



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Iωάννης N. Αθανασιάδης
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών

**Μεθοδολογία Ανάπτυξης Συστημάτων
Πρακτόρων Λογισμικού σε Εφαρμογές
Περιβαλλοντικής Πληροφορικής**

Διδακτορική Διατριβή

Θεσσαλονίκη 2005



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Μεθοδολογία Ανάπτυξης Συστημάτων
Πρακτόρων Λογισμικού σε Εφαρμογές
Περιβαλλοντικής Πληροφορικής

Διδακτορική Διατριβή
που εκπονήθηκε ως μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
για την απονομή του τίτλου του Διδάκτορα Μηχανικού

του
Ιωάννη N. Αθανασιάδη
Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Μηχανικού Υπολογιστών

Επιβλέπων
Περικλής Α. Μήτκας
Αναπληρωτής Καθηγητής

Συμβουλευτική Επιτροπή
Ιωάννης Μυλόπουλος Λουκάς Πέτρου
Καθηγητής Αναπληρωτής Καθηγητής

Υποστηρίχθηκε δημόσια στη Θεσσαλονίκη, στις 23 Μαρτίου 2005

Εξεταστική Επιτροπή

.....
Περικλής Α. Μήτκας **Ιωάννης Μυλόπουλος** **Λουκάς Πέτρου**
Αναπληρωτής Καθηγητής Καθηγητής Αναπληρωτής Καθηγητής

.....
Μιχαήλ Γ. Στρίντζης **Βασίλειος Πετρίδης** **Γεώργιος Χασάπης**
Καθηγητής Καθηγητής Καθηγητής

.....
Κωνσταντίνος Καρατζάς
Επίκουρος Καθηγητής

Στο θείο μου Γιάννη Ξενόπουλο

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xv
Κατάλογος Δημοσιεύσεων	xvii
Γλωσσάρι	xxi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ορισμός του προβλήματος	1
1.2 Προσέγγιση του προβλήματος	2
1.3 Διάρθρωση της διατριβής	3
I Προσέγγιση της περιβαλλοντικής πληροφορικής με πράκτορες	7
2 Η περιβαλλοντική πληροφορική	9
2.1 Η αξία της περιβαλλοντικής πληροφορίας	9
2.2 Η Περιβαλλοντική πληροφορική	12
2.2.1 Η περιβαλλοντική πληροφορική	12
2.2.2 Η οικολογική πληροφορική	14
2.2.3 Ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αποτίμηση με τη βοήθεια υπολογιστή	16
2.2.4 Επιστημονικές κοινότητες και δίκτυα εργασίας	17
2.3 Τα συστήματα περιβαλλοντικής πληροφορίας	19
2.3.1 Γενικά	19
2.3.2 Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για το περιβάλλον	20
2.3.3 Ταξινομία των ΣΠΠ	21
2.4 Η σημερινή κατάσταση και οι προκλήσεις	23
3 Πράκτορες λογισμικού και συστήματα πρακτόρων	25
3.1 Αυτόνομοι πράκτορες	25
3.1.1 Η έννοια του πράκτορα	25
3.1.2 Σχολές ανάπτυξης πρακτόρων	27
3.2 Τεχνικές ανάπτυξης λογισμικού με πράκτορες	29
3.2.1 Πράκτορες λογισμικού	29
3.2.2 Συστήματα πρακτόρων	30
3.2.3 Τυπικός πράκτορας λογισμικού	32
3.2.4 Εσωτερική αρχιτεκτονική πράκτορα λογισμικού	33

3.3 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των πρακτόρων λογισμικού	36
3.4 Τα συστήματα πρακτόρων λογισμικού	38
3.4.1 Εισαγωγικά	38
3.4.2 Τύποι συστημάτων πολλών πρακτόρων	39
3.4.3 Επικοινωνία πρακτόρων	41
3.4.4 Η τεχνολογία πρακτόρων	45
4 Οι πράκτορες στην περιβαλλοντική πληροφορική	49
4.1 Σκοπιμότητα της προσέγγισης	49
4.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση	50
4.2.1 Συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης περιβαλλοντικής πληροφορίας	51
4.2.2 Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για το περιβάλλον	53
4.2.3 Συστήματα προσομοίωσης σεναρίων	54
4.2.4 Σύνοψη και παρατηρήσεις στη βιβλιογραφία	56
4.3 Ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εργασίας με πράκτορες λογισμικού	59
4.3.1 Η περιοχή στόχου	59
4.3.2 Οι πράκτορες λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική	61
4.4 Μεθοδολογική προσέγγιση	64
4.4.1 Μοντέλα πρακτόρων σε περιβαλλοντικές εφαρμογές	64
4.4.2 Συστήματα πρακτόρων για την ανάπτυξη ΟΣΠΠ	69
4.4.3 Οδηγός ανάπτυξης ΣΠ σε περιβαλλοντικές εφαρμογές	70
II Πράκτορες λογισμικού για τη διαχείριση περιβαλλοντικής πληροφορίας & την υποστήριξη αποφάσεων	75
5 Μια γενικευμένη προσέγγιση με πράκτορες λογισμικού	77
5.1 Εισαγωγή	77
5.1.1 Παρατήρηση του περιβάλλοντος	77
5.2 Παρακολούθηση και Διαχείριση Περιβαλλοντικής Πληροφορίας	78
5.2.1 Τα ΣΠΑΠΠ και τα ΟΣΥΑΔΠ	78
5.2.2 Τα ΟΣΥΑΔΠ και οι ΠΛ	80
5.2.3 Ορισμός του προβλήματος	81
5.3 Μεθοδολογία	83
5.3.1 Γενική περιγραφή	83
5.3.2 Οι πράκτορες ως φορείς πληροφορίας	84
5.3.3 Οι πράκτορες ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων	86
5.4 Ένα κατανεμημένο σύστημα διαχείρισης και διάχυσης περιβαλλοντικής πληροφορίας	87
5.4.1 Στόχοι του συστήματος	87
5.4.2 Γενική περιγραφή του AISLE	88
5.4.3 Ο μηχανισμός λειτουργίας του AISLE	90
5.4.4 Μια γενική αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων για το AISLE	90
5.4.5 Υλοποίηση του συστήματος & τεχνολογίες ανάπτυξης	91
5.5 Επίδειξη χρήσης - Εφαρμογές	92
5.5.1 Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας στην περιοχή της Βαλένθια	92
5.5.2 Σύστημα παρακολούθησης των αλιματολογικών συνθηκών στη Κύπρο	95
5.6 Συζήτηση - σύνοψη	96

6 Σύστημα πρακτόρων για τη διαχείριση της πληροφορίας και την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα	99
6.1 Εισαγωγικά	99
6.1.1 Τα Επιχειρησιακά Κέντρα Ποιότητας του Αέρα	99
6.2 Ανάλυση - Λειτουργική περιγραφή	100
6.2.1 Στόχοι του συστήματος	100
6.2.2 Εργασίες του συστήματος	102
6.2.3 Ανάθεση εργασιών στους ΠΛ	102
6.2.4 Αρχιτεκτονική και λειτουργική προδιαγραφή	103
6.3 Προδιαγραφή συστήματος	105
6.3.1 Μοντελοποίηση	105
6.3.2 Επικοινωνία πρακτόρων	106
6.3.3 Οντολογία	106
6.3.4 Διορίες παραδόσης	108
6.4 Εσωτερική δομή πρακτόρων	109
6.4.1 Πράκτορας συνεισφοράς	109
6.4.2 Πράκτορας Συναγερμού	110
6.4.3 Πράκτορας Βάσης Δεδομένων	112
6.4.4 Πράκτορας διανομέας	112
6.5 Υλοποίηση του Συστήματος Ο3RTAA	112
6.5.1 Τεχνολογίες ανάπτυξης	112
6.5.2 Η ροή της πληροφορίας	113
6.6 Σύνοψη-Συμπεράσματα	115
7 Η διαδικασία λήψης αποφάσεων για την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα και η ενσωμάτωσή της σε πράκτορες	117
7.1 Αποτίμηση της ποιότητας του αέρα	117
7.1.1 Δείκτες ποιότητας της ατμόσφαιρας	117
7.1.2 Προβλήματα και ο ανθρώπινος παράγοντας	118
7.2 Η διαδικασία λήψης αποφάσεων	119
7.2.1 Περιγραφή του προβλήματος	119
7.2.2 Κόμβοι απόφασης	120
7.2.3 Χρήση περιβαλλοντικών μετρήσεων για την επαγωγή μοντέλων πρόβλεψης	121
7.2.4 Η προοπτική χρήσης των επαγωγικών μοντέλων πρόβλεψης	121
7.2.5 Υπόθεση εργασίας	122
7.3 Εξόρυξη γνώσης από δεδομένα ποιότητας αέρα	122
7.3.1 Πειραματική διάταξη	122
7.3.2 Διαθέσιμα δεδομένα και προεπεξεργασία	123
7.4 Δημιουργία των μοντέλων απόφασης	124
7.4.1 Μοντέλο υποστήριξης αποφάσεων για την επικύρωση καταγραφόμενων μετρήσεων	124
7.4.2 Μοντέλο υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση ελλιπών μετρήσεων	125
7.5 Αποτελέσματα	127
7.5.1 Επαγωγή δένδρων απόφασης, εκπαίδευση και έλεγχος	127
7.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα	128
7.5.3 Ενσωμάτωση των μοντέλων απόφασης στους ΠΛ - Επίδειξη	129
7.6 Σύνοψη	133

III Πράκτορες Λογισμικού για την προσομοίωση σεναρίων και την υποστήριξη αποφάσεων

135

8 Ο μηχανισμός διάχυσης της επιρροής σε μια κοινωνία πρακτόρων	137
8.1 Εισαγωγικά	137
8.1.1 Γενικά (σκοπός-κίνητρο)	137
8.1.2 Προσομοίωση με μοντέλα πολλών πρακτόρων	138
8.2 Από τις θεωρίες κοινωνικής επικοινωνίας στο μηχανισμό διάχυσης της επιρροής	139
8.2.1 Μοντέλα κοινωνικής επικοινωνίας	139
8.2.2 Κοινωνικό πλέγμα και η έννοια της γειτονίας	141
8.2.3 Ο μηχανισμός διάχυσης της επιρροής	142
8.2.4 Αντιληψη των κοινωνικών σημάτων και η συνάρτηση διάθλασης	143
8.3 Ο προσομοιωτής DAWN	145
8.3.1 Λειτουργικές απαιτήσεις	145
8.3.2 Η εφοδιαστική αλυσίδα ζήτησης του νερού σε αστικές περιοχές και η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων	146
8.3.3 Η επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης	147
8.4 Μοντελοποίηση με πράκτορες	149
8.4.1 Μεθοδολογική προσέγγιση	149
8.4.2 Ρόλοι πρακτόρων	150
8.4.3 Μοντέλο πρακτόρων	152
8.4.4 Επικοινωνία πρακτόρων	153
8.4.5 Οντολογία της εφαρμογής	153
8.5 Υλοποίηση	154
8.6 Σύνοψη	156
9 Προσομοίωση σεναρίων με πράκτορες για την αστική κατανάλωση νερού	157
9.1 Διαχείριση νερού στις αστικές περιοχές	157
9.1.1 Γενικά	157
9.1.2 Διαχείριση της ζήτησης του νερού	159
9.1.3 Η αστική κατανάλωση του νερού και ο κοινωνικός παράγοντας	160
9.1.4 Μοντέλα πρακτόρων για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων	161
9.1.5 Η εφοδιαστική αλυσίδα ζήτησης του νερού στο DAWN	163
9.2 Συλλογιστική των πρακτόρων	163
9.2.1 Το οικονομετρικό μοντέλο	163
9.2.2 Το κοινωνικό μοντέλο και ο μηχανισμός διάχυσης της επιρροής	164
9.2.3 Υβριδικό μοντέλο DAWN	165
9.3 Πειράματα	165
9.3.1 Εφαρμογή στη μητροπολιτική περιοχή της Θεσσαλονίκης	165
9.3.2 Παραμετροποίηση και βαθμονόμηση	166
9.3.3 Τα εναλλακτικά σενάρια πολιτικών εξοικονόμησης	169
9.3.4 Αποτελέσματα και συμπεράσματα της προσομοίωσης	173
IV Επίλογος	175
10 Σύνοψη, συμπεράσματα και προεκτάσεις της διατριβής	177
10.1 Ανακεφαλαίωση	177
10.1.1 Συμπεράσματα και συνεισφορά της διατριβής	178
10.2 Πιθανές επεκτάσεις της διατριβής	179

Βιβλιογραφικές αναφορές	181
Ευρετήριο	199

Κατάλογος Σχημάτων

1.1 Η προσέγγιση της περιβαλλοντικής πληροφορικής με πράκτορες	4
2.1 Τα επίπεδα της περιβαλλοντικής πληροφορίας	10
2.2 Ο διαμεσολαβητικός ρόλος της περιβαλλοντικής πληροφορικής	13
2.3 Τύποι συστημάτων οικολογικής πληροφορικής	15
2.4 Τύποι συστημάτων περιβαλλοντικής πληροφορικής	23
3.1 Αυτόνομοι πράκτορες λογισμικού	26
3.2 Τυπικός πράκτορας λογισμικού	33
3.3 Πράκτορας λογισμικού με μνήμη	35
3.4 Πράκτορας λογισμικού με κατάσταση	36
3.5 Η ταξινόμηση των συστημάτων πρακτόρων με βάση τα χαρακτηριστικά των πρακτόρων	39
3.6 Ταξινόμηση των διαφορετικών τρόπων με τους οποίους οι πράκτορες συντονίζουν τις ενέργειές τους	42
4.1 Ταξινόμηση συστημάτων περιβαλλοντικής πληροφορικής, ως προς τις τεχνικές σχεδίασης και ανάπτυξης λογισμικού	56
4.2 Η περιοχή στόχου της προσέγγισης	60
4.3 Ο ρόλος των ΠΛ σε περιβαλλοντικές εφαρμογές	62
4.4 Συσχέτιση τύπων πρακτόρων και κατηγοριών ΣΠΠ	63
4.5 Συσχέτιση κατηγοριών ΣΠΠ και τύπων ΠΛ	64
4.6 Η αλληλεπίδραση ενός πράκτορα της εργαλειοθήκης με το περιβάλλον του	65
4.7 Εσωτερική δομή και συμπεριφορά πράκτορα-φορέα πληροφορίας	67
4.8 Εσωτερική δομή και συμπεριφορά πράκτορα-υπεύθυνου λήψης αποφάσεων	68
4.9 Εσωτερική δομή και συμπεριφορά πράκτορα-κοινωνικού εικονογράφου	69
4.10 Αφηρημένη αρχιτεκτονική ενός ΣΠ για περιβαλλοντικές εφαρμογές	70
4.11 Οδηγός ανάπτυξης ΣΠ σε περιβαλλοντικές εφαρμογές	73
5.1 Κατηγοριοποίηση των ΣΠΔ-Αναγνώρισης με πράκτορες	80
5.2 Μια αφηρημένη όψη της μεθοδολογίας	83
5.3 Η τοπολογία του AISLE	89
5.4 Ο μηχανισμός του AISLE, ως συνέργεια τριών συνεργαζόμενων ομάδων λειτουργιών	91
5.5 Η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων AISLE	92
5.6 Στιγμιότυπο της εφαρμογής AISLE	93

5.7 Η αρχιτεκτονική του AISLE με AORML	94
5.8 Στιγμιότυπο της εφαρμογής O ₃ RTAA στη Βαλένθια	95
5.9 Ένα στιγμιότυπο της πλατφόρμας ABACUS	96
6.1 Οι στόχοι του συστήματος και οι αντίστοιχοι ρόλοι πρακτόρων	101
6.2 Η αρχιτεκτονική του συστήματος O ₃ RTAA	104
6.3 Το μοντέλο πρακτόρων O ₃ RTAA	106
6.4 Το εσωτερικό μοντέλο AORML του CA	107
6.5 Το εσωτερικό μοντέλο AORML του DMA	107
6.6 Το εσωτερικό μοντέλο AORML του DA	107
6.7 Οι κύριες έννοιες του πεδίου εφαρμογής και η δομή της οντολογίας του συ- στήματος	108
6.8 Η λογική δομή της συμπεριφοράς του πράκτορα διάγνωσης	109
6.9 Η λογική δομή της συμπεριφοράς του πράκτορα συναγερμού	111
6.10 Στιγμιότυπο της εφαρμογής O ₃ RTAA από το JADE	113
6.11 Ο πράκτορας διάγνωσης του όζοντος αναφέρει στον πράκτορα συναγερμού την τρέχουσα μετρησή του	114
6.12 Η ροή της πληροφορίας και το περιεχόμενο των μηνυμάτων των πρακτόρων	115
7.1 Η διαδικασία υποστήριξης αποφάσεων που εμπλέκεται σε ένα ΣΠΔ αναγνώ- ρισης	120
7.2 Οι μετεωρολογικοί σταθμοί στην περιοχή της Βαλένθια, Ισπανία	123
7.3 Δένδρο αποφάσεων για το μοντέλο επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρή- σεων	131
7.4 Δένδρο αποφάσεων για το μοντέλο εκτίμησης ελλιπών μετρήσεων	131
7.5 Αναπαράσταση των μοντέλων σε μορφή PMML και οι αντίστοιχοι κανόνες πρακτόρων σε JESS	132
8.1 Εικονική γειτονιά πρακτόρων καταναλωτών και οι δυνάμεις επιρροής	142
8.2 Διάγραμμα λειτουργιών του προσομοιωτή DAWN	146
8.3 Η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων της πλατφόρμας DAWN	147
8.4 Η επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης του DAWN	148
8.5 Ο ρόλος πράκτορα WATERSUPPLIER	151
8.6 Ο ρόλος πράκτορα WATERCONSUMER	152
8.7 Ο ρόλος πράκτορα CONSUMERNEIGHBOUR	152
8.8 Το μοντέλο πρακτόρων DAWN	153
8.9 Εξωτερικό διάγραμμα πρακτόρων σε AORML	154
8.10 Οντολογία εννοιών, κατηγορημάτων και ενεργειών πρακτόρων για την προ- σομοίωση της εφοδιαστικής αλυσίδας του νερού	155
8.11 Στιγμιότυπο της γραφικής διεπαφής της πλατφόρμας DAWN	155
9.1 Συγκριτικά αποτελέσματα για την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου . .	170
9.2 Επίσια συνολική κατανάλωση	171
9.3 Συγκριτική εκτίμηση της κατα κεφαλήν μείωσης της κατανάλωσης	171
9.4 Κατά κεφαλή κατανάλωση για την περίοδο 2004-2010	172

Κατάλογος Πινάκων

2.1 Κοινότητες και δίκτυα περιβαλλοντικής πληροφορικής	18
3.1 Ενδεικτικές κατηγορίες υπηρεσιών πρακτόρων λογισμικού	38
3.2 Τυπολογία πρακτόρων λογισμικού με βάση τις ικανότητές τους για επικοινωνία	42
4.1 Σύνοψη της βιβλιογραφικής επισκόπησης	58
5.1 Διαδικασία μοντελοποίησης ΠΛ-Φορέων πληροφορίας	85
5.2 Διαδικασία μοντελοποίησης ΠΛ-Υπεύθυνων Λήψης Αποφάσεων	86
7.1 Δείκτες της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος	118
7.2 Αέριοι ρύποι και μετεωρολογικές παραμέτροι	124
7.3 Στατιστικά για τα αρχεία περιβαλλοντικών δεδομένων	125
7.4 Μεταβλητές του μοντέλου αποφάσης για την επικύρωση των καταγραφόμενων μετρήσεων	126
7.5 Μεταβλητές των μοντέλων υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση ελλιπών μετρήσεων	127
7.6 Αποτελέσματα για το μοντέλο επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων (εκπαίδευση και έλεγχος)	130
7.7 Αποτελέσματα για το μοντέλο εκτίμησης ελλιπών μετρήσεων (μοντέλο δίχως μνήμη)	130
7.8 Αποτελέσματα για το μοντέλο εκτίμησης ελλιπών μετρήσεων (μοντέλο με μνήμη)	130
9.1 Μεταβλητές και ελαστικότητες για το μοντέλο της Θεσσαλονίκης	166
9.2 Τύποι πρακτόρων - καταναλωτών	167

Κατάλογος Δημοσιεύσεων

Άρθρα σε περιοδικά

1. I. N. Athanasiadis and P. A. Mitkas. **A methodology for developing environmental management systems with software agents.** *Environmental Modeling & Software*, Accepted for publication, 2005.
2. P. A. Mitkas, A. L. Symeonidis, D. Kehagias, and I. N. Athanasiadis. **Application of data mining and intelligent agent technologies to concurrent engineering.** *International Journal of Agile Manufacturing*, Accepted for publication, 2005.
3. A. L. Symeonidis, K. C. Chatzidimitriou, I. N. Athanasiadis, and P. A. Mitkas. **Data Mining for Agent Reasoning: a Synergy for Training Intelligent Agents.** *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Accepted for publication, 2005.
4. I. N. Athanasiadis and P. A. Mitkas. **Social influence and water conservation: An agent-based approach.** *IEEE Computing in Science and Engineering*, 7(1):65-70, January/February 2005.
5. I. N. Athanasiadis, A. K. Mentes, P. A. Mitkas, and Y. A. Mylopoulos. **A hybrid agent-based model for estimating residential water demand.** *Simulation, Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 80(11):in print, 2004.
6. I. N. Athanasiadis and P. A. Mitkas. **An agent-based intelligent environmental monitoring system.** *Management of Environmental Quality*, 15(3):238-249, May 2004.

Κεφάλαια σε βιβλία

1. K. Kok, P. Valkering, J. Carmichael, J. Hinkel, I. N. Athanasiadis, O. Salmi, V. Moreau, and P. Steenhof. **Problem Formulation and Classification in Integrated Assessment Modeling.** In J. Rotmans and others, editors, *Puzzle Solving for Policy II*. ICIS, Accepted for publication, 2005.
2. P. A. Mitkas, D. Kehagias, A. L. Symeonidis, and I. N. Athanasiadis. **A Framework for Constructing Multi-Agent Applications and Training Intelligent Agents.** In *Agent Oriented Software Engineering IV (AOSE-2003)*, Lecture Notes in Computer Science 2935, pages 96-109. Springer-Verlag, January 2004.

Ανακοινώσεις σε συνέδρια

1. I. N. Athanasiadis, M. Milis, P. A. Mitkas, and S. Michaelides. **Abacus: A multi-agent system for meteorological radar data management and decision support.** In *Proc. Int'l Symposium on Environmental Software Systems (ISESS-05)*, Sesimbra, Portugal, May 2005. IFIP.
2. P. A. Mitkas, A. L. Symeonidis, and I. N. Athanasiadis. **A Retraining Methodology for Enhancing Agent Intelligence.** In *IEEE Int'l Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems (KIMAS-05)*, Waltham, MA, USA, April 2005. IEEE.
3. I. N. Athanasiadis, K. Karatzas, and P. A. Mitkas. **Contemporary air quality forecasting methods: A comparative analysis between statistical methods and classification algorithms.** In *Proc. 5th Int'l Conf. on Urban Air Quality (UAQ-5)*, Valencia, Spain, March 2005. CEAM.
4. I. N. Athanasiadis, A. K. Mentes, P. A. Mitkas, and Y. A. Mylopoulos. **A system for evaluating water pricing policies in urban areas.** In *Proc. 5th Int'l Exhibition and Conference on Environmental Technology:Environment and Development (HELECO-05)*, Athens, Greece, February 2005. Technical Chamber of Greece.
5. I. N. Athanasiadis and P. A. Mitkas. **A distributed system for managing and diffusing environmental information.** In *Proc. 5th Int'l Exhibition and Conference on Environmental Technology:Environment and Development (HELECO-05)*, Athens, Greece, February 2005. Technical Chamber of Greece.
6. I. N. Athanasiadis and P. A. Mitkas. **Applying agent technology in Environmental Management Systems under real-time constraints.** In C. Pahl, S. Schmidt, A. E. Rizzoli, and A. Jakeman, editors, *Trans. 2nd Int'l Environmental Modelling and Software Society Biennial Congress: Complexity and Integrated Resources Management*, volume 2, Osnabrueck, Germany, pages 531-536, June 2004. iEMSs: Manno, Switzerland. [Best student paper prize in Integrated Systems].
7. I. N. Athanasiadis and P. A. Mitkas. **Software Agents for Assessing Environmental Quality: Advantages and Limitations.** In *Sh@ring: 18th Int'l Conf. Informatics for Environmental Protection (EnviroInfo 2004)*, volume 2, CERN, Geneve, Switzerland, pages 303-306, October 2004. Editions du Tricorn.
8. I. N. Athanasiadis and P. A. Mitkas. **Supporting the Decision-Making Process in Environmental Monitoring Systems with Knowledge Discovery Techniques.** In H. Voss, M. Wachowicz, S. Dzeroski, and A. Lanza, editors, *Knowledge-based Services for the Public Sector Symposium (Workshop III: Knowledge Discovery for Environmental Management)*, Bonn, Germany, pages 1-12, June 2004. KDnet.
9. I. N. Athanasiadis, P. Vartalas, and P. A. Mitkas. **DAWN: A platform for evaluating water-pricing policies using a software agent society.** In C. Pahl, S. Schmidt, A. E. Rizzoli, and A. Jakeman, editors, *Trans. 2nd Int'l Environmental Modelling and Software Society Biennial Congress: Complexity and Integrated Resources Management*, volume 2, Osnabrueck, Germany, pages 643-648, June 2004. iEMSs: Manno, Switzerland.
10. I. N. Athanasiadis, V. G. Kaburlasos, P. A. Mitkas, and V. Petridis. **Applying Machine Learning Techniques on Air Quality Data for Real-Time Decision Support.**

- In Proc. *1st Int'l Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering (ITEE-2003)*, Gdansk, Poland, pages 51, June 2003. ICSC-NAISO Publishers.
11. Ioannis N. Athanasiadis, Pericles A. Mitkas, Gokce B. Laleci, and Yildiray Kabak. **Embedding data-driven decision strategies on software agents: The case of a multi-agent system for monitoring air-quality indexes.** In R. Jardim-Goncalves, J. Cha, and A. Steiger-Garcao, editors, *Concurrent Engineering: The Vision for the Future Generation in Research and Applications*, volume 1, Madeira, Portugal, pages 23-30, July 2003. Balkema Publishers.
 12. R. S. S. Guizzardi, D. Kehagias, A. L. Symeonidis, Ioannis N. Athanasiadis, A. Koumpis, and G. Perez. **Testing Agent Academy: A new methodology for training intelligent agents.** In M. Klusch and S. Willmott, editors, *Agentcities iD3*, Barcelona, Spain, pages 50-51, February 2003. Agentcities.NET.
 13. G. Hatzidamianos, S. Diplaris, I. N. Athanasiadis, and P. A. Mitkas. **GenMiner: A Data Mining Tool for Protein Analysis.** In I. Pitas and K. Margaritis, editors, *Proc. 9th Panhellenic Conference in Informatics*, Thessaloniki, Greece, pages 346-360, November 2003. Greek Computer Society.
 14. P. A. Mitkas, D. Kehagias, A. L. Symeonidis, and I. N. Athanasiadis. **A Framework for Constructing Multi-Agent Applications and Training Intelligent Agents.** In P. Giorgini, J. P. Mueller, and J. Odell, editors, *Proc. of Autonomous Agents & Multi-Agent Systems (AAMAS 2003) at the Agent-Oriented Software Engineering (AOSE-2003) Workshop*, Melbourne, Australia, pages 1-15, July 2003.
 15. P. A. Mitkas, D. Kehagias, A. L. Symeonidis, and I. N. Athanasiadis. **Agent Academy: An integrated tool for developing multi-agent systems and embedding decision structures into agents.** In M. d'Inverno, C. Sierra, and F. Zambonelli, editors, *Proc. 1st European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS 2003)*, Oxford, UK, December 2003. AgentLink.
 16. P. A. Mitkas, A. L. Symeonidis, D. Kehagias, and I.N. Athanasiadis. **Application of data mining and intelligent agent technologies to concurrent engineering.** In R. Jardim-Goncalves, J. Cha, and A. Steiger-Garcao, editors, *Concurrent Engineering: The Vision for the Future Generation in Research and Applications*, volume 1 (Enhanced Interoperable Systems), Madeira, Portugal, pages 11-18, July 2003. Balkema Publishers.
 17. P. A. Mitkas, A. L. Symeonidis, D. Kehagias, Ioannis N. Athanasiadis, G. Laleci, G. Kurt, Y. Kabak, A. Acar, and A. Dogac. **An agent framework for dynamic agent retraining: Agent Academy.** In B. Stanford-Smith, E. Chiozza, and M. Edin, editors, *Challenges and Achievements in e-business and e-work*, Prague, Czech Republic, pages 757-764, October 2002. IOS Press.
- Εισηγήσεις (tutorials) σε συνέδρια**
1. I. N. Athanasiadis, and P. A. Mitkas. **Software agents in environmental informatics.** Accepted for presentation in the *Int'l Symposium on Environmental Software Systems (ISESS-05)*, Sesimbra, Portugal, May 2005. IFIP.
 2. I. N. Athanasiadis, and P. A. Mitkas. **Building environmental information systems: An approach with agents.** Accepted for presentation in the *2nd Int'l Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering (ITEE-05)*, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Germany, September 2005. ICSC-NAISO.

Αρτικόλεξα

CA	Consumer Agent.
AAAI	American Association for Artificial Intelligence.
ACL	Agent Communication Language.
ACM	Association for Computer Machinery.
Alarm DMA	Ozone Alarm DMA.
AORML	Agent-Object-Relationship Metamodel.
AUML	Agent Unified Modeling Language.
BESAI	Binding Environmental Sciences and Artificial Intelligence Working Group.
CA	Contribution Agent.
DA	Distribution Agent.
DAWN	Distributed Agent-based environment for urban Water simulatioN.
DMA	Data Management Agent.
EFIEA	European Forum on Integrated Environmental Assessment.
FIPA	Foundation of Intelligent Physical Agents.
GI	Gesellschaft für Informatik.
iEMSs	International Environmental Modelling and Software Society.
IFIP	International Federation for Information Processing.
ISEI	International Society for Ecological Informatics.
ISEIS	International Society for Environmental Information Sciences.
JADE	Java Agent Development Environemnt.

O₃RTAA	Ozone Real Time Agent Academy.
TIAS	The Integrated Assessment Society.
UML	Unified Modeling Language.
AΙΠΠ	Αντικείμενα Περιβαλλοντικής Πληροφορίας.
ΚΙΠΠ	Κέντρα Παρατήρησης και Παρακολούθησης του Περιβάλλοντος.
ΚΙμΠ	Κοινωνική προσομοίωση με πράκτορες.
MME	Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης.
ΟΠΑ	Ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Αποτίμηση.
ΟΣΠΠ	Ολοκληρωμένα Συστήματα Περιβαλλοντικής Πληροφορικής.
ΟΣΥΑΔΠ	Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Διαχείρισης Πληροφορίας.
ΟΣΥΑΠΣ	Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Προσομοίωσης Σεναρίων.
ΠΛ	Πράκτορας (Λογισμικού).
ΣΠ	Συστήμα (Πολλών) Πρακτόρων.
ΣΠΛΠΠ	Συστήματα Παρακολούθησης και Διαχείρισης Περιβαλλοντικής Πληροφορίας.
ΣΠΠ	Συστήματα Περιβαλλοντικής Πληροφορικής.
ΣΠΣ	Συστήματα Προσομοίωσης Σεναρίων.
ΣΥΑΠ	Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για το Περιβάλλον.
ΤΑΛΠ	Τεχνικές Ανάπτυξης Λογισμικού με Πράκτορες.
ΤΠΕ	Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών.

Αγγλικοί όροι

Agent action Ενέργεια πράκτορα.

Agent Communication Language Γλώσσα επικοινωνίας πρακτόρων.

Agent perception Αντίληψη πράκτορα.

Agent-based social simulation Κοινωνική προσομοίωση με πράκτορες.

Agent-based-modeling Μοντελοποίηση με πράκτορες.

Agent-oriented software engineering Τεχνικές ανάπτυξης λογισμικού με πράκτορες.

Air Quality Operational Center Επιχειρησιακά κέντρα ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Application domain Πεδίο εφαρμογής.

Artificial life Τεχνητή ζωή.

Causal chain Αιτιακή αλυσίδα.

Co-data Συνδεδομένα.

Cognitive science Γνωστικές επιστήμες.

Contribution Agent Πράκτορας συνεισφοράς.

Data format Τυποποίηση δεδομένων.

Data fusion Σύντηξη πληροφορίας.

Data Management Agent Πράκτορας Διαχείρισης Δεδομένων.

Distributed Artificial Intelligence Κατανεμημένη Τεχνητή Νοημοσύνη.

Distribution Agent Πράκτορας Διάχυσης Πληροφορίας.

Domain ontology Οντολογία του πεδίου εφαρμογής.

Eco-informatics Οικολογική πληροφορική ή "Οικοπληροφορική".

Ecological informatics Οικολογική πληροφορική.

Enviromatics Περιβαλλοντική πληροφορική ή "Περιβαλλοφορική".

Environmental data object Αντικείμενο περιβαλλοντικής πληροφορίας.

Environmental Decision Support Systems Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για το Περιβάλλον.

Environmental Informatics Περιβαλλοντική πληροφορική.

Environmental Information Systems Σύστηματα Περιβαλλοντικής Πληροφορίας.

Forecasting Systems Συστήματα Πρόβλεψης.

Individual behavior Ατομική συμπεριφορά.

Influence diffusion mechanism Μηχανισμός διάχυσης της επιρροής.

Information flow Ροή πληροφορίας.

Instance Στιγμιότυπο.

Integrated Environmental Assessment Ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αποτίμηση.

Intelligent interface agent Πράκτορας ευφυούς διεπαφής.

Knowledge diffusion Διάχυση γνώσης.

Legacy system Απαρχειωμένο σύστημα.

Locus of control Σημείο ελέγχου.

Meta-data Μεταδεδομένα.

Micro-level simulation Προσομοιώση μικρής κλίμακας.

Mobile agent Κινητός πράκτορας.

Mouth-to-mouth communication Διαπροσωπική επικοινωνία.

Multi-agent systems ή Agent-based systems Συστήματα (Πολλών) Πρακτόρων.

Off-line analysis systems Συστήματα ανάλυσης μη-πραγματικού χρόνου.

Opinion dynamics Δυναμικές σχηματισμού άποψης.

Opinion follower Ακόλουθος κοινής γνώμης.

Opinion leader Γνωμηγέτης ή ηγέτης κοινής γνώμης.

Peer agent Πράκτορας ομοτιμίας.

Policy Χάραξη πολιτικής.

Power of influence Δύναμη της επιρροής.

Precaution measures Μέτρα προφύλαξης.

Prevention measures Προληπτικά μέτρα.

Purely reactive agent Αμιγώς ανακλαστικός πράκτορας.

Real-time reporting systems Συστήματα αναφοράς πραγματικού χρόνου.

Sound decision Τεκμηριωμένη απόφαση.

Speech act Δράση λόγου.

Standard agent Τυπικός πράκτορας.

Stimulus-response model Μοντέλο "ερεθίσματος-απόκρισης".

Two-step flow communication model Μοντέλο επικοινωνίας με δύο βημάτων.

Macro-level simulation Προσομοιώση μεγάλης κλίμακας.

Σημείωση: Στην παρούσα διατριβή οι αγγλικοί όροι αποδόθηκαν στην ελληνική σύμφωνα με τους ορισμούς των Βάσεων Όρων Πληροφορικής [205] και Όρων Τηλεπικοινωνιών [206] της Ελληνικής Εταιρεία Ορολογίας και του ΕΛΟΤ και το πολυγλωσσικό γλωσσάριο της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος [50].

Ευχαριστίες

Στην παρούσα διατριβή συνοψίζονται τα αποτελέσματα της ερευνητικής μου δραστηριότητας, ως υποψήφιου διδάκτορα του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ. Η "Ιθάκη" στην οποία κατέπλευσα μετά από μια πενταετή περιπέτεια στις θάλασσες της περιβαλλοντικής πληροφορικής. Ωστόσο, στο κείμενο αυτό δεν θα βρείτε πολλές πληροφορίες για την διαδρομή που με έφερε στο υπήνεμο τούτο λιμάνι, ένα ταξίδι με έντονες περιπέτειες, δυνατές προκλήσεις, αλλά και μεγάλες φουρτούνες!

Η προσπάθεια αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί επιτυχώς δίχως την επίβλεψη του καθηγητή κ. Περικλή Μήτκα, που ήταν η πυξίδα μου. Κοιτούσε πάντα στο Βορρά, δείχνοντας τον στόχο! Τον ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου για τις ευκαιρίες που μου έδωσε, τις πολύτιμες συμβουλές του, την επιστημονική γνώση και την επαγγελματική εμπειρία του, που τις μοιράστηκε απλόχερα μαζί μου, τις πολύ ενδιαφέρουσες συζητήσεις που είχαμε, αλλά κυρίως για την αμέριστη εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Ιδιαίτερη τύχη ήταν να έχω δυο συνταξιδιώτες στο ταξίδι τούτο, τον Διονύση Κεχαγιά και τον Ανδρέα Συμεωνίδη. Δεν ήταν μόνο καλή παρέα που έκανε το μακρινό ταξίδι ευχάριστο, ήταν δυο πολύτιμοι συνεργάτες που κλείνανε τ' αυτιά μου στις διάφορες Σειρήνες!

Ακόμη, οφείλω πολλές ευχαριστίες:

Στους συναδέλφους *Παναγιώτη Βαρταλά, Μάριο Μιλή, Παρασκευή Νικολαΐδου, Andreas Solsbach, Γεράσιμο Χατζηδαμιανό*, Μελίνα Εφραϊμίδου και Μαίρη Κανάκη με τους οποίους συνεργάστηκα στα πλαίσια των διπλωματικών τους εργασιών.

Στους καθ. *Γιάννη Μυλόπουλο, Δρ. Αλέξανδρο Μεντέ, Δρ. Δήμητρα Βαγιωνά* από τον Τομέα Υδραυλικής και Περιβάλλοντος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ για την αγαστή συνεργασία τους κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του DAWN.

Στον καθ. *Κώστα Καρατζά* από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΠΘ για τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις που είχαμε και τη στήριξή του.

Στον καθ. *Βασίλη Καμπουρλάζο* από το Τμήμα Βιομηχανικής Πληροφορικής ΤΕΙ Καράλας για την συνεργασία του.

Στον κ. *Διαμαντή Κουμπή* που με τίμησε με τη συνεργασία του.

Στους *Aybar Acar, Lora Aroyo, Nick Brehmer, Ulises Cortes, Asuman Dogac, Josefa Farnos, Merce Griera-i-Fisa, Yıldırıy Kabak, Dimitri Konstantas, Oliver Kruse, Gokhan Kurt, Gokce Laleci, Robert Magnus, Maurice Mulvenna, Gerhard Müller Pröfrock, Renata Silva Souza, Thomas Wagenfeld, και Timo Wille* για την συνεργασία τους στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος **Agent Academy: A data mining framework for training intelligent agents**. Ιδιαίτερως, στους κ.κ. *Miguel Alborg και Juan Gabriel Pérez* της εταιρείας IDI-EIKON με έδρα τη Βαλένθια, Ισπανία, για την συνεργασία τους στην επιδεικτική εφαρμογή O₃RTAA.

Στον κ. *Enrique Mantilla* από το Κέντρο Μεσογειακών Περιβαλλοντικών Μελετών (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo - CEAM) που μου διέθεσε τα περιβαλλοντικά δεδομένα από την περιοχή της Βαλένθια.

Στον συνάδελφο κ. *Χρήστο Καδόγλου* για τις διορθώσεις του στο αρχικό κείμενο της διατριβής.

Στις Βίκυ Μανουσιάκη, Πόπη Μπουντανούρ, Μαρίνα Σιδηροπούλου και Όλγα Τσακαλίδου για την υποστήριξή τους στα θέματα διαχείρισης των ερευνητικών έργων που συμμετείχα.

Στους συνεργάτες του εργαστήριου για το ευχάριστο περιβάλλον εργασίας και την καλή παρέα: Τάσο Βαλσαμίδη, Χρήστο Δίου, Χρήστο Δήμου, Σωτήρη Διπλάρη, Δημήτρη Ζαμανάκο, Ελένη Καλύβα, Ναούμ Λιώτα, Γιώργο Μαμαλάκη, Γιώργο Μιλή, Αλέξανδρο Μπάτζιο, Δημήτρη Σιμητόπουλο, Φανή Τζήμα, Φιλαρέτη Τσαλακανίδου, Ευαγγελία Τριανταφύλλου, Γιώργο Τριανταφυλλίδη, Μανώλη Φαλελάκη, Κυριάκο Χατζηδημητρίου, Φώτη Ψωμόπουλο.

Το ταξίδι, που ολοκληρώνεται εδώ, χρειάστηκε θυσίες σε βάρος της προσωπικής και οικογενειακής μου ζωής. Ευχαριστώ τους γονείς μου και την αδερφή μου, για την αγάπη τους, την στήριξή τους και την υπομονή τους, καθώς και τους φίλους και τις φίλες που μου στάθηκαν. *Δίχως τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί, ίσως να μην τα κατάφερνα.*

Θεσσαλονίκη, 17 Φεβρουαρίου 2005

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ορισμός του προβλήματος

Τα τελευταία χρόνια συνέβη μια αξιοπρόσεκτη αλλαγή στις μοντέρνες κοινωνίες. Οι περιβαλλοντικές αξίες αναγνωρίζονται σε μεγαλύτερο βαθμό, καθώς έγινε προφανές ότι συσχετίζονται έντονα με την ποιότητα ζωής. Φυσικό επακόλουθο του ολοένα και πιο έντονου ενδιαφέροντος της κοινής γνώμης για το φυσικό περιβάλλον και την βιώσιμη ανάπτυξη ήταν η ανάδειξη της αξίας της περιβαλλοντικής πληροφορίας. Η πρόκληση για τα σύγχρονα συστήματα περιβαλλοντικής πληροφορικής είναι όχι μόνο να διαχειρίζονται τα περιβαλλοντικά δεδομένα, αλλά να παρέχουν αποτελεσματικές, αξιόπιστες και έγκαιρες υπηρεσίες, τόσο στην επιστημονική κοινότητα, όσο και σε κάθε ενδιαφερόμενο και τους πολίτες.

Η ανάπτυξη πληροφοριακών συστημάτων για το περιβάλλον είναι μια απαιτητική διαδικασία, που προϋποθέτει τη διεπιστημονική συνεργασία και το συγκερασμό απόψεων, τεχνικών και μεθόδων από το χώρο των φυσικών και περιβαλλοντικών επιστημών, τις κοινωνικές και οικονομικές επιστήμες, την πληροφορική και τη μηχανική υπολογιστών. Η επιστήμη των υπολογιστών καλείται να αναλάβει το βάρος της ολοκλήρωσης των διαφορετικών όψεων, αξιών και προτεραιοτήτων που έχουν οι συμμέτοχοι και οι χρήστες ενός Συστήματος Περιβαλλοντικής Πληροφορικής (ΣΠΠ). Η πρόκληση για τα ΣΠΠ είναι να εκμεταλλευτούν τις δυνατότητες της επιστήμης των υπολογιστών και να τις ενσωματώσουν στις πρακτικές διαχείρισης του περιβάλλοντος, με απώτερο στόχο την παροχή προηγμένων υπηρεσιών σε όλους τους εμπλεκόμενους φορείς, που περιλαμβάνουν το κράτος, τη βιομηχανία, την κοινωνία και τους πολίτες, και την επιστημονική κοινότητα.

