **Σχήμα 30** αναπαριστάται ο αλγόριθμος του ενοποιημένου συστήματος ελέγχου και παρακολούθησης των επιλεγμένων γεωγραφικών περιοχών όπου έχουν εγκατασταθεί αισθητήρες καθώς έχει εξασφαλισθεί διασύνδεση αυτών με την υποδομή πλέγματος. Οι διάφορες μετρήσεις που λαμβάνουν οι αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο από το φυσικό περιβάλλον στόχο έχουν τη διενέργεια προσομοιώσεων που σχετίζονται με τις κλιματολογικές αλλαγές ώστε να υπάρξει χαρακτηρισμός μίας περιοχής ως επικίνδυνη καθώς και μελλοντική πρόγνωση των περιβαλλοντικών μεταβολών.

4.5 Πειραματικά Αποτελέσματα

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στόχος αυτού του κεφαλαίου της διατριβής είναι η διαδικτύωση και η διαλειτουργικότητα των γεωγραφικά διασπαρμένων δικτύων αισθητήρων με την υποδομή πλέγματος που αποσκοπεί στη λήψη, αποθήκευση, επεξεργασία και απεικόνιση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο από το φυσικό περιβάλλον. Με αυτόν τον τρόπο συμβάλλει στην άμεση πρόληψη της προστασίας του περιβάλλοντος αλλά και στην έγκαιρη πρόγνωση επικίνδυνων κλιματικών αλλαγών. Συγκεκριμένα κάθε κόμβος-μέλος (*node*) του ασύρματου δικτύου αισθητήρων λαμβάνει μετρήσεις από το φυσικό περιβάλλον που σχετίζονται με τη θερμοκρασία, υγρασία και την ολική ακτινοβολία. Ως αρχικός στόχος είναι η αποστολή των μετρήσεων στον σταθμό-βάση και εν συνεχεία η μετάδοση, η απεικόνισή τους καθώς και ο έλεγχος των αισθητήρων από οποιοδήποτε χρήστη έχει πρόσβαση μέσα στην πλεγματική υποδομή.

Το προτεινόμενο ενοποιημένο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με πλέγμα αποτελείται από μονάδες-αισθητήρες Tmote Sky της εταιρείας Moteiv, οι οποίοι σχηματίζουν ένα ασύρματο δίκτυο το οποίο προωθεί τις μετρήσεις που λαμβάνονται από το φυσικό περιβάλλον σε μία μονάδα που βρίσκεται συνδεδεμένη στον αντίστοιχο διακομιστή μεσολάβησης (*proxy server*) (βλ. Σχ. 25). Η συγκεκριμένη τεχνική διαδικτύωσης που ακολουθήθηκε θα παρουσιασθεί αναλυτικότερα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής στο Κεφ. 5. Δεδομένης της πυκνής εγκατάστασης των κόμβων, η μετάδοση της πληροφορίας μεταξύ τους δύναται να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους επικοινωνίας: (i) Με ένα βήμα (*single-hop*), (ii) Με πολλαπλά βήματα (*multi-hop*). Στην πρώτη περίπτωση εφαρμόζεται όταν ο κόμβος-αποδέκτης είναι εντός της εμβέλειας όλων των κόμβων. Οπότε η εκπομπή πρέπει να γίνεται με τη μέγιστη δυνατή ισχύ ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή εμβέλεια.

Ο προγραμματισμός των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιήθηκε μέσω του λειτουργικού συστήματος TinyOS 2.1 και για την υλοποίηση της λειτουργίας πολλαπλών βημάτων-κόμβων (*multi-hop*) χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο TYMO. Οι μετρήσεις που φτάνουν στο σταθμό-βάση που είναι διασυνδεδεμένος με τον αντίστοιχο διακομιστή μεσολάβησης επεξεργάζονται και καταχωρούνται στη βάση δεδομένων του πλέγματος, η οποία έχει υλοποιηθεί με την MySQL και βασίζεται στην αναπτυχθείσα εφαρμογή Java. Επίσης, η εξαγωγή των μετρήσεων από τη βάση δεδομένων που βρίσκεται στην υποδομή του δικτύου πλέγματος υλοποιείται με PHP, ενώ η απεικόνισή τους γίνεται με Google Charts μέσω του αναπτυχθέν JavaScript.



Σχήμα 31: Ασύρματη Μονάδα Tmote Sky

Το Tmote Sky (Σχ. 31) είναι μία μονάδα ασύρματης επικοινωνίας εξαιρετικά χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, για χρήση σε δίκτυα αισθητήρων, εφαρμογές παρακολούθησης και ταχεία εφαρμογή πρωτοτύπων με σκοπό τόσο την ανεκτικότητα στο θόρυβο όσο και την ευκολία περαιτέρω ανάπτυξης και αξιοποίησης. Το Tmote Sky αξιοποιεί πρότυπα όπως το USB και το IEEE 802.15.4 για να επικοινωνεί άσφρα με άλλες συσκευές. Χρησιμοποιώντας βιομηχανικά πρότυπα και ενσωματώνοντας μετρητές υγρασίας, θερμοκρασίας, αισθητήρες φωτός, και παρέχοντας ευέλικτες διασυνδέσεις με περιφερειακά, το Tmote Sky υποστηρίζει την υλοποίηση ενός μεγάλου φάσματος εφαρμογών δικτύου πλέγματος. Επίσης είναι ο αντικαταστάτης του επιτυχημένου Telos περιλαμβάνοντας αυξημένες επιδόσεις, λειτουργικότητα, και επεκτασιμότητα σε σχέση με τον προκάτοχό του. Με απόλυτη υποστήριξη από το TinyOS, το Tmote Sky αξιοποιεί νέα πρωτόκολλα ασύρματης δικτύωσης και ανοιχτού λογισμικού. Το Tmote Sky είναι μέρος μίας σειράς πλατφόρμων που αναπτύχθηκαν από το Πανεπιστήμιο του Berkeley των Η.Π.Α και διαθέτουν onboard αισθητήρες ώστε να αυξηθεί η ισχύς τους ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος και το μέγεθος του πακέτου.

Τα κυριότερα γνωρίσματα και τεχνικά χαρακτηριστικά του Tmote Sky είναι ότι διαθέτουν ασύρματο πομποδέκτη 250kbps 2.4GHz IEEE 802.15.4 Chipcon, έχουν εξασφαλισμένη διαλειτουργικότητα με άλλες συσκευές IEEE 802.15.4, διαθέτουν μικροελεγκτή 8MHz Texas Instruments MSP430 (10k RAM, 48k Flash), έχουν onboard κεραία με εμβέλεια 50m σε εσωτερικούς χώρους, 125m σε εξωτερικούς με ενσωματωμένους αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας και φωτός. Επίσης έχουν εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, γρήγορη αφύπνιση (<6μs), κωδικοποίηση και πιστοποίηση αυθεντικότητας στο στρώμα ζεύξης υλικού, ενώ παρέχουν δυνατότητες προγραμματισμού και συλλογής δεδομένων μέσω USB και υποστηρίζουν το λειτουργικό σύστημα TinyOS.

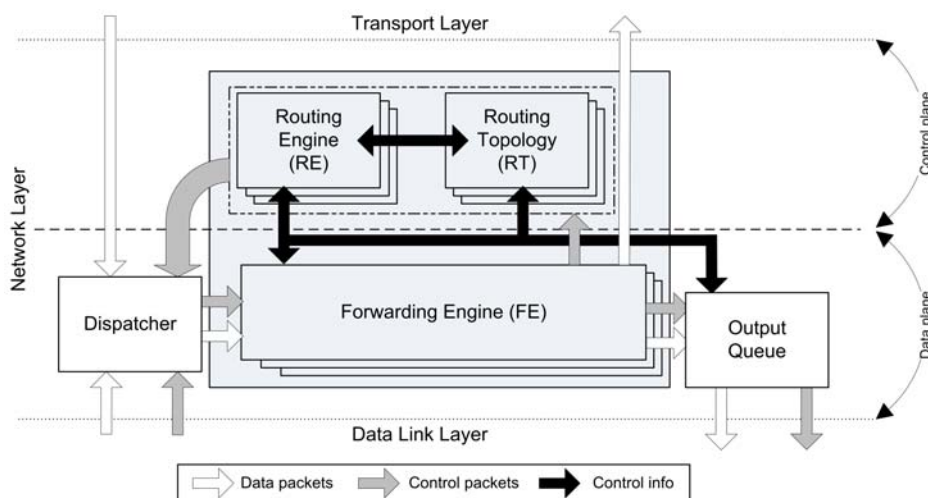
Η υλοποίηση και ανάπτυξη του Tmote στηρίχθηκε σε τρεις βασικούς στόχους που είναι οι εξής: (i) Η αρκετά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με τις προηγούμενες γενεές πλατφόρμων, (ii) Η φιλικότητα προς το χρήστη (*user-friendly*), (iii) Περαιτέρω δυνατότητες ανάπτυξης και διενέργειας πειραμάτων. Ο σχεδιασμός της μονάδας Tmote Sky στηρίζεται στην ακόλουθη βασική αρχή: Η μονάδα-κόμβος βρίσκεται σε αδράνεια στο σύνολο του χρόνου, αφυπνίζεται άμεσα με την ύπαρξη ενός συμβάντος, επεξεργάζεται το

συμβάν και επιστρέφει σε αδράνεια. Η ολοκληρωμένη σχεδίαση του προσφέρει όμως κάτι παραπάνω από απλά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία του επιτρέποντας στους σχεδιαστές ενός συστήματος να εκμεταλλευτούν την αυξημένη λειτουργικότητά του και να υποστηρίξουν περισσότερο την ευρωστία ενός τέτοιου δικτύου.

Η μονάδα Tmote χρησιμοποιεί τον μικροελεγκτή MSP430, ο οποίος έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε καταστάσεις αδράνειας και ενεργής λειτουργίας και λειτουργεί με ελάχιστη τάση 1.8 V. Η απαίτηση χαμηλών τιμών τάσης είναι σημαντική για την εξαγωγή όλης της ενέργειας από μία πηγή τάσης. Συνεπώς, για παράδειγμα, οι μπαταρίες τύπου AA έχουν τάση αποκοπής στα 0.9V. Οπότε αν χρησιμοποιηθούν 2 μπαταρίες σε σειρά η τάση αποκοπής του συστήματος είναι 1.8V, ακριβώς η ίδια με την ελάχιστη τάση που απαιτεί ο MSP430. Ο MSP430 μεταβαίνει από την κατάσταση αναμονής (*standby*) του 1μΑ σε κατάσταση λειτουργίας το πολύ μέσα σε 6μs. Επίσης, διαθέτει έναν ελεγκτή (*controller*) DMA (*Direct Memory Access*) προσφέροντας έτσι δυνατότητα μείωσης του φορτίου στον πυρήνα του μικροελεγκτή καθώς και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας επιτυγχάνοντας αύξηση της απόδοσης.

4.5.1 Πειραματική Διάταξη

Στη συγκεκριμένη υλοποίηση επιλέχθηκε η επικοινωνία πολλαπλών βημάτων-κόμβων (*multi-hop*) για το λόγο ότι το δίκτυο προσφέρει περισσότερες δυνατότητες στον σχεδιαστή του επειδή χρησιμοποιεί την εμβέλεια του κάθε κόμβου δημιουργώντας έτσι ένα επεκτάσιμο δίκτυο που δύναται να παρέχει πλήρη κάλυψη σε μία ευρεία περιοχή καθώς οι πληροφορίες μετακινούνται από κόμβο-σε-κόμβο μέχρι τον τελικό προορισμό τους. Επίσης, η ακολουθούμενη μέθοδος αυξάνει κατά πολύ την συνολική κάλυψη του δικτύου ενώ μειώνει ταυτόχρονα την απαιτούμενη ενέργεια με μοναδική απαίτηση τη χρήση εξειδικευμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και ισχυρότερους κόμβους από πλευράς υλικού (*hardware*) [40].



Σχήμα 32: Διάταξη TYMO σε Επίπεδο Δικτύου

Ο προγραμματισμός των αισθητήρων πραγματοποιήθηκε μέσω του λειτουργικού συστήματος TinyOS 2.1 [35] και για την υλοποίηση της λειτουργίας πολλαπλών βημάτων (*multi-hop*) χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο TYMO [36]. Στο **Σχήμα 32** απεικονίζεται η διάταξη του TYMO καθώς διαιρείται στα εξής δύο μέρη: (i) Επίπεδο Δεδομένων, (ii) Επίπεδο Ελέγχου.

Ο Δρομολογητής (*Dispatcher*) εξετάζει την επικεφαλίδα των πακέτων που προέρχονται από το κατώτερο ή ανώτερο στρώμα προκειμένου να καθοριστεί το πρωτόκολλο, στο οποίο ανήκει το πακέτο, και περνάει το πακέτο στην αρμόδια υπηρεσία πρωτοκόλλου η οποία είναι ένα σύνολο που αποτελείται από τη Μηχανή Προώθησης (*Forwarding Engine*), τη Μηχανή Δρομολόγησης (*Routing Engine*) και την Τοπολογία Δρομολόγησης (*Routing Topology*). Αν και η Μηχανή Προώθησης είναι μέρος μίας υπηρεσίας πρωτοκόλλου, δε γνωρίζει τη μορφή του πρωτοκόλλου και των αλγορίθμων. Απλώς ζητά από τη Μηχανή Δρομολόγησης την πλήρωση της επικεφαλίδας δρομολόγησης του πακέτου πριν την προώθησή του ή την παράδοση του πακέτου στο ανώτερο στρώμα όταν το πακέτο έχει φτάσει στον προορισμό της. Ο λόγος για τον οποίο η Μηχανή Προώθησης ανήκει στην υπηρεσία πρωτοκόλλου είναι ότι δύναται να εκτελέσει συνάθροιση πακέτων ή προγραμματισμό και αυτά τα καθήκοντα εξαρτώνται από το πρωτόκολλο.

Η Μηχανή Δρομολόγησης και η Τοπολογία Δρομολόγησης είναι οι βασικές συνιστώσες ενός πρωτοκόλλου. Καθώς η Μηχανή Δρομολόγησης παράγει και επεξεργάζεται πακέτα ελέγχου, η Τοπολογία Δρομολόγησης υπολογίζει και αποθηκεύει τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με την τοπολογία του δικτύου, σύμφωνα με τα στοιχεία που αναφέρθηκαν από τη Μηχανή Δρομολόγησης. Τέλος, η ουρά εξόδου χειρίζεται τα πακέτα που αποστέλλονται από όλα τα πρωτόκολλα που εκτελούνται στον κόμβο. Δεδομένου ότι όλα τα πακέτα πρέπει να περάσουν από αυτό το συστατικό για να αποσταλούν, η ουρά εξόδου δύναται να τα προγραμματίζει σύμφωνα με την πολιτική του κόμβου.

Ο στόχος της εφαρμογής TYMO μέσα στο ενοποιημένο δίκτυο είναι να παρέχει ένα συστατικό σε μία εφαρμογή, προκειμένου να γίνεται διαφανής αποστολή και λήψη δεδομένων σε ένα δίκτυο πολλαπλών βημάτων (*multi-hop*). Είναι η υλοποίηση στο TinyOS του DYMO (*DYnamic MANET On-demand, DYMO*) πρωτοκόλλου, ενός point-to-point πρωτοκόλλου δρομολόγησης για κινητά ad-hoc δίκτυα (*Mobile Ad-Hoc Networks, MANETs*). Η επιλογή του DYMO πρωτοκόλλου δρομολόγησης μέσα στο προτεινόμενο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων πολλαπλών βημάτων (*multi-hop*) βασίστηκε στα πλεονεκτήματα που προσφέρει έναντι των υπολοίπων πρωτοκόλλων που είναι το Flooding, Direct Diffusion (*DD*), Minimum Cost Forwarding Algorithm (*MCF*), και το Ad-hoc On-demand Distance Vector (*AODV*). Τα πλεονεκτήματα του DYMO εστιάζονται κυρίως στην εξοικονόμηση ενέργειας, στην κλιμακωσιμότητα, στο εύρος κάλυψης περιοχής και στην ευρωστία (*robustness*) του δικτύου [41].

Ως αντιδραστικό (*reactive*) πρωτόκολλο, το DYMO δεν αποθηκεύει ρητά την τοπολογία του δικτύου. Απεναντίας, οι κόμβοι υπολογίζουν μία διαδρομή προς τον επιθυμητό προορισμό μόνο όταν χρειάζεται. Ως αποτέλεσμα, οι πληροφορίες δρομολόγησης ανταλλάσσονται γεγονός που μειώνει την επιβάρυνση του δικτύου οπότε κατά συνέπεια εξοικονομεί εύρος ζώνης και ενέργεια. Επίσης, δεδομένου ότι λίγες πληροφορίες δρομολόγησης αποθηκεύονται, το DYMO δύναται να χρησιμοποιηθεί από συσκευές με περιορισμένους πόρους μνήμης, όπως είναι οι πλατφόρμες αισθητήρων.

Όταν ένας κόμβος χρειάζεται μία διαδρομή, διαδίδει μία Αίτηση Διαδρομής (*RREQ*), η οποία είναι ένα πακέτο, ζητώντας για μία διαδρομή μεταξύ του εντολέα και ενός κόμβου-στόχου. Το πακέτο στέλνεται στο σύνολο του δικτύου ή σε έναν αριθμό βημάτων (*hops*) από τον εντολέα. Όταν το πακέτο φθάσει στο στόχο του ή σε ένα κόμβο που έχει μία νέα διαδρομή προς τον στόχο, ο κόμβος απαντά με μία Απάντηση Διαδρομής (*RREP*). Ένα τέτοιο πακέτο είναι παρόμοιο με ένα Αίτημα Διαδρομής (*RREQ*), αλλά ακολουθεί μία διαδρομή μοναδικής διανομής και δεν ενεργοποιείται καμία απόκριση όταν ο στόχος έχει επιτευχθεί.

Όταν οι κόμβοι λάβουν ένα *RREQ* ή *RREP* αποθηκεύουν προσωρινά πληροφορίες σχετικά με τον αποστολέα σε επίπεδο συνδέσμου, δηλαδή τον τελευταίο αποστολέα του *RREQ* ή *RREP*, και την πηγή προέλευσης ώστε να γνωρίζουν μία διαδρομή προς την πηγή προέλευσης που δύναται να χρησιμοποιήσουν αργότερα σε περίπτωση που δεν είναι αρκετά πρόσφατη και δίχως να απαιτείται η αποστολή ενός *RREQ*. Οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να συγκεντρώνουν την διαδρομή που ακολούθησε το πακέτο στο ίδιο το πακέτο. Έτσι, όταν οι κόμβοι διαδίδουν μία *RREQ* ή *RREP*, πολλές πληροφορίες δύναται να ληφθούν από το πακέτο, πολύ περισσότερο από μία διαδρομή μεταξύ δύο κόμβων. Όταν διαδρομές δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, διαγράφονται. Αν ένας κόμβος καλείται να διαβιβάσει ένα πακέτο μέσα από μία διαδρομή που έχει διαγραφεί, παράγει ένα μήνυμα Σφάλματος Διαδρομής (*RERR*) ώστε να προειδοποιήσει το αρχικό κόμβο και άλλους κόμβους ότι αυτή η διαδρομή δεν είναι πλέον διαθέσιμη. Ως ένα άλλο μηχανισμό συντήρησης διαδρομής, το DYMO χρησιμοποιεί αριθμούς ακολουθίας και μετράει τα βήματα (*hops*) για τον προσδιορισμό της χρησιμότητας και της ποιότητας της διαδρομής.

Η χρήση του DYMO αποσκοπεί στο να βρεθούν διαδρομές κατά-απαίτηση (*on-demand*). Για τη μεταφορά των δεδομένων κατά μήκος αυτών των διαδρομών, σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε το πρωτόκολλο μεταφοράς MH (βλ. Σχ. 33) για multi-hop και χρησιμοποιεί διεύθυνση 16-bit, δηλαδή της ίδιας μορφής με το DYMO. Σκοπός του MH είναι η προώθηση πακέτων, εκτός εάν ο κόμβος-παραλήπτης είναι ο στόχος του πακέτου. Η αποστολή και λήψη μηνυμάτων MH γίνεται μέσα από τις ίδιες τεχνικές διεπαφές με τη στοίβα Ενεργού Μηνύματος του TinyOS. Βέβαια για την αποστολή και λήψη μηνυμάτων MH, θα πρέπει να δηλωθεί η χρήση των διεπαφών, όπως ακολουθεί στο παρακάτω σχήμα.

```

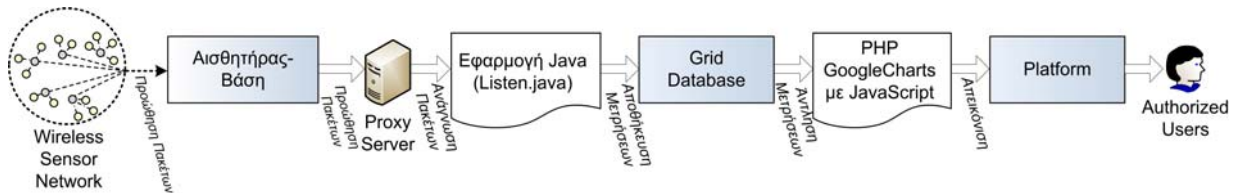
module TestM {
  uses {
    interface SplitControl;
    interface AMPacket as MHPacket;
    interface Packet;
    interface Receive;
    interface AMSend as MHSend;
  }
}

```

Σχήμα 33: Επισκόπηση Αποστολής-Λήψης MH Μηνυμάτων

Στο Σχήμα 34 απεικονίζεται η ροή των δεδομένων μέσα στο ενοποιημένο σύστημα ελέγχου και παρακολούθησης περιβάλλοντος, ενώ ο κώδικας υλοποιήθηκε στα πλαίσια του περιβαλλοντικού συστήματος παρουσιάζεται στο παρόν κεφαλαίο της διατριβής. Οι μετρήσεις που φτάνουν στο σταθμό-βάση

επεξεργάζονται και καταχωρούνται στη βάση δεδομένων μέσω μίας Java εφαρμογής που αναπτύχθηκε, ενώ η βάση δεδομένων έχει δημιουργηθεί με τη χρήση της MySQL [32]. Επίσης, η εξαγωγή δεδομένων από τις βάσεις δεδομένων που βρίσκονται στην υποδομή πλέγματος υλοποιείται με PHP [37], ενώ η απεικόνιση τους γίνεται με Google Charts [38] μέσω JavaScript [39].



Σχήμα 34: Διάγραμμα Ροής Συστήματος

Για τη λήψη μετρήσεων από τους αισθητήρες, το TinyOS διαθέτει τα συστατικά που παρέχουν μία ή περισσότερες Split-phase διεπαφές Read της μορφής που απεικονίζεται στο Σχήμα 35. Για να ληφθεί μία μέτρηση, πρέπει να κληθεί η εντολή read. Με την ολοκλήρωσή της, σηματοδοτείται το γεγονός readDone. Δεδομένου ότι η επιστρεφόμενη τιμή της μεταβλητής result είναι SUCCESS, η μεταβλητή val θα περιέχει την ζητούμενη μέτρηση [42].

```
interface Read<val_t> {
    command error_t read();
    event void readDone(error_t result, val_t val);
}
```

Σχήμα 35: Διεπαφή Read

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στην επικοινωνία πολλαπλών βημάτων (*multi-hop*) μεταξύ των Tmote Sky μονάδων, τη λήψη μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο από το φυσικό περιβάλλον καθώς και τη διασύνδεση-διαλειτουργικότητα αυτών με την υποδομή πλέγματος. Αρχικά, για τη διαχείριση των αισθητήρων έγινε εγκατάσταση του TinyOS λειτουργικού. Η ανάπτυξη της εφαρμογής έγινε σε περιβάλλον Linux, συγκεκριμένα του Ubuntu 8.04 (Hardy Heron) [43], και έγινε εγκατάσταση εργαλείων όπως είναι το NesC Compiler [44], Debian MSP430 [45], Debian AVR [46], Java SDK [47]. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν, όσον αφορά τους αισθητήρες, ήταν τα εξής:

- Λήψη μετρήσεων από τον αισθητήρα της μονάδας
- Αποστολή μετρήσεων σειριακά στο διακομιστή μεσολάβησης μέσω USB
- Αποστολή μετρήσεων σε άλλο αισθητήρα (*single-hop*)
- Αποστολή μετρήσεων με προορισμό τον κόμβο-βάση (*multi-hop*)
- Τροποποίηση εφαρμογής κόμβου βάσης για να επεξεργάζεται τον τύπο μηνύματος πολλαπλών βημάτων (*multi-hop*)

Για την επίτευξη των παραπάνω διαδικασίες ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο SampleToRadio τον οποίο εκτελεί η εφαρμογή. Ενώ οι διεπαφές της πλατφόρμας Tmote Sky που καθορίστηκαν για τη λήψη των πραγματοποιούμενων μετρήσεων διαμορφώνονται ως εξής:

- SensirionSht11C() για μέτρηση θερμοκρασίας και υγρασίας
- HamamatsuS1087ParC για μέτρηση Ενεργής Φωτοσυνθετικά Ακτινοβολίας (PAR)
- HamamatsuS10871TsrC() για μέτρηση Ολικής Ηλιακής Ακτινοβολίας (TSR)
- Msp430InternalVoltageC() για μέτρηση εσωτερικής τάσης
- Msp430InternalTemperatureC() για μέτρηση εσωτερικής θερμοκρασίας

Οι αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας είναι τοποθετημένοι στο εξωτερικό του αισθητήρα Sensirion. Για τις μετρήσεις της θερμοκρασίας ο παλμογράφος επιστρέφει μία 14-bit τιμή και μετατρέπει τις ανακτώμενες τιμές σε βαθμούς Κελσίου με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$T_c = -39.60 + 0.01 \times SO_t \quad (16)$$

όπου SO_t η μη επεξεργασμένη τιμή της θερμοκρασίας.

Για την υγρασία επιστρέφει μία 14-bit τιμή και υπολογίζεται από τους παρακάτω τύπους:

$$Humidity_{linear} = -4 + 0.405 \times SO_{rh} + (-2.8 \times 10^{-6}) \times (SO_{rh}^2) \quad (17)$$

όπου SO_{rh} είναι η μη-επεξεργασμένη τιμή του αισθητήρα υγρασίας, ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Οπότε από τις σχέσεις (16) και (17) η σχέση της πραγματικής τιμής της υγρασίας διαμορφώνεται ακολούθως:

$$Humidity_{true} = (T_c - 25) \times (0.01 + 0.00008 \times SO_{rh}) + humidity \quad (18)$$

όπου T_c η θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου, όπως υπολογίστηκε στη σχέση (16).

Ο αισθητήρας εσωτερικής τάσης χρησιμοποιεί το 12-bit ADC του μικροελεγκτή του Mote. Στη θύρα τάσης του ADC απεικονίζεται το αποτέλεσμα από ένα διαιρέτη τάσης. Η μετατροπή των μετρήσεων σε φυσικές μονάδες βασίζεται στην παρακάτω σχέση:

$$V_{cc} = \frac{RawValue}{4096} \times V_{ref} \times \frac{2R}{R} \quad (19)$$

όπου $V_{ref} = 1.5V$ η τάση των μπαταριών που χρησιμοποιεί το mote, $RawValue$ η τιμή τάσης του ADC και ο αριθμός $4096 = 2^{12}$ γιατί έχουμε 12-bit ADC.

Παρόμοια με την εσωτερική τάση, ο αισθητήρας εσωτερικής θερμοκρασίας είναι μη-βαθμονομημένος και δειγματοληπτείται με τη χρήση του 12-bit ADC που βρίσκεται στον 16-bit μικροελεγκτή (*microcontroller*).

Αν και ο μη-βαθμονομημένος ακόλουθος τύπος λειτουργεί ορθά για αρκετές εφαρμογές, ωστόσο κάποιες φορές το σφάλμα δύναται να είναι μεγάλο.

$$T = \frac{V_{temp} - 0.986}{0.0035} \quad (20)$$

όπου V_{temp} είναι η τιμή της τάσης που προέρχεται από τη σχέση (19) διαιρεμένη με το συντελεστή 2. Αυτό συμβαίνει διότι η εσωτερική θερμοκρασία υπολογίζεται σε συνάρτηση με την τιμή τάσης που εμφανίζεται στη γραμμή τάσης του ADC, δηλαδή το αποτέλεσμα που προέρχεται από το διαιρέτη τάσης όπως αυτό αναφέρθηκε παραπάνω.

Η Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία (*Total Solar Radiation, TSR*) και Ενεργή Φωτοσυνθετική Ακτινοβολία (*Photosynthetically Active Radiation, PAR*) των αισθητήρων μετρώνται με τον 12-bit ADC και με $V_{ref}=1.5V$. Οι φωτοδιόδοι δημιουργούν ρεύμα κατά μήκος μίας αντίστασης 100KOhm. Το ρεύμα της φωτοδιόδου του αισθητήρα TSR σε *lux* προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$S1087 \quad I_x = 0.625 \times 1e6 \times I \times 1000 \quad (21)$$

$$\text{όπου} \quad I = \frac{V_{sensor}}{100,000} \quad (22)$$

$$\text{από} \quad V_{sensor} = I \times R, \text{ με } I = 100KOhm \quad (23)$$

$$\text{με} \quad V_{sensor} = \frac{RawValue}{4096} \times V_{ref} \quad (24)$$

Το ρεύμα της φωτοδιόδου της Ενεργής Φωτοσυνθετικής Ακτινοβολίας (*PAR*) προκύπτει από τον εξής τύπο:

$$S1087-01 \quad I_x = 0.769 \times 1e5 \times I \times 1000 \quad (25)$$

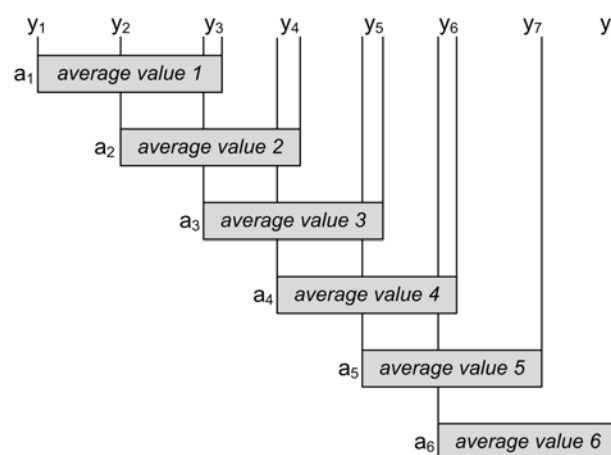
με I όμοια με τη σχέση (22). Μετά την ολοκλήρωση της εγκατάστασης των απαραίτητων στοιχείων, το επόμενο βήμα είναι η ανάπτυξη της εφαρμογής. Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα, πρέπει να δημιουργηθούν δύο αρχεία, ένα *module* και ένα *configuration*, τα *SampleToRadioAppC.nc* και *SampleToRadioC.nc* αντίστοιχα. Συμπληρωματικά, χρειάζεται το αρχείο *SampleToRadio.h* για τον ορισμό δομών και σταθερών που θα χρησιμοποιηθούν στην περιβαλλοντική εφαρμογή.

Σε επίπεδο σχεδιασμού της βάσης δεδομένων και οι μετρήσεις των αισθητήρων που θα αποθηκεύονται χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο Κινητού Μέσου Όρου (*Moving Average Filter*) [48]. Ύστερα από μία σειρά δοκιμών και πειραματισμών πάνω σε διαφόρων τύπων φίλτρα, βαθυπερατά ή υψυπερατά, με τη βοήθεια του

εργαλείου Signal Processing του Matlab [49] και των σημάτων που πάρθηκαν από την εφαρμογή, η επιλογή του φίλτρου κινητού μέσου όρου (*moving average filter*) κρίθηκε από τα τελικά αποτελέσματα των μετρήσεων ως η πιο κατάλληλη για την περίπτωση που εξετάζουμε.

Η επιλογή του συγκεκριμένου φίλτρου βασίστηκε στο ότι αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην εξάλειψη των έντονων διακυμάνσεων του σήματος μας εξαιτίας του θορύβου. Ο κινητός μέσος όρος είναι μία μαθηματική τεχνική η οποία χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τη μείωση της απόκλισης και την ανάδειξη της τάσης σε μία συλλογή από σημεία δεδομένων. Ο κινητός μέσος όρος αποτελεί παράλληλα πρωτότυπο του Φίλτρου Πεπερασμένης Κρουστικής Απόκρισης FIR (*Finite Impulse Response filter*), του πιο κοινού φίλτρου που χρησιμοποιείται ευρέως σε υπολογιστικά όργανα μέτρησης. Η χρήση του φίλτρου του κινητού μέσου όρου (*moving average filter*) έγκειται σε περιπτώσεις θορυβώδους σήματος και εφόσον υπάρχει ανάγκη εξάλειψης της μέσης τιμής από ένα περιοδικό σήμα ή όταν υπάρχει μία αργή μετατόπιση βασικής γραμμής που πρέπει να εξαλειφθεί.

Η διαδικασία που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για να καθοριστεί το μέγεθος του φιλτραρίσματος, περιλαμβάνει τη χρήση ενός παράγοντα εξομάλυνσης, παράθυρο s σημείων. Ο παράγοντας αυτός δύναται να αυξηθεί ή να ελαττωθεί ανάλογα με τον αριθμό των πραγματικών τιμών της κυματομορφής ή των δειγμάτων που θα χρησιμοποιήσει ο αλγόριθμος. Κάθε περιοδική κυματομορφή δύναται να θεωρηθεί σαν μία σειρά ή συλλογή από τιμές δεδομένων. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τον κινούμενο μέσο όρο παίρνοντας 2 ή περισσότερες τιμές της κυματομορφής και προσθέτοντάς τις διαιρεί το άθροισμά τους με το συνολικό αριθμό των προστιθέμενων τιμών ενώ αντικαθιστά την πρώτη τιμή με το μέσο όρο που μόλις υπολογίστηκε, επαναλαμβάνοντας τα βήματα με τη δεύτερη, την τρίτη μέχρι την τελευταία n τιμή της κυματομορφής. Το αποτέλεσμα είναι μία παραγόμενη κυματομορφή που συνίσταται από τις μέσες τιμές των δεδομένων και έχει τον ίδιο αριθμό σημείων με την αρχική κυματομορφή.



Σχήμα 36: Επισκόπηση Κινητός Μέσος Όρος

Στο Σχήμα 36 απεικονίζεται η εφαρμογή του αλγορίθμου του κινητού μέσου όρου στα σημεία y μίας κυματομορφής. Με y σημειώνονται τα συνεχόμενα σημεία της κυματομορφής ώστε να φανεί πώς

υπολογίζεται ο κινούμενος μέσος όρος. Στην περίπτωση αυτή, εφαρμόστηκε ο παράγοντας εξομάλυνσης τριών σημείων, που σημαίνει ότι 3 συνεχόμενα σημεία της αρχικής κυματομορφής προστέθηκαν, το άθροισμά τους διαιρέθηκε με τον αριθμό των n συνεχόμενων σημείων και το πηλίκο αυτό αποτέλεσε το πρώτο σημείο της παραγόμενης κυματομορφής. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το δεύτερο, το τρίτο κ.ο.κ. σημείο της αρχικής κυματομορφής, μέχρι το n τελευταίο σημείο της. Σημειώνοντας δε, ότι η τεχνική επικάλυψη που συμβαίνει κατά τον υπολογισμό του κινητού μέσου όρου μαζί με μία ειδική μεταχείριση του αρχικού και τελικού σημείου, δίνει τον ίδιο αριθμό σημείων στην παραγόμενη κυματομορφή, με αυτόν της αρχικής. Ο κινητός μέσος όρος μίας κυματομορφής εξάγεται από την σχέση:

$$a(n) = \frac{1}{s} \sum_{i=n}^{n+(s-1)} y(i) \quad (26)$$

όπου a είναι η μέση τιμή, n η θέση του σημείου, s ο παράγοντας εξομάλυνσης και y η πραγματική τιμή του σημείου.

Η ευελιξία του αλγορίθμου βασίζεται στο μεγάλο εύρος επιλογών που υπάρχουν για τον παράγοντα εξομάλυνσης. Ο συγκεκριμένος παράγοντας καθορίζει πόσα πραγματικά σημεία θα ληφθούν υπόψη για την εξαγωγή του μέσου όρου. Κάθε θετικός παράγοντας εξομάλυνσης έχει ως αποτέλεσμα ένα βαθυπερατό φίλτρο ενώ κάθε αρνητικός προσομοιώνει ένα υψιπερατό φίλτρο. Δεδομένης της απόλυτης τιμής του παράγοντα εξομάλυνσης, οι υψηλές τιμές δίνουν μεγαλύτερη εξομάλυνση στην παραγόμενη κυματομορφή ενώ οι χαμηλές τιμές παρέχουν μικρότερη εξομάλυνση.

Εφαρμόζοντας τον κατάλληλο παράγοντα εξομάλυνσης, ο αλγόριθμος δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή της μέσης τιμής μίας περιοδικής κυματομορφής. Μεγαλύτεροι θετικοί παράγοντες εξομάλυνσης συνήθως εφαρμόζονται για την παραγωγή μεσαίων τιμών κυματομορφής. Η υλοποίηση του φίλτρου σε κώδικα έγινε σε Java [39] και MySQL [32], ενώ το εργαλείο Listen.java περιγράφεται μαζί με τη διαδικασία αποθήκευσης τιμών στη βάση δεδομένων στις παραγράφους που ακολουθούν. Ο παράγοντας εξομάλυνσης που επιλέχθηκε είναι ίσος με $s=10$.

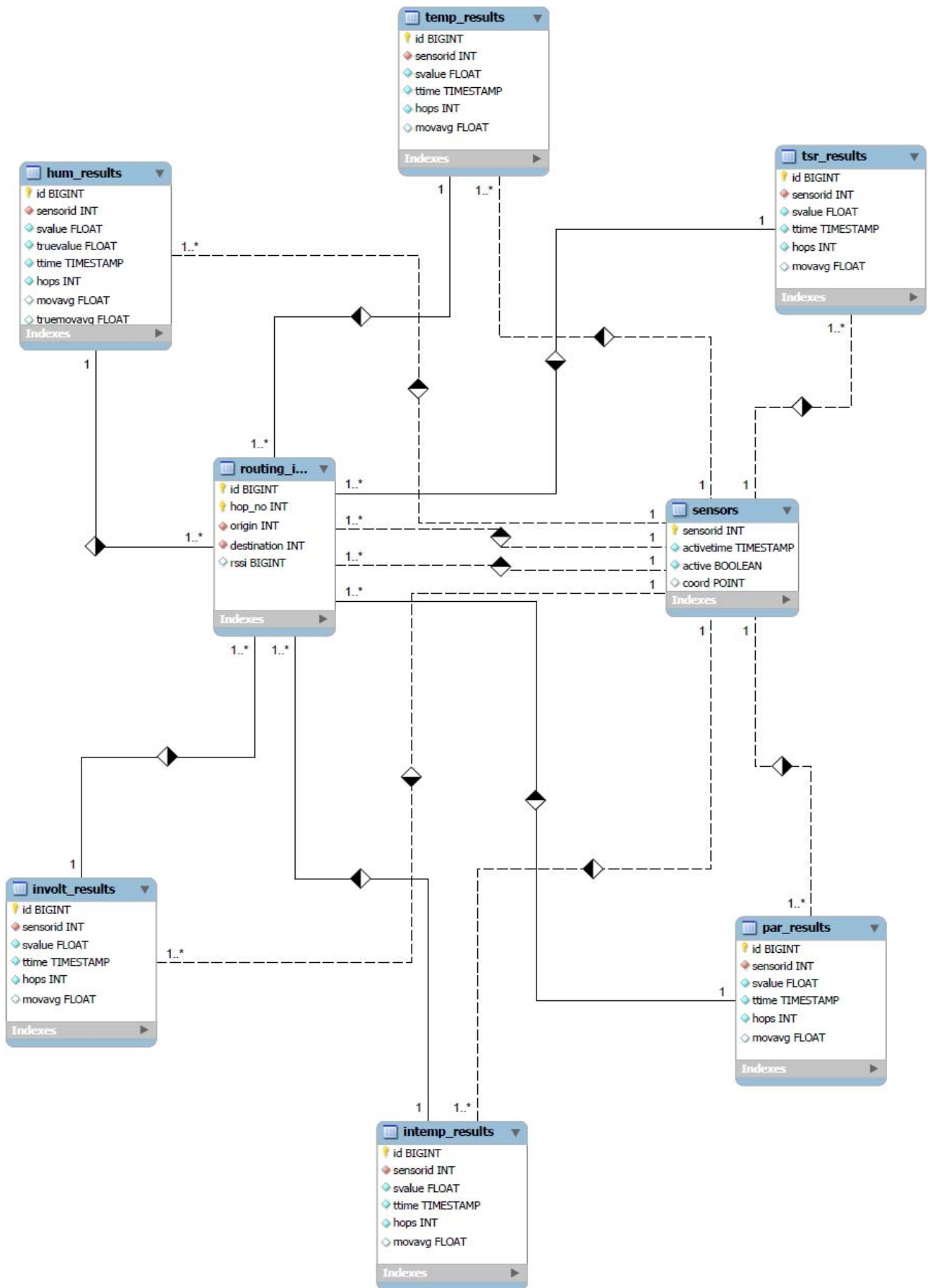
Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την αποθήκευση των μετρήσεων που αποστέλλουν οι αισθητήρες στην υποδομή πλέγματος βασίστηκε στην MySQL. Παρακάτω παρατίθεται το σχεσιακό μοντέλο της βάσης δεδομένων καθώς και μία περιγραφή των πινάκων και των πεδίων τους.

Στο **Σχήμα 37** με κίτρινο θαυμαστικό σημειώνεται το πρωτεύων κλειδί με έντονη γραφή στην περιγραφή του κάθε πίνακα ενώ με κόκκινο ρόμβο το ξένο κλειδί, πλάγια γραφή στην περιγραφή.

- *sensors*: Περιλαμβάνει όλους τους αισθητήρες που υπάρχουν στο σύστημα και όσους υπήρξαν στο παρελθόν.
 - *sensorid*: Το αναγνωριστικό της μονάδας-αισθητήρα.
 - *activetime*: Η ημερομηνία και ώρα που ήταν τελευταία φορά ενεργή που έστειλε πακέτο με μετρήσεις η μονάδα-αισθητήρας.

- active: TRUE αν ο αισθητήρας ήταν ενεργός μέσα στις προηγούμενες 2 ώρες, FALSE στην αντίθετη περίπτωση.
- coord: Οι συντεταγμένες της θέσης του αισθητήρα
- *routing_info*: Περιλαμβάνει πληροφορίες για τα βήματα (*hops*) που ακολούθησε κάθε πακέτο μέχρι να φτάσει στη μονάδα-βάση.
 - id: Το αναγνωριστικό του πακέτου.
 - hop_no: Το νούμερο του βήματος
 - origin: Η μονάδα-αισθητήρας που προώθησε το πακέτο
 - destination: Η μονάδα-αισθητήρας που έλαβε το πακέτο
 - rssi: Το Δείκτη Ισχύος Ληφθέντος Σήματος (*Received Signal Strength Indicator, RSSI*) που μέτρησε η μονάδα-αισθητήρας που έλαβε το πακέτο.
- *temp_results*: Περιλαμβάνει στοιχεία για τις Μετρήσεις Θερμοκρασίας.
 - id: Το αναγνωριστικό του πακέτου που περιείχε τη μέτρηση.
 - sensorid: Το αναγνωριστικό της μονάδας-αισθητήρα που πήρε τη μέτρηση.
 - svalue: Η τιμή του μεγέθους.
 - ttime: Η ημερομηνία και ώρα που έγινε η μέτρηση.
 - hops: Ο αριθμός των βημάτων που χρειάστηκαν για να φτάσει η μέτρηση στη μονάδα βάση.
 - monavg: ο κινητός μέσος όρος (*moving average*), δηλαδή ο μέσος όρος των τελευταίων 10 μετρήσεων.
- *hum_results*: Περιλαμβάνει στοιχεία για τις Μετρήσεις Υγρασίας.
 - id: Το αναγνωριστικό του πακέτου που περιείχε τη μέτρηση.
 - sensorid: Το αναγνωριστικό της μονάδας-αισθητήρα που πήρε τη μέτρηση.
 - svalue: Η τιμή του μεγέθους.
 - truevalue: Η πραγματική τιμή της υγρασίας, αν συνυπολογιστεί και η θερμοκρασία.
 - ttime: Η ημερομηνία και ώρα που έγινε η μέτρηση.
 - hops: Ο αριθμός των βημάτων που χρειάστηκαν για να φτάσει η μέτρηση στη μονάδα βάση.
 - monavg: ο κινητός μέσος όρος, δηλαδή ο μέσος όρος των τελευταίων 10 μετρήσεων.
 - truemonavg: ο κινητός μέσος όρος των πραγματικών μετρήσεων, δηλαδή ο μέσος όρος των τελευταίων 10 μετρήσεων *true value*.
- *tsr_results*: Περιλαμβάνει στοιχεία για τις μετρήσεις Ολικής Ηλιακής Ακτινοβολίας (*TSR*).
 - id: Το αναγνωριστικό του πακέτου που περιείχε τη μέτρηση.
 - sensorid: Το αναγνωριστικό της μονάδας-αισθητήρα που πήρε τη μέτρηση.
 - svalue: Η τιμή του μεγέθους.
 - ttime: Η ημερομηνία και ώρα που έγινε η μέτρηση.
 - hops: Ο αριθμός των βημάτων που χρειάστηκαν για να φτάσει η μέτρηση στη μονάδα βάση.

- monavg: ο κινητός μέσος όρος των πραγματικών μετρήσεων, δηλαδή ο μέσος όρος των τελευταίων 10 μετρήσεων.
- *par_results*: Περιλαμβάνει στοιχεία για τις μετρήσεις Ενεργής Φωτοσυνθετικά Ακτινοβολίας (PAR).
 - id: Το αναγνωριστικό του πακέτου που περιείχε τη μέτρηση.
 - sensorid: Το αναγνωριστικό της μονάδας-αισθητήρα που πήρε τη μέτρηση.
 - svalue: Η τιμή του μεγέθους.
 - ttime: Η ημερομηνία και ώρα που έγινε η μέτρηση.
 - hops: Ο αριθμός των βημάτων που χρειάστηκαν για να φτάσει η μέτρηση στη μονάδα βάση.
 - monavg: ο κινητός μέσος όρος των πραγματικών μετρήσεων, δηλαδή ο μέσος όρος των τελευταίων 10 μετρήσεων.
- *involt_results*: Περιλαμβάνει στοιχεία για τις Μετρήσεις Εσωτερικής Τάσης.
 - id: Το αναγνωριστικό του πακέτου που περιείχε τη μέτρηση.
 - sensorid: Το αναγνωριστικό της μονάδας-αισθητήρα που πήρε τη μέτρηση.
 - ttime: Η ημερομηνία και ώρα που έγινε η μέτρηση.
 - hops: Ο αριθμός των βημάτων που χρειάστηκαν για να φτάσει η μέτρηση στη μονάδα βάση.
 - monavg: ο κινητός μέσος όρος των τελευταίων 10 μετρήσεων.
- *intemp_results*: Περιλαμβάνει στοιχεία για τις Μετρήσεις Εσωτερικής Θερμοκρασίας.
 - id: Το αναγνωριστικό του πακέτου που περιείχε τη μέτρηση.
 - sensorid: Το αναγνωριστικό της μονάδας-αισθητήρα που πήρε τη μέτρηση.
 - ttime: Η ημερομηνία και ώρα που έγινε η μέτρηση.
 - hops: Ο αριθμός των βημάτων που χρειάστηκαν για να φτάσει η μέτρηση στη μονάδα βάση.
 - monavg: ο κινητός μέσος όρος των τελευταίων 10 μετρήσεων.



Σχήμα 37: Σχεσιακό Μοντέλο Βάσης Δεδομένων Μετρήσεων Αισθητήρων

Για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα της βάσης έχουν αξιοποιηθεί οι εξής παράμετροι:

- (i) Τύποι δεδομένων, όπου με την επιλογή των κατάλληλων τύπων δεδομένων για την αποθήκευση των μετρήσεων διασφαλίζεται ότι θα γίνει ορθή αναπαράστασή τους στη βάση δεδομένων,
- (ii) Τα Πρωτεύοντα Κλειδιά: διασφαλίζουν ότι κάθε πακέτο έχει μοναδικό αναγνωριστικό κατά την καταχώρησή του και ότι θα είναι δυνατό να ανεβρεθούν και οι έξι τύποι μετρήσεων που περιείχε, αφού θα έχουν το ίδιο αναγνωριστικό,
- (iii) Τα Ξένα κλειδιά διασφαλίζουν ότι για να πραγματοποιηθεί η εισαγωγή δεδομένων σε πίνακα με εξάρτηση ξένου κλειδιού πρέπει πρώτα η τιμή του πεδίου με την εξάρτηση να υπάρχει στον πίνακα από τον οποίο εξαρτάται. Επίσης κατά τη διαγραφή μίας εγγραφής ενός πίνακα γίνεται διαγραφή και των αντίστοιχων εγγραφών με αυτήν την τιμή στον εξαρτώμενο πίνακα. Έτσι δεν θα υπάρχουν ασυσχέτιστες εγγραφές.
- (iv) Τα Triggers διασφαλίζουν ότι κατά την εισαγωγή νέων εγγραφών στους πίνακες *temp_results*, *hum_results*, *tsr_results*, *par_results*, *involt_results* και *intemp_results* γίνεται έλεγχος για το αν οι μονάδες-αισθητήρες που βρίσκονται στη βάση ήταν ενεργοί μέσα στις προηγούμενες 2 ώρες, ειδικά η τιμή του πεδίου *sensors.active* γίνεται *FALSE*. Από αυτόν τον έλεγχο εξαιρείται η μονάδα-βάση, αφού είναι σίγουρα ενεργή, εφόσον έχει καταχωρηθεί νέα εγγραφή στη βάση.

Η εφαρμογή Listen.java είναι ένα βασικό κομμάτι του συστήματος που υλοποιείται γιατί πραγματοποιεί τη γεφύρωση ανάμεσα στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και τη βάση δεδομένων. Αναλυτικά οι εργασίες που εκτελεί είναι οι εξής:

- Ανάγνωση Πακέτων την μονάδας-βάση από τη θύρα USB.
- Μετατροπή της αλληλουχίας byte που ανακτά σε String από δεκαεξαδικά ψηφία.
- Διαχωρισμός του κάθε πεδίου του πακέτου και μετατροπή του σε δεκαδική μορφή.
- Μετατροπή των περιβαλλοντικών μετρήσεων από *raw values*.
- Εκτύπωση στο τερματικό τόσο του αρχικού πακέτου όσο και των δεδομένων αφού έχουν μετατραπεί.
- Εγκατάσταση σύνδεσης με τη Βάση Δεδομένων.
- Υπολογισμός κινητού μέσου όρου (*moving average*) για κάθε μέγεθος.
- Καταχώρηση στη βάση δεδομένων του id του αισθητήρα αν δεν υπάρχει ήδη ή ενημέρωση του πεδίου του *activetime* με την παρούσα ημερομηνία και ώρα στην αντίθετη περίπτωση.
- Καταχώρηση στη βάση όλων των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί μαζί με ημερομηνία, ώρα και τον κινητό μέσο όρο (*moving average*).

Σε κάθε πακέτο που καταφθάνει από τον αισθητήρα-βάση ανατίθεται ένα μοναδικό id, το οποίο είναι κοινό για κάθε τύπο μέτρησης που περιέχει αυτό το πακέτο.

4.5.2 Πειραματική Αξιολόγηση Διαδικτύωσης Ενοποιημένης Υποδομής

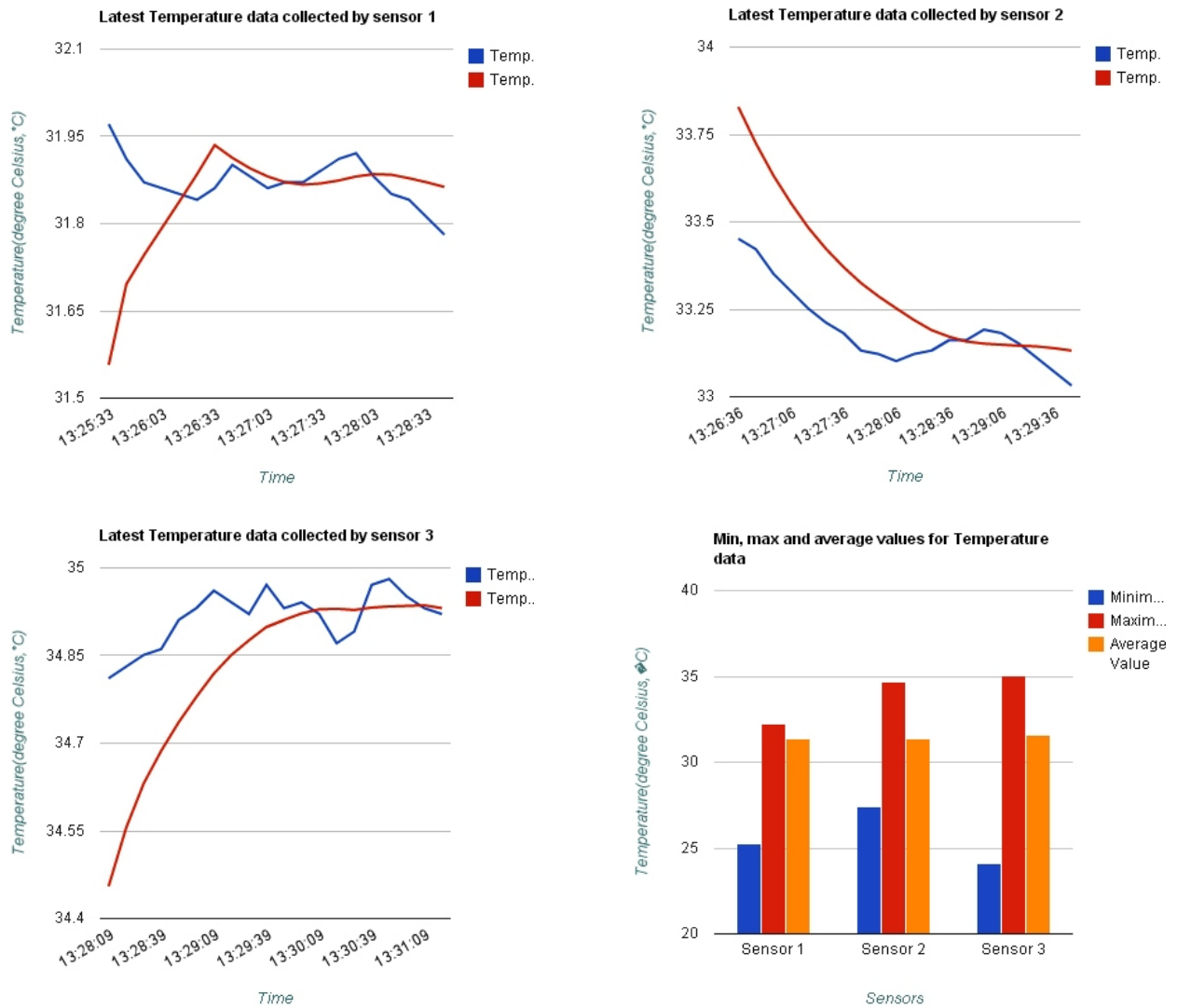
Πριν την γραφική αναπαράσταση, πρέπει να ανακτηθούν τα αποθηκευμένα δεδομένα από τη βάση δεδομένων. Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής, για τη συγκεκριμένη υλοποίηση επιλέχθηκε η γλώσσα PHP η οποία συνεργάζεται αρκετά καλά με τη MySQL. Οι λειτουργίες που εκτελεί βασίζονται στη διασύνδεση δεδομένων με τη βάση, ανάκτηση δεδομένων σύμφωνα με την επερώτηση (*query*) που έχει οριστεί και αποθήκευσή τους σε μεταβλητές, έτσι ώστε να είναι έτοιμα για χρήση.

Αφού τα δεδομένα είναι ήδη αποθηκευμένα σε μεταβλητές, το επόμενο βήμα είναι η παρουσίαση τους στο χρήστη, η οποία γίνεται με τη χρήση Google Charts Tools [50]. Το chart API παρέχει έναν απλό τρόπο για διαγράμματα-εικόνες διαφόρων τύπων, αποστέλλοντας μία μορφοποιημένη διεύθυνση URL που περιλαμβάνει τα δεδομένα και τις επιλογές διαμόρφωσης του γραφήματος στον αντίστοιχο εξυπηρετητή της Google. Το κλειστό σύνολο διαγραμμάτων (*charts*) περιλαμβάνει διάφορες επιλογές αποτελώντας ένα εργαλείο γραφικής αναπαράστασης δεδομένων που βασίζεται σε JavaScript. Περνώντας τα δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί σε PHP μεταβλητές στα Google Charts και επιλέγοντας τον τύπο του γραφήματος και καθορίζοντας τις επιλογές αναπαράστασης δημιουργούνται τα ζητούμενα γραφήματα.

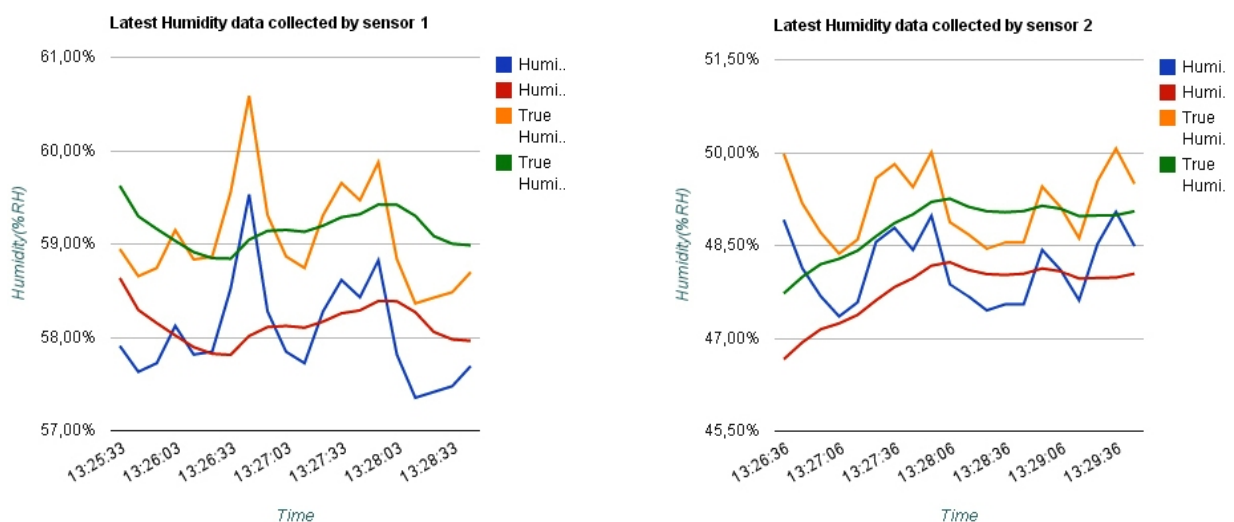
Επίσης για την αποτύπωση των γεωγραφικών θέσεων των αισθητήρων, χρησιμοποιήθηκε το Google Maps JavaScript API [50] δίδοντας τη δυνατότητα ενσωμάτωσης του Google Maps μέσα στο GUI του χρήστη και παρέχοντας λειτουργίες όπως επιλογή του αντίστοιχου γεωγραφικού σημείου, μεγέθυνσης χάρτη και τον τύπο της επιθυμητής απεικόνισης του γεωγραφικού χάρτη. Ανακτώντας έτσι τις συντεταγμένες των αισθητήρων με PHP, αυτοί καταχωρούνται στο γεωγραφικό χάρτη με σημάδια αντίστοιχα της επικινδυνότητας της εκάστοτε παρακολουθούμενης περιοχής.

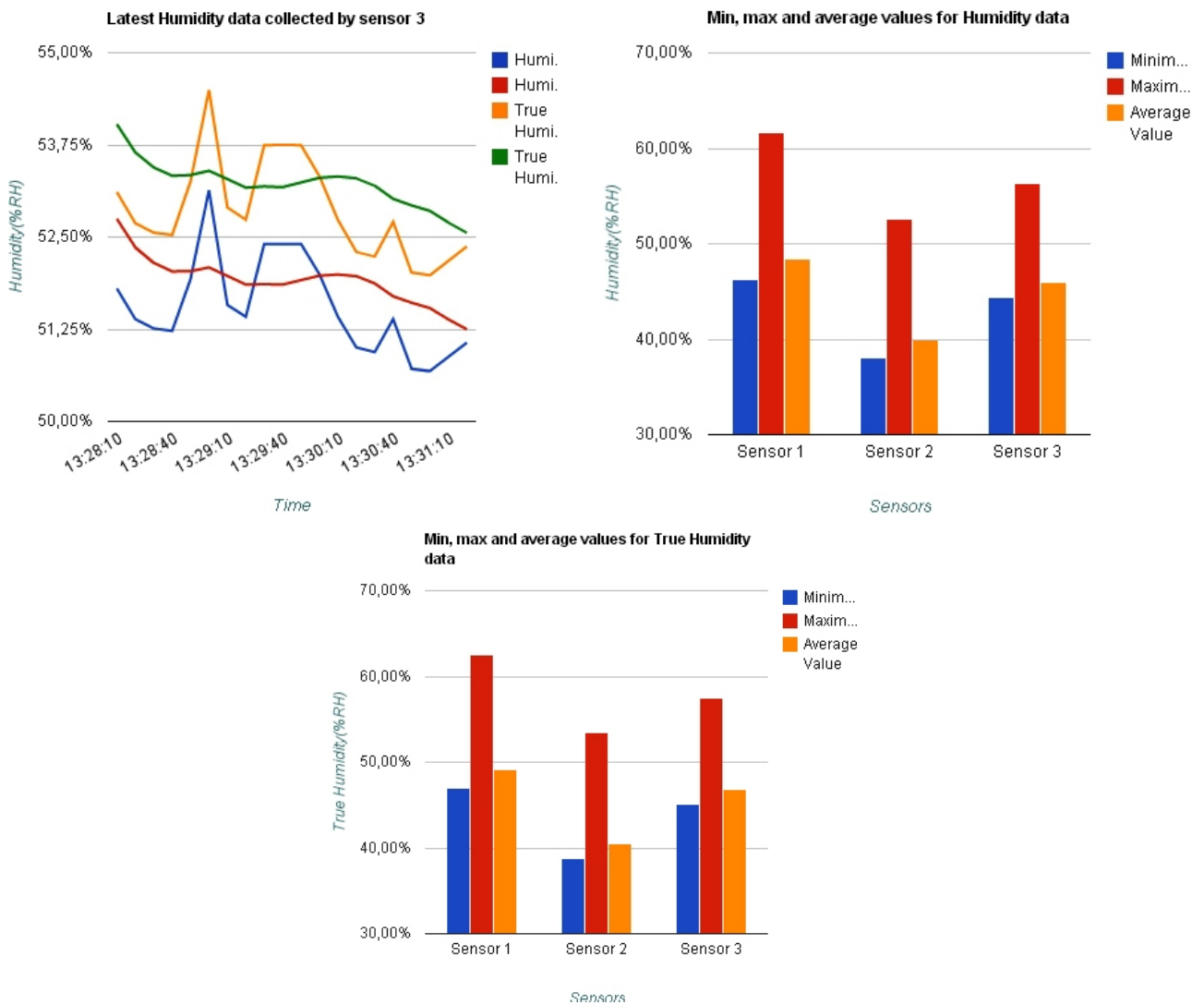
Στα παρακάτω **Σχήματα 38** έως **44** απεικονίζονται οι ανακτημένες μετρήσεις (Θερμοκρασίας, Υγρασίας, Ενεργής Ολικής Ηλιακής Ακτινοβολίας-TSR, Φωτοσυνθετικά Ακτινοβολίας-PAR, Μέτρηση Εσωτερικής Τάσης, Μετρήσεις Εσωτερικής Θερμοκρασίας, Δεικτών Ισχύος Ληφθέντος Σήματος-RSSI) από τους 3 γεωγραφικά διεσπαρμένους αισθητήρες που έχουν παραταχθεί μέσα στην υπό παρακολούθηση περιοχή προκειμένου να ελεγχθεί το προτεινόμενο ενοποιημένο δίκτυο αισθητήρων με πλέγμα ως προς τη διασύνδεση και τη διαλειτουργικότητά του. Με κόκκινο σημειώνεται ο κινητός μέσος όρος (*moving average*) κάθε μεγέθους.

Η κάθε μονάδα-αισθητήρας τροφοδοτείται από δύο μπαταρίες AA 1.5V, για αυτόν το λόγο παρατηρείται μη-γραμμικότητα με σταδιακή μείωση στη μέτρηση τάσης τροφοδοσίας (βλ. Σχ. 42). Παράλληλα συνυπάρχει και το φαινόμενο επαναφόρτισης (*recovery effect*) [51], κατά το οποίο ένα μέρος της χαμένης τάσης ανακτάται. Σε περίπτωση όμως που οι αισθητήρες χρησιμοποιήσουν τροφοδοσία μέσω USB, οι τιμές της εσωτερικής τάσης είναι σταθερές.

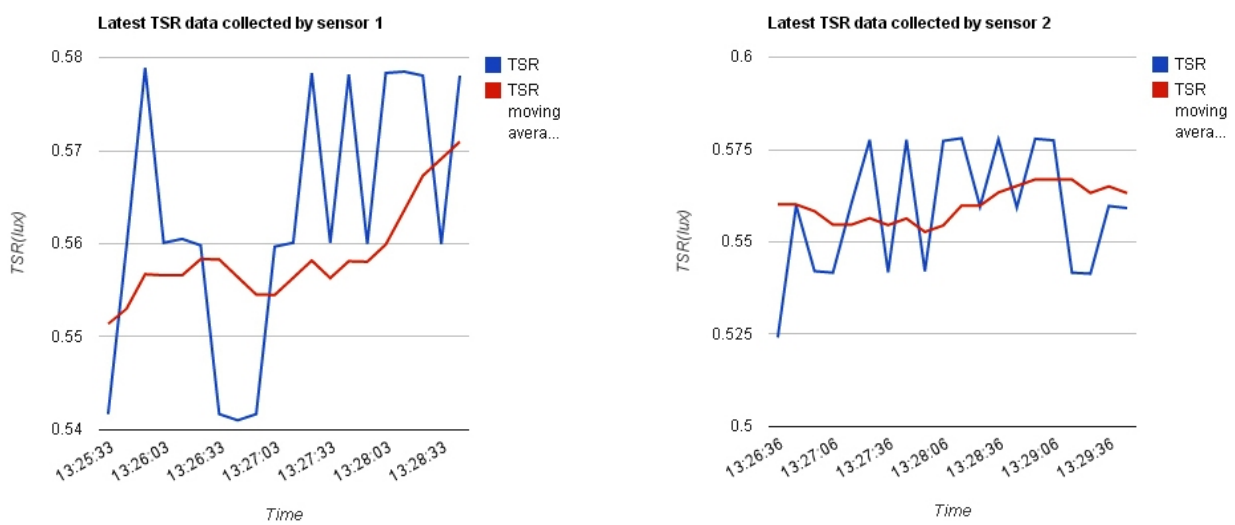


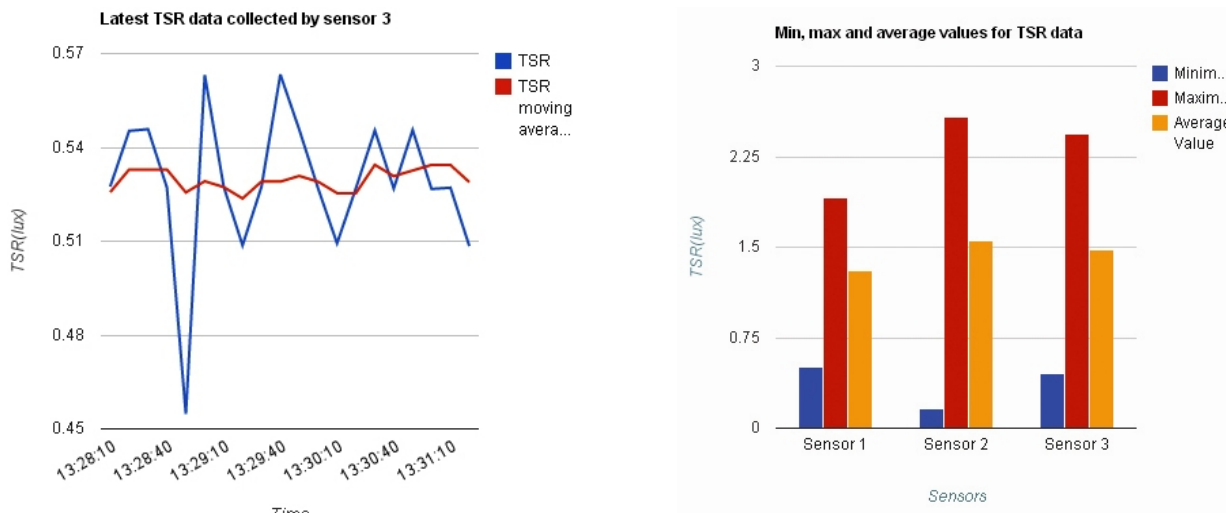
Σχήμα 38: Διαγράμματα Μετρήσεων Θερμοκρασίας Αισθητήρων



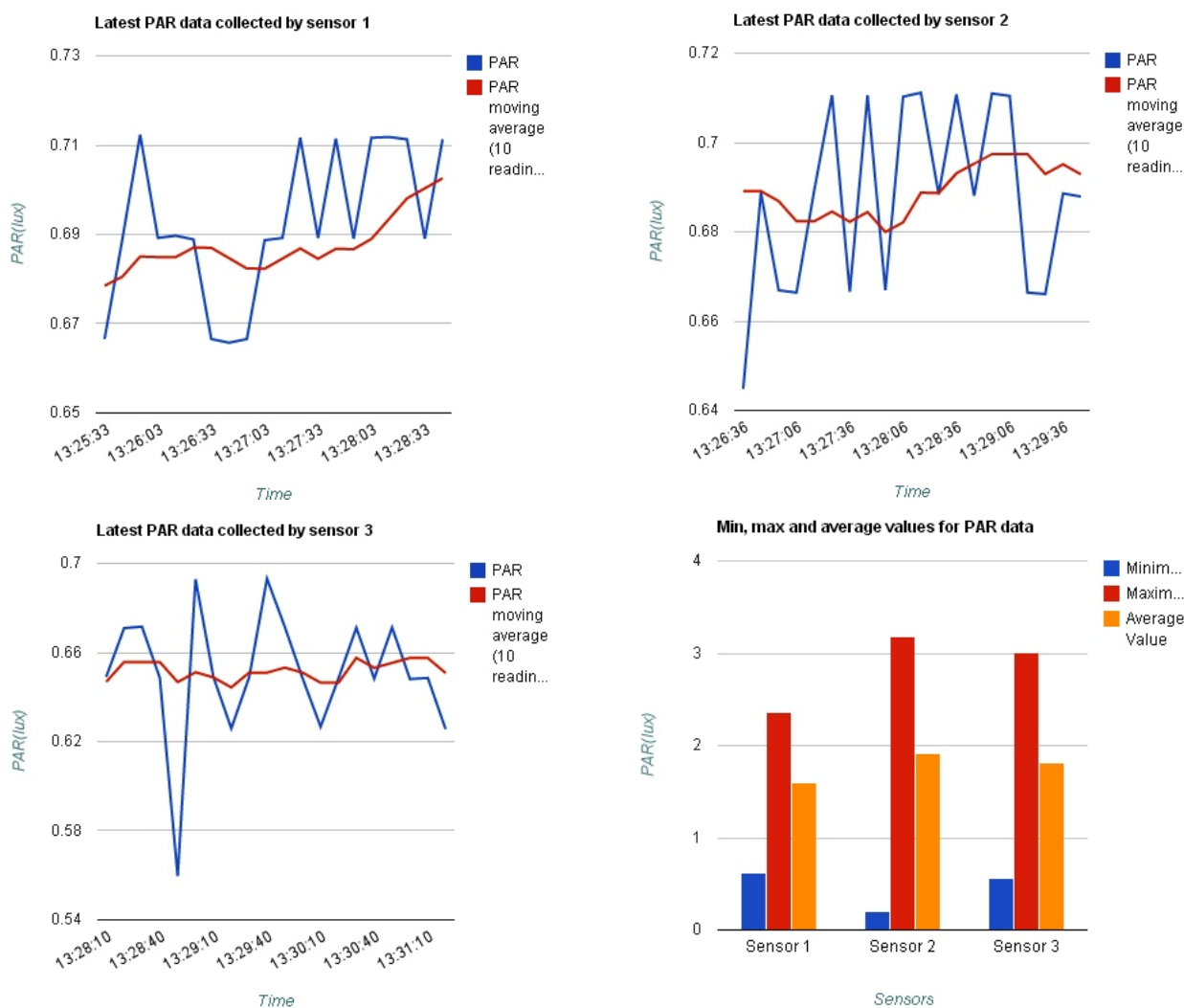


Σχήμα 39: Διαγράμματα Μετρήσεων Υγρασίας & Μετρήσεων Πραγματικής Υγρασίας Αισθητήρων

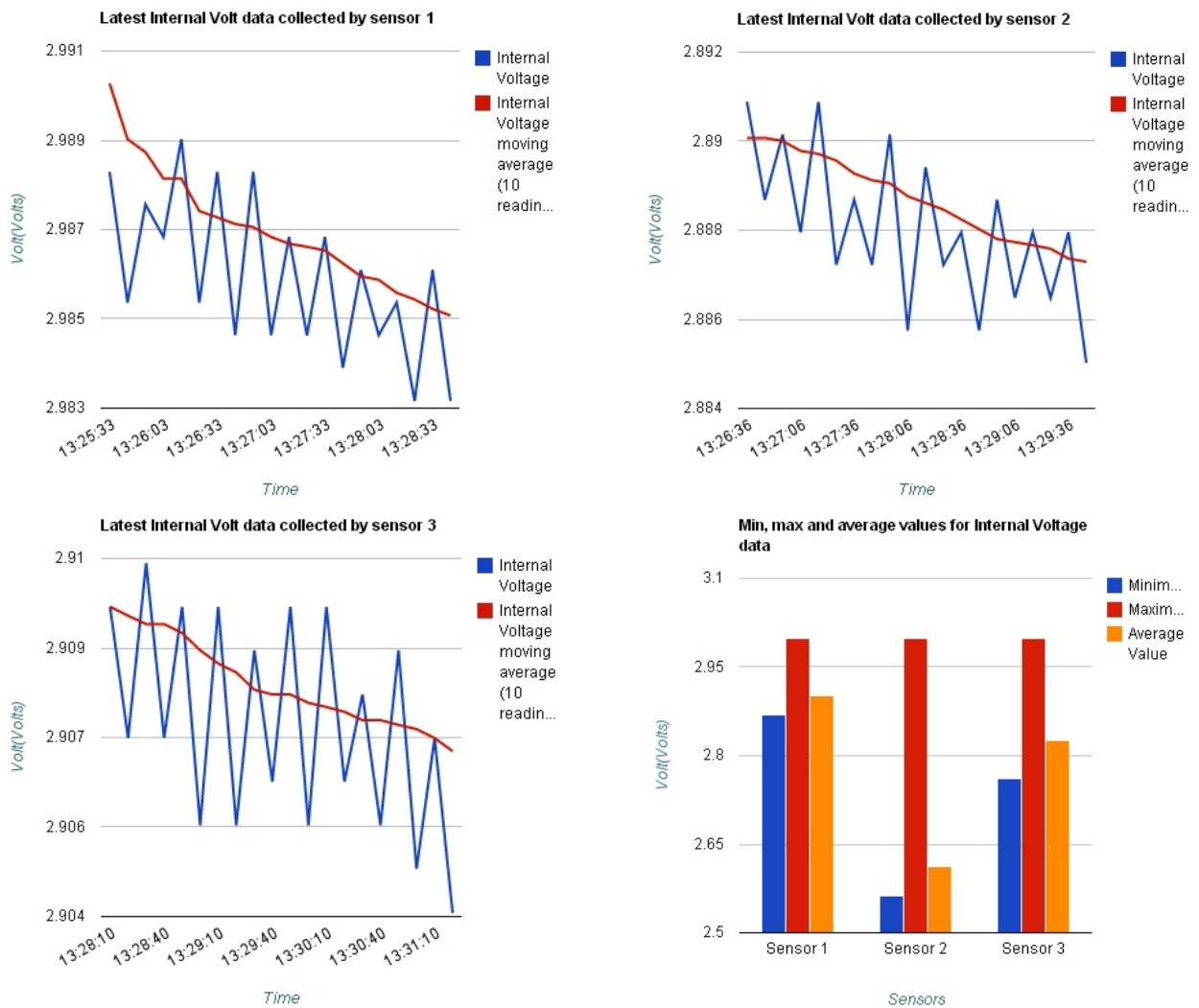




Σχήμα 40: Διαγράμματα Μετρήσεων Ολικής Ηλιακής Ακτινοβολίας (TSR)