Στο περιβάλλον αυτό, η περιβαλλοντική πληροφορική καλείται να υιοθετήσει, να προ-

σαρμόσει και να επεκτείνει με τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο τις μεθόδους και τα εργαλεία της επιστήμης των υπολογιστών, ώστε να ικανοποιήσει τις σύγχρονες απαιτήσεις και τις προσδοκίες των πολιτών και της πολιτείας. Τα τελευταία χρόνια η επιστήμη των υπολογιστών ανέδειξε την τεχνολογία των πρακτόρων λογισμικού, ως μια πρωτοπόρα μέθοδο ανάπτυξης λογισμικού. Οι Τεχνικές Ανάπτυξης Λογισμικού με Πράκτορες βασίζονται στην έννοια του *πράκτορα*, δηλαδή σε μια οντότητα λογισμικού η οποία χαρακτηρίζεται από αυτονομία, ανακλαστικότητα, προνοητικότητα και ικανότητα λήψης αποφάσεων. Οι πράκτορες λογισμικού έχουν χρησιμοποιηθεί αποσπασματικά σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, και ακόμη, στη βιβλιογραφία δεν απαντάται μια ενιαία θεώρηση και ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εργασίας για την ανάπτυξη ΣΠΠ με πράκτορες λογισμικού.

Ένα τέτοιο πλαίσιο εργασίας είναι απαραίτητο, καθώς όπως σημειώνει το ευρωπαϊκό δίκτυο αριστείας AgentLink για την τεχνολογία πρακτόρων [6] δεν υπάρχει ένα κοινό μεθοδικό πλαίσιο εργασίας για την ανάπτυξη συστημάτων πρακτόρων, καθώς αυτό ποικίλει ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής. Ακόμη, έχει επισημανθεί ότι η ανάπτυξη των συστημάτων πρακτόρων απαιτεί μια διαφορετική προσέγγιση σε σχέση με τη διαδικασία ανάπτυξης συμβατικού λογισμικού [125].

Για τους λόγους αυτούς, σκοπός της παρούσας διατριβής αποτελεί η θεμελίωση ενός πλαισίου εργασίας για την εφαρμογή της τεχνολογίας πρακτόρων στην περιβαλλοντική πληροφορική.

1.2 Προσέγγιση του προβλήματος

Στην προσπάθεια ολοκληρωμένης προσέγγισης του προβλήματος, εγείρονται με τρία θεμελιώδη ερωτήματα:

- a. Τι** είδους πράκτορες απαιτούνται σε εφαρμογές περιβαλλοντικής πληροφορικής;
- β. Που** μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πράκτορες λογισμικού σε ΣΠΠ;
- γ. Πώς** μπορεί να εφαρμοστεί η τεχνολογία των πρακτόρων στην περιβαλλοντική πληροφορική;

Η παρούσα διατριβή απαντά στα παραπάνω ερωτήματα με βάση την επιστημονική γνώση στις περιοχές της περιβαλλοντικής πληροφορικής και της τεχνολογίας πρακτόρων, και τη μελέτη των βιβλιογραφικών αναφορών σε εφαρμογές των πρακτόρων λογισμικού για την ανάπτυξη ΣΠΠ. Συγκεκριμένα, το ολοκληρωμένο πλαίσιο εργασίας που παρουσιάζει η παρούσα διατριβή απαντά στο πρώτο ερώτημα, καθορίζοντας μια εργαλειοθήκη γενικών τύπων πρακτόρων για την περιβαλλοντική πληροφορική. Στη συνέχεια, η εργα-

λειοθήκη αυτή συσχετίζεται με τις διάφορες κατηγορίες ΣΠΠ, δίνοντας έτσι απάντηση και στο δεύτερο ερώτημα. Τέλος, θεμελιώνεται ένας οδηγός καλής χρήσης των πρακτόρων λογισμικού στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής, που χρησιμοποιεί τους γενικούς τύπους πρακτόρων της εργαλειοθήκης σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός ΣΠΠ.

Το πλαίσιο εργασίας που θεμελιώνεται στην παρούσα διατριβή, προσεγγίζει τους πράκτορες λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική ως: (α) φορείς πληροφορίας, (β) υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, και ως (γ) κοινωνικούς εικονογράφους. Οι τρεις γενικευμένοι τύποι πρακτόρων συνδυάζονται (κατά περίπτωση), για την ανάπτυξη εφαρμογών πρακτόρων, που αφορούν: (α) τα Συστήματα Διαχείρισης Περιβαλλοντικής Πληροφορίας, (β) τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για το Περιβάλλον, (γ) τα Συστήματα Προσομοίωσης Σεναρίων, αλλά και (δ) τα Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Διαχείρισης Πληροφορίας, και (ε) τα Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Προσομοίωσης Σεναρίων.

Ο οδηγός καλής χρήσης των πρακτόρων λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική καθορίζει την διαδικασία αξιοποίησης της εργαλειοθήκης για την ανάπτυξη ΣΠΠ. Συγκεκριμένα προτείνεται μια κάθετη μεθοδολογία για την ανάλυση, προδιαγραφή, μοντελοποίηση και ανάπτυξη ΣΠΠ, η οποία χρησιμοποιεί τους πράκτορες της εργαλειοθήκης.

Το Σχήμα 1.1 αναπαριστά σχηματικά την προσέγγιση της περιβαλλοντικής πληροφορικής με πράκτορες λογισμικού που υιοθετήσαμε στην παρούσα διατριβή.

Το παραπάνω πλαίσιο εργασίας επιδεικνύεται σε δύο πρότυπες εφαρμογές που αναλαμβάνουν τις σύγχρονες προκλήσεις της περιβαλλοντικής πληροφορικής. Η πρώτη αφορά την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου περιβαλλοντος σύντηξης και διαχείρισης περιβαλλοντικών μετρήσεων και στη συνέχεια διάχυσης περιβαλλοντικής πληροφορίας με σκοπό την έγκαιρη και έγκυρη αποτίμηση της ποιότητας του αέρα. Η δεύτερη αφορά ένα ολοκληρωμένο σύστημα προσομοίωσης σεναρίων τιμολόγησης του νερού. Στην εφαρμογή αυτή οι πράκτορες προσομοιώνουν την αστική αλυσίδα κατανάλωσης του νερού.

1.3 Διάρθρωση της διατριβής

Η διατριβή διαρθρώνεται σε τέσσερα μέρη: Το πρώτο μέρος παρουσιάζει την προσέγγιση της περιβαλλοντικής πληροφορικής με πράκτορες. Το δεύτερο μέρος αφορά την εφαρμογή των πρακτόρων λογισμικού σε Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Διαχείρισης Πληροφορίας. Στο τρίτο μέρος παρουσιάζεται η εφαρμογή των πρακτό-



Σχήμα 1.1: Η προσέγγιση της περιβαλλοντικής πληροφορικής με πράκτορες

ρων λογισμικού σε Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Προσομοίωσης Σεναρίων. Το τέταρτο μέρος αποτελεί τον επίλογο και συνοψίζει τα συμπεράσματα της διατριβής.

Το Μέρος Ι αποτελείται από τα Κεφάλαια 2-4. Στο Κεφάλαιο 2 μελετάται η περιοχή της περιβαλλοντικής πληροφορικής. Δίνονται οι σχετικοί ορισμοί που απαντώνται στη βιβλιογραφία και συνοψίζονται οι διάφοροι τύποι πληροφορικών συστημάτων για το περιβάλλον. Συζητούνται τα χαρακτηριστικά των εφαρμογών περιβαλλοντικής πληροφορικής και οι σύγχρονες προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι Πράκτορες Λογισμικού και τα Συστημάτων Πρακτόρων (Κεφάλαιο 3). Αφού διθούν οι απαραίτητοι ορισμοί της έννοιας του "αυτόνομου πράκτορα", συζητούνται οι διάφορες σχολές ανάπτυξης πρακτόρων και ακολούθως παρουσιάζονται οι Τεχνικές Ανάπτυξης Λογισμικού με Πράκτορες. Δίδεται ο ορισμός του Πράκτορα Λογισμικού, παρουσιάζονται διάφοροι τύποι πρακτόρων και συζητούνται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητές τους. Τέλος, παρουσιάζονται τα Συστήματα Πρακτόρων, διάφοροι τύποι συστημάτων πρακτόρων και τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

Στο Κεφάλαιο 4 συσχετίζονται οι σύγχρονες ανάγκες της Περιβαλλοντικής Πληρο-

φορικής με τις ικανότητες των Πρακτόρων Λογισμικού, και καθορίζεται ένα πλαίσιο εργασίας για την ανάπτυξη Συστημάτων Πρακτόρων σε εφαρμογές περιβαλλοντικού λογισμικού. Αρχικά, ορίζεται η περιοχή στόχου της προσέγγισης και ακολουθώς προδιαγράφεται η εργαλειοθήκη πρακτόρων λογισμικού για την περιβαλλοντική πληροφορική. Το κεφάλαιο 4 ολοκληρώνεται με την μεθοδολογική προσέγγιση των συστημάτων πρακτόρων για την ανάπτυξη εφαρμογών περιβαλλοντικής πληροφορικής και τον οδηγό ανάπτυξης συστημάτων πρακτόρων σε περιβαλλοντικές εφαρμογές.

Στο μέρος II της διατριβής, μελετάται η χρήση πρακτόρων λογισμικού για την ανάπτυξη Ολοκληρωμένων Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων και Διαχείρισης Πληροφορίας (Κεφάλαια 5-7). Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφονται οι προκλήσεις που καλούνται να αντιμετωπίσουν τα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης περιβαλλοντικών πληροφοριών, και οι ανάγκες τους να ενσωματώσουν υπηρεσίες έγκυρης και έγκαιρης πληροφόρησης. Με βάση τις ανάγκες αυτές καθορίζεται μια γενικευμένη προσέγγιση που συνδυάζει τους πράκτορες, ως φορείς πληροφορίας και ως υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Το Κεφάλαιο 5 ολοκληρώνεται με μια γενική αρχιτεκτονική ενός συστήματος πρακτόρων, η οποία διαχειρίζεται την περιβαλλοντική πληροφορία και ενσωματώνει χαρακτηριστικά υποστήριξης αποφάσεων.

Η γενική αρχιτεκτονική πρακτόρων του Κεφαλαίου 5 επιδεικνύεται για την ανάπτυξη ενός συστήματος αποτίμησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας, που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6. Οι στόχοι του συστήματος, η αρχιτεκτονική του συστήματος πρακτόρων, οι δόλοι και οι εσωτερικές καταστάσεις των πρακτόρων καθορίζονται λεπτομερώς, ακολουθώντας τα βήματα της μεθοδολογίας του Κεφαλαίου 4.

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων που υιοθετείται στο σύστημα αποτίμησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας και η ενσωμάτωσή της σε πράκτορες λογισμικού παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7. Αφού περιγραφεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής, παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη εξόρυξης μοντέλων απόφασης από περιβαλλοντικά δεδομένα και τα αποτελέσματα της διαδικασίας εκπαίδευσης με πραγματικά δεδομένα. Ακολούθως, τα μοντέλα αυτά ενσωματώνονται στους πράκτορες και επιδεικνύεται η χρήση τους στα πλαίσια της εφαρμογής.

Το Μέρος III μελετά της εφαρμογή πρακτόρων λογισμικού σε Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Προσομοίωσης Σεναρίων και αποτελείται από τα Κεφάλαια 8 και 9. Το Κεφάλαιο 8 παρουσιάζει το μηχανισμό διάχυσης της επιφύσης σε μια κοινωνία πρακτόρων. Αρχικά, παρουσιάζονται τα μοντέλα κοινωνικής επικοινωνίας με βάση τα οποία ορίζεται ο μηχανισμός διάχυσης της επιφύσης. Ο μηχανισμός αυτός

υλοποιείται σε ένα εργαλείο κοινωνικής προσομοίωσης με πράκτορες. Παρουσιάζονται οι λειτουργικές απαιτήσεις του εργαλείου, η επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης και η υλοποίηση με πράκτορες.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζεται η προσομοίωση σεναρίων με πράκτορες για την αστική κατανάλωση του νερού. Στην αρχή συζητείται το πρόβλημα της διαχείρισης των υδάτινων πόρων στις αστικές περιοχές, και η συσχέτιση της κατανάλωσης με τον κοινωνικό παράγοντα. Ακολούθως παρουσιάζεται η συλλογιστική των πρακτόρων, καθώς και το οικονομετρικό και το κοινωνικό μοντέλο που ενσωματώνουν. Τέλος παρουσιάζονται τα πειράματα χρήσης του συστήματος για την αποτίμηση εναλλακτικών σεναρίων τιμολόγησης του νερού.

Η διατριβή καταλήγει με το Μέρος IV που αποτελείται από το Κεφάλαιο 10. Παρουσιάζεται μια ανακεφαλαίωση της διατριβής, διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή και παρουσιάζονται θέματα που αποτελούν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας.

Μέρος Ι

**Προσέγγιση της περιβαλλοντικής
πληροφορικής με πράκτορες**

Κεφάλαιο 2

Η περιβαλλοντική πληροφορική

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια συνοπτική περιγραφή της περιοχής της περιβαλλοντικής πληροφορικής και των συστημάτων περιβαλλοντικής πληροφορίας. Στόχος του κεφαλαίου είναι να ορισθούν οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με την συγκεκριμένη περιοχή και να περιγραφούν τα βασικά χαρακτηριστικά που διέπουν τα συστήματα περιβαλλοντικής πληροφορίας.

2.1 Η αξία της περιβαλλοντικής πληροφορίας

Η διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος και η βιώσιμη ανάπτυξη, τις τελευταίες δεκαετίες, βρίσκονται στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος τόσο της πολιτικής και των πολιτών, όσο και της επιστημονικής κοινότητας, αναδεικνύοντας την αξία της περιβαλλοντικής πληροφορίας. Το κεφάλαιο 40 της Ατζέντας 21¹ δίνει έμφαση στην πληροφορία ως συστατικό της διαδικασίας λήψης αποφάσεων για το περιβάλλον. Στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης, ο κάθε εμπλεκόμενος θεωρείται ταυτόχρονα, τόσο παραγωγός, όσο και καταναλωτής περιβαλλοντικής πληροφορίας, με την ευρεία έννοια του όρου. Σύμφωνα λοιπόν με την Ατζέντα 21, η περιβαλλοντική πληροφορία διακρίνεται σε τέσσερα επίπεδα: δεδομένα, πληροφορία, εμπειρία, και γνώση (Σχήμα 2.1).

Οι ανάγκες σε περιβαλλοντική πληροφορία διατρέχουν όλα τα επίπεδα λήψης αποφάσεων, από τους ιθύνοντες σε εθνικό ή διεθνές επίπεδο, μέχρι τους πολίτες που παίρνουν αποφάσεις σε ατομικό επίπεδο. Το κεφάλαιο 40 της Ατζέντας 21 καλεί την διεθνή κοι-

¹Η Ατζέντα 21 υιοθετήθηκε από το Συνέδριο των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη (United Nations Conference on Environment and Development) στις 14 Ιουνίου 1992, ως η αντίδραση της διεθνούς κοινότητας στην ανάγκη χάραξης στρατηγικών αντιμετώπισης και αντιστροφής των συνεπειών της υποβάθμισης του περιβάλλοντος, "στο πλαίσιο της ενίσχυσης των εθνικών και διεθνών προσπαθειών προώθησης της βιώσιμης και φιλικής προς το περιβάλλον ανάπτυξης από όλες τις χώρες" (ΓΣ ΟΗΕ 22/12/1989).



Σχήμα 2.1: Τα επίπεδα της περιβαλλοντικής πληροφορίας

νότητα να υλοποιήσει προγράμματα που αφορούν (α) στην "γεφύρωση" της έλλειψης δεδομένων και (β) στην διαθεσιμότητα της πληροφορίας. Ολοένα περισσότερα και διαφορετικά δεδομένα είναι απαραίτητο να καταγράφονται σε τοπικό, επαρχιακό, εθνικό και διεθνές επίπεδο, τα οποία αποτυπώνουν την κατάσταση και τις τάσεις του πλανητικού οικοσυστήματος, των φυσικών πόρων, της μόλυνσης και της κοινωνικο-οικονομικής κατάστασης. Ωστόσο, υπάρχει μια απόσταση ανάμεσα στις αναπτυγμένες και τις αναπτυσσόμενες χώρες, η οποία ολοένα και μεγαλώνει. Η απόσταση αυτή, που αναφέρεται και ως "**κενό πληροφορίας**" σχετίζεται με την διαθεσιμότητα, την ποιότητα, τη συνέπεια, την τυποποίηση και την δυνατότητα πρόσβασης στα περιβαλλοντικά δεδομένα. Το κενό πληροφορίας έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της ικανότητας των αναπτυσσόμενων χωρών να παίρνουν σωστές αποφάσεις (Sound decisions) σε σχέση με το περιβάλλον και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Από την άλλη, στις αναπτυγμένες χώρες υπάρχει μια πληθώρα δεδομένων και πληροφοριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διαχείριση της βιώσιμης ανάπτυξης.

Ωστόσο, ο εντοπισμός και η ανάσυρση των κατάλληλων πληροφοριών στην κατάλληλη χρονική στιγμή και την απαραίτητη κλίμακα είναι μια δύσκολη εργασία εξαιτίας του πλαισίου διαχείρισης των περιβαλλοντικών δεδομένων και των ελλείψεων σε τεχνολογικές υποδομές, ανθρώπινο δυναμικό και πόρους. Υπό αυτήν την έννοια, το Κεφάλαιο 40 της Ατζέντας 21 επικεντρώνεται στο ρόλο της πληροφορίας στην βιώσιμη ανάπτυξη, σκιαγραφώντας:

Τα εθνικά και διεθνή κέντρα δεδομένων και πληροφορίας πρέπει να αναπτύ-

*ξουν συστήματα διαρκούς και αξιόπιστης συλλογής δεδομένων και να χοησι-
μοποιούν γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, έμπειρα συστήματα, μοντέλα
και μια πλειάδα τεχνικών για την αποτίμηση και την ανάλυση των δεδομένων.*

(Article 40.9) [204]

Καθίσταται λοιπόν σαφές, ότι η αποτελεσματική διευθέτηση των περιβαλλοντικών θεμάτων απαιτεί την χρήση ισχυρών, νέων εργαλείων από τον χώρο ΤΠΕ για τη διαχεί-
ριση, χρήση και διάθεση δεδομένων που ήδη υπάρχουν ή θα καταγραφούν στο μέλλον [121, 122]. Η διαχείριση περιβαλλοντικών συστημάτων δεν είναι μια εύκολη υπόθεση
καθότι απαιτεί την επιστημονική εξειδίκευση σε ένα μεγάλο εύρος επιστημών, που συ-
μπεριλαμβάνει τις επιστήμες περιβάλλοντος, μηχανικής και τεχνολογίας, αλλά και τις
κοινωνικές, οικονομικές και πολιτικές επιστήμες [36].

Ακόμη, η διάχυση της περιβαλλοντικής πληροφορίας είναι εν γένει μια δύσκολη ερ-
γασία γιατί συνήθως η πληροφορία βρίσκεται σε γεωγραφικά απομακρυσμένα και ετε-
ρογενή συστήματα. Καθότι τα συστήματα αυτά κατασκευάστηκαν δίχως να προνοηθούν
απαιτήσεις που σχετίζονται με την διαλειτουργικότητα ή την διευρυμένη πρόσβαση, συνή-
θως η περιβαλλοντική πληροφορία είναι δύσκολο να προσπελαστεί από δευτερεύοντες
χρήστες [167]. Με τον τρόπο αυτό αποθαρρύνονται οι προσπάθειες υποστήριξης αποφά-
σεων και δημιουργίας κοινής αντίληψης για τις περιβαλλοντικές συνθήκες και ενέργειες,
οι οποίες βασίζονται στα διαθέσιμα δεδομένα.

Έτσι, προβάλει αδήριτη η ανάγκη να βρεθούν αποτελεσματικές μέθοδοι επικοινωνί-
ας της περιβαλλοντικής πληροφορίας, που παρεμβάλλουν **προνοητικές** και **συνεργατικές**
ενέργειες ανάμεσα στις διαδικασίες παραγωγής των δεδομένων και τους τελικούς υπεύ-
θυνους λήψης αποφάσεων, χωρίς ωστόσο να μειώνουν την ποιότητα και την αξιοπιστία
των περιβαλλοντικών δεδομένων [46]. Καταλήγοντας, η αξία της περιβαλλοντικής πληρο-
φορίας συνίσταται στο γεγονός ότι αποτελεί μέσον για την τεκμηρίωση των αποφάσεων
και την υποστήριξη των ενεργειών που σχετίζονται με τη βιώσιμη ανάπτυξη και το πε-
ριβάλλον.

Με σκοπό να προσεγγίσουμε την περιοχή της επιστήμης της περιβαλλοντικής πληρο-
φορικής, αναψηλαφούμε τους διάφορους όρους που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία
για να περιγράψουν την συγκεκριμένη περιοχή της επιστήμης. Οι όροι που απαντώνται
πιο συχνά είναι "περιβαλλοντική πληροφορική", "οικολογική πληροφορική" και "ολοκλη-
ρωμένη περιβαλλοντική αποτίμηση με τη βοήθεια υπολογιστή" και οι οποίοι παρουσιάζο-
νται παρακάτω.

2.2 Η Περιβαλλοντική πληροφορική

2.2.1 Η περιβαλλοντική πληροφορική

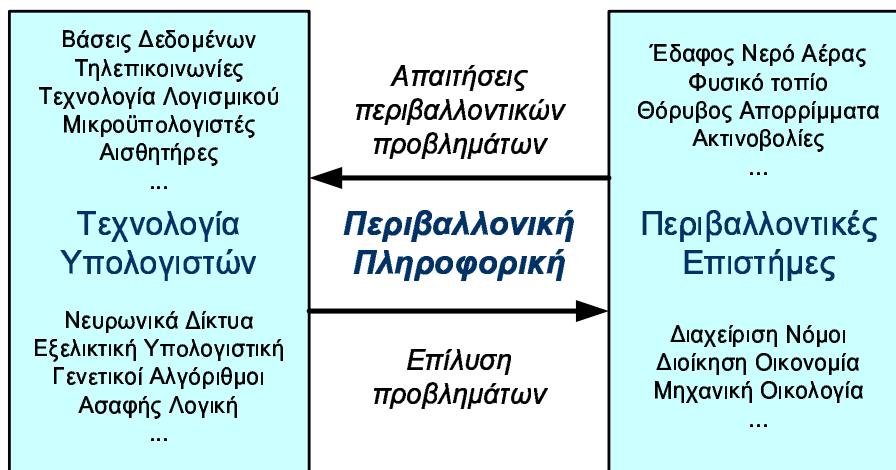
Η περιβαλλοντική πληροφορική αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της εφαρμοσμένης πληροφορικής και παρέχει την μεθοδολογική υποστήριξη για την εφαρμογή των υπολογιστών με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος [160]. Η ομάδα εργασίας της IFIP για τους υπολογιστές και το περιβάλλον ορίζει την περιβαλλοντική πληροφορική ως την ερευνητική πρωτοβουλία που εξετάζει την εφαρμογή της τεχνολογίας υπολογιστών στην έρευνα, παρακολούθηση, αποτίμηση, διαχείριση και χάραξη πολιτικής (Policy) για το περιβάλλον [95]. Ο αγγλικός όρος που χρησιμοποιείται για την περιβαλλοντική πληροφορική είναι Environmental Informatics ή κάποιες φορές και ο σύντομος όρος Enviromatics.

Η περιβαλλοντική πληροφορική, λοιπόν, χρησιμοποιεί μεθόδους, τεχνικές και εργαλεία της επιστήμης των υπολογιστών για την ανάλυση, υποστήριξη και καθιέρωση των διαδικασιών επεξεργασίας πληροφορίας που συμβάλλουν στην διερεύνηση, την αποφυγή, και τον περιορισμό της υποβάθμισης και καταστροφής του φυσικού περιβάλλοντος [175]. Η επίλυση των ευμετάβλητων, έντονα διασυνδεδεμένων και διαθεματικών προβλημάτων που σχετίζονται με το περιβάλλον απαιτούν την αποτελεσματική χρήση νέων μεθόδων και τεχνικών διαχείρισης πληροφορίας. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην ανάπτυξη της επιστημονικής περιοχής της περιβαλλοντικής πληροφορικής [173].

Η πρόκληση που επωμίζεται η περιβαλλοντική πληροφορική σχετίζεται με την ολοκλήρωση ετερογενών συστημάτων σε ένα κατανευμένο περιβαλλοντικό σύστημα πληροφοριών. Η πρόκληση αυτή απαιτεί τόσο την δημιουργία νέων μεθόδων πλοήγησης και επεξεργασίας δεδομένων, όσο και την παροχή υπηρεσιών μεταδεδομένων (Meta-data), όπως λεξικά δεδομένων και υπηρεσιών, και συναφών δεδομένων (ή συν-δεδομένων, Co-data), όπως γεωγραφικές και χρονικές αναφορές, ώστε να υποστηριχθεί η αποτελεσματική χρήση των υφιστάμενων δεδομένων και δομών [79]. Υπό το πρίσμα αυτό, ο στόχος της περιβαλλοντικής πληροφορικής είναι η υποστήριξη των υπευθύνων λήψης αποφάσεων να συσχετίσουν πιο αποτελεσματικά την γνώση του περιβάλλοντος με τους κοινωνικούς, οικονομικούς και οικολογικούς στόχους για το μέλλον [92]. Παράλληλα, μπορεί να συσχετιστεί άμεσα και με την παροχή υπηρεσιών για τον πολίτη και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής του στο πλαίσιο της αειφόρου ανάπτυξης [105].

Η περιβαλλοντική πληροφορική μπορεί να θεωρηθεί ως η περιοχή της επιστήμης που φέρνει κοντά, από τη μία πλευρά, μια πλειάδα εργαλείων και τεχνικών της πληροφορικής

και από την άλλη τα δίκτυα παρακολούθησης του περιβάλλοντος και τα διαθεματικά μοντέλα μελέτης του φυσικού περιβάλλοντος. Σκοπός της είναι να προκύψουν λύσεις στα προβλήματα των περιβαλλοντικών επιστημών που να είναι αποτελεσματικές, να ενέχουν λιγότερους κινδύνους και να υποστηρίζουν τη δημιουργία κοινής αντίληψης για τις περιβαλλοντικές αξίες [92]. Έτσι, η περιβαλλοντική πληροφορική συνδυάζει τεχνικές της επιστήμης των υπολογιστών, όπως οι βάσεις δεδομένων, τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, η μοντελοποίηση και η προσομοίωση, τα γραφικά υπολογιστών και η ανάπτυξη διεπαφών, η διαχείριση γνώσης και οι τεχνικές μηχανικής μάθησης, με κατάλληλο τρόπο ώστε να εφαρμοστούν σε περιβαλλοντικά προβλήματα [160, 88]. Σε μια γραφική αναπαράσταση, στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ο διαμεσολαβητικός ρόλος της περιβαλλοντικής πληροφορικής, που παρέχει λύσεις για τα προβλήματα του περιβάλλοντος χρησιμοποιώντας μεθόδους και τεχνικές της επιστήμης των υπολογιστών.



Σχήμα 2.2: Ο διαμεσολαβητικός ρόλος της περιβαλλοντικής πληροφορικής(Προσαρμογή από [88])

Εν κατακλείδι, κύριο αντικείμενο της περιβαλλοντικής πληροφορικής θεωρείται η μεθοδολογική υποστήριξη της εφαρμογής των τεχνολογιών πληροφορικής για την προστασία του περιβάλλοντος. Ωστόσο, η περιβαλλοντική πληροφορική δεν περιορίζεται στην εφαρμογή τεχνολογιών πληροφορικής σε περιβαλλοντικές εφαρμογές για την διευκόλυνση της υλοποίησης και παρουσίασης των περιβαλλοντικών συστημάτων, αλλά συμβάλλει ενεργά στη δημιουργία νέων μεθόδων και τεχνικών για την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με το περιβάλλον. Έτσι, η περιβαλλοντική πληροφορική δρα ως καταλύτης για την ολοκλήρωση δεδομένων, πληροφοριών και γνώσης από ετερογενείς πηγές που σχετίζονται με το περιβάλλον [88].

2.2.2 Η οικολογική πληροφορική

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.1, πέραν του όρου περιβαλλοντική πληροφορική, στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιείται και όρος οικολογική πληροφορική. Ένας ορισμός που δίνεται στο λεξικό Webster για την οικολογική πληροφορική είναι ο ακόλουθος:

Η οικολογική πληροφορική ή οικοπληροφορική (Ecological informatics και Eco-informatics, αντίστοιχα) είναι η περιοχή της επιστήμης της πληροφορικής που ασχολείται με την οικολογία και τις περιβαλλοντικές επιστήμες.²

Η οικολογική πληροφορική επικεντρώνεται στην εφαρμογή των υπολογιστών για την διαχείριση της οικολογικής πληροφορίας [138], και θεωρείται ως η ευρεία διεπιστημονική περιοχή που ενσωματώνει τα θεωρητικά και πρακτικά εργαλεία της επιστήμης των υπολογιστών για την κατανόηση, δημιουργία, επεξεργασία, και διάχυση οικολογικών δεδομένων και πληροφορίας [139].

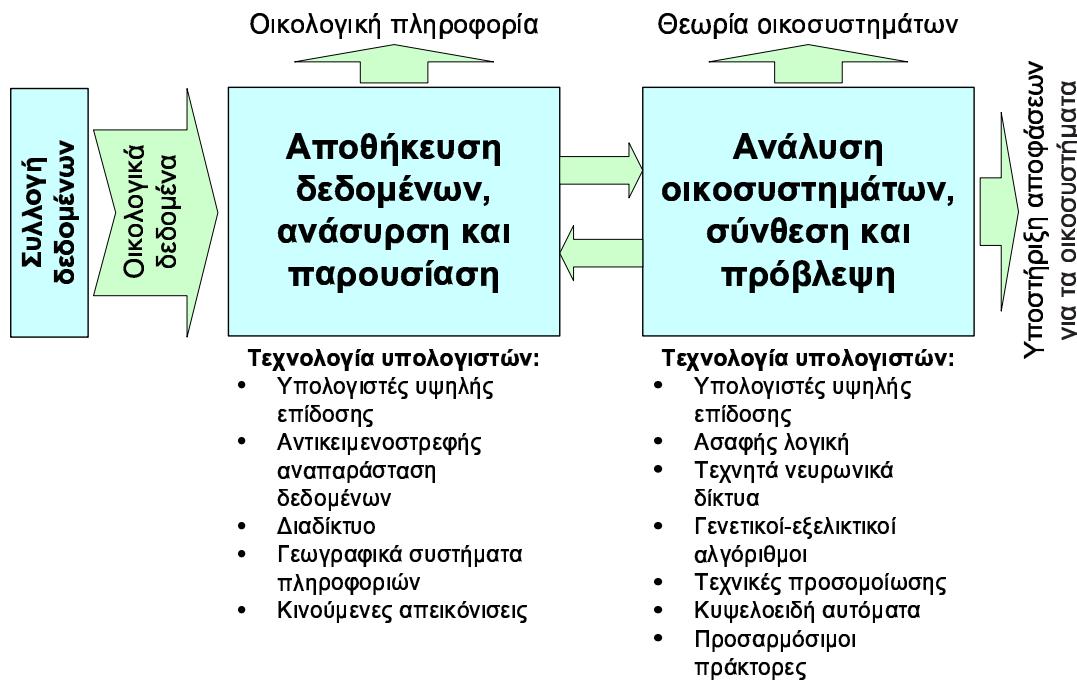
Η οικολογική πληροφορική παρέχει ένα διευρυμένο πλαίσιο εργασίας και προωθεί την χρήση προηγμένων υπολογιστικών τεχνικών με σκοπό:

- την διασάφηση των αρχών διαχείρισης πληροφορίας σε κάθε επίπεδο πολυπλοκότητας των οικοσυστημάτων αλλά και ανάμεσα στα επίπεδα αυτά, –από το επίπεδο των γονιδίων μέχρι τα περιβαλλοντικά οικοσυστήματα και δίκτυα–
- την υποστήριξη διάφανων αποφάσεων που σχετίζονται με την οικολογική βιωσιμότητα, τη βιοποικιλότητα και την υπερθέρμανση του πλανήτη [176].

Υπό την παραπάνω έννοια, η οικολογική πληροφορική αποτελεί σύνθεση επιστημών του περιβάλλοντος και πληροφορικής με σκοπό την δημιουργία ενός διαύλου πληροφορίας που ολοκληρώνει ετερογενείς και χωρικά κατανεμημένες βάσεις δεδομένων με υπολογιστικές υπηρεσίες, όπως μοντέλα πρόβλεψης, ανάλυσης και σχεδιασμού. Απότερος στόχος της προσπάθειας αυτής είναι η παροχή προηγμένων υπηρεσιών στους σπουδαστές, τους ερευνητές και τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, που αφορούν τον εντοπισμό, την προσέλαση και την ανάλυση της γνώσης που σχετίζεται με τα οικολογικά, κοινωνικά και οικονομικά συστήματα. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται τόσο η ανάπτυξη των κατάλληλων υπολογιστικών εργαλείων, όσο και η δημιουργία μιας κοινής αντίληψης για το περιβάλλον και τις αξίες της οικολογίας [200].

Τα διακριτά χαρακτηριστικά της οικολογικής πληροφορικής είναι:

²Ορισμός από www.webster-dictionary.org και www.wordiq.com.



Σχήμα 2.3: Τύποι συστημάτων οικολογικής πληροφορικής (Προσαρμογή από [176])

- η ολοκλήρωση δεδομένων οριζοντίως μεν στις διάφορες κατηγορίες οικοσυστημάτων, κατακορύφως δε στα διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας,
- ο συμπερασμός από τα πρότυπα δεδομένων που ενέχονται στις οικολογικές διαδικασίες, και
- η ευπροσάρμοση προσομοίωση και πρόβλεψη των οικοσυστημάτων.

Βασικά εργαλεία της οικολογικής πληροφορικής θεωρούνται οι υπολογιστικές τεχνικές που εμπνεύστηκαν από βιολογικά συστήματα, όπως η ασαφής λογική, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, οι γενετικοί αλγόριθμοι και οι προσαρμόσιμοι πράκτορες [176]. Στο Σχήμα 2.3 αναπαρίσταται ο διπτός στόχος της οικολογικής πληροφορικής. Τα οικολογικά δεδομένα συνεχώς εξευγενίζονται δημιουργώντας οικολογική πληροφορία, θεωρίες οικοσυστημάτων και υποστήριξη αποφάσεων για τα οικοσυστήματα μέσω δύο βασικών υπολογιστικών τεχνικών: Την αποθήκευση, ανάσυρση και παρουσίαση δεδομένων, και την ανάλυση, σύνθεση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς των οικοσυστημάτων.

Οι υπολογιστικές τεχνικές της οικολογικής πληροφορικής συμπεριλαμβάνουν τους υπολογιστές υψηλής επίδοσης, την αντικειμενοστραφή αναπαράσταση δεδομένων, το διαδίκτυο, τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, τις κινούμενες απεικόνησεις, την ασαφή λογική, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τους γενετικούς και εξελικτικούς αλγόριθμους, τις τεχνικές προσομοίωσης, τα κυψελοειδή αυτόματα και τους προσαρμόσιμους πράκτορες.

2.2.3 Ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αποτίμηση με τη βοήθεια υπολογιστή

Η Ολοκληρωμένη Περιβαλλοντική Αποτίμηση , εν συντομίᾳ ΟΠΑ (Integrated Environmental Assessment) ασχολείται με τη διαχείριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που οφείλεται στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Η ΟΠΑ ορίζεται ως η διεπιστημονική διαδικασία αναγνώρισης, ανάλυσης και αποτίμησης όλων των φυσικών και ανθρώπινων διεργασιών που επηρεάζουν το περιβάλλον και τους φυσικούς πόρους. Στόχος της ΟΠΑ είναι να υποστηρίξει το πλαίσιο υλοποίησης βέλτιστων πολιτικών και στρατηγικών, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις περιβαλλοντικές προτεραιότητες όσο και τις οικονομικές και κοινωνικές ανάγκες [182]. Η ΟΠΑ διακρίνεται σε δύο σκέλη:

- α. Το πρακτικό σκέλος, που αφορά την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, και
- β. Το σκέλος της συναντίληψης, που αφορά την κατανόηση όλων των μερών που επηρεάζουν την απόφαση και πρέπει να ενσωματωθούν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων [164].

Υπό την έννοια αυτή, η ΟΠΑ βοηθά τους διοικούντες και τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να λύσουν προβλήματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό και τη διαχείριση των φυσικών πόρων και του περιβάλλοντος, να βελτιώσουν την αντίληψή τους για τις περιβαλλοντικές συνθήκες και να σχεδιάσουν προστατευτικές και επανορθωτικές στρατηγικές.

Τα εργαλεία και οι μέθοδοι της ΟΠΑ διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: στις αναλυτικές μεθόδους και τις συμμετοχικές μεθόδους. Οι αναλυτικές μέθοδοι βασίζονται στις επιστήμες του περιβάλλοντος και χρησιμοποιούν τεχνικές μοντελοποίησης [117], σεναρίων εκτίμησης [9] ή ανάλυσης κινδύνου. Οι συμμετοχικές μέθοδοι προέρχονται από τις κοινωνικές επιστήμες και βασίζονται σε μεθόδους διαλόγου, ασκήσεις πολιτικής ή αμοιβαία εκμάθηση [208]. Η ΟΠΑ χρησιμοποιεί τα εργαλεία αυτά για να συνδέσει τα διαθέσιμα δεδομένα και τη γνώση μεταξύ τους ώστε να δημιουργήσει προβλέψεις για μελλοντικά γεγονότα και την κατάσταση του περιβάλλοντος.

Η τεχνολογία των υπολογιστών έχει στενή σχέση κυρίως με τις αναλυτικές μεθόδους ΟΠΑ. Οι τεχνικές και τα εργαλεία που έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί περιλαμβάνουν δυναμικά μοντέλα προσομοιώσης, μοντέλα βελτιστοποίησης, εργαλεία πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων, θεωρία παιγνίων και βάσεις δεδομένων. Τα ολοκληρωμένα μοντέλα περιβαλλοντικής αποτίμησης είναι υπολογιστικά εργαλεία που συνδυά-

ζουν γνώση από διάφορες επιστήμες για να αποτιμήσουν κάποιο πρόβλημα. Συνήθως, σε ένα τέτοιο σύστημα αναπαριστώνται το φυσικό περιβάλλον και οι κοινωνικο-οικονομικοί παράγοντες. Σε ένα **υπολογιστικό σύστημα ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής αποτίμησης** ενσωματώνεται η αιτιακή αλυσίδα (Causal chain) με όλες τις αναδράσεις της, που περιγράφει το φαινόμενο που μελετάται [209].

Μια κατηγοριοποίηση των συστημάτων ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής αποτίμησης με τη χρήση υπολογιστή είναι η ακόλουθη [111]:

- a. Συστήματα αναγνώρισης και διάγνωσης, που σχετίζονται με την αναγνώριση της κατάστασης του συστήματος (Nowcasting).
- β. Συστήματα σεναρίων εκτίμησης, τα οποία αφορούν την πρόβλεψη της εξέλιξης του συστήματος όταν αλλάξει ένας ή περισσότεροι παράγοντες (drivers) του συστήματος (Forecasting).
- γ. Συστήματα ανάδρομων σεναρίων, που ερευνούν το πώς πρέπει να εξελιχθούν ορισμένοι παράγοντες του συστήματος, ώστε να επιτευχθεί ή να εξασφαλισθεί μια επιθυμητή (μελλοντική) κατάσταση του συστήματος (Backcasting).

Οι πρώτοι δύο τύποι αφορούν συστήματα που ενσωματώνουν αναλυτικές μεθόδους, ενώ ο τρίτος αφορά κυρίως τις συμμετοχικές μεθόδους.

2.2.4 Επιστημονικές κοινότητες και δίκτυα εργασίας

Η περιοχή της επιστήμης η οποία ασχολείται με την εφαρμογή μεθόδων των ΤΠΕ σε εφαρμογές περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως περιβαλλοντική πληροφορική, ή αλλού ως οικολογική πληροφορική ή άλλες φορές ως ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αποτίμηση με τη βοήθεια υπολογιστή. Στα πλαίσια της διατριβής θα αναφερόμαστε σε όλες τις παραπάνω περιοχές με τον όρο "**Περιβαλλοντική πληροφορική**", χωρίς να γίνεται κάποια περαιτέρω διάκριση, εκτός από τις φορές που κρίνεται απαραίτητο, οπότε και θα χρησιμοποιούνται οι αρχικοί όροι. Ο λόγος που υπάρχει διαφορετική ορολογία, όσον αφορά την περιβαλλοντική πληροφορική οφείλεται, κατά τη γνώμη του συγγραφέα, στο γεγονός ότι με την έκρηξη των υπολογιστών οι διάφορες κοινότητες που σχετίζονται με το περιβάλλον υιοθέτησαν, σταδιακά, την τεχνολογία των υπολογιστών, χωρίς ωστόσο να επικοινωνούν ενεργά μεταξύ τους. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη την εγγενή διαθεματικότητα της περιβαλλοντικής επιστήμης, αναπτύχθηκαν διάφορες κοινότητες που ασχολούνται με την περιοχή της περιβαλλοντικής πληροφορικής. Οι κυριότερες από αυτές αναφέρονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Κοινότητες και δίκτυα περιβαλλοντικής πληροφορικής

- Η ομάδα εργασίας 5.11 του Διεθνούς Ιδρύματος για την Επεξεργασία Πληροφορίας (IFIP - International Foundation for Information Processing - www.ifip.org) για τους Υπολογιστές και το Περιβάλλον (IFIP Working Group 5.11: Computers and the Environment - <http://www.enviromatics.org>)
- Η διεθνής εταιρεία μοντέλων και λογισμικού για το περιβάλλον (iEMSSs - International Environmental Modelling and Software Society - www.iEMSSs.org).
- Η διεθνής εταιρεία για τις επιστήμες περιβαλλοντικής πληροφορίας (ISEIS - International Society for Environmental Information Sciences - www.iseis.org).
- Η διεθνής εταιρεία οικολογικής πληροφορικής (ISEI - International Society for Ecological Informatics - www.waite.adelaide.edu.au/ISEI/).
- Το ευρωπαϊκό φόρουμ για την ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αποτίμηση (EFIEA - European Forum on Integrated Environmental Assessment - www.efiea.org) και η Εταιρεία Ολοκληρωμένης Περιβαλλοντικής Αποτίμησης (TIAS - The Integrated Assessment Society, www.tias-web.info)
- Η Γερμανική Εταιρεία Πληροφορικής (GI - Gesellschaft für Informatik - www.gi-ev.de) δραστηριοποιείται έντονα στο χώρο της περιβαλλοντικής πληροφορικής (Umweltinformatik). Η τεχνική επιτροπή 4.6 της εταιρείας ασχολείται με την "Πληροφορική για την προστασία του περιβάλλοντος" (Technical Committee 4.6 "Informatics for Environmental Protection" - www.iai.fzk.de/Fachgruppe/GI/).
- Η ομάδα εργασίας για την προσέγγιση των περιβαλλοντικών επιστημών και της τεχνητής νοημοσύνης (BESAI - Binding Environmental Sciences and Artificial Intelligence Working Group - <http://www.lsi.upc.es/~webia/besai/>).

Οι επιστημονικές εργασίες της περιβαλλοντικής πληροφορικής παρουσιάζονται σε επιστημονικά συνέδρια και περιοδικά, που είτε σχετίζονται με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προσεγγίζονται, είτε με τις τεχνολογίες υπολογιστών που χρησιμοποιήθηκαν. Ως συνέπεια, οι σχετικές εργασίες είναι διάσπαρτες σε ένα μεγάλο εύρος επιστημονικών περιοδικών με μοναδική εξαίρεση το διεθνώς αναγνωρισμένο περιοδικό **Environmental Modeling and Software**, που επικεντρώνεται στα μοντέλα και τις εφαρμογές λογισμικού για το περιβάλλον. Το κενό αυτό στο χώρο της περιβαλλοντικής πληροφορικής επιχειρεί να καλύψει ένα καινούργιο περιοδικό, το **Journal of Environmental Informatics**, το οποίο δημιουργήθηκε πρόσφατα (2003). Αντίστοιχα, τα διεθνή συνέδρια που σχετίζονται άμεσα με την περιβαλλοντική πληροφορική είναι λιγοστά.