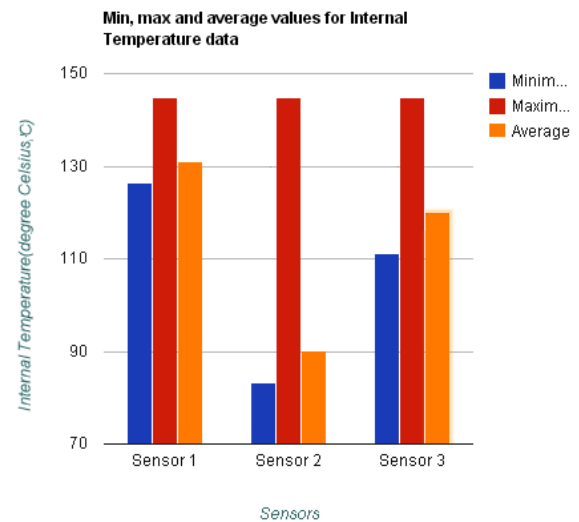
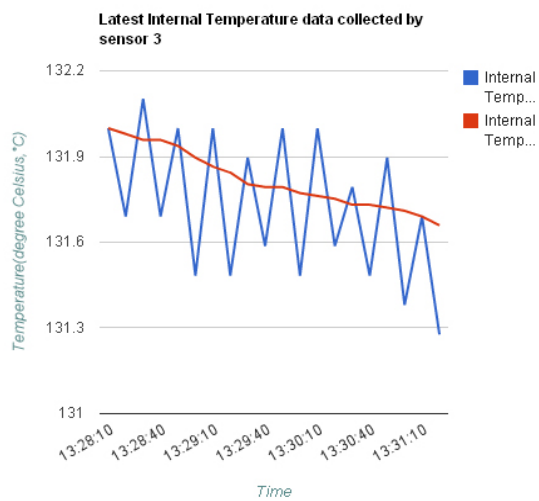


Σχήμα 41: Διαγράμματα Μετρήσεων Ενεργής Φωτοσυνθετικής Ακτινοβολίας (PAR)

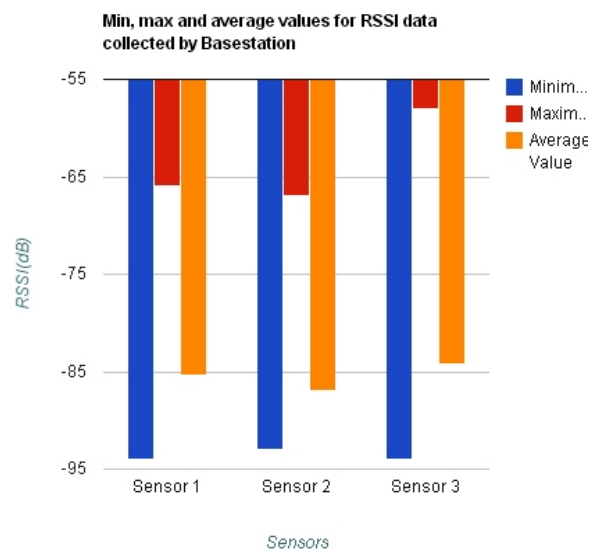
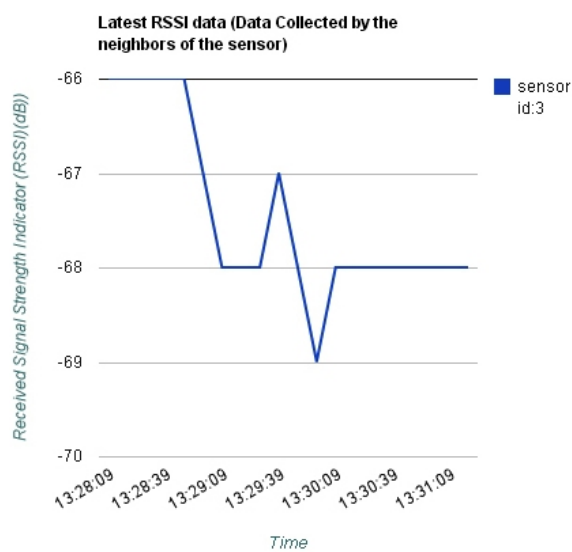
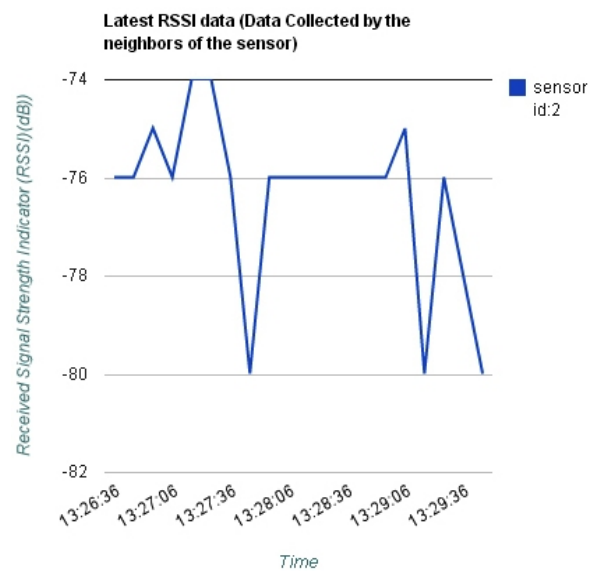
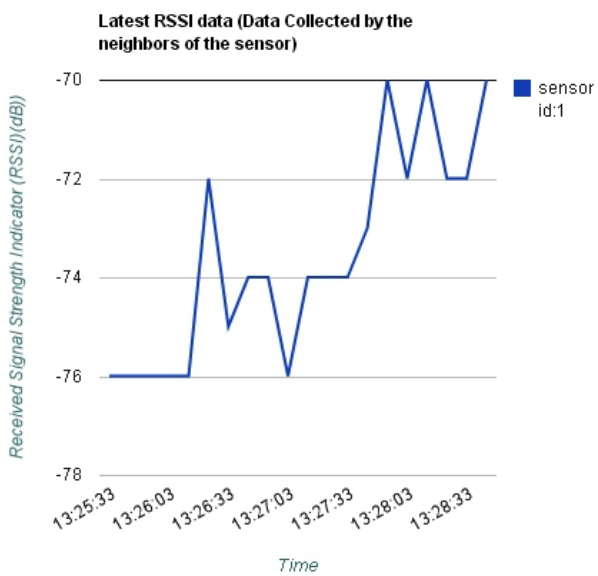


Σχήμα 42: Διαγράμματα Μετρήσεων Εσωτερικής Τάσης

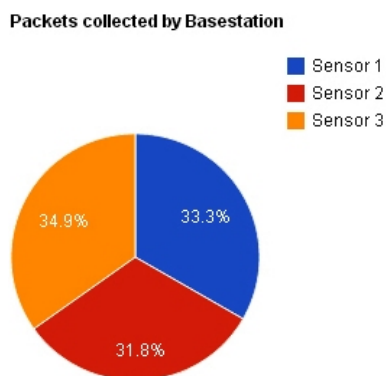




Σχήμα 43: Διαγράμματα Μετρήσεων Εσωτερικής Θερμοκρασίας



Σχήμα 44: Διαγράμματα Δεικτών Ισχύος Ληφθέντος Σήματος (RSSI)



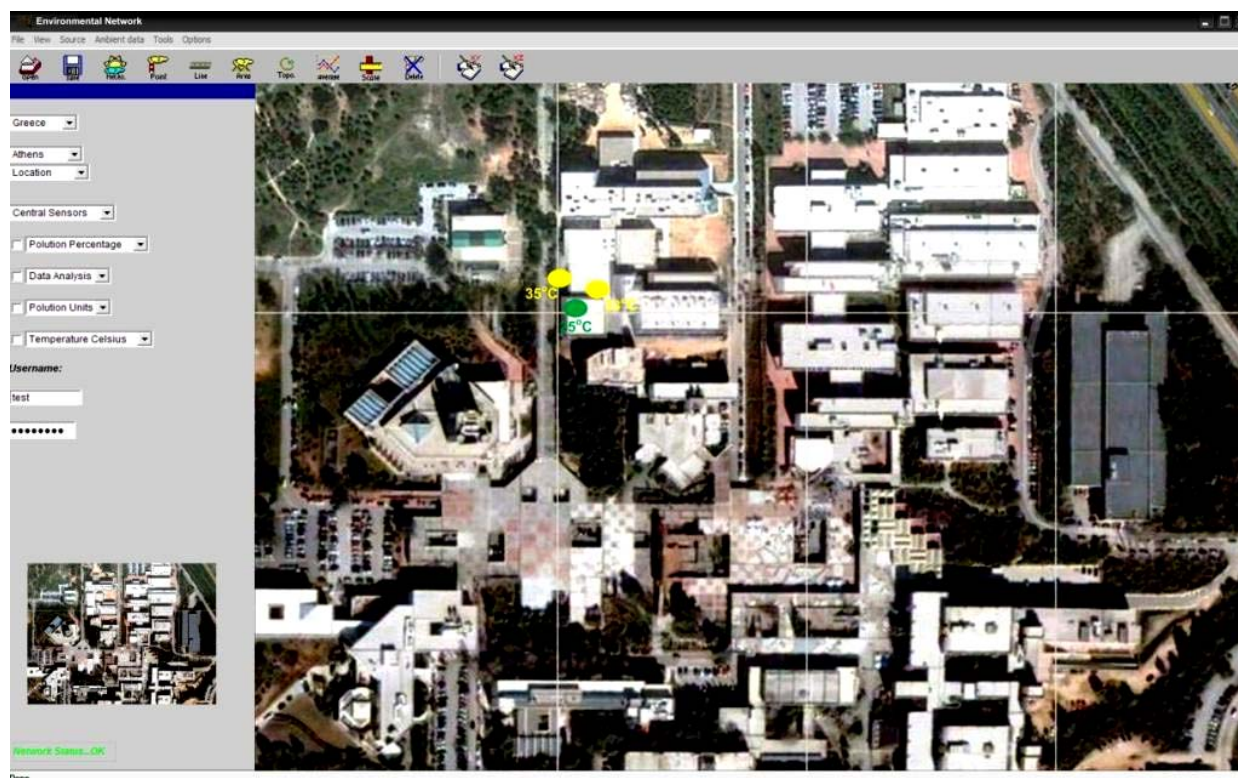
Σχήμα 45: Μετρήσεις Προέλευσης Πακέτων Βάσης-Αισθητήρα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η συχνότητα δειγματοληψίας των μετρήσεων έχει καθοριστεί στο 1 sec. Η χρονική περίοδος δειγματοληψίας καθορίστηκε στη συγκεκριμένη τιμή διότι μικρότερες τιμές έχουν ως αποτέλεσμα λανθασμένα αποτελέσματα ένεκα της απώλειας πακέτων που συμβαίνει διότι δεν ολοκληρώνεται η μετάδοση των προηγούμενων δεδομένων κάθε φορά. Σύμφωνα με τις μετρήσεις που απεικονίζονται στα παραπάνω σχήματα και τις πραγματοποιούμενες πειραματικές δοκιμές, η επιλεγμένη χρονική τιμή έδειξε βέλτιστα αποτελέσματα σε σχέση με άλλες συχνότητες δειγματοληψίας κρατώντας τη μετάδοση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.

Στο Σχήμα 46 απεικονίζεται η γραφική εφαρμογή χρήστη με τις περιβαλλοντικές μετρήσεις μέσα στο σύστημα ελέγχου-παρακολούθησης των επιλεγμένων γεωγραφικών περιοχών και σε περιπτώσεις εκτάκτου κινδύνου αποστέλλει μηνύματα ειδοποίησης σε πραγματικό χρόνο. Κατά τη διάρκεια της γραφικής απεικόνισης των μετρήσεων, το παρουσιαζόμενο GIS σύστημα έχει συνεχή ροή δεδομένων για τις επιλεγμένες γεωγραφικές περιοχές. Επίσης, κατά την εκκίνησή του ελέγχεται η διαθεσιμότητα του ενοποιημένου δικτύου από άκρη σε άκρη και αντιστοιχίζονται οι μετρήσεις από τους αισθητήρες με τις υπό παρακολούθηση γεωγραφικές περιοχές σε πραγματικό χρόνο ενώ αυτές αποθηκεύονται για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία στη βάση δεδομένων της υποδομής πλέγματος. Όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα, οι υπό παρακολούθηση περιοχές σημειώνονται με πράσινο εφόσον δεν έχουν χαρακτηριστεί για οποιοδήποτε λόγο από το σύστημα ως επικίνδυνες. Σε περίπτωση όμως που κάποια μέτρηση των αισθητήρων πλησιάσει ή ξεπεράσει το προκαθορισμένο, από το σύστημα ή από το χρήστη, κατώφλι επικίνδυνης τιμής τότε εμφανίζεται κίτρινη ή κόκκινη αντίστοιχα ένδειξη στο GUI που σχετίζεται με την παρακολουθούμενη περιοχή ενώ υπάρχει ταυτόχρονη αποστολή μηνύματος ειδοποίησης προς το χρήστη.

Οι επικίνδυνες περιοχές και οι τρέχουσες περιοχές κινδύνου καθορίζονται από το μοντέλο πρόληψης και προστασίας του περιβάλλοντος μέσου του παρουσιαζόμενου ενοποιημένου συστήματος παρακολούθησης και προστασίας περιβάλλοντος βάσει κανόνων περιβαλλοντικής μόλυνσης που θεσπίζονται για την κάθε μία ξεχωριστά, όπως αυτοί παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 4.4.2. Ως μελλοντικά επικίνδυνες περιοχές, χαρακτηρίζονται αυτοματοποιημένα από το σύστημα οι γεωγραφικές περιοχές που έχουν τιμές πολύ κοντά στο προκαθορισμένο κατώφλι του συστήματος. Αφού αναλυθούν από τον χρήστη του συστήματος οι παράμετροι που σχετίζονται με τις αρχικά υψηλές περιβαλλοντικές τιμές και λαμβάνοντας υπόψη του

σημαντικούς παράγοντες όπως είναι η χωροταξική περιοχή και η πιθανότητα ανάπτυξης ακραίων περιβαλλοντικών καταστάσεων δύναται να μεταβάλλει τους προκαθορισμένους κανόνες του περιβαλλοντικού συστήματος παρακολούθησης. Παρόλα αυτά, οι γενικές περιβαλλοντικές γνώσεις περί του παρακολουθούμενου γεωγραφικού τομέα είναι αυτές που ασκούν καθοριστικό ρόλο για τον χαρακτηρισμό μίας περιοχής ως μελλοντικά επικίνδυνη.



Σχήμα 46: Αναπαράσταση Μετρήσεων Διαδικτύου Αισθητήρων με Πλέγμα σε GUI

Σημειώνοντας δε τη σπουδαιότητα των συνεχόμενων ενημερώσεων του κατωφλιού επικίνδυνων τιμών από τον διαχειριστή του συστήματος, εφόσον υπάρχουν συνεχώς μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές αλλαγές στις υπό παρακολούθηση περιοχές. Επιπλέον, ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να προβαίνει σε εξατομίκευση του κατωφλιού επικίνδυνων τιμών ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν στις υπό παρακολούθηση περιοχές.

Πέραν από την εφαρμογή GUI που αναπτύχθηκε, ο κάθε κόμβος-αισθητήρας δύναται εκτός από το να αποστέλλει συνεχώς δεδομένα μετρήσεων στον αντίστοιχο σταθμό βάσης, να τα επεξεργάζεται πρώτα και να μεταδίδει ασύρματα μόνο συγκεκριμένες τιμές που προκύπτουν από αυτήν την επεξεργασία ή να αποστέλλει μηνύματα ειδοποίησης για καταστάσεις κινδύνου όποτε αυτά απαιτούνται.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση στοχεύει στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου αισθητήρων αφού το πιο ενεργοβόρο τμήμα του περιβαλλοντικού συστήματος είναι το τμήμα μετάδοσης δεδομένων. Επίσης μειώνονται ταυτόχρονα οι πιθανότητες για μία ενδεχόμενη συμφόρηση του δικτύου ένεκα αυξημένης κίνησης δεδομένων συμβάλλοντας στην αύξηση της παρεχόμενης ποιότητάς του. Η προσέγγιση που στόχο

έχει τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας από πλευράς αισθητήρων επειδή έχει άμεσο αντίκτυπο στη μετάδοση δεδομένων πραγματικού χρόνου δύναται να εφαρμοστεί μόνο σε γεωγραφικές περιοχές που πρέπει να θέτονται υπό συνεχή παρακολούθηση δίχως όμως να εμπίπτουν άμεσα στις περιοχές έντονου γεωγραφικού ενδιαφέροντος.

Σε περίπτωση δυσλειτουργίας κάποιου αισθητήρα συνήθως παράγονται πολύ υψηλές τιμές που δεν αντιστοιχούν στις συνηθισμένες τιμές της υπό παρακολούθησης γεωγραφικής περιοχής. Τότε το προτεινόμενο περιβαλλοντικό σύστημα μέσω του μοντέλου πρόληψης και προστασίας του περιβάλλοντος συγκρίνει τις συγκεκριμένες τιμές με μετρήσεις που λαμβάνει από αισθητήρες που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή λήψης υψηλών τιμών και σε περίπτωση που υπάρχει επιβεβαίωση τότε αποστέλλονται στο χρήστη μηνύματα ειδοποίησης εκτάκτου περιβαλλοντικής ανάγκης. Τέλος, η ασφάλεια της ανάκτησης, αποστολής, αποθήκευσης, επεξεργασίας, ανάλυσης καθώς και των εγκατεστημένων αισθητήρων μέσα στο ενοποιημένο περιβάλλον πλέγματος βασίζεται επάνω στην υποδομή ασφαλείας του πλέγματος GSI (*Grid Security Infrastructure*).

4.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μία τεχνική ενοποίησης ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων με την υποδομή πλέγματος επιλύοντας οποιοσδήποτε περιορισμούς προκύπτουν από την ετερογένεια των δύο δικτυακών περιβαλλόντων εξασφαλίζοντας τη διαδικτύωση και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των δύο ετερογενών δικτυακών τεχνολογιών. Το περιβαλλοντικό σύστημα που αναπτύχθηκε έχει ως κύριο σκοπό τη συλλογή, επεξεργασία και απεικόνιση μετρήσεων από το φυσικό περιβάλλον με ταυτόχρονη μετάδοσή τους κατά μήκος της ενοποιημένης υποδομής σε πραγματικό χρόνο.

Όσον αφορά τον τομέα του ασυρμάτου δικτύου αισθητήρων η συγκεκριμένη υλοποίηση βασίστηκε στην επικοινωνία πολλαπλών βημάτων-κόμβων (*multi-hop*), αυτό έγινε για να υποστηριχθεί η επεκτασιμότητα και η μετάδοση των μετρήσεων παρέχοντας έτσι πλήρη κάλυψη μέσα σε μία ευρεία γεωγραφική περιοχή. Ο προγραμματισμός των αισθητήρων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του TinyOS 2.1 ενώ για την υλοποίηση της λειτουργίας πολλαπλών βημάτων χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο TYMO που στόχο έχει την υποστήριξη της εφαρμογής, προκειμένου να γίνεται διαφανής αποστολή και λήψη δεδομένων μέσα στο ενοποιημένο πολύπλοκο δίκτυο αισθητήρων με πλέγμα.

Στην πλευρά του δικτύου πλέγματος για να επιτευχθεί η βέλτιστη διαχείριση των δεδομένων που προέρχονται από τους αισθητήρες, παρουσιάστηκαν δύο μοντέλα που σχετίζονται με την πρόληψη και προστασία του περιβάλλοντος αποσκοπώντας στην αύξηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών (*GIS*) ελέγχου και παρακολούθησης. Το πρώτο μοντέλο προτείνει την ιεράρχηση των ανακτημένων δεδομένων και το δεύτερο παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση αυτών σε δομές καθώς ταυτόχρονα μοντελοποιούνται οι παράμετροι αλληλεξάρτησης και συσχέτισής τους.

Τέλος, σε επίπεδο βάσης δεδομένων της υποδομής πλέγματος εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος κινητού μέσου όρου παρέχοντας ενδείξεις για τις τελευταίες 10 μετρήσεις που λαμβάνονται από τους αισθητήρες υποστηρίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ταχεία λήψη αποφάσεων. Παρόλα αυτά, πέραν της γραφικής απεικόνισης των μετρήσεων που αναπτύχθηκε, οι αισθητήρες και οι μετρήσεις τους αποτυπώνονται σε γεωγραφικούς χάρτες στο GUI του χρήστη δίδοντας σε αυτόν επιπλέον λειτουργίες επεξεργασίας επιβεβαιώνοντας ταυτόχρονα την ευρωστία (*robustness*), προσαρμοστικότητα (*adaptability*) και κλιμακωσιμότητα (*scalability*) του ενοποιημένου δικτύου με πλέγμα που στόχο έχει την προστασία του περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο.

4.7 Αναφορές

- [1] Open Geospatial Consortium (OGC), Retrieved from: <http://www.opengeospatial.org>
- [2] M. Botts, G. Percivall, C. Reed, J. Davidson, “*OGC[®] Sensor Web Enablement: Overview and High Level Architecture*”, In Proc. of the 2nd International Conference on GeoSensor Networks, Springer, pp. 175–190, 2008.
- [3] M. Botts, “*OpenGIS[®] Sensor Model Language (SensorML) Implementation Specification*”, Technical Paper OGC 05-086, 2005, Retrieved from: <https://portal.opengeospatial.org>
- [4] National Science Foundation (NSF), Retrieved from: <http://www.nsf.gov>
- [5] K. Martinez, J. K. Hart, R. Ong, “*Environmental Sensor Networks*”, IEEE Computer., vol. 37(8), pp. 50–56, 2004.
- [6] A. R. Ilka, C. Gilberto, A. Renato, M. V. M. Antonio, “*Data Aware Clustering for Geosensor Networks Data Collection*”, In Proc. Anais XIII Simposio Brasileiro De Sensoriamento Remoto, pp. 6059–6066, INPE, 2007, Retrieved from: <http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.23.33>
- [7] S. S. Iyengar, A. Tandom, Q. Wu, E. Cho, N. S. V. Rao, V. K. Vaishnavi, “*Deployment of Sensors: An Overview*”, In S. S. Iyengar (Ed.), “*Distributed Sensor Networks*”, CRC Press, pp. 483–504, 2004.
- [8] S. Nittel, A. Stefanidis, “*GeoSensor Networks and Virtual GeoReality*”, In A. Stefanidis (Ed.), “*GeoSensors Networks*”, CRC Press, pp. 1–9, 2004.
- [9] I. D. Doukas, G. Retscher, “*Whereto with Earthquake Risk Management: The Resultant of Sensor-Web and Web-GIS Could Show the Way*”, In Proc. of the IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, 2011.
- [10] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson, “*Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring*”, In Proc. of the 1st ACM International Workshop Wireless Sensor Networks Applications, pp. 88–97, 2002.
- [11] D. Culler, D. Estrin, M. Srivastava, “*Overview of Sensor Networks*”, IEEE Computer, vol. 37(8), pp. 41–49, 2004.
- [12] J. K. Hart, J. Rose, “*Approaches to the Study of Glacier Bed Deformation*”, Quaternary International, vol. 86(1), pp. 45–58, 2001.
- [13] E. Biagioni K. Bridges, “*The Application of Remote Sensor Technology to Assist the Recovery of Rare and Endangered Species*”, International Journal of High Performance Computing Applications, vol. 16(3), pp. 315–324, 2002.

- [14] I. Wokoma, L. L. Shum, L. Sacks, I. Marshall, “*A Biologically-Inspired Clustering Algorithm Dependent on Spatial Data in Sensor Networks*”, In Proc. of the 2nd IEEE European Workshop on Wireless Sensor Networks, pp. 386–390, 2005.
- [15] E. Basha, D. Rus, “*Design of Early Warning Flood Detection Systems for Developing Countries*”, In Proc. of the IEEE International Conference on Information and Communication Technologies and Development, pp. 1–10, 2007.
- [16] R. Pugliese, M. Prica, G. Kourousias, A. Del Linz, A. Curri, “*Integrating Instruments in the Grid for On-Line and Off-Line Processing in a Synchrotron Radiation Facility*”, Computational Methods in Science and Technology, vol. 14(2), 2008.
- [17] Enabling Grids for E-science (EGEE), Retrieved from: <http://www.eu-egee.org>
- [18] N. Yamamoto, R. Nakamura, H. Yamamoto, S. Tsuchida, I. Kojima, Y. Tanaka, S. Sekiguchi, “*GEO Grid: Grid Infrastructure for Integration of Huge Satellite Imagery and Geoscience Data Sets*”, In Proc. of the 6th IEEE International Conference on Computer Information Technology, pp. 75, 2006.
- [19] G. Coulson, D. Kuo, J. Brooke, “*Sensor Networks + Grid Computing = A New Challenge for the Grid?*”, IEEE Distributed Systems Online, vol. 7(12), pp. 2, 2006.
- [20] R. Denzer, S. Schlobinski, R. Guttler, P. Guttler, P. Dihe, M. Scholl, S. Puhl, “*A Service Access Control Framework for a Sensor Service Architecture*”, In Proc. of the 44th IEEE International Conference on System Sciences, pp. 1–10, 2011.
- [21] Global Monitoring for Environment and Security (GMES), Retrieved from: <http://www.gmes.info>
- [22] N. P. Preve, E. N. Protonotarios, “*An Integrated Sensor Web Grid Cyberimplementation for Environmental Protection*”, IEEE Sensors Journal, vol. 11(9), pp. 1787–1794, 2011.
- [23] H. Bidgoli, “*The Handbook of Computer Networks*”, John Wiley & Sons, 2007.
- [24] G. Lu, D. De, M. Xu, W. Z. Song, B. Shirazi, “*A Wake-On Sensor Network*”, In Proc. of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 341–342, 2009.
- [25] J. D. Myers, R. E. McGrath, “*Cyberenvironments: Adaptive Middleware for Scientific Cyberinfrastructure*”, In Proc. of the 6th ACM International Middleware Conference on Adaptive Reflective Middleware, pp. 1–3, 2007.
- [26] SEE-GRID-SCI (SEE-GRID eInfrastructure for regional eScience), Official Project Portal, Retrieved from: <http://www.see-grid-sci.eu>
- [27] V. Hingne, A. Joshi, E. Houstis, J. Michopoulos, “*On the Grid and Sensor Networks*”, In Proc. of the 4th IEEE International Workshop on Grid Computing, pp. 166–173, 2003.

-
- [28] M. Gaynor, S. L. Moulton, M. Welsh, E. La Combe, A. Rowan, J. Wynne, “*Integrating Wireless Sensor Networks with the Grid*”, IEEE Internet Computing, vol. 8(4), pp. 82–87, 2004.
- [29] J. Humble, C. Greenhalgh, A. Hamsphire, H. L. Muller, S. R. Egglestone, “*A Generic Architecture for Sensor Data Integration with the Grid*”, In Lecture Notes in Computer Science, S. Perez and V. Robles (Eds.), Springer, vol. 3458, pp. 99–107, 2005.
- [30] C. K. Tham, R. Buyya, “*SensorGrid: Integrating Sensor Networks and Grid Computing*”, CSI Communications, vol. 29(1), pp. 24–29, 2005.
- [31] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “*A Survey on Sensor Networks*”, IEEE Communications Magazine, vol. 40(8), pp. 102–114, 2002.
- [32] MySQL, Retrieved from: <http://www.mysql.com>
- [33] C. Portele, “*OpenGIS Geography Markup Language (GML) Encoding Standard*”, Open Geospatial Consortium Inc., Open GIS® Standard, OGC 07-036, 2007.
- [34] V. Welch, F. Siebenlist, I. Foster, J. Bresnahan, K. Czajkowski, J. Gawor, C. Kesselman, S. Meder, L. Pearlman, S. Tuecke, “*Security for Grid Services*”, In Proc. of the 12th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, pp. 48–57, 2003.
- [35] TinyOS, Retrieved from: <http://www.tinyos.net>
- [36] TYMO, “*An Implementation of the DYMO Protocol on TinyOS*”, Retrieved from: <http://tymo.sourceforge.net>
- [37] PHP, Hypertext Preprocessor, Retrieved from: <http://www.php.net>
- [38] Google Chart Tools, Retrieved from: <http://code.google.com/apis/chart>
- [39] Java, Retrieved from: <http://www.java.com>
- [40] G. Pottie, L. Clareb, “*Wireless Integrated Network Sensors: Toward Low-Cost and Robust Self-Organizing Security Networks*”, In Proc. of the SPIE, Sensors, C31, Vol. 3577, pp. 86–95, 1999.
- [41] T. Pilsak, J. L. ter Haseborg, “*Simulation of Wireless Sensor Networks on Vessels under Consideration of ElectroMagnetic Compatibility (EMC)*”, In Proc. of the IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 602–605, 2010.
- [42] G. Hackmann, “*TinyOS Tutorial*”, Washington University, U.S.A., 2008, Retrieved from: http://tinycoding.googlecode.com/files/TinyOS_Tutorial_2.pdf
- [43] Ubuntu Linux OS, Retrieved from: <http://releases.ubuntu.com/8.04>
- [44] D. Gay, P. Levis, R von Behren, M. Welsh, E. Brewer, D. Culler, “*The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems*”, ACM Special Interest Group on Programming Languages (SIGPLAN), vol. 38(5), pp. 1–11, 2003.

-
- [45] Debian MSP430, Retrieved from: <http://bugs.debian.org>
- [46] Debian AVR, Retrieved from: <http://packages.debian.org>
- [47] Java SE Development Kit 7 (Java SDK), Retrieved from: <http://www.oracle.com/technetwork/java>
- [48] H. C. Chen, S. W. Chen, “*A Moving Average based Filtering System with its Application to Real-Time QRS Detection*”, In Proc. of the IEEE on Computers in Cardiology, pp. 585–588, 2003.
- [49] Matlab, Mathworks® Signal Processing Toolbox, Retrieved from: <http://www.mathworks.com/products/signal>
- [50] Google Code, Retrieved from: <http://code.google.com/apis/chart>
- [51] S. Park, A. Savvides, M. Srivastava, “*Battery Capacity Measurement and Analysis using Lithium Coin Cell Battery*”, In Proc. of the ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design, pp. 382–387, 2001.

5. Συγκλίνον Δίκτυο Πλέγματος Υγείας SEGEDMA και Διαχείριση Δεδομένων Σχεσιακών Βάσεων σε Περιβάλλον Διάχυτου Υπολογισμού

Η πρόσφατη πρόοδος στην τεχνολογία των ασύρματων επικοινωνιών και των ψηφιακών ηλεκτρονικών μέσων υποστήριξε την έρευνα και ανάπτυξη χαμηλού κόστους και κατανάλωσης ενέργειας πολυλειτουργικών κόμβων οδηγώντας μας έτσι στη δημιουργία των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (*Wireless Sensor Networks, WSNs*) [1]. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό αισθητήρων-κόμβων που κατανέμονται σε μία γεωγραφική περιοχή με σκοπό την συλλογή πληροφοριών και δεδομένων. Κάθε αισθητήρας μέσα στο ασύρματο δίκτυο συλλέγει δεδομένα από το χώρο και τα δρομολογεί στον κόμβο συγκέντρωσης (*sink node*). Το κυριότερο χαρακτηριστικό τους είναι το μικρό τους μέγεθος και η επικοινωνία μεταξύ τους σε κοντινές αποστάσεις, βασιζόμενοι σε μία *ad-hoc* συμπεριφορά. Τέτοιου είδους κόμβοι χαρακτηρίζονται γενικά από περιορισμένες ενεργειακές, υπολογιστικές και αποθηκευτικές δυνατότητες καθώς επίσης και περιορισμένο εύρος ζώνης. Ένα σύνολο τέτοιων κόμβων-αισθητήρων που επικοινωνούν μεταξύ τους ασύρματα, συνιστούν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Ένας από τους κύριους στόχους των WSNs είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του ψηφιακού και του πραγματικού κόσμου [2] [3]. Οι πιο εξελιγμένες εφαρμογές αυτών των δικτύων απαντώνται κυρίως σε εξειδικευμένες περιπτώσεις, όπως είναι η παρακολούθηση (*monitoring*) και προστασία του περιβάλλοντος, η παρακολούθηση της κυκλοφορίας, τα στρατιωτικά συστήματα, η εφοδιαστική αλυσίδα (*logistics*) και τα συστήματα υγείας.

Ο προγραμματισμός των ασύρματων δικτύων αισθητήρων υλοποιείται συνήθως με τη χρήση ενός μεσισμικού (*middleware*), το οποίο συνεργάζεται μόνο με συγκεκριμένες και καθορισμένες δομές υλικού (*hardware*) για WSN. Αυτού του είδους το λογισμικό, εν αντιθέσει με τη συνήθη ερμηνεία του όρου, δεν αποσκοπεί στο να παρέχει μία γενική και υψηλού επιπέδου προγραμματιστική πλατφόρμα για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αλλά ένα βασικό σύνολο εργαλείων και βιβλιοθηκών για του χαμηλού επιπέδου χειρισμό των κόμβων αισθητήρων. Ο προγραμματισμός και η ρύθμιση του δικτύου αισθητήρων είναι εργασία δύσκολη και ευάλωτη σε λάθη αφού ο σχεδιαστής της εφαρμογής πρέπει στις περισσότερες περιπτώσεις να προγραμματίσει ξεχωριστούς κόμβους αισθητήρων, χρησιμοποιώντας χαμηλού επιπέδου προγραμματιστικές γλώσσες. Παρόλα αυτά, προκειμένου να ενσωματωθούν οι υπάρχουσες WSN εφαρμογές σε άλλα υπολογιστικά συστήματα η ανάγκη για προσθήκη και βελτίωση νέων μηχανισμών κρίνεται επιτακτική.

Η παράλληλη ανάπτυξη τεχνολογιών που σχετίζονται με τα δίκτυα πλέγματος άλλαξε ριζικά την επιστήμη των υπολογιστών μέσω της δημιουργίας εικονικών περιβαλλόντων που συναθροίζουν και διαμοιράζονται ετερογενείς υπολογιστικούς πόρους διαμέσου δικτυακών συνδέσεων υψηλών ταχυτήτων (*high-speed networks*). Οι περισσότερες υλοποιήσεις δικτύων πλέγματος σχετίζονται με τα υπολογιστικά δίκτυα πλέγματος και τα δίκτυα δεδομένων. Η ανάπτυξη και η διείσδυση των δικτύων πλέγματος τόσο σε ερευνητικό αλλά και σε επιχειρηματικό επίπεδο ολοένα αυξάνεται. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία

προσπάθεια για εφαρμογή και χρήση των δικτύων πλέγματος σε ευρύτερες επιστημονικές και εξειδικευμένες υποδομές. Μερικά από τα πεδία που έχουν γνωρίσει τα δίκτυα πλέγματος ευρεία αποδοχή είναι η βιοπληροφορική, ο σχεδιασμός φαρμάκων, οι οικονομικές και χρηματιστηριακές εφαρμογές, και ο βιομηχανικός σχεδιασμός προϊόντων.

Στις μέρες μας, ένα από τα πιο υποσχόμενα υπολογιστικά παραδείγματα είναι ο διάχυτος υπολογισμός (*ubiquitous computing*) ο οποίος ενσωματώνει τον υπολογισμό στο φυσικό κόσμο επιτρέποντας τη διασύνδεσή του με υπολογιστικά συστήματα και υπηρεσίες στα οποία οι χρήστες μπορούν να έχουν πρόσβαση δίχως την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα. Ο Mark Weiser [26] ήταν ο οραματιστής του διάχυτου υπολογισμού καθορίζοντας την έννοια αυτού, όπου είναι και η επικρατέστερη μέχρι σήμερα, ως την εκτεταμένη χρήση υπολογιστών οπουδήποτε αυτοί δύναται να είναι διαθέσιμοι μέσα σε οποιοδήποτε περιβάλλον φυσικό ή μη. Οι δύο σημαντικές περιοχές στις οποίες βασίζεται ο διάχυτος υπολογισμός είναι τα κατανεμημένα συστήματα (*distributed systems*) και ο κινητός υπολογισμός (*mobile computing*).

Δεδομένου ότι ένα περιβάλλον διάχυτου υπολογισμού είναι κορεσμένο με υπολογιστικές και επικοινωνιακές δυνατότητες κρίνεται απαραίτητο να υποστηρίζεται η κινητικότητα, διαφορετικά ο χρήστης θα συνειδητοποιεί έντονα την ύπαρξη της τεχνολογίας λόγω της απουσίας της όταν αυτός θα κινείται. Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός περιβάλλοντος διάχυτου υπολογισμού είναι: (i) Αποτελεσματική χρήση, (ii) Αορατότητα, (iii) Κλιμακωσιμότητα, (iv) Διείσδυση σε ποικίλες συνθήκες περιβάλλοντος. Από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του διάχυτου υπολογισμού είναι ότι δύναται να προσαρμόζεται στις ανάγκες των χρηστών που το χρησιμοποιούν λαμβάνοντας αυτόνομα αποφάσεις, ελαχιστοποιώντας έτσι την παρέμβασή τους. Για αυτόν το λόγο οι χρήστες του δεν θα πρέπει να εκπαιδεύονται στη χρήση εξειδικευμένων συσκευών αλλά θα πρέπει οι τεχνολογίες που τους περιβάλλουν να προσαρμόζονται σύμφωνα με τις ανάγκες τους και να τους υποστηρίζουν [26].

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής θα παρουσιασθεί μία δικτυακή αρχιτεκτονική που στόχο έχει την ενοποίηση του υπολογιστικού πλέγματος με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και τη σύγκλιση τους με συστήματα υγειονομικής περίθαλψης (*health care systems*) μέσα σε περιβάλλον διάχυτου υπολογισμού. Το αποτέλεσμα της σύγκλισης θα είναι μία ευρεία υποδομή αισθητήρων με πλέγμα (*Sensor Grid*) που δύναται να παρέχει μέσα από μία ολοκληρωμένη πλατφόρμα ιατρικές υπηρεσίες επεκτείνοντας έτσι τη χρηστικότητα των του προτεινόμενου πολύπλοκου δικτύου. Επίσης, δίδεται έμφαση στο διάχυτο υπολογισμό υποστηρίζοντας την απρόσκοπτη ροή πληροφοριών μέσα στο νέο συγκλίνον δίκτυο. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική της συγκλίνουσας υποδομής στοχεύει στην επίλυση οποιοδήποτε περιορισμών που υφίστανται μέχρι στιγμής τα προαναφερθέντα είδη δικτύων με κύριο στόχο την επέκταση των υπολογιστικών πλεγμάτων. Οι περιορισμοί αυτοί σχετίζονται με την επεκτασιμότητα, κλιμακωσιμότητα, προσβασιμότητα, διαθεσιμότητα και την κινητικότητα των χρηστών μέσα στο υπολογιστικό πλέγμα. Ταυτοχρόνως επιτυγχάνουμε, μέσα από τη συγκλίνουσα υποδομή, να ξεπεραστούν επεξεργαστικοί και αποθηκευτικοί περιορισμοί που σχετίζονταν με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Το συγκλίνον δίκτυο που αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή, σύμφωνα με τους παραπάνω στόχους, καλείται SEGEDMA [4] (*Sensor Grid Enhancement Data Management*) και έχει εφαρμογή στην ιατρική

πληροφορική (*medical informatics*) επεκτείνοντας και προσδίδοντας επιπλέον υπηρεσίες στον κύριο κορμό του συγκλίνοντος δικτύου που είναι το υπολογιστικό πλέγμα [9]. Η υλοποίηση της συγκλίνουσας υποδομής που αναπτύσσεται έχει στο επίκεντρό της την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος όπου με την υποστήριξη των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων, παρουσιάζεται ένα ευρύ Δίκτυο Αισθητήρων και Πλέγματος (*Sensor Grid*) όπου εφαρμόζεται σε διασυνδεδεμένα συστήματα περίθαλψης υγείας (*healthcare computing*) που σκοπό έχουν την παρακολούθηση (*monitoring*) ασθενών σε πραγματικό χρόνο [4] [9]. Επίσης, υιοθετούμε το μοντέλο του διάχυτου υπολογισμού εξασφαλίζοντας την ποιότητα των υπηρεσιών (QoS) και την απρόσκοπτη ροή πληροφοριών μέσα στο συγκλίνον δίκτυο [9]. Γεγονός που παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα συλλογής, επεξεργασίας, ανάλυσης και αποθήκευσης των δεδομένων που είτε έχουν συλλεχθεί από το δίκτυο αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο είτε αυτά βρίσκονται αποθηκευμένα στην υποδομή πλέγματος.

Επίσης, στο επίκεντρο του συγκεκριμένου κεφαλαίου βρίσκεται η επίλυση των προβλημάτων που προκύπτουν από τη σύγκλιση των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων με τις υποδομές πλέγματος που δημιουργούν ένα ευρύ Δίκτυο Αισθητήρων και Πλέγματος (*Sensor Grid*) το οποίο συγκλίνεται με διασυνδεδεμένα συστήματα περίθαλψης υγείας. Παρουσιάζοντας έτσι τις δυνατότητες που παρέχονται από την επέκταση ενός υπολογιστικού πλέγματος επιλύοντας οποιουσδήποτε περιορισμούς με τελικό στόχο να αναδείξουμε τη χρησιμότητά του στην ιατρική πληροφορική και στα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης.

Πέραν των προαναφερθέντων στόχων, το παρόν κεφάλαιο εισάγει μία τεχνική επίλυσης που βασίζεται στη χρήση διακομιστών μεσολάβησης (*proxy systems*), εξασφαλίζοντας έτσι τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των διαφορετικών δικτυακών συστημάτων αποκρύπτοντας οποιεσδήποτε τεχνολογικές διαφορές υπάρχουν μέσα στο συγκλίνον δίκτυο. Τέλος, στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική του συγκλίνοντος δικτύου που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο ενσωματώθηκαν ανοικτά πρότυπα διεπαφής και κωδικοποίησης κατά OGC (*Open Geospatial Consortium*) [5], ενώ η ενοποίηση του συγκλίνοντος δικτύου με τα πληροφοριακά συστήματα υγείας πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο HL7 (*Health Level Seven International*) [6].

5.1 Εισαγωγή

Η πρόσφατη ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (*WSNs*) έδωσε το έναυσμα της αξιοποίησής τους σε εφαρμογές πέραν της επιστήμης των υπολογιστών, με συνέπεια να χρησιμοποιούνται σε ιατρικές εφαρμογές παρακολούθησης ασθενών που πάσχουν από κρίσιμες ασθένειες. Ένα ασύρματο δίκτυο που αποτελείται από βιοιατρικούς αισθητήρες δύναται να εμφυτευθεί στο σώμα των ασθενών παρακολουθώντας την κατάσταση της υγείας τους. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι μία ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία που επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά από το φυσικό περιβάλλον [1]. Ένα κύριο μειονέκτημα που έχουν είναι ότι χαρακτηρίζονται από περιορισμούς που σχετίζονται το εύρος ζώνης, τις επεξεργαστικές και αποθηκευτικές τους ικανότητες. Ωστόσο, η παράταξη και συνάθροιση πολλών αισθητήρων μέσα σε μία ευρεία περιοχή εξασφαλίζει σημαντική συλλογή δεδομένων. Για αυτόν το λόγο,

θεωρούνται ως κατανεμημένοι πόροι που δύναται να διαμοιραστούν από διαφορετικούς χρήστες και ποικίλες εφαρμογές.

Η διείσδυση, εφαρμογή και αξιοποίηση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων στην ιατρική πληροφορική (*medical informatics*) και στα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης (*healthcare computing*) είναι περιορισμένη παρόλη την αυξανόμενη ζήτηση που υπάρχει. Η χρησιμότητα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι ιδιαίτερα εμφανή σε έκτατα περιστατικά υγείας, όπου οι αισθητήρες χρησιμεύουν στην απρόσκοπτη συλλογή πληροφοριών της κατάστασης των ασθενών πληροφορώντας σε πραγματικό χρόνο το τμήμα πρώτων βοηθειών (*Emergency Medical Technicians*), το ιατρικό και νοσηλευτικό προσωπικό. Επιπλέον, ένεκα του μικρού μεγέθους τους και της ενεργειακής αποδοτικότητάς τους δύναται να τοποθετηθούν δίχως πρόβλημα στο χώρο διαμονής του ασθενή.

Η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος πρωτοεμφανίστηκε στα μέσα της δεκαετίας του 1990 με σκοπό να προσδιορίσει μία προτεινόμενη κατανεμημένη δικτυακή αρχιτεκτονική υπολογιστών που απευθυνόταν σε επιστημονικές εφαρμογές [7]. Τελευταία παρατηρείται ένα παγκόσμια αυξανόμενο ενδιαφέρον γύρω από την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος και τις εφαρμογές σε ευρύτερα επιστημονικά πεδία όπως αυτά της αστρονομίας, αεροναυπηγικής, βιοπληροφορικής, χημείας, φυσικής, προστασίας περιβάλλοντος, των οικονομικών και των ιατρικών συστημάτων. Με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται συνεχείς προσπάθειες στον τομέα έρευνας και ανάπτυξης (*Research and Development, R&D*) των δικτύων πλέγματος τόσο σε επιχειρηματικό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο.

Η πρόταση ενοποίησης της τεχνολογίας των δικτύων πλέγματος με τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης (*healthcare computing*) πρωτοεμφανίστηκε το 2005 δημιουργώντας μία νέα ερευνητική περιοχή που καλείται Δίκτυο Πλέγματος Υγείας (*HealthGrid*) [8]. Σκοπός αυτού ήταν η επισήμανση σε θεωρητικό επίπεδο της επιτακτικής ανάγκης για εισαγωγή των δικτύων πλέγματος στην ιατρική πληροφορική, υποδεικνύοντας ταυτόχρονα την χρησιμότητα τους σε περιπτώσεις διάγνωσης, θεραπείας, έκτακτων ιατρικών περιστατικών και ιατρικών εφαρμογών.

Η χρήση των δικτύων πλέγματος υποστηρίζει τη δημιουργία μίας συγκλίνουσας υποδομής η οποία παρέχει επαρκείς πόρους στο ιατρικό και νοσηλευτικό προσωπικό που έχει εξουσιοδοτημένη πρόσβαση ανάλογα με τις πολιτικές (*policies*) του εκάστοτε συστήματος υγειονομικής περίθαλψης. Οι πόροι της συγκλίνουσας ιατρικής υποδομής απαρτίζονται από υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους καθώς επίσης δύναται να υποστηρίξουν τη λειτουργία σύνθετων ιατρικών μηχανημάτων και τη μεταφορά ιατρικής γνώσης. Με αυτόν τον τρόπο η πρόσβαση σε οποιοδήποτε ιατρικό πόρο είναι διασυνδεδεμένος με την συγκλίνουσα υποδομή αποκτάται αυτόματα με την πρόσβαση του χρήστη. Από την πλευρά ασφαλείας του συστήματος υγειονομικής περίθαλψης, οι πολιτικές του βασίζονται κυρίως σε διαδικασίες πιστοποίησης ταυτότητας (*authentication*), εξουσιοδότησης (*authorization*) και ελέγχου (*auditing*) και δύναται να προσαρμοστούν ανάλογα το εκάστοτε συμφωνητικό επιπέδου λειτουργίας υπηρεσιών (*Service Level Agreement, SLA*).

Ενοποιώντας τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων με μία υποδομή πλέγματος εξάγουμε μία συγκλίνουσα υποδομή δικτύου αισθητήρων και πλέγματος (*Sensor Grid*) που δύναται να εφαρμοστεί στα συστήματα

περίθαλψης υγείας και στην ιατρική πληροφορική. Η διασύνδεση του WSN δικτύου με το υπολογιστικό πλέγμα πραγματοποιείται με τη χρήση ενσύρματων μέσων. Όπως και οι υποδομές πλέγματος έτσι και τα δίκτυα Sensor Grids δύναται να διαχωριστούν σε παρόμοιες κατηγορίες όπως και τα συμβατικά δίκτυα πλέγματος, ανάλογα δηλαδή με τα χαρακτηριστικά της κάθε υποδομής.

Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική που αναπτύσσεται στη συνέχεια έχουμε αξιοποιήσει και τις τρεις κατηγορίες των Sensor Grids. Αρχικά έχουμε τα Sensor Grids που συλλέγουν και αποθηκεύουν δεδομένα που προέρχονται από την πλευρά των αισθητήρων. Στην επόμενη κατηγορία ανήκουν τα διαμοιραζόμενα Sensor Grids που συναθροίζουν και διαμοιράζουν τους πόρους μέσα στο δίκτυο μεταξύ χρηστών που έχουν πρόσβαση σε ένα υποδίκτυο αισθητήρων για καθορισμένο χρόνο με σκοπό να χρησιμοποιήσουν μία συγκεκριμένη εφαρμογή συλλέγοντας ταυτόχρονα δεδομένα από τους αισθητήρες. Εν συνεχεία, τα υπολογιστικά Sensor Grids που παρέχουν κυρίως στο δίκτυο αισθητήρων την απαραίτητη υπολογιστική ισχύς που δύναται να απαιτούν ορισμένες εφαρμογές. Τέλος, η πρωτότυπη πλατφόρμα που προτείνεται ενσωματώνει διαφορετικά δίκτυα αισθητήρων και πλέγματος (*Sensor Grid*) μέσα σε ένα περιβάλλον διάχυτου υπολογισμού παρέχοντας στο χρήστη πρόσβαση σε όλους τους καταναμημένους πόρους του δικτύου δίδοντας του έτσι την δυνατότητα επεξεργασίας και διαχείρισης δεδομένων οπουδήποτε και αν βρίσκεται μέσα στο δίκτυο.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το παρόν κεφάλαιο απευθύνεται στην επίλυση προβλημάτων που προκύπτουν από την ενοποίηση των δικτύων πλέγματος με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, καθώς και από τη σύγκλιση του ενοποιημένου δικτύου με συστήματα παρακολούθησης και υγειονομικής περίθαλψης. Ως αποτέλεσμα αυτού, είναι η παρουσίαση μίας πρωτότυπης πλατφόρμας που υποστηρίζει τη διασύνδεση ετερογενών δικτύων και εξασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα μέσα σε ένα καταναμημένο περιβάλλον ιατρικών πληροφοριακών συστημάτων, δίδοντας ταυτόχρονα έμφαση στο διάχυτο περιβάλλον υπολογισμού που αυτά διαθέτουν.

Η πρωτότυπη πλατφόρμα καλείται SEGEDMA (*SEnsor Grid Enhancement Data Management*) και εισάγει την τεχνική των διακομιστών μεσολάβησης (*proxy servers*) με στόχο να επιλύσει τα προβλήματα διαλειτουργικότητας που προκαλούνται από την ετερογένεια των δικτύων υποστηρίζοντας την απρόσκοπτη επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων μέσα στο υβριδικό περιβάλλον του δικτύου αισθητήρων και πλέγματος (*Sensor Grid*) [4] [9].

Επιπλέον, αναλύεται η επιτακτική ανάγκη της χρήση των δικτύων πλέγματος στην πληροφορική της υγείας, υποστηρίζοντας έτσι την δημιουργία μίας παγκόσμιας συγκλίνουσας ιατρικής υποδομής που ως δίκτυο κορμού (*backbone*) θα έχει την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος. Επίσης παρουσιάζεται μία σχεδιαστική προσέγγιση που σχετίζεται με τη βέλτιστη διαχείριση των αποθηκευμένων δεδομένων του Sensor Grid μέσα στο ενοποιημένο ιατρικό σύστημα υγειονομικής περίθαλψης που παρακολουθεί (*monitoring*) την κατάσταση ασθενών. Τέλος, αναπτύσσεται μία πειραματική διάταξη ώστε μέσω των αποτελεσμάτων να επιβεβαιωθεί η λειτουργικότητα του μοντέλου διαχείρισης δεδομένων και η διαλειτουργικότητα του συγκλίνοντος δικτύου περίθαλψης υγείας.

5.2 Σχετικές Εργασίες

Το ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον ολόκληρης της επιστημονικής κοινότητας, ώθησε τους ερευνητές να εστιάσουν και σε άλλες επιστημονικές περιοχές όπου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος. Έτσι δημιουργήθηκε η ιδέα της εφαρμογής των δικτύων πλέγματος στον τομέα της υγείας, υποστηρίζοντας τα υπάρχοντα συστήματα περίθαλψης υγείας. Τα σημαντικότερα δίκτυα πλέγματος υγείας (*HealthGrid*) που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα είναι το MammoGrid [10], GEMSS (*Grid Enabled Medical Simulation Services*) [11], eDiaMoND [12], CLEF (*Clinical E-Science Framework*) [13], και το CareGrid [14].

Το MammoGrid ανέπτυξε μία Πανευρωπαϊκή υποδομή πλέγματος υγείας, όπου διαμοιράζονταν διαμέσου των κατανεμημένων βάσεων δεδομένων οι αποθηκευμένες εικόνες μαστογραφιών. Η υποδομή βασίστηκε επάνω στα πρότυπα ανάπτυξης του EDG (*European Data Grid*) [15] και του EGEE [16]. Το GEMSS ανέπτυξε μία υποδομή υπολογιστικού πλέγματος με στόχο την προσομοίωση ιατρικών υπηρεσιών. Στα πλαίσια του συγκεκριμένου έργου αναπτύχθηκε ένα μεσισμικό πλέγματος (*grid middleware*) για να υποστηρίξει ιατρικές υπηρεσίες όπως η γναθοχειρουργική, η νευροχειρουργική, η ραδιο-χειρουργική αλλά και προσομοιώσεις του καρδιοαναπνευστικού συστήματος και της πλαστικής χειρουργικής. Τα συγκεκριμένα εργαλεία προσομοίωσης υποβοήθησαν το εξειδικευμένο ιατρικό προσωπικό σε περιστατικά διάγνωσης, προ-εγχειρητικού ελέγχου και σχεδόν ιατρικής υποστήριξης σε πραγματικό χρόνο.

Το eDiaMoND στόχευε στην ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου απεικόνισης μαστογραφιών, επιδημιολογικών μελετών και ψηφιακής ανίχνευσης σε περιπτώσεις καρκίνου του μαστού. Χρησιμοποιώντας τις κατανεμημένες βάσεις δεδομένων του δικτύου πλέγματος που αναπτύχθηκε για αυτόν το σκοπό, το εξουσιοδοτημένο ιατρικό προσωπικό είχε πρόσβαση σε όλες τις ψηφιακές μαστογραφίες ασθενών. Η κατανεμημένες βάσεις δεδομένων με τη χρήση αλγορίθμων, με μηχανισμούς εξόρυξης δεδομένων και τεχνικές προτυποποίησης εικόνων υποβοήθησαν την έγκυρη διάγνωση περιπτώσεων καρκίνου. Το CLEF χρησιμοποιώντας μία κλιμακούμενη (*scalable*) αρχιτεκτονική βασισμένη στην τεχνολογία πλέγματος υποστήριζε την ενοποίηση, ταύτιση και ερμηνεία μεγάλου όγκου δεδομένων γονιδιακής έκφρασης με τα κλινικά δεδομένα που ήταν αποθηκευμένα σε διάφορα συστήματα περίθαλψης υγείας.

Κατά τη διάρκεια εξέλιξης των δικτύων πλέγματος το Globus Toolkit [17] [18] έγινε ένα βασικό εργαλείο που συντέλεσε στην ανάπτυξη υπηρεσιών πλέγματος και στην ύπαρξη μεσισμικού (*middleware*) για τα δίκτυα πλέγματος. Συγκεκριμένα προσφέρει εργαλεία και βιβλιοθήκες που υποστηρίζουν την επικοινωνία, διαχείριση πόρων και δεδομένων προωθώντας ταυτόχρονα και την ασφάλεια της πλεγματικής υποδομής. Το Παγκόσμιο Grid Forum (*Global Grid Forum*).

Η κοινότητα της τεχνολογίας πλέγματος έστρεψε την προσοχή της προς μία υπηρεσιοστρεφή προσέγγιση ανάπτυξης εφαρμογών που σηματοδοτήθηκε με την έλευση της αρχιτεκτονικής OGSA (*Open Grid Services Architecture*) [19] [52], καθώς και την υλοποίηση αυτής μέσω του OGSF (*Open Grid Services Infrastructure*) [20] που επέκτεινε την τεχνολογία των υπηρεσιών Διαδικτύου ώστε να παρέχει υποστήριξη σε λειτουργίες

που απαιτούνται από τις εφαρμογές πλέγματος. Ένα από τα κυριότερα αποτελέσματα αυτού ήταν η αρχιτεκτονική των υπηρεσιών πλέγματος (*grid services*) που υποστηρίζουν το δυναμικό διαμοιρασμό και την ανακάλυψη των πόρων μέσα στο πλεγματο περιβάλλον. Γεγονός που υποστηρίζεται και από την προτεινόμενη αρχιτεκτονική που παραθέτεται στο συγκεκριμένο κεφάλαιο. Μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές προσπάθειες από μέρους της ερευνητικής κοινότητας για την ανάπτυξη ενός δικτύου πλέγματος υγειονομικής περίθαλψης (*health care grid*). Παρόμοιες προσπάθειες πραγματοποιήθηκαν και στον τομέα ανάπτυξης λογισμικού που σχετίζονταν με τις πλατφόρμες πλέγματος

Η χρήση λογισμικών εργαλείων κρίνεται απαραίτητη για τη διαχείριση των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων υποστηρίζοντας έτσι την επαρκή και αποτελεσματική χρησιμοποίησή τους. Το MoteLab [21] είναι μία πειραματική υλοποίηση ασύρματου δικτύου αισθητήρων που βασίζεται σε μία προσέγγιση Διαδικτύου (*web-based*) και έχει αναπτυχθεί από το πανεπιστήμιο του Harvard των Η.Π.Α. Η διεπαφή Διαδικτύου χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να διευκολύνει τους χρήστες στον προγραμματισμό των αισθητήρων (*notes*), στην υποβολή εργασιών (*jobs*) στους αισθητήρες (*notes*), στη δέσμευση χρονοθυρίδων (*time slots*) των αισθητήρων (*notes*) για την υποβολή εργασιών, στη συλλογή δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα τους παρέχει διαχειριστικές λειτουργίες (*administrative functions*). Το EmStar [22] και το Kansei [23] είναι επίσης γνωστά λογισμικά που επιτρέπουν τη διαχείριση (*management*) δικτύων αισθητήρων. Ωστόσο, οι συγκεκριμένες πειραματικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται αποκλειστικά στα καθιερωμένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων δίχως να ενοποιούνται με άλλων ειδών δίκτυα, όπως είναι τα δίκτυα πλέγματος.

Πρόσφατα η ερευνητική κοινότητα παρουσιάζει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον στην ενοποίηση των WSNs δικτύων με την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος. Χαρακτηριστική προσέγγιση ήταν αυτή του Discovery Net [24] όπου μέσω μίας πλεγματοκής πλατφόρμας σκοπό είχε να αναπτύξει, αναλύσει και να διαχειριστεί γνωσιακές βάσεις δεδομένων που δημιουργούνταν από καταναμημένους αισθητήρες υψηλής απόδοσης (*high throughput sensors*). Οι εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του συγκεκριμένου έργου αφορούσαν σε γενικό επίπεδο τις επιστήμες υγείας, την προστασία περιβάλλοντος και τη μοντελοποίηση σεισμογενών περιοχών. Ωστόσο, οι εφαρμογές που αναπτύχθηκαν απλά χρησιμοποιούσαν αρχιτεκτονικές υποδομές Sensor Grid δίχως να έχουν κατασκευαστεί για να υποστηρίξουν συγκεκριμένες εφαρμογές. Η αξιολόγηση των αρχιτεκτονικών που προτάθηκαν στα πλαίσια των παραπάνω έργων, παρόλο που είχαν ικανοποιητική απόδοση για τις συγκεκριμένες εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν υστερούσαν στην ευελιξία (*flexibility*) και στην κλιμακωσιμότητα (*scalability*). Προσπάθειες επίσης υπήρξαν για τον επανασχεδιασμό της αρχιτεκτονικής του μεσισμικού των δικτύων αισθητήρων ώστε να υποστηριχθεί η ενοποίησή τους με το υπολογιστικό πλέγμα.

Το CIMA (*Common Instrument Middleware Architecture*) [25] ερευνητικό έργο στόχευε στην προσαρμογή της δομής των αισθητήρων και στην εξέλιξη των χρησιμοποιούμενων πλεγματοκών λειτουργιών ώστε να διευκολυνθεί η ενοποίηση των δύο τεχνολογιών καθώς και η διαχείριση των δεδομένων που προέρχονταν σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες. Το μεσισμικό που προτάθηκε από το CIMA βασίστηκε επάνω στα πλεγματοκά πρότυπα του OGSA. Αυτό αποτέλεσε το κυριότερο πρόβλημα της

συγκεκριμένης προσέγγισης, διότι η πολυπλοκότητα του μεσισμικού δεν υποστήριζε επαρκώς το δίκτυο αισθητήρων που είχε περιορισμένη υπολογιστική και επεξεργαστική ισχύ [27] [28].

5.3 Σχεδιασμός Δικτύου Αισθητήρων με Πλέγμα Υγείας

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής θα περιγραφεί ο σχεδιασμός της πλατφόρμας του συγκλίνοντος συστήματος υγειονομικής περίθαλψης. Επίσης, θα καθοριστούν οι παράμετροι του δικτύου πλέγματος υγείας (*Health Grid*) και θα αναλυθούν σενάρια χρήσης του υποστηρίζοντας το εξειδικευμένο ιατρικό προσωπικό στη διαδικασία διάγνωσης ασθενών και στη λήψη αποφάσεων. Η εισαγωγή της τεχνολογίας των δικτύων πλέγματος στα συστήματα περίθαλψης υγείας, πέραν της επίλυσης των επιστημονικών ζητημάτων, αποσκοπεί στην αδιάλειπτη παρακολούθηση (*monitoring*) της υγείας των ασθενών και στη μείωση του κόστους λειτουργίας των συστημάτων ιατρικής πληροφορικής συνδυάζοντας την ταυτόχρονη αύξηση των ενσωματωμένων υπηρεσιών σε αυτά [29].

Η υποδομή του δικτύου πλέγματος αποτελεί το δίκτυο κορμού (*backbone*) ενώ η ενοποίησή του με τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης στοχεύει στην παροχή εξατομικευμένων ιατρικών υπηρεσιών και εξειδικευμένων ιατρικών περιοχών, όπως είναι η ιατρική πληροφορική, η βιοιατρική, η βιοπληροφορική, η επιδημιολογία, οι κοινωνικές υπηρεσίες υγείας και τα περιστατικά έκτακτης περίθαλψης. Η χρήση των δικτύων πλέγματος υποστηρίζει τα εξατομικευμένα συστήματα περίθαλψης μέσω της επεξεργασίας, αποθήκευσης και ανάλυσης δεδομένων των ασθενών. Επίσης με τη χρήση των δικτύων πλέγματος επιτυγχάνεται η ενσωμάτωση σχεδιαστικών εφαρμογών στα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης υποστηρίζοντας έτσι τη λήψη αποφάσεων του εξειδικευμένου προσωπικού σε κλινικό αλλά και εκπαιδευτικό επίπεδο.

Εξειδικευμένες εφαρμογές όπως η ανάλυση γονιδιώματος και η λήψη βιοσημάτων (*biosignals*) δύναται να γίνουν και να αναλυθούν σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση της πλεγματικής υποδομής. Επιπλέον, όλα τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης και όλες οι ιατρικές εξετάσεις είναι διασυνδεδεμένα μέσω των γεωγραφικά κατανεμημένων πόρων, γεγονός που προωθεί την παρακολούθηση (*monitoring*), πρόληψη και τη θεραπεία ενός ασθενούς οπουδήποτε και αν βρίσκεται στον κόσμο. Τα δίκτυα πλέγματος υγείας (*HealthGrid*) που αναπτύχθηκαν μέσα στα πλαίσια των παραπάνω ερευνητικών έργων έδειξαν ότι οι ιατρικές εφαρμογές έχουν αρκετά υψηλές επεξεργαστικές και αποθηκευτικές απαιτήσεις. Συγκεκριμένα ερευνητικά έργα όπως το MammoGrid, eDiaMoND και το NDMA [30] εστίασαν την προσοχή τους στην ανάλυση και διαχείριση των κατανεμημένων βάσεων δεδομένων. Εν αντιθέσει, με το BIRN (*Biomedical Informatics Research Network*) [31], MEGrid (*Medical Engineering Grid*) [32], NeuroGrid [33] και το EIT (*Electrical Impedance Tomography*) [34] στόχευαν στη βελτίωση των επεξεργαστικών πόρων ώστε οποιοσδήποτε ιατρικές αναλύσεις και οπτικοποίηση δεδομένων να εκτελούνται σε λιγοστό χρόνο.

5.3.1 Σχεδιαστικά Ζητήματα

Η αναγκαιότητα εισαγωγής των δικτύων πλέγματος στα συστήματα περίθαλψης υγείας είναι ιδιαίτερα εμφανής σε περιπτώσεις απομακρυσμένης (*remote*) ιατρικής διαβούλευσης, όπως η εξ αποστάσεως σύσκεψη ιατρικών συμβουλίων και η απομακρυσμένη υποστήριξη σε χειρουργικές επεμβάσεις. Η απομακρυσμένη διαβούλευση παρέχει πρόσβαση μέσω απευθείας σύνδεσης (*on-line*) σε ιατρικές πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες σε διασυνδεδεμένα εθνικά ή διεθνή συστήματα ιατρικών πληροφοριών, επιταχύνοντας τη διαδικασία διάγνωσης του ασθενή. Επίσης μέσω του συγκλίνοντος δικτύου υγείας επιτυγχάνεται η διαβούλευση σε απομακρυσμένες χειρουργικές επεμβάσεις σε πραγματικό χρόνο (*real time*) εξασφαλίζοντας μίας υψηλής ποιότητας τηλεσυνδιάσκεψη με τον απομακρυσμένο εξειδικευμένο χειρουργό.

Οι χειρουργοί, οι ειδικοί σύμβουλοι, οι ιατρικές και εργαστηριακές μονάδες, καθώς και ο ιατρικός εξοπλισμός είναι όλα διασυνδεδεμένα με το ενοποιημένο δίκτυο υγείας και με τις κατανεμημένες βάσεις δεδομένων του συγκλίνοντος δικτύου. Η υψηλή απόδοση των υπολογιστικών πόρων και η διασύνδεση του εξοπλισμού υποστηρίζει σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια του χειρουργείου, την ανάλυση και σύγκριση των ιατρικών αποτελεσμάτων που προέρχονται από τα κλινικά δεδομένα με τα δεδομένα ιατρικών ερευνών μειώνοντας στο ελάχιστο απαιτούμενο χρόνο ολόκληρη την παραγωγική διαδικασία.

Όλα αυτά τα χρόνια τα κλινικά και ερευνητικά δεδομένα αποθηκεύονται σε τοπικές γεωγραφικές τοποθεσίες και είναι διαφορετικού τύπου αρχεία (*format*), γεγονός που καθιστά αρκετά δύσκολη τη σύγκριση μεταξύ τους καθώς και την αναπαραγωγή οπτικοακουστικού υλικού. Ωστόσο, λιγостоί ερευνητές έχουν προτείνει διαδικασίες ενοποίησης αυτών στους τομείς περιγραφής μεταδεδομένων (*metadata description*) και των αποθετηρίων (*repositories*) μέσα σε ένα πλέγμα υγείας [35]. Έτσι κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη αλγορίθμων και μηχανισμών αναζήτησης, ανάκτησης και εξόρυξης δεδομένων μέσα στην κατανεμημένη βάση δεδομένων του πλέγματος υγείας.

Οι πολιτικές ασφαλείας του προτεινόμενου δικτύου αισθητήρων με πλέγμα υγείας βασίζονται πάνω στο AAA (*Authentication, Authorization, Accounting*) πλαίσιο, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διαδικασία πιστοποίησης ταυτότητας (*Authentication*) των χρηστών επιτρέποντάς μας να γνωρίζουμε ποιος χρήστης αποκτάει πρόσβαση σε πλεγματικούς πόρους και αν του επιτρέπεται να έχει πρόσβαση σε αυτούς. Η διαδικασία εξουσιοδότησης (*Authorization*) καθορίζει τις υπηρεσίες, τους πόρους και τα είδη των δεδομένων που δύναται να έχει πρόσβαση ο πιστοποιημένος χρήστης. Τέλος, μέσα από τη διαδικασία του ελέγχου (*Auditing*) καταγράφονται οι εντολές του χρήστη που εκτελέστηκαν καθώς επίσης λαμβάνουμε μετρήσεις σχετικά με τη χρήση των πλεγματικών πόρων που κατανάλωσε κατά τη διάρκεια της πρόσβασής του. Συνήθως, το πλαίσιο AAA εκπληρώνεται από έναν “αφιερωμένο” AAA εξυπηρετητή (*dedicated AAA server*), στην περίπτωση μας τα πιστοποιητικά πρόσβασης των χρηστών είναι αποθηκευμένα στις κατανεμημένες βάσεις του δικτύου πλέγματος υγείας.

Η προτεινόμενη συγκλίνουσα πλατφόρμα παροχής ιατρικών υπηρεσιών εξασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα των ετερογενών δικτύων αλλά και των ιατρικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη ότι οι κατανεμημένες βάσεις του δικτύου πλέγματος υγείας είναι διασυνδεδεμένες με τα ετερογενή τοπικά

συστήματα υγειονομικής περίθαλψης όπου το κάθε ένα από αυτά διαθέτει διαφορετικού τύπου αρχεία (*format*). Για να επίτευξη μίας διασυνδεδεμένης και διαλειτουργικής υποδομής πλέγματος υγείας (*HealthGrid*) αναπτύσσεται στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου μία διαδικασία τυποποίησης της μορφής (*format*) και της δομής των ιατρικών δεδομένων. Επίσης, έμφαση έχει δοθεί στην ποιότητα υπηρεσίας (*QoS*) που είναι ζωτικής σημασίας καθώς όλες οι ιατρικές εφαρμογές πρέπει να απαιτούν λιγιστό χρόνο απόκρισης διασφαλίζοντας έτσι την υψηλή ποιότητα εικόνων, ήχου και κινούμενης εικόνας σε περιπτώσεις διαβούλευσης απομακρυσμένων χειρουργείων. Τέλος, η λειτουργία του συγκλίνοντος δικτύου πλέγματος υγείας πρέπει να είναι αδιάλειπτη καθώς αυτό πρέπει να είναι διαθέσιμο και προσπελάσιμο από τους χρήστες συνεχώς. Δεδομένου αυτού, ο σχεδιασμός του εστιάστηκε στην εξασφάλιση της ευρωστίας (*robustness*) του δικτύου και στην ανοχή σφαλμάτων.

5.3.2 Πλεγματική Διεπαφή για Αισθητήρες

Μία προσέγγιση για την ενοποίηση των αισθητήρων στο δίκτυο πλέγματος είναι να υιοθετηθούν πλεγματικά πρότυπα και Διεπαφές Προγραμματισμού Εφαρμογών (*Application Programming Interfaces, APIs*). Η αρχιτεκτονική OGSA (*Open Grid Services Architecture*) [19] βασίζεται επάνω στα πρότυπο υπηρεσιών Διαδικτύου (*web services*) και σε τεχνολογίες όπως είναι η XML (*eXtensible Markup Language*), το SOAP (*Simple Object Access Protocol*), και η WSDL (*Web Services Description Language*).

Εάν όμως τα δεδομένα των αισθητήρων είναι διαθέσιμα σύμφωνα με το OGSA [19] πρότυπο τότε θα υποστηριχθεί σε μεγάλο βαθμό η διαλειτουργικότητα της ανταλλαγής και επεξεργασίας των δεδομένων μέσα στο δίκτυο πλέγματος. Όπως είναι ήδη γνωστό οι αισθητήρες έχουν περιορισμένες υπολογιστικές και αποθηκευτικές ικανότητες γεγονός που καθιστά αδύνατη την κωδικοποίηση των δεδομένων σε XML μορφή (*format*) και την μετάδοσή τους με τη χρήση Διαδικτυακών πρωτοκόλλων [45]. Ωστόσο, οι υπηρεσίες πλέγματος (*grid services*) είναι αρκετά πολύπλοκες ώστε να αναπτυχθεί κάποια υλοποίηση για περιορισμένης κλίμακας ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

5.3.3 Διασύνδεση Δικτύου και Πρωτοκόλλα

Οι δικτυακές συνδέσεις των δικτύων πλέγματος είναι αρκετά αξιόπιστες και παρέχουν υψηλό εύρος ζώνης. Η πλειονότητα των υλοποιήσεων που σχετίζονται με τα δίκτυα πλέγματος βασίζονται επάνω στην υποδομή του Διαδικτύου. Εν αντιθέσει, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων διασυνδέονται με ασύρματες ζεύξεις χαμηλού εύρους ζώνης, υψηλής καθυστέρησης (*high-latency*) που είναι αναξιόπιστες (*unreliable*). Η δυναμική διασύνδεση των αισθητήρων επιτρέπει τις διακοπές μετάδοσης ένεκα του θορύβου της ζεύξης ή/και της υποβάθμισης του σήματος που προκαλούνται από περιβαλλοντολογικούς παράγοντες.

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο η πλεγματοειδής τεχνολογία βασίζονται στα καθιερωμένα πρωτόκολλα Διαδικτύου, όπως είναι το TCP/IP, HTTP και το FTP. Ενώ τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων βασίζονται κυρίως σε MAC (*Medium Access Control*) πρωτόκολλα και πρωτόκολλα δρομολόγησης (*routing protocols*) [2] [46]. Δίδοντας τη δυνατότητα χρήσης πολλαπλών δικτυακών διεπαφών στους κόμβους των αισθητήρων είναι μία διαδικασία αναξιόπιστη διότι ένεκα της πολυπλοκότητάς τους θα υπάρχουν διακυμάνσεις στη διασύνδεση και διαλειτουργικότητα του ενοποιημένου δικτύου.