2.3 Τα συστήματα περιβαλλοντικής πληροφορίας

2.3.1 Γενικά

Παρότι υπάρχουν διάφορες κοινότητες που ασχολούνται με την περιβαλλοντική πληροφορική και οι οποίες όπως έγινε σαφές στην παραπάνω ενότητα δεν χρησιμοποιούν κοινή ορολογία, ωστόσο όλοι συμφωνούν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό ότι αντικείμενο της περιβαλλοντικής πληροφορικής είναι η ανάπτυξη, διαχείριση και η έρευνα των Συστημάτων Περιβαλλοντικής Πληροφορίας (ΣΠΠ) (Environmental Information Systems) [81]. Ένας πολύ γενικός ορισμός των ΣΠΠ είναι αυτός του Günter (1998) [79]:

Τα **Συστημάτα Περιβαλλοντικής Πληροφορίας** ασχολούνται με τη διαχείριση δεδομένων που αφορούν τη γή, το νερό, τον αέρα και τους ζωντανούς οργανισμούς του φυσικού περιβάλλοντος.

Το πλαίσιο εργασίας που προτείνει ο Günter δομεί τα ΣΠΠ σε τέσσερεις φάσεις: α. συλλογή δεδομένων, β. αποθήκευση δεδομένων, γ. ανάλυση δεδομένων και δ. διαχείριση μεταδεδομένων. Το απλό αυτό μοντέλο αντιστοιχεί σε μια πολύπλοκη διαδικασία βαθμαίου μετασχηματισμού των πρωτογενών δεδομένων σε συνεκτικές αναφορές κατάλληλες για την υποστήριξη αποφάσεων σε υψηλό επίπεδο.

Τα ΣΠΠ χρησιμοποιούνται ως η τεχνολογική και οργανωτική υποδομή που συγκεντρώνει περιβαλλοντική πληροφορία από εξειδικευμένα πεδία εφαρμογής σε βάσεις δεδομένων, που συχνά συμπεριλαμβάνουν γεωγραφικές αναφορές. Για το λόγο αυτό, αρκετοί επιστήμονες (π.χ. βλ. [213]) θεωρούν τα ΣΠΠ ως εκτεταμένα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών. Ωστόσο, με βάση και την εισαγωγή στην περιβαλλοντική πληροφορική που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.2, καθίσταται σαφές ότι το αντικείμενο των ΣΠΠ είναι

πολύ ευρύτερο. Τα ΣΠΠ αφορούν **θεματικά δεδομένα** (όπως περιβαλλοντικοί δείκτες, πίνακες χαρακτηριστικών χημικών ουσιών, συλλογές εγγράφων από τη βιβλιογραφία, ή βάσεις νομικών κειμένων και οδηγιών για το περιβάλλον, κα), **δεδομένα με χρονική αναφορά** (όπως η διακύμανση των συγκεντρώσεων περιβαλλοντικών όπων, οι μεταβολές της χρήσης γης, η διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων, κλπ), και **δεδομένα με γεωγραφική αναφορά** (όπως αεροφωτογραφίες φυσικών βιοτόπων, η δομή των δικτύων μεταφοράς νερού, κλπ). Είναι φανερό ότι τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών δεν μπορούν να διαχειριστούν όλους τους παραπάνω τύπους δεδομένων [87]. Έτσι, ένας πιο σαφής ορισμός των ΣΠΠ είναι αυτός του Haklay (1999) [81]:

Ένα ΣΠΠ είναι μια συλλογή δεδομένων και πληροφοριών που έχουν κάποια συνάφεια με τη μελέτη, την παρακολούθηση ή την εξερεύνηση του φυσικού περιβάλλοντος.

Στα πλαίσια της περιβαλλοντικής πληροφορικής, ο όρος "Σύστημα Πληροφοριών" έχει μια ευρεία έννοια και δεν περιορίζεται στο υλικό και το λογισμικό που το συνθέτουν. Ο όρος περιλαμβάνει το *μοντέλο δεδομένων*, που ενσωματώνει τη δομή, τον ορισμό και τις σχέσεις ανάμεσα στα στοιχεία δεδομένων, αλλά και τις διαδικασίες διαχείρισης του κύκλου ζωής των δεδομένων αυτών [69]. Φυσικά, οι ενέργειες αυτές μπορούν και πρέπει να υποστηρίζονται από ένα ΣΠΠ, ωστόσο δεν αποτελούν πάντα το κύριο αντικείμενο τους.

Συνοψίζοντας, τα ΣΠΠ καλύπτουν μια ευρεία περιοχή εφαρμογών που σχετίζονται με το περιβάλλον και συμπεριλαμβάνουν συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου, συστήματα διαχείρισης πληροφοριών και ανάλυσης δεδομένων αλλά και συστήματα σχεδιασμού και υποστήριξης αποφάσεων [89].

2.3.2 Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για το περιβάλλον

Όταν ο κύριος σκοπός ενός ΣΠΠ είναι η υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων, τότε συχνά τα συστήματα αυτά αναφέρονται ως **Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για το Περιβάλλον** (ΣΥΑΠ, Environmental Decision Support Systems) [78, 89, 90]. Ένα ΣΥΑΠ δεν είναι παρά ένα ΣΠΠ που ενσωματώνει ευφυή χαρακτηριστικά με σκοπό να διευκολύνουν τους υπευθύνους να λάβουν αποφάσεις που σχετίζονται με το περιβάλλον, μειώνοντας το χρόνο που απαιτείται για να ληφθούν οι αποφάσεις και βελτιώνοντας την αξιοπιστία και την ποιότητα των αποφάσεων αυτών [80]. Σύμφωνα με τον Cortés (2000), τα ΣΥΑΠ αναλαμβάνουν την πολύ σημαντική αποστολή να βοηθήσουν στη μείωση των

κινδύνων που προκαλεί η αλληλεπίδραση των ανθρώπινων κοινωνιών με το φυσικό τους περιβάλλον [35].

Ένα ΣΥΑΠ θεωρείται ένα υπολογιστικό σύστημα που βοηθά τους ιθύνοντες να διερευνήσουν τις εναλλακτικές παραδοχές και πιθανές ενέργειες χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα και τη γνώση του πεδίου εφαρμογής, ώστε να καταλήξουν σε υποδείξεις σχετικά με την άσκηση περιβαλλοντικής πολιτικής. Η ενσωμάτωση μιας ρητής διαδικασίας λήψης αποφάσεων σε ένα ΣΥΑΠ, που βασίζεται σε μια επιστημονική μέθοδο ή/και σε πραγματικά δεδομένα, αποδεικνύει και δικαιολογεί την ορθότητα της χρήσης του ΣΥΑΠ [65]. Τα ΣΥΑΠ μπορεί να είναι επικεντρωμένα είτε σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα που σχετίζεται με το περιβάλλον, είτε σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα και σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία [180].

2.3.3 Ταξινομία των ΣΠΠ

Τα κλασικά ΣΠΠ εμπλέκουν δύο βασικές κατηγορίες χρηστών: (α) τα κρατικά ινστιτούτα και τους οργανισμούς για τη μελέτη του περιβάλλοντος, και (β) τις βιομηχανίες. Με βάση αυτήν την παρατήρηση, οι Hilty και Ruddy διακρίνουν δύο κατηγορίες ΣΠΠ [89, 90]:

A ΣΠΠ δημοσίου ενδιαφέροντος

Τα συστήματα αυτά ικανοποιούν τις ανάγκες για δημόσια επαγρύπνηση για τις συνθήκες του φυσικού περιβάλλοντος, είναι προαπαιτούμενα για την λήψη πολιτικών αποφάσεων, ενώ στα πλαίσια της άσκησης περιβαλλοντικής πολιτικής έχουν εκτελεστικό ρόλο.

B ΣΠΠ βιομηχανικής χρήσης

Τα συστήματα τούτα αναπτύχθηκαν ως μέρος της συμμόρφωσης των εταιρειών με τις νομικές επιταγές που αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος. Αρχικά, ο κύριος σκοπός τους περιορίζονταν στην αναφορά των περιβαλλοντικών συνθηκών στους εμπλεκόμενους φορείς. Πλέον, τα σύγχρονα συστήματα δίνουν έμφαση στην οικολογική αποδοτικότητα και τη διαχείριση του κύκλου ζωής των πρώτων υλών των βιομηχανιών.

Η παραπάνω διάκριση των ΣΠΠ είναι ενδεικτική των πεδίων εφαρμογής τους, ωστόσο δεν παρέχει κάποια ένδειξη για τις λειτουργίες που επιτελούν και τις εμπλεκόμενες τεχνολογίες. Η ταξινόμηση των Hilty, Page, Rademacher και Riekert (1995) είναι πλέον κατάλληλη για το σκοπό αυτό. Με βάση την ταξινόμηση αυτή, τα ΣΠΠ διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες [88]:

I. Συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου

Τα συστήματα αυτά αλληλεπιδρούν άμεσα με τις διαδικασίες και τα αντικείμενα που σχετίζονται με το περιβάλλον, και περιλαμβάνουν τα απαιτούμενα συστήματα τηλεμετρίας και ανάλυσης πρωτογενών δεδομένων. Οι διαδικασίες που αναλαμβάνουν τα συστήματα της κατηγορίας αυτής αφορούν την επεξεργασία ακατέργαστων δεδομένων, την σύνοψη, και την κατηγοριοποίηση των δεδομένων (όπου μπορεί να εμπλέκονται και τεχνικές ασαφούς λογικής, ή τεχνητά νευρωνικά δίκτυα). Τα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου μπορεί να έχουν είτε άμεση σχέση με το περιβάλλον (όπως ο έλεγχος της εκπομπής ρύπων), είτε έμμεση σχέση (όπως συστήματα εξοικονόμησης ενεργειακών πόρων).

II. Κλασσικά πληροφοριακά συστήματα

Τα συστήματα αυτά αφορούν την υποστήριξη διαδικασιών εισαγωγής, αποθήκευσης, δόμησης, ολοκλήρωσης, ανάσυρσης, και ανάκτησης περιβαλλοντικής πληροφορίας. Τα δεδομένα που διαχειρίζονται μπορεί να είναι χρονοσειρές περιβαλλοντικών δεδομένων, αντικείμενα, ημι-δομημένα κείμενα, ή βάσεις τεχνικών αναφορών και νομοθεσίας. Οι τεχνολογίες που εμπλέκονται είναι τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, οι βάσεις δεδομένων, και τα συστήματα πολυμέσων και υπερμέσων. Συνήθως, η χωρική και χρονική διάσταση των δεδομένων παίζει ένα πολύ σημαντικό ρόλο για τα συστήματα αυτής της κατηγορίας.

III. Συστήματα ανάλυσης και υπολογιστικής αποτίμησης

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει συστήματα που υποστηρίζουν την διαδικασία επεξεργασίας των περιβαλλοντικών δεδομένων χρησιμοποιώντας σύνθετα μαθηματικά και στατιστικά μοντέλα και μεθόδους μοντελοποίησης και προσομοίωσης. Τα συστήματα της κατηγορίας σκοπεύουν στην αναγνώριση των αιτίων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την πρόβλεψη των πιθανών επιπτώσεων υποστηρίζοντας τη δημιουργία σεναρίων.

IV. Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων και σχεδιασμού

Τα συστήματα αυτά απευθύνονται στους ιθύνοντες λήψης αποφάσεων και παρέχουν υποστήριξη των διαδικασιών αποτίμησης των επιπτώσεων εναλλακτικών ενεργειών και τεκμηρίωσης των εναλλακτικών αποφάσεων. Συνήθως χρησιμοποιούν μεθόδους πολύ-κριτηριακής ανάλυσης εναλλακτικών ενεργειών. Στην κατηγορία αυτή εμπίπτουν και τα συστήματα διαχείρισης και ελέγχου συμμόρφωσης που εφαρμόζουν οι

βιομηχανίες (όπως τα σχήματα ISO-14000 [96] και EMAS [51]).

V. Ολοκληρωμένα πληροφοριακά συστήματα

Όσα συστήματα δεν εμπίπτουν σε καμία από τις παραπάνω κατηγορίες κατατάσσονται σ' αυτήν την κατηγορία. Συνήθως είναι αρθρωτά ή κατανεμημένα συστήματα των οποίων τα δομικά στοιχεία συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των παραπάνω κατηγοριών.

Το Σχήμα 2.4 συνοψίζει τους τρόπους με τους οποίους οι τεχνολογίες υπολογιστών υποστηρίζουν τους διάφορους τύπους ΣΠΠ.

	Βάσεις Δεδομένων	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών	Μοντελοποίηση και προσομοίωση	Ποιοτική και ασφαλής λογική	Ευρυτή ουσιόμετρα	Βάσεις γνώσης	Γραφικά υπολογιστών	Τεχνικές απεκόνισης	Σχεδίαση διεπαφών χρήστη	Εργονομία λογισμικού	Τεχνητή νευρωνική δίκτυα	Μοντέλα συμπερασμού	Ολοκλήρωση δεδομένων, μοντέλων,	
Συστήματα Παρακολούθησης και Ελέγχου	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Κλασσικά Πληροφοριακά Συστήματα	■				■								■	■
Συστήματα Ανάλυσης και Περιβαλλοντικής Αποτίμησης		■		■	■	■		■	■	■				■
Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Σχεδιασμού	■	■		■	■	■	■	■	■					■
Ολοκληρωμένα Πληροφοριακά Συστήματα	■	■			■		■	■	■	■			■	■

Σχήμα 2.4: Τύποι συστημάτων περιβαλλοντικής πληροφορικής και οι εμπλεκόμενες τεχνολογίες (Προσαρμογή από [88])

2.4 Η σημερινή κατάσταση και οι προκλήσεις

Οι ΤΠΕ, όπως αυτές που σχετίζονται με την αντικειμενοστραφή ανάπτυξη λογισμικού, τα κατανεμημένα συστήματα δικτυακών τοπολογιών, τα συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων, τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, τα συστήματα διαχείρισης διαδικασιών και επικοινωνίας, και τα συστήματα γραφικής αναπαράστασης δεδομένων [117], μπορούν να ολοκληρωθούν στα περιβαλλοντικά συστήματα πληροφοριών και να ενσωματώσουν τα αντίστοιχα μοντέλα. Ωστόσο, η ενσωμάτωση των ΤΠΕ σε περιβαλλοντικές

εφαρμογές είναι περιορισμένη. Ο Swayne (2003) ισχυρίζεται ότι αυτό οφείλεται στην έλλειψη οικονομικού κινήτρου από τις βιομηχανίες και το κράτος, ώστε να χρηματοδοτηθούν οι αντίστοιχες επενδύσεις [196]. Ακόμη και αν δεν είναι έτσι, η πραγματικότητα είναι ότι συχνά τα περιβαλλοντικά δεδομένα συχνά δεν αποθηκεύονται ηλεκτρονικά και "θάβονται" σε μη επαναχρησιμοποιήσιμες φόρμες, απομονωμένες αναφορές ή απαρχαιωμένες βάσεις δομένων. Οι μηχανικοί υπολογιστών και οι επιστήμονες της πληροφορικής που ασχολούνται με την υποστήριξη των κρατικών υπηρεσιών και εταιρειών, συχνά αναφέρονται στο "**κενό πληροφορίας**" (information vacuum) που αφορά τα περιβαλλοντικά δεδομένα. Υπό την έννοια αυτή, οι περιβαλλοντικές εφαρμογές υποφέρουν από προβλήματα που σχετίζονται με την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων και έχουν ανάγκη περαιτέρω στήριξης. Η πρόοδος της επιστήμης των υπολογιστών δεν έχει εφαρμοστεί καθολικά και μεθοδευμένα στις επιστήμες του περιβάλλοντος.

Στο πλαίσιο αυτό, η περιβαλλοντική πληροφορική έχει να αντιμετωπίσει προβλήματα προσαρμογής μέχρι την καθιέρωσή της ως ένα αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας λήψης αποφάσεων που σχετίζονται με το περιβάλλον. Έχει όμως ακόμη να αντιμετωπίσει τα εγγενή προβλήματα του πεδίου εφαρμογής που σχετίζονται με την πολυθεματικότητα των περιβαλλοντικών επιστημών, τις συχνά συγκρουόμενες όψεις των χρηστών και τις διαφορετικές προτεραιότητες και αξίες των εμπλεκομένων μερών. Επιπρόσθετα, τα προβλήματα που σχετίζονται με το περιβάλλον έχουν πολλούς βαθμούς ελευθερίας και τα ΣΠΠ καλούνται να αντιμετωπίσουν προκλήσεις που σχετίζονται με το συμπερασμό σε συνθήκες αβεβαιότητας. Τα προβλήματα αβεβαιότητας διατρέχουν κάθετα ένα ΣΠΠ και σχετίζονται με τα δεδομένα, τη δομή, ή και τα μοντέλα που ενσωματώνονται [207]. Σήμερα τόσο οι εταιρείες και οι βιομηχανίες, όσο και οι περιβαλλοντικές υπηρεσίες μπορούν να επωφεληθούν από την υψηλή δυναμική της διαχείρισης γνώσης, αν ακολουθήσουν τις υποδείξεις και ολοκληρώσουν δομές διαχείρισης γνώσης στα υπάρχοντα συστήματα περιβαλλοντικής πληροφορίας [202].

Η πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει η περιβαλλοντική πληροφορική είναι η ενσωμάτωση και η προσαρμογή νέων τεχνικών από το χώρο της ΤΠΕ, όπως η εξόρυξη γνώσης, ο πιθανοτικός συμπερασμός, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, και άλλες μέθοδοι της επιστήμης των υπολογιστών με απώτερο σκοπό την επίλυση των προβλημάτων που ενυπάρχουν στα ΣΠΠ [196]. Στο χώρο αυτό, η παρούσα διατριβή εξετάζει την εφαρμογή της τεχνολογίας των πρακτόρων λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική.

Κεφάλαιο 3

Πράκτορες λογισμικού και συστήματα πρακτόρων

Οι έννοιες του Πράκτορα Λογισμικού (ΠΛ) και των Συστημάτων Πρακτόρων (ΣΠ) παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να εισάγει στον αναγνώστη τις Τεχνικές Ανάπτυξης Λογισμικού με Πράκτορες (ΤΑΛΠ) και να αναδείξει τα πλεονεκτήματα υιοθέτησής της για την ανάπτυξη εφαρμογών.

3.1 Αυτόνομοι πράκτορες

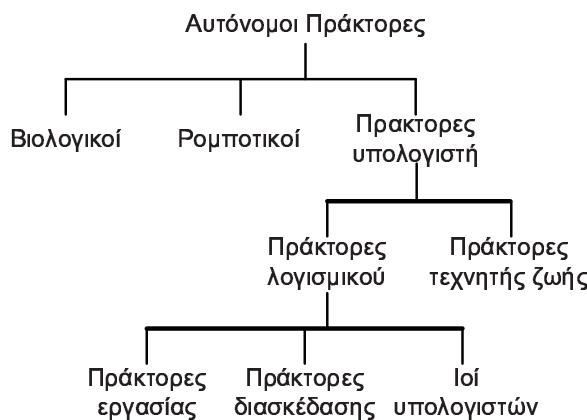
3.1.1 Η έννοια του πράκτορα

Η έννοια του **πράκτορα** (agent) είναι τα τελευταία χρόνια πολύ δημοφιλής στις κοινότητες της πληροφορικής, της μηχανικής λογισμικού και της τεχνητής νοημοσύνης. Στη βιβλιογραφία δεν απαντάται ένας κοινά αποδεκτός ορισμός του πράκτορα. Ωστόσο, η έννοια του πράκτορα είναι (σε κάποιο βαθμό) γνωστή στον καθένα από την καθημερινή ζωή. Παράδειγμα αποτελούν οι ταξιδιωτικοί πράκτορες, που έχουν έναν αντιπροσωπευτικό ρόλο, ενεργώντας για λογαριασμό αεροπορικών εταιρειών ή ξενοδοχείων. Υπό την έννοια αυτή, μπορεί να θεωρηθεί ως πρωταρχικό χαρακτηριστικό των πρακτόρων η **ικανότητα για διαμεσολάβηση**. Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό των πρακτόρων είναι το ότι απολαμβάνουν κάποιο βαθμό **αυτονομίας** (autonomy) από τους εντολείς τους, σε αναλογία με τους ταξιδιωτικούς πράκτορες που μπορούν να συζητούν με πελάτες χωρίς να ενημερώνουν προηγούμενα τις αεροπορικές εταιρείες. Μια τρίτη βασική ιδιότητα ενός πράκτορα είναι ότι συμπεριφέρεται **ανακλαστικά** (reactive) ή/και **προνοητικά** (proactive). Το νόημα της συμπεριφοράς αυτής μπορεί να γίνει αντιληπτό αν αναλογιστούμε πάλι το παράδειγμα του ταξιδιωτικού πράκτορα, ο οποίος είτε περιμένει κάποιος πελάτη να ζητήσει μια κράτηση, οπότε

και αντιδρά σ' αυτό το ερέθισμα (ανακλαστική συμπεριφορά), είτε οργανώνει και διαφημίζει κάποια εκδρομή (προνοητική συμπεριφορά). Είναι φανερό ότι η ανακλαστική και η προνοητική συμπεριφορά ενός πράκτορα δεν είναι αντίθετες η μια με την άλλη. Η συμπεριφορά ενός πράκτορα μπορεί να χαρακτηρίζεται από διαφορετικούς βαθμούς ανακλαστικότητας και προνοητικότητας σε κατάλληλες συνθήκες. Τέλος, οι πράκτορες επιδεικνύουν σε κάποιο βαθμό δευτερεύοντα χαρακτηριστικά, όπως οι ικανότητες εκπαίδευσης, συνεργασίας ή κινητικότητας. Οι ιδιότητες ενός πράκτορα παρουσιάζονται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο.

Μια κοινή βάση συζήτησης για την έννοια του πράκτορα, είναι η έννοια του **αυτόνομου πράκτορα** (autonomous agent), που περιγράφει οντότητες όπως αυτόματα ρομπότ ή βιολογικούς μικροοργανισμούς, αλλά και εφαρμογές υπολογιστών (Σχήμα 3.1). Σε αυτό το επίπεδο γενίκευσης, ένας πλήρης ορισμός του αυτόνομου πράκτορα είναι ο ακόλουθος [66]:

Αυτόνομος πράκτορας είναι ένα σύστημα το οποίο:
τοποθετείται και αποτελεί μέρος ενός περιβάλλοντος,
αισθάνεται το περιβάλλον του κατά τη διάρκεια του χρόνου, και
ενεργεί στο περιβάλλον του, επηρεάζοντας την μελλοντική κατάστασή του, με
σκοπό την επίτευξη των στόχων του.



Σχήμα 3.1: Αυτόνομοι πράκτορες λογισμικού (Προσαρμογή από [130])

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, οι πράκτορες υπολογιστών, μπορούν να διαχωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους **πράκτορες λογισμικού** (Software agents) και τους **πράκτορες τεχνητής ζωής** (Artificial life agents). Οι πράκτορες λογισμικού αποτελούν το κύριο αντικείμενο της διατριβής, και μπορούν να οριστούν ως εξής [76]:

Πράκτορας λογισμικού θεωρείται κάθε υπολογιστική οντότητα η οποία:

- ενεργεί για λογαριασμό τρίτων με αυτόνομο τρόπο
- δρα προνοητικά ή/και αντιδραστικά
- επιδεικνύει κάποιο βαθμό εκμάθησης ή συνεργασίας ή κινητικότητας.

Οι πράκτορες λογισμικού με τη σειρά τους μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις γενικές κατηγορίες: (α) τους πράκτορες εργασιών (όπως ο πράκτορας Sumpy, που διαχειρίζεται αρχεία σε περιβάλλον UNIX [193]), (β) τους πράκτορες διασκέδασης (όπως ο πράκτορας Julia, που είναι ένας από τους πρώτους πράκτορες εικονικής πραγματικότητας που αλληλεπιδρά με τους χρήστες του, δημιουργώντας μια μορφή 'συνομιλίας' [64]), και (γ) τους ιούς υπολογιστών. Στη συνέχεια του κεφαλαίου (§3.2.3) δίνεται ένας πιο αυστηρός ορισμός του Πράκτορα Λογισμικού.

3.1.2 Σχολές ανάπτυξης πρακτόρων

Ο όρος πράκτορας ανάγεται στις απαρχές της Τεχνητής Νοημοσύνης, στο πλαίσιο δημιουργίας τεχνητών οντοτήτων που να μιμούνται τις ανθρώπινες ικανότητες [86], ενώ χρησιμοποιήθηκε και από τις επιστημονικές κοινότητες ανάπτυξης εφαρμογών διεπαφών ανθρώπου-υπολογιστή και δικτύων υπολογιστών.

Πράκτορες και τεχνητή νοημοσύνη

Η **κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη** (Distributed Artificial Intelligence) είναι μια περιοχή της τεχνητής νοημοσύνης που προσεγγίζει τους πράκτορες, ως ένα σύνολο από "λύτες προβλημάτων" που συνεργάζονται μεταξύ τους για να λύσουν ένα πρόβλημα, το οποίο είναι πέραν των ικανοτήτων του καθενός ατομικά. Η περιοχή των Συστημάτων Πρακτόρων στα πλαίσια της Τεχνητής Νοημοσύνης απολαμβάνει μεγάλης κινητικότητας, εξαιτίας των σημαντικών πλεονεκτημάτων που έχει μια τέτοια προσέγγιση για την επίλυση σύνθετων και πολύπλοκων προβλημάτων. Ένα ΣΠ δύναται να επιλύσει προβλήματα που πιθανώς είναι πολύ μεγάλα ή σύνθετα για να λυθούν από ένα σύστημα με κεντρικό έλεγχο, να βελτιώσει τις επιδόσεις σε χρόνο και σε αξιοπιστία, αλλά και να αντιμετωπίσει προβλήματα που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα, ελλιπή δεδομένα και γνώση ή έχουν πολλές λύσεις. Με τον τρόπο αυτό, η επίλυση προβλημάτων από ένα ΣΠ συμπεριλαμβάνει πτυχές, όπως ο συντονισμός (coordination), η διαπραγμάτευση (negotiation) και η επικοινωνία (communication) ανάμεσα στους πράκτορες. Έτσι, οι πράκτορες ενός ΣΠ που προσπαθεί να λύσει ένα πολύπλοκο πρόβλημα πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους, να

συντονίζουν τις ενέργειές τους και να διαπραγματεύονται για τους ενδεχομένως αλληλο-
συγκρουόμενους στόχους ή ενέργειές τους. Τέτοιες συγκρούσεις μπορεί να αφορούν για
παράδειγμα την ανάγκη χρήστης περιορισμένων πόρων ή πιο σύνθετες καταστάσεις δια-
φωνίας των υπολογισμών τους. Ο συντονισμός είναι απαραίτητος για την καλή οργάνωση
των πρακτόρων και την αποδοτική διάσπαση του προβλήματος [76, 184, 217].

Πράκτορες και αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή

Η περιοχή της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή χρησιμοποιεί κατά κόρον την έν-
νοια του **Πράκτορα Ευφυούς Διεπαφής** (Intelligent interface agent). Η ευρεία αυτή έν-
νοια περιλαμβάνει τους πράκτορες βοηθούς (wizard agents), τους διαλογικούς πράκτορες
(conversational agents), τους κινούμενους πράκτορες-εκπαιδευτές (animated pedagogical
agents), και τους πράκτορες-φίλτρα πληροφορίας (information filter agents) [118].

Το κύριο χαρακτηριστικό των πρακτόρων ευφυούς διεπαφής είναι η προσαρμοστικό-
τητα των ενεργειών τους στις ανάγκες του χρήστη. Η κύρια συνεισφορά τους είναι ότι
λειτουργούν με αυτόνομο και προνοητικό τρόπο. Ο βαθμός της αυτονομίας και της προ-
νοητικότητας ενός Πράκτορα ευφυούς διεπαφής ποικίλει από εφαρμογή σε εφαρμογή.
Ένα παράδειγμα τέτοιου πράκτορα αποτελεί ο Office Assistant της Microsoft, ο οποί-
ος αυτόνομα παρακολουθεί τις ενέργειες του χρήστη και όποτε ξρίνει απαραίτητο δίνει
συμβουλές στο χρήστη (προνοητικότητα).

Πράκτορες και δίκτυα υπολογιστών

Η διαθεσιμότητα των δικτυακών πόρων αποτελεί εν γένει ένα πολύ σημαντικό πρόβλη-
μα των δικτύων υπολογιστών. Ένα ερώτημα, ή πιο γενικά μια δικτυακή συναλλαγή ενός
πελάτη (client) σε ένα διακομιστή (server) απαιτεί, συνήθως, αρκετούς κύκλους αποστολής
και παραλαβής δεδομένων. Η χρήση κινητών πρακτόρων (Mobile agent) για την διεκ-
περαίωση των δικτυακών συναλλαγών προτείνεται ως μια μέθοδος εξοικονόμησης των
πόρων ενός δικτύου. Αντί λοιπόν να πραγματοποιούνται πολλοί κύκλοι αποστολής και
παραλαβής δεδομένων, ανατίθεται σε ένα πράκτορα η εκτέλεση της συναλλαγής. Συγκε-
κριμένα, ο πράκτορας αποστέλλεται μέσω του δικτύου στον διακομιστή, όπου και εκτελεί
όλη τη συναλλαγή, χωρίς να απαιτείται η ενδιάμεση επικοινωνία πελάτη-διακομιστή [24].
Η κλασική προσέγγιση επικοινωνίας πελάτη-διακομιστή απαιτεί την λεπτομερή ανάλυση
των ρόλων και των ενεργειών του συστήματος εξαρχής, στη φάση του σχεδιασμού. Η
υιοθέτηση κινητών πρακτόρων επιτρέπει την χρήση μιας "ελαφρότερης" σχεδίασης, που
είναι πιο ευέλικτη σε μελλοντικές αναβαθμίσεις. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι ότι μια

προσέγγιση με πράκτορες μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά ενέργειες αυτόματης διαχείρισης δικτυακών πόρων [194]. Ένα σχετικό παράδειγμα, είναι οι πράκτορες που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτρονικών δημοπρασιών και ηλεκτρονικού εμπορίου. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, οι κινητοί πράκτορες αναλαμβάνουν να συμμετέχουν σε μια ηλεκτρονική δημοπρασία ή αγοραπωλησία που εκτελείται εξ ολοκλήρου στην πλευρά του διακομιστή, εκ μέρους του ιδιοκτήτη τους. Έτσι οι κινητοί πράκτορες, φέρουν τις εντολές, στρατηγικές ή προτιμήσεις του εντολέα τους και μετακινούνται στον διακομιστή, και εκτελούν την συναλλαγή εξ ολοκλήρου στο διακομιστή, χωρίς να είναι απαραίτητη η μεταφορά δεδομένων μέσω του δικτύου. Ένα τέτοιο μοντέλο χαρακτηρίζεται από απλότητα, συνεργατικότητα και προσαρμοστικότητα των πρακτόρων που αντιμετωπίζουν τα προβλήματα διαπραγμάτευσης και συνεργασίας των εφαρμογών ηλεκτρονικού εμπορίου [147]. Τέτοιου είδους εφαρμογές πρακτόρων δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στην ασφάλεια των πρακτόρων [119] και την συνεργασία των κινητών πρακτόρων σε μικρές συσκευές (PDAs, κινητά τηλέφωνα) [27].

3.2 Τεχνικές ανάπτυξης λογισμικού με πράκτορες

3.2.1 Πράκτορες λογισμικού

Οι **Τεχνικές Ανάπτυξης Λογισμικού με Πράκτορες** (Agent-oriented software engineering) αποτελούν μια από πιο σύγχρονες και πλέον εξελισσόμενες περιοχές της Τεχνολογίας Λογισμικού (Software Engineering). Οι ΤΑΛΠ πλεονεκτούν σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους ανάπτυξης λογισμικού, καθώς ενσωματώνουν ισχυρά χαρακτηριστικά, όπως η ικανότητα των πρακτόρων για την αναπαράσταση μοντέλων λογισμικού σε υψηλό επίπεδο αφαιρετικότητας [203].

Ένας από τους κύριους λόγους που οι ΤΑΛΠ αναπτύσσονται με έντονους ρυθμούς είναι η ίδια η έννοια του **Πράκτορα Λογισμικού** και οι ικανότητές του. Από τη σκοπιά της Τεχνολογίας Λογισμικού ο ΠΛ θεωρείται μια αυτόνομη οντότητα, ικανή να αλληλεπιδρά με άλλους πράκτορες με σκοπό την παροχή υπηρεσιών [226]. Σε αυτό το επίπεδο, ένας πολύ γενικός και αφηρημένος ορισμός του ΠΛ είναι ο ακόλουθος [227]:

Ως πράκτορας ορίζεται ένα υπολογιστικό σύστημα, το οποίο βρίσκεται σε κάποιο περιβάλλον, και είναι ικανό να εκτελεί ενέργειες αυτόνομα μέσα στο περιβάλλον, έτσι ώστε να επιτύχει το σκοπό του.

Οι ΠΛ είναι συστήματα λογισμικού που συμμορφώνονται με τον παραπάνω ορισμό

(έστω και μερικά) και λειτουργούν σε υπολογιστές ή δίκτυα υπολογιστών για να βοηθούν τους χρήστες τους να εκτελούν υπολογιστικές εργασίες [76].

Η αυτονομία ενός υπολογιστικού συστήματος είναι μια έννοια που δεν είναι δυνατό να καθοριστεί εύκολα, και για το λόγο αυτό στη βιβλιογραφία απαντώνται διάφορες προσεγγίσεις που αντίστοιχα επανακαθορίζουν την έννοια του πράκτορα. Η έννοια της αυτονομίας σε ένα πολύ γενικό επίπεδο μπορεί να είναι αυτή που αναφέρει ο Jennings: "*To σύστημα είναι ικανό να ενεργεί χωρίς την άμεση παρέμβαση ανθρώπου ή άλλων πρακτόρων, και έχει τον έλεγχο της εσωτερικής κατάστασής του και των ενεργειών του*". Στο σημείο αυτό πρέπει να υπογραμμιστεί ότι πολλοί επιστήμονες θεωρούν ότι η έννοια του ΠΛ δεν είναι κάτι καινούργιο στην περιοχή της Τεχνολογίας Λογισμικού, καθώς αντίστοιχα χαρακτηριστικά ενσωματώνουν και τα αντικείμενα (object), τα νήματα (threads), ή τα ενεργά αντικείμενα (active objects) [224].

Μια βασική διαφορά ανάμεσα στους πράκτορες και τα αντικείμενα είναι ότι οι πράκτορες πέραν της εσωτερικής κατάστασης υλοποιούν μια συμπεριφορά και έχουν πλήρη έλεγχο των μεθόδων τους [223]. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε ότι ένα αντικείμενο *obj(1)* το οποίο καλεί μια μέθοδο *method_{obj(2)}* ενός δεύτερου αντικειμένου *obj(2)*, τότε το αντικείμενο *obj(2)*, δεν έχει καμία αντίληψη για το εάν η μέθοδος του *method_{obj(2)}* χρησιμοποιείται και από ποιόν. Σε αντίθεση, θεωρούμε ότι ένας πράκτορας *agent(1)* δεν εκτελεί μια μέθοδο *method_{agent(2)}* του πράκτορα *agent(2)*, αλλά ζητά (request) από τον πράκτορα *agent(2)* να εκτελέσει τη μέθοδο. Η απόφαση για το αν και πότε ο πράκτορας *agent(2)* θα εκτελέσει την αντίστοιχη μέθοδο *method_{agent(2)}* εναπόκειται αποκλειστικά στον πράκτορα *agent(2)*, ο οποίος και έχει πλήρη αντίληψη των μεθόδων και των ενεργειών του [101]. Από αυτό το απλό παράδειγμα καθίσταται σαφές ότι η αυτονομία στους ΠΛ αποτελεί πρωταρχικό, κυρίαρχο στοιχείο που τους διαχωρίζει από άλλες τεχνικές ανάπτυξης λογισμικού.

3.2.2 Συστήματα πρακτόρων

Έχοντας αποσαφηνύσει τη βασική δομική μονάδα της ΤΑΛΠ, την έννοια του πράκτορα, μπορούμε να προχωρήσουμε στον ορισμό του συστήματος πρακτόρων (Multi-agent systems ή Agent-based systems) ως:

Ως σύστημα πρακτόρων ορίζεται κάθε σύστημα λογισμικού στο οποίο η βασική αφηρημένη έννοια είναι αυτή του πράκτορα.

Η προσέγγιση των ΤΑΛΠ δρα συμπληρωματικά και όχι ανταγωνιστικά σε σχέση με τις ακλασικές τεχνικές ανάπτυξης λογισμικού [229], και μάλιστα παρουσιάζει συγκεκριμένα,

εγγενή πλεονεκτήματα [100]. Ανάμεσα σε αυτά, είναι και τα ακόλουθα:

- **Φυσική μεταφορά**

Υπάρχουν πολλά πεδία εφαρμογής που μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας ένα σύνολο αλληλεπιδρώντων, ενεργών πρακτόρων που έχουν συγκεκριμένη αναλογία με το φυσικό πρόβλημα. Η περίπτωση των εφαρμογών κινητών πρακτόρων σε εφαρμογές ηλεκτρονικού εμπορίου είναι μονάχα μια ενδεικτική περιοχή. Γενικά, οι ΠΛ συνιστούν μια μεταφορά που είναι ικανή να μοντελοποιήσει το πρόβλημα (των διαδικτυακών συναλλαγών στο συγκεκριμένο παράδειγμα) με φυσικό τρόπο, πολύ κοντά στον τρόπο που το πραγματικό σύστημα λειτουργεί.

- **Διασπορά δεδομένων και κατανεμημένος έλεγχος**

Σε πολλά υπολογιστικά συστήματα, δεν είναι δυνατό να καθοριστεί ένα κεντρικό σημείο ελέγχου (Locus of control). Στις περιπτώσεις αυτές, ο συνολικός έλεγχος του συστήματος είναι κατανεμημένος σε ένα πλήθος υπολογιστικών κόμβων, πιθανώς σε απομακρυσμένες γεωγραφικά τοποθεσίες. Για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη τέτοιου είδους εφαρμογών, οι υπολογιστικοί κόμβοι ελέγχου πρέπει να χαρακτηρίζονται από αυτονομία και να μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, πράγμα που επιτυγχάνεται με πράκτορες.

- **Ολοκλήρωση συστημάτων**

Σε εφαρμογές ολοκλήρωσης ετερογενών και πιθανώς απαρχειωμένων συστημάτων (Legacy systems) οι πράκτορες λογισμικού μπορούν να είναι χρήσιμοι για το σχεδιασμό και την υλοποίηση διεπαφών ανάμεσα στις συνιστώσες εφαρμογές. Οι πράκτορες "πακεταρίσματος" (wrapper agents) παρεμβάλονται ανάμεσα στις απαρχειωμένες εφαρμογές και σχηματίζουν ένα επιπέδο πρακτόρων ικανών να επικοινωνούν μεταξύ τους, διασφαλίζοντας την επικοινωνία ανάμεσα στις συνιστώσες εφαρμογές.

- **Ανοικτά συστήματα**

Ανοικτά χαρακτηρίζονται τα συστήματα εκείνα, των οποίων είναι αδύνατο να καθοριστούν πλήρως στη φάση του σχεδιασμού τους όλες οι συνιστώσες ή υπηρεσίες τους και το πώς ακριβώς θα αλληλεπιδρούν η μια με την άλλη. Οι ΤΑΛΠ ενδείκνυνται για την ανάπτυξη τέτοιου είδους εφαρμογών, καθότι η αυτόνομη λήψη αποφάσεων και η συνεργασία κάτω από άγνωστες συνθήκες είναι απαραίτητη.

Γενικά, θα μπορούσε να ισχυριστεί κανείς ότι ένα σύστημα πρακτόρων μπορεί να σχεδιαστεί με πράκτορες, αλλά να υλοποιηθεί χωρίς τη χρήση πρακτόρων στο επίπεδο του

λογισμικού. Ας αναλογιστούμε πάλι τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό. Κάποιος μπορεί να σχεδιάσει ένα υπολογιστικό σύστημα με αντικείμενα, αλλά να το υλοποιήσει χωρίς τη χρήση ενός αντικειμενοστραφούς περιβάλλοντος ανάπτυξης. Είναι προφανές, ότι μια τέτοια τακτική πέραν του ότι είναι αξιοπερίεργη, είναι τουλάχιστον αντιπαραγωγική. Κατ' αντιστοιχία, οι ΤΑΔΠ σχεδιάζουν, μοντελοποιούν και αναπτύσσουν τις διάφορες εφαρμογές χρησιμοποιώντας πράκτορες σε όλα τα στάδια ανάπτυξης λογισμικού [101]. Μια πλειάδα εργαλείων ανάπτυξης λογισμικού με πράκτορες είναι διαθέσιμα που επιτρέπουν στο χρήστη να αναπτύσσει πράκτορες και συστήματα πρακτόρων [123, 124, 130].

3.2.3 Τυπικός πράκτορας λογισμικού

Έχοντας αναφερθεί ήδη στην έννοια του πράκτορα, στην ενότητα αυτή προχωρούμε ένα βήμα παρακάτω παρουσιάζοντας έναν πιο αυστηρό ορισμό του πράκτορα, σύμφωνα με τον Wooldridge [224].

Τυπικός πράκτορας

Ο πράκτορας ορίζεται ως ένα υπολογιστικό σύστημα, το οποίο βρίσκεται σε κάποιο περιβάλλον, και είναι ικανό να εκτελεί ενέργειες αυτόνομα μέσα στο περιβάλλον, ώστε να ικανοποιήσει το σκοπό του (§ 3.2.1). Υπό την έννοια αυτή, μπορούμε να ορίσουμε τον **τυπικό πράκτορα** (Standard agent) ως ένα υπολογιστικό σύστημα που καθορίζει τις ενέργειές του με βάση τις καταστάσεις του περιβάλλοντος που αντιλαμβάνεται. Θεωρώντας $S = \{s_1, s_2, \dots\}$ το σύνολο των δυνατών καταστάσεων του περιβάλλοντος και $A = \{a_1, a_2, \dots\}$ το σύνολο των δυνατών ενεργειών του πράκτορα, ένας τυπικός πράκτορας ορίζεται ως μια συνάρτηση που αντιστοιχίζει ακολουθίες των καταστάσεων του περιβάλλοντος σε ενέργειες ως εξής:

$$action : S^* \rightarrow A \quad (3.1)$$

όπου S^* είναι το σύνολο όλων των ακολουθιών των στοιχείων του S .

Το περιβάλλον (*env*) αντιδρά σε μια ενέργεια a του πράκτορα που εφαρμόζεται επί της κατάστασης s αντιστοιχίζοντας την σε ένα σύνολο δυνατών νέων καταστάσεων του S και ορίζεται ως η αναπαράσταση:

$$env : S \times A \rightarrow \wp(S) \quad (3.2)$$

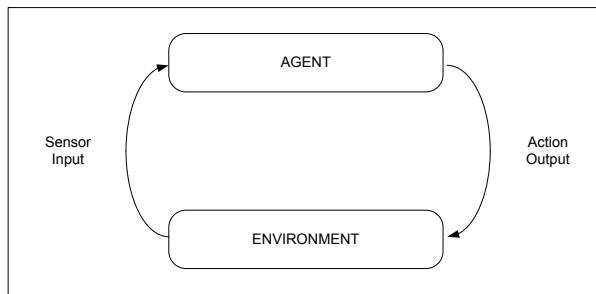
όπου με $\wp(\mathbf{S})$ συμβολίζεται το δυναμοσύνολο του \mathbf{S} ¹.