Ως συνέπεια αυτού κρίνεται επιτακτική η ανάγκη ανάπτυξης μίας απλής διεπαφής ή μίας τεχνικής αλληλεπίδρασης των πρωτοκόλλων του δικτύου αισθητήρων με τα πρωτόκολλα της τεχνολογίας των δικτύων πλέγματος.

5.3.4 Κλιμακωσιμότητα

Το ενοποιημένο δίκτυο πρέπει να επιλύει εκτός από τους προαναφερθείς περιορισμούς και το ζήτημα της κλιμακωσιμότητας (*scalability*) αποσκοπώντας στην συνεχή και αυξανόμενη ενσωμάτωση αισθητήρων στην υποδομή του πλέγματος δίχως να παρουσιάζεται η ανάγκη οποιασδήποτε αλλαγής, είτε σε επίπεδο υλικού είτε λογισμικού.

Η ενοποιημένη υποδομή θα πρέπει να εξασφαλίζει τη διασύνδεση πολλαπλών ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων που δύναται να ανήκουν σε διαφορετικούς εικονικούς οργανισμούς (VOs) και να δύναται να ενοποιηθούν άμεσα με τους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους της πλεγματοειδούς υποδομής. Γεγονός που συνεπάγεται ότι οι χρήστες της ενοποιημένης υποδομής ή/και οι εφαρμογές της θα μπορούν να έχουν πρόσβαση σε όλα τα προστιθέμενα ετερογενή ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

5.3.5 Διαθεσιμότητα Αισθητήρων

Η διαχείριση ενέργειας μέσα στα δίκτυα αισθητήρων είναι μείζονος σημασίας διότι η ενέργεια που διαθέτουν είναι περιορισμένη. Συνεπώς πολύπλοκες δομές και εφαρμογές καταναλώνουν ενέργεια από τους αισθητήρες μειώνοντας έτσι τη διαθεσιμότητά τους μέσα στο δίκτυο. Η ενοποίηση δύο δικτυακών τεχνολογιών έχει ως στόχο την αύξηση της διαθεσιμότητας (*availability*) των αισθητήρων μέσα στο ενοποιημένο περιβάλλον διάχυτου υπολογισμού. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, όλες σχεδόν οι εργασίες και οι υπηρεσίες υψηλής υπολογιστικής απαίτησης εκτελούνται στην υποδομή πλέγματος καθώς αυτή αποτελεί το δίκτυο κορμού της προτεινόμενης συγκλίνουσας υποδομής.

5.3.6 Ασφάλεια Υποδομής

Για να ξεπεραστούν οποιαδήποτε προβλήματα ασφαλείας που προκύπτουν, όσον αφορά την υποδομή πλέγματος, έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι τα τελευταία έτη με επικρατέστερες το GSI (*Grid Security Infrastructure*) [17] και την ασφάλεια υπηρεσιών Διαδικτύου WS-Security (*Web Services Security*) [47].

Εν αντιθέσει με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων που παρουσιάζουν μία ευπάθεια στον τομέα της ασφαλείας, τα μέτρα αντιμετώπισης που δύναται να ληφθούν σχετίζονται με τεχνικές επίλυσης του εν λόγω ζητήματος. Αυτές περιλαμβάνουν ασφάλιση της MAC διεύθυνσης και των πρωτοκόλλων δρομολόγησης, πιστοποίηση των χρησιμοποιούμενων κόμβων, κρυπτογράφηση δεδομένων και επικοινωνίας μέσα στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

5.3.7 Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS)

Η ποιότητα υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*) δύναται να καθορίσει εάν ένα δίκτυο αισθητήρων παρέχει με αποτελεσματικό τρόπο τους κατά απαίτηση (*on-demand*) πόρους του μέσα στο ενοποιημένο περιβάλλον του δικτύου αισθητήρων με πλέγμα (*Sensor Grid*). Οι παράμετροι που εξετάζονται μέσα στο Sensor Grid καθορίζοντας το QoS σχετίζονται με το μέγεθος των πόρων του δικτύου αισθητήρων, δηλαδή τον αριθμό των αισθητήρων, την μνήμη (*memory*) και το εύρος ζώνης (*bandwidth*). Επιπλέον, η περιγραφή των υπηρεσιών κρίνεται αναγκαία ώστε να καθορίζεται ποιες υπηρεσίες θα εκτελούνται από ποιους αισθητήρες, τον τρόπο πρόσβασης σε αυτούς και τις παραμέτρους QoS της υπηρεσίας.

Παρόλα αυτά, δύναται μερικοί πόροι του δικτύου αισθητήρων να υποστηρίζουν απαιτήσεις περισσότερο από μίας υπηρεσίας, γεγονός που προϋποθέτει την κράτηση (*reservation*) πόρων. Η διαδικασία κράτησης πόρων σχετίζεται με το χρονοπρογραμματισμό (*scheduling*) των πόρων του δικτύου αισθητήρων λαμβάνοντας πάντα υπόψη το δυναμικό περιβάλλον του δικτύου που επηρεάζεται από αλλαγές της τοπολογίας του, της διαθεσιμότητας των πόρων του, του εύρους ζώνης και τις καθυστερήσεις (*latencies*). Μέσω της ενοποίησης του δικτύου αισθητήρων με την υποδομή πλέγματος ενισχύονται οι QoS μηχανισμοί τους.

5.3.8 Σενάριο Χρήσης

Ένας εξεταζόμενος φθάνει σε ένα νοσοκομείο για να πραγματοποιήσει προληπτικές ιατρικές εξετάσεις. Κατά την άφιξή του πρέπει να περάσει από τα προκαθορισμένα σημεία ελέγχου όπου πληροφορεί το νοσοκομειακό προσωπικό με τα προσωπικά του στοιχεία είτε παραδίδει την κάρτα ασφάλισης ασθενείας. Το ειδικευμένο ιατρικό προσωπικό αναζητεί τα στοιχεία του μέσω του τοπικού πληροφοριακού συστήματος υγειονομικής περίθαλψης (*Health Information Systems, HIS*). Σε περίπτωση που αυτά δεν ανευρεθούν στο

πίεση και τη θερμοκρασία του σώματος του ασθενή που εισήχθηκε στο νοσοκομείο για ιατρική παρακολούθηση.

Η αίτηση του ιατρικού προσωπικού προς τη συγκλίνουσα υποδομή υγείας επεξεργάζεται από τον Εξυπηρετητή Επεξεργασίας Αιτημάτων (*Request Processing Server, RPS*), όπου επαληθεύεται ως προς την ορθότητά της και μετά προωθείται στον Εξυπηρετητή Αισθητήρων Συλλογής Δεδομένων (*Sensor Data Collection Server, SDCS*). Ο SDCS είναι συνδεδεμένος με το σταθμό βάσης του ασύρματου δικτύου των αισθητήρων παρακολουθώντας και συλλέγοντας σε πραγματικό χρόνο από το δίκτυο των αισθητήρων στοιχεία που σχετίζονται με την κατάσταση της υγείας των ασθενών. Εν συνέχεια, ο SDCS εξυπηρετητής ενημερώνει τον RPS εξυπηρετητή με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν όπου με τη σειρά τους αυτά προωθούνται μέσω του Διαδικτύου στο ιατρικό προσωπικό που έστειλε την αίτηση. Εάν για οποιονδήποτε λόγο διακοπεί η σύνδεση ή παρουσιαστεί πρόβλημα στο δίκτυο τότε τα ιατρικά δεδομένα που συλλέχθηκαν αποθηκεύονται στο ηλεκτρονικό μητρώο υγείας του ασθενή που βρίσκεται στις κατακευματισμένες βάσεις δεδομένων της υποδομής και ενημερώνεται ο RPS εξυπηρετητής.

Οι Εικονικοί Ιατρικοί Οργανισμοί (*Virtual Medical Organizations, VMOs*) που σχηματίζονται μέσα στην υποδομή παρέχουν τη δυνατότητα σε εξειδικευμένο ιατρικό προσωπικό από όλον τον κόσμο, που έχει πρόσβαση σε αυτήν, να αναλύσει τα αποθηκευμένα ιατρικά ιστορικά και αρχεία ασθενών υποβοηθώντας τους στη θεραπεία νεοεμφανιζόμενων ασθενειών ενώ ταυτόχρονα τους παρέχεται υποστήριξη για τις ήδη υπάρχουσες. Επίσης, μέσω των σχηματιζόμενων VMOs τους παρέχεται η δυνατότητα διαμοιρασμού γνώσης και ιατρικών πόρων καθώς επίσης προωθείται η μεταξύ τους συνεργασία προς την επίτευξη κοινών ιατρικών στόχων όπως η μελέτη, ανάλυση, παρατήρηση, καταγραφή, πρόληψη και θεραπεία ασθενειών. Γεγονός που συνεπάγεται την εξασφάλιση κριτηρίων που σχετίζονται με τις πολιτικές ασφαλείας και την ποιότητα υπηρεσίας (QoS), ώστε οι πιστοποιημένοι χρήστες της υποδομής να έχουν απρόσκοπτη πρόσβαση στα κατά απαίτηση (*on-demand*) δεδομένα. Με την ύπαρξη VMOs μέσα στην πρωτότυπη υποδομή επιτυγχάνεται ένα περιβάλλον που στόχο έχει τη δημιουργία ενός δυναμικού συστήματος ηλεκτρονικής υγείας (*Electronic health, E-health*)

5.3.9 Αρχιτεκτονική Βάσης Δεδομένων

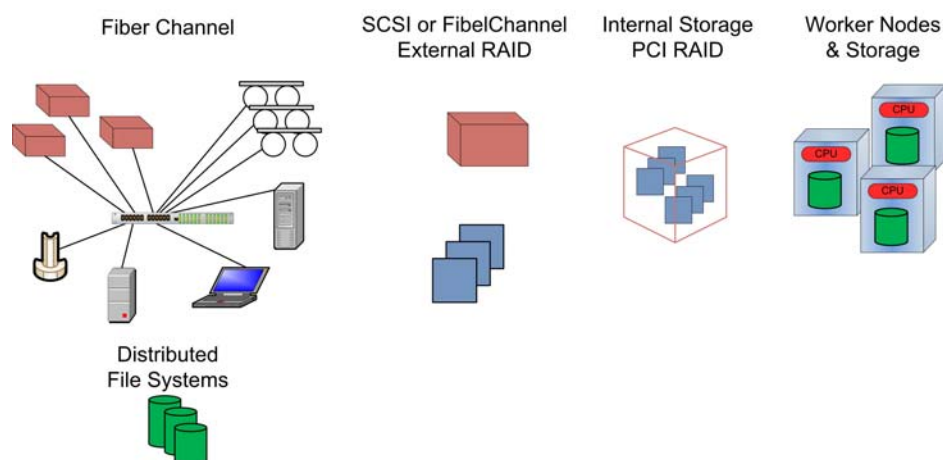
Όπως αναφέρθηκε στην κατηγοριοποίηση των δικτύων πλέγματος, ο όρος πλέγμα δεδομένων (*data grid*) χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα περιβάλλον πλέγματος που περιλαμβάνει τη διαχείριση και την απομακρυσμένη πρόσβαση σε μεγάλο όγκου δεδομένα. Η τεχνολογία των δικτύων πλέγματος επιτρέπει τον διαμοιρασμό των πόρων ανάμεσα σε διάφορους γεωγραφικά κατακευματισμένους οργανισμούς ή/και χρήστες, στοχεύοντας στην κοινή χρήση, επεξεργασία, αποθήκευση και πρόσβαση σε δεδομένα που διαμοιράζονται μέσα στο δίκτυο πλέγματος όταν μία εφαρμογή το απαιτεί.

Ο στόχος ενός πλέγματος δεδομένων είναι να παρέχει μία υποδομή αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων συνδυάζοντας μεγάλο όγκου δεδομένα με τους γεωγραφικά κατακευματισμένους χρήστες

παρέχοντας τους πρόσβαση σε υπολογιστικούς πόρους για την κάλυψη εφαρμογών υψηλής υπολογιστικής απαίτησης. Η πλήρη κάλυψη των αποθηκευτικών αναγκών της συγκλίνουσας πλατφόρμας υγειονομικής περίθαλψης επιτυγχάνεται μέσω της διαδικτύωσης του τοπικού πληροφοριακού συστήματος υγειονομικής περίθαλψης με το πλέγμα δεδομένων εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο πρόσβαση σε απεριόριστους αποθηκευτικούς πόρους.

Η διατήρηση της εφικτότητας (*reliability*), κλιμακωσιμότητα (*scalability*), διαχειρισιμότητας (*manageability*) και η παροχή υπηρεσιών υψηλής απόδοσης του δικτύου δεδομένων παρέχεται μέσα από το μεσισμικό του πλέγματος το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διασφάλιση αυτών των χαρακτηριστικών πάνω από ένα πλήθος ετερογενών υλικών (*hardware*) και λογισμικών (*software*). Για τη διασφάλιση των συγκεκριμένων παραμέτρων καθώς και για την επίλυση των περιορισμών, υιοθετήθηκε για την υλοποίηση της προτεινόμενης ολοκληρωμένης πλατφόρμας μία σειρά από εμπορικές και παραμετροποιημένες λύσεις.

Στο **Σχήμα 48** παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική διασύνδεσης του δικτύου πλέγματος με τις ενσωματωμένες τεχνολογίες υλικού (*hardware*). Η χρήση της παρούσας τεχνολογίας αποθηκευτικών μέσων έχει ως επίκεντρο την εύκολη συντήρηση και το χαμηλό κόστος κτήσης υλικού δίχως όμως να υφίσταται περιορισμός στην παρεχόμενη ποιότητα. Δεδομένης της χρήσης ποικίλων διεπαφών των αποθηκευτικών μέσων και της πολυπλοκότητας του δικτύου, το ζήτημα εστιάζεται στην ορθή υλοποίησή τους που δύναται να δημιουργήσει γενικευμένο πρόβλημα στην προτεινόμενη υποδομή.



Σχήμα 48: Συνδυασμός Τεχνολογίας Αποθηκευτικών Μέσων

Η αρχιτεκτονική προσέγγιση των αποθηκευτικών μέσων που παρουσιάζεται στη συγκεκριμένη διατριβή βασίζεται στην προσέγγιση του Μαζικού Συστήματος Αποθήκευσης (*Mass Storage Solution, MSS*). Η MSS προσέγγιση συνδυάζει δίσκους και αποθηκευτικές ταινίες μέσα στο δίκτυο πλέγματος εξασφαλίζοντας στους υπολογιστικούς πόρους του πλέγματος, που δύναται να αποτελούνται είτε από μία συστοιχία υπολογιστών (*cluster*) είτε από ένα σύνολο τοπικών υπολογιστικών κόμβων (*Worker Nodes, WNs*), τους απαιτούμενους αποθηκευτικούς πόρους. Όσον αφορά τον περιορισμό του κόστους υλοποίησης χρησιμοποιήθηκε και

παραμετροποιήθηκε η εφαρμογή του pNFS (*Parallel Network File System*) [39], ενώ δοκιμάστηκαν ως προς την διαλειτουργικότητα εφαρμογές όπως το Andrew File System (*AFS*) [40] και το Lustre [41].

Η ενσωμάτωση του SE (*Storage Element*) στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική κρίνεται επιτακτική καθώς αυτό προσφέρει μία ομογενοποιημένη διεπαφή (*interface*) προς τους αποθηκευτικούς πόρους. Στο SE προσφέρεται η υπηρεσία Διαχείρισης Αποθηκευτικών Πόρων (*Storage Resource Manager, SRM*) [42], η οποία διαχειρίζεται τους αποθηκευτικούς πόρους προσφέροντας δυνατότητες όπως η κράτηση (*reservation*) αποθηκευτικού χώρου, η μεταφορά από δίσκο σε ταινία, από SE σε SE κ.ά. Ένας από τους λόγους που χρησιμοποιήθηκε το SRM μέσα στην προτεινόμενη υποδομή είναι ένεκα του χαρακτηριστικού της δυναμικής διανομής αποθηκευτικού χώρου καθώς και διαχείρισης των διαμοιραζόμενων αρχείων μέσα στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική. Επιπλέον αποκρύπτει τη διαφορετικότητα των αποθηκευτικών πόρων επιτρέποντας στο χρήστη την επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων στο πλέγμα [42] [43].

Η χρήση μίας πλεγματοειδούς υποδομής δεδομένων κρίνεται επιτακτική στη συγκεκριμένη περίπτωση διότι τα κατά τόπους ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παράγουν τεράστιου όγκου ιατρικά δεδομένα που προέρχονται από την παρακολούθηση των ασθενών. Οπότε δεδομένου του κατανεμημένου περιβάλλοντος του δικτύου η αποθήκευση, ανάλυση και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των ιατρικών δεδομένων δύναται να φθάσουν αρκετά petabytes σε μέγεθος. Τα μητρώα υγείας των ασθενών είναι αποθηκευμένα ως λογικές οντότητες μέσα στην κατανεμημένη αποθηκευτικό σύστημα. Έτσι ο χρήστης της υποδομής δύναται να εκτελέσει μόνο εντολές του τύπου αναζήτησης (*select*), εισαγωγής εγγραφής (*insert*), διαγραφή εγγραφής (*delete*), τροποποίηση εγγραφής (*update*) καθώς τα μητρώα υγείας των ασθενών περιέχουν κυρίως ιατρικά δεδομένα μετρήσεων που προέρχονται από το δίκτυο αισθητήρων. Τα χαρακτηριστικά των κλειδιών (*keys*) που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση, επιλογή και διάταξη των ιατρικών εγγραφών σχετίζονται με το όνομα του ασθενή, το είδος της ασθένειας, τη φαρμακευτική αγωγή και τον επιβλέποντα ιατρό.

Ο χρήστης της υποδομής δύναται να επεξεργαστεί και να αποθηκεύσει τα δεδομένα, όταν ο όγκος τους το επιτρέπει, στο τοπικό MIS που χρησιμεύει και ως μεταβατικό αποθηκευτικός χώρος πριν ο χρήστης τα αποθηκεύσει στο πλέγμα δεδομένων. Συνεπώς, ένα σύνολο από αποθηκευμένες κλάσεις (*classes*) είναι διαθέσιμο επιτρέποντας τη μετάβαση, αποθήκευση και κατηγοριοποίηση των ιατρικών αρχείων στο πλέγμα δεδομένων ανάλογα με το πόσο σημαντικά ή αναλώσιμα είναι αυτά. Η ακεραιότητα (*integrity*) και η εμπιστευτικότητα (*privacy*) των μεταδιδόμενων-αποθηκευμένων δεδομένων βασίζεται σε ένα εγκαταστημένο μηχανισμό checksum [44] που ελέγχει τα δεδομένα ως προς την ορθότητα, την επανεπεξεργασία και το ποσοστό αντιγράφων (*replication*). Επίσης, η εμπιστευτικότητα (*privacy*) των δεδομένων δύναται να εξασφαλισθεί με τη χρήση κρυπτογραφημένων κλειδιών που θα διαμοιράζονται μεταξύ των διάφορων συνδέσεων.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική έχει στο επίκεντρό της τη διαφάνεια (*transparency*) προκειμένου να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα ανάμεσα σε διαφορετικούς διαχειριστικούς τομείς (*administrative domains*) καθώς και για να επιτευχθεί η ενοποίηση της ευρείας υποδομής αισθητήρων με το πλέγμα και με τις ιατρικές εφαρμογές των κατά τόπους ιατρικών πληροφοριακών συστημάτων (*MIS*). Για αυτόν το λόγο στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου της διατριβής αναπτύσσεται μία διάφανη διεπαφή (*transparent interface*) χρήστη όπου

στο τέλος αυτού του κεφαλαίου αξιολογείται μετρικά ως προς την εφικτότητα (*reliability*), τη διαλειτουργικότητα και την απόδοσή της.

5.4 Συγκλίνον Δίκτυο Πλέγματος Υγείας SEGEDMA

Στις μέρες μας τα δίκτυα πλέγματος είναι μία ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία που βασίζεται στις υπηρεσίες Διαδικτύου (*Web services*). Το συγκλίνον δίκτυο SEGEDMA (*Sensor Grid Enhancement Data Management*) που παρουσιάζεται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ακολουθεί μία υπηρεσιοστραφής αρχιτεκτονική (*Service Oriented Architecture, SOA*) προσέγγιση.

Ένας ορισμός των υπηρεσιοστραφών αρχιτεκτονικών (SOA) του OASIS που έχει δοθεί [51] αναφέρει ότι είναι ένα υπόδειγμα για την οργάνωση και χρησιμοποίηση καταναλωμένων δυνατοτήτων που μπορεί να είναι υπό τον έλεγχο διαφορετικών τομέων κυριότητας (*ownership domains*). Προσφέρει ένα ομογενοποιημένο τρόπο για την προσφορά, ανακάλυψη και αλληλεπίδραση με τις προσφερόμενες από τους οργανισμούς δυνατότητες, στοχεύοντας στην παραγωγή συνεπών αποτελεσμάτων με μετρήσιμες προϋποθέσεις και προσδοκίες.

Το Μοντέλο Αναφοράς του OASIS για τις SOA δίδει έμφαση στο πως πρέπει να είναι οι υπηρεσίες SOA για να καταναλωθούν. Συγκεκριμένα γίνεται αντιστοίχιση των αναγκών (*needs*) ενός καταναλωτή (*consumer*) με τις δυνατότητες (*capabilities*) πόρων (*resources*) μέσω ενός Παρόχου Υπηρεσίας (*Service Provider, SP*). Στα πλαίσια αυτά, μία υπηρεσιοστραφή αρχιτεκτονική SOA έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Περιγραφή Υπηρεσίας (*Service Description*): Είναι η απαραίτητη πληροφορία για να μπορέσει κάποιος καταναλωτής να ανακαλύψει την υπηρεσία, να κατανοήσει τι αυτή προσφέρει και τέλος να την χρησιμοποιήσει. Είναι αναγκαία απαίτηση, ειδικά όταν οι καταναλωτές της υπηρεσίας προέρχονται από διαφορετικές διαχειριστικές περιοχές.
- Ορατότητα (*Visibility*): Η σχέση των παρόχων υπηρεσίας και των καταναλωτών σε μία υπηρεσία SOA πρέπει να είναι διαφανής με την παροχή περιγραφών των λειτουργιών, των τεχνικών απαιτήσεων, των περιορισμών, της πολιτικής και των μηχανισμών πρόσβασης στην υπηρεσία.
- Αλληλεπίδραση (*Interaction*): Διεξάγεται με την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ SP και των καταναλωτών, μέσω των οποίων ανταλλάσσεται πληροφορία.
- Αποτέλεσμα στον Πραγματικό Κόσμο (*Real World Effect*): Είναι το φυσικό αποτέλεσμα χρήσης μίας υπηρεσίας. Μπορεί να είναι η επιστροφή πληροφορίας ή η αλλαγή κατάστασης της οντότητας που προσφέρει την δυνατότητα.
- Περιβάλλον Εκτέλεσης (*Execution Context*): Είναι το σύνολο των τεχνικών και επιχειρησιακών στοιχείων που δημιουργούν το μονοπάτι μεταξύ αυτών που διαθέτουν τους πόρους ή δυνατότητες και των παρόχων υπηρεσίας επιτρέποντας έτσι την αλληλεπίδραση των υπηρεσιών με τους καταναλωτές τους.

- Συμβόλαιο & Πολιτική (*Contract & Policy*): Μια πολιτική αντιπροσωπεύει ένα είδος περιορισμού και προϋποθέσεων στην χρήση, εγκατάσταση ή περιγραφή μίας υπηρεσίας μεταξύ των παρόχων υπηρεσίας και των καταναλωτών. Το συμβόλαιο αντιπροσωπεύει την συμφωνία μεταξύ δύο ή περισσότερων συμβαλλόντων, πάροχοι υπηρεσίας, καταναλωτών και κατόχων των δυνατοτήτων (*capabilities*) ή πόρων μίας υπηρεσίας.

Με βάση τα παραπάνω εξάγουμε το συμπέρασμα ότι οι SOA δεν είναι μία συγκεκριμένη αρχιτεκτονική αλλά αρχιτεκτονικές-σχεδιαστικές αρχές βασισμένες στην έννοια της υπηρεσίας. Για αυτόν το λόγο κάθε λύση που σχεδιάζεται με βάση την SOA προσέγγιση πρέπει να επιλύει συγκεκριμένα προβλήματα της περιοχής ενδιαφέροντος που εφαρμόζεται σεβόμενη παράλληλα τις βασικές αρχές της.

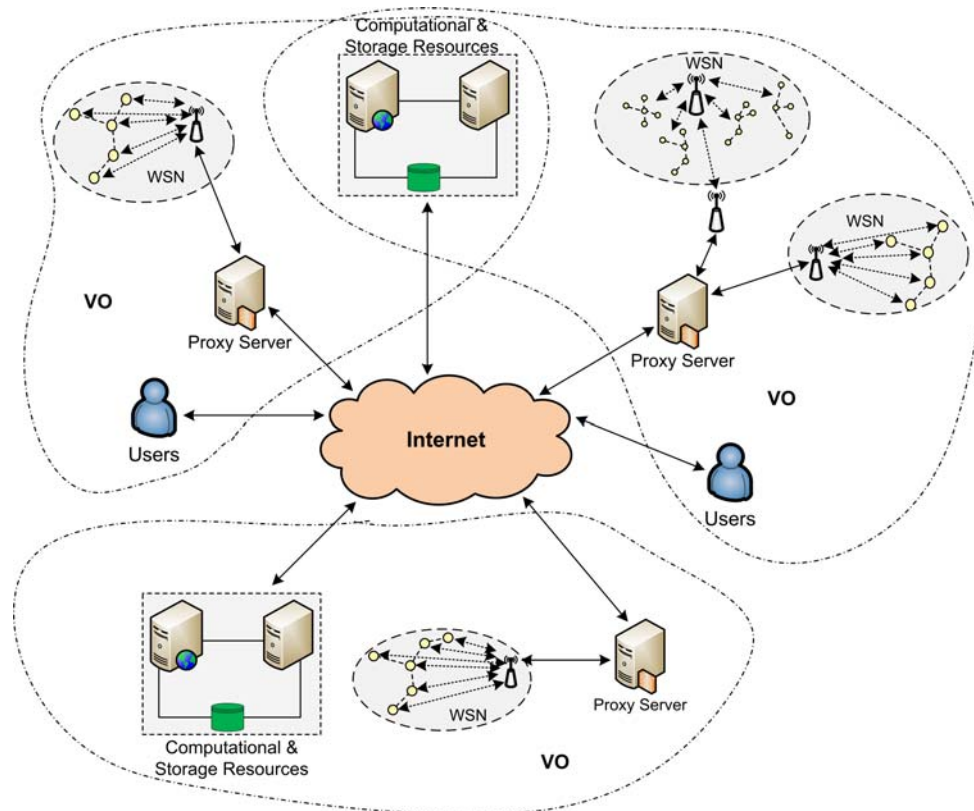
Μία πρότυπη αρχιτεκτονική SOA για την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος είναι το OGSA [19] [52]. Η ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής έχει προέλθει από τον οργανισμό Global Grid Forum (*GGF*), ο οποίος ενώθηκε το έτος 2006 με τον οργανισμό Enterprise Grid Alliance και δημιουργήθηκε το Open Grid Forum (*OGF*) [53]. Όπου υλοποιεί τις υπηρεσίες ως υπηρεσίες Διαδικτύου (*web services*), συντακτικό XML και πρωτόκολλο μεταφοράς μηνυμάτων SOAP πάνω από πρωτόκολλο HTTP, παρέχοντας κατανεμημένη αλληλεπίδραση και υπολογιστική ισχύ βασισμένη σε υπηρεσίες. Καλύπτει τη διαλειτουργικότητα μέσα σε ετερογενή συστήματα με συνέπεια να είναι δυνατή η ανταλλαγή πληροφοριών, η διασύνδεση και ο διαμοιρασμός διαφορετικών τύπων πόρων. Η αρχιτεκτονική OGSA ορίζει εφτά ανεξάρτητες υπηρεσίες. (i) Υπηρεσίες Υποδομής (*Infrastructure Services*), (ii) Εκτέλεση Υπηρεσιών Διαχείρισης (*Execution Management Services*), (iii) Υπηρεσίες Δεδομένων (*Data Services*), (iv) Υπηρεσίες Διαχείρισης Πόρων (*Resource Management Services*), (v) Υπηρεσίες Ασφαλείας (*Security Services*), (vi) Αυτο-Διαχείριση Υπηρεσιών (*Self-Management Services*), (vii) Υπηρεσίες Πληροφορίας (*Information Services*).

Η πρωτότυπη ολοκληρωμένη πλατφόρμα δικτύου αισθητήρων με πλέγμα SEGEDMA έχει ως βάση της την εν λόγω προσέγγιση διότι το κατανεμημένο περιβάλλον του δικτύου πλέγματος ως τεχνολογία, εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής SOA που προτείνει τη χρήση της υπηρεσίας (*service*) ως δομικό συστατικό ενός κατανεμημένου συστήματος, υλοποιημένο με βάση τις τεχνολογίες υπηρεσιών Διαδικτύου (*web services*) [4] [9]. Ως εκ τούτου, το προτεινόμενο συγκλίνον δίκτυο υγειονομικής περίθαλψης βασίζεται σε ένα σύνολο ευέλικτων σχεδιαστικών αρχών που χρησιμοποιούνται κατά τη φάση σχεδιασμού κατανεμημένων αρχιτεκτονικών όπως ορίζουν οι προδιαγραφές και τα πρότυπα που εκπορεύονται από τους Οργανισμούς Ανοιχτών Προτύπων.

Η αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 49** απεικονίζει το συγκλίνον δίκτυο SEGEDMA του οποίου στόχος είναι η ενοποίηση των ασυρμάτων δικτύων αισθητήρων και των συστημάτων υγειονομικής περίθαλψης με το δικτύου κορμού που βασίζεται στην τεχνολογία των δικτύων πλέγματος. Απώτερος στόχος είναι η δημιουργία μίας συγκλίνουσας υποδομής που με βάση το δίκτυο πλέγματος θα ενσωματώνει λειτουργίες και υπηρεσίες από διαφορετικούς τύπους ετερογενών δικτύων οπουδήποτε και αν αυτοί βρίσκονται μέσα στα πλαίσια του SEGEDMA. Ως εκ τούτου, το δημιουργηθέν δίκτυο επεκτείνει τις δυνατότητες της πλεγματικής τεχνολογίας, που αρχικά δεν ήταν διαθέσιμες, στην ιατρική πληροφορική και

στα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης παρέχοντάς τους άφθονους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους. Το αποτέλεσμα αυτού είναι να επιλύει περιορισμούς που σχετίζονται με τη χωρητικότητα και υψηλή υπολογιστική απαίτηση πολύπλοκων αναλύσεων ιατρικών δεδομένων με ταυτόχρονη υποστήριξη της παρακολούθησης (*monitoring*) ασθενών σε πραγματικό χρόνο επιτυγχάνοντας διαδίκτυωση γεωγραφικά διεσπαρμένων ιατρικών οργανισμών μέσα σε περιβάλλον διάχυτου υπολογισμού [4] [9].

Η αρχιτεκτονική του SEGEDMA που περιγράφεται στο παρακάτω σχήμα αποτελείται από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων που είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο πλέγματος και τους πόρους του. Οι πόροι του ευρέως δικτύου αισθητήρων με πλέγμα (*Sensor Grid*) δύναται να διαμοιράζονται μέσα σε εικονικούς ιατρικούς οργανισμούς (VMOs) με δυνατότητα να ανήκουν μερικοί πόροι σε έναν ή/και περισσότερους VMO. Με αυτόν το τρόπο δύναται οι χρήστες από ποικίλους VMOs να αποκτούν πρόσβαση στους πόρους του ολόκληρου δικτύου αισθητήρων με πλέγμα οπουδήποτε και αν βρίσκονται μέσα σε αυτό ανεξάρτητα αν οι διαμοιραζόμενοι πόροι ανήκουν στον VMO που είναι οι χρήστες.



Σχήμα 49: Αρχιτεκτονική Συγκλίνοντος Δικτύου SEGEDMA

Στην προτεινόμενη αρχιτεκτονική προκειμένου να εξασφαλίσουμε τη διαλειτουργικότητα και διαθεσιμότητα των επιμέρους ασύρματων δικτύων αισθητήρων που είναι διασυνδεδεμένα με την υποδομή πλέγματος και τις υπηρεσίες του, εισάγουμε μία τεχνική που βασίζεται επάνω σε διακομιστές μεσολάβησης (*proxy servers*). Η συγκεκριμένη τεχνική προσέγγιση των διακομιστών μεσολάβησης εκτός από τη διαλειτουργικότητα και διαθεσιμότητα που παρέχει στο δίκτυο πλέγματος δύναται να υποστηρίξει ποικίλες

υλοποιήσεις και εφαρμογές από πλευράς δικτύου αισθητήρων. Μέσα στο προτεινόμενο συγκλίνον δίκτυο ο ρόλος των διακομιστών μεσολάβησης είναι η διασύνδεση της υποδομής πλέγματος με τα WSNs δίκτυα καθώς αυτοί δρουν ως μία διεπαφή αποκρύπτοντας οποιεσδήποτε διαφορές υλικού υπάρχουν ανάμεσα στις δύο διαφορετικές δικτυακές τεχνολογίες.

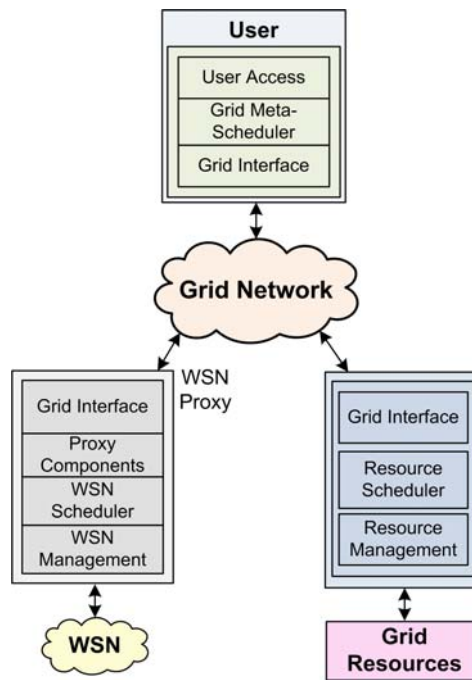
Η κυριότερη λειτουργία των διακομιστών μεσολάβησης (*proxy servers*) είναι η έκθεση των πόρων των WSNs δικτύων ως υπηρεσίες πλέγματος (*grid services*), ώστε να δύναται να ανακαλυφθούν και να είναι προσβάσιμοι από οποιαδήποτε πλεγματική εφαρμογή και χρήστη. Επίσης, τα δεδομένα που προέρχονται από τα δίκτυα αισθητήρων από το αρχικό τους σχήμα (*format*) μετατρέπονται σε OGSA (*Open Grid Services Architecture*) σχήμα (*format*) ώστε να υπάρχει συμβατότητα με την τεχνολογία των δικτύων πλέγματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα που θα παρατεθούν στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου επιβεβαίωσαν ότι η έκθεση των αισθητήρων ως πόροι πλέγματος γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως οποιοσδήποτε άλλος πόρος μέσα στο πλέγμα.

Η τεχνική χρησιμοποίησης διακομιστών μεσολάβησης πέραν από την ενοποίηση ετερογενών δικτυακών πόρων στοχεύει στο συντονισμό και εξασφάλιση της συνδεσιμότητας μεταξύ του δικτύου πλέγματος και των WSNs δρώντας ως διεπαφή ανάμεσα στα πρωτόκολλα των δικτύων αισθητήρων και των πρωτοκόλλων του Διαδικτύου χρησιμοποιώντας μηχανισμούς όπως την προσωρινή μνήμη (*buffering*), την κρυφή ή λανθάνουσα μνήμη ΚΜΕ (Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας) (*cache*), τη διαχείριση σύνδεσης (*link management*), το χρονοπρογραμματισμό (*scheduling*) και την ασφάλεια της υποδομής. Σε περίπτωση μακράς ή απρόσμενης αποσύνδεσης του δικτύου αισθητήρων, μέσω των παραπάνω μηχανισμών που διαθέτουν οι διακομιστές μεσολάβησης, επιτυγχάνεται περιορισμός του αρνητικού αντίκτυπου που αυτό θα είχε στην απόδοση του δικτύου και στην ποιότητα υπηρεσίας (QoS) μέσα στο συγκλίνον περιβάλλον διάχυτου υπολογισμού.

Επιπλέον, η εφαρμογή διακομιστών μεσολάβησης στην πλευρά του δικτύου αισθητήρων υποστηρίζει την κλιμακωσιμότητα (*scalability*) της προτεινόμενης ενοποιημένης αρχιτεκτονικής. Έτσι για κάθε νέο δίκτυο αισθητήρων που προστίθεται στην παρούσα αρχιτεκτονική, εγκαθιστώντας νέους διακομιστές μεσολάβησης επιτυγχάνουμε άμεση αναγνώρισή του από το δίκτυο πλέγματος καθώς αυτό αναγνωρίζεται ως πλεγματικός πόρος.

Στο **Σχήμα 50** απεικονίζονται τα χαρακτηριστικά της διαστρωματοποιημένης αρχιτεκτονικής (*layered architecture*) του προτεινόμενου πλαισίου υλοποίησης του πολύπλοκου συγκλίνοντος δικτύου υγείας SEGEDMA. Η διαστρωμάτωση έγινε με βάση τα μέρη των ποικίλων λογισμικών που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της προτεινόμενης συγκλίνουσας υποδομής [4] [9] με το κάθε επίπεδο (*layer*) του Σχήματος 48 να καθορίζει τις υπηρεσίες που είναι προσβάσιμες δια μέσου των διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (*APIs*).

Το επίπεδο Διεπαφής Δικτύου Πλέγματος (*Grid Interface*) περιέχει το υποστηριζόμενο μεσισμικό λογισμικό, στην συγκεκριμένη περίπτωση το Globus Toolkit, επιτρέποντας τη διασύνδεση ετερογενών πόρων μέσα στη συγκλίνουσα υποδομή.



Σχήμα 50: Μοντέλο Διαστρωμάτωσης Ενοποιημένου Δικτύου

Το επίπεδο της Πρόσβασης Χρήστη (*User Access*) παρέχει τη διεπαφή, όπως είναι ένα grid portal ή ένα εργαλείο διαχείρισης ροής εργασιών (*workflow management*), επιτρέποντας στους χρήστες να υποβάλλουν εργασίες (*jobs*) και εφαρμογές προς εκτέλεση στην πλατφόρμα SEGEDMA. Πέραν των εργασιών που υποβάλλονται μόνο στην πλευρά του δικτύου πλέγματος για οποιαδήποτε επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν από το δίκτυο αισθητήρων, δύναται να υποβληθούν και εργασίες προς εκτέλεση στο δίκτυο αισθητήρων με σκοπό την περαιτέρω συλλογή δεδομένων από αυτούς.

Το επίπεδο του Πλεγματού Μετα-Χρονοπρογραμματιστή (*Grid Meta-Scheduler*) περιλαμβάνει τον CSF (*Community Scheduler Framework*) [17] [48] χρονοπρογραμματιστή υποστηρίζοντας έτσι τη δρομολόγηση και το χρονοπρογραμματισμό των εργασιών σύμφωνα με τους διαθέσιμους πόρους. Η χρήση του CFS βασίζεται στη διττή ιδιότητα που προσφέρει. Πρώτον, υποστηρίζει την προδιαγραφή WS-Agreement (*Web Services Agreement*) εξασφαλίζοντας έτσι την ποιότητα και διαθεσιμότητα του δικτύου [49]. Δεύτερον, υποστηρίζει την υπηρεσία GRAM (*GRAM service*) που προσφέρει μία υπηρεσία ομογενοποιημένης διεπαφής που στοχεύει στην υποβολή εργασιών και το συντονισμό των κρατημένων πόρων [49]. Επίσης, ο CFS μετα-χρονοπρογραμματιστής έχει υλοποιηθεί σε OGSA πρότυπα και βελτιστοποιεί το φόρτο εργασίας (*workload*) μέσα στο δίκτυο συνδυάζοντας και συναθροίζοντας όλους τους διαχειριστές καταναμημένων πόρων (*distributed resource managers*) από ποικίλους οργανισμούς, επιτρέποντας έτσι την άμεση εκτέλεση batch jobs.

Όσον αφορά το δίκτυο αισθητήρων, το επίπεδο Διαχείρισης Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (*WSN Management*) περιλαμβάνει μία περιγραφή των Διεπαφών Προγραμματισμού Εφαρμογών (*APIs*) και τα πρωτόκολλα πρόσβασης και διαχείρισης των ετερογενών διασυνδεδεμένων δικτύων αισθητήρων. Επίσης,

διαχειρίζεται τη διαμόρφωση (*configuration*) των κόμβων-αισθητήρων και παρέχει πληροφορίες σχετικά με την κατάστασή τους. Ως επί το πλείστον, δέχεται τις υποβαλλόμενες εργασίες (*jobs*) που προέρχονται από το δίκτυο πλέγματος εκτελώντας τις στους αντίστοιχους κόμβους των αισθητήρων.

Το επίπεδο του WSN Χρονοπρογραμματιστή (*WSN Scheduler*) είναι ο τοπικός χρονοπρογραμματιστής του ασύρματου δικτύου αισθητήρων. Υλοποιεί χρονοπρογραμματιστικούς αλγορίθμους υποστηρίζοντας τη διαχείριση πόρων και ενέργειας των αισθητήρων. Η χρήση του WSN χρονοπρογραμματιστή υποστηρίζει εφαρμογές που χρησιμοποιούνται από τους αισθητήρες ενώ ανήκουν μέσα σε διαφορετικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Κυρίως οι αισθητήρες χρησιμεύουν μέσα στην ενοποιημένη υποδομή για τη συλλογή δεδομένων που σχετίζονται με τη θερμοκρασία, τους καρδιακούς παλμούς και γενικότερα με την κατάσταση υγείας των ασθενών.

Εν αντιθέσει με τους χρονοπρογραμματιστές της τεχνολογίας πλέγματος, ο WSN χρονοπρογραμματιστής υλοποιείται με βάση ότι οι αισθητήρες δεν υποστηρίζουν την ταυτόχρονη εκτέλεση ενός πλήθους εφαρμογών (*multitasking*) σε πραγματικό χρόνο. Συνεπώς ένας αισθητήρας δύναται να εκτελέσει μία υποβαλλόμενη εργασία ανά μονάδα χρόνου και όχι πλήθος από αυτές ταυτόχρονα. Ως εκ τούτου, ο χρονοπρογραμματιστής σύμφωνα με τις παραμέτρους των υποβαλλόμενων εργασιών ελέγχει τη διαθεσιμότητα και την κράτηση των ασύρματων πόρων για την εκτέλεση των υποβαλλόμενων εργασιών. Επίσης, συνεργάζεται με το επίπεδο σύνθεσης των διακομιστών μεσολάβησης (*proxies components*) εξασφαλίζοντας πρόσβαση στις διαθέσιμες υπηρεσίες υποστηρίζοντας έτσι την ποιότητα υπηρεσιών (QoS).

Το επίπεδο Σύνθεσης Διακομιστή Μεσολάβησης (*Proxy Components*), που θα παρουσιασθεί στο επόμενο υποκεφάλαιο της παρούσας διατριβής, έχει συνεργατική δράση με το επίπεδο WSN Διαχείρισης (*WSN Management*) του ασύρματου δικτύου αισθητήρων παρέχοντας υπηρεσίες διαχείρισης δεδομένων των αισθητήρων, διασύνδεσης του δικτύου, διαχείριση ενέργειας, ασφάλειας και QoS.

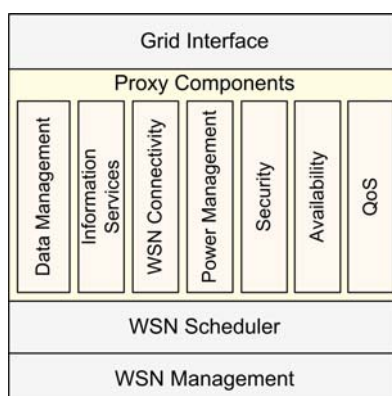
Το επίπεδο Διαχείρισης Πόρων (*Resources Management*) παρέχει τη διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών (*APIs*) για την πρόσβαση και διαχείριση των υπολογιστικών και αποθηκευτικών πόρων για την εκτέλεση των πλεγματικών εργασιών. Τέλος, το επίπεδο του Χρονοπρογραμματιστή Πόρων (*Resource Scheduler*) εκπληρώνει τον χρονοπρογραμματισμό των πλεγματικών εργασιών ανάλογα με τις τοπικές πολιτικές χρήσης.

5.4.1 Στοιχεία Μεσισμικού Διακομιστών Μεσολάβησης

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την προτεινόμενη αρχιτεκτονική σύνθεση στοιχείων μεσισμικού των διακομιστών μεσολάβησης του συγκλίνοντος δικτύου SEGEDMA υποστηρίζοντας ταυτόχρονα και την διαλειτουργικότητα των υπηρεσιών-εφαρμογών μέσα σε ολόκληρη την υποδομή υγειονομικής περίθαλψης.

Η τεχνική της σύνθεσης στοιχείων μεσισμικού και η εφαρμογή τους στους διακομιστές μεσολάβησης δεν υποστηρίζει την ενοποίηση και διασύνδεση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με την υποδομή πλέγματος μονό σε επίπεδο υλικού (*hardware*), αλλά και σε επίπεδο λογισμικού (*software*) και υπηρεσιών.

Στο **Σχήμα 51** απεικονίζεται το πλαίσιο της σύνθεσης μεσισμικού, όπου το μέρος που απαρτίζεται από επτά στοιχεία αποτελεί τον πυρήνα της δομής των διακομιστών μεσολάβησης.



Σχήμα 51: Αρχιτεκτονική Σύνθεση Μεσισμικού Διακομιστών Μεσολάβησης

Αναλύοντας το μεσισμικό που απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα καθώς αυτό ενσωματώνεται στους διακομιστές μεσολάβησης, αρχικά έχουμε το στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων (*Data Management*). Ο ρόλος αυτού του στοιχείου είναι ο χειρισμός των ιατρικών δεδομένων που προέρχονται από τους αισθητήρες μετατρέποντάς τα σε XML μορφή, καθώς αυτή είναι απολύτως συμβατή με την πλεγματική τεχνολογία και φιλική προς τους χρήστες (*user-friendly*). Επίσης εκτελεί σύντηξη δεδομένων βελτιστοποιώντας τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από διάφορους αισθητήρες και δίδεται στο χρήστη η δυνατότητα μεταφοράς τους στην υποδομή πλέγματος με τη χρήση του Πρωτοκόλλου Μεταφοράς Αρχείων GridFTP [18].

Το στοιχείο των Υπηρεσιών Πληροφορίας (*Information Services*) διαχειρίζεται και παρακολουθεί (*monitoring*) όλους τους πόρους του δικτύου αισθητήρων. Η λειτουργία του είναι να ενημερώνει την υποδομή πλέγματος για τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου αισθητήρων, όπως ακριβώς η Υπηρεσία Ευρετηρίου (*Indexing Service, IS*) του OGSA. Οπότε οι χρήστες δύναται να υποβάλλουν ερωτήματα για τη διαθεσιμότητα και την κατάσταση των πόρων του δικτύου αισθητήρων δια μέσου της Υπηρεσίας Παρακολούθησης και Ανακάλυψης (*Monitoring and Discovery Service, MDS*) του OGSA. Οι στατικές και δυναμικές πληροφορίες των WSN πόρων είναι άμεσα διαθέσιμες και προσπελάσιμες από τον WSN χρονοπρογραμματιστή.

Το στοιχείο της WSN Συνδεσιμότητας (*WSN Connectivity*) λειτουργεί ως διεπαφή των πρωτοκόλλων παρέχοντας διαφάνεια των υπηρεσιών του ασύρματου δικτύου αισθητήρων στην υποδομή πλέγματος. Κατά τη διάρκεια μετάδοσης δεδομένων από τους αισθητήρες υποστηρίζει το buffer των δεδομένων, τη δρομολόγηση στους αισθητήρες και τη διαχείριση των ζευξέων μεταξύ των αισθητήρων του ασύρματου δικτύου.

Το στοιχείο της Διαχείρισης Ισχύος (*Power Management*) παρακολουθεί την κατανάλωση ενέργειας των πόρων του WSN δικτύου και σε συνεργασία με τον WSN Χρονοπρογραμματιστή (*WSN Scheduler*) υποστηρίζει λειτουργίες συντήρησης ενέργειας των αισθητήρων.

Το στοιχείο Ασφάλειας (*Security*) βασισμένο σε OGSA πρότυπα με την υποστήριξη του GSSAPI (*Generic Security Services Application Program Interface*) [50] είναι υπεύθυνο για την ασφάλεια της πλεγματικής υποδομής καθώς εισάγει τη διαδικασία πιστοποίησης ταυτότητας (*authentication*) μεταξύ του διακομιστή μεσολάβησης και του ασύρματου δικτύου αισθητήρων.

Το στοιχείο της Διαθεσιμότητας (*Availability*) παρέχει υπηρεσίες που βελτιώνουν την διαθεσιμότητα των αισθητήρων μέσα στο WSN δίκτυο. Παρακολουθεί τους αισθητήρες εντοπίζοντας αυτούς που διαθέτουν χαμηλό επίπεδο ενέργειας ή/και αστοχίας πόρων, με σκοπό να δρομολογήσει τις υποβαλλόμενες εργασίες (*jobs*) σε λειτουργικούς αισθητήρες. Επίσης με γνώμονα την αύξηση της ανοχής σφαλμάτων παρέχοντας λειτουργίες αντιγράφων (*replication*) και ανάκτησης των υποβεβλημένων εργασιών σε περιπτώσεις αποσύνδεσης ή δυσλειτουργίας του δικτύου.

Το στοιχείο Ποιότητας Υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*) σε συνεργασία των WSN Χρονοπρογραμματιστή υποστηρίζει το QoS μέσα στην προτεινόμενη συγκλίνουσα υποδομή ασυρμάτων αισθητήρων με πλέγμα (*Sensor Grid*). Οι λειτουργίες που διατελεί σχετίζονται με την κράτηση (*reservation*) και διανομή (*allocation*) των πόρων του WSN δικτύου ανάλογα με τις QoS απαιτήσεις των υποβαλλόμενων εργασιών στους αισθητήρες. Ωστόσο, η συνεργατική δράση του με το στοιχείο της WSN Συνδεσιμότητας (*WSN Connectivity*) του διακομιστή μεσολάβησης στόχο έχει να προσαρμόζεται ανάλογα με τις ποικίλες διαδικτυακές καταστάσεις παρέχοντας έτσι το επιθυμητό QoS σε κάθε περίπτωση.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μερισμικού των διακομιστών μεσολάβησης καθώς και η χρήση αυτών μέσα σε ένα ευρύ δίκτυο αισθητήρων με πλέγμα, που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής, στοχεύει στην επίλυση υπαρχόντων περιορισμών που προκύπτουν από την ενοποίηση των δύο διαφορετικών δικτυακών τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, με την εισαγωγή των διακομιστών μεσολάβησης και του προτεινόμενου πλαισίου μερισμικού σε αυτούς δεν επιτυγχάνεται μόνον η διασύνδεση του δικτύου πλέγματος με τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αλλά επιλύονται και περιορισμοί των WSNs δικτύων που σχετίζονται με την κλιμακωσιμότητα (*scalability*), τη διαχείριση ενέργειας στους αισθητήρες, το χρονοπρογραμματισμό και τη διαθεσιμότητα αυτών.

Τέλος, η εισαγωγή της τεχνικής που βασίζεται επάνω σε διακομιστές μεσολάβησης προσδίδει μία αυτόνομη διαχειριστική οντότητα στο κάθε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ξεχωριστά μέσα στο ενοποιημένο περιβάλλον παρέχοντας άμεση συνδεσιμότητα και διαμοιρασμό των πόρων τους με ταυτόχρονη εξασφάλιση του QoS μέσα στο δίκτυο.

5.4.2 Μοντέλο Διαχείρισης Δεδομένων

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του συγκλίνοντος δικτύου πλέγματος υγείας επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα και διασύνδεση, του ασύρματου δικτύου αισθητήρων με την κύρια υποδομή του δικτύου πλέγματος, που εξασφαλίζεται με τη χρήση διακομιστών μεσολάβησης προβάλλοντας έτσι μία διεπαφή ανάμεσα στις δύο διαφορετικές δικτυακές τεχνολογίες. Τα στοιχεία σύνθεσης του μερισμικού (βλ. Κεφ. 5.4.1) ελέγχουν τη λειτουργία των χρηστών μέσα στην υποδομή, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων καθώς και τους

αποθηκευτικούς και υπολογιστικούς πόρους της υποδομής πλέγματος. Έτσι τα στοιχεία του μεσισμικού (βλ. Σχ. 51) διασυνδέουν επιτυχώς διαφορετικούς τύπους δικτυακών συστημάτων με το δίκτυο πλέγματος της υγειονομικής πλατφόρμας. Τα επίπεδα του μεσισμικού καθορίζουν την προσβασιμότητα των εφαρμογών σε υπηρεσίες δια μέσου της Διεπαφής Προγραμματισμού Εφαρμογών (*API*).

Η συνεχόμενη καταγραφή της υγείας των ασθενών και η αδιάκοπη λήψη μετρήσεων που σχετίζεται με την κατάσταση της υγείας τους, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή μεγάλου όγκου δεδομένων. Τα παραγόμενα δεδομένα των συγκεκριμένων ιατρικών διαδικασιών μαζί με διάφορες ιατρικές αναλύσεις και στοιχεία αποθηκεύονται στις κατανεμημένες βάσεις του δικτύου πλέγματος. Δεδομένου του τεράστιου όγκου των αποθηκευμένων δεδομένων και προκειμένου να υπάρξει αποτελεσματική διαχείριση, επεξεργασία και ανάκτηση αυτών κρίνεται η επιτακτική ανάγκη για χρησιμοποίηση ενός μοντέλου διαχείρισης δεδομένων. Το στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων (*Data Management*) επιτρέπει τη διαχείριση των αποθηκευμένων δεδομένων στις κατανεμημένες βάσεις της υποδομής πλέγματος, αρκεί που αυτά προέρχονται είτε από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είτε από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία.

Το στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων (*Data Management*) προσφέρει υπηρεσίες που σχετίζονται με την επερώτηση και ανάκτηση (*query & retrieval*) εργασιών, τη μετατροπή και ροή των δεδομένων καθώς και τη ειδοποίηση συμβάντος (*event alert*). Η υπηρεσία επερώτησης και ανάκτησης εργασιών επιτρέπει στις εφαρμογές να υποβάλλουν επερωτήσεις σχετικά με τις εργασίες που έχουν ολοκληρωθεί. Οπότε ο χρήστης δύναται να αποφασίσει ποιες εργασίες που εκτελέστηκαν τον αφορούν ώστε αυτές να ανακτηθούν από την βάση. Μέσω της συγκεκριμένης υπηρεσίας, με τη χρήση διάφορων εφαρμογών δύναται να πραγματοποιηθούν στατιστικές και υπολογιστικές αναλύσεις επάνω στα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τους αισθητήρες.

Η μετατροπή των ακατέργαστων (*raw*) δεδομένων σε XML μορφή πραγματοποιείται από την υπηρεσία μετατροπής δεδομένων. Αυτό γίνεται διότι τα αρχεία που είναι σε XML μορφή είναι διαλειτουργικά μέσα στην υποδομή πλέγματος και ταυτόχρονα υποστηρίζουν την προτυποποίηση των Πληροφοριακών Συστημάτων Υγειονομικής Περίθαλψης (*Health Care Information Systems, HISs*) κατά το ευρέως χρησιμοποιούμενο HL7 (*Health Level Seven International*) [6] πρότυπο.

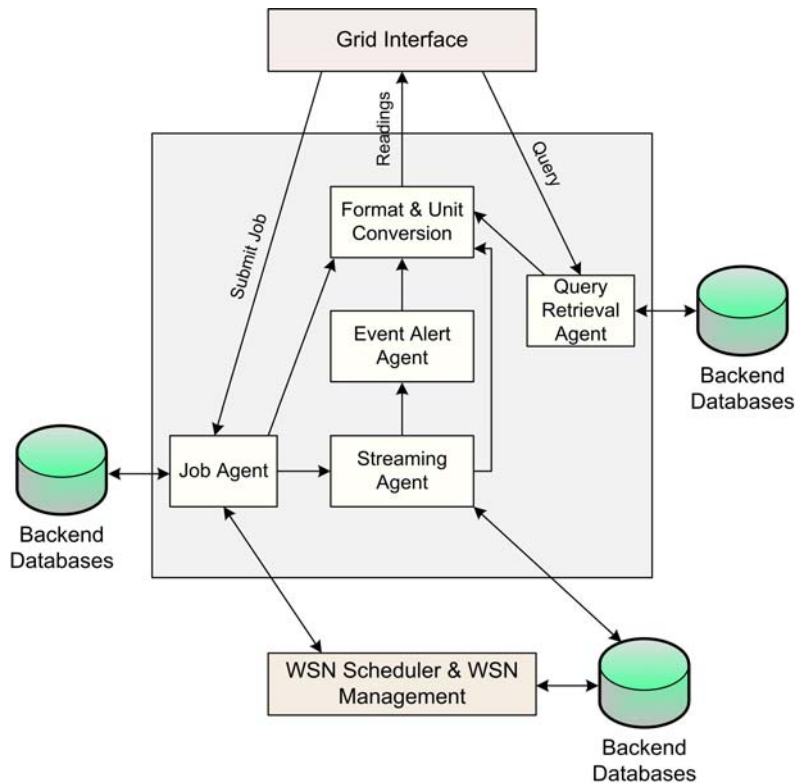
Η χρήση του XML φορμά ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις των χρηστών καθώς τα δεδομένα δύναται να απεικονιστούν ως πίνακας στον φυλλομετρητή ιστοσελίδων (*web browser*), ως διάγραμμα ή ως απλό αρχείο κειμένου. Επίσης, μέσω της υπηρεσίας μετατροπής δεδομένων δύναται να πραγματοποιηθεί μετατροπή των μονάδων μέτρησης που έχουν ληφθεί από έναν ασθενή, π.χ. έστω ότι τα δεδομένα που σχετίζονται με τη θερμοκρασία σώματος του ασθενή έχουν ληφθεί στην κλίμακα Κελσίου και μέσω της παρούσης υπηρεσίας δύναται να μετατραπούν στην κλίμακα Φαρενάιτ, γεγονός που ισχύει για όλα τα αποθηκευμένα δεδομένα των βάσεων.

Η υπηρεσία ροής παρέχει σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων στις εφαρμογές που τις αιτούνται. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η υποστήριξη επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων του WSN σε πραγματικό χρόνο μέσα από επιστημονικές και υπολογιστικές εφαρμογές.

Η τελευταία υπηρεσία που παρέχεται από το στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων (*Data Management*) είναι η υπηρεσία ειδοποίησης συμβάντος, όπου μέσω αυτής της υπηρεσίας ειδοποιούνται εφαρμογές που

σχετίζονται με κάποιο συμβάν που εμφανίζεται. Για παράδειγμα, όταν η θερμοκρασία του σώματος ενός ασθενή ξεπεράσει το ανώτατο επιτρεπτό όριο που έχει καθοριστεί από το ιατρικό προσωπικό, τότε το στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων θα αποστείλει ένα μήνυμα ειδοποίησης πληροφορώντας τους χρήστες της εφαρμογής για το περιστατικό που λαμβάνει χώρα.

Το στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων βασίζεται σε μία πολυ-πρακτορική (*multi-agent*) προσέγγιση, όπως αυτό απεικονίζεται στο **Σχήμα 52** που παραθέτει αναλυτικά το σχεδιασμό και το μοντέλο ροής πληροφοριών του στοιχείου αυτού.



Σχήμα 52: Σχεδιασμός του Στοιχείου Διαχείρισης Δεδομένων

Ο Πράκτορας Ανάκτησης Επερωτήσεων (*Query Retrieval Agent*), δέχεται επερωτήσεις (*queries*) από το επίπεδο (*layer*) Διεπαφής Πλέγματος (*Grid Interface*) (βλ. Σχ. 51) για τα δεδομένα που προέρχονται από τους αισθητήρες και επεξεργάζοντάς τα ανακτά τις απαιτούμενες πληροφορίες από τις κατανεμημένες βάσεις δεδομένων. Εν συνεχεία αποστέλλει τα αποτελέσματα στη Μονάδα Μετατροπής Φορμά (*Format & Unit Conversion*) ώστε να μετατραπούν αυτά στο κατάλληλο φορμά προωθώντας τα πίσω στη Διεπαφή Πλέγματος όπου μεταφέρονται στην εφαρμογή.

Ο Πράκτορας Εργασίας (*Job Agent*), δέχεται τις υποβαλλόμενες εργασίες (*jobs*) από το επίπεδο Διεπαφής Πλέγματος, τις επεξεργάζεται και τις διαχειρίζεται ανάλογα με τον τύπο τους προωθώντας τις είτε στον Πράκτορα Ροής (*Streaming Agent*) είτε στον Πράκτορα Ειδοποίησης Συμβάντος (*Event Alert Agent*), όπου αυτοί τις χειρίζονται χωριστά. Όταν μία εργασία ολοκληρωθεί ο Πράκτορας Εργασίας ανακτά τα παραγόμενα δεδομένα αυτής, που βρίσκονται στη βάση δεδομένων, και εν συνεχεία τα αποστέλλει στη

Μονάδα Μετατροπής Φορμά (*Format & Unit Conversion*) όπου αυτά προωθούνται στο επίπεδο Διεπαφής Πλέγματος. Ο Πράκτορας Εργασίας αλληλεπιδρά με το επίπεδο WSN Διαχείρισης (*WSN Management*) και το επίπεδο του WSN Χρονοπρογραμματιστή (*WSN Scheduler*). Επίσης, το στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων διαμέσου του Πράκτορα Εργασίας επικοινωνεί επιτυχώς με το επίπεδο WSN Διαχείρισης και τον WSN Χρονοπρογραμματιστή παρέχοντας υπηρεσίες στις εφαρμογές

Ο Πράκτορας Ροής (*Streaming Agent*), χειρίζεται τις υποβαλλόμενες εργασίες ροής προς τους αισθητήρες χρησιμοποιώντας τον αρχικό και τελικό χρόνο ολοκλήρωσης μίας εργασίας καθορίζοντας τη διαδικασία έναρξης-τέλους επερωτήσεων προς τη βάση δεδομένων για καινούργιες εγγραφές από τους αισθητήρες. Σε περίπτωση που ανεβρεθούν νέες εγγραφές, τις προωθεί στη Μονάδα Μετατροπής Φορμά όπου με τη σειρά της προωθεί τα δεδομένα στο επίπεδο Διεπαφής Πλέγματος.

Ο Πράκτορας Ειδοποίησης Συμβάντος (*Event Alert Agent*), αποτελεί επέκταση του Πράκτορα Ροής. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι όταν εντοπίζονται νέα δεδομένα στη βάση, ο Πράκτορας Ειδοποίησης Συμβάντος ελέγχει αν αυτά χρειάζεται να προωθηθούν ως μήνυμα ειδοποίησης. Εάν αυτό ισχύει, τότε τα δεδομένα προωθούνται στη Μονάδα Μετατροπής Φορμά και μετά στη Διεπαφή Πλέγματος.

Η Μονάδα Μετατροπής Φορμά (*Format & Unit Conversion*) αποτελεί το καταληκτικό και συνδεδεμένο κόμβο των παραπάνω διαδικασιών με το επίπεδο Διεπαφής Πλέγματος ενώ μετατρέπει τα ακατέργαστα δεδομένα (*raw data*) που προέρχονται από τους αισθητήρες σε XML φορμά ώστε να αναγνωρισθούν, αναλυθούν και να επεξεργαστούν από τους χρήστες υποστηρίζοντας έτσι τη διαλειτουργικότητα αυτών μέσα σε ολόκληρη την υποδομή.

5.4.3 Διασύνδεση Τοπικών Πληροφοριακών Συστημάτων Υγειονομικής Περιθάλψης και Σύστημα Αλληλεπίδρασης

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζεται το μοντέλο της Τεχνολογίας Πληροφόρησης & Επικοινωνίας (*Information and Communication Technologies, ICT*) του κατακευματισμένου ιατρικού πληροφοριακού συστήματος ηλεκτρονικής υγείας (*E-health*). Ο όρος ηλεκτρονική υγεία καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εργαλείων βασισμένων στις τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών που στοχεύουν στην καλύτερη πρόληψη, διάγνωση, θεραπεία, παρακολούθηση και διαχείριση της υγείας και του τρόπου ζωής [54] [55].

Το προτεινόμενο διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρονικής υγείας έχει αναπτυχθεί με επίκεντρο τη συνεργασία μεταξύ ασθενών και φορέων παροχής υγειονομικών υπηρεσιών, την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφόρων ιδρυμάτων και την επικοινωνία μεταξύ ασθενών ή απασχολούμενων στον τομέα της υγείας. Επίσης, στοχεύει στην ανάπτυξη δικτύων πληροφοριών υγείας, ηλεκτρονικών μητρώων υγείας, υπηρεσιών τηλεϊατρικής ενώ υποστηρίζει τη διασύνδεση ιατρικών συστημάτων και εξοπλισμού για την παρακολούθηση (*monitoring*) και στήριξη των ασθενών σε πραγματικό χρόνο (*real-time*) μέσα σε ένα κατακευματισμένο περιβάλλον πλέγματος [4] [9].

Επιπλέον στόχοι της κατανεμημένης πλεγματικής υποδομής ηλεκτρονική υγείας είναι η δημιουργία ενός συστήματος ηλεκτρονικών μητρώων υγείας που ως απώτερο σκοπό θα υποστηρίζει την ανταλλαγή-τυποποίηση πληροφοριών και την ανάπτυξη δικτύων ανταλλαγής πληροφοριών για την υγεία μεταξύ διαφόρων φορέων περίθαλψης ώστε να υπάρχει ενιαίος συντονισμός δράσης σε περιπτώσεις άμεσου κινδύνου για την υγεία των παρακολουθούμενων ασθενών ή/και της δημόσιας υγείας παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο υπηρεσίες υγείας σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, υποστηρίζεται η πρόληψη και θεραπεία των ασθενειών σε πραγματικό χρόνο, η ανάπτυξη συστημάτων τηλεσυμβουλευτικής (*teleconsultation*), ηλεκτρονικής συνταγογράφησης (*ePrescribing*), ηλεκτρονικής παραπομπής (*eReferral*) και ηλεκτρονικής ανάλυσης των ιατρικών αποτελεσμάτων, προωθώντας έτσι την ποιότητα και αποτελεσματικότητα των ιατρικών υπηρεσιών.

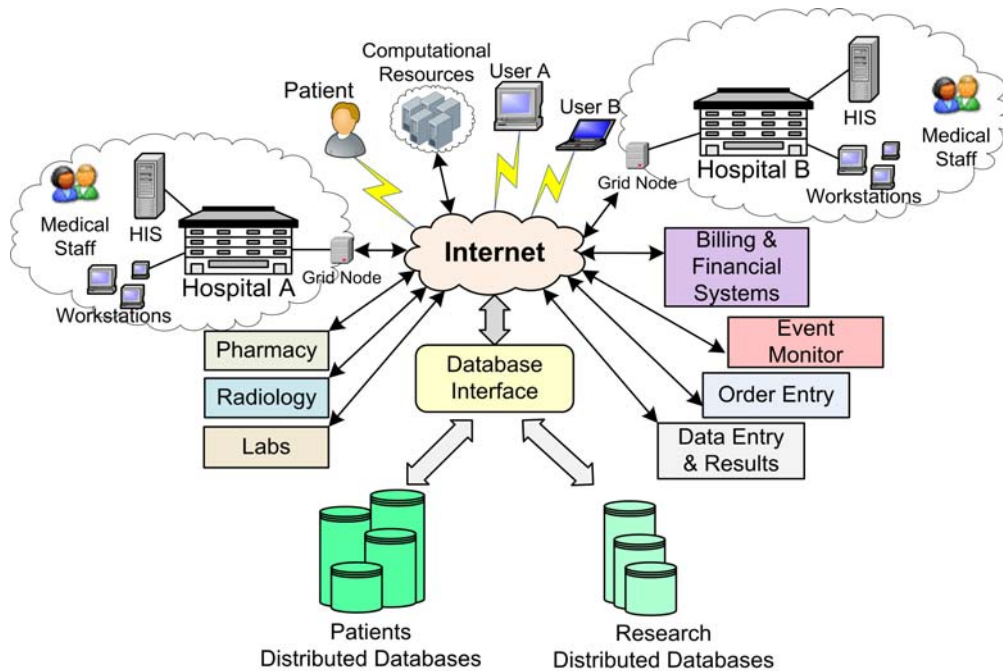
Μέσα στο προτεινόμενο διασυνδεδεμένο σύστημα τα αρχεία που καταγράφουν την κατάσταση υγείας και το ιστορικό των ασθενών αντιπροσωπεύονται από τους Ηλεκτρονικούς Φακέλους Υγείας (*Electronic Health Record, EHR*) των ασθενών που είναι αποθηκευμένοι στα κατά τόπους πληροφοριακά συστήματα υγειονομικής περίθαλψης του κάθε νοσοκομείου ξεχωριστά. Γεγονός που θέτει περιορισμούς που σχετίζονται με το διαμοιρασμό, την ανάλυση και την τυποποίηση των ιατρικών δεδομένων καθώς επίσης της άμεσης πληροφόρησης και επικοινωνίας μεταξύ του ιατρικού προσωπικού διαφορετικών οργανισμών υγείας. Το προτεινόμενο συγκλίνον δίκτυο πλέγματος υγείας SEGEDMA επιλύει επιτυχώς τους όποιους περιορισμούς θέτονται επιτρέποντας την ανταλλαγή ιατρικών δεδομένων μέσω Εικονικών Ιατρικών Οργανισμών (*VMO*) της υποδομής πλέγματος [4] [9].

Μέχρι σήμερα η έλλειψη διασύνδεσης των γεωγραφικά διεσπαρμένων Πληροφοριακών Συστημάτων Υγειονομικής Περίθαλψης (*Health Care Information Systems, HISs*) έχει ως συνέπεια τα ιατρικά δεδομένα που βρίσκονται αποθηκευμένα στις κατά τόπους βάσεις δεδομένων να παρουσιάζουν διαφορετικό σχήμα με αποτέλεσμα να μην εξασφαλίζεται η διαλειτουργικότητα των δεδομένων μέσα στα HISs. Ο διεθνής οργανισμός HL7 (*Health Level Seven International*) σχηματίστηκε με σκοπό την ανάπτυξη προτύπων σχετικά με την ανταλλαγή ηλεκτρονικών δεδομένων με σκοπό την υποστήριξη της αυτόματης ανταλλαγής πληροφορίας μεταξύ διαφορετικών πληροφοριακών συστημάτων υγειονομικής περίθαλψης. Το HL7 είναι το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο ανταλλαγής πληροφοριών μέσω μηνυμάτων σε κλινικό περιβάλλον [56]. Το όνομα HL7 προήλθε από το έβδομο στρώμα, δηλαδή το στρώμα εφαρμογών του μοντέλου αναφοράς OSI (*Open System Interconnection*) και στόχος του είναι η υποστήριξη της διαλειτουργικότητας των ιατρικών πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων οργανισμών υγείας, νοσοκομείων και παρόχων υγειονομικής περίθαλψης.

Τα ιατρικά δεδομένα που σχετίζονται με τους Ηλεκτρονικούς Φακέλους Υγείας (*EHR*) των ασθενών στο πρωτότυπο συγκλίνον δίκτυο πλέγματος υγείας SEGEDMA αποθηκεύονται στις κατανεμημένες βάσεις δεδομένων της υποδομής που παρέχει απεριόριστους αποθηκευτικούς πόρους. Ωστόσο, η εναρμόνιση των ιατρικών δεδομένων που προέρχονται από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων του SEGEDMA κατά HL7 επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του στοιχείου Διαχείρισης Δεδομένων (*Data Management*) που ενσωματώνεται στους διακομιστές μεσολάβησης (βλ. Κεφ. 5.4.1) μετατρέποντας τα δεδομένα σε XML μορφή. Η προτυποποίηση των δεδομένων της προτεινόμενης υποδομής στόχο έχει να υποστηρίξει την

ενσωμάτωσή της και την ανταλλαγή αυτών μέσα σε προτυποποιημένα HL7 πληροφοριακά συστήματα υγειονομικής περίθαλψης.

Διασυνδέοντας τα κατά τόπους πληροφοριακά συστήματα υγειονομικής περίθαλψης με το ευρύ δίκτυο αισθητήρων με πλέγμα και τις κατανεμημένες βάσεις δεδομένων δια μέσου της διεπαφής βάσης δεδομένων (*database interface*), που προτείνεται και εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο, υποστηρίζονται λειτουργίες που σχετίζονται με την αναζήτηση, αποθήκευση και ανάλυση δεδομένων σε οποιοδήποτε σημείο και αν είναι ο χρήστης μέσα στα διασυνδεδεμένα HISs.



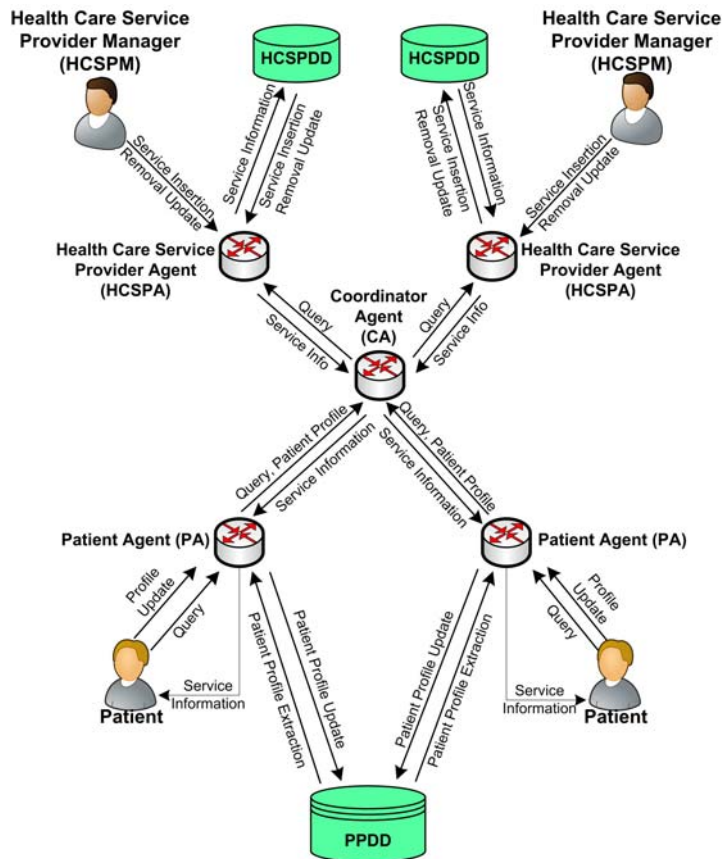
Σχήμα 53: Διασύνδεση Πληροφοριακών Συστημάτων Υγειονομικής Περίθαλψης με το Δίκτυο Πλέγματος

Η παρούσα αρχιτεκτονική που απεικονίζει στο **Σχήμα 53** παρουσιάζει τη διασύνδεση των γεωγραφικά διεσπαρμένων πληροφοριακών συστημάτων υγειονομικής περίθαλψης (HIS) με τις διάφορες υποδομές πλέγματος και με ποικίλες υποστηρικτικές ιατρικές υπηρεσίες. Οι δύο λειτουργίες που έχουν ενσωματωθεί στην παραπάνω αρχιτεκτονική αφορούν πρώτον την ενοποίηση των δεδομένων μεταξύ ποικίλων HISs ενώ η δεύτερη λειτουργία μέσω της διεπαφής βάσης δεδομένων υποστηρίζει την διαλειτουργικότητα των δεδομένων και των EHR προτυποποιημένων κατά HL7 φακέλων.