Σε αυτό το περιβάλλον η εκτέλεση run του πράκτορα μπορεί να θεωρηθεί ως η ακολουθία:

$$run : s_0 \xrightarrow{a_0} s_1 \xrightarrow{a_1} s_2 \xrightarrow{a_2} \dots \xrightarrow{a_{n-1}} s_n \xrightarrow{a_n} \dots \quad (3.3)$$

όπου s_0 είναι η κατάσταση του περιβάλλοντος τη στιγμή που ενεργοποιήθηκε ο πράκτορας, a_n είναι η n -οστή ενέργεια που επέλεξε να εκτελέσει ο πράκτορας επί της κατάστασης s_n , στην οποία το περιβάλλον αντέδρασε μεταβαίνοντας στην κατάσταση s_{n+1} . Γενικά, αντικείμενο ενδιαφέροντος αποτελούν οι συνεχώς εκτελέσιμοι πράκτορες, δηλαδή εκείνοι που η ακολουθία της εκτέλεσής τους δεν είναι μικρή.

Μια γραφική αναπαράσταση του τυπικού πράκτορα και του περιβάλλοντός του παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Τυπικός πράκτορας λογισμικού (Προσαρμογή από [224])

3.2.4 Εσωτερική αρχιτεκτονική πράκτορα λογισμικού

Ο ορισμός του τυπικού πράκτορα είναι αρκετά γενικός, και ο τρόπος που λειτουργεί ένας ΠΛ στην πράξη μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή. Η εσωτερική αρχιτεκτονική ενός ΠΛ καθορίζει με λεπτομέρεια τα δομικά στοιχεία ενός πράκτορα, δηλαδή τις **δομές δεδομένων** του, τις **λειτουργίες** (operations) που ο ΠΛ εκτελεί επί των δομών αυτών και την **ακολουθία ελέγχου** των λειτουργιών του ΠΛ. Με βάση την εσωτερική τους αρχιτεκτονική και τον τρόπο λήψης των αποφάσεών τους, οι ΠΛ μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες:

1. Αμιγώς ανακλαστικοί πράκτορες
2. Πράκτορες με μνήμη

¹Σημείωση: Αν το περιβάλλον *enp* αντιστοιχίζει όλα τα ζεύγη (s, a) σε μοναδοσύνολα του $\wp(\mathbf{S})$, τότε η συμπεριφορά του περιβάλλοντος θεωρείται προβλέψιμη.

3. Πράκτορες με κατάσταση

Αμιγώς ανακλαστικός πράκτορας

Αμιγώς ανακλαστικός πράκτορας (Purely reactive agent) λέγεται εκείνος ο πράκτορας που αντιδρά σε κάθε ενέργεια του περιβάλλοντός του. Η πλήρως ανακλαστική συμπεριφορά του πράκτορα ορίζεται από μια συνάρτηση της μορφής:

$$action : S \rightarrow A \quad (3.4)$$

Ένας αμιγώς ανακλαστικός πράκτορας είναι ισοδύναμος με ένα τυπικό πράκτορα, ενώ το αντίθετο δεν ισχύει πάντα [224].

Πράκτορες με μνήμη

Πράκτορες με μνήμη λέγονται εκείνοι οι ΠΛ που η διαδικασία λήψης των αποφάσεών τους επηρεάζεται από την ακολουθία εκτέλεσής τους *run*. Στην περίπτωση αυτή, το γενικό μοντέλο του τυπικού πράκτορα αναλύεται στην συνάρτηση αντίληψης και την συνάρτηση ενέργειας:

- Η **συνάρτηση αντίληψης του πράκτορα** (Agent perception), *see*, αναπαριστά την ικανότητα του πράκτορα να παρακολουθεί το περιβάλλον του *env*.
- Η **συνάρτηση ενέργειας του πράκτορα** (Agent action) αναπαριστά την διαδικασία λήψης αποφάσεων του πράκτορα.

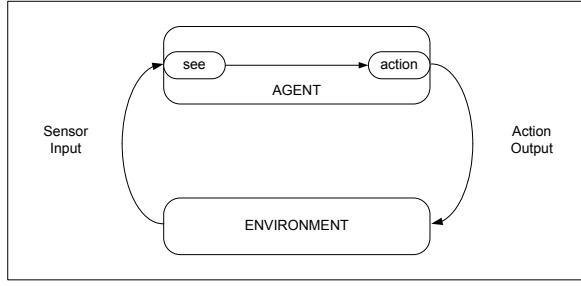
Ως **αντίληψη του πράκτορα** ορίζουμε το αποτέλεσμα της συνάρτησης *see*. Έτσι, αν θεωρήσουμε *P* το μη κενό σύνολο των δυνατών αντιλήψεων ενός πράκτορα, η συνάρτηση *see* μπορεί να οριστεί ως:

$$see : S \rightarrow P \quad (3.5)$$

που αντιστοιχίζει τις καταστάσεις του περιβάλλοντος σε αντιλήψεις του πράκτορα. Η συνάρτηση ενέργειας του πράκτορα (*action*) ορίζεται ως:

$$action : P^* \rightarrow A \quad (3.6)$$

η οποία αντιστοιχίζει τις ακολουθίες αντιλήψεων του πράκτορα σε ενέργειες. Μια γραφική αναπαράσταση του πράκτορα με μνήμη απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Πράκτορας λογισμικού και τα υποσυστήματα αντίληψης και ενέργειας (Εικόνα από [224])

Πράκτορες με κατάσταση

Οι πράκτορες οι οποίοι διατηρούν μια κατάσταση, δηλαδή μια εσωτερική δομή δεδομένων που συνήθως αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του περιβάλλοντος και την ακολουθία εκτέλεσης του πράκτορα, λέγονται **πράκτορες με κατάσταση**. Αν θεωρήσουμε \mathbf{I} το σύνολο όλων των καταστάσεων ενός πράκτορα, τότε η διαδικασία λήψης αποφάσεων του πράκτορα βασίζεται σε αυτήν την πληροφορία. Η συνάρτηση αντίληψης του περιβάλλοντος ορίζεται όμοια με προηγουμένως ως εξής:

$$see : \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{P} \quad (3.7)$$

Ενώ οι αντιλήψεις του περιβάλλοντος πλέον μετασχηματίζονται σε εσωτερικές καταστάσεις μέσω της συνάρτησης

$$next : \mathbf{I} \times \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{I} \quad (3.8)$$

Ο πράκτορας με κατάσταση συμπεριφέρεται ως εξής: Έστω ότι αρχικά ο πράκτορας βρίσκεται στην αρχική κατάσταση $i_0 \in \mathbf{I}$. Όταν αισθανθεί την κατάσταση του περιβάλλοντος $s_0 \in \mathbf{S}$, μέσω της συνάρτησης see σχηματίζει την αντίληψη $p_0 = see(s_0)$ και στη συνέχεια ανανεώνει την εσωτερική του κατάσταση στην κατάσταση i_1 που ορίζεται μέσω της συνάρτησης $next$, ως: $i_1 = next(i_0, p_0) = next(i_0, see(s_0))$. Ακολούθως, ενεργεί με την συνάρτηση $action$ που ορίζεται ως η εξίσωση:

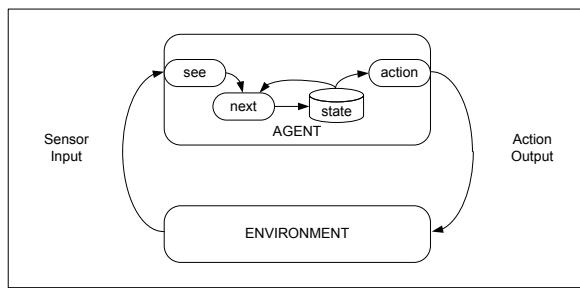
$$action : \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{A} \quad (3.9)$$

και ο πράκτορας εκτελεί την ενέργεια:

$$a_1 = action(i_1) = action(next(i_0, p_0)) = action(next(i_0, see(s_0)))$$

Οι πράκτορες με κατάσταση είναι απόλυτα ισοδύναμοι με τους τυπικούς πράκτο-

ρες. Μια σχηματική αναπαράσταση ενός πράκτορα με κατάσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Για τον καθορισμό της συνάρτησης *action* που καθορίζει τον τρόπο που ο πράκτορας λαμβάνει αποφάσεις χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα λήψης αποφάσεων, όπως μοντέλα λογικού συμπερασμού (deductive reasoning), μοντέλα BDI (belief-desire-intention), ανακλαστικά μοντέλα (ή μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού) και μοντέλα απόφασης σε πολλά επίπεδα (layered architectures).



Σχήμα 3.4: Πράκτορας λογισμικού με κατάσταση (Εικόνα από [224])

3.3 Χαρακτηριστικά και ιδιότητες των πρακτόρων λογισμικού

Αντί της παραθετικής περισσοτέρων ορισμών των πρακτόρων, είναι δυνατόν να τους ορίσουμε περιγράφοντας τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά τους. Σε άμεση συσχέτιση με τις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος, ο ΠΛ μπορεί να έχει, σε κάποιο βαθμό, τα παρακάτω χαρακτηριστικά [52]:

- a. **Αυτονομία:** Ο πράκτορας είναι ικανός να αναλάβει πρωτοβουλία και να ελέγχει σε ένα μη τετριμμένο βαθμό τις ενέργειές του. Η αυτονομία ενός πράκτορα κατά περίπτωση μπορεί να λάβει διάφορες διαστάσεις, όπως:
 - αα. **Προσήλωση:** (Συμπεριφορά προσανατολισμένη στους στόχους) Ο πράκτορας αναλαμβάνει στόχους υψηλού επιπέδου που υποδηλώνουν τους σχεδιαστικούς στόχους του πράκτορα ή του εντολέα του και είναι υπεύθυνος να αποφασίσει πώς και πού να ικανοποιήσει αυτούς τους στόχους.
- αβ. **Συνεργατικότητα:** Ο πράκτορας δεν υπακούει σε διαταγές, αλλά αντίθετα έχει την ικανότητα να συνεργάζεται με άλλους πράκτορες ώστε να επιτελέσει το σκοπό του. Έτσι, ένας πράκτορας μπορεί να τροποποιήσει τα αιτήματα που δέχεται, να ζητήσει επεξηγήσεις ή ακόμη να αρνηθεί να ικανοποιήσει συγκεκριμένες εντολές.

- αγ. **Ευελιξία:** Η λειτουργία ενός πράκτορα δεν είναι προκαθορισμένη, αλλά αντίθετα είναι ικανός να επιλέγει δυναμικά τις ενέργειες που θα εκτελέσει και να αποφασίζει τη σειρά εκτέλεσής τους, ως αποτέλεσμα της αντίληψης του περιβάλλοντός του.
- αδ. **Αυτοδυναμία:** Ο πράκτορας μπορεί να εκκινεί διαδικασίες από μόνος του, με σκοπό να εκπληρώσει τους στόχους του.
- β. **Χρονική συνέχεια:** Ένας πράκτορας δεν είναι μια υπολογιστική διαδικασία που εκτελείται αντιστοιχίζοντας μια είσοδο σε μια έξοδο και μετά τερματίζει. Ο πράκτορας δεν εκτελείται μονομιάς (one-shot), αντίθετα είναι μια διαδικασία που εκτελείται συνέχεια.
- γ. **Χαρακτήρας:** Ο πράκτορας έχει μια πλήρως καθορισμένη, πιστευτή "προσωπικότητα" και "συναισθηματική" κατάσταση.
- δ. **Ομιλητικότητα:** Ο πράκτορας είναι ικανός να αναπτύσσει πολύπλοκη επικοινωνία με άλλους πράκτορες (ή και ανθρώπους) με σκοπό να πάρει πληροφορίες ή να ξητήσει βιοήθεια για την εκπλήρωση των στόχων του.
- ε. **Κοινωνικότητα:** Ένας πράκτορας μπορεί να ενσωματώσει ανθρωποκεντρικά χαρακτηριστικά που αντιστοιχούν σε διάφορες εκφάνσεις της κοινωνικής συμπεριφοράς των ανθρώπων, όπως συντροφικότητα, φιλία και προσήνεια.
- στ. **Προσαρμοστικότητα:** Ο πράκτορας προσαρμόζει τη συμπεριφορά του στις προτιμήσεις του εντολέα του ή γενικότερα στο περιβάλλον του, με βάση την ακολουθία εκτέλεσής του. Η ικανότητα αυτή του πράκτορα επίσης αναφέρεται και ως **ικανότητα εκπαίδευσης**.
- ζ. **Κινητικότητα:** Ο πράκτορας είναι ικανός να μεταφέρει τον εαυτό του από μια μηχανή σε μια άλλη, πιθανόν με διαφορετική αρχιτεκτονική, πλατφόρμα και διαμόρφωση, και εν συνεχείᾳ αυτοδύναμα να ανασυσταθεί και να συνεχίσει τη λειτουργία του.

Οι ΠΛ μπορούν επίσης να οριστούν και λειτουργικά, ανάλογα με τις υπηρεσίες τις οποίες προσφέρουν. Ενδεικτικές κατηγορίες υπηρεσιών που παρέχουν οι ΠΛ παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1

Πίνακας 3.1: Ενδεικτικές κατηγορίες υπηρεσιών πρακτόρων λογισμικού

1. Αναζήτηση πληροφορίας
2. Φιλτράρισμα και διαχείριση δεδομένων
3. Συστήματα ελέγχου
4. Παροχή βοήθειας και διδασκαλία σε πραγματικό χρόνο
5. Εκτέλεση ενεργειών εκ μέρους ενός χρήστη (προσωπικοί βοηθοί)
6. Διαχείριση υπηρεσιών διαδικτύου

3.4 Τα συστήματα πρακτόρων λογισμικού

3.4.1 Εισαγωγικά

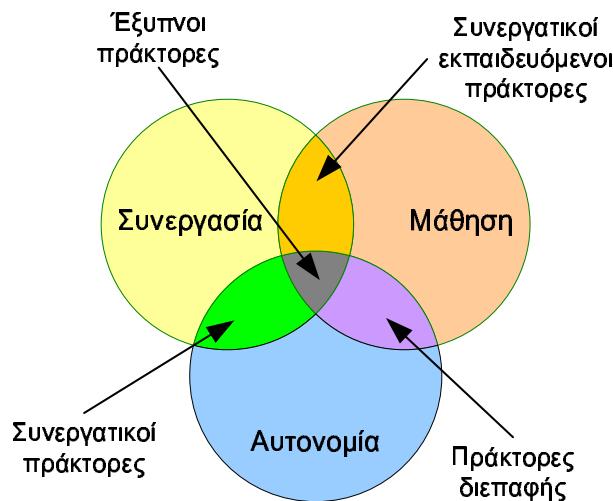
Τα ΣΠ θεωρούνται ότι είναι εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και αντιπροσωπεύουν τα πιο σύνθετα πεδία εφαρμογής των ΤΑΛΠ. Οι αρχιτεκτονικές των ΣΠ βασίζονται στην εκμετάλλευση του συνδυασμού της αποτελεσματικότητας πολλών πρακτόρων σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον και στον ορισμό ενός αυστηρά ορισμένου και αποτελεσματικά συντονισμένου πλαισίου για την επικοινωνία και την συνεργασία των πρακτόρων. Η πολυπλοκότητα ενός ΣΠ εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό των πρακτόρων που υπάρχουν σε αυτό. Κατά συνέπεια, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το πλέον απλούστερο ΣΠ εμπλέκει ένα και μόνο πράκτορα, ενώ μια σύνθετη δομή ΣΠ μπορεί να περιέχει πολλούς συνεργαζόμενους πράκτορες ή κοινότητες ΠΛ. Ο όρος "συνεργασία" στα ΣΠ χρησιμοποιείται γενικά όχι μόνο για να περιγράψει την αγαστή συνεργασία μεταξύ ΠΛ, αλλά και άλλες μορφές της όπως τον ανταγωνισμό, την διαπραγμάτευση, ή την αντιπαράθεση, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε εφαρμογής.

Η χρήση περισσοτέρων του ενός πράκτορα σε ένα σύστημα θα μπορούσε να πεί κανείς ότι είναι εκ προϊμίου επωφελής σε περιπτώσεις σύνθετων ή πολύπλοκων προβλημάτων, Ωστόσο, μια τέτοια προσέγγιση αναδεικνύει πρόσθετα πλεονεκτήματα. Ένας μοναδικός πράκτορας ο οποίος χειρίζεται ένα σύνολο από καθήκοντα υστερεί σε επίδοση, αξιοπιστία, συντηρησιμότητα, κτλ. Εν αντιθέσει, τα ΣΠ προσφέρουν ευελιξία και αυξημένες δυνατότητες επέκτασης και αναπροσαρμογής, λόγω του κατανεμημένου της φύσης τους. Επίσης, ένα ΣΠ εκμεταλλεύεται πλήρως την αρχή του ταυτοχρονισμού. Οι κατανεμημένες εφαρμογές υποστηρίζονται καλύτερα από ΣΠ, παρά από έναν μονάχα ΠΛ. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι η επιλογή ανάμεσα σε αρχιτεκτονική ενός ή πολλών πρακτόρων πρέπει να γίνεται με βάση τις ανάγκες της εφαρμογής. Έτσι, για παράδειγμα, αν θέλουμε ένα σύστημα-σύμβουλο (wizard) να βοηθά τον χρήστη μιας εφαρμογής, τότε η ανάπτυξη ενός μοναδικού πράκτορα είναι αρκετή. Από την άλλη, όμως, για την ανάπτυξη ενός

ηλεκτρονικού κέντρου δημοπρασιών, στο οποίο πολλοί πράκτορες παίρνουν μέρος για να πουλήσουν ή να αγοράσουν αγαθά, η τεχνολογία των ΣΠ είναι η πλέον κατάλληλη.

3.4.2 Τύποι συστημάτων πολλών πρακτόρων

Τα ΣΠ μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν τους πράκτορες που τα συνιστούν. Ο Nwana [154] διακρίνει τρία θεμελιώδη χαρακτηριστικά των πρακτόρων που συμμετέχουν σε ένα ΣΠ: α) αυτονομία, β) συνεργατικότητα, και γ) ικανότητα εκμάθησης. Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά, οι πράκτορες ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες: συνεργατικοί, διεπαφής, συνεργατικοί-εκπαιδευόμενοι, και έξυπνοι. Κάθε πράκτορας ανήκει σε μια από τις παραπάνω τέσσερις κατηγορίες όταν κατέχει, σε κάποιο βαθμό, τουλάχιστον δύο από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5: Η ταξινόμηση των συστημάτων πρακτόρων με βάση τα χαρακτηριστικά των πρακτόρων (Εικόνα από [154])

Συνδυάζοντας τα κριτήρια της θεώρησης του Nwana με κάποιο από τα άλλα χαρακτηριστικά των πρακτόρων (όπως η μεταφερσιμότητα ή η αντιδραστικότητα), θα μπορούσαμε να έχουμε και άλλους τρόπους ταξινόμησης δημιουργώντας νέες κατηγορίες πρακτόρων, όπως για παράδειγμα τους κινητούς διαλεγόμενους συνεργατικούς πράκτορες, τους στατικούς αντιδραστικούς συνεργατικούς πράκτορες, τους στατικούς αντιδραστικούς πράκτορες διεπαφής, τους κινητούς διαλεγόμενους πράκτορες διεπαφής, κοκ. Κατά συνέπεια, ο χώρος ταξινόμησης των πρακτόρων είναι πολυδιάστατος και γι' αυτό δύσκολο να αναπαρασταθεί γραφικά. Συνολικά, πάντως, ο Nwana καταλήγει σε πέντε τύπους ΠΛ και οδηγείται στον καθορισμό επτά τύπων ΣΠ:

- α) Τα **συστήματα συνεργατικών πρακτόρων** αποτελούν το κύριο μέσο της κατανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης. Η έμφαση στα συγκεκριμένα συστήματα δίνεται στην αυτονομία των πρακτόρων και την συνεργασία μεταξύ τους, οι οποίοι εκτελούν εργασίες για λογαριασμό των εντολέων τους. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ΠΛ, που συνεργάζονται μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργούν πέρα από τις ικανότητες του καθενός.
- β) Τα **συστήματα πρακτόρων διεπαφής** συνιστώνται από ένα σύνολο αυτόνομων και εκπαιδευόμενων πρακτόρων. Οι ΠΛ των συστημάτων της κατηγορίας αυτής υλοποιούν και διαχειρίζονται διεπαφές ανθρώπου-υπολογιστή.
- γ) Τα **συστήματα κινητών πρακτόρων** χρησιμοποιούν τους κινητούς πράκτορες ως αυτόνομες υπολογιστικές οντότητες που περιδιαβαίνουν το διαδίκτυο ή άλλα δίκτυα και αλληλεπιδρούν με διακομιστές για λογαριασμό των εντολέων τους, και τελικά επιστρέφουν στο χρήστη τους έχοντας εκτελέσει τις εργασίες που τους ανατέθηκαν.
- δ) Στα **συστήματα πρακτόρων πληροφορίας**, οι ΠΛ αναλαμβάνουν το ρόλο της διαχείρισης δεδομένων από πολλές κατανεμημένες πηγές. Στην περίπτωση αυτή η χρήση των πρακτόρων πληροφορίας είναι πλεονεκτική για την αντιμετώπιση προβλημάτων υπερχείλισης δεδομένων και της αποτελεσματικής πρόσβασης σε δεδομένα.
- ε) Τα **συστήματα ανακλαστικών πρακτόρων** αποτελούνται από ανακλαστικούς ΠΛ, οι οποίοι αντιδρούν στα ερεθίσματα του περιβάλλοντός τους δίχως να έχουν κάποιο εσωτερικό μοντέλο αναπαράστασης των ερεθισμάτων αυτών. Χρησιμοποιώντας ανακλαστικούς πράκτορες μπορούν να αναπτυχθούν εφαρμογές, των οποίων η αποτελεσματικότητα προκύπτει από την ικανότητα των πρακτόρων να αναπαριστούν την συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις διαφόρων οντοτήτων, ενώ εκμεταλλεύονται την ευκαμψία και την προσαρμοστικότητα των ΠΛ.
- στ) **συστήματα υβριδικών πρακτόρων.** Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε ΠΛ που ενσωματώνουν πάνω από μια πρακτική ανάπτυξης στους πράκτορες τους. Σε μερικές εφαρμογές είναι πλεονεκτική η ενσωμάτωση σε έναν πράκτορα χαρακτηριστικών που ανήκουν σε περισσότερες από μια από τις παραπάνω πέντε κατηγορίες. Για παράδειγμα, μπορεί να είναι απαραίτητοι πράκτορες που λειτουργούν και ως πράκτορες διεπαφής και ως κινητοί, οπότε και δημιουργούνται οι υβριδικοί: "κινητοί πράκτορες διεπαφής".

ζ) συστήματα ετερογενών πρακτόρων. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν ΠΛ, οι οποί- οι ανήκουν σε παραπάνω από μια κατηγορίες ορίζονται ως ετερογενή συστήματα πρακτόρων. Τα συστήματα ετερογενών πρακτόρων, σε αντίθεση με τα συστήματα υβριδικών πρακτόρων, αναφέρονται σε εφαρμογές που ολοκληρώνουν διαφορετικούς τύπους πρακτόρων (συνεργατικούς, διεπαφής, κινητούς, πληροφορίας, ανακλαστικούς, ή υβριδικούς).

Τα συστήματα των ετερογενών πρακτόρων αποτελούν το κύριο αντικείμενο των ΤΑΛΠ και υποστηρίζουν την συνεργασία και την αλληλεπίδραση πρακτόρων διαφορετικών τύπων, χρησιμοποιώντας μια γλώσσα επικοινωνίας πρακτόρων (Agent Communication Language ή ACL) μέσω της οποίας οι ΠΛ επικοινωνούν μεταξύ τους.

3.4.3 Επικοινωνία πρακτόρων

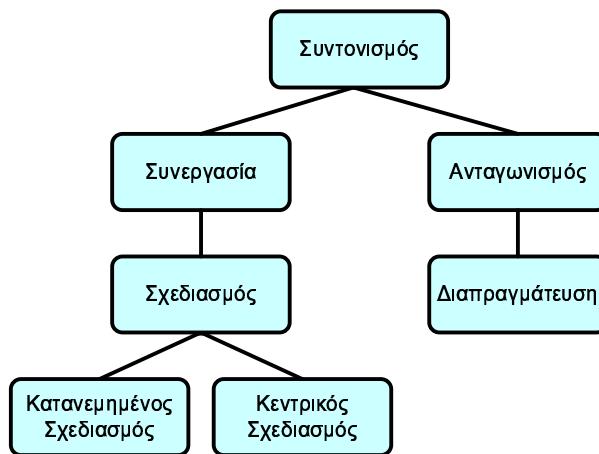
Η ανταλλαγή μηνυμάτων ανάμεσα στους πράκτορες αποτελεί το βασικό τρόπο επικοινωνίας σε ένα ΣΠ και κύριο αντικείμενο μελέτης των ΤΑΛΠ. Η επικοινωνία των ΠΛ επιτρέπει στους πράκτορες να συντονίσουν τις ενέργειες και τις συμπεριφορές τους, με σκοπό να επιτύχουν το σκοπό τους.

Τα κυριότερα θέματα που σχετίζονται με την επικοινωνία πρακτόρων παρουσιάζονται στη συνέχεια [191, 94].

A. Συντονισμός. Ένα ΣΠ συντονίζει την επικοινωνία των πρακτόρων του ακολουθώντας, κατά περίπτωση, διαφορετικά πρωτόκολλα συντονισμού. Στο Σχήμα 3.6 δίνεται μια κατηγοριοποίηση των τρόπων με τους οποίους οι πράκτορες μπορούν να συντονίσουν τη συμπεριφορά και τις ενέργειές τους. Ως συνεργασία, ορίζεται ο **συντονισμός** μεταξύ μη-ανταγωνιστικών πρακτόρων, ενώ ως **διαπραγμάτευση**, ορίζεται ο συντονισμός μεταξύ ανταγωνιστικών πρακτόρων.

B. Οι διαστάσεις του νοήματος των μηνυμάτων πρακτόρων

Οι πράκτορες επικοινωνούν στο πλαίσιο επίτευξης των στόχων τους. Το νόημα της συνομιλίας δύο (ή περισσοτέρων) πρακτόρων μπορεί να έχει διάφορες διαστάσεις [192]. Γενικά, υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις μελέτης της επικοινωνίας των συνομιλιών των πρακτόρων. Η πρώτη εξετάζει το πώς δομείται η επικοινωνία με βάση τα σύμβολά της (**σύνταξη**). Η δεύτερη αφορά το τι απεικονίζουν τα σύμβολα (**σημασιολογία**). Ενώ, η τρίτη σχετίζεται με το πώς ερμηνεύονται τα σύμβολα (**σημειολογία**).



Σχήμα 3.6: Ταξινόμηση των διαφορετικών τρόπων με τους οποίους οι πράκτορες συντονίζουν τις ενέργειές τους (Εικόνα από [94])

Γ. Τύποι μηνυμάτων και οι ρόλοι των πρακτόρων στην επικοινωνία. Ως μέσο διαλόγου οι πράκτορες χρησιμοποιούν τα **μηνύματα πρακτόρων**. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μηνυμάτων: η δήλωση και η ερώτηση.

Η επικοινωνία των ΠΛ μπορεί να οριστεί σε πολλά επίπεδα με βάση το βαθμό της πολυπλοκότητας του διαλόγου. Στο χαμηλότερο επίπεδο θεωρούνται οι **βασικοί πράκτορες** που είναι ικανοί να συμμετέχουν σε ένα διάλογο κάνοντας απλές δηλώσεις. Στο επόμενο επίπεδο, θεωρούνται οι πράκτορες που μπορούν να δέχονται ερωτήσεις και να απαντούν σε αυτές κάνοντας δηλώσεις. Οι πράκτορες αυτοί λέγονται **παθητικοί πράκτορες**. Από την άλλη, υπάρχουν πράκτορες που έχουν ενεργητικό ρόλο στο διάλογο, ικανοί να υποβάλλουν ερωτήσεις και να κάνουν δηλώσεις (**Ενεργοί πράκτορες**). Τέλος, οι πράκτορες που παίρνουν τόσο παθητικό, όσο και ενεργητικό ρόλο σε ένα διάλογο, έχοντας κατά συνέπεια και τις αντίστοιχες ικανότητες χαρακτηρίζονται **ομότιμοι πράκτορες** (Peer agent) [94].

Στον Πίνακα 3.2 γίνεται μια σύνοψη των επικοινωνιακών χαρακτηριστικών ενός πράκτορα, και η διαμόρφωση των αντίστοιχων ρόλων πρακτόρων.

Πίνακας 3.2: Τυπολογία πρακτόρων λογισμικού με βάση τις ικανότητές τους για επικοινωνία

	Βασικός	Παθητικός	Ενεργητικός	Ισοδύναμος
Δέχεται δηλώσεις	✓	✓	✓	✓
Δέχεται ερωτήσεις		✓		✓
Κάνει δηλώσεις		✓	✓	✓
Κάνει ερωτήσεις			✓	✓

Δ. Επίπεδα Επικοινωνίας. Τα επίπεδα επικοινωνίας διαφέρουν κατά περίπτωση. Στο

χαμηλότερο επίπεδο επικοινωνίας καθορίζεται η μέθοδος διασύνδεσης. Στο ενδιάμεσο, καθορίζεται η μορφή ή η σύνταξη της πληροφορίας που μεταφέρεται. Στο υψηλότερο, καθορίζονται το νόημα ή η σημασιολογία της πληροφορίας. Η σημασιολογία αναφέρεται, όχι μόνο στο περιεχόμενο του μηνύματος, αλλά και στον τύπο του μηνύματος. Η δομή δεδομένων ενός **πρωτοκόλλου επικοινωνίας** περιλαμβάνει τα ακόλουθα πεδία[94]:

1. Αποστολέα
2. Παραλήπτη(ες)
3. Γλώσσα πρωτοκόλλου
4. Συναρτήσεις κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης
5. Ενέργειες που πρέπει να εκτελέσει ο παραλήπτης

E. Δράση Λόγου. Η θεωρία μοντελοποίησης της επικοινωνίας των πρακτόρων ονομάζεται **θεωρία δράσης λόγου** (Speech act) και βασίζεται στον τρόπο επικοινωνίας των ανθρώπων. Έτσι, η πράξη λόγου ενός πράκτορα έχει τρεις όψεις: (α) τη φράση (locution), δηλαδή το φυσικό λεγόμενο του ομιλητή), (β) την παραφραση/νόημα (illocution), δηλαδή αυτό που εννοεί ο ομιλητής εκφέροντας το λεγόμενο, και (γ) την περίφραση (perlocution), που είναι η ενέργεια που αντιστοιχεί στο λεγόμενο. Η θεωρία δράσης λόγου υπαγορεύει ότι τα μηνύματα που ανταλλάσσονται πράκτορες έχουν κάποια δύναμη νοήματος, που υποδηλώνει σημασιολογικά το περιεχόμενο του μηνύματος. Έτσι, η πρόθεση του αποστολέα πρέπει να δηλώνεται καθαρά στο μήνυμα, για να γνωρίζει ο παραλήπτης τι τύπο απάντησης να στείλει. Με τον τρόπο αυτό απλοποιείται σημαντικά η σχεδίαση της επικοινωνίας των πρακτόρων.

ΣΤ. Πρωτόκολλα ανταλλαγής πληροφορίας. Η επικοινωνία ανάμεσα στους πράκτορες πρέπει να διαχωρίζει τα νοήματα του πρωτοκόλλου επικοινωνίας από τα νοήματα της εφαρμογής που εμπεριέχονται σε ένα μήνυμα [94]. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε η KQML (Knowledge and Querying Manipulation Language), που είναι μια γλώσσα και ένα πρωτόκολλο για την ανταλλαγή πληροφορίας.

Η KQML ορίζει τόσο τους τύπους των μηνυμάτων, όσο και το πρωτόκολλο διαχείρισής τους, με σκοπό την υποστήριξη της ανταλλαγής πληροφορίας ανάμεσα στους πράκτορες. Το βασικό χαρακτηριστικό της KQML [58, 113, 114] είναι ότι σε κάθε μήνυμα εμπεριέχεται όλη η απαραίτητη πληροφορία ώστε αυτό να γίνει κατανοητό. Το βασικό πρωτόκολλο επικοινωνίας είναι το εξής:

```
(KQML-performative
  :sender <word>
  :receiver <word>
  :in-reply-to <word>
  :reply-with <word>
  :language <word>
  :ontology <word>
  :content <expression>
)
```

και αποτελείται από:

- (α) ένα τελεστή δράσης λόγου (KQML-performative),
- (β) τα χαρακτηριστικά παράδοσης του μηνύματος, τα οποία να σημειωθεί είναι ανεξάρτητα από πράξη λόγου και πεδίο εφαρμογής (: sender, : receiver, : in-reply-to, : reply-with), και
- (γ) από το περιεχόμενο του μηνύματος, το οποίο ορίζεται σημασιολογικά πλήρως, με τον καθορισμό της γλώσσας στην οποία εκφράζεται το μήνυμα (: language), τον ορισμό της οντολογίας (του λεξιλογίου που χρησιμοποιείται στο μήνυμα) και, τέλος, το περιεχόμενο του μηνύματος (: content).

Η KQML επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός συνόλου τελεστικών δράσεων λόγου (performatives), το οποίο καθορίζει τις πιθανά επιτρεπτές ενέργειες κατά την επικοινωνία των πρακτόρων, με σκοπό πάντα την ανταλλαγή γνώσης. Οι τελεστικές δράσεις λόγου αποτελούν το υπόβαθρο πάνω στο οποίο αναπτύσσονται μοντέλα αλληλεπίδρασης πρακτόρων υψηλότερου επιπέδου (π.χ. διαπραγματεύσεις). Επιπλέον, η KQML παρέχει τη βασική αρχιτεκτονική για ανταλλαγή γνώσης μέσα από μια ειδική κατηγορία πρακτόρων, τους διαμεσολαβητές επικοινωνίας (communication facilitators), οι οποίοι συντονίζουν τις ενέργειες των άλλων πρακτόρων ενός ΣΠΠ. Η KQML έχει βρει αρκετή εφαρμογή σε πεδία όπως η παράλληλη μηχανική (concurrent engineering), ο ευφυής σχεδιασμός (intelligent design) και ο ευφυής προγραμματισμός διαδικασιών (intelligent planning and scheduling).

ΣΤ. Οντολογίες Για την επικοινωνία των συστημάτων μεταξύ τους και τη συνεργασία τους είναι επίσης δυνατή η ανάπτυξη μιας κοινής οντολογίας. Ως οντολογία ορίζεται ένα κοινό λεξιλόγιο στο οποίο περιγράφονται τα αντικείμενα, τα νοήματα και οι συσχετίσεις ανάμεσα σε αυτά. Η ιδέα των οντολογιών δεν είναι καινούρια, κα-

Θώς στη βιβλιογραφία απαντώνται συχνά προσπάθειες οι οποίες προσεγγίζουν τις οντολογίες, όπως για παράδειγμα στον ορισμό λεξικών, ή τον καθορισμό σχεσιακών σχημάτων βάσεων δεδομένων, και αλλού. Η οντολογία είναι κάτι παραπάνω από μια ταξινόμηση των κλάσεων (των τύπων) των δεδομένων. Οι κλάσεις και οι συσχετίσεις περιγράφονται μέσα στην οντολογία, όχι όμως και τα δεδομένα. Κατά συνέπεια, η οντολογία είναι ανάλογη με το σχεσιακό σχήμα της βάσης, και όχι τα περιεχόμενα αυτής. Έτσι ένας ορισμός της οντολογίας μπορεί να θεωρείται ο ακόλουθος [94]:

Οντολογία είναι η προδιαγραφή των αντικειμένων και των εννοιών ενός πεδίου εφαρμογής, και των συσχετίσεων ανάμεσα σε αυτά.

Σε μια οντολογία, μοναδιαία κατηγορήματα (unary predicates) λογικής πρώτης τάξης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό των εννοιών (concept), ενώ κατηγορήματα υψηλότερου βαθμού αναπαριστούν τις συσχετίσεις (relationship).

Τα προγράμματα ανάπτυξης οντολογιών [53, 126, 152, 77] προσφέρουν μια σειρά από δυνατότητες για την ορθή απεικόνιση των οντολογιών και των χαρακτηριστικών τους (κλάσεις, στιγμιότυπα, σχέσεις και μεθόδους) και την μεταγλώττιση των οντολογιών σε διάφορες γλώσσες αναπαράστασης από πράκτορες.

3.4.4 Η τεχνολογία πρακτόρων

Ο προγραμματισμός βασισμένος στους πράκτορες (agent-based programming) αναπτύχθηκε την τελευταία δεκαετία, θεμελιώνοντας τεχνικές προδιαγραφής, ανάπτυξης και επικύρωσης λογισμικού χρησιμοποιώντας πράκτορες [99], με σκοπό να υποστηρίξει τον μηχανικό λογισμικού στην ανάλυση και τον σχεδιασμό σύνθετων συστημάτων λογισμικού σε κατανεμημένα πεδία εφαρμογής [109]. Η εξέλιξη της τεχνολογίας λογισμικού, σύμφωνα με τον Parunak (1999), πέρασε από τα εξής στάδια [162]: Αρχικά, το πλήρες πρόγραμμα θεωρούνταν ως βασική μονάδα στο λογισμικό, όπου αλγόριθμος, κώδικας και δεδομένα αποτελούσαν αντικείμενο του προγραμματιστή. Στο επόμενο στάδιο, τα προγράμματα λογισμικού σχεδιάζονται σε μικρότερα τμήματα (πακέτα), όπως βρόχους και υπορουτίνες, τα οποία έπρεπε να καλούνται εξωτερικά ώστε να εκτελεστούν. Με τον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό ο κώδικας του προγράμματος οργανώνεται σε αντικείμενα, τα οποία ενσωματώνουν επιπλέον χαρακτηριστικά, όπως η κληρονομικότητα. Οι πράκτορες λογισμικού θεωρούνται ως η φυσική εξέλιξη των αντικειμένων, που ενσωματώνουν χαρακτηριστικά όπως η αυτονομία, η ανακλαστικότητα, η προνοητικότητα και η

κοινωνικότητα. Με τη χρήση ΠΛ τα τμήματα λογισμικού είναι ομιλητικά, έχουν το δικό τους νήμα ελέγχου και εσωτερικούς σκοπούς [130].

Έτσι, η τεχνολογία πρακτόρων μπορεί να θεωρηθεί ως [123]: α. μια μεταφορά για το σχεδιασμό πολύπλοκων, κατανεμημένων συστημάτων λογισμικού, β. ένα σύνολο τεχνικών της επιστήμης των υπολογιστών, και γ. ένα μοντέλο αναπαράστασης σύνθετων συστημάτων του πραγματικού κόσμου, όπως για παράδειγμα αυτά που απαντώνται στη βιολογία και την οικονομία. Οι διάφορες αυτές όψεις της τεχνολογίας πρακτόρων επεξήγουνται παρακάτω.

Οι ΠΛ ως μια σχεδιαστική μεταφορά

Η τεχνολογία ΠΛ παρέχει στους σχεδιαστές και τους προγραμματιστές λογισμικού ένα μέσο για να δομήσουν μια εφαρμογή χρησιμοποιώντας στοιχεία που χαρακτηρίζονται από αυτονομία και από ικανότητα επικοινωνίας. Υπό την έννοια αυτή, οι ΠΛ συνιστούν μια σχεδιαστική μεταφορά, η οποία πλεονεκτεί για την ανάπτυξη ανοικτών και δυναμικών εφαρμογών. Για την υποστήριξη της διαδικασίας αυτής χρειάζονται εξειδικευμένα εργαλεία και τεχνικές, που συμπεριλαμβάνουν τις μεθόδους ανάλυσης και σχεδιασμού με πράκτορες, τις αρχιτεκτονικές συστημάτων πρακτόρων και τις υποστηρικτικές υποδομές ενσωμάτωσης τεχνολογιών, όπως οι υπηρεσίες δικτύου (web services), το σημασιολογικό δίκτυο (semantic web), οι διεπαφές με απαρχειωμένα συστήματα, τα μοντέλα συμπερασμού, κα.

Οι ΠΛ ως μοντέλο αναπαράστασης σύνθετων συστημάτων

Η τεχνολογία των πρακτόρων λογισμικού υιοθετήθηκε και σε πεδία εφαρμογής πέραν της επιστήμης των υπολογιστών, καθώς η έννοια του πράκτορα αποτελεί ένα μοντέλο αναπαράστασης των οντοτήτων του φυσικού κόσμου. Για παράδειγμα, οι πράκτορες χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση δικτύων υπηρεσιών κοινής χρήσης (utility networks) και συστημάτων διαχείρισης και καταμερισμού πόρων. Ακόμη, μοντέλα πρακτόρων έχουν υιοθετηθεί για την προσομοίωση σύνθετων φυσικών και κοινωνικών προβλημάτων, κάτι που με τις συμβατικές τεχνικές μοντελοποίησης θα ήταν ανέφικτο [123], όπως οι επιπτώσεις της μεταβολής του κλίματος σε διάφορους πληθυσμούς ζωντανών οργανισμών (βλ.σχ. §4.2).

Οι ΠΛ ως σύνολο τεχνικών της επιστήμης των υπολογιστών

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των πρακτόρων επηρέασε σημαντικά την ανάπτυξη μεθόδων της τεχνολογίας λογισμικού. Η ερευνητική δραστηριότητα σε διεθνές επίπεδο επικεντρώ-

νεται σε μεθόδους και τεχνικές που τον κύκλο ζωής του λογισμικού και αφορά:

- Την **ανάλυση απαιτήσεων για συστήματα πρακτόρων** [210, 233], που περιλαμβάνει μεθόδους όπως την iStar [232] και την Tropos [74].
- Τις **τεχνικές σχεδιασμού και μοντελοποίησης συστημάτων πρακτόρων** όπως τις Gaia (Generic Architecture for Information Availability) [228, 234], SODA (Societies in Open and Distributed Agent spaces)[158], EXPAND (Expectation-oriented analysis and design) [30] και AORML (Agent-Object-Relationship Modeling Language) [214, 215].
- Τις **μεθοδολογίες τυπικής προδιαγραφής και επικύρωσης συστημάτων πρακτόρων**, όπως η θεωρία πρόθεσης (theory of intention) [34], το μοντέλο BDI (belief-desire-intention) [174] και η LORA (Logic of Rational Agents) [225].
- **Πρότυπα ανάπτυξης πρακτόρων**, που περιλαμβάνουν:
 - i. **Γλώσσες για τον προγραμματισμό πρακτόρων**, όπως η ConGolog [45] και η 3APL [91],
 - ii. **γλώσσες την επικοινωνία και τον συντονισμό**, όπως η KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) [58, 113, 114], η FIPA-ACL (FIPA Agent Communication Language) [61], και η KIF (Knowledge Interchange Format) [70],
 - iii. **γλώσσες για τον καθορισμό οντολογιών**, όπως η SHOE (Simple HTML Ontology Extension) [190], η OIL (Ontology Inference Layer) [55, 56, 157], και η DAML (DARPA Agent Markup Language) [159, 39], και
 - iv. **Προγράμματα ανάπτυξης οντολογιών**, όπως η Ontolingua [53], το Java Ontology Editor (JOE) [126], και το Protégé-2000 [152, 77].
- Τα εργαλεία, τις βιβλιοθήκες και τις **πλατφόρμες ανάπτυξης λογισμικού με πράκτορες**, όπως το ZEUS [235, 155], το JADE (Java Agent DEvelopment framework) [26, 25], το JATLite (Java Agent Template, Lite) [102, 98], το JACK [97, 5] και μια σειρά άλλων εργαλείων που συνοψίζονται σε μια αναφορά του δικτύου αριστείας AgentLink [130].

Η έντονη ερευνητική δραστηριότητα στο χώρο των πρακτόρων λογισμικού τα τελευταία χρόνια ανέδειξε τις τεχνολογίες που συνοψίζονται παραπάνω. Ωστόσο, η ανάπτυξη

συστημάτων πρακτόρων, δεν βασίζεται σε μια αυστηρά καθορισμένη διαδικασία. Είναι κοινά παραδεκτό ότι αφενός οι συμβατικές τεχνικές μηχανικής λογισμικού δεν είναι κατάλληλες για τον προγραμματισμό βασισμένο σε πράκτορες [125], αλλά και ότι η διαδικασία ανάπτυξης συστημάτων πρακτόρων εξαρτάται άμεσα από το πεδίο εφαρμογής [130]. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διατριβή καθορίζει την διαδικασία ανάπτυξης συστημάτων πρακτόρων σε εφαρμογές περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος, που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4

Οι πράκτορες στην περιβαλλοντική πληροφορική

Στα προηγούμενα δυο κεφάλαια παρουσιάστηκαν τόσο τα συστήματα περιβαλλοντικής πληροφορικής, οι ειδικές απαιτήσεις τους και οι σύγχρονες ανάγκες τους, αλλά και οι πράκτορες λογισμικού, που προβάλλουν ως μια μοντέρνα τεχνική ανάπτυξης εφαρμογών λογισμικού. Στο κεφάλαιο αυτό απαριθμούνται οι αποσπασματικές προσπάθειες εφαρμογής των πρακτόρων λογισμικού για την ανάπτυξη Συστημάτων Περιβαλλοντικής Πληροφορικής, προτείνεται μια ενιαία μεθοδολογία ανάπτυξης τέτοιων εφαρμογών με πράκτορες και θεμελιώνεται ένα γενικευμένο πλαίσιο εργασίας στην περιβαλλοντική πληροφορική με πράκτορες λογισμικού.

4.1 Σκοπιμότητα της προσέγγισης

Σύμφωνα με τον van Dyke Parunak, οι πράκτορες λογισμικού ενδείκνυνται για εφαρμογές που είναι *αρθρωτές* (modular), *αποκεντρωμένες*, *μεταβαλλόμενες*, *ημι-δομημένες* και *πολύπλοκες* [162, 163]. Στη διαπίστωση αυτή καταλήγει ο van Dyke Parunak έχοντας υπόψη πεδία βιομηχανικής/εμπορικής εφαρμογής, όπως ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα ελέγχου, συστήματα διαχείρισης εταιρικών πόρων και εφαρμογές ηλεκτρονικών υπηρεσιών. Ωστόσο, παρατηρούμε ότι και οι εφαρμογές περιβαλλοντικού λογισμικού, χαρακτηρίζονται από τις παραπάνω ιδιότητες. Τα ΣΠΠ απαιτείται (κατά περίπτωση) να παρέχουν υπηρεσίες σε πολλαπλά επίπεδα και σε διαφορετικούς χρήστες, να ολοκληρώνουν ετερογενή δεδομένα από κατανευμημένες πηγές, να διαχειρίζονται δεδομένα με χωρική και χρονική αναφορά και να προσαρμόζονται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες. Ακόμη, όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 2, τα ΣΠΠ κληρονομούν από τα περιβαλλοντικά προβλήματα τόσο την αβεβαιότητα σε επίπεδο δεδομένων, μοντέλων και μεθόδων, όσο και την πολυπλοκότητα του πεδίου εφαρμογής, ενώ καλούνται να αντιμετωπίσουν τις συγκρουόμενες

όψεις των χρηστών και τις διαφορετικές προτεραιότητες και αξίες των εμπλεκομένων μερών. Ως εκ τουτου, κανείς θα μπορούσε να ισχυριστεί ότι η περιοχή της περιβαλλοντικής πληροφορικής ενδείκνυται για τη ανάπτυξη συστημάτων πρακτόρων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται προσπάθειες ανάπτυξης συστημάτων πρακτόρων σε περιβαλλοντικές εφαρμογές. Στην ακόλουθη παραγραφο γίνεται μια (κατά το δυνατό) πλήρης παρουσίαση των διάφορων εφαρμογών που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία και χρησιμοποιούν πράκτορες λογισμικού σε ΣΠΠ. Οι σχετικές προσπάθειες επικεντρώνονται στο επίπεδο των τελικών εφαρμογών, ενώ δεν αναφέρεται κάποιο γενικευμένο πλαίσιο εργασίας που να υποδεικνύει μια ολιστική μεθοδολογία εφαρμογής της τεχνολογίας των πρακτόρων σε περιβαλλοντικές εφαρμογές. Υπό την έννοια αυτή, η μέχρι σήμερα προσέγγιση της περιβαλλοντικής πληροφορικής με πράκτορες μπορεί να θεωρηθεί αποσπασματική και επικεντρωμένη σε συγκεκριμένες εφαρμογές με αποτέλεσμα να μην αναδεικνύονται σε όλη τους την έκταση τα πλεονεκτήματα της υιοθέτησης των πρακτόρων λογισμικού. Οι ικανότητες της τεχνολογίας των πρακτόρων, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, μπορούν να βρουν στην περιοχή της περιβαλλοντικής πληροφορικής ένα ευρύτερο πεδίο εφαρμογής, αποτελώντας την τεχνολογική υποδομή που θα ικανοποιήσει τις σύγχρονες ανάγκες των ΣΠΠ. Άλλωστε, η φαρέτρα των τεχνητών της περιβαλλοντικής πληροφορικής (βλ. Κεφ. 2) έχει μάλλον εξαντληθεί, και σχετικά o Swayne (2003) υπογραμμίζει ότι χρειάζεται η ενσωμάτωση και η προσαρμογή νέων τεχνητών και μεθόδων της επιστήμης των υπολογιστών με απότερο σκοπό την επίλυση των προβλημάτων που ενυπάρχουν στα ΣΠΠ [196]. Σε αυτό το υπόβαθρο, μια ολοκληρωμένη προσέγγιση της περιβαλλοντικής πληροφορικής με πράκτορες είναι επιθυμητή. Επιπλέον, η ανάγκη θεμελίωσης ενός πλαισίου εργασίας ενισχύεται, καθώς δεν υπάρχει μια ενιαία μεθοδολογία εφαρμογής της τεχνολογίας των πρακτόρων για την ανάπτυξη ΣΠ. Αντιθέτως, οι Τεχνικές Ανάπτυξης Λογισμικού με Πράκτορες ποικίλουν ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής, όπως σημειώνει και το ευρωπαϊκό δίκτυο αριστείας για την τεχνολογία των πρακτόρων AgentLink [130]. Για τους παραπάνω λόγους, ο συγγραφέας θεώρησε σκόπιμο να ερευνήσει την συνέργια της τεχνολογίας των πρακτόρων λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική.

4.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Στην παραγραφο αυτή παρουσιάζονται οι διάφορες εφαρμογές πρακτόρων στην περιβαλλοντική πληροφορική που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία. Για λόγους πληρότη-

τας συμπεριλαμβάνονται και εφαρμογές που δεν χρησιμοποιούν πράκτορες λογισμικού, καθώς και συστήματα που δεν περιορίζονται σε περιβαλλοντικές εφαρμογές, ώστε να διερευνηθεί σε βάθος η πιθανή συνέργια των πρακτόρων λογισμικού σε περιβαλλοντικές εφαρμογές. Για την διευκόλυνση της παρουσίασης αρχικά διακρίνουμε τις εφαρμογές σε τρεις κατηγορίες, (α) αυτές που αφορούν συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης περιβαλλοντικής πληροφορίας, (β) εκείνες που σχετίζονται με συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για το περιβάλλον, και τέλος (γ) τις εφαρμογές περιβαλλοντικής προσομοίωσης.

4.2.1 Συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης περιβαλλοντικής πληροφορίας

Οι πράκτορες λογισμικού έχουν εφαρμοστεί σε λίγα συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης περιβαλλοντικής πληροφορίας. Ανάμεσα σε αυτά, ξεχωρίζει το EDEN-IW (Environmental Data Exchange Network for Inland Water) που στοχεύει στην διάθεση περιβαλλοντικών δεδομένων στους ερευνητές, τους ιθύνοντες λήψης αποφάσεων και τους πολίτες μέσω μιας ευφυούς διεπαφής λειτουργώντας ως ένα κέντρο μιας επαφής (one-stop shop) [54]. Το EDEN-IW βασίζεται στην τεχνολογική υποδομή του συστήματος InfoSleuth, στο οποίο πράκτορες λογισμικού εκτελούν ενέργειες διαχείρισης δεδομένων και διερμηνεύουν τα ερωτήματα χρηστών προς ένα σύνολο κατανευμένων Βάσεων Δεδομένων. Οι πράκτορες του InfoSleuth συνεργάζονται μεταξύ τους για την ανάσυρση των δεδομένων και ομογενοποιούν τα ερωτήματα και τα δεδομένα μέσω μιας οντολογίας του πεδίου εφαρμογής [106, 151, 167].

Μια άλλη παρόμοια προσπάθεια χρήσης πρακτόρων λογισμικού για την υποστήριξη της πρόσβασης σε περιβαλλοντικά δεδομένα είναι το σύστημα πρακτόρων NZDIS (New Zealand Distributed Information System). Το NZDIS σχεδιάστηκε για τη διαχείριση περιβαλλοντικών μετα-δεδομένων με σκοπό την εξυπηρέτηση ερωτημάτων που απευθύνονται σε ετερογενείς πηγές δεδομένων [38, 169, 170, 171].

Στη μετεωρολογική υπηρεσία της Αυστραλίας αναπτύσσεται το σύστημα FSEP (Forecast Streamlining and Enhancement Project), το οποίο χρησιμοποιεί πράκτορες για τον εντοπισμό και τη χρήση δεδομένων και υπηρεσιών σε ένα ανοικτό, κατανευμένο περιβάλλον. Στο FSEP οι πράκτορες διαχειρίζονται την παρακολούθηση και την πρόγνωση του καιρού [40, 41].

Ακόμη, σχετικά με τη συγκεκριμένη περιοχή μπορούν να θεωρηθούν τα ακόλουθα συστήματα, παρότι δεν είναι υλοποιημένα με πράκτορες ή δεν αφορούν καθαρά περιβαλ-

λοντικές εφαρμογές:

- Το σύστημα BUSTER (Bremen University Semantic Translator for Enhanced Retrieval) [149, 211, 212], το οποίο χρησιμοποιεί μια προσέγγιση με οντολογίες για την ανάσυρση περιβαλλοντικής πληροφορίας και το σημασιολογικό μετασχηματισμό των δεδομένων στον επιθυμητό τύπο (format). Οι δημιουργοί του BUSTER αναφέρουν ότι στο μέλλον θα υλοποιήσουν το σύστημα με πράκτορες.
- Το σύστημα MAGIC (Multi-Agents-based Diagnostic Data Acquisition and Management in Complex Systems), το οποίο αν και δεν δίνει έμφαση στις περιβαλλοντικές εφαρμογές, στοχεύει στην έγκαιρη αναγνώριση και διάγνωση σταδιακώς δημιουργούμενων σφαλμάτων σε σύνθετα συστήματα χρησιμοποιώντας πράκτορες λογισμικού. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει επιδειχθεί σε εφαρμογές αυτομάτου βιομηχανικού ελέγχου [110].
- Μια παρόμοια εφαρμογή με πράκτορες είναι η αρχιτεκτονική κατενεμημένης παρακολούθησης και διάγνωσης DIAMOND (DIistributed Architecture for MONitoring and Diagnosis) [8] που χρησιμοποιήθηκε στον κύκλο νερού ενός θερμοηλεκτρικού εργοστασίου. Οι πράκτορες της εφαρμογής που λέγεται SEQA αναλαμβάνουν την προσομοίωση των ενεργειών σχετίζονται με την διαδικασία παραγωγής, τον εξοπλισμό και την παρακολούθηση και διάγνωση των εμπλεκόμενων διαδικασιών.
- Το σύστημα BUISY προτείνει τη χρήση ρομποτικών πρακτόρων που συνεργάζονται μεταξύ τους για την παρακολούθηση της ρύπανσης που προκαλούν οι ρύποι που εκπέμπονται από μια καμινάδα ενός εργοστασίου [189, 188]. Στην εφαρμογή επίδειξης προσομοιώνεται ο καπνός που εκπέμπει μια καμινάδα ενός εργοστασίου παραγωγής ενέργειας και παρακολουθείται από μια ομάδα πρακτόρων που κινούνται ελεύθερα στο χώρο ενσωματώνοντας ένα μοντέλο κίνησης αντίστοιχο με αυτό του ελικοπτέρου. Οι πράκτορες είναι υπεύθυνοι για τη δειγματοληψία διάφορων παραγόντων ρύπανσης, και ενσωματώνουν απλά μοντέλα ατομικής και συλλογικής συμπεριφοράς για να επιτύχουν το σκοπό τους. Το σύστημα αυτό επιδεικνύει πώς ένα σύνθετο πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί ακολουθώντας μια προσέγγιση περιορισμένης αντίληψης του περιβάλλοντος.
- Το σύστημα RAID (Rilevamento dati Ambientali con Interfaccia DECT) αφορά την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ρύπανσης σε εσωτερικούς χώρους. Η συγκεκριμένη εφαρμογή βασίζεται στη γενική αρχιτεκτονική Kaleidoscope που χρησιμο-

ποιεί "οντότητες" για την δυναμική ολοκλήρωση των μετρήσεων που καταγράφουν διάφοροι αισθητήρες [140].

4.2.2 Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για το περιβάλλον

Τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για το περιβάλλον που έχουν αναπτυχθεί με πράκτορες αφορούν κυρίως συστήματα κατανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης σε περιβαλλοντικές εφαρμογές. Στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν εφαρμόζεται μια προσέγγιση με πράκτορες σε όλα τα στάδια ανάπτυξης ενός ΣΠΠ, αλλά η χρήση πρακτόρων περιορίζεται στην διαδικασία λήψης αποφάσεων με κατανεμημένο τρόπο. Στη συνέχεια παρατίθενται διάφορες εφαρμογές ΣΥΑΠ που ενσωματώνουν πράκτορες.

Στο Επιχειρησιακό Κέντρο Διαχείρισης της Ατμόσφαιρας της Αθήνας, η εφαρμογή D-NEMO χρησιμοποιεί πράκτορες για την διαχείριση της ποιότητας της ατμόσφαιρας. Οι πράκτορες της εφαρμογής ενσωματώνουν δένδρα CART, CBR και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την πρόβλεψη ενεχόμενων επεισοδίων ωπάνσης της ατμόσφαιρας [104].

Η εφαρμογή EDS-DAI χρησιμοποιεί ένα σύστημα πολλών πρακτόρων για την υποστήριξη αποφάσεων που σχετίζονται με την αποτίμηση ανάπτυξιακών σχεδίων χρήσης γης. Οι πράκτορες του συστήματος συνεργάζονται μεταξύ τους για την επιλογή τοποθεσιών, τον έλεγχο συμμόρφωσης με τους (περιβαλλοντικούς) κανονισμούς και τις προδιαγραφές. Οι διάφοροι εμπλεκόμενοι φορείς αναπαριστώνται με πράκτορες, οι οποίοι δίνουν συστάσεις που πιθανά είναι αντικρουόμενες μεταξύ τους. Οι πράκτορες συνεργάζονται μεταξύ τους για να συστήσουν τις ενέργειες χρήσης γης με βάση τους υπάρχοντες (χωρικούς και μη) περιορισμούς [127, 128, 129].

Η εφαρμογή NED-2 αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Georgia και την Δασική Υπηρεσία των ΗΠΑ και αφορά ένα σύστημα πρακτόρων για την διαχείριση δασικών οικοσυστημάτων. Στην εφαρμογή NED-2 οι πράκτορες χρησιμοποιούν μοντέλα ανάπτυξης και καρποφορίας για να αναλύσουν διάφορα σενάρια διαχείρισης δασικών εκτάσεων. Οι πράκτορες ενσωματώνουν μοντέλα κανόνων για την λήψη των αποφάσεων και προσομοιώνουν διάφορα σχέδια διαχείρισης δασών και εκτελούν αναλύσεις-στόχου για τα επόμενα χρόνια [153].

Η εφαρμογή PICO [165] χρησιμοποιεί πράκτορες για την ανάλυση απαιτήσεων ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων για την ολοκληρωμένη αγροτική παραγωγή¹. Στο PICO αναλύθηκαν με την χρήση πρακτόρων οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των εμπλεκομένων μερών και οι τεχνικές προστασίας των φυτικών οργανισμών. Οι υπεύθυνοι του έργου

¹Η ολοκληρωμένη παραγωγή στον αγροτικό τομέα είναι η μεθοδολογική υποστήριξη των βιολογικών καλλιεργειών με σκοπό την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων

σκοπεύουν να το αναπτύξουν χρησιμοποιώντας πράκτορες λογισμικού.

Η εφαρμογή των Davis και Sharp [44, 43] είναι ένα έμπειρο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για την αποκατάσταση των αγωγών υδροδότησης που χρησιμοποιεί πράκτορες (Expert System and Agent Technology to Water Mains Rehabilitation Decision Making ή εν συντομίᾳ ESAT-WMR). Μια κοινότητα συνεργατικών πρακτόρων μοντελοποιεί τις εργασίες της εταιρείας υδροδότησης και των συνεργατών της με σκοπό την διερεύνηση των πιθανών επιπτώσεων της στρατηγικής αποκατάστασης αγωγών που ακολουθεί σήμερα η εταιρεία, και υποθετικών σχετικών σεναρίων (what-if analysis).

Ένα ακόμη σύστημα υποστήριξης αποφάσεων που χρησιμοποιεί πράκτορες λογισμικού εφαρμόστηκε για την μελέτη προώθησης των αγροτικών προϊόντων [135, 134]. Το σύστημα IDS-DAP (intelligent decision support system for differentiated agricultural products) χρησιμοποιεί πράκτορες λογισμικού για την προσομοίωση των στρατηγικών διείσδυσης αγροτικών προϊόντων. Οι πράκτορες του IDS-DAP ενσωματώνουν μοντέλα κατανεμημένης πολυ-κριτηριακής ανάλυσης για να εξηγήσουν τη συμπεριφορά των καταναλωτών.

Το σύστημα DAI-DEPUR αναπτύχθηκε από το Πολυτεχνείο της Καταλονίας [185] και εφαρμόζει τις τεχνικές κατανεμημένης τεχνητής νοημοσύνης σε ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων για τον έλεγχο μιας μονάδας βιολογικού καθαρισμού. Οι διαδικασίες της μονάδας αναπαριστώνται με πράκτορες που συνεργάζονται μεταξύ τους σε μια αρχιτεκτονική πολλών επιπέδων. Ένα παρόμοιο σύστημα που αναπτύχθηκε από την ίδια ερευνητική ομάδα, λέγεται OntoWEDSS και δίνει έμφαση στη χρήση οντολογιών για την μοντελοποίηση της μικροβιολογικής γνώσης που αφορά μια μονάδα βιολογικού καθαρισμού [31].

4.2.3 Συστήματα προσομοίωσης σεναρίων

Στα συστήματα προσομοίωσης σεναρίων συγκαταλέγονται οι εφαρμογές εκείνες που χρησιμοποιούν πράκτορες ως τη βασική δομική μονάδα για την μοντελοποίηση διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στους εμπλεκόμενους φορείς του περιβάλλοντος.

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν κυρίως ανακλαστικούς πράκτορες για την προσομοίωση διαφόρων συστημάτων. Στη διεθνή βιβλιογραφία απαντώνται διάφορες εφαρμογές στη συγκεκριμένη κατηγορία. Ανάμεσα σε αυτές είναι και οι ακόλουθες:

Το SHADOC [20] που χρησιμοποιεί πράκτορες για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των αγροτών και των εμπλεκομένων στην άρδευση της κοιλάδας του Σενεγάλη. Σε μια ανάλογη προσπάθεια, το μοντέλο CATCHSCAPE [23] αφορά την άρδευση της βό-

ρειας Ταϊλάνδης και χρησιμοποιεί πράκτορες για την αναπαράσταση όλων των οντοτήτων που σχετίζονται με μια υδρολογική λεκάνη. Οι πράκτορες ενσωματώνουν μοντέλα για τον προσδιορισμό των υδάτινων αποθεμάτων. Σχετική, όσον αφορά το πεδίο εφαρμογής, είναι και η εφαρμογή SINUSE [57], που χρησιμοποιεί πράκτορες για την μοντελοποίηση της υδρολογικής λεκάνης Kairouan στην κεντρική Τυνησία και την διερεύνηση των συνεπειών της ανθρώπινης συμπεριφοράς στη διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων.

Η εφαρμογή “STAU-Wien” (City-Suburb relations and development in the Vienna Region) στοχεύει στη μελέτη της αστικής ανάπτυξης της Βιέννης και των γύρω περιοχών [120]. Αντικείμενο μελέτης αποτελούν οι κάτοικοι που εγκαθίστανται στις διάφορες περιοχές με διαφορετικούς ρυθμούς. Συγκεκριμένα, στο σύστημα ολοκληρώνονται μοντέλα πρακτόρων με χωρική αναφορά που λειτουργούν με βάση τις αρχές των κυψελοειδών αυτομάτων. Στο STAU-Wien οι πράκτορες αναπαριστούν τους κατοίκους που εγκαθίστανται στις περιαστικές περιοχές, αλλάζοντας την χρήση της γης.

Το μοντέλο πολλών πρακτόρων GEMACE προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυνηγών, των αγροτών και του πληθυσμού των παπιών στον υδροβιότοπο Camargue (Νότια Γαλλία). Το σύστημα ερευνά τους συσχετισμούς ανάμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και τις συνέπειες τους στη χρήση γης και τον πληθυσμό των παπιών [133].

Ένα μοντέλο πολύπλευρης διαπραγμάτευσης με πράκτορες αναπτύχθηκε για την υδρολογική λεκάνη Adour, στη νοτιοδυτική Γαλλία [201]. Επτά πράκτορες που αναπαριστούν τους αγρότες, την εταιρεία διαχείρισης των υδάτινων πόρων, τον μέσο φορολογούμενο και τις μη-κυβερνητικές οργανώσεις διαπραγματεύονται τις εναλλακτικές χρήσεις νερού της περιοχής.

Σχετικά, ο Recknagel αναφέρει ένα σύστημα προσομοίωσης της αλυσίδας τροφής και της αλληλεπίδρασης των ζωντανών οργανισμών σε ένα υδάτινο περιβάλλον, χρησιμοποιώντας ανακλαστικούς πράκτορες με χωρική αναφορά (AqEcAA) [178, 177].

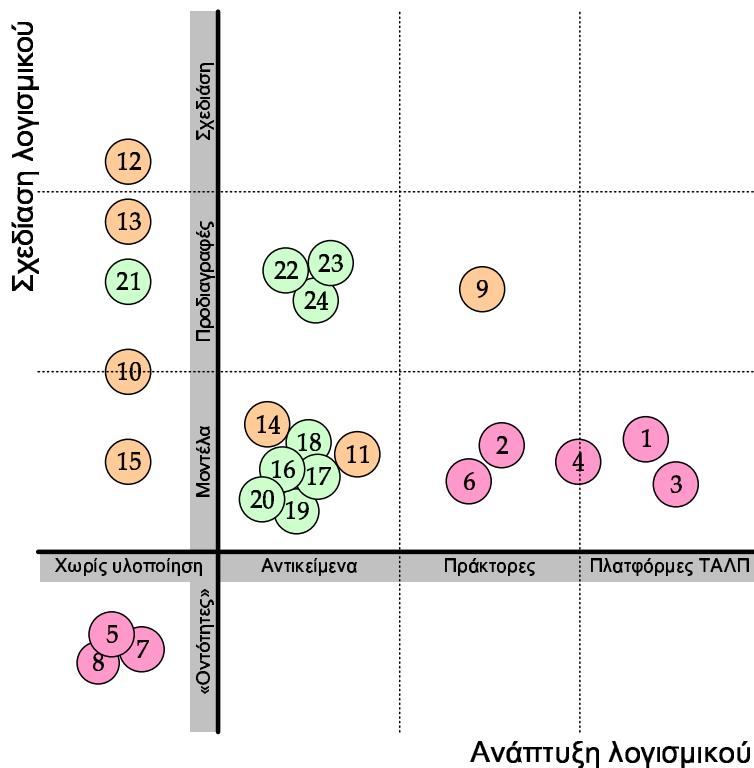
Σημαντική συνεισφορά στην διαχείριση των υδάτινων πόρων με πράκτορες είχε το ερευνητικό έργο FIRMA (Freshwater Integrated Resource Management with Agents), που χρηματοδοτήθηκε από την ΕΕ (1999-2003). Το FIRMA ασχολήθηκε με την ανάπτυξη και εφαρμογή μοντέλων πρακτόρων για την ολοκλήρωση των φυσικών, υδρολογικών, κοινωνικών και οικονομικών πτυχών της διαχείρισης υδάτινων πόρων. Ο στόχος του συγκεκριμένου έργου ήταν να συμπεριλάβει τους εμπλεκόμενους στη διαδικασία προδιαγραφής και επικύρωσης των μοντέλων σε διάφορα επίπεδα. Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στο FIRMA περιγράφουν τη συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις των

πρακτόρων [21, 146].

Ένα σύστημα για την μοντελοποίηση της επίμονης προσήλωσης σε μια περιοχή (territoriality) και της κοινωνικής δομής των κυνοειδών αναπτύχθηκε από τους Pitt et al. (2003) [166]. Η εφαρμογή CANID ανέπτυξε ένα σύστημα αυτόνομων πρακτόρων για την προσομοίωση της δυναμικής του πληθυσμού των κογιότ. Οι πράκτορες αναπτύχθηκαν με το Swarm [195] που επιτρέπει την επικοινωνία των πρακτόρων σε κάθε βήμα της προσομοίωσης και τη δημιουργία ιεραρχικών μοντέλων πληθυσμών.

4.2.4 Σύνοψη και παρατηρήσεις στη βιβλιογραφία

Στις παραγράφους που προηγήθηκαν έγινε μια εκτενής αναφορά στις προσπάθειες χρήσης των πρακτόρων σε εφαρμογές περιβαλλοντικής πληροφορικής που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία. Τα συστήματα αυτά συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1 και απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 4.1. Το σχήμα αναπαριστά με ποιοτικό τρόπο τις τεχνικές σχεδίασης και ανάπτυξης λογισμικού που ακολούθησαν τα εν λόγω συστήματα.



Η αρίθμηση των συστημάτων αντιστοιχεί στον Πίνακα 4.1.

Σχήμα 4.1: Ταξινόμηση των συστημάτων του Πίνακα 4.1, ως προς τις τεχνικές σχεδίασης και ανάπτυξης λογισμικού

Ανατρέχοντας τη βιβλιογραφία κανείς μπορεί να καταλήξει στα ακόλουθα συμπεράσματα. Καταρχήν, επιβεβαιώνεται το ότι η χρήση πρακτόρων λογισμικού σε ΣΠΠ είναι

a.a	Ακρωνύμιο	Πεδίο εφαρμογής	Σκοπός της εφαρμογής	Κύριες εγκαστίες	Τεχνολογίες πλατφόρμων	Τύποι πλατφόρμων	Έτος	Περιοχή	Αναφορές	
1	EDEN-IW InfoSleuth	Υδάτων πόρου	Αναφορά και σχεδιασμός ομοιογενοποιημένης πρόσθατης σε δεδομένα	Ολοκλήρωση περιβαλλοντικών δεδομένων	Ολοκλήρωση περιβαλλοντικών δεδομένων	JADE, FIPA-ACL, RDF	DB resource agent, Query Decomposition Agent, Ontology agent, Broker agent	2000-3	Ευρώπη ΗΠΑ	[54, 106, 151, 167]
2	NZDIS	Περιβαλλοντικά δεδομένα	Ολοκλήρωση περιβαλλοντικών δεδομένων	Ολοκλήρωση ερωτήσεως ένα ανοικτό, κατανεμημένο περιβάλλοντο από επεργενείς ΒΔ	Ολοκλήρωση ερωτήσεως ένα ανοικτό, κατανεμημένο περιβάλλοντο από επεργενείς ΒΔ	FIPA-ACL, UML, OQL, RDF	ontology agent, resource agent, query processing agents, broker agent	2000-3	Νέα Λανδία	[169, 38, 171, 170]
3	FSEP	Μετεωρολογία	Προβλεψη και συναρρεόμενος	Ολοκλήρωση περιβαλλοντικών δεδομένων	Παρακολούθηση πρόγνωσης συναντερεμένων προβλημάτων	JACK, RDF-S, DAML+OIL	wrapper agents, interface agents	2002-3	Αυστραλία	[40, 41]
4	BUSTER	Χρήστες γης	Ολοκλήρωση περιβαλλοντικών δεδομένων	Ολοκλήρωση και φύλαξη στα δεδομένα, υπηρεσίες εργοτηλιάτων	OIL, [FIPA-OS]*	wrapper, mediator, mapper	2001	Γερμανία	[149, 211, 212]	
5	MAGIC	Μονάδα επεξεργασίας νερού	Προβλεψη και συναρρεόμενος	Αναρρωγή σφράγιστων σηματοδοτών στη βιομηχανική διαδικασία διέλογης	*	diagnostic agents, data acquisition agent, knowledge acquisition agent,	2001	Ευρώπη	[110]	
6	DIAMOND SEQA	Απομονωτικό εργοστάσιο	Προσομοίωση και διάγνωση	Διάγνωση ανωμαλιών του κήλου νερού ψήξης σε απομονωτικό εργοστάσιο	XML, FIPA-ACL	wrapper agents, monitoring agent, diagnostic agent	2002	Ευρώπη	[8]	
7	BUSY	Απροσαριωτή ρύπανση	Προσομοίωση και διάγνωση	Παρακολούθηση της σημήνιας που επιτέμπει μακρινά στα ενός εργοστασίου παρασημογής ενέργειας	-	sensor agents	1998	Πορτογαλία	[189, 188]	
8	RAID Kaleidoscope	Ποιότητα αέρα επωτερικών χώρων	Ολοκλήρωση περιβαλλοντικών δεδομένων	Παρακολούθηση και έλεγχος της ρύπανσης σε επωτερικούς χώρους	"entities"	-	2002	Ευρώπη	[140]	
9	D-NEMO	Απροσαριωτή πάνω	Προβλεψη και συναρρεόμενος	Προβλεψη της αποσφράκτωσης ωπάνων	LALO, KOML	station agents, model agents	2002	Ελλάδα	[104]	
10	EDS-DAI	Χρήσεις γης	Υποστήριξη λήψης αποφάσεων	Επαλγή τοποθεσιών που παραποτούν συγκεκριμένους κανονισμούς	Distributed Belief Revision	evaluation agents, GIS agents	1997	Ευρώπη	[127, 128, 129]	
11	NED-2	Διαχείριση δασών οικοσυστημάτων	Υποστήριξη λήψης αποφάσεων	Προσομοίωση σεναρίων διαχείρισης δασών	C++, Prolog, HTML	Interface agent, Simulation agent, Goal analysis planning agent, GIS agent, Report generation agents	2004	ΗΠΑ	[153]	
12	PICO	Ολοκληρωμένη γραπτοποίηση προσώπων	Υποστήριξη λήψης αποφάσεων	Ανάλυση των αληθεύσατορών των εμπλεκομένων μερών	[Tropos, WEKA]*	GIS agent, Disease Learner, wrapper agents	2004	Ιταλία	[165]	
13	ESAT-WMR	Διαχείριση δικτύων υδρευσης	Υποστήριξη λήψης αποφάσεων	Διερεύνωση και ανάλυση στασηγκών αποκαταστάσιμων βλαβών στο δίπτυχο υδροδόσητης	[KIF, KOML]*	Interface agent, Heuristics agent, Information agent, Datanining agent, Database agent	2000	HB	[44, 43]	

α.α	Ακρωνύμιο	Πεδίο εφαρμογής	Σκοπός της εφαρμογής	Κύριες εγκασίες	Τεχνολογίες πλατφόρμαν	Τύποι πλατφόρμαν	Έτος	Περιοχή	Αναφορές
14	IDS-DAP	Προσθήτη σχεδούσεων προϊόντων	Υποστήξη λίγης αποφάσεων	Διερευνηθημένη με πολυχρηματοκαλή ανάλυση της διεύδουσης προϊόντων στην αγορά	UML, Visual Basic, TCP-IP	Data analysis agent, Brand choice agent, Market expert agent	2003	Ελλάδα	[135, 134]
15	DAL-DEPUR	Μονάδα βιολογικού καύσι καθαρισμού	Υποστήξη λήψης αποφάσεων	Προσωπικότητα των μεροδαγκών γνωστικών βιοδιαποσιών των λυμάτων	LISP	knowledge-base agents, case-based reasoning agents, supervisory agents	1996	Ισπανία	[185]
16	SHADOC	Διαχείριση λεκάνης απορροής νερού	Ανάλυση και υπολογιστική αποτίμηση σεναρίων	Προσωπικότητα της συμπεριφοράς των αγροτών και των στατιστικών αποθεμάτων	UML, SmallTalk, OOP	Pump station, Reach, Watercourse, textitPlot, Farmer	2000	Σενεγάλη	[20]
17	CATCH-SCAPE	Διαχείριση λεκάνης απορροής νερού	Ανάλυση και υπολογιστική αποτίμηση σεναρίων	Προσωπικότητα του υδάτινου σώματος και των αποφάσεων των αγροτών	UML, SmallTalk, OOP	Plot, Crop, Farmer, Canal, Weir, Canal Manager, River,	2003	Ταϊβάνδη	[23]
18	SINUSE	Διαχείριση λεκάνης απορροής νερού	Ανάλυση και υπολογιστική αποτίμηση σεναρίων	Προσωπικότητα των διαχειριζομένων για τη λήψη του νερού	UML, SmallTalk, OOP	Plot, Water table, Farmer	2003	Τυνησία	[57]
19	STAU-Wien	Οικοτοπή ανάπτυξης	Ανάλυση και υπολογιστική αποτίμηση σεναρίων	Προσωπικότητα της ανάπτυξης των προαστίων της Βιέννης	UML, ArchInfo, Cellular automata, OOP	enterprises, households	2003	Αυστρία	[120]
20	GEMACE	Διαχείριση βιοτοπού	Ανάλυση και υπολογιστική αποτίμηση σεναρίων	Προσωπικότητα των αλληλεπιδρών μεταξύ των κανηγών, των αγροτών και του πληθυσμού των πετρών	UML, Smalltalk, OOP	hunting manager agents, farmers agents	2003	Γαλλία	[133]
21	Adour	Διαχείριση λεκάνης απορροής νερού	Ανάλυση και υπολογιστική αποτίμηση σεναρίων	Διαπρεγμάτευση λογοτύπων νερού	[BDI]*	farmers, environmental lobbies, water manager, taxpayer	2001	Γαλλία	[201]
22	AqEcAA	Αλυσίδα τροφής	Ανάλυση και εξελικτική υπολογιστική	Προσωπικότητα της αλυσίδας τροφής και των αλληλεπιδρώσεων μεταξύ των πλανκτόν	Echo, Gecko plankton species	Phytoplankton species, Zoo-	2003	Αυστραλία	[178, 177]
23	FIRMA	Διαχείριση υδάτων πόρων	Ανάλυση και υπολογιστική αποτίμηση σεναρίων	Σχεδιασμός της διαχείρισης υδάτων πόρων με τη λήψη μοντέλων προσκόδοντων	SDML	Policy agent, citizens	2003	Ευρώπη	[21, 146]
24	CANID	Βιοποικιλότητα	Ανάλυση και υπολογιστική αποτίμηση σεναρίων	Μοντελοποίηση της προστασίας των κανονικούς δομής των κυνοειδών	Swarm, coyote		2003	ΗΠΑ	[166]

* Τα συστήματα που σημειώνονται με αστερίσκο δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως.

αποσπασματική, περιπτωσιολογική, και μάλλον περιορισμένη. Ενώ κάποιος θα μπορούσε να ισχυριστεί ότι η μοντελοποίηση με πράκτορες σε συστήματα προσομοίωσης, και ο προγραμματισμός με πράκτορες σε συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης περιβαλλοντικής πληροφορίας είναι κάπως διαδεδομένες, οι Τεχνικές Ανάπτυξης Λογισμικού με Πράκτορες δεν χρησιμοποιούνται κάθετα και καθολικά για την ανάπτυξη ΣΠΠ. Μοναδική εργασία που αναφέρεται στην ανάλυση απαιτήσεων με τεχνικές πρακτόρων είναι το PICO [165], που χρησιμοποιεί την μεθοδολογία Tropos [74]. Ωστόσο, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι το PICO δεν έχει αναπτυχθεί με πράκτορες λογισμικού (η ανακοίνωση παρουσιάζει μόνο το μοντέλο πρακτόρων του PICO), καθώς και ότι ο Tropos έχει αναπτυχθεί από τους ίδιους ερευνητές. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι οι σύγχρονες εξελίξεις των μεθόδων ΤΑΛΠ δεν έχουν μεταλαμπαδευτεί πλήρως στην περιοχή της Περιβαλλοντικής Πληροφορικής.

Ακόμη, τα συστήματα που αναφέρθηκαν στη βιβλιογραφική επισκόπηση εκμεταλλεύνται "μονομερώς" τις ικανότητες των ΠΛ. Λιγότερο ή περισσότερο, οι τρεις κατηγορίες συστημάτων που μελετήθηκαν στην ενότητα 4.2 αφορούν συστήματα που υλοποιούν ευφυείς διεπαφές, κατανεμημένα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων ή πράκτορες τεχνητής ζωής. Ακόμη, στις περισσότερες εφαρμογές οι ΠΛ δεν χρησιμοποιούνται ως δομικά στοιχεία των εφαρμογών. Αντιθέτως, οι πράκτορες χρησιμοποιούνται ως μοντέλα αναπαράστασης του φυσικού περιβάλλοντος ή ως υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης. Η τεχνολογία των ΠΛ, όπως έγινε σαφές και στο Κεφάλαιο 3 έχει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες, που δεν έχουν αξιοποιηθεί πλήρως στα ΣΠΠ.

Τέλος, αναγνωρίζουμε την έλλειψη μιας γενικευμένης προσέγγισης ανάπτυξης ΣΠΠ με ΠΛ. Μια προσέγγιση που να παρέχει ένα γενικευμένο πλαίσιο εργασίας είναι απαραίτητη για να εφαρμοστούν αποδοτικότερα οι ΤΑΛΠ σε εφαρμογές περιβαλλοντικού λογισμικού. Σκοπός της διατριβής αυτής, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1 είναι να θεμελιώσει ένα τέτοιο πλαίσιο εργασίας, το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια.

4.3 Ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εργασίας με πράκτορες λογισμικού

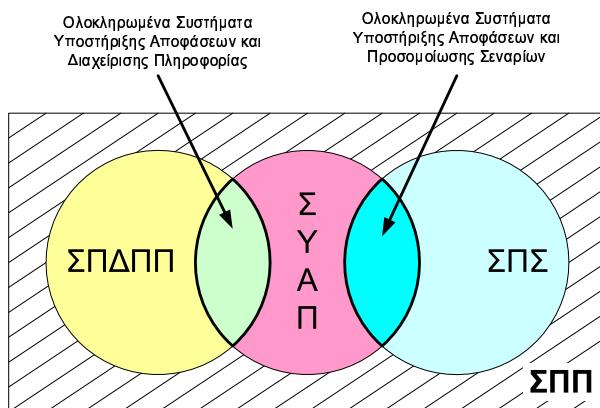
4.3.1 Η περιοχή στόχου

Από την επισκόπηση της περιβαλλοντικής πληροφορικής στο Κεφάλαιο 2 έχει γίνει σαφές ότι ο χώρος των ΣΠΠ είναι ευρύς και πολυδιάστατος. Ακόμη, οι σύγχρονες απαιτήσεις και οι προκλήσεις που καλείται να αναλάβει η περιβαλλοντική πληροφορική, διευρύνουν ολοένα και περισσότερο τους στόχους και το περιεχόμενο των εφαρμογών των ΣΠΠ. Από

την άλλη, προβάλλουν οι ΤΑΛΠ, ως η σύγχρονη τάση ανάπτυξης λογισμικού, ικανή για την ανάπτυξη συστημάτων που έχουν ανθρωπόμορφα χαρακτηριστικά και είναι ικανά να παρέχουν προηγμένες υπηρεσίες.

Στο περιβάλλον αυτό μπορούμε να διακρίνουμε τρεις κύριες περιοχές στόχου που πρέπει να καλύψει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εργασίας ανάπτυξης ΣΠΠ υιοθετώντας τις τεχνικές πρακτόρων λογισμικού. Οι περιοχές στόχου αναπαριστώνται γραφικά στο Σχήμα 4.2 και περιλαμβάνουν:

- (α) Τα Συστήματα Παρακολούθησης και Διαχείρισης Περιβαλλοντικής Πληροφορίας (ΣΠΔΠΠ)
- (β) Τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για το Περιβάλλον (ΣΥΑΠ)
- (γ) Τα Συστήματα Προσομοίωσης Σεναρίων (ΣΠΣ)



Σχήμα 4.2: Η περιοχή στόχου της προσέγγισης

Η κατηγοριοποίηση αυτή είναι συμβατή με την κατηγοριοποίηση των Hilty, Page, Rademacher και Riekert [88] που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.3.3, ωστόσο δίνει μεγαλύτερη έμφαση στα ολοκληρωμένα συστήματα περιβαλλοντικής πληροφορικής. Τα τελευταία άλλωστε θεωρούνται το κύριο αντικείμενο έρευνας της Περιβαλλοντικής Πληροφορικής και σκοπεύουν να επεκτείνουν τα ΣΠΔΠΠ και τα ΣΠΣ ενσωματώνοντας χαρακτηριστικά υποστήριξης αποφάσεων. Έτσι, η περιοχή στόχου συμπεριλαμβάνει ολοκληρωμένα συστήματα περιβαλλοντικής πληροφορικής που ανήκουν στις εξής δύο (ύπο)κατηγορίες:

- (αα) Τα Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Διαχείρισης Πληροφορίας (ΟΣΥΑΔΠ)

(ββ) Τα Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Προσδομοίωσης Σεναρίων (ΟΣΥΑΠΣ)

4.3.2 Οι πράκτορες λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική

Ο ρόλος των πρακτόρων λογισμικού για την ανάπτυξη ΣΠΠ

Η θέση που προτείνει η παρούσα διατριβή είναι ότι η περιοχή στόχου των ΣΠΠ που συζητήθηκε στην ανωτέρω παράγραφο μπορεί να καλυφθεί χρησιμοποιώντας πράκτορες λογισμικού. Ο κύριος ρόλος των ΠΛ στην διαδικασία ανάπτυξης ΣΠΠ είναι ότι οι ΠΛ αποτελούν ένα κοινό αφηρημένο μοντέλο για ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός ΣΠΠ.

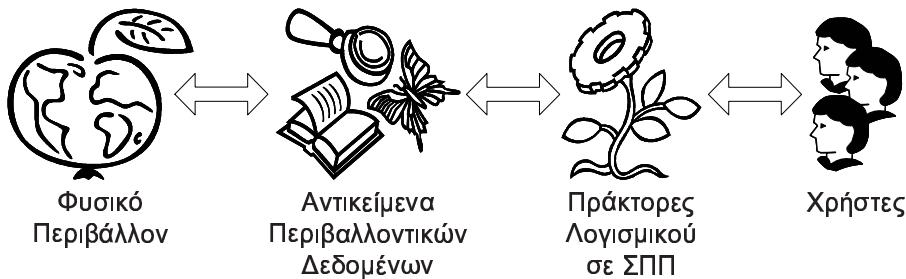
Θεωρούμε ότι η έννοια του ΠΛ είναι η βασική δομική μονάδα για την ανάλυση, τη σχεδίαση και την ανάπτυξη ενός ΣΠΠ. Τα ανθρωπόμορφα χαρακτηριστικά των πρακτόρων, οι οποίοι ενσωματώνουν συμπεριφορές, υλοποιούν ρόλους, και αναπτύσσουν πρωτόκολλα επικοινωνίας, είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στα χέρια ενός μηχανικού λογισμικού στην προσπάθειά του να αντιμετωπίσει τα προβλήματα διαθεματικότητας και πολυπλοκότητας που ενέχουν οι περιβαλλοντικές εφαρμογές. Ο ΠΛ αποτελεί μια μεταφορά που είναι εύκολο να αντιληφθούν οι επιστήμονες του περιβάλλοντος, με αποτέλεσμα να μπορούν να συμμετέχουν σε όλες τις φάσεις ανάλυσης και μοντελοποίησης ενός ΣΠΠ. Η συμμετοχή των επιστημόνων του περιβάλλοντος στις φάσεις ανάλυσης και μοντελοποίησης των ΣΠΠ είναι μια από τις βασικές προϋποθέσεις για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης στα ΣΠΠ² και την αντίληψη της αβεβαιότητας που ενέχουν σε επίπεδο δομής, μοντέλων και δεδομένων. Η χρήση ΠΛ συμβάλει στην ανάπτυξη διαφανών εργαλείων που οι επιστήμονες του περιβάλλοντος να μπορούν να εμπιστευθούν.