Για να αποκτήσει πρόσβαση ένας χρήστης ή/και ένα πιστοποιημένο HIS πρέπει να εγγράφουν στην υποδομή πλέγματος ώστε να αποκτήσουν τα αντίστοιχα πιστοποιητικά και εν συνεχεία να χρησιμοποιήσουν τις δυνατότητες που παρέχονται από το συγκλίνον δίκτυο υγείας. Όλοι οι συμμετέχοντες οργανισμοί υγειονομικής περίθαλψης χρησιμοποιούν ένα κόμβο πλέγματος που λειτουργεί ως πάροχος πληροφοριών του δικτύου πλέγματος επιτρέποντάς τους να αποκτούν πρόσβαση σε όλους τους πόρους της κατανεμημένης υποδομής. Επίσης η συνεχόμενη και αυτόνομη λειτουργία του επιτρέπει να ασκεί ρόλο πράκτορα (*agent*)

μέσα στα διάφορα HISs παρέχοντας πρόσβαση σε διάφορες υπηρεσίες των κατά τύπους υγειονομικών οργανισμών περίθαλψης.

Οι χρήστες που είναι πιστοποιημένοι και εξουσιοδοτημένοι για να έχουν πρόσβαση στους πόρους της υποδομής υγειονομικής περίθαλψης δύναται να υποβάλλουν ερωτήσεις (*queries*) οι οποίες δια μέσου του συστήματος αλληλεπίδρασης που απεικονίζεται στο **Σχήμα 54** προωθούνται στο αντίστοιχο τμήμα υγειονομικής περίθαλψης.



Σχήμα 54: Σύστημα Αλληλεπίδρασης Περίθαλψης

Το σύστημα προώθησης ερωτήσεων (*queries*) ακολουθεί μία πολυ-πρακτορική (*multi-agent*) προσέγγιση αποτελούμενη από πέντε στοιχεία που έχουν ως εξής:

- Ο Πράκτορας-Ασθενή (*Patient Agent, PA*), επιτρέπει σε οποιονδήποτε εξουσιοδοτημένο χρήστη να υποβάλλει ερωτήσεις ώστε να αντιστοιχηθούν οι ανάγκες του με τις υπηρεσίες της υποδομής.
- Ο Πράκτορας-Πάροχος Υγειονομικών Υπηρεσιών (*Healthcare Service Provider Agent, HCSPA*), διαχειρίζεται τις υγειονομικές υπηρεσίες του παρόχου (*Healthcare Service Provider Manager, HCSPM*) ιατρικών συμβουλών ενημερώνοντας ταυτόχρονα τις κατανεμημένες βάσεις δεδομένων.
- Ο Πράκτορας-Συντονισμού (*Coordinator Agent, CA*), συντονίζει τους PAs και τους HCSPAs ώστε να ανακαλύψει υπηρεσίες που προσεγγίζουν τις ερωτήσεις των χρηστών και το προφίλ τους.

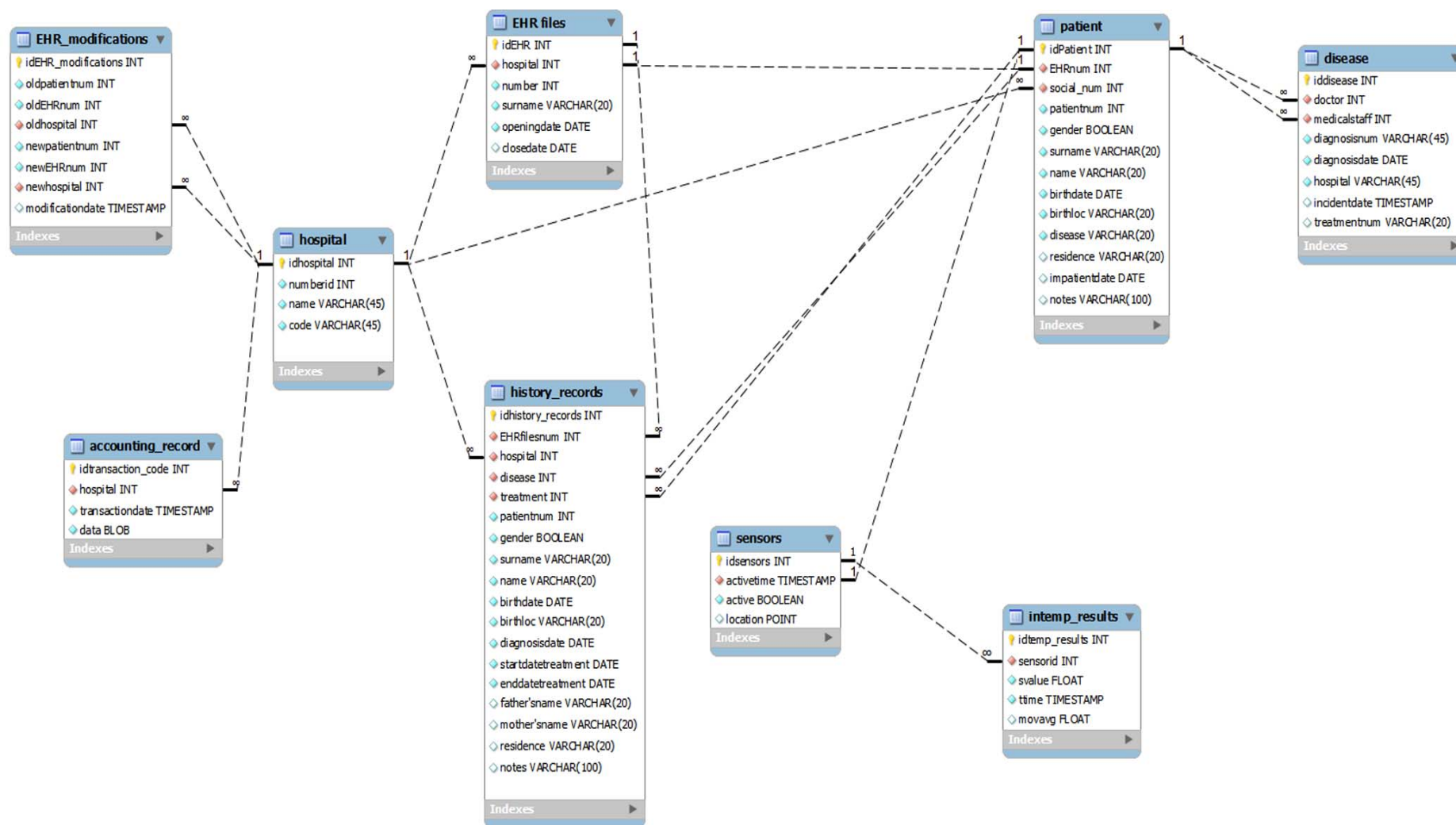
- Ο Πάροχος-Υπηρεσίας Υγειονομικής Περίθαλψης Κατανεμημένων Βάσεων (*Healthcare Service Provider Distributed Database, HCSPDD*), ενημερώνεται από τον παρόχο υγειονομικών υπηρεσιών (*HCSPM*) με σκοπό την παροχή και διαχείριση πληροφοριών.
- Το Προφίλ Ασθενών Κατανεμημένης Βάσης Δεδομένων (*Patients Profile Distributed Database, PPDD*), όπου αποθηκεύονται και διαχειρίζονται δεδομένα που σχετίζονται με τους χρήστες.

Πέραν του Ανθρωποκεντρικού Μοντέλου Σχεδίασης (*User Centered Design, UCD*) που διαθέτει το παρόν σύστημα υγειονομικής περίθαλψης, ο χρήστης δεν επικοινωνεί με κάποιον ενδιάμεσο χρήστη του συστήματος για την παροχή ιατρικών συμβουλών ή παρακολούθησης του προφίλ υγείας οποιουδήποτε χρήστη. Οι επερωτήσεις που υποβάλλει προς αυτό προωθούνται μέσω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω, επιτρέποντας στους πράκτορες του συστήματος υγείας να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους αιτώντας, ανταλλάσσοντας και αποκτώντας πρόσβαση στις αντίστοιχες ιατρικές πληροφορίες που ζητήθηκαν από το χρήστη.

Εκτός από τις προκαθορισμένες διαδικασίες ασφαλείας που απαιτούνται για την πρόσβαση ενός χρήστη στην υποδομή πλέγματος επιπρόσθετα μέτρα ασφαλείας δύναται να ληφθούν ανάλογα με τις πολιτικές ασφαλείας που καθορίζονται για τον κάθε οργανισμό υγείας χωριστά. Μέσω των επιπρόσθετων μέτρων ασφαλείας δύναται ο επιπλέον διαχωρισμός σε τοπικό επίπεδο μεταξύ είτε πιστοποιημένων χρηστών είτε σε χρήστες γενικού ενδιαφέροντος, σε χρήστες Διαδικτύου, σε ασθενείς, σε ιατρούς και σε νοσηλευτές. Η παρούσα ομαδοποίηση σκοπό έχει την ένταξη αυτών στο αντίστοιχο επίπεδο εξουσιοδότησης καθορίζοντας έτσι τις υπηρεσίες και τα είδη των δεδομένων που δύναται να έχουν πρόσβαση μέσα στο αυτοματοποιημένο σύστημα.

Στο **Σχήμα 55** παρουσιάζεται το σχεσιακό μοντέλο της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την αποθήκευση των δεδομένων μέσα στη συγκλίνουσα υποδομή πλέγματος υγείας. Η παρούσα σχεδιαστική προσέγγιση προέκυψε έπειτα από την αναγνώριση των φυσικών οντοτήτων και των συσχετίσεων που πραγματοποιήθηκε κατά τη μελέτη του φυσικού προβλήματος. Λαμβάνοντας υπόψη αυτόν τον παράγοντα η σχεδίαση των πινάκων και των πεδίων κάθε πίνακα σκοπό έχει να διευκολύνει την αποδοτική εξυπηρέτηση των χρηστών υποστηρίζοντας ταυτόχρονα τις υπηρεσίες που παρουσιάστηκαν στα πλαίσια της προτεινόμενης υποδομής. Με αυτόν τον τρόπο υποστηρίζεται η αναζήτηση σε ένα σύνολο από πεδία τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικούς πίνακες.

Για την αποδοτικότερη υλοποίηση της συγκεκριμένης αναζήτησης, τα πεδία αυτά αποθηκεύονται σε πλεονασμό σε παραπάνω από ένα πίνακα. Δηλαδή, η σχεδίαση της βάσης έλαβε υπόψη και τα υπάρχοντα XML σχήματα που ορίζουν οι υπηρεσίες έτσι ώστε να είναι εύκολη τόσο η αποθήκευση των XML δεδομένων που αποστέλλονται από τους πελάτες όσο και η παραγωγή των XML εγγράφων που επιστρέφονται πίσω ως απάντηση. Επιπλέον, η χρήση ευρετηρίων (*indexes*) σε πεδία αποσκοπεί στην υποστήριξη πολλαπλών αναζητήσεων μέσα στη βάση δεδομένων. Ο ορισμός των πεδίων των πινάκων ακολουθεί τους αντίστοιχους ορισμούς των XML σχημάτων τόσο όσον αφορά τα ονόματα όσο και τους τύπους δεδομένων.



Σχήμα 55: Σχεσιακό Μοντέλο Βάσης Δεδομένων*

*Με κίτρινο θαυμαστικό σημειώνεται το πρωτεύον κλειδί κάθε πίνακα ενώ με κόκκινο ρόμβο το ξένο κλειδί.

5.5 Πειραματικά Αποτελέσματα

5.5.1 Πειραματική Διάταξη

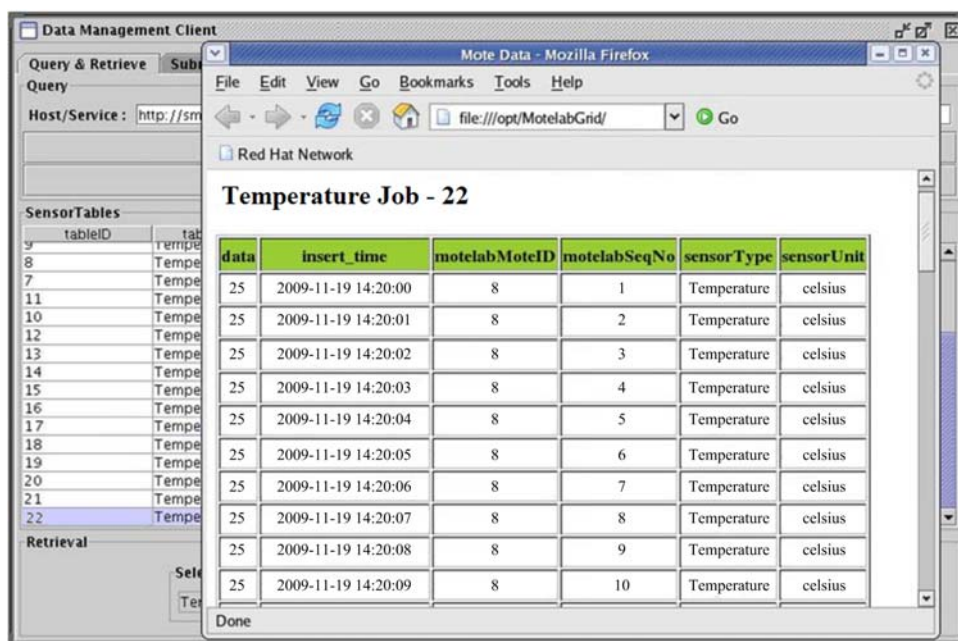
Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιασθεί η διαδικασία αξιολόγησης της προτεινόμενης συγκλίνουσας υποδομής πλέγματος και των παρεχόμενων υπηρεσιών επιβεβαιώνοντας ταυτόχρονα την απόδοση, τη διασύνδεση και διαλειτουργικότητά του. Σκοπός αυτού είναι η μετρική παρουσίαση της διαλειτουργικότητας της συγκλίνουσας υποδομής που υποστηρίζεται από την προτεινόμενη τεχνική διασύνδεσης που χρησιμοποιεί διακομιστές μεσολάβησης στους οποίους έχει ενσωματωθεί το προτεινόμενο πλαίσιο που απαρτίζεται από διάφορα στοιχεία λογισμικού ασκώντας ρόλο διεπαφής ενώ επιτυγχάνει να αποκρύψει οποιεσδήποτε τεχνολογικές διαφορές υπάρχουν μέσα στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και την υποδομή πλέγματος.

Για να την υποβολή ερωτήσεων (*queries*), διαχείρισης και να ανάκτησης (*retrieval*) των δεδομένων που προέρχονται από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, υιοθετήθηκε το MySQL σύστημα διαχείρισης σχεσιακών βάσεων δεδομένων. Ο λόγος είναι ότι η χρήση της MySQL παρέχει μία εκτεταμένη βάση δεδομένων όπου σε αυτήν καταγράφονται οι εκτελούμενες εργασίες από τους αισθητήρες. Επίσης, η καταγραφή μεταδεδομένων (*metadata*) που σχετίζονται με τις εργασίες (*jobs*) των αισθητήρων υποστηρίζει τις εφαρμογές του χρήστη ώστε να ανακαλύπτουν σε ποιους αισθητήρες εκτελούνται οι υποβαλλόμενες από αυτόν εργασίες. Έτσι όταν εκτελείται μία εργασία σε οποιονδήποτε αισθητήρα οι πληροφορίες που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη εργασία εξάγονται στον πίνακα-κατάλογο της MySQL. Αυτό έχει ως συνέπεια οι εξουσιοδοτημένοι χρήστες της υποδομής να έχουν πρόσβαση σε αυτές τις πληροφορίες καθώς και να παρατηρήσουν εάν μία εργασία έχει ολοκληρωθεί ανακτώντας τα αποτελέσματά της μέσω του GT 4 και του GridFTP.

Η δημιουργία ονομάτων για τις υποβαλλόμενες εργασίες στους αισθητήρες και για τα πεδία του πίνακα που χρησιμοποιούνται για τα συλλεχθέντα από τους αισθητήρες δεδομένα, είναι λειτουργίες που υποστηρίζονται από το Motelab [21]. Επίσης το Motelab υποστηρίζει το στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων (*Data Management*) (βλ. Σχ. 51) ενημερώνοντας τον κατάλογο της βάσης δεδομένων όταν ένας αισθητήρας έχει ολοκληρώσει την υποβαλλόμενη εργασία. Για να επιτευχθεί η παραπάνω διαδικασία, υπήρξε παραμετροποίηση του κώδικα (*code*) και των αρχείων εντολών (*scripts*) του Motelab. Συνεπώς, το επίπεδο WSN Διαχείρισης (*WSN Management*) και το στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων (*Data Management*) του προτεινόμενου πλαισίου στοιχείων λογισμικού των διακομιστών μεσολάβησης επικοινωνούν μεταξύ τους παρέχοντας αποτελεσματικές υπηρεσίες ερωτήσεων και ανάκτησης δεδομένων.

Όταν μία εφαρμογή υποβάλλει εργασίες προς εκτέλεση στους αισθητήρες καθορίζει και τον τύπο της μορφής που θα μετατραπούν τα δεδομένα. Η μονάδα μετατροπής φορμά παρέχει τα δεδομένα στο χρήστη σε μορφή XML ή κειμένου. Για περαιτέρω μετατροπή των XML δεδομένων, ένα XSL (*EXtensible Stylesheet Language*) κείμενο παράγεται και μεταδίδεται στην εφαρμογή του χρήστη μαζί με τα XML δεδομένα. Απεικονίζοντας τα δεδομένα η εφαρμογή, τότε η XSLT (*XSL Transformation*) αναλαμβάνει να μετατρέψει τα

XML δεδομένα σε HTML (*HyperText Markup Language*) υπερκείμενο, επιτρέποντας την απεικόνιση των δεδομένων που συλλέχθηκαν στον περιηγητή Ιστού του χρήστη. Η ροή δεδομένων μέσα στο δίκτυο χρησιμοποιεί τον μηχανισμό των κοινοποιήσεων (*notifications*) του Globus Toolkit υποστηρίζοντας έτσι την υπηρεσία ροής [58]. Ο μηχανισμός κοινοποιήσεων του GT επιτρέπει στους χρήστες να ενημερώνονται για τις αλλαγές που συμβαίνουν στον τομέα των υπηρεσιών του πλέγματος.



Σχήμα 56: Απεικόνιση Ανάκτησης Δεδομένων σε GUI

Στο Σχήμα 56 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του στοιχείου Διαχείρισης Δεδομένων (*Data Management*) δια μέσου του Γραφικού Περιβάλλοντος Χρήστη (*Graphical User Interface, GUI*) μέσα στο προτεινόμενο ενοποιημένο περιβάλλον, επιβεβαιώνοντας έτσι τη διαλειτουργικότητα των δεδομένων. Με τη χρήση της υπηρεσίας επερωτήσεων και ανάκτησης (*query & retrieval*), που είναι ενσωματωμένη στο στοιχείο Διαχείρισης Δεδομένων, δίδεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει ποιες εργασίες θα ανακτήσει-απεικονίσει από τα δεδομένα των αισθητήρων που συλλέχθηκαν στο φυλλομετρητή ιστοσελίδων. Επιπλέον σκοπός του αναπτυχθέν GUI είναι η επιβεβαίωση της διαλειτουργικότητας της υπηρεσίας ροής (*streaming service*) ανακτώντας τα δεδομένα που προέρχονται από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο. Επίσης μέσω του GUI της εφαρμογής ελέγχθηκε η υπηρεσία ειδοποίησης συμβάντος (*event alert*), όπου αιτώντας κοινοποίηση για ένα συμβάν λαμβάνεται και η αντίστοιχη ειδοποίηση συμβάντος όταν η θερμοκρασία ενός ασθενούς ξεπεράσει το προκαθορισμένο όριο. Παρόλα αυτά, μέσω της εφαρμογής που αναπτύχθηκε και μέσω της απεικόνισης των μετρήσεων από τους αισθητήρες επικυρώνεται και η μετατροπή του φορμά των δεδομένων που κάνει χρήση της υπηρεσίας μετατροπής φορμά (*format conversion service*).

Η επερώτηση (*query*) που παρουσιάζεται στον Πίνακα 9 στοχεύει στην ανάκτηση δεδομένων που σχετίζονται με τη θερμοκρασία. Η συγκεκριμένη επερώτηση υποβλήθηκε ώστε να ληφθούν οι αντίστοιχες

μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο από όλους τους χρησιμοποιούμενους αισθητήρες που ισαπέχουν μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Τα αποτελέσματα που ανακτήθηκαν απεικονίζονται στο **Σχήμα 56** με ανακτημένη τιμή θερμοκρασίας που έχει καθοριστεί μέσω της παρακάτω επερώτησης (βλ. Πιν. 9) να έχει τεθεί μεγαλύτερη των 5 βαθμών Κελσίου.

Πίνακας 9: Μορφή Επερώτησης Θερμοκρασίας

SELECT moteid, temperature
FROM sensors
WHERE temperature>5
SAMPLE PERIOD 1s

Στην προτεινόμενη συγκλίνουσα υποδομή που παρουσιάζεται στα πλαίσια της διατριβής, το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από 16 Crossbow MICA2 που είναι ένα από τα πιο πρόσφατα ανεπτυγμένα εμπορικά διαθέσιμα μοντέλα καθώς ενσωματώνει εξαρτήματα για μέγιστη ευελιξία και 10 MICAz motes που αποτελούν την πιο σύγχρονη εξέλιξη αυτών. Τα MICA2 χρησιμοποιούν έναν 7.3MHz Atmel ATmega128L μικροελεγκτή (*microcontroller*) που διαθέτει 128KB για τη flash μνήμη, 4KB EEPROM, 512KB flash logger μνήμη για δεδομένα και έναν Chipcon CC1000 πομποδέκτη στα 433MHz με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 38.4Kbps. Το MICAz είναι μία ενημερωμένη έκδοση του MICA2 με IEEE 802.15.4 συμβατό Chipcon CC2420 πομποδέκτη που λειτουργεί στα 2.4 GHz με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 250Kbps.

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν 5 MIB600 Ethernet διεπαφές για να φιλοξενήσουν (*hosting*) το σταθμό βάσης των μονάδων-αισθητήρων (*motes*). Για τη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν 12 MTS310CA πλακέτες (*boards*) αισθητήρων οι οποίες συνδέθηκαν στις μονάδες-αισθητήρες (*motes*). Σε ότι αφορά το λογισμικό της εφαρμογής των MICA2 και MICAz η εργασία έγινε στο TinyOS 2.0 [59] καθώς αυτό έχει σχεδιαστεί για εμπεδωμένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και λειτούργησε μέσω της διανομής Linux Red Hat. Οι εφαρμογές των αισθητήρων έχουν αναπτυχθεί με τη χρήση του ανοικτού κώδικα nesC [60] που αποτελεί μία προέκταση της C γλώσσας προγραμματισμού όπου και χρησιμοποιήθηκε ως βάση της παρούσας εφαρμογής (<http://sourceforge.net/projects/nesc>). Οι βασικές μετατροπές που έγιναν στον κώδικα αφορούσαν το μέγεθος των πακέτων δεδομένων. Ο κώδικας αυτός διαβάζει για 2 τράπεζες δεδομένων με το a2d12ch module. Τις τράπεζες δεδομένων τις διαχειρίζεται το HplMsp430GeneralOI.

Η πειραματική διάταξη πραγματοποιήθηκε σε μία συστοιχία υπολογιστών αποτελούμενη από 4 κόμβους-εξυπηρετητές (*server nodes*) και 25 υπολογιστικούς-κόμβους (*computational nodes*) με συνολική δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων 15TB. Ο κάθε κόμβος-εξυπηρετητής αποτελείτο από Intel Xeon 2.8 GHz επεξεργαστές με 16GB RAM, ενώ ο κάθε υπολογιστικός κόμβος αποτελείτο από Intel Xeon 2 GHz επεξεργαστές με 4GB RAM. Το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε από πλευράς χρήστη και από πλευράς διακομιστών μεσολάβησης είναι η διανομή Red Hat Linux.

5.5.2 Μετρική Αξιολόγηση Ανάκτησης Δεδομένων

Στην παρούσα προτεινόμενη ενοποίηση της πλεγματικής υποδομής με το δίκτυο αισθητήρων ως επίπεδο Διεπαφής Πλέγματος (*Grid Interface*) χρησιμοποιείται το Globus Toolkit (GT) που είναι εγκατεστημένο στους διακομιστές μεσολάβησης, στη συστοιχία υπολογιστών και στο σύστημα χρήστη. Το επίπεδο του Πλεγματικού Μετα-Χρονοπρογραμματιστή (*Grid Meta-Scheduler*) περιλαμβάνει τον CSF (*Community Scheduler Framework*) [17] [48] χρονοπρογραμματιστή που υποστηρίζει τη δρομολόγηση και το χρονοπρογραμματισμό των εργασιών.

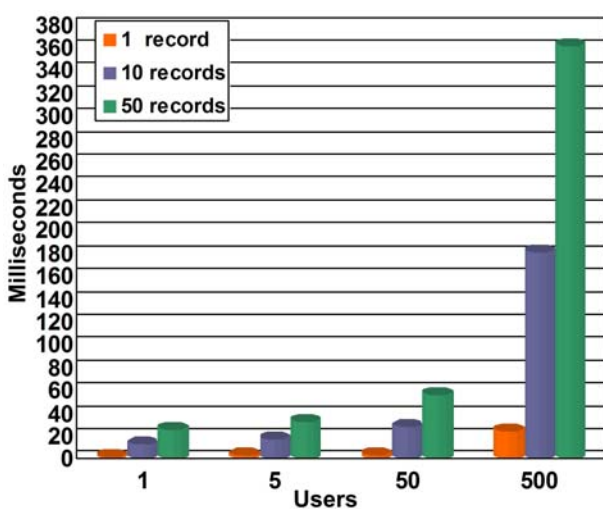
Η Sun Grid Engine (*SGE*) 6.2 χρησιμοποιήθηκε διότι επιτυγχάνει την πλήρη συνεργασία με τον WSN χρονοπρογραμματιστή καθώς επίσης υποστηρίζει το χρονοπρογραμματισμό των εργασιών που υποβάλλονται στη συστοιχία. Ο λόγος χρησιμοποίησης του SGE έγκειται στο ότι προσφέρει διατήρηση της σειράς που διαμοιράζεται ένας πόρος, δύναται να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον με διαφορετικές πολιτικές χρήσης και υποστηρίζει το δίκαιο διαμοιρασμό των πόρων μεταξύ των χρηστών της υποδομής. Για να μπορέσει να επιτευχθεί η υποβολή των εργασιών από το Globus Toolkit στο SGE, χρησιμοποιείται το EPIC [61] εργαλείο ενοποίησης. Οι μονάδες-αισθητήρες (*moten*) και οι σταθμοί βάσης τους είναι μόνιμα διασυνδεδεμένες με το δίκτυο μέσω των MIB600 Ethernet διεπαφών που διαθέτουν.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εστίαστηκαν στη διαδικασία συλλογής δεδομένων από τους αισθητήρες. Αυτό έγινε διότι η διαδικασία συλλογής δεδομένων αποτελεί την πύλη των υπολοίπων υπηρεσιών που παρέχουν οι αισθητήρες. Μέσω της αξιολόγησης αυτής της διαδικασίας δύναται να αντιληφθούμε εάν υπάρξει συμφόρηση (*bottleneck*) στο δίκτυο σε περίπτωση που οι υπόλοιπες υπηρεσίες έχουν υψηλές απαιτήσεις από αυτό. Η απεικόνιση της θερμοκρασίας έγινε με τη χρήση του nesC ώστε να επιτευχθεί η μετάδοσή της σε τακτά χρονικά διαστήματα (βλ. Σχ. 54). Εν συνεχεία, η συγκεκριμένη εφαρμογή εγκαταστάθηκε σε κάθε χρησιμοποιούμενη μονάδα-αισθητήρα (*mote*). Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων ανατέθηκε μία ουρά εργασιών (*job queue* ή *batch queue*), μέσω του SGE στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με σκοπό να επιβεβαιωθεί η ανάκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, με τα αποτελέσματά της να παρουσιάζονται στο **Σχήμα 56** αποδεικνύοντας έτσι τη διαλειτουργικότητα του δικτύου που επιτεύχθηκε με τη χρήση των διακομιστών μεσολάβησης.

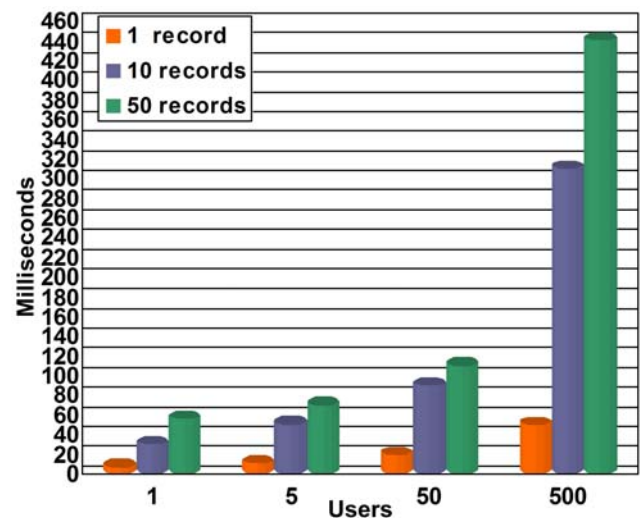
Προχωρώντας στην παρακάτω υπόθεση καθορίζουμε ότι η τιμή δειγματοληψίας της θερμοκρασίας ασθενών που βρίσκονται σε κρίσιμη κατάσταση ή χρήζουν συνεχής ιατρικής παρακολούθησης τίθεται ανά δευτερόλεπτο, οπότε μέσα σε 24 ώρες θα έχουν αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων 86.400 μετρήσεις που θα προέρχονται μόνον από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Άρα με συνεχόμενη και σταθερή δειγματοληψία θερμοκρασίας ανά δευτερόλεπτο για 2 μήνες θα ληφθούν 5.184.000 μετρήσεις θερμοκρασίας όπου θα αποθηκευτούν στη βάση δεδομένων της πλεγματικής υποδομής. Τα μηνύματα που παράγονται από τους αισθητήρες περιλαμβάνουν 10 μετρήσεις το καθένα και το μέγεθος του κάθε μηνύματος είναι 26 bytes, οπότε τα παραγόμενα δεδομένα είναι 12.86 MB. Παρόλα αυτά η προτεινόμενη υποδομή πρέπει να είναι σε θέση να εξασφαλίσει τη διαθεσιμότητα αυτών με εξασφαλισμένη ποιότητα υπηρεσίας (QoS).

Για να εξασφαλίσουμε την κλιμακωσιμότητα (*scalability*) και την προσαρμοστικότητα (*adaptability*) της προτεινόμενης υποδομής, εισάγονται διαφορετικού αριθμητικού μεγέθους χρήστες κάθε φορά, όπου όλοι υποβάλλουν ταυτόχρονα επερωτήσεις που σχετίζονται με την ανάκτηση δεδομένων που έχουν αποθηκευτεί στις βάσεις του δικτύου πλέγματος οι προερχόμενες από τους αισθητήρες μετρήσεις. Το σενάριο προσομοίωσης διαχωρίστηκε σε δύο επιμέρους σκέλη που αναλύονται ακολούθως, όπου επαναλήφθηκαν 5 φορές το καθένα ώστε να υπολογισθεί ο μέσος χρόνος ανάκτησης δεδομένων που παρουσιάζεται στα παρακάτω σχήματα. Σημειώνοντας δε, για να πραγματοποιηθεί η κάθε προσομοίωση η σύνταξη των επερωτήσεων προσαρμοζόταν ανάλογα με τις αποθηκευμένες μετρήσεις των αισθητήρων.

Το πρώτο σενάριο προσομοίωσης κάνει χρήση του προσομοιωτή Network Simulator (NS2) [62] με σκοπό να μετρήσει το μέσο χρόνο ανάκτησης των αποθηκευμένων δεδομένων σε περίπτωση που υποβληθεί μία ίδια παράλληλη επερώτηση (*concurrent query*) και 5 διαφορετικές παράλληλες επερωτήσεις σε ταυτόχρονο και ταυτόσημο χρόνο από 1, 5, 50, 500 διαφορετικούς χρήστες με σκοπό να ανακτήσουν δεδομένα που σχετίζονται με 1, 10 και 50 μετρήσεις θερμοκρασίας. Το συγκεκριμένο πρώτο σενάριο έχει δύο υποκατηγορίες προσομοίωσης. Στην πρώτη υποκατηγορία αυτού του σεναρίου προσομοίωσης πραγματοποιείται ανάκτηση δεδομένων από τα δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί στην βάση δεδομένων του πλέγματος, ενώ στη δεύτερη υποκατηγορία του πραγματοποιείται ανάκτηση δεδομένων από την *cache* των διακομιστών μεσολάβησης.



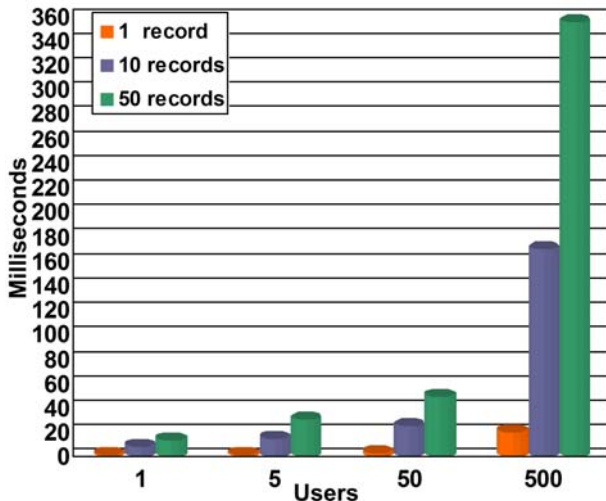
Σχήμα 57: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με Μία Ίδια Παράλληλη Επερώτηση (Cold Cache)



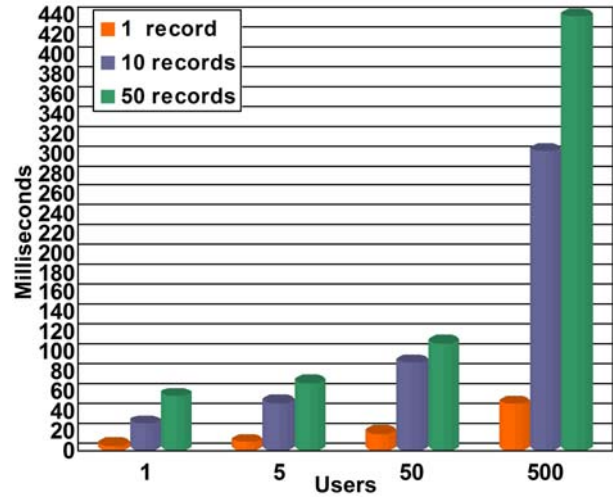
Σχήμα 58: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με 5 Διαφορετικές Παράλληλες Επερωτήσεις (Cold Cache)

Η προσομοίωση του πρώτου σεναρίου (NS2) βασίστηκε στην τοπολογία δικτύου που παρουσιάστηκε παραπάνω. Η μορφή των επερωτήσεων βασίστηκαν σε αυτήν του Πίνακα 9 και διαμορφώθηκε κατάλληλα για την κάθε περίπτωση. Στα **Σχήματα 57** και **58** απεικονίζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ανάλογα με τον αριθμό χρηστών που αποστέλλουν παράλληλες επερωτήσεις προς τη βάση δεδομένων για την ανάκτηση δεδομένων που έχουν αποσταλεί από το δίκτυο των αισθητήρων.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, παρόλο που ο αριθμός των χρηστών που προσομοιώθηκαν, με τη χρήση του NS2 [62] προσεγγίζει τους 500 ο χρόνος απόκρισης του συστήματος για την παροχή των μετρήσεων θερμοκρασίας που αντιστοιχούν στον Ηλεκτρονικό Φάκελο Υγείας (EHR) ασθενών είναι σχετικά μικρός. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τα παραπάνω αποτελέσματα ήταν αποθηκευμένες στο δίκτυο πλέγματος, η διαδικασία αυτή καλείται cold cache [68] [69].