Ακόμη, οι ΠΛ αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάπτυξη και παροχή προγραμμάτων υπηρεσιών σε ένα ΣΠΠ. Οι ΠΛ έχουν την ικανότητα να αναλάβουν ένα διαμεσολαβητικό ρόλο που θα παρέχει υπηρεσίες σε ένα ανοιχτό περιβάλλον εργασίας. Το κενό πληροφορίας που αναδεικνύει η Ατζέντα 21 (βλέπε § 2.1), μπορεί να γεφυρώθει χρησιμοποιώντας ΠΛ, που θα αναλάβουν ένα ρόλο μεσίτευσης πληροφορίας στους ολοένα και περισσότερους αποδέκτες των περιβαλλοντικών δεδομένων (κυβερνήσεις, μη-κυβερνητικές οργανώσεις, ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια, πολίτες, κλπ).

Μια σχηματική αναπαράσταση του περιβάλλοντος λειτουργίας των ΠΛ σε εφαρμογές περιβαλλοντικής πληροφορικής παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Το φυσικό περιβάλλον αναπαριστάται από αντικείμενα περιβαλλοντικής πληροφορίας (Environmental data ob-

²Ο J. Rotmans [182] αναφέρει σχετικά με τις προκλήσεις της ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής αποτίμησης και των μεθόδων της, ότι "πρέπει να ενσωματωθεί βαθεία γνώση των σύνθετων συστημάτων, των προσαρμόσματων συμπεριφορών, των διακλαδώσεων και της αβεβαιότητας"

jeet και εν συντομία ΑΠΠ) τα οποία απεικονίζουν τα διάφορα επίπεδα της διαθέσιμης περιβαλλοντικής πληροφορίας (δεδομένα, πληροφορία, εμπειρία και γνώση). Οι πράκτορες λογισμικού αναλαμβάνουν να διαμεσολαβήσουν για λογαριασμό των χρηστών που θέλουν να αποκτήσουν πρόσβαση στην πληροφορία, παρέχοντας προηγμένες υπηρεσίες.



Σχήμα 4.3: Ο ρόλος των ΠΛ σε περιβαλλοντικές εφαρμογές

Εργαλειοθήκη πρακτόρων περιβαλλοντικής πληροφορικής

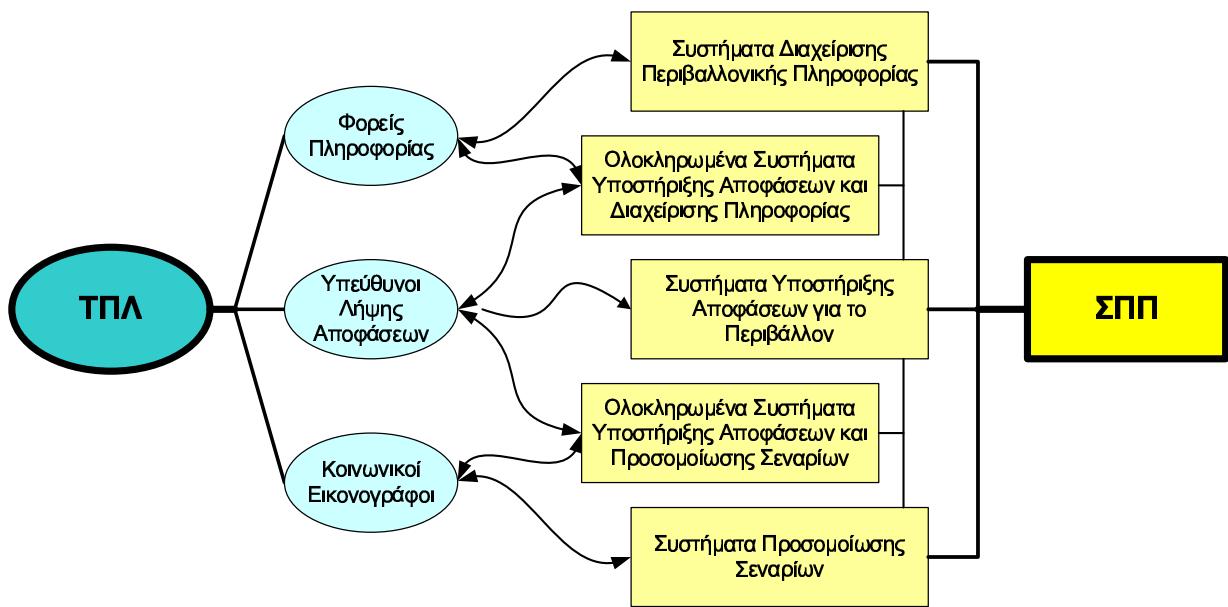
Με σκοπό την θεμελίωση ενός γενικευμένου πλαισίου εργασίας για την ανάπτυξη ΣΠΠ με πράκτορες, θεωρούμε ότι αρκούν τρεις γενικοί τύποι πρακτόρων. Οι τρεις κατηγορίες πρακτόρων αποτελούν την εργαλειοθήκη της προσέγγισης και ορίζονται σε ένα αφηρημένο επίπεδο ως εξής:

- A. **Πράκτορες-Φορείς Πληροφορίας**, οι οποίοι διαχειρίζονται και μετασχηματίζουν ΑΠΠ.
- B. **Πράκτορες-Υπεύθυνοι Λήψης Αποφάσεων**, οι οποίοι αντιλαμβάνονται τα ΑΠΠ και με βάση αιτιοκρατικές στρατηγικές, μεθόδους εξόρυξης γνώσης ή ευριστικές τεχνικές λαμβάνουν αποφάσεις και προτείνουν ενέργειες.
- C. **Πράκτορες-Κοινωνικοί Εικονογράφοι**, οι οποίοι συγκροτούν εικονικές κοινότητες και ενσωματώνουν συμπεριφορές συνεργασίας ή ανταγωνισμού.

Στο επίπεδο αυτό οι τρεις κατηγορίες πρακτόρων λογισμικού για την ανάπτυξη περιβαλλοντικών εφαρμογών ορίζονται με αρκετά αφηρημένο τρόπο. Σε επόμενη παράγραφο καθορίζονται οι τύποι αυτοί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια (§4.4.1).

Χρησιμοποιώντας την εργαλειοθήκη ΤΑΛΠ, που ορίστηκε παραπάνω, κάθε ΣΠΠ της περιοχής στόχου μπορεί να αναπτυχθεί ως ένα σύστημα πρακτόρων χρησιμοποιώντας πράκτορες των τριών κατηγοριών. Η εργαλειοθήκη των τριών τύπων πρακτόρων συσχετίζεται με τις διάφορες εφαρμογές της Περιβαλλοντικής Πληροφορικής που ορίστηκαν στην περιοχή στόχου, ως ακολούθως:

Οι πράκτορες-Φορείς Πληροφορίας χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ΣΠΔΠΠ και εφαρμογές ΟΣΥΑΔΠ, οι πράκτορες-Υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων σε εφαρμογές ΣΥΑΠ, ΟΣΥΑΔΠ και ΟΣΥΑΠΣ, ενώ οι πράκτορες - Κοινωνικοί εικονογράφοι σε εφαρμογές ΣΠΣ και ΟΣΥΑΠΣ. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται σχηματικά η συσχέτιση τύπων ΠΛ και τύπων ΣΠΠ.



Σχήμα 4.4: Συσχέτιση τύπων πρακτόρων και κατηγοριών ΣΠΠ

Στη συνέχεια συσχετίζουμε τα διάφορα συστήματα πρακτόρων που αφορούν εφαρμογές περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος και συνήτιθηκαν εκτενώς στην §4.2 με τους τρεις τύπους πρακτόρων. Στη διδιάστατη απεικόνιση του Σχήματος 4.5, θεωρούμε ως άξονες από τη μία τις κατηγορίες συστημάτων περιβαλλοντικής πληροφορίας και από την άλλη τους τύπους πρακτόρων λογισμικού. Στη βιβλιογραφική επισκόπηση των ΣΠΠ με ΠΛ έγινε φανερό ότι υπάρχει μια ευθεία σχέση ανάμεσα στους Πράκτορες-Φορείς πληροφορίας και τα ΣΠΔΠΠ, τους Πράκτορες-Υπεύθυνους λήψης αποφάσεων και τα ΣΥΑΠ, και τους Πράκτορες-Κοινωνικούς εικονογράφους και τα ΣΠΣ. Ωστόσο, η προσέγγιση που υιοθετήσαμε επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής της τεχνολογίας των πρακτόρων λογισμικού για την ανάπτυξη ΣΠΠ. Η παρούσα προσέγγιση εγκολπώνει τα ΟΣΥΑΔΠ και τα ΟΣΥΑΠΣ, με σκοπό την παροχή προηγμένων υπηρεσιών υποστήριξης αποφάσεων στα ΣΠΠ και καλύπτει ολόκληρη την περιοχή στόχου.

Η παρούσα θεώρηση της εργαλειοθήκης τύπων πρακτόρων για την ανάπτυξη εφαρμογών περιβαλλοντικής πληροφοριακής, θεμελιώνεται μεθοδολογικά στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 4.5: Συσχέτιση κατηγοριών ΣΠΠ και τύπων ΠΛ

4.4 Μεθοδολογική προσέγγιση

4.4.1 Μοντέλα πρακτόρων σε περιβαλλοντικές εφαρμογές

Γενικά

Ο ρόλος ενός ΠΛ στην περιβαλλοντική πληροφορική είναι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, διαμεσολαβητικός. Σε ένα υψηλό επίπεδο γενίκευσης, ένα πράκτορας σε μια εφαρμογή περιβαλλοντικής πληροφορικής (*agent*) μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας **τυπικός πράκτορας**, ο οποίος καθορίζει τις ενέργειες του με βάση τις καταστάσεις του (τεχνητού/εικονικού) περιβάλλοντος που αντιλαμβάνεται. Το περιβάλλον του *agent* συνίσταται από όλες τις δυνατές καταστάσεις των ΑΠΠ που αντιλαμβάνεται. Έστω **O** το σύνολο των ΑΠΠ στα οποία έχει πρόσβαση ο *agent*. Στη γενικότερη περίπτωση ένα αντικείμενο $O_{ED}(i) \in O$ είναι συνάρτηση τόσο του χρόνου t , όσο και της τοποθεσίας l . Έτσι, το σύνολο των I ΑΠΠ που αντιλαμβάνεται ο *agent* είναι:

$$O = \{O_{ED(1)}, O_{ED(2)}, \dots, O_{ED(I)}\}, \quad O_{ED(i)} = f(t, l), i = 1, \dots, I \quad (4.1)$$

Και το σύνολο των καταστάσεων του περιβάλλοντος του πράκτορα *agent* ορίζεται ως το σύνολο **S** όλων των στιγμιότυπων των αντικειμένων του **O**, πληθικότητας J .

$$S = \{s_1, s_2, \dots\}, \quad \forall s_j = O_{ED(i)}(t, l), j = 1, \dots, J \quad (4.2)$$

Αν θεωρήσουμε $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, \dots\}$ το σύνολο των δυνατών ενεργειών του πράκτορα *agent*, τότε ο *agent* μπορεί να οριστεί ως μια συνάρτηση που αντιστοιχίζει τις ακολουθίες των καταστάσεων του περιβάλλοντος σε ενέργειες σύμφωνα με τη σχέση:

$$\text{action} : \mathbf{S}^* \rightarrow \mathbf{A} \quad (4.3)$$

Ενώ το περιβάλλον του *agent* αντιδρά στην ενέργεια $a \in \mathbf{A}$ που εφαρμόζεται επί της κατάστασης $s \in \mathbf{S}$ ως:

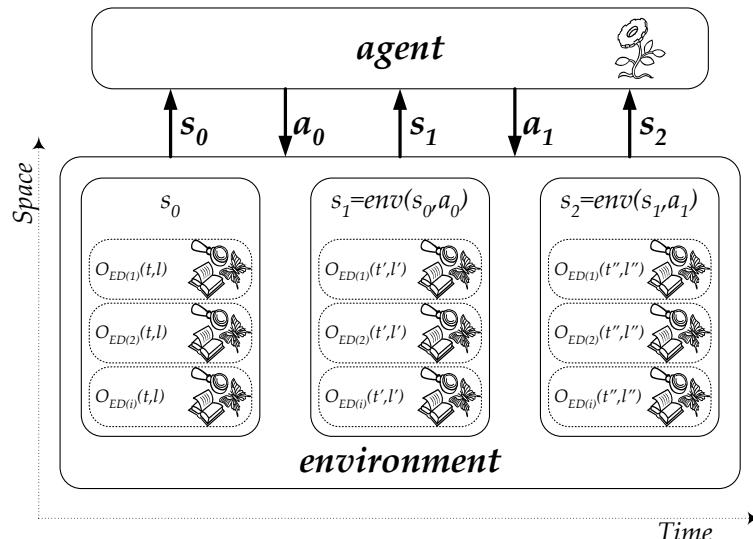
$$\text{env} : \mathbf{S} \times \mathbf{A} \rightarrow \mathcal{S} \quad (4.4)$$

Η εκτέλεση (*run*) του πράκτορα *agent* είναι η ακολουθία:

$$\text{run} : s_0 \xrightarrow{a_0} s_1 \xrightarrow{a_1} s_2 \xrightarrow{a_2} s_3 \dots \quad (4.5)$$

όπου $s_1 = \text{env}(s_0, a_0)$ είναι η κατάσταση στην οποία μεταβαίνει το περιβάλλον του πράκτορα, όταν ασκηθεί η ενέργεια a_0 επί της κατάστασης s_0 . Η αλληλεπίδραση του πράκτορα με το περιβάλλον του αναπαρίσταται γραφικά στο Σχήμα 4.6. Με τον τρόπο αυτό καθορίζεται η "εξωτερική όψη" ενός πράκτορα *agent* της εργαλειοθήκης.

Στη συνέχεια, προσδιορίζονται οι λειτουργίες των τριών τύπων πρακτόρων της εργαλειοθήκης ακολουθώντας το μοντέλο ενός τυπικού πράκτορα με κατάσταση, καθορίζοντας την "εσωτερική όψη" τους³.



Σχήμα 4.6: Η αλληλεπίδραση ενός πράκτορα της εργαλειοθήκης με το περιβάλλον του

³Θυμίζουμε ότι ο πράκτορας με κατάσταση είναι πλήρως ισοδύναμος με τον τυπικό πράκτορα.

Μοντέλο πρακτόρων-φορέων πληροφορίας

Ένας πράκτορας a_{IC} ως φορέας πληροφορίας λειτουργεί ως μια συνάρτηση μετασχηματισμού ΑΠΠ, με σκοπό την παροχή υπηρεσιών πληροφόρησης σχετικά με το περιβάλλον. Το σύνολο ενεργειών του a_{IC} είναι $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_i\}$, όπου κάθε ενέργεια $a_i \in \mathbf{O}^*$ είναι μια διάταξη ΑΠΠ που ο a_{IC} επικοινωνεί στο περιβάλλον του. Το σύνολο \mathbf{I} των εσωτερικών καταστάσεων που διατηρεί ο πράκτορας είναι:

$$\mathbf{I} = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_k\}, \quad i_k \in \mathcal{P}(\mathbf{O}) \quad (4.6)$$

δηλαδή ένα σύνολο από στιγμιότυπα των ΑΠΠ.

Έτσι, ο a_{IC} λειτουργεί αισθανόμενος το περιβάλλον του μέσω της συνάρτησης αντίληψης *see*, που μετασχηματίζει τις καταστάσεις του περιβάλλοντος $s \in \mathbf{S}$ σε αντιλήψεις πράκτορα $p \in \mathbf{P}$. Στη συνέχεια, ο a_{IC} ανανεώνει την εσωτερική του κατάσταση με βάση τις ακολουθίες αντιλήψεών του, μέσω της συνάρτησης μετασχηματισμού *trans*. Τέλος, ο πράκτορας ενεργεί μέσω της συνάρτησης *action* βάσει της εσωτερικής του κατάστασης. Η εσωτερική λειτουργία του a_{IC} προδιαγράφεται ως:

$$see : \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{P} \quad (4.7)$$

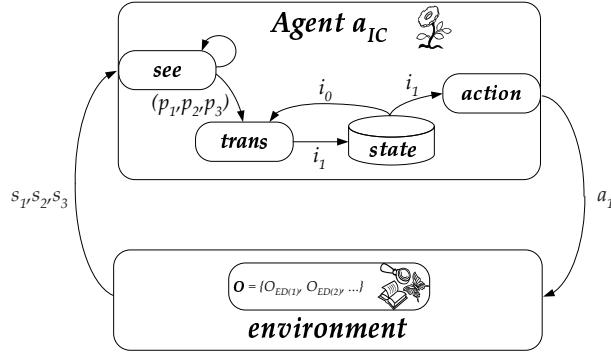
$$trans : \mathbf{I} \times \mathbf{P}^* \rightarrow \mathbf{I} \quad (4.8)$$

$$action : \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{A} \quad (4.9)$$

$$\text{όπου } \mathbf{P}, \mathbf{S} \subseteq \mathbf{O}, \quad \mathbf{I} \subseteq \mathcal{P}(\mathbf{O}), \quad \text{και } \mathbf{A} \subseteq \mathbf{O}^*$$

Υλοποιώντας την συμπεριφορά αυτήν, ο πράκτορας έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται τα ΑΠΠ του \mathbf{O} ως εξής: Έστω ότι αρχικά ο a_{IC} βρίσκεται στην κατάσταση i_0 , δηλαδή έχει στην εσωτερική του κατάσταση ένα σύνολο ακολουθιών ΑΠΠ και μέσω της συνάρτησης *see* αντιλαμβάνεται διάφορες καταστάσεις του περιβάλλοντός του. Για παράδειγμα, έστω ότι αντιλαμβάνεται τα αντικείμενα s_1, s_2 , και s_3 . Καθένα από αυτά αποκωδικοποιείται στην αντίστοιχη αντίληψη του πράκτορα, ως $p_1 = see(s_1), p_2 = see(s_2), p_3 = see(s_3)$. Ο πράκτορας μετασχηματίζει τα ΑΠΠ μέσω της *trans* και οδηγείται την εσωτερική κατάσταση $i_1 = trans((p_1, p_2, p_3), i_0)$. Τελικά, επιστρέφει στο περιβάλλον την ενέργεια (ακολουθία αντικειμένων) $a_1 = action(i_1) = action(trans((p_1, p_2, p_3), i_0))$. Η συμπεριφορά του πράκτορα a_{IC} εικονίζεται στο Σχήμα 4.7.

Ενσωματώνοντας τον μηχανισμό αυτό, ο πράκτορας-φορέας πληροφορίας καθίσταται ικανός για την εκτέλεση πολύπλοκων πράξεων διαχείρισης δεδομένων περιβαλλοντικής πληροφορίας. Το σύνολο των πρακτόρων-φορέων πληροφορίας συμβολίζεται με \mathcal{IC} και



Σχήμα 4.7: Εσωτερική δομή και συμπεριφορά πράκτορα-φορέα πληροφορίας

συμπεριλαμβάνει όλους τους πράκτορες που ενσωματώνουν την συμπεριφορά του $a_{IC} \in \mathcal{I}_{\mathcal{C}}$.

Μοντέλο πρακτόρων-υπεύθυνων λήψης αποφάσεων

Ένας πράκτορας a_{DM} που λειτουργεί ως υπεύθυνος λήψης αποφάσεων, ενσωματώνει μια μηχανή συμπερασμού (reasoning engine) *engine*, που υλοποιεί ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνει αιτιολογικές στρατηγικές, μεθόδους εξόρυξης γνώσης ή ευριστικές τεχνικές⁴. Γενικά, η μηχανή συμπερασμού του πράκτορα a_{DM} θεωρείται ότι απεικονίζει μια ακολουθία εσωτερικών καταστάσεων i_1, i_2, \dots, i_n του a_{DM} σε μια απόφαση d , ως η συνάρτηση:

$$\text{engine} : \mathbf{I}^* \rightarrow \mathbf{D} \quad (4.10)$$

Ο a_{DM} με βάση τις αποφάσεις του $d \in \mathbf{D}$ εκτελεί τις κατάλληλες ενέργειες $a \in \mathbf{A}$. Ακολουθώντας το γενικό μοντέλο του πράκτορα με κατάσταση, ο πράκτορας a_{DM} λειτουργεί ως εξής:

$$\text{see} : \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{P} \quad (4.11)$$

$$\text{next} : \mathbf{I} \times \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{I} \quad (4.12)$$

$$\text{engine} : \mathbf{I}^* \rightarrow \mathbf{D} \quad (4.13)$$

$$\text{action} : \mathbf{D} \rightarrow \mathbf{A} \quad (4.14)$$

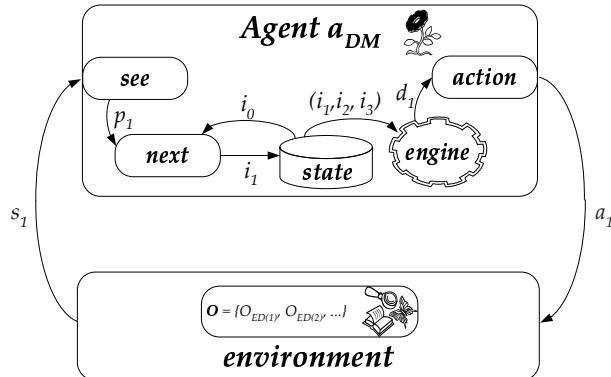
$$\text{όπου } \mathbf{P}, \mathbf{S} \subseteq \mathbf{O}, \quad \mathbf{I} \subseteq \mathcal{P}(\mathbf{O}), \quad \mathbf{D} \subseteq \mathbf{O}, \quad \text{και } \mathbf{A} \subseteq \mathbf{O}^*$$

Έστω ότι ο a_{DM} βρίσκεται στην κατάσταση i_0 και δέχεται το ερεθίσμα s_1 από το περιβάλλον του. Τότε η συνάρτηση *see* σχηματίζει την αντίληψη $p_1 = \text{see}(s_1)$. Μέσω της *next*, ο

⁴Ο καθορισμός της κατάλληλης στρατηγικής εξαρτάται από το πεδίο εφαρμογής, τα διαθέσιμα δεδομένα και τις σχεδιαστικές επιλογές. Σε λεπτομέρεια συζητούνται στην §5.3.3.

a_{DM} αναθεωρεί την εσωτερική του κατάσταση σε $i_1 = next(i_0, p_1)$. Η ακολουθία καταστάσεων (i_1, i_2) προκαλεί την μηχανή *engine* να λάβει την απόφαση $d_1 = engine(i_1, i_2)$. Τέλος, ο πράκτορας a_{DM} , εκτελεί την ενέργεια $a_1 = action(d_1) = action(engine(i_1, i_2))$. Η εσωτερική δομή και η συμπεριφορά ενός πράκτορα-υπεύθυνου λήψης αποφάσεων εικονίζονται στο Σχήμα 4.8.

Με το μοντέλο του πράκτορα a_{DM} προδιαγράφεται ένας πράκτορας με ικανότητα συμπερασμού, ο οποίος αντιλαμβάνεται το εικονικό του περιβάλλον σχηματίζοντας τις αντίστοιχες αντιλήψεις και αναθεωρώντας την εσωτερική του κατάσταση. Με βάση την ακολουθία των εσωτερικών του καταστάσεων, παίρνει αποφάσεις χρησιμοποιώντας τη μηχανή συμπερασμού *engine* και εκτελεί τις αποφάσεις του ως ενέργειες που κοινοποιεί στο περιβάλλον του. Το σύνολο των πρακτόρων-υπεύθυνων λήψης αποφάσεων συμβολίζεται με \mathcal{DM} και συμπεριλαμβάνει όλους τους πράκτορες που ενσωματώνουν την συμπεριφορά του $a_{DM} \in \mathcal{DM}$.



Σχήμα 4.8: Εσωτερική δομή και συμπεριφορά πράκτορα-υπεύθυνου λήψης αποφάσεων

Μοντέλο πρακτόρων-κοινωνικών εικονογράφων

Ένας πράκτορας-κοινωνικός εικονογράφος a_{SI} λειτουργεί ως ένα αφηρημένο εργαλείο μοντελοποίησης που είναι ικανό να αντιλαμβάνεται τα ερεθίσματα του περιβάλλοντός του και να αντιδρά σε αυτά με ανακλαστικό τρόπο. Συγκεκριμένα, ο a_{SI} σχηματίζει μια αντίληψη $p \in \mathbf{P}$ για κάθε κατάσταση του περιβάλλοντος $s \in \mathbf{S}$ που αντιλαμβάνεται. Στη συνέχεια, ανανεώνει την εσωτερική του κατάσταση $i \in \mathbf{I}$ και αντιδρά με την ενέργεια $a \in \mathbf{A}$. Συνολικά, η συμπεριφορά του πράκτορα a_{SI} είναι η ακολουθία των ενεργειών:

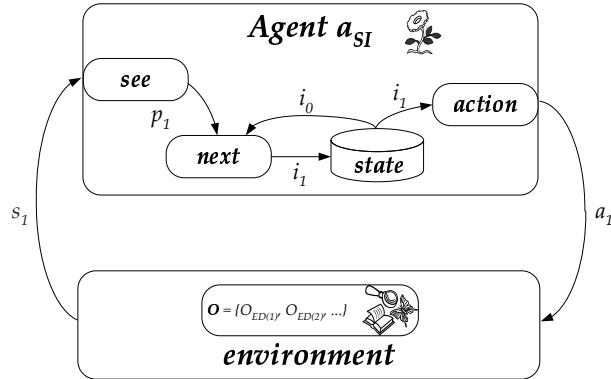
$$see : \mathbf{S} \rightarrow \mathbf{P} \quad (4.15)$$

$$next : \mathbf{I} \times \mathbf{P} \rightarrow \mathbf{I} \quad (4.16)$$

$$action : \mathbf{I} \rightarrow \mathbf{A} \quad (4.17)$$

όπου $\mathbf{P}, \mathbf{S} \subseteq \mathbf{O}$, $\mathbf{I} \subseteq \mathbf{O}^*$, και $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{O}$

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η εσωτερική δομή και συμπεριφορά πράκτορα-κοινωνικού εικονογράφου. Το σύνολο των πρακτόρων a_{SI} συμβολίζεται με \mathcal{ST} .



Σχήμα 4.9: Εσωτερική δομή και συμπεριφορά πράκτορα-κοινωνικού εικονογράφου

4.4.2 Συστήματα πρακτόρων για την ανάπτυξη ΟΣΠΠ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα πλεονεκτήματα χρήση των ΤΑΛΠ αναδεικνύονται σε συστήματα πολλών πρακτόρων, και όχι σε συστήματα ενός πράκτορα. Έτσι περισσότεροι του ενός πράκτορες των παραπάνω τύπων συνδυάζονται για την ανάπτυξη εφαρμογών ΟΣΠΠ. Ένα σύστημα πρακτόρων (*EnvMAS*) στην περιβαλλοντική πληροφορική, θεωρείται ως ένα σύνολο από N τύπους πρακτόρων ag_n που ενσωματώνουν τις συμπεριφορές και υλοποιούν τα πρότυπα των a_{IC} , a_{DM} και a_{SI} . Έτσι, το αφηρημένο μοντέλο ενός συστήματος πρακτόρων είναι:

$$EnvMAS_{model} = \{ag_1, ag_2, ag_3, \dots, ag_n, \dots, ag_N\} \quad (4.18)$$

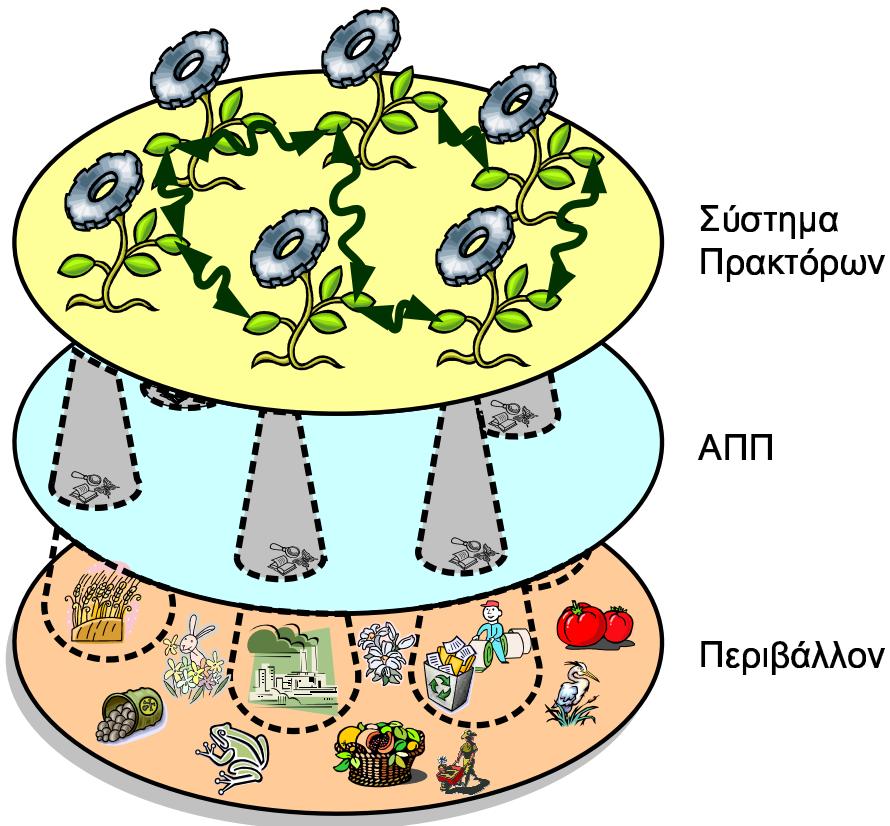
$$ag_n \in \{\mathcal{IC} \cup \mathcal{DM} \cup \mathcal{ST}\}, \quad n = 1 \dots N$$

Κάθε τύπος πράκτορα ag_n μπορεί να έχει περισσότερα από ένα στιγμιότυπα $ag_n(k)$, $k = 1 \dots K_n$. Με K_n συμβολίζεται το πλήθος των στιγμιότυπων του n -οστού πράκτορα. Το ΣΠ για περιβαλλοντικές εφαρμογές είναι:

$$\begin{aligned}
 EnvMAS = & \{ ag_1(1), ag_1(2), \dots ag_1(K_1), \\
 & ag_2(1), ag_2(2), \dots ag_2(K_2), \\
 & \dots, ag_n(1), ag_n(2), \dots, ag_n(K_n), \\
 & \dots, ag_N(1), ag_N(2), \dots, ag_N(K_N) \}
 \end{aligned} \tag{4.19}$$

Συνολικά, το πλήθος των πρακτόρων του *EnvMAS* είναι $\sum_{n=1}^N K_n$.

Η αφηρημένη αρχιτεκτονική ενός ΣΠ για περιβαλλοντικές εφαρμογές εικονίζεται στο Σχήμα 4.10. Το *EnvMAS* αλληλεπιδρά με το φυσικό περιβάλλον μέσω των ΑΠΠ που αντιλαμβάνονται οι ΠΛ, ενώ η επικοινωνία των ΠΛ διασφαλίζει την λειτουργικότητα του συστήματος.



Σχήμα 4.10: Αφηρημένη αρχιτεκτονική ενός ΣΠ για περιβαλλοντικές εφαρμογές

4.4.3 Οδηγός ανάπτυξης ΣΠ σε περιβαλλοντικές εφαρμογές

Η έννοια του πράκτορα λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφοριακή διατρέχει ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός ΣΠΠ. Ο πράκτορας θεωρείται ένα αφηρημένο εργαλείο που

χρησιμοποιείται για την ανάλυση, την σχεδίαση και την προδιαγραφή, και την ανάπτυξη ενός συστήματος. Συγκεκριμένα, οι τρεις τύποι ΠΛ(που ορίστηκαν στην παράγραφο 4.4.1) χρησιμοποιούνται τόσο για την ανάλυση του προβλήματος και την σχεδίαση του μοντέλου, όσο και για την ανάπτυξη του λογισμικού. Η διαδικασία υιοθέτησης των ΤΑΛΠ για την ανάπτυξη περιβαλλοντικού λογισμικού περιγράφεται ακολούθως.

Η διαδικασία ξεκινά με την φάση της **ανάλυσης του προβλήματος**, η οποία προϋποθέτει την μελέτη του προβλήματος και τον σαφή καθορισμό των στόχων του συστήματος. Το δεύτερο βήμα στη φάση αυτή είναι ο καθορισμός των οντοτήτων του Συστήματος. Οι οντότητες αυτές είναι μέρος του προβλήματος και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

α. Τις οντότητες που αποτελούν μέρος του προβλήματος και (συν)διαμορφώνουν το πρόβλημα.

β. Τις οντότητες που αποτελούν μέρος του συστήματος και καθορίζουν το πρόβλημα.

Στην πρώτη κατηγορία συμπεριλαμβάνονται οι δυνάμεις εκείνες που επηρεάζουν τη λειτουργία του συστήματος, αλλά αποτελούν εξωτερικές οντότητες, όπως για παράδειγμα οι τελικοί χρήστες μιας ιστοσελίδας. Οι οντότητες αυτές επηρεάζουν την ανάλυση του συστήματος αλλά δεν αποτελούν μέρος του. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι οντότητες εκείνες που αποτελούν μέρος του συστήματος. Αυτές μπορεί να είναι είτε φυσικά πρόσωπα (π.χ. ο διαχειριστής μιας πλατφόρμας), είτε έννοιες και δυνάμεις του φυσικού περιβάλλοντος (χρόνος, βαρύτητα, ζωντανοί οργανισμοί), είτε το υλικό ή το λογισμικό ενός πληροφοριακού συστήματος (π.χ. μια βάση δεδομένων, ένας αισθητήρας, κ.α.). Η αναγνώριση των οντοτήτων ενός συστήματος ποικίλει κατά περίπτωση, καθώς σχετίζεται με το πεδίο εφαρμογής.

Η φάση της ανάλυσης του Συστήματος καταλήγει με τον πλήρη καθορισμό των οντοτήτων και της συμπεριφοράς τους. Η διαδικασία αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας μεθόδους ανάλυσης απαιτήσεων στις οποίες συμμετέχουν όλα τα εμπλεκόμενα μέρη. Ενδεικτικά, περιλαμβάνονται οι περιβαλλοντικοί επιστήμονες, οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων, οι μηχανικοί λογισμικού, και οι χρήστες της εφαρμογής.

Ακολουθεί η φάση της **σχεδίασης του συστήματος**, η οποία διαρθρώνεται σε τέσσερα βήματα:

1. Ανατίθεται η συμπεριφορά των οντοτήτων σε ΠΛ.
2. Καθορίζεται η γενική αρχιτεκτονική του Συστήματος.
3. Προδιαγράφεται η λειτουργικότητα του Συστήματος.

4. Μοντελοποείται το Σύστημα με ΠΛ.

Αρχικά, οι οντότητες που αποτελούν μέρος του συστήματος αντιστοιχίζονται σε πράκτορες της εργαλειοθήκης. Κριτήριο για την ανάθεση είναι η λειτουργία των οντοτήτων και η συμπεριφορά τους. Έτσι δημιουργείται ένα πρώτο σχέδιο του συστήματος που σηματοποιεί τις απαιτήσεις που προδιαγράφηκαν στη φάση της ανάλυσης.

Στη συνέχεια καθορίζεται η γενική αρχιτεκτονική του συστήματος με έμφαση στη λειτουργικότητα. Με βάση τις επιθυμητές κύριες υπηρεσίες που παρέχει το Σύστημα, οργανώνεται η αρχιτεκτονική του και προδιαγράφονται οι βασικές εργασίες που εκτελούν οι πράκτορες.

Το τρίτο βήμα συνιστά την λειτουργική προδιαγραφή του συστήματος. Για καθένα από τους ΠΛ καθορίζεται σε λεπτομέρεια η λειτουργία του με βάση τους τρεις τύπους ΠΛ της εργαλειοθήκης. Συγκεκριμένα, για τους πράκτορας που συμπεριφέρονται ως φορείς πληροφορίας καθορίζεται η θέση της πληροφορίας, δηλαδή οι μετασχηματισμοί που εκτελεί ο ΠΛ και οι υπηρεσίες που παρέχει. Για τους πράκτορες-υπεύθυνους λήψης αποφάσεων ορίζεται η στρατηγική συμπερασμού που ενσωματώνουν, ενώ, τέλος, για τους πράκτορες κοινωνικούς εικονογράφους καθορίζεται το μοντέλο συντονισμού.

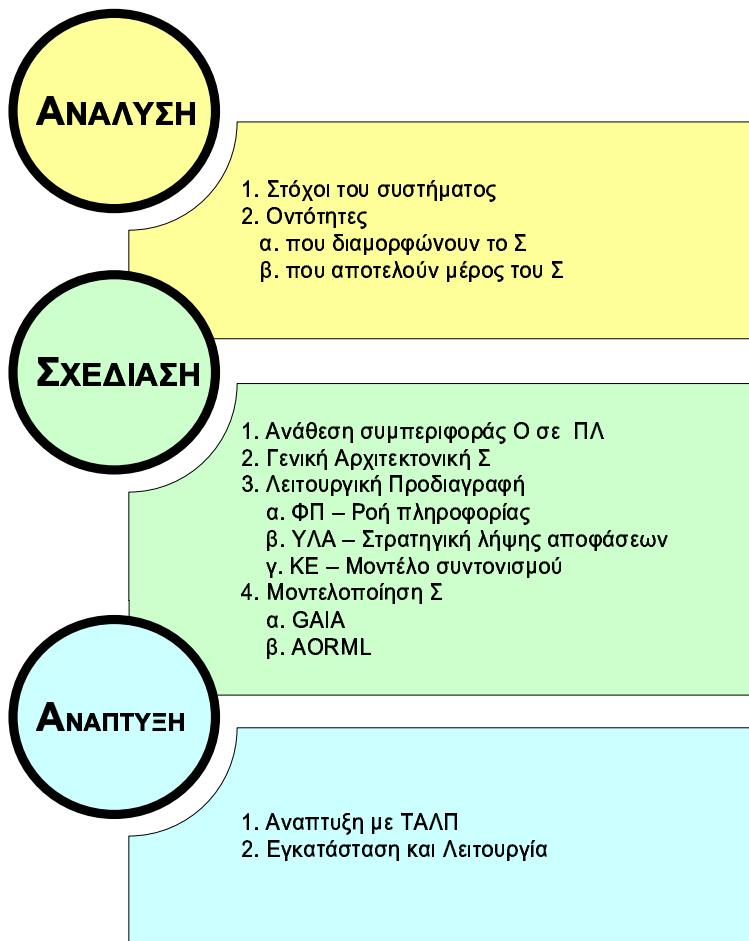
Η φάση της σχεδίασης ολοκληρώνεται με την μοντελοποίηση του συστήματος χρησιμοποιώντας ΠΛ. Τεχνικές μοντελοποίησης με πράκτορες, όπως η GAIA [228, 234] ενδείκνυνται για την μικροσκοπική προδιαγραφή του συστήματος, ενώ η AORML προτείνεται για τον λεπτομερή σχεδιασμό της επικοινωνίας των πρακτόρων [214, 215]. Στο βήμα αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μέθοδοι μοντελοποίησης με πράκτορες, όπως η AUML [156], η iSTAR [232] και η Tropos [74].

Η ανάπτυξη του συστήματος αποτελεί την τρίτη φάση της διαδικασίας. Έχοντας προδιαγράψει με λεπτομέρεια την εσωτερική δομή αλλά και την επικοινωνία των πρακτόρων λογισμικού στην προηγούμενη φάση, στη φάση της ανάπτυξης το σύστημα υλοποιείται ακολουθώντας τις ΤΑΛΠ. Ο μηχανικός λογισμικού έχει στη διάθεσή του διάφορα εργαλεία ανάπτυξης λογισμικού με πράκτορες, όπως το JADE [26, 25] που λειτουργεί σε περιβάλλον Java. Μια εκτενής αναφορά στα διάφορα εργαλεία ΤΑΛΠ έχει γίνει από το δίκτυο αριστείας AgentLink [130].

Τέλος, η φάση της ανάπτυξης ολοκληρώνεται με την εγκατάσταση και λειτουργία του συστήματος, όποτε και αποκαλύπτονται τα τυχόν λάθη υλοποίησης. Μια επαναληπτική διαδικασία εκσφαλμάτωσης είναι απαραίτητη για την τελική έκδοση του Συστήματος.

Η παραπάνω διαδικασία εισαγωγής των ΤΑΛΠ για την ανάπτυξη ΣΠΠ συνοψίζεται

στον οδηγό ανάπτυξης ΣΠ σε περιβαλλοντικές εφαρμογές του Σχήματος 4.11.



Σχήμα 4.11: Οδηγός ανάπτυξης ΣΠ σε περιβαλλοντικές εφαρμογές

Μέρος ΙΙ

**Πράκτορες λογισμικού για τη
διαχείριση περιβαλλοντικής
πληροφορίας & την υποστήριξη
αποφάσεων**

Κεφάλαιο 5

Μια γενικευμένη προσέγγιση με πράκτορες λογισμικού

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια συστηματικότερη παρουσίαση των ΟΣΥΑΔΠ με αναφορά στα προβλήματα από τα οποία υποφέρουν καθώς και στις προκλήσεις τις οποίες καλούνται να αντιμετωπίσουν. Παρουσιάζεται μια μεθοδολογία ανάπτυξης ΣΠΠ με πράκτορες λογισμικού, η οποία υιοθετεί την χρήση αποτελεσματικών εργαλείων από το χώρο των ΤΠΕ σε εφαρμογές περιβαλλοντικού λογισμικού με σκοπό την επίλυση των προβλημάτων των ΟΣΥΑΔΠ.

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία παρουσιάστηκε στο συνέδριο της International Environmental Modeling and Software Society και απέσπασε το βραβείο καλύτερης φοιτητικής ανακοίνωσης [14]. Τμήματα του κεφαλαίου αυτού έχουν δημοσιευθεί στο περιοδικό Environmental Modeling and Software [14].

5.1 Εισαγωγή

5.1.1 Παρατήρηση του περιβάλλοντος

Τα Κέντρα Παρατήρησης και Παρακολούθησης του Περιβάλλοντος ΚΠΠΠ (environmental monitoring and surveillance centers) έχουν εγκατασταθεί σε περιοχές που εμφανίζουν προβλήματα μόδινης ή υποβάθμιας του φυσικού περιβάλλοντος και έχουν σκοπό την παρατήρηση και την καταγραφή των συνθηκών που επικρατούν. Κάνοντας χρήση δικτύων αισθητήρων ή άλλων οργάνων παρακολούθησης, τα ΚΠΠΠ καταγράφουν τεράστιες ποσότητες πρωτογενών δεδομένων. Τα ΣΠΠ Παρακολούθησης και Διαχείρισης Περιβαλλοντικής Πληροφορίας (ΣΠΔΠΠ) καλούνται να ολοκληρώσουν τα δεδομένα που καταγράφονται. Μια τυπική διάταξη ενός ΣΠΔΠΠ αναλαμβάνει τη σύντηξη σε μια κοινή βάση δεδομένων όλων των περιβαλλοντικών μετρήσεων, οι οποίες καταγράφονται από

ένα δίκτυο αισθητήρων σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Η συνήθης πρακτική είναι ότι τα δεδομένα που καταγράφονται από τα ΣΠΔΠΠ προορίζονται κατά κύριο λόγο για τους επιστήμονες του περιβάλλοντος και τις μακροχρόνιες μελέτες τους για την σπουδή των φυσικών φαινομένων.