Σχήμα 59: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με Μία Ίδια Παράλληλη Επερώτηση (Warm Cache)



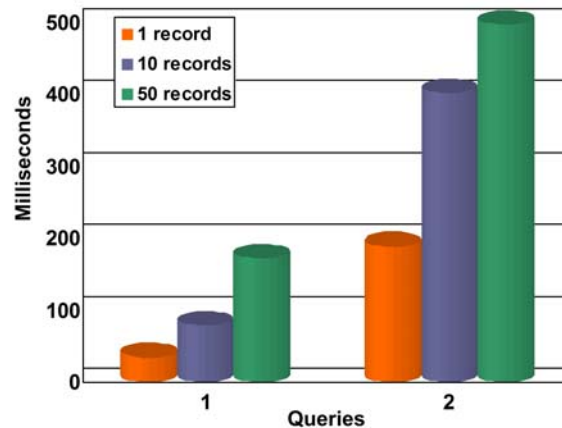
Σχήμα 60: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με 5 Διαφορετικές Παράλληλες Επερωτήσεις (Warm Cache)

Στο **Σχήμα 59** και στο **Σχήμα 60** απεικονίζονται τα αποτελέσματα όταν οι χρήστες του δικτύου αιτούνται δεδομένα μετρήσεων θερμοκρασίας με μία ίδια παράλληλη επερώτηση (*concurrent query*) και 5 διαφορετικές παράλληλες επερωτήσεις. Η μόνη διαφορά από τις προηγούμενες μετρήσεις είναι ότι η προσομοίωση δεν ανέκτησε τα δεδομένα που ήταν αποθηκευμένα στον τοπικό δίσκο του δικτύου που ήταν η βάση δεδομένων, αλλά η ανάκτηση δεδομένων έγινε από τους διακομιστές μεσολάβησης που αποτέλεσε την προτεινόμενη τεχνική διασύνδεσης του δικτύου αισθητήρων με την υποδομή του πλέγματος.

Πέραν του ρόλου διασύνδεσης που ασκούν οι διακομιστές μεσολάβησης (βλ. Κεφ. 5.4.1) αποκρύπτοντας οποιαδήποτε ετερογένεια υπάρχει μεταξύ των διαφορετικών δικτυακών τεχνολογιών. Επίσης εισάγουν τη λειτουργία του caching στο προτεινόμενο συγκλίνον δίκτυο και καλείται *warm cache* [68] [69]. Αυτό συνεπάγεται αύξηση της απόδοσης του ενοποιημένου δικτύου μειώνοντας το χρόνο ανάκτησης δεδομένων που προέρχονται από το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα παραπάνω αποτελέσματα της εκτελούμενης προσομοίωσης. Επιπλέον επιτυγχάνουν ανάκτηση δεδομένων που σχετίζονται με τις μετρήσεις θερμοκρασίας σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, καθώς αυτά βρίσκονται στη cache τους και όχι αποθηκευμένα στην υποδομή πλέγματος.

Το δεύτερο σενάριο κάνοντας χρήση του προσομοιωτή TOSSIM [63] αποσκοπεί στη μετρική αξιολόγηση του μέσου χρόνου ανάκτησης σε δεδομένα πραγματικού χρόνου μέσω του TinyDB (*Tiny DataBase*) από το TinyOS δίκτυο αισθητήρων [64] [65] σε περίπτωση που ένας χρήστης υποβάλλει μία

επερώτηση και δύο διαφορετικές παράλληλες επερωτήσεις (*concurrent queries*) στο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων ανακτώντας 1, 10 και 50 μετρήσεις θερμοκρασίας αντίστοιχα. Ο περιορισμός αυτός τίθεται μέσα στο περιβάλλον της προσομοίωσης διότι δεν δύναται να υποστηριχθεί από πλευράς TinyDB ένεκα περιορισμού μνήμης [66] [67].



Σχήμα 61: Μέσος Χρόνος Ανάκτησης Δεδομένων με Μία και με Δύο Διαφορετικές Παράλληλες Επερωτήσεις (TinyDB)

Στο **Σχήμα 61** παρατηρείται αύξηση του χρόνου απόκρισης όταν ο αριθμός των επερωτήσεων αυξάνεται. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό οφείλεται στο ότι η διαδικασία ανάκτησης δεδομένων με τη χρήση επερωτήσεων (*queries*) έχει μειωμένη απόδοση ένεκα του μηχανισμού εκτέλεσης του TinyDB που αφορά το σύστημα επεξεργασίας επερωτήσεων και ανάκτησης πληροφοριών από το TinyOS δίκτυο αισθητήρων.

Εκ των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η τεχνική διασύνδεσης που βασίστηκε στην εισαγωγή διακομιστών μεσολάβησης, εκτός του ότι συνέβαλλε στη διαλειτουργικότητα και διαδικτύωση των δύο ετερογενών δικτυακών τεχνολογιών, επέδειξε ταυτόχρονα μειωμένο χρόνο ανάκτησης δεδομένων μέσα σε περιβάλλον πολλαπλών χρηστών. Πέραν των προαναφερθέντων περιορισμών ένας επιπλέον περιορισμός που επιλύθηκε μέσα στην ακολουθούμενη αξιολόγηση απόδοσης της προτεινόμενης τεχνικής που εισάγει διακομιστές μεσολάβησης ως το κύριο μέσο διαδικτύωσης μεταξύ ετερογενών δικτυακών συστημάτων οφείλεται στη δυναμικότητα του χαρακτήρα των αποθηκευμένων δεδομένων. Δηλαδή, στη δυσκολία εκτίμησης του ακριβές χρόνου που χρειάζονται τα δεδομένα για να υπάρξει επικύρωση αυτών από τους διακομιστές μεσολάβησης μέσω του caching και την μετέπειτα αποθήκευσή τους στη βάση δεδομένων του πλέγματος.

5.6 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε μία ολοκληρωμένη πολύπλοκη υποδομή με επίκεντρο το προτεινόμενο πολύπλοκο δίκτυο που με τη χρήση των τεχνολογιών ασυρμάτου μέσου στόχο έχει την παροχή

υπηρεσιών υγειονομικής περίθαλψης σε περιβάλλοντα διάχυτου υπολογισμού. Επίσης, πραγματοποιήθηκε μία σύντομη εισαγωγή στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων τα οποία επιλέχθηκαν για να ενσωματωθούν με την υποδομή πλέγματος παράγοντας ένα συγκλίνον δίκτυο υγειονομικής περίθαλψης που αποσκοπεί στην αδιάλειπτη παρακολούθηση ασθενών και λήψη ιατρικών μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.

Το ευρύ πολύπλοκο δίκτυο αισθητήρων με πλέγμα που αναπτύχθηκε, στη συνέχεια διασυνδέθηκε με τα τοπικά πληροφοριακά συστήματα υγειονομικής περίθαλψης συγκλίνοντας έτσι δύο διαφορετικές δικτυακές τεχνολογίες καθώς και τις υπηρεσίες που αυτά ενσωματώνουν. Ο σκοπός της σύγκλισης είναι η δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου με πλέγμα που να ενσωματώνει νέες υπηρεσίες, μεικτά δικτυακά χαρακτηριστικά και ιδιότητες προεκτείνοντας και εμπλουτίζοντας ταυτόχρονα τις ήδη υπάρχουσες λειτουργίες τους. Με αυτόν τον τρόπο εμφανίζεται στο προσκήνιο η επιτακτική ανάγκη που υπάρχει για χρήση υποδομών πλέγματος σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία πέραν της επιστήμης των υπολογιστών καθώς και αυτά παρουσιάζουν αυξημένες απαιτήσεις διαδικτύωσης, επεξεργαστικής και αποθηκευτικής ισχύς.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη διαδικτύωση και διαλειτουργικότητα των ετερογενών δικτυακών τεχνολογιών και υπηρεσιών που συγκλήθηκαν μέσα στο δημιουργηθέν δίκτυο. Προκειμένου να υπάρχει όσον το δυνατόν μεγαλύτερη συμβατότητα με τις υπάρχουσες ιατρικές εφαρμογές αλλά και για να αξιοποιηθούν πλήρων όλα τα δεδομένα των ιατρικών καταχωρήσεων, παρατηρήσεων και μετρήσεων υπήρξε εναρμόνιση αυτών κατά το HL7 πρότυπο. Επίσης προτάθηκε ένα μοντέλο διαχείρισης δεδομένων υποστηρίζοντας την παραπάνω διαδικασία και θεμελιώνοντας ταυτόχρονα τα ιατρικά συστήματα αλληλεπίδρασης μέσα από μία προτεινόμενη πολυ-πρακτορική προσέγγιση.

Επίσης αναλύθηκε η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου μοντέλου SEGEDMA για πολύπλοκα δίκτυα υπολογιστών με ιδιαίτερη αναφορά να πραγματοποιείται στην προτεινόμενη τεχνική διαδικτύωσης και διαλειτουργικότητας του νέου συγκλίνοντος δικτύου. Η τεχνική διαδικτύωσης που παρουσιάστηκε βασίστηκε στη χρήση διακομιστών μεσολάβησης και μέσω του προτεινόμενου λογισμικού επτά στοιχείων που ενσωματώθηκε σε αυτούς εξασφαλίστηκε η διαλειτουργικότητα και η σύγκλιση των διαφορετικών δικτυακών τεχνολογιών. Ο απώτερος στόχος της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής είναι η επίλυση περιορισμών που σχετίζονται με την επεκτασιμότητα, κλιμακωσιμότητα, διαθεσιμότητα και την κινητικότητα των χρηστών μέσα σε ένα πλεγματοειδές περιβάλλον ενώ ταυτόχρονα επιτεύχθηκε με τη δημιουργία συγκλίνουσας υποδομής η επίλυση επεξεργαστικών και αποθηκευτικών περιορισμών που υφίστανται μέχρι στιγμής τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Το κεφάλαιο κλείνει με την παρουσίαση και επικύρωση των δεδομένων σύμφωνα με HL7 πρότυπο καθώς και με τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων σχετικά με την ανάκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, υπηρεσία που υποστηρίζεται από το προτεινόμενο μοντέλο σύγκλισης. Τα πειραματικά αποτελέσματα επικύρωσαν τη διαδικτύωση και διαλειτουργικότητα της υποδομής μέσω της διαδικασίας λήψης μετρήσεων και ανάκτησης δεδομένων. Επιπλέον, τα πειραματικά αποτελέσματα ανέδειξαν την προτεινόμενη τεχνική που βασίστηκε στη χρήση διακομιστών μεσολάβησης ως το επίκεντρο της διαδικτύωσης και διαλειτουργικότητας ανάμεσα στα ετερογενή δικτυακά περιβάλλοντα της ολοκληρωμένης πλατφόρμας που παρουσιάστηκε.

5.7 Αναφορές

- [1] C. K. Tham, R. Buyya, “*SensorGrid: Integrating Sensor Networks and Grid Computing*”, CSI Communications, vol. 29(1), pp. 24–29, 2005.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “*A Survey on Sensor Networks*”, IEEE Communications Magazine, vol. 40(8), pp. 102–114, 2002.
- [3] D. Culler, D. Estrin, M. Srivastava, “*Overview of Sensor Networks*”, IEEE Computer, vol. 37(8), pp. 41–49, 2004.
- [4] N. P. Preve, “*SEGEDMA: SENSOR GRID ENHANCEMENT DATA MANAGEMENT SYSTEM FOR HEALTH CARE COMPUTING*”, Expert Systems with Applications, Elsevier, vol. 38(3), pp. 2371–2380, 2011.
- [5] Open Geospatial Consortium (OGC), Retrieved from: <http://www.opengeospatial.org>
- [6] Health Level Seven International (HL7), Retrieved from: <http://www.hl7.org>
- [7] I. Foster, C. Kesselman, S. Tuecke, “*The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations*”, International Journal of High Performance Computing Applications, vol. 15(3), pp. 200–222, 2001.
- [8] V. Breton, K. Dean, T. Solomonides, “*The Healthgrid White Paper*”, In Proc. of Healthgrid 2005, In: T. Solomonides, R. McClatchey, V. Breton, Y. Legré, S. Nørager (Eds.), “*From Grid to Healthgrid*”, IOS Press, Studies in Health Technology and Informatics, vol. 112, pp. 249–321, 2005.
- [9] N. P. Preve, “*Ubiquitous Healthcare Computing with Sensor Grid Enhancement with Data Management System (SEGEDMA)*”, Journal of Medical Systems, Springer, vol. 35(6), pp.1375–1392, 2011.
- [10] MammoGrid, (EU), Retrieved from: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/grids/mammogrid_achievement.pdf
- [11] GEMSS (Grid Enabled Medical Simulation Services) (EU), Retrieved from: ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/ist/docs/grids/gemms_achievement.pdf
- [12] eDiaMoND, UK e-Science, Retrieved from: <http://www.ediamond.ox.ac.uk>
- [13] CLEF (Clinical E-Science Framework), Retrieved from: <http://www.nlp.shef.ac.uk/clef>
- [14] Y. Liu, J. Bacon, R. Wilson-Hinds, “*On Smart-Care: Services Studies of Visually Impaired Users in Living Contexts*”, In Proc. of the 1st IEEE International Conference on the Digital Society, pp. 32–40, 2007.
- [15] European Data Grid (EDG), Retrieved from: <http://www.eu-datagrid.web.cern.ch>

- [16] Enabling Grid for E-science (EGEE), Retrieved from: <http://www.eu-egee.org>
- [17] The Globus Alliance, Retrieved from: <http://www.globus.org/toolkit>
- [18] I. Foster, C. Kesselman, “*Globus: A Metacomputing Infrastructure Toolkit*”, International Journal of High Performance Computing Applications, vol. 11(2), pp. 115–128, 1997.
- [19] I. Foster, C. Kesselman, J. Nick, S. Tuecke, “*The Physiology of the Grid: An Open Grid Services Architecture for Distributed Systems Integration*”, Global Grid Forum, Retrieved from: <http://www.globus.org/alliance/publications/papers/ogsa.pdf>, 2002.
- [20] S. Tuecke, K. Czajkowski, I. Foster, J. Frey, S. Graham, C. Kesselman, T. Maguire, T. Sandholm, P. Vanderbilt, D. Snelling, “*Open Grid Services Infrastructure (OGSI) version 1.0*”, http://www.globus.org/alliance/publications/papers/Final_OGSI_Specification_V1.0.pdf, 2003.
- [21] G. Werner-Allen, P. Swieskowski, M. Welsh, “*Motelab: A Wireless Sensor Network Testbed*”, In Proc. of 4th IEEE International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp. 483–488, 2005.
- [22] L. Girod, J. Elson, A. Cerpa, T. Stathopoulos, N. Ramanathan, D. Estrin, “*EmStar: A Software Environment for Developing and Deploying Wireless Sensor Networks*”, In Proc. of the USENIX Annual Technical Conference, pp. 283–296. USENIX Association, 2004.
- [23] E. Ertin, A. Arora, R. Ramnath, V. Naik, S. Bapat, V. Kulathumani, M. Sridharan, H. Zhang, H. Cao, M. Nesterenko, “*Kansei: A Testbed for Sensing at Scale*”. In Proc. of the 5th IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, pp. 399–406, 2006.
- [24] Y. Guo, J. Darlington, D. Rueckert, B. Spence, H. Hassard, J. Cass, S. Durucan, “*Discovery Net: An e - Science Test Bed for High Throughput Informatics*”, Retrieved from: http://www.doc.ic.ac.uk/~mmg/dnet/testbed-Final_web.pdf
- [25] T. Devadithya, K. Chiu, K. Huffman, D. F. McMullen, “*The Common Instrument Middleware Architecture: Overview of Goals and Implementation*”, In Proc. of the 1st IEEE International Conference on e-Science and Grid Computing, pp.578–585, 2005.
- [26] M. Weiser, “*The Computer for the 21st Century*”, Scientific American, Special Issue on Communications, Computers, and Networks, vol. 265(3), 1991.
- [27] R. Bramley, K. Chiu, J. C. Huffman, K. Huffman, D. F. McMullen, “*Instruments and Sensors as Network Services: Making Instruments First Class Members of the Grid*”, Technical Report 588, Indiana University Computer Science Department, 2003, Retrieved from: <http://www.cs.indiana.edu/pub/techreports/TR588.pdf>
- [28] D. F. McMullen, R. Bramley, K. Chiu, H. Davis, T. Devadithya, J. C. Huffman, K. Huffman, T. Reichherzer, “*The Common Instrument Middleware Architecture Experiences and Future Directions*”,

- In: F. Davoli, N. Meyer, R. Pugliese, S. Zappatore (Eds), “Grid Enabled Remote Instrumentation”, Springer US, pp. 393–407, 2009.
- [29] V. Breton, K. Dean, T. Solomonides et al., “*The Healthgrid White Paper*”, In Proc. of the 3rd International Conference on Healthgrid, pp. 249–321, 2005.
- [30] National Digital Medical Archive (NDMA) Inc., Worldwide Videotex Publishers, 2005, Retrieved from: <ftp://ftp.software.ibm.com/software/solutions/pdfs/ODB-0148-02.pdf>
- [31] D. B. Keator, J.S. Grethe, D. Marcus, B. Ozyurt, S. Gadde, S. Murphy, S. Pieper, D. Greve, R. Notestine, H. J. Bockholt, P. Papadopoulos, A National Human Neuroimaging Collaboratory Enabled by the Biomedical Informatics Research Network (BIRN), IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, vol. 12(2), pp. 162–172, 2008.
- [32] Japan Medical Engineering Grid (MEGrid), Retrieved from: <http://www.biogrid.jp>
- [33] R. Buyya, S. Date, Y. Mizuno-Matsumoto, S. Venugopal, D. Abramson, “*Composition and On-Demand Deployment of Distributed Brain Activity Analysis Application on Global Grids*”, In Proc. of the 10th IEEE International Conference on High Performance Computing, pp. 1–10, 2003.
- [34] J. Fritschy, L. Horesh, D. Holder, R. Bayford, “*Applications of Grid in Clinical Neurophysiology and Electrical Impedance Tomography of Brain Function*”, In Proc. of the 3rd International Conference on Healthgrid, pp. 138–145, 2005.
- [35] P. Watry, R. Larson, “*Cheshire 3 Framework White Paper: Implementing Support for Digital Repositories in a Data Grid Environment*”, In Proc. of IEEE International Symposium on Mass Storage Systems and Technology, pp. 60–64, 2005.
- [36] P. Khan, M. A. Hussain, K. S. Kwak, “*Medical Applications of Wireless Body Area Networks*”, International Journal of Digital Content Technology and its Applications, vol. 3(3), pp. 185–193, 2009.
- [37] S. Ullah, H. Higgins, B. Braem, B. Latre, C. Blondia, I. Moerman, S. Saleem, Z. Rahman, K. S. Kwak, “*A Comprehensive Survey of Wireless Body Area Networks: On PHY, MAC, and Network Layers Solutions*”, Journal of Medical Systems, Published Online: 19 August 2010, DOI: 10.1007/s10916-010-9571-3.
- [38] M. Chen, S. Gonzalez, A. Vasilakos, H. Cao, V. C. M. Leung, “*Body Area Networks: A Survey*”, Mobile Networks and Applications, vol. 16(2), pp. 171–193, 2011.
- [39] Parallel NFS (pNFS), Retrieved from: <http://www.pnfs.com>
- [40] Andrew File System (AFS), Retrieved from: <https://itservices.stanford.edu/service/afs>
- [41] Lustre, Retrieved from: <http://www.lustre.org>

- [42] G. A. Cowan, G. A., Stewart, B. Dunne, A., Elwell, A. P. Miller, “*Optimising LAN Access to Grid Enabled Storage Elements*”, Journal of Physics: Conference Series, vol. 119:062047, IOP Publishing, 2008.
- [43] A. Shoshani, A. Sim, J. Gu, “*Storage Resource Managers: Middleware Components for Grid Storage*”, In Proc. of the 19th IEEE Symposium on Mass Storage Systems, pp. 209–224, 2002.
- [44] J. Joseph, C. Fellenstein, “*Grid Computing: On Demand Series*”, 1st Edition, IBM Press, 2004.
- [45] M. Gaynor, S. L. Moulton, M. Welsh, E. LaCombe, A. Rowan, J. Wynne, “*Integrating Wireless Sensor Networks with the Grid*”, IEEE Internet Computing, vol. 8(4), pp. 32–39, 2004.
- [46] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, “*Wireless Sensor Networks: A Survey*”, Computer Networks, vol. 38(4), pp. 393–422, 2002.
- [47] G. Della-Libera, B. Dixon, J. Farrell, P.t Garg, M. Hondo, C. Kaler, B. Lampson, K. Lawrence, A. Layman, P. Leach, J. Manferdelli, H. Maruyama, A. Nadalin, N. Nagaratnam, R. Rashid, J. Shewchuk, D. Simon, A. Wesley, “*Security in a Web Services World: A Proposed Architecture and Roadmap*”, IBM and Microsoft Corporation, White Paper, 2002, Retrieved from: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms977312.aspx>
- [48] C. Smith, “*Open Source Metascheduling for Virtual Organizations with the Community Scheduler Framework (CSF)*”, Technical White Paper, Platform Computing Inc., 2004, Retrieved from: http://www.cs.virginia.edu/~grimshaw/CS851-2004/Platform/CSF_architecture.pdf
- [49] A. Andrieux, K. Czajkowski, A. Dan, K. Keahey, H. Ludwig, T. Nakata, J. Pruyne, J. Rofrano, S. Tuecke, M. Xu, “*Web Services Agreement Specification (WS-Agreement)*”, Technical Report GFD-R.192, Open Grid Forum, 2011, Retrieved from: <http://www.ogf.org/documents/GFD.192.pdf>
- [50] P. C. Moore, W. R. Johnson, R. J. Detry, “*Adapting Globus and Kerberos for a Secure ASCI Grid*”, In Proc. of the 2001 ACM/IEEE Conference on Supercomputing, pp. 54, 2001.
- [51] M. MacKenzie, K. Laskey, F. McCabe, P. Brown, R. Metz, B. Hamilton, “*Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0*”, OASIS Standard, 2006, Retrieved from: <http://www.oasis-open.org/committees/download.php/19679/soa-rm-cs.pdf>
- [52] I. Foster, H. Kishimoto, A. Savva, D. Berry, A. Djaoui, A. Grimshaw, B. Horn, F. Maciel, F. Siebenlist, R. Subramanian, J. Treadwell, J. Von Reich, “*Open Grid Services Architecture (OGSA), Version 1.5*”, Open Grid Forum, 2006, Retrieved from: <http://ogf.org/documents/GFD.80.pdf>
- [53] Open Grid Forum, Retrieved from: <http://www.ogf.com>
- [54] G. Eysenbach, “*What is e-health?*”, Journal of Medical Internet Research, vol. 3(2), pp. 20, 2001.
- [55] European Commission, Health-EU, Retrieved from: <http://www.ec.europa.eu/health-eu>

- [56] M. Eichelberg, T. Aden, J. Riesmeier, A. Dogac, G. B. Laleci, “*A Survey and Analysis of Electronic Healthcare Record Standards*”, *Journal of ACM Computing Surveys*, vol. 37(4), pp. 277–315, 2005.
- [57] MySQL, Retrieved from: <http://www.mysql.com>
- [58] B. Sotomayor, “*The Globus Toolkit 3 Programmer's Tutorial*”, 2004, Retrieved from: http://gdp.globus.org/gt3-tutorial/singlehtml/progtutorial_0.4.3.html#id2542451
- [59] J. Hill, R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. Culler, K. Pister, “*System Architecture Directions for Networked Sensors*”, *ACM Special Interest Group on Programming Languages (ACM – SIGPLAN)*, vol. 35(11), pp. 93–104, 2000.
- [60] D. Gay, P. Levis, R. von Behren, M. Welsh, E. Brewer, D. Culler, “*The nesC Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems*”, *ACM Special Interest Group on Programming Languages (ACM- SIGPLAN)*, vol. 38(5), pp. 1–11, 2003.
- [61] Epic-Sun Grid Engine Integration with Globus Toolkit, Retrieved from: <http://www.lesci.ac.uk/projects/epic-gt-sge.html>
- [62] Network Simulator (NS-2), Retrieved from: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>
- [63] P. Levis, N. Lee, M. Welsh, D. Culler, “*TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications*”, *Proceeding of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 126–137, 2003.
- [64] TinyDB, A Declarative Database for Sensor Networks, “*A Query Processor for Sensor Networks*”, Retrieved from: <http://www.telegraph.cs.berkeley.edu/tinydb/software.html>
- [65] S. Madden, J. Hellerstein, W. Hong, “*TinyDB: In-Network Query Processing in TinyOS*”, 2003, Retrieved from: <http://www.telegraph.cs.berkeley.edu/tinydb/tinydb.pdf>
- [66] R. Muller, G. Alonso, D. Kossman, “*A Virtual Machine for Sensor Networks*”, *ACM Special Interest Group on Operating Systems of Operating Systems Review (ACM – SIGOPS)*, vol. 41(3), pp. 145–158, 2007.
- [67] P. Levis, D. Culler, “*Maté: A Tiny Virtual Machine for Sensor Networks*”, *ACM Special Interest Group on Computer Architecture on Computer Architecture News (ACM – SIGARCH)*, vol. 30(5), pp. 85–95, 2002.
- [68] J. J. Ordille, P. B. Miller, “*Distributed Active Catalogs and Meta-Data Caching in Descriptive Name Services*”, In *Proc. of the 13th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, pp. 120–129, 1993.
- [69] C. Schimmel, “*UNIX® Systems for Modern Architectures: Symmetric Multiprocessing and Caching for Kernel Programmers*”, 1st Edition, Addison-Wesley Professional, 1994.

6. Συμπεράσματα

6.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται το θέμα της μιμητικής συμπεριφοράς μίας αποικίας μυρμηγκιών και προτείνει έναν ACO (*Ant Colony Optimization*) αλγόριθμο με σκοπό την αντιμετώπιση ζητημάτων που προκύπτουν ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη ανάθεση και χρονοδρομολόγηση των υποβαλλόμενων εργασιών μέσα σε περιβάλλοντα πολύπλοκων δικτύων υπολογιστών. Όπως έχει ήδη παρουσιασθεί, ένα πολύπλοκο δίκτυο υπολογιστών αποτελείται από ένα σύνολο ενοποιημένων ετερογενών δικτυακών υποδομών που δύναται να παρέχει υπηρεσίες αδιάλειπτα οπουδήποτε και αν βρίσκεται ο χρήστης μέσα στο δίκτυο. Η μίμηση ενός μοντέλου εμπνευσμένου από το φυσικό κόσμο και η εφαρμογή του μέσα σε ένα πολύπλοκο ψηφιακό υπερ-υπολογιστικό περιβάλλον αποτελεί πρόκληση για την ακολουθούμενη διαδικασία της ανάθεσης και χρονοδρομολόγησης των υποβαλλόμενων εργασιών.

6.2 Συμβολή Εργασίας στην Έρευνα

Σε αυτά τα πλαίσια έρευνας, προτάθηκαν και αναλύθηκαν αρχιτεκτονικές καθώς και μηχανισμοί ενοποίησης που διέπουν τις υλοποιήσεις πολύπλοκων δικτύων. Επίσης παρουσιάστηκε ένας νέος βελτιωμένος ACO αλγόριθμος μίμησης αποικίας μυρμηγκιών και πραγματοποιήθηκε σύγκρισή του με τους ήδη χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους που έχουν αναπτυχθεί για πολύπλοκα δικτυακά περιβάλλοντα. Επιπλέον, παρουσιάστηκε μία νέα τεχνική ενοποίησης δίδοντας έμφαση στην ανάγκη ανάπτυξης νέων μηχανισμών που αποσκοπούν στη διασύνδεση ετερογενών δικτύων μέσα σε πολύπλοκα συστήματα και δικτυακά περιβάλλοντα. Η συνεισφορά της παρούσας διδακτορικής διατριβής εστιάζεται στις εξής καινοτομίες:

- (i) Προτείνει έναν μιμητικό βελτιωμένο ACO αλγόριθμο που βασίζεται στη συμπεριφορά της αποικίας μυρμηγκιών κατά τη διάρκεια εξεύρεσης τροφής.

Ο προτεινόμενος μιμητικός ACO αλγόριθμος έχει σχεδιαστεί με στόχο να επιλύει τα συνεχή προβλήματα κατανομής των διαμοιραζόμενων πόρων που εμφανίζονται μέσα σε πολύπλοκα δίκτυα, όπως των πλεγματικών περιβαλλόντων, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα εξισορρόπηση φόρτου του υπολογιστικού φόρτου μέσα στο δίκτυο μέσω της βέλτιστης ανάθεσης και χρονοδρομολόγησης των υποβαλλόμενων εργασιών. Επίσης, πραγματοποιείται σύγκριση με τους ήδη χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους με στόχο να αξιολογηθεί η αποδοτικότητά του.

- (ii) Παρουσιάζει την υλοποίηση μίας καινοτόμου αρχιτεκτονικής ενοποίησης πολύπλοκου δικτύου που έχει ως βάση την τεχνολογία των πολύπλοκων δικτύων με τις τεχνολογίες ασυρμάτου μέσου.

Σκοπός αυτής είναι να προσδώσει επιπλέον χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα μέσα σε ένα πολύπλοκο δίκτυο που σχετίζονται με την επεκτασιμότητα, κλιμακωσιμότητα, προσαρμοστικότητα, ευελιξία, διαθεσιμότητα και κινητικότητα. Επιτυγχάνοντας έτσι το ενοποιημένο πολύπλοκο δίκτυο να έχει υβριδική δομή ευνοώντας τη χρήση αμφίδρομων υπηρεσιών και εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο που αρχικά είτε δεν ήταν διαθέσιμες είτε δεν ήταν διαλειτουργικές. Η συνολική αρχιτεκτονική του πλαισίου διαχείρισης και παροχής εξατομικευμένων υπηρεσιών βασίζεται σε ανοιχτές τεχνολογίες όπως οι XML τεχνολογίες και πρότυπα αμιγώς παραμετροποιήσιμα. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της προτεινόμενης υποδομής είναι ότι η ενιαία διεπαφή των εφαρμογών, υπηρεσιών υποστηρίζουν και προάγουν τη διαλειτουργικότητα των ετερογενών δικτυακών περιβαλλόντων διευκολύνοντας έτσι την ενσωμάτωση διαφόρων εφαρμογών στο δίκτυο.

- (iii) Αναλύει και επιδεικνύει την εφαρμογή και την αναγκαιότητα των πολύπλοκων δικτύων σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία πέραν της επιστήμης των υπολογιστών.

Παρουσιάζει ως βάση υλοποίησης τα πολύπλοκα δίκτυα και συγκεκριμένα το πλεγματοειδές περιβάλλον, πραγματοποιείται εξατομικευση της υποδομής για κάθε ανάγκη ξεχωριστά λαμβάνοντας πάντα ως επίκεντρο τις ιδιαίτερες ανάγκες του χρήστη. Ταυτόχρονα η αξιολόγηση του προτεινόμενου πλαισίου έχει στόχο να επιδείξει τη χρηστικότητα του καθώς και τη συνεισφορά του σε κάθε επιστημονικό πεδίο ξεχωριστά. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στις μετρικές αξιολογήσεις των πεδίων εφαρμογής των πολύπλοκων δικτύων σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία όπως είναι η ιατρική επιστήμη και η γεωεπιστήμη.

- (iv) Προτείνει ένα πλαίσιο μηχανισμών και τεχνικών ενοποίησης επιλύοντας οποιοσδήποτε περιορισμούς διασύνδεσης και διαλειτουργικότητας προκύπτουν από την ετερογένεια των ενοποιημένων πολύπλοκων δικτύων.

Για να επιτευχθεί η διασύνδεση και διαλειτουργικότητα, εισάγονται διακομιστές μεσολάβησης (*proxy servers*) που σκοπός έχουν την εξασφάλιση της ομοιογένειας μέσα στο νέο δικτυακό περιβάλλον αποκρύπτοντας οποιαδήποτε ασυμβατότητα υλικού ή/και λογισμικού υπάρχει παρέχοντας έτσι στον χρήστη την έννοια μίας ολοκληρωμένης υποδομής πλέγματος.

- (v) Αναπτύχθηκαν ποικίλες μελέτες περιπτώσεων πραγματικών σεναρίων ώστε να αξιολογηθεί η προτεινόμενη πολύπλοκη δικτυακή υποδομή ως προς τη διαλειτουργικότητα και χρηστικότητά της. Η διενέργεια προσομοιώσεων αποσκοπούσε στην επιβεβαίωση και αξιολόγηση της διαλειτουργικότητας που επιτεύχθηκε μέσω της προτεινόμενης πολύπλοκης δικτυακής υποδομής για κάθε σενάριο ξεχωριστά. Οι πειραματικές δοκιμές χρήσης του πολύπλοκου δικτύου χωρίστηκαν σε τρία στάδια περιλαμβάνοντας διαφορετικά σενάρια με πραγματικούς χρήστες.

Τέλος, οι καινοτομίες που προτάθηκαν και αναλύθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής διαμορφώνουν μία ολοκληρωμένη λύση στον τομέα των πολύπλοκων δικτύων δίδοντας ταυτόχρονα έναυσμα

για μελλοντικές επεκτάσεις αυτών καθώς και μελλοντικές εφαρμογές τους πέραν του προτεινόμενου πολύπλοκου δικτυακού περιβάλλοντος.

6.3 Προοπτικές – Μελλοντικές Επεκτάσεις

Οι ερευνητικές προοπτικές που προκύπτουν από την παρούσα διδακτορική διατριβή με βάση το πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται είναι αρκετές. Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται ορισμένες από τις προοπτικές και τις μελλοντικές επεκτάσεις που δύναται να αποτελέσουν αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα.

Στο πλαίσιο της πλήρους αξιοποίησης των δυνατοτήτων που προσφέρουν οι ACO αλγόριθμοι προκειμένου να παρουσιασθεί ένα πιο συμπαγές αποτέλεσμα ειδικά στους τομείς της βέλτιστης χρονοδρομολόγησης εργασιών, ανεύρεσης και ανάθεσης πόρων θα ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές φωλιές μυρμηγκιών ή/και αφιερωμένες αποικίες μυρμηγκιών με σκοπό να προσφέρουν διαρκή ενημέρωση για τους άμεσα διαθέσιμους δικτυακούς πόρους. Υποστηρίζοντας με αυτόν τον τρόπο την διαρκή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ όλων των διαθέσιμων πόρων του δικτύου και των χρηστών.

Η καινοτόμος τεχνική διαλειτουργικότητας και διαδικτύωσης που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής δύναται να εφαρμοστεί επιτυχώς μέσα σε πολύπλοκα δίκτυα υπολογιστών. Βέβαια, στον τομέα της προτυποποίησης κρίνεται αναγκαία η θεμελίωση κοινών προτύπων διαλειτουργικότητας μεταξύ των εμπλεκόμενων δικτυακών συστημάτων καθώς με αυτόν τον τρόπο δύναται να επιτευχθούν εξαιρετικά οφέλη στην ερευνητική κοινότητα.

Η περαιτέρω εξέλιξη του προτεινόμενου χρονοπρογραμματιστικού ACO αλγόριθμου με καθολική και κοινή χρήση του από όλα τα επιμέρους υποσυστήματα μέσα σε ένα πολύπλοκο δίκτυο υπολογιστών κρίνεται απαραίτητη εάν υπάρχει ανάγκη για να υποστηριχθεί περισσότερο η διαλειτουργικότητα και η χρονοδρομολόγηση των εργασιών μέσα σε οποιαδήποτε υλοποιημένη πολύπλοκη υποδομή. Πέραν τούτου, δύναται να επιτευχθεί επιπλέον μείωση του κόστους επικοινωνίας και της καταναλισκόμενης ενέργειας των συστημάτων αυξάνοντας ταυτόχρονα το συνολικό διαθέσιμο εύρος ζώνης του δικτύου.

Επίσης, ο προτεινόμενος ACO αλγόριθμος δύναται να εξελιχθεί και να ενσωματώσει λειτουργίες όπως η άμεση εξεύρεση διαθέσιμων αποθηκευτικών πόρων καθώς και η ενσωμάτωση στον παραπάνω αλγόριθμο της λειτουργίας συγκέντρωσης (*aggregation*) δεδομένων σε κόμβους του δικτύου διευκολύνοντας έτσι τη μεταφορά τμημάτων δεδομένων μέσα στο πολύπλοκο δίκτυο πριν ξεκινήσει μία εργασία την εκτέλεσή της σε αυτόν. Σκοπός αυτού είναι η μείωση της πιθανότητας ύπαρξης συμφόρησης μέσα στο πολύπλοκο δίκτυο που δύναται να εμφανισθεί κατά την ταυτόχρονη μεταφορά δεδομένων που απαιτούνται για την εκτέλεση της υποβαλλόμενης εργασίας.

Μελλοντική επέκταση των πολύπλοκων συστημάτων που αναλύθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής δύναται να αποτελέσουν οι μελέτες νέων σεναρίων χρήσης και εφαρμογής των πολύπλοκων δικτύων σε χρηματοοικονομικές εφαρμογές, στην εκπαίδευση και σε άλλα επιστημονικά πεδία,

πέραν της επιστήμης των υπολογιστών, καθώς έτσι θα επιτευχθεί περαιτέρω βελτίωση και εξατομίκευση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής.

Με την νέα υλοποίηση ενός πολύπλοκου δικτύου πρέπει να αναπτυχθεί ένα ενιαίο προτυποποιημένο διαχειριστικό εργαλείο που θα λαμβάνει υπόψη του τους διαφορετικούς κανόνες ασφαλείας του εκάστοτε εικονικού οργανισμού (VO) και τις ποικίλες πολιτικές ιδιωτικότητας των χρηστών που δύναται να υπάρξουν μέσα σε ένα δικτυακό περιβάλλον, ενώ θα πρέπει να χρησιμοποιείται καθολικά από τους διαχειριστές του δικτύου μέσα στο πολύπλοκο δικτυακό περιβάλλον.

Η απόρροια της παρούσας διατριβής εστιάζει στην ανάπτυξη ενός μιμητικού ACO αλγορίθμου που σκοπό έχει να επιτύχει τη βέλτιστη εξισορρόπηση του συνολικού φόρτου μέσα σε ένα πολύπλοκο δίκτυο υπολογιστών που αποτελείται από διαφορετικά ετερογενή δικτυακά περιβάλλοντα. Τέλος, μέσω των προτεινόμενων μηχανισμών και τεχνικών που αναπτύσσονται υποστηρίζεται η διαλειτουργικότητα μέσα σε πολύπλοκα δικτυακά περιβάλλοντα ενώ υποδεικνύεται μέσω των ολοκληρωμένων εφαρμογών που αναπτύχθηκαν η χρηστικότητα τους και σε πεδία πέραν της επιστήμης των υπολογιστών.