Ωστόσο, ως συνέπεια του διαρκώς αυξανόμενου ενδιαφέροντος της κοινωνίας για το περιβάλλον και την αειφόρο ανάπτυξη, ανέκυψε η ανάγκη για την ενημέρωση του κοινού και την δημόσια διάθεση της περιβαλλοντικής πληροφορίας. Το ευρύ κοινό, οι μη κυβερνητικές οργανώσεις, η βιομηχανία, η τοπική αυτοδιοίκηση και η κεντρική κυβέρνηση επιζητούν την πρόσβαση σε δεδομένα περιβαλλοντικής πληροφορίας. Η πρόκληση που καλούνται να αναλάβουν τα ΣΠΔΠΠ είναι να ανταποκριθούν στις αυξημένες ανάγκες των "νέων χρηστών" τους και να ενσωματώσουν προηγμένες υπηρεσίες υποστήριξης αποφάσεων, σχηματίζοντας Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Διαχείρισης Πληροφορίας (ΟΣΥΑΔΠ). Είναι κοινά παραδεκτό ότι οι διάφοροι φορείς (stakeholders) που εμπλέκονται στα περιβαλλοντικά προβλήματα έχουν συνήθως διαφορετικές ερμηνείες των περιβαλλοντικών αξιών, πράγμα που διαφοροποιεί τις απαιτήσεις τους σε δεδομένα. Παρότι όμως έχουν μεταξύ τους διαφορετικές ανάγκες, όλοι οι χρήστες συμφωνούν σε μια ελάχιστη απαίτηση: *την πρόσβαση στα περιβαλλοντικά δεδομένα έγκαιρα και αξιόπιστα*. Η αναγνώριση, άλλωστε, των περιβαλλοντικών επεισοδίων εν τη γενέση τους επηρεάζει την έγκαιρη απόκριση όλων των εμπλεκομένων μερών και την αποτελεσματικότητα των μέτρων προφύλαξης (Prevention measures).

Στην υπόλοιπη έκταση του κεφαλαίου γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική αναφορά στα ΣΠΔΠΠ και τα ΟΣΥΑΔΠ και αναλύεται μια μέθοδος εφαρμογής της τεχνολογίας των πρακτόρων λογισμικού για την ανάπτυξη τέτοιου είδους εφαρμογών, που βασίζεται στους γενικούς τύπους της εργαλειοθήκης.

5.2 Παρακολούθηση και Διαχείριση Περιβαλλοντικής Πληροφορίας

5.2.1 Τα ΣΠΔΠΠ και τα ΟΣΥΑΔΠ

Τα ΣΠΔΠΠ θεωρούνται πληροφοριακά συστήματα τα οποία έχουν ως κύριο στόχο την ενοποίηση περιβαλλοντικών δεδομένων από κατανεμημένες τοποθεσίες. Αν αναλογιστεί κανείς τις ανάγκες για περιβαλλοντική πληροφόρηση διαφόρων φορέων, όπως το κράτος, η βιομηχανία και η κοινωνία, αποτελεί πρόκληση η ανάπτυξη ΟΣΥΑΔΠ, τα οποία να παρέχουν σύγχρονες υπηρεσίες πληροφόρησης. Υπό την έννοια αυτή, ο στόχος των ΟΣΥΑΔΠ δεν περιορίζεται στην ολοκλήρωση ακατέργαστων μετρήσεων, αλλά βαθμιαία

επεκτείνεται στην σύντηξη δεδομένων (Data fusion) και την διάχυση γνώσης (Knowledge diffusion). Θα μπορούσαμε λοιπόν να πούμε ότι τα ΟΣΥΑΔΠ απαιτείται να επεκτείνουν τις υπηρεσίες τους από απλές υπηρεσίες ολοκλήρωσης, σε υπηρεσίες αποτίμησης και προειδοποίησης.

Σε μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των ΟΣΥΑΔΠ επιχειρήθηκε η διάκρισή τους με βάση το γενικό τους σκοπό. Καθότι τα διάφορα αναπτυγμένα ΟΣΥΑΔΠ καλούνται να ικανοποιήσουν ανόμοιες ανάγκες, ο γενικός τους σκοπός μπορεί να διακριθεί στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- a. **Συστήματα ανάλυσης μη πραγματικού χρόνου** (Off-line analysis systems ή Near-real time reporting systems). Τέτοια συστήματα είναι υπεύθυνα για συστηματική καταγραφή ιστορικών περιβαλλοντικών δεδομένων, την ολοκλήρωσή και την διάθεσή τους με απότερο σκοπό την εις βάθος επιστημονική ανάλυση των εμπλεκόμενων φαινομένων.
- β. **Συστήματα αναφοράς (σχεδόν) πραγματικού χρόνου** (Real-time reporting systems). Τα συστήματα αυτά αναγνωρίζουν και αναφέρουν τις συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον σε συνθήκες πίεσης χρόνου¹, ενώ ικανοποιούν την ανάγκη για δημόσια περιβαλλοντική επαγρύπνηση. Επίσης, είναι απαραίτητα για την αναγνώριση επεισοδίων και τη λήψη μέτρων προφύλαξης (Prevention measures).
- γ. **Συστήματα Πρόβλεψης** (Forecasting Systems). Στην περίπτωση αυτή, ο σκοπός είναι η πρόβλεψη των μελλοντικών συνθηκών του περιβάλλοντος. Η ανάγκη για πρόβλεψη και προειδοποίηση για ενδεχόμενα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι προϋπόθεση για την λήψη προληπτικών μέτρων (Precaution measures²) και την διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος.

Πολλά ΣΠΠ έχουν αναπτυχθεί ανά τον κόσμο για να πραγματώσουν έναν ή περισσότερους από τους παραπάνω στόχους. Η εξέλιξη των ΣΠΔΠΠ ξεκίνησε με τα συστήματα

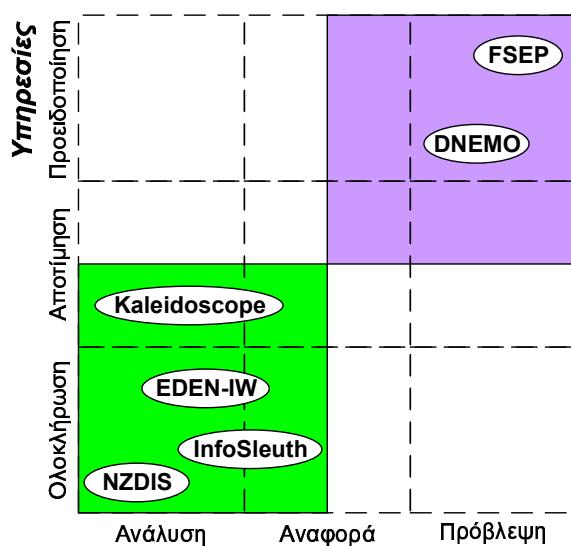
¹Ο όρος συνθήκες πίεσης χρόνου δίνει έμφαση στο ότι τα συστήματα σέβονται χρονικές προθεσμίες.

²Η σχετική Ευρωπαϊκή πρακτική διαχωρίζει τις έννοιες "προφύλαξη" και "πρόληψη" [83]. Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος (www.eea.eu.int) ορίζει ως μέτρο προφύλαξης μια ενέργεια που στοχεύει την μείωση γνωστού κινδύνου, δηλαδή ενός γεγονότος που με βεβαιότητα θα συμβεί στο μέλλον. Από την άλλη, ως μέτρο πρόληψης θεωρείται μια ενέργεια που λαμβάνεται για να αναγνωριστούν και να μειωθούν οι επιπτώσεις ενός ενδεχόμενου που ίσως συμβεί στο μέλλον. Η προφύλαξη αφορά ενδεχόμενα με άγνωστες επιπτώσεις, τα οποία με μη βέβαιη πιθανότητα μπορεί να συμβούν στο μέλλον. Η αρχή της πρόληψης (precautionary principle) υιοθετήθηκε από το UN Conference on the Environment and Development (1992) με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος. Η προληπτική προσέγγιση πρέπει να εφαρμοστεί ευρέως, όπου υπάρχουν απειλές για σοβαρή ή μη αναστρέψιμη βλάβη του φυσικού περιβάλλοντος, ακόμη και στις περιπτώσεις που υπάρχουν αμφιβολίες στην επιστημονική κοινότητα. Η πλήρης επιστημονική τεκμηρίωση και απόδειξη της υποβάθμισης του περιβάλλοντος δεν μπορεί να χορηγηθεί σε αυτόν.

ανάλυσης μη πραγματικού χρόνου, τα οποία συγκέντρωναν πληροφορίες για να χρησιμοποιηθούν για την πειραματική απόδειξη οικολογικών θεωριών. Στην συνέχεια προέκυψαν τα συστήματα πρόβλεψης στη δεκαετία του 1970, ως μια ανταπόκριση στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος (π.χ. τα συστήματα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου). Τα τελευταία χρόνια, και ύστερα από το διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον των πολιτών για το περιβάλλον, θεσμοθετήθηκε νομικά τόσο στην Ευρώπη όσο και την Αμερική η ανάγκη για κοινοποίηση των περιβαλλοντικών συνθηκών σε πραγματικό χρόνο [161]. Η US Clean Air Act το 1990 και η Ευρωπαϊκή Οδηγία 92/72/ΕΕC το 1992 ήταν από τις πρώτες προς την κατεύθυνση αυτή και υπήρξαν η αφορμή για την δημιουργία των συστημάτων αναγνώρισης και κοινοποίησης σε συνθήκες πίεσης χρόνου.

5.2.2 Τα ΟΣΥΑΔΠ και οι ΠΛ

Τα χαρακτηριστικά των ΠΛ και των ΣΠ ταιριάζουν απόλυτα με τις απαιτήσεις για την επεξεργασία πληροφορίας και την κατανεμημένη επίλυση προβλημάτων, λειτουργίες που είναι επιθυμητές από τα ΣΠΔΠΠ. Για το λόγο αυτό, αρκετές εφαρμογές ΠΛ έχουν αναπτυχθεί σε μια προσπάθεια βελτίωσης της απόδοσης των ΣΠΠ. Σε διάφορα έργα έχουν αναπτυχθεί ΣΠ για την εκπλήρωση των στόχων των ΣΠΔΠΠ και την παροχή υπηρεσιών ολοκλήρωσης, αποτίμησης και προειδοποίησης. Σε μια σχηματική αναπαράσταση (Σχήμα 5.1), οι στόχοι και οι υπηρεσίες των ΟΣΥΑΔΠ θεωρούνται ως οι δύο άξονες για την ολοκληρωμένη κατηγοριοποίηση των ΣΠ που έχουν αναπτυχθεί.



Στόχοι

Σχήμα 5.1: Κατηγοριοποίηση των ΣΠΔ-Αναγνώρισης με πράκτορες

Η εικόνα του Σχήματος 5.1 μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ανάπτυξη ΣΠΔΠΠ με

πράκτορες επικεντρώνεται σε δύο βασικές κατευθύνσεις. Η πρώτη κατηγορία αφορά την “διαφανή” ολοκλήρωση περιβαλλοντικών δεδομένων. Τέτοια συστήματα είναι το InfoSleuth [167], το EDEN-IW [54], το NZDIS [169] και το Kaleidoscope [140], τα οποία παρουσιάστηκαν στην §4.2. Μια κοινή πρακτική που ακολουθήθηκε από όλα τα συστήματα αυτά είναι η χρήση των πρακτόρων λογισμικού για την επεξεργασία και διαχείριση πληροφορίας.

Στη δεύτερη κατεύθυνση κατατάσσονται συστήματα προειδοποίησης, τα οποία εκμεταλλεύονται τις ικανότητες των πρακτόρων για κατανεμημένη λήψη αποφάσεων, και συγκεκριμένα για την παροχή υπηρεσιών πρόβλεψης. Τέτοια συστήματα είναι το FSEP [41] και το DNEMO [104], τα οποία αξιοποιούν τα ευφυή χαρακτηριστικά των πρακτόρων για την πρόβλεψη περιβαλλοντικών κινδύνων. Η ευφυία των πρακτόρων υλοποιείται με την χρήση μηχανών περιπτωσιολογικού συμπερασμού, δένδρων παλινδρόμησης και τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Όλα τα ανωτέρω συστήματα υιοθέτησαν την τεχνολογία των πρακτόρων λογισμικού, ακολουθώντας, είτε όπως στην πρώτη περίπτωση τη σχολή προγραμματισμού με πράκτορες, είτε όπως στη δεύτερη την σχολή της τεχνητής νοημοσύνης. Αυτό το συμπέρασμα αφορά όχι μόνο τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη των εφαρμογών, αλλά κυρίως τον τρόπο προσέγγισης των εφαρμογών, τους στόχους και τις υπηρεσίες που παρέχουν. Σε συγχετισμό με την εργαλειοθήκη ΤΑΛΠ για την ανάπτυξη εφαρμογών περιβαλλοντικού λογισμικού που παρουσιάστηκε στην §4.3.2, η πρώτη κατηγορία ενσωματώνει πράκτορες-φορείς πληροφορίας, ενώ η δεύτερη πράκτορες-υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Η χρήση της τεχνολογίας των ΠΛ φάνηκε από τις εφαρμογές αυτές ότι είναι ικανή τόσο για την σύντηξη δεδομένων, όσο και για την παροχή υπηρεσιών πρόβλεψης. Ωστόσο, διαφαίνεται ένα κενό ανάμεσα στις δύο αυτές κατηγορίες εφαρμογών, η οποία αφορά τα ΟΣΥΑΔΠ, που στοχεύουν στην αναφορά των περιβαλλοντικών συνθηκών σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και υποστηρίζουν υπηρεσίες αποτίμησης. Η συγκεκριμένη κατηγορία συστημάτων και η εφαρμογή των ΠΛ για την ανάπτυξή τους αποτελούν αντικείμενο μελέτης του κεφαλαίου.

5.2.3 Ορισμός του προβλήματος

Η πρόκληση για τα σύγχρονα ΟΣΥΑΔΠ, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.1, είναι η ικανοποίηση των αναγκών της διοίκησης, της βιομηχανίας και του κοινού για την πρόσβαση σε δεδομένα περιβαλλοντικής πληροφορίας *έγκαιρο* και *αξιόπιστο* τρόπο. Οι ειδικοί επιστήμονες πρέπει να έχουν στη διάθεσή τους ικανοποιητική υποστήριξη δεδομένων στις

προσπάθειές τους να αποτιμήσουν την ποιότητα του περιβάλλοντος έγκαιρα, και να εισηγηθούν τα απαραίτητα μέτρα πρόληψης αξιόπιστα. Ο περιορισμός του σχεδόν πραγματικού χρόνου αποκαλύπτει κρίσιμα προβλήματα για τις συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως η χαμηλής ποιότητας ή η απουσία δεδομένων και οι χρονικά εξελισσόμενες συνθήκες. Τα προβλήματα αυτά παρότι είναι αβλαβή για τα συστήματα ανάλυσης μη-πραγματικού χρόνου και για τα συστήματα πρόγνωσης, μπορούν να αποδειχθούν κρίσιμα για τα συστήματα σχεδόν πραγματικού χρόνου.

Συγκεκριμένα, το κύριο αντικείμενο ενός ΟΣΥΑΔΠ είναι να παρέχει ηλεκτρονικές υπηρεσίες πληροφόρησης, με κέντρο τον πολίτη. Οι υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνουν κατά περίπτωση:

- α. Ανάκτηση πληροφορίας από κατανεμημένες τοποθεσίες,
- β. Σύντηξη πληροφοριών και προεπεξεργασία δεδομένων.
- γ. Επικύρωση δεδομένων και απόσπαση μετα-πληροφοριών
- δ. Αποθήκευση και οργάνωση δεδομένων
- ε. Αποτίμηση της ποιότητας του περιβάλλοντος, και

στ. Στοχευμένες υπηρεσίες προειδοποίησης μέσω του διαδικτύου.

Το πρόβλημα, λοιπόν, που καλούνται να επιλύσουν τα ΟΣΥΑΔΠ συνοψίζεται ως εξής: Έστω ένα δίκτυο αισθητήρων που παρακολουθεί τις περιβαλλοντικές συνθήκες σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Ένα ΣΠΠ εγκαθίσταται επί του δικτύου, συλλαμβάνει τις μετρούμενες τιμές, αποτιμά την ποιότητα του περιβάλλοντος και αποδίδει την προεπεξεργασμένη πληροφορία στους τελικούς αποδέκτες (π.χ. μέσω του διαδικτύου).

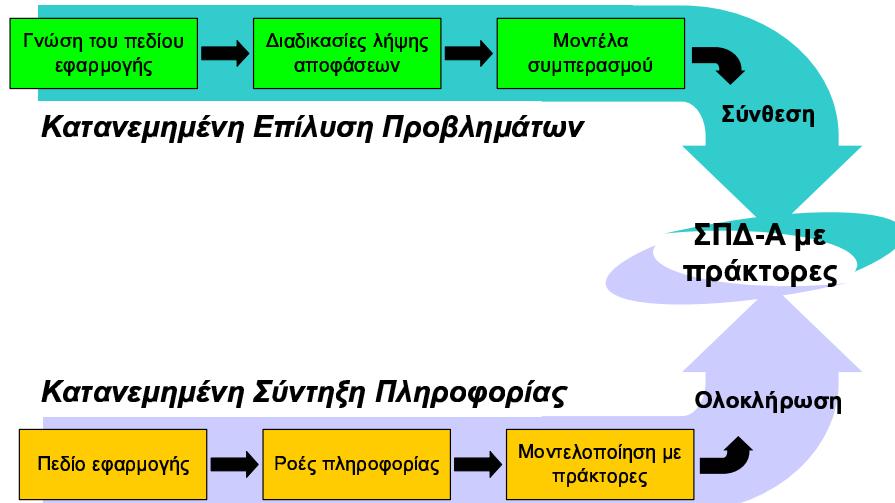
Οι κύριες δραστηριότητες που καλείται να κάνει ένα ΟΣΥΑΔΠ επιβάλλουν απαιτήσεις που σχετίζονται με την ικανότητα του συστήματος τόσο για σύντηξη κατανεμημένων πληροφοριών, όσο και για κατανεμημένη επίλυση προβλημάτων. Άλλες ερευνητικές προσπάθειες (που συζητήθηκαν στην παρ. 5.2.2) έχουν προτείνει και εφαρμόσει ΣΠ, είτε για την σύντηξη κατανεμημένων πληροφοριών, είτε για κατανεμημένη επίλυση προβλημάτων. Υπό το πρόσμα των σύγχρονων αναγκών στον συγκεκριμένο τομέα εφαρμογής είναι απαραίτητα ΣΠ τα οποία θα συνδυάζουν τις δύο βασικές ιδιότητες των ΠΛ. Για το λόγο αυτό, προτείνουμε μια μεθοδολογία ανάπτυξης ΟΣΥΑΔΠ με πράκτορες λογισμικού που συνδυάζει τους πράκτορες-φορείς πληροφορίας και τους πράκτορες-υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.

5.3 Μεθοδολογία

5.3.1 Γενική περιγραφή

Προάγοντας την μέχρι σήμερα προσέγγιση των ερευνητικών προσπαθειών για την ανάπτυξη ΣΠΠ με την χρήση ΠΛ, προτείνουμε μια μεθοδολογία ανάπτυξης ΟΣΥΑΔΠ ως Συστήματα Πρακτόρων. Στόχος της προσέγγισής είναι η ανάθεση όλων των εργασιών που εμπλέκονται στην λειτουργία ενός ΟΣΥΑΔΠ σε μια κοινότητα ΠΛ. Στην προσέγγιση αυτή, οι ΠΛ θεωρούνται τόσο ως **φορείς πληροφορίας**, όσο και **υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων**.

Οι πράκτορες ως φορείς πληροφορίας λειτουργούν ως μια κατανεμημένη κοινότητα μονάδων επεξεργασίας πληροφορίας, που είναι ικανή να συλλέγει, να διαχειρίζεται και να κοινοποιεί δεδομένα με αποτελεσματικό τρόπο. Οι πράκτορες ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων, συμπεριφέρονται ως ένα δίκτυο από αυτόνομους λύτες επιμέρους προβλημάτων, οι οποίοι συνεργάζονται μεταξύ τους, ώστε να επιτύχουν λύση σε ένα γενικότερο, πιο σύνθετο, πρόβλημα. Η ολοκληρωμένη μεθοδολογία που προτείνεται, καθορίζει ένα οδηγό ανάπτυξης συστημάτων πρακτόρων, που λειτουργούν και με τις δύο ιδιότητες. Μια γενική άψη της μεθόδου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.2: Μια αφηρημένη άψη της μεθοδολογίας

Το σημείο εκκίνησης είναι η αναγνώριση του πεδίου εφαρμογής και των ικανών πόρων που ενυπάρχουν σε αυτό. Η κατανόηση του πεδίου εφαρμογής σε βάθος επηρεάζει την προδιαγραφή της ροής πληροφορίας και της γνώσης του υποβάθρου της εφαρμογής. Δίνεται έμφαση στους δύο όρους, γιατί αφενός οι ροές της πληροφορίας υπαγορεύουν το

πώς οι ΠΛ διαχειρίζονται την πληροφορία, και αφετέρου η διαδικασία λήψης αποφάσεων που ενσωματώνουν οι πράκτορες, προσδιορίζεται με βάση την γνώση του πεδίου εφαρμογής. Οι ροές πληροφορίας υλοποιούνται μέσω της επικοινωνίας μεταξύ πρακτόρων, ενώ οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων πρέπει να μετασχηματιστούν σε μοντέλα συλλογισμού των πρακτόρων.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2, η μεθοδολογία αποτελείται από δύο κλάδους. Στον πρώτο κλάδο, με βάση το πεδίο εφαρμογής (Application domain) αναγνωρίζονται οι ροές πληροφορίας (Information flow), οι οποίες και μοντελοποιούνται με συμεριφορές ΠΛ. Με τον τρόπο αυτό σχεδιάζεται ένα ΣΠ για την κατανεμημένη σύντηξη της πληροφορίας. Ο δεύτερος κλάδος ξεκινά από την γνώση του πεδίου εφαρμογής, από την οποία εξάγονται οι στρατηγικές λήψης αποφάσεων. Οι συγκεκριμένες στρατηγικές, μετασχηματίζονται στη συνέχεια σε μοντέλα συλλογισμού πρακτόρων και με τον τρόπο αυτό υλοποιείται μια κατανεμημένη προσέγγιση επίλυσης προβλημάτων. Τέλος, ακολουθεί η ολοκλήρωση των μοντέλων πρακτόρων και η σύνθεση των μοντέλων συλλογισμού των πρακτόρων σε ένα ΣΠ που λειτουργεί ως ΟΣΥΑΔΠ.

5.3.2 Οι πράκτορες ως φορείς πληροφορίας

Η μοντελοποίηση των ΠΛ, ως φορέων πληροφορίας, γίνεται σε τέσσερα βήματα, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1

Το προϊόν της διαδικασίας αυτής υλοποιείται στις προδιαγραφές μιας αρχιτεκτονικής ενός ΣΠ (*EnvMAS*) στην μορφή της εξίσωσης:

$$EnvMAS = \langle A, O, I, D \rangle \quad (5.1)$$

όπου:

- $A = \{A_1, \dots, A_n\}$, όπου $A_i \in \mathcal{IC}$ είναι ένα αριθμήσιμο σύνολο πρακτόρων λογισμικού, κάθε ένας από τους οποίους ορίζεται είτε να εισάγει, είτε να διαχειρίζεται, είτε να εξάγει πληροφορία.
- Ο είναι η οντολογία του πεδίου εφαρμογής (Domain ontology), η οποία καθορίζει ένα κοινό λεξιλόγιο για την αναπαράσταση των εννοιών του συστήματος.
- $I = \{I_k = (A_i, A_j) / A_i, A_j \in A\}$, είναι το σύνολο των αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στους πράκτορες. Οι αλληλεπιδράσεις αντιστοιχούν στην επικοινωνία των πρακτόρων και συνοδεύουν τις σχέσεις οργάνωσης του συστήματος. Η επικοινωνία των

Πίνακας 5.1: Διαδικασία μοντελοποίησης ΠΛ-Φορέων πληροφορίας

Βήμα 1. Αναγνώριση των εισόδων και των εξόδων του συστήματος.

Μελετούνται οι διεπαφές του συστήματος με το δίκτυο αισθητήρων και τις ηλεκτρονικές υπηρεσίες τελικού χρήστη. Ανατίθενται σε πράκτορες λογισμικού να πραγματοποιήσουν τις αντίστοιχες διεπαφές και να λειτουργούν είτε ως πηγές δεδομένων, είτε ως συλλέκτες δεδομένων.

Βήμα 2. Σχηματοποίηση των διαύλων πληροφορίας

Καθορίζεται με λεπτομέρεια η ροή πληροφορίας μέσα στο σύστημα. Προδιαγράφονται οι μετασχηματισμοί δεδομένων που τυχόν εμπλέκονται στο σύστημα. Οι εργασίες αυτές ανατίθενται σε πράκτορες - φορείς πληροφορίας.

Βήμα 3. Καθορισμός της επικοινωνίας μεταξύ πρακτόρων

Με βάση τα Βήματα 1 και 2, προδιαγράφονται οι επικοινωνίες μεταξύ πρακτόρων για την ομαλή διασπορά της πληροφορίας. Καθορίζεται η σημασιολογία της επικοινωνίας με τη χρήση οντολογιών

Βήμα 4. Ορίζονται οι διορίες παραδοσης των μηνυμάτων

Με σκοπό την διασφάλιση της έγκαιρης διανομή της πληροφορίας, ορίζονται συγκεκριμένες διορίες παραδοσης των μηνυμάτων των πρακτόρων. Σχετικά ορίζονται και οι στρατηγικές εξόδου σε περιπτώσεις καθυστέρησης ή σφάλματος.

πρακτόρων επιτρέπει τον ορισμό ενός μοντέλου κοινωνικής δράσης και συνεργασίας ανάμεσα στους πράκτορες που καθορίζει την ροή της πληροφορίας μέσα στο σύστημα.

- $D = \{D_k, \forall I_k \in I\}$, είναι το σύνολο των διοριών παραδοσης που αντιστοιχίζονται στην κάθεμια επικοινωνία αναμεσα στους πράκτορες λογισμικού.

Η μέθοδος μοντελοποίησης και οι προδιαγραφές που προκύπτουν, διατυπώνονται στην μορφή της εξίσωσης 5.1, και καθορίζουν σε λεπτομέρεια την αρχιτεκτονική και την λειτουργία ενός ΣΠ, από την οπτική γωνία της σύντηξης πληροφορίας. Μεθοδολογίες αιχμής για την μοντελοποίηση ΣΠ, όπως η GAIA [228], η AUML[156], η AORML[215] ή η iSTAR [232] μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό ρόλων, τύπων πρωτοκόλλων και αλληλεπιδράσεων πρακτόρων.

Με την μέθοδο που παρουσιάστηκε, επιθυμητές ιδιότητες των ΣΠΠ, όπως η ανακτηση πληροφορίας και η προεπεξεργασία, αποθήκευση και οργάνωση περιβαλλοντικών δεδομένων οργανώνονται με συστηματικό τρόπο και ανατίθενται σε πράκτορες για να τις φέρουν εις πέρας. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να διασφαλιστεί η έγκαιρη και έγκυρη παροχή υπηρεσιών πληροφόρησης.

5.3.3 Οι πράκτορες ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων

Οι πράκτορες ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων αναλαμβάνουν τις ικανότητες συλλογιστικής του ΣΠ. Ενδεικτικά, ένα ΟΣΥΑΔΠ περιλαμβάνει διαδικασίες λήψης αποφάσεων, είτε για την παροχή υπηρεσιών αποτίμησης του περιβάλλοντος, είτε για την αντιμετώπιση προβλημάτων αβεβαιότητας δεδομένων. Με βάση τη γνώση του πεδίου εφαρμογής, οι στρατηγικές λήψης αποφάσεων των πρακτόρων μπορούν να καθοριστούν με βάση την μέθοδο που συνοψίζεται στον Πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2: Διαδικασία μοντελοποίησης ΠΛ-Υπεύθυνων Λήψης Αποφάσεων

Βήμα 1. Ορισμός και ανάλυση του προβλήματος.

Μελέτη του συνολικού προβλήματος και ανάλυσή του σε σαφή υπο-προβλήματα.

Βήμα 2. Δημιουργία των κόμβων απόφασης.

Ανατίθεται σε συγκεκριμένους πράκτορες να είναι υπεύθυνοι για την λύση του κάθε υπο-προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη τους διαθέσιμους πόρους που υπαγορεύει η αρχιτεκτονική του συστήματος. Οι πράκτορες αυτοί λειτουργούν ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων.

Βήμα 3. Προδιαγραφή των στρατηγικών λήψης αποφάσεων.

Για κάθε υπο-πρόβλημα εξασφαλίζεται μια στρατηγική επίλυσή του, που να εκμεταλλεύεται τους διαθέσιμους πόρους. Να σημειωθεί ότι για ένα ΟΣΥΑΔΠ ο σκοπός είναι να βρεθεί η βέλτιστη λύση στον διαθέσιμο χρόνο.

Βήμα 4. Υλοποίηση των μοντέλων συλλογισμού.

Υλοποιούνται οι στρατηγικές λήψης αποφάσεων που σχεδιάστηκαν στο Βήμα 3 ως μοντέλα συμπερασμού των αντιστοίχων πρακτόρων. Κατόπιν, τα μοντέλα αυτά θα ενσωματωθούν στους πράκτορες ως μηχανές συλλογισμού (reasoning engines).

Η παραπάνω διαδικασία εξαρτάται σε υψηλό βαθμό από το πεδίο εφαρμογής. Η εύρεση της βέλτιστης στρατηγικής λήψης αποφάσεων είναι ένα δύσκολο έργο, ιδίως όταν ο χρόνος εκτέλεσης είναι μια παράμετρος της λύσης. Ωστόσο, τρεις ξεχωριστές περιπτώσεις μπορούν να διακριθούν, οι οποίες καλύπτουν την πλειοψηφία των εφαρμογών:

Περίπτωση 1 Αιτιοκρατικές στρατηγικές

Οι αιτιοκρατικές στρατηγικές εφαρμόζονται όταν στο πεδίο εφαρμογής υπάρχουν διαθέσιμοι ακριβείς, προκαθορισμένοι κανόνες για την λήψη αποφάσεων. Τέτοιοι κανόνες μπορεί να περιγράφουν φυσικούς νόμους, λογικούς κανόνες ή φυσικούς περιορισμούς. Στις περιπτώσεις αυτές, οι κανόνες μπορούν να ενσωματωθούν στους

πράκτορες λογισμικού με την μορφή στατικών, έμπιστων, εξηγήσιμων expert συστημάτων.

Περίπτωση 2 Στρατηγικές Εξόρυξης Γνώσης.

Όταν ιστορικά δεδομένα είναι διαθέσιμα, η εφαρμογή αλγορίθμων τεχνικής μάθησης για την εξόρυξης γνώσης μπορεί να αποφέρει ενδιαφέροντα μοντέλα γνώσης. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συλλογιστική των πρακτών με ένα δυναμικό, επαγγελματικό τρόπο. Στα ΣΠΠ μεγάλες ποσότητες δεδομένων καταγράφονται συνεχώς. Στις περιπτώσεις που οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τα φαινόμενα είτε είναι πολύ πολύπλοκοι, είτε δεν υπάρχουν, μοντέλα απόφασης βασισμένα στα δεδομένα, όπως δένδρα αποφάσεων, περιπτωσιολογικός συμπερασμός, ή τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να χρησιμοποιηθούν, παρέχοντας μια εναλλακτική λύση για την ανάπτυξη του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, η διαδικασία αφορά την δημιουργία μοντέλων συμπερασμού από ιστορικά δεδομένα, τα οποία στην συνέχεια ενσωματώνονται στους ΠΛ.

Περίπτωση 3 Ευριστικές στρατηγικές.

Όταν καμία από τις παραπάνω δύο περιπτώσεις δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί, ευριστικά μοντέλα απόφασης ή εμπειρικοί κανόνες μπορούν να ενσωματωθούν στους ΠΛ.

Ακολουθώντας τα βήματα του Πίνακα 5.2 και έχοντας αναγνωρίσει τις κατάλληλες στρατηγικές λήψης αποφάσεων ανάμεσα στις τρεις περιπτώσεις, η διαδικασία υποστηριζεί των αποφάσεων ενός ΟΣΥΑΔΠ μπορεί να επιτευχθεί μέσω ΠΛ. Συγκεκριμένα, ενσωματώνουμε τις αντίστοιχες μηχανές συμπερασμού *RE* στους πράκτορες $A_i \in \mathcal{D}\mathcal{M}$.

Η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε εδώ εφοδιάζει τον μηχανικό λογισμικού με έναν ενοποιημένο οδηγό ανάπτυξης ΟΣΥΑΔΠ ως ΣΠ. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα κατανεμημένο σύστημα διαχείρισης και διάχυσης περιβαλλοντικής πληροφορίας, που αναπτύχθηκε ως ΣΠ.

5.4 Ένα κατανεμημένο σύστημα διαχείρισης και διάχυσης περιβαλλοντικής πληροφορίας

5.4.1 Στόχοι του συστήματος

Ως επιδεικτική εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας, αναπτύξαμε το AISLE (Adaptive Intelligent Support Layer for Environmental data), ένα προσαρμόσιμο ευφυές σύστημα

παροχής υποστηρικτικών υπηρεσιών διαχείρισης και διάχυσης περιβαλλοντικής πληροφορίας. Το AISLE διαμεσολαβεί ανάμεσα στα δίκτυα παρακολούθησης του περιβάλλοντος και τους τελικούς χρήστες των δεδομένων που παράγουν τα πρώτα, έχοντας δύο αντικειμενικούς σκοπούς:

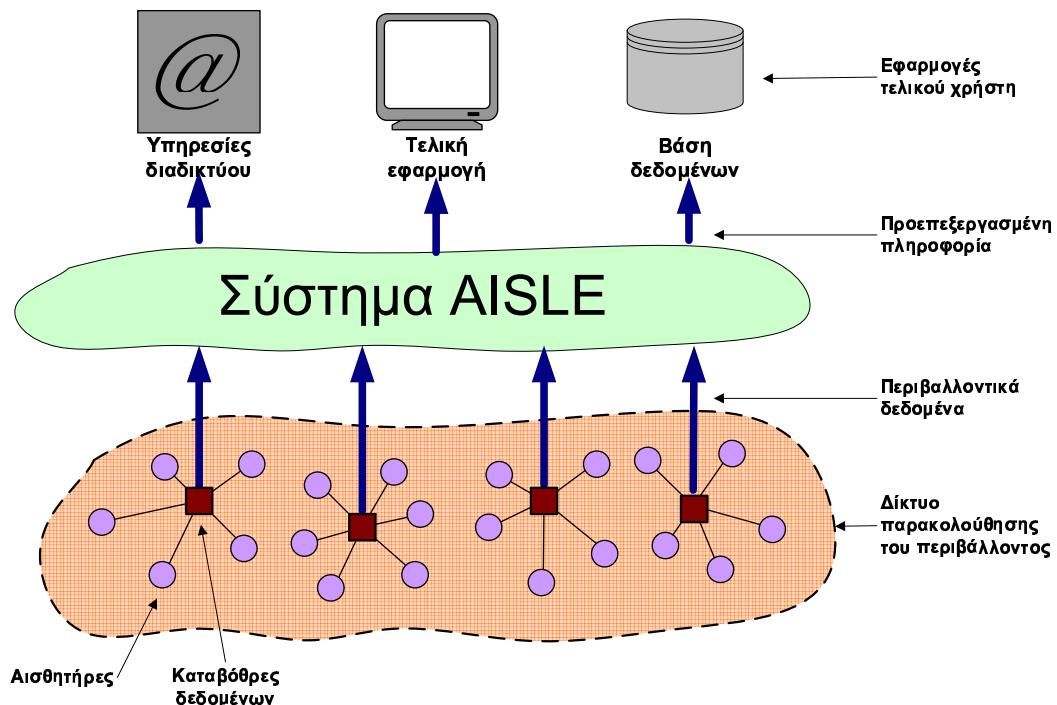
- A. Να επεκτείνει τις ικανότητες των δικτύων παρακολούθησης του περιβάλλοντος, αναγνωρίζοντας και πιθανώς αντιμετωπίζοντας κοινά προβλήματα που τείνουν να υποβαθμίζουν την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Συνήθη είναι περιστατικά, όπως η κακή λειτουργία ή η βλάβη των αισθητήρων, ο θόρυβος ή η πόλωση των δεδομένων, τα οποία οδηγούν σε μειωμένη αξιοπιστία της παρεχόμενης πληροφορίας. Στο επίπεδο αυτό, στόχος του AISLE είναι να συνεισφέρει στη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ευστάθειας των δικτύων παρακολούθησης του περιβάλλοντος.
- B. Να παρέχει την κατάλληλη υποδομή στα δίκτυα παρακολούθησης του περιβάλλοντος να ενσωματώσουν προηγμένες υπηρεσίες, που περιλαμβάνουν την προεπεξεργασία και διαχείριση δεδομένων, υπηρεσίες υποστήριξης αποφάσεων και διάχυσης της πληροφορίας σε πολλούς παραλήπτες.

Για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του AISLE ακολουθήσαμε την ολοκληρωμένη μεθοδολογία ανάπτυξης συστημάτων πολλών πρακτόρων για εφαρμογές περιβαλλοντικής πληροφορικής που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 και την παράγραφο 5.3.

5.4.2 Γενική περιγραφή του AISLE

Το AISLE παρεμβάλλεται ανάμεσα σε ένα δίκτυο περιβαλλοντικής παρακολούθησης και τις εφαρμογές τελικού χρήστη. Μια γενική τοπολογία του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Το AISLE τοποθετείται επί ενός δικτύου αισθητήρων, συνυφαίνει πολλαπλές ροές δεδομένων (data streams) και παρέχει στις τελικές εφαρμογές χρήστη προεπεξεργασμένη, έτοιμη προς χρήση πληροφορία (information). Οι αισθητήρες του δικτύου, πιθανώς συνδεδεμένοι μεταξύ τους, λειτουργούν ως πηγές δεδομένων που δρομολογούν τα περιβαλλοντικά δεδομένα προς τρίτες, εξωτερικές εφαρμογές μέσω των συλλεκτών δεδομένων (data sinks). Γενικά, η διαδικασία αυτή μπορεί να διαφοροποιείται για κάθε περίπτωση εγκατάστασης, ωστόσο, χωρίς βλάβη της γενικότητας, με τον όρο ότι δεδομένων περιγράφουμε τα περιβαλλοντικά δεδομένα που καταγράφονται από ένα δίκτυο παρακολούθησης του περιβάλλοντος. Οι ροές δεδομένων είναι οι είσοδοι της αρχιτεκτονικής AISLE και αληρονομούν τα τυπικά χαρακτηριστικά των δικτύων παρακολούθησης του περιβάλλοντος, όπως η περιορισμένη αξιοπιστία, η φτωχή σημασιολογική περιγραφή

και ο πλεονασμός των δεδομένων (data redundancy). Για τους λόγους αυτούς, τα καταγεγραμμένα δεδομένα είναι συνήθως ασύμβατα με την πλειοψηφία των τελικών εφαρμογών χοήστη. Οι τελικές εφαρμογές χοήστη τοποθετούνται στην έξοδο του AISLE και μπορεί να είναι βάσεις δεδομένων, ειδικές εφαρμογές λογισμικού ακόμη και υπηρεσίες διαδικτύου. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, τοποθετείται το AISLE για να λειτουργεί ως ένα ενδιάμεσο επίπεδο επεξεργασίας πληροφορίας που υποστηρίζει την σύντηξη δεδομένων και την διασπορά περιβαλλοντικής πληροφορίας.



Σχήμα 5.3: Η τοπολογία του AISLE

Οι αύριες λειτουργίες του AISLE είναι οι ακόλουθες:

- Συλλογή και επικύρωση δεδομένων.** Το AISLE έχει την ικανότητα να συγκεντρώνει και να επικυρώνει τις διάφορες περιβαλλοντικές δεδομένων ενός δικτύου παρακολούθησης.
- Υποκατάσταση ή εκτίμηση ελλειπών ή εσφαλμένων μετρήσεων** (όποτε κάτι τέτοιο απαιτείται από τις τελικές εφαρμογές χοήστη). Συγκεκριμένες εφαρμογές δεν μπορούν να αντεπεξέλθουν αυτόματα στο ενδεχόμενο έλλειψης δεδομένων. Για το λόγο αυτό το AISLE μπορεί να υποκαταστήσει ή να παρέχει μια εκτίμηση των ελλειπών μετρήσεων μέσω των χαρακτηριστικών του για λογικό συμπερασμό και υποστήριξη αποφάσεων .

- 3. Διαχείριση δεδομένων και προεπεξεργασία.** Το AISLE υποστηρίζει υπηρεσίες καθαρισμού, κανονικοποίησης ή μετατροπής/μετασχηματισμού δεδομένων.
- 4. Ενορχήστρωση δικτύου.** Τα δίκτυα παρακολούθησης του περιβάλλοντος υπόκεινται σε αλλαγές στην τοπολογία τους (προσθαφαίρεση αισθητήρων-ροών δεδομένων). Το AISLE είναι συμβατό με τέτοιες ενέργειες και μπορεί να προσαρμόζεται σε αυτές.
- 5. Διάδοση πληροφορίας.** Οι ροές δεδομένων που εισάγονται στο AISLE αφού προεπεξεργάστούν κατάλληλα, συνδυάζονται μεταξύ τους και προωθούνται στον τελικό προορισμό τους.

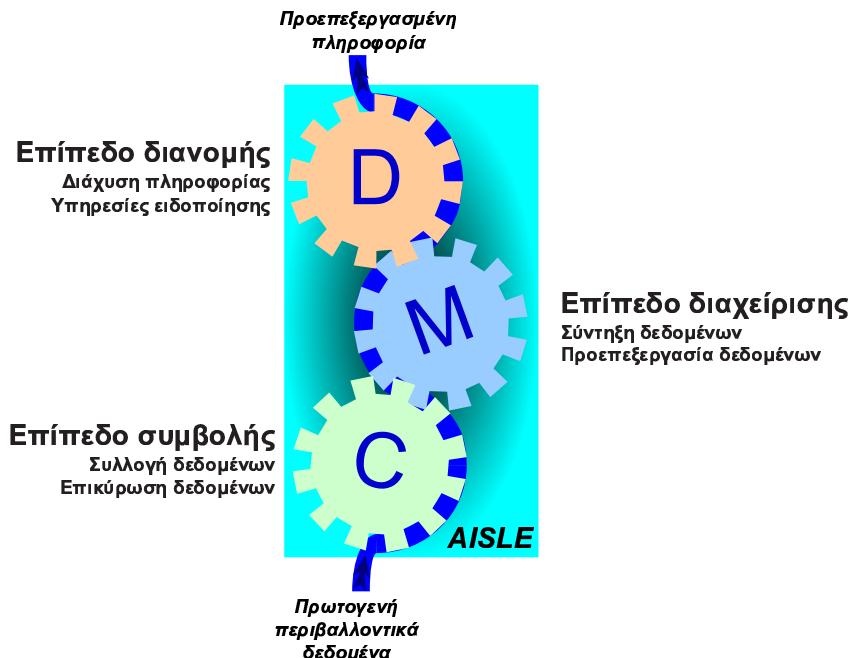
5.4.3 Ο μηχανισμός λειτουργίας του AISLE

Για να υλοποιήσουμε τον εσωτερικό μηχανισμό λειτουργίας του AISLE ομαδοποιήσαμε τις λειτουργίες του σε τρία διακριτά, ωστόσο συνεργαζόμενα επίπεδα υπηρεσιών. Το επίπεδο συνεισφοράς δεδομένων, που είναι υπεύθυνο για τις λειτουργίες συλλογής και επικύρωσης δεδομένων, μαζί με την υποκατάσταση ή την εκτίμηση ελλιπών ή εσφαλμένων μετρήσεων. Το επίπεδο διαχείρισης δεδομένων, όπου έμφαση δίνεται στις υπηρεσίες διαχείρισης και προεπεξεργασίας δεδομένων. Τέλος, το επίπεδο διανομής δεδομένων παρέχει τις απαραίτητες διεπαφές με τις τελικές εφαρμογές χρήστη. Ο μηχανισμός του AISLE, ως συνέργεια των τριών επιπέδων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4. Η πρωτογενής πληροφορία με τη μορφή των ροών περιβαλλοντικής πληροφορίας εισάγεται στο AISLE και διατρέχει τα τρία επίπεδα που είναι ιεραρχικά τοποθετημένα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η διάθεση προεπεξεργασμένης πληροφορίας προσαρμοσμένης στις απαρτήσεις των τελικών χρηστών.

5.4.4 Μια γενική αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων για το AISLE

Οι στόχοι του συστήματος και οι βασικές λειτουργίες του ανατίθενται σε πράκτορες λογισμικού, που αποτελούν τα βασικά δομικά στοιχεία του AISLE. Ορίζουμε τρεις διακριτούς τύπους πρακτόρων (έναν για κάθε επίπεδο).

1. Οι πράκτορες συνεισφοράς (Contribution Agents) λειτουργούν ως οι εν δυνάμει δέκτες πληροφορίας του AISLE, ανακτούν τις ροές περιβαλλοντικής πληροφορίας και τις επικυρώνουν.
2. Οι πράκτορες διαχείρισης δεδομένων (Data Management Agents) είναι υπεύθυνοι για τη σύντηξη των δεδομένων, την προεπεξεργασία των πληροφοριών και την



Σχήμα 5.4: Ο μηχανισμός του AISLE, ως συνέργεια τριών συνεργαζόμενων ομάδων λειτουργιών

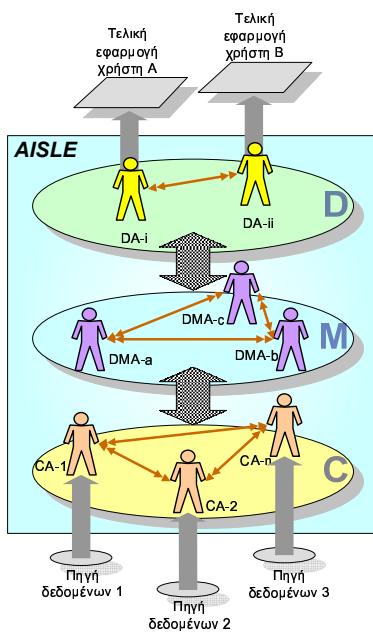
εξαγωγή των μέτα-δεδομένων.

3. Οι πράκτορες διανομής (Distribution Agents) λειτουργούν ως διεπαφές με τις τελικές εφαρμογές χρήστης και διαχέουν την πληροφορία.

Οι πράκτορες λειτουργούν στα διάφορα επίπεδα και μέσω ανταλλαγής μηνυμάτων υλοποιείται η επικοινωνία εντός των επιπέδων και μεταξύ των επιπέδων. Η επικοινωνία των πρακτόρων του ίδιου επιπέδου εξασφαλίζει τις απαιτήσεις συνεργασίας του AISLE για διάχυση της γνώσης και των αντιλήψεων εντός κάθε επιπέδου. Η επικοινωνία των πρακτόρων των διαφορετικών επιπέδων διασφαλίζει την αποτελεσματική προώθηση της πληροφορίας από την είσοδο στην έξοδο του συστήματος. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων του AISLE.

5.4.5 Υλοποίηση του συστήματος & τεχνολογίες ανάπτυξης

Το σύστημα AISLE αναπτύχθηκε ως ένα σύστημα πρακτόρων υλοποιημένο σε Java. Για τη δημιουργία των πρακτόρων χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον ανάπτυξης JADE [25, 26], το οποίο υποστηρίζει την ανάπτυξη πρακτόρων λογισμικού συμβατών με τις απαιτήσεις της FIPA [59, 60, 61, 62, 63]. Να σημειωθεί ότι μια εφαρμογή πρακτόρων αναπτυγμένη σε JADE είναι δυνατό να κατανεμηθεί σε περισσότερους από έναν υπολογιστές και



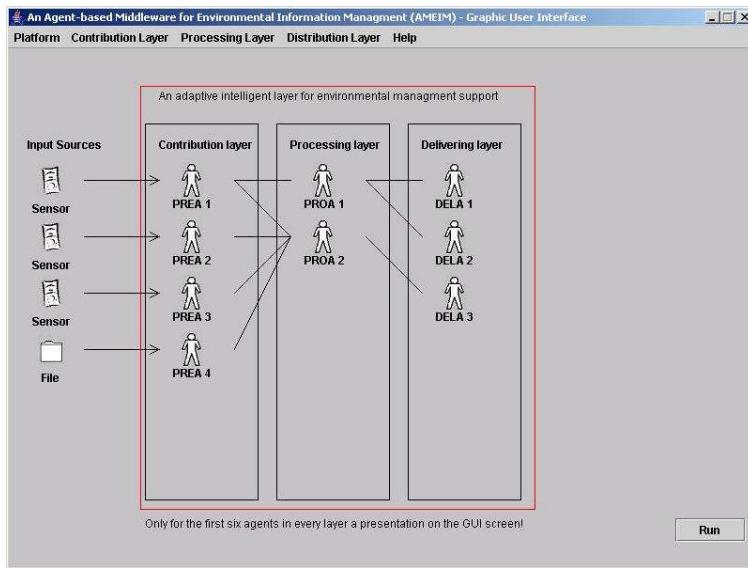
Σχήμα 5.5: Η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων AISLE

η διαμόρφωση του συστήματος μπορεί να αλλάξει κατά την εκτέλεση της εφαρμογής, όταν και όποτε απαιτείται. Η επικοινωνία των πρακτόρων υλοποιείται μέσω μηνυμάτων που σέβονται τη σημειολογία του πεδίου εφαρμογής, χρησιμοποιώντας οντολογίες. Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται οι πράκτορες του AISLE ακολουθούν οντολογίες που αναπτύχθηκαν με το Protege 2000 [77, 152]. Με τη χρήση του Protégé-2000 οι έννοιες και οι μεταβλητές του πεδίου εφαρμογής του AISLE θεμελιώνονται σε μορφή RDFS. Τέλος, να σημειωθεί ότι οι ικανότητες λογικού συμπερασμού των πρακτόρων λογισμικού μπορούν να υλοποιηθούν με το JESS (Java Expert System Shell) [68, 67], το οποίο υποστηρίζει τη δημιουργία βάσεων γνώσης σε Java και την εκτέλεση λογικών κανόνων. Η ανάπτυξη του AISLE εξασφαλίζει την ανεξαρτησία από πλατφόρμα. Το Σχήμα 5.6 παρουσιάζει ένα στιγμιότυπο της πλατφόρμας AISLE και στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται το γενικό μοντέλο AORML της εφαρμογής.

5.5 Επίδειξη χρήσης - Εφαρμογές

5.5.1 Σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας στην περιοχή της Βαλένθια

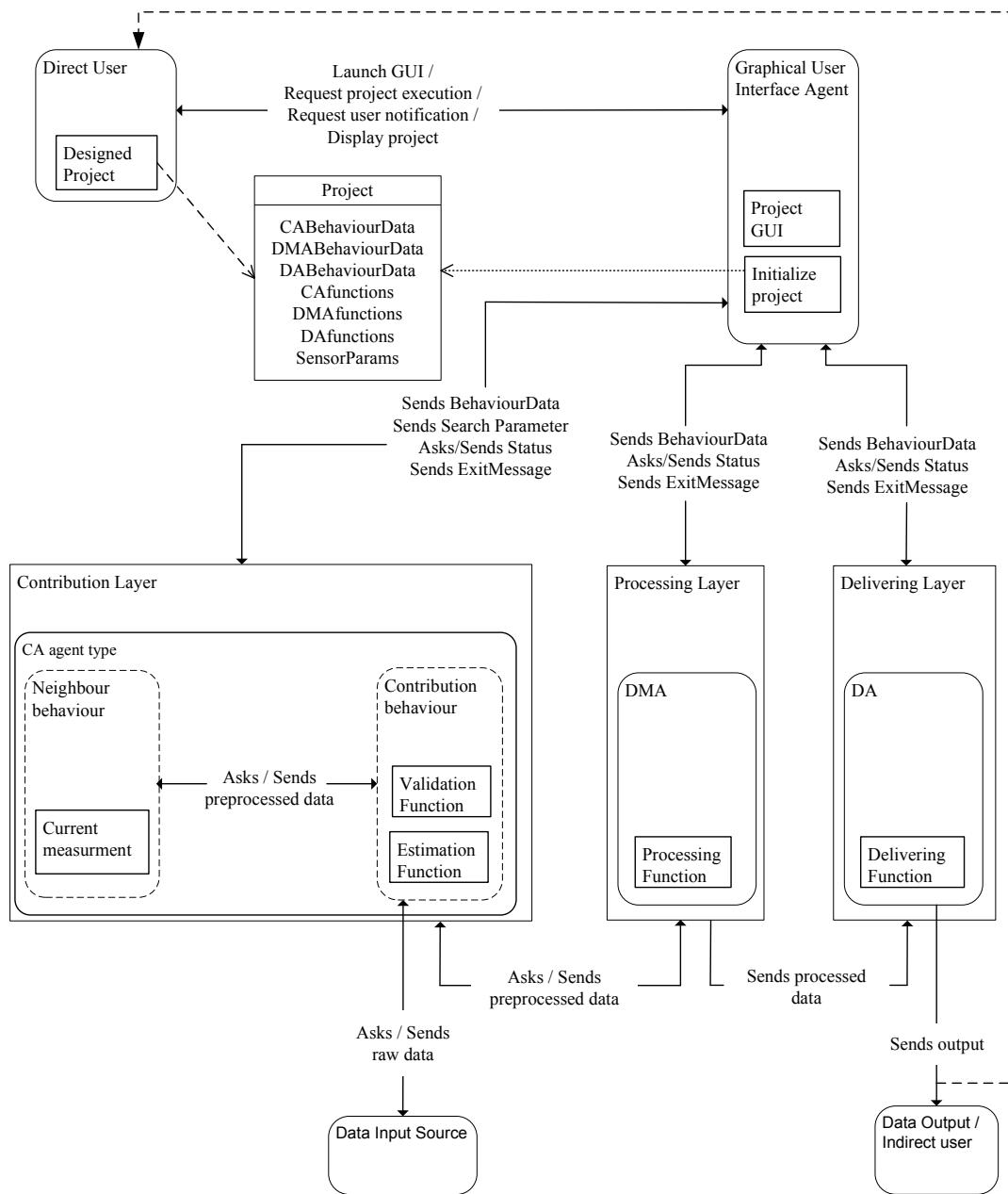
Η επίδειξη της γενικής αρχιτεκτονικής του AISLE έγινε σε δύο πεδία εφαρμογής. Το πρώτο αφορά ένα σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας στην περιοχή της Βαλένθια στην Ισπανία. Σκοπός μας ήταν να διερευνήσουμε πώς μια γενική



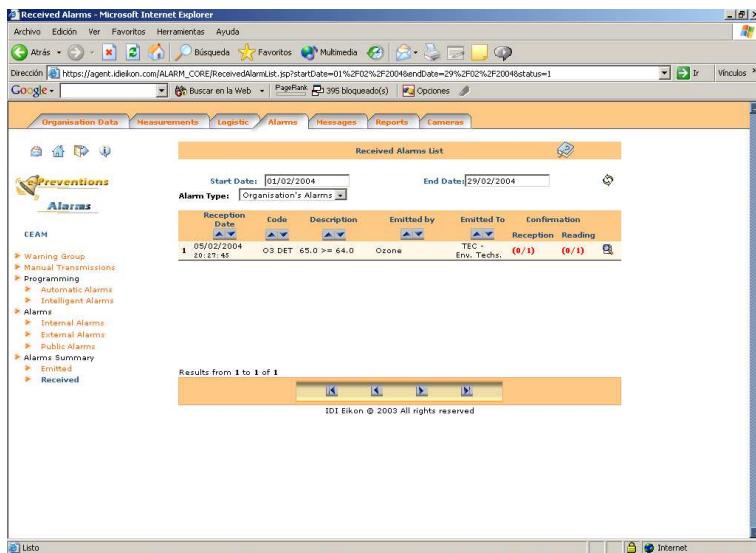
Σχήμα 5.6: Στιγμιότυπο της εφαρμογής AISLE

αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων, όπως αυτή του AISLE, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έγκαιρη διανομή περιβαλλοντικής πληροφορίας μέσω διαδικτυακών υπηρεσιών σε χρήστες με διαφορετικές απαιτήσεις. Αναπτύξαμε το σύστημα ονόματι O₃RTAA [13], ως μια πλατφόρμα πολλών πρακτόρων για την αποτίμηση και την αναφορά της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος. Το O₃RTAA (Ozone Real-Time Agent Academy) αναλαμβάνει την παρακολούθηση και την αποτίμηση χαρακτηριστικών της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος, χρησιμοποιώντας δεδομένα που καταγράφονται από μετεωρολογικούς σταθμούς. Οι πράκτορες λογισμικού παρεμβάλλονται ανάμεσα στο δίκτυο παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα και τις εφαρμογές τελικού χρήστη και αναλαμβάνουν την συλλογή και επικύρωση των μετρήσεων που καταγράφονται από πολλούς αισθητήρες, την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα, και την έκδοση αναφορών και συναγερμών στους αρμόδιους παραλήπτες, όποτε είναι απαραίτητο μέσω του διαδικτύου. Η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων του O₃RTAA περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6 και η διαδικασία υποτροπής αποφάσεων στο Κεφάλαιο 7.

Το σύστημα έχει εγκατασταθεί επιτυχώς ως πιλοτική εφαρμογή στο Κέντρο Μεσογειακών Περιβαλλοντικών Μελετών (Centro de Estudios Ambientales del Mediterraneo), στη Βαλένθια, Ισπανία, σε συνεργασία με την εταιρεία IDI-EIKON, στα πλαίσια του έργου Agent Academy (IST-2000-31050). Ένα στιγμιότυπο της εφαρμογής παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8, που παρουσιάζει τους συναγερμούς στην ποιότητα της ατμόσφαιρας μέσω του διαδικτύου.



Σχήμα 5.7: Η αρχιτεκτονική του AISLE με AORML



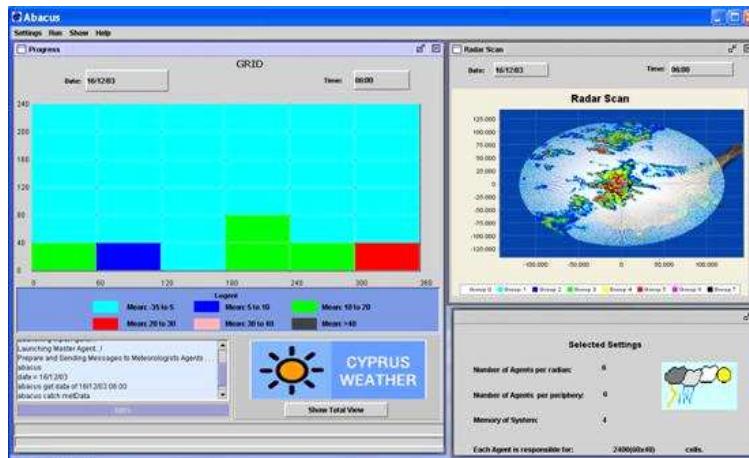
Σχήμα 5.8: Στιγμιότυπο της εφαρμογής O₃RTAA στη Βαλένθια

5.5.2 Σύστημα παρακολούθησης των κλιματολογικών συνθηκών στη Κύπρο

Το δεύτερο πεδίο εφαρμογής στο οποίο επιδείχθηκε η αρχιτεκτονική AISLE αφορά ένα σύστημα παρακολούθησης των κλιματολογικών συνθηκών στη Κύπρο, που αναπτύχθηκε ως πιλοτική εφαρμογή για την Μετεωρολογική Υπηρεσία της Κύπρου. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή, που ονομάστηκε ABACUS, παρεμβάλλεται ανάμεσα στο Doppler ραντάρ που είναι εγκατεστημένο στη Βορειοδυτική ορεινή περιοχή της Κύπρου κοντά στη μονή Κύκκου και τους τελικούς χρήστες της εφαρμογής (Μετεωρολογική Υπηρεσία και Αεροδρόμιο Λάρνακας). Το ραντάρ καταγράφει τις τιμές των ανακλάσεων τις ακτίνας του, οι οποίες καθορίζουν την πυκνότητα των σωμάτων που βρίσκονται κατά μήκος της πορείας της ακτίνας που εκπέμπει και ως εκ τούτου και των νεφών. Στόχος του συστήματος ABACUS είναι να παρακολουθεί και να επεξεργάζεται τις συνεχώς παραγόμενες τιμές που καταγράφει το ραντάρ, να αναγνωρίζει συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες και να εκτιμά την εξέλιξή τους, και, τέλος, να παρέχει ηλεκτρονικές υπηρεσίες συναγερμών στους τελικούς χρήστες.

Συγκεκριμένα, μια ομάδα πρακτόρων-μετεωρολόγων επιβλέπουν τις περιοχές ενδιαφέροντος, αναγνωρίζουν ενδεχόμενα δυσμενή καιρικά φαινόμενα και παρακολουθούν την εξέλιξή τους. Οι πράκτορες- μετεωρολόγοι λειτουργούν ως πράκτορες διαχείρισης δεδομένων και χρησιμοποιούνται για την προεπεξεργασία των ακατέργαστων καταγραφών του ραντάρ και για την εξαγωγή μεταδεδομένων, όπως διάφορα ποσοτικά ή στατιστικά μεγέθη και γραφικές παραστάσεις, που είναι απαραίτητα για τη μελέτη και την ανάλυση

καιρικών φαινομένων (Σχήμα 5.9). Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του συστήματος είναι η υπηρεσία ενημέρωσης όλων των ενδιαφερομένων μερών για την κατάσταση που επικρατεί, μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και ιστοσελίδων.



Σχήμα 5.9: Ένα στιγμάτυπο της πλατφόρμας ABACUS

Το ABACUS επιδείχθηκε στη Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου όπου και αναδειχθηκε η προστιθέμενη αξία του για τη διαχείριση του ραντάρ "Κύκκος" [141]. Κύριο πλεονέκτημα του ABACUS είναι ότι εκμεταλλεύεται την ικανότητα των προακτόρων για αυτόνομη δράση και λογικό συμπερασμό, και ως εκ τούτου είναι ικανό να διαχείριζεται και να επεξεργάζεται τα δεδομένα του ραντάρ σε πραγματικό χρόνο χωρίς την ανάγκη επίβλεψης ή ανθρώπινου ελέγχου. Αν ληφθεί υπόψη ότι μέχρι σήμερα, η επεξεργασία και εκμετάλλευση των δεδομένων είναι περιορισμένη, ενώ παράλληλα απαιτεί την έντονη απασχόληση ανθρώπινου δυναμικού της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, γίνεται ακόμη πιο εμφανής η αξία της εφαρμογής. Καθοριστικής σημασίας είναι η δυνατότητα αυτόματης και άμεσης ενημέρωσης των υπευθύνων χωρίς την μεσολάβηση κάποιου χρήστη, με βάση λογικούς κανόνες αναγνώρισης συγκεκριμένων καιρικών συνθηκών.

5.6 Συζήτηση - σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία ανάπτυξης ΟΣΥΑΔΠ με την χρήση ΠΛ. Το όφελος από τη χρήση της μεθόδου είναι διπλό: Αφενός, αντιμετωπίζει τα προβλήματα αβεβαιότητας των δεδομένων που εμπλέκονται σε ένα ΟΣΥΑΔΠ, χρησιμοποιώντας ΠΛ ως υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Αφετέρου, ακολουθεί μια κατανεμημένη προσέγγιση για την επεξεργασία των δεδομένων, με τους πράκτορες να συμπεριφέρονται ως φορείς πληροφορίας ώστε να παρέχουν έγκαιρη και αξιόπιστη πληρο-

φόρηση των αρμοδίων μέσω του διαδικτύου.

Η προσέγγιση που περιγράφηκε ενοποιεί σε μια μεθοδολογία ανάπτυξης δυο ιδιότητες των ΠΛ: (α) την ικανότητά τους για κατανεμημένη επεξεργασία πληροφορίας, και (β) την ικανότητά τους για επίλυση κατανεμημένων προβλημάτων. Το κύριο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι ότι εκμεταλλεύεται πλήρως τις ικανότητες των ΠΛ, θεωρώντας τους τόσο ως φορείς πληροφορίας, όσο και ως υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Τα ΣΠ που αναπτύσσονται ακολουθώντας τη μεθοδολογία αυτή είναι ικανά να αντιμετωπίσουν προβλήματα αβεβαιότητας δεδομένων, μέσω της συνδυασμένης χρήσης διαφορετικών στρατηγικών απόφασης (αυτοκρατικών, επαγωγικών ή ευριστικών) για τη συλλογιστική των πρακτόρων. Ακόμη, να σημειωθεί ότι η χρήση των ΠΛ κατά τη διαδικασία ανάλυσης των απαιτήσεων, προδιαγραφής και σχεδιασμού του λογισμικού ΟΣΥΑΔΠ είναι πλεονεκτική, καθότι η έννοια του πράκτορα είναι πιο κοντά στον πραγματικό κόσμο, και ως εκ τούτου περισσότερο κατανοητή από τους τελικούς χρήστες.

Το AISLE αποτελεί μια γενικευμένη πλατφόρμα για την παροχή προηγμένων υπηρεσιών υποστήριξης δικτύων παρακολούθησης του περιβάλλοντος που εγκαθιστούν τα Κέντρα Παρατήρησης και Παρακολούθησης του Περιβάλλοντος. Το AISLE συνδυάζει τεχνολογίες αιχμής για να παρέχει πληροφορίες στους τελικούς χρήστες έγκαιρα και αξιόπιστα, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Αναπτύχθηκε ως ένα σύστημα πολλών πρακτόρων, που ενσωματώνει χαρακτηριστικά προσαρμοσμένης ευφυΐας και διάχυσης της γνώσης. Το AISLE αποτελεί μια γενική αρχιτεκτονική διαχείρισης και διάχυσης περιβαλλοντικής πληροφορίας βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχουν τα Κέντρα Παρατήρησης και Παρακολούθησης του Περιβάλλοντος.

Στη συνέχεια του Μέρους II της διατριβής, στα Κεφάλαια 6 και 7 παρουσιάζεται λεπτομερώς η εφαρμογή της μεθοδολογίας για την ανάπτυξη του συστήματος Ο₃RTAA. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του ΣΠ και στο Κεφάλαιο 7 η διαδικασία λήψης αποφάσεων που ενσωματώνεται.

Κεφάλαιο 6

Σύστημα πρακτόρων για τη διαχείριση της πληροφορίας και την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων ενός ΟΣΥΑΔΠ που αναπτύχθηκε για την παρακολούθηση, την αποτίμηση και την αναφορά της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα, στο σύστημα O₃RTAA μια κοινότητα πολλών πρακτόρων αναλαμβάνει την συγκέντρωση των μετρήσεων που καταγράφουν οι αισθητήρες ενός μετεωρολογικού σταθμού, την επικύρωση των μετρήσεων, την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος και την ενεργοποίηση πιθανών συναγερμών στους αρμόδιους φορείς και το κοινό. Ακολουθώντας την μεθοδολογία του Κεφαλαίου 5, προδιαγράφονται η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων του συστήματος, η οντολογία του πεδίου εφαρμογής, η αλληλεπίδραση ανάμεσα στους πράκτορες και οι διορίες παράδοσης των μηνυμάτων.

6.1 Εισαγωγικά

6.1.1 Τα Επιχειρησιακά Κέντρα Ποιότητας του Αέρα

Τα επιχειρησιακά κέντρα ποιότητας της ατμόσφαιρας (Air Quality Operational Centers) έχουν ιδρυθεί ανά τον κόσμο, σε περιοχές με πιθανά προβλήματα μόλυνσης του αέρα του περιβάλλοντος. Η ευθύνη των κέντρων αυτών είναι να παρακολουθούν τους αέριους ρύπους και περιοδικά να δημοσιοποιούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων και των ερευνών τους. Η τρέχουσα πρακτική στα κέντρα αυτά είναι να εμπλέκονται σε υψηλό βαθμό οι περιβαλλοντικοί επιστήμονες στη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, και να χρησιμοποιούνται πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα για την μελέτη και κατανόηση των ατμοσφαιρικών φαινομένων. Για παράδειγμα, στο London Air Quality Network¹ η

¹ <http://www.erg.kcl.ac.uk/london>

ανάλυση των δεδομένων υποστηρίζεται χρησιμοποιώντας στατιστικά εργαλεία, ενώ στο Texas Natural Resource Conservation Commission² οι μετεωρολόγοι θέτουν κριτήρια για την επικύρωση των δεδομένων.

Το σύστημα O₃RTAA, που περιγράφουμε σε αυτό το κεφάλαιο και βασίστηκε στη γενική αρχιτεκτονική του AISLE, εκμεταλλεύεται τις τεχνικές ανάπτυξης λογισμικού με πράκτορες και τις τεχνικές εξόρυξης γνώσης για την ανάπτυξη ενός ΟΣΥΑΔΠ, που ενσωματώνει προσαρμοσμένα ευφυή χαρακτηριστικά και υπηρεσίες. Αρκετοί ΠΛ συνεργάζονται σε μια κοινότητα πρακτόρων με σκοπό την αυτοματοποίηση των διαδικασιών παρακολούθησης των μετεωρολογικών μεταβλητών και παραμέτρων αέριων ρύπων, την αξιολόγηση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος και την ενεργοποίηση και διάθεση κατάλληλων προειδοποιήσεων στους αρμόδιους και το κοινό.

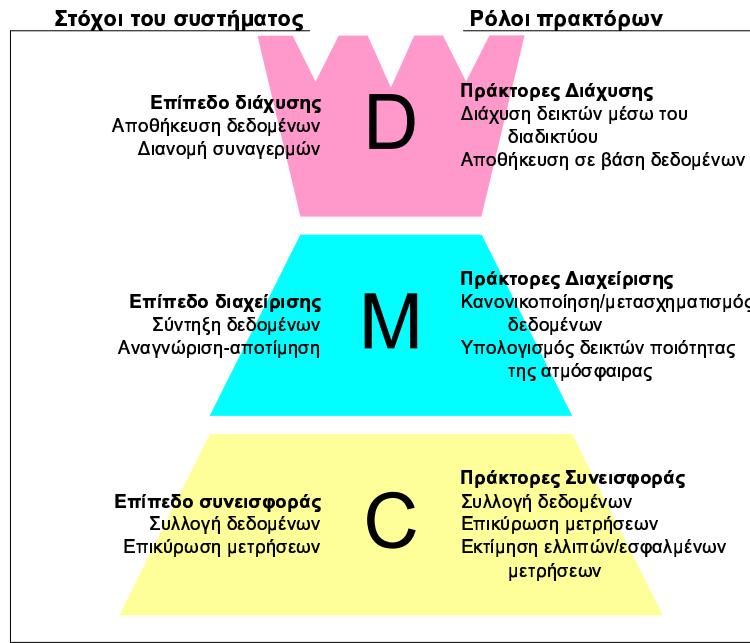
6.2 Ανάλυση - Λειτουργική περιγραφή

6.2.1 Στόχοι του συστήματος

Ο γενικός στόχος του συστήματος που αναπτύχθηκε είναι να παρακολουθεί τις τις συγκεντρώσεις των αέριων ρύπων και τις τιμές των μετεωρολογικών μεταβλητών του περιβάλλοντος που καταγράφονται σε ένα μετεωρολογικό σταθμό. Συνήθως, σε τέτοια συστήματα οι αισθητήρες του σταθμού καταγράφουν τις περιβαλλοντικές συνθήκες και ειδικοί επιστήμονες αναλαμβάνουν την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα και αναγνωρίζουν πιθανώς επικίνδυνα ενδεχόμενα. Το σύστημα O₃RTAA παρεμβάλλεται μεταξύ των αισθητήρων και των επιστημόνων και αναλαμβάνει διάφορες εργασίες, ώστε να βοηθήσει τους επιστήμονες στο έργο τους. Συγκεκριμένα, το σύστημα αναλαμβάνει κάποιες εργασίες ρουτίνας, όπως την ενημέρωση των βάσεων δεδομένων με τις νέες μετρήσεις. Ωστόσο, το πλέον σημαντικό είναι ότι το σύστημα ενσωματώνει προηγμένα χαρακτηριστικά, όπως την επικύρωση των καταγραφόμενων μετρήσεων, την εκτίμηση των ελλιπών μετρήσεων και την παροχή υπηρεσιών προειδοποίησης μέσω του διαδικτύου. Τα προηγμένα χαρακτηριστικά του συστήματος βασίζονται στις ικανότητες των πρακτόρων για αυτόνομη δράση, συλλογισμό και λήψη αποφάσεων.

Το σύστημα O₃RTAA λειτουργεί ως **μεσολαβητής**, ώστε να επιτύχει συγκεκριμένους σκοπούς, οι οποίοι οργανώνονται σε τρεις ομάδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Να σημειωθεί ότι η επιτυχία των στόχων των υπερκείμενων επιπέδων εξαρτάται από την επιτυχία των στόχων των χαμηλότερων επιπέδων. Τα τρία επίπεδα των στόχων είναι τα

²<http://www.tnrc.state.tx.us>



Σχήμα 6.1: Οι στόχοι του συστήματος και οι αντίστοιχοι ρόλοι πρακτόρων

ακόλουθα:

- 1 Επίπεδο συνεισφοράς (Contribution layer).
- 2 Επίπεδο διαχείρισης (Management layer).
- 3 Επίπεδο διάχυσης (Distribution layer).

Στο πρώτο επίπεδο, το επίπεδο συνεισφοράς, συγκεντρώνονται οι στόχοι του συστήματος που σχετίζονται με ενέργειες προεπεξεργασίας. Αυτές συμπεριλαμβάνουν τις ενέργειες για ορθή ανάκτηση των δεδομένων που καταγράφονται από τους αισθητήρες, την επαλήθευση των εισερχόμενων χρονοσειρών, την αναγνώριση πιθανών λαθών σε αυτές και την αποκατάστασή τους, καθώς και την παράδοση προεπεξεργασμένων τιμών των μετρητών.

Το δεύτερο επίπεδο στόχων του συστήματος, το επίπεδο διαχείρισης, σχετίζεται με την επεξεργασία και οργάνωση των προεπεξεργασμένων τιμών των μετρήσεων που εξάγονται από το επίπεδο συνεισφοράς, με σκοπό την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα και τον υπολογισμό των αντίστοιχων δεικτών. Συγκεκριμένα, διακρίνουμε δύο τύπους συναγερμών. Ο πρώτος είναι ο “επίσημος συναγερμός”, που καθορίζεται από τους νόμους και τους κανονισμούς για το περιβάλλον. Ο δεύτερος τύπος αφορά τους “συναγερμούς κατά παραγγελία”, που ορίζονται από τις απαιτήσεις των χρηστών, και οι οποίοι ανιχνεύουν τοπικά φαινόμενα και τάσεις.

Στο υψηλότερο επίπεδο, το επίπεδο διάχυσης, οι στόχοι σχετίζονται με την διανομή των συναγερμών στους κατάλληλους παραλήπτες με βάση τις προτιμήσεις τους. Οι συναγερμοί που εγείρονται στο επίπεδο διαχείρισης αναλύονται κατάλληλα και παραδίδονται στους παραλήπτες τους με το επιθυμητό μέσο (email, sms ή iotoseleidha).

6.2.2 Εργασίες του συστήματος

Στη συνέχεια, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4, αναθέτουμε τις εργασίες του O₃RTAA σε ΠΛ της εργαλειοθήκης ΤΑΛΠ. Συγκεκριμένα στο O₃RTAA, οι κύριες εργασίες που αναλαμβάνουν οι πράκτορες του O₃RTAA, ως φορείς πληροφορίας είναι οι ακόλουθες:

E-1 Συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες παρακολούθησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

E-2 Διαχείριση δεδομένων, που περιλαμβάνει δράσεις όπως την προεπεξεργασία, την κανονικοποίηση, και το μετασχηματισμό δεδομένων.

E-3 Διάχυση πληροφορίας και διανομή περιβαλλοντικών δεικτών μέσω του διαδικτύου

Ενώ, ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων, οι πράκτορες του O₃RTAA πραγματοποιούν τις εξής εργασίες:

E-4 Επικύρωση των εισερχόμενων δεδομένων μέσω του ελέγχου της ποιότητας των καταγραφόμενων μετρήσεων.

E-5 Αντικατάσταση των άκυρων μετρήσεων μέσω της εκτίμησης των ελλιπών καταγραφών και της προσέγγισης των εσφαλμένων καταγραφών.

E-6 Υπολογισμός ποιοτικών δεικτών για την αποτίμηση της ποιότητας του περιβάλλοντος.

6.2.3 Ανάθεση εργασιών στους ΠΛ

Στη συνέχεια αναθέτουμε τις εργασίες του O₃RTAA στους εξής τρεις τύπους πρακτόρων:

Οι **Πράκτορες Συνεισφοράς** (Contribution Agent ή CA) λειτουργούν ως η πηγή δεδομένων για το σύστημα, υλοποιώντας τις κατάλληλες διεπαφές με τους αισθητήρες. Κάθε ένας CA αντιστοιχεί σε έναν αισθητήρα. Οι CA αναλαμβάνουν τις εργασίες E-1, E-4, E-5.

Οι **Πράκτορες Διαχείρισης Δεδομένων** (Data Management Agent ή DMA) είναι υπεύθυνοι για την σύντηξη δεδομένων που προέρχονται από διαφορετικούς CA. Κάθε

ένας DMA παράγει μια συνδυασμένη όψη (joint view) των δεδομένων των αισθητήρων, στη μορφή που απαιτεί η τυποποίηση δεδομένων των τελικών εφαρμογών χρήστη. Οι DMA είναι υπεύθυνοι για τις εργασίες E-2 και E-6. Στο O₃RTAA εισάγουμε δύο DMA. Ο πρώτος είναι υπεύθυνος για την αποθήκευση των δεδομένων των αισθητήρων στην Βάση Δεδομένων Μετρήσεων, όπου φυλάσσονται για μελλοντική χρήστη. Ο δεύτερος DMA είναι υπεύθυνος να υπολογίζει Προειδοποιήσεις Κινδύνου από Ρύπους Όζοντος (Alarm DMA), που στη συνέχεια θα διανεμηθούν μέσω του διαδικτύου.

Τέλος, δύο Πράκτορες Διάχυσης Πληροφορίας (Distribution Agent ή DA) ενεργοποιούνται για την υλοποίηση των διεπαφών με τις τελικές εφαρμογές χρήστη. Συγκεκριμένα, ο πρώτος είναι υπεύθυνος για την συντήρηση της Βάσης Δεδομένων Μετρήσεων, ενώ ο δεύτερος είναι υπεύθυνος για την διανομή των προειδοποιήσεων κινδύνου μέσω του διαδικτύου.

6.2.4 Αρχιτεκτονική και λειτουργική προδιαγραφή

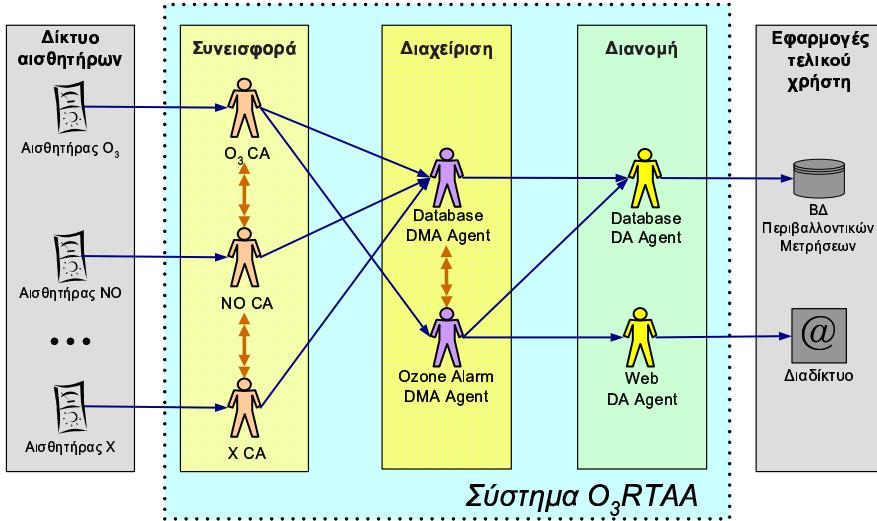
Η γενική αρχιτεκτονική του συστήματος O₃RTAA και η επικοινωνία των πρακτόρων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2. Η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων ενός επιπέδου προστίθεται για να ενισχύσει την ικανότητα λήψης αξιόπιστων αποφάσεων του καθενός. Η επικοινωνία των πρακτόρων διαφορετικών επιπέδων διασφαλίζει την επιτυχή μεταφορά πληροφορίας στον τελικό χρήστη.

Ως φορείς πληροφορίας

Η πληροφορία ρέει από τους αισθητήρες (στα αριστερά του Σχήματος 6.2) προς τους χρήστες (στα δεξιά) μέσα από τρία επίπεδα πρακτόρων. Οι μετρήσεις της ποιότητας της ατμόσφαιρας, εισέρχονται στο σύστημα από τους αισθητήρες. Οι πράκτορες συνεισφοράς (CA) τις συλλαμβάνουν και έπειτα από την διαδικασία επικύρωσης, τις παραδίδουν στο επίπεδο διαχείρισης. Εκεί, ο πράκτορας συναγερμών παραλαμβάνει τις επικυρωμένες μετρήσεις και αναγνωρίζει επίσημους ή κατά παραγγελία συναγερμούς. Οι επικυρωμένες μετρήσεις αποθηκεύονται στη Βάση Δεδομένων Μετρήσεων για μελλοντική χρήση. Πιθανοί συναγερμοί προωθούνται στο επίπεδο διάχυσης, όπου ο πράκτορας διάχυσης (DA) αναλαμβάνει να τις παραδώσει στους κατάλληλους παραλήπτες, στην επιθυμητή τυποποίηση.

Ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων

Οι CA αναλαμβάνουν ως υπεύθυνοι της διαδικασίας λήψης αποφάσεων την επικύρωση των εισερχόμενων δεδομένων και την αντικατάσταση των ελλιπών ή εσφαλμένων μετρήσεων.



Σχήμα 6.2: Η αρχιτεκτονική του συστήματος O_3 RTAA

σεων, ενώ ο υπολογισμός των ποιοτικών δεικτών αποτίμησης της ατμόσφαιρας ανατίθεται στον Alarm DMA.

Κάθε CA είναι υπεύθυνος για τον εφοδιασμό του O_3 RTAA με δεδομένα που καταγράφονται σε ένα συγκεκριμένο αισθητήρα. Έτσι, τους ανατίθενται επιπλέον οι υποχρεώσεις να επικυρώνουν τις εισερχόμενες μετρήσεις και να εκτιμούν τις ελλιπείς. Και για τις δυο εργασίες λήψης απόφασης οι πράκτορες χρησιμοποιούν στρατηγικές βασισμένες στα δεδομένα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ίδιας της φύσης των εργασιών αυτών, οι οποίες εξαρτώνται από τις τοπικές συνθήκες. Η επικύρωση των δεδομένων και η εκτίμηση των ελλιπών μετρήσεων σχετίζονται με τις τοπικές συνθήκες και τις αλλαγές τους, όπως εξηγείται αναλυτικά στο κεφάλαιο 7. Οι αιτιοκρατικές στρατηγικές είναι ακατάλληλες για το συγκεκριμένο πρόβλημα, ενώ μεγάλοι όγκοι ιστορικών δεδομένων είναι διαθέσιμα. Έτσι, δυο τύποι μηχανών συλλογισμού, βασισμένες στα δεδομένα, ενσωματώνονται σε κάθε CA. Η μία είναι η Μηχανή Συλλογισμού Επικύρωσης και η δεύτερη είναι η Μηχανή Συλλογισμού Εκτίμησης. Λεπτομέρειες για τις μηχανές αυτές δίνεται στο κεφάλαιο 7 και στις εργασίες [12, 16, 15].

Ο υπολογισμός των δεικτών ποιότητας της ατμόσφαιρας περιλαμβάνει την εφαρμογή συγκεκριμένων επιτρεπτών ορίων που ορίζει η νομοθεσία. Η χρήση των ορίων αυτών αναπαριστά μια αιτιοκρατική στρατηγική λήψης αποφάσεων. Για το λόγο αυτό, ο Alarm DMA, που υλοποιεί μια διαδικασία συναγερμών (που αφορούν τη συγκέντρωση του όξυντος) ενσωματώνει μια *ντετερομηνιστική* μηχανή συμπερασμού.

6.3 Προδιαγραφή συστήματος

6.3.1 Μοντελοποίηση

Το σύστημα O₃RTAA μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα μοντέλο τριών τύπων πρακτόρων O₃RTAA_{model}:

$$\text{O}_3\text{RTAA}_{model} = \{A_{CA}, A_{DMA}, A_{DA}\} \quad (6.1)$$

Ενώ, το τελικό σύστημα O₃RTAA αποτελείται από K_{CA} στιγμιότυπα πρακτόρων τύπου CA (A_{CA}), K_{DMA} στιγμιότυπα πρακτόρων τύπου DMA (A_{DMA}), και K_{DA} στιγμιότυπα πρακτόρων τύπου DA (A_{DA}):

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\text{O}_3\text{RTAA}) = & \{A_{CA}(1), \dots, A_{CA}(K_{CA}), \\ & A_{DMA}(1), \dots, A_{DMA}(K_{DMA}), A_{DA}(1), \dots, A_{DA}(K_{DA})\} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Στο σύστημα O₃RTAA, κάθε στιγμιότυπο (Instance) του CA είναι υπεύθυνο για έναν αισθητήρα του μετεωρολογικού σταθμού. Το σύστημα που αναπτύχθηκε παρακαλούθει εννέα παραμέτρους: Διοξείδιο του θείου (SO₂), Όζον του περιβάλλοντος (O₃) Μονοξείδιο, Διοξείδιο και Οξείδια του αζώτου (NO, NO₂, NO_x), Ταχύτητα και Διεύθυνση του ανέμου (VEL, DIR), Θερμοκρασία (TEM) και Σχετική υγρασία (HR), οπότε και ενσωματώνει εννέα πράκτορες CA (K_{CA} = 9). Ακόμη, ενεργοποιούνται δύο πράκτορες DMA, ένας για την επεξεργασία των δεδομένων για την βάση δεδομένων (A_{DMA}(db)) και ένας για την αποτίμηση της ατμόσφαιρας και την έκδοση δεικτών με βάση το οξείδιο (A_{DMA}(al)), οπότε και K_{DMA} = 2. Τέλος, στο σύστημα προστίθενται τρεις πράκτορες διάχυσης. Ο A_{DA}(db) που επικοινωνεί με την Βάση δεδομένων, ο A_{DA}(email) που επικοινωνεί μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου με τους τελικούς χρήστες, και ο A_{DA}(web) που είναι υπεύθυνος για την ανανέωση των ιστοσελίδων. Οπότε τελικά είναι K_{DA} = 3. Η σύνθεση των πρακτόρων του συστήματος αποτελείται από 14 πράκτορες και αναλυτικά είναι:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\text{O}_3\text{RTAA}) = & \{A_{CA}(SO_2), A_{CA}(O_3), A_{CA}(NO), A_{CA}(NO_2), A_{CA}(NO_x), \\ & A_{CA}(VEL), A_{CA}(DIR), A_{CA}(TEM), A_{CA}(HR), \\ & A_{DMA}(db), A_{DMA}(al), \\ & A_{DA}(db), A_{DA}(email), A_{DA}(web)\} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Το μοντέλο πρακτόρων της GAIA [228, 234] για το σύστημα O_3RTAA απεικονίζεται στο σχήμα 6.3. Η εσωτερική αρχιτεκτονική των πρακτόρων μοντελοποιημένη με τη χρήση της AORML [214, 215] εικονίζεται στα Σχήματα 6.4, 6.5, και 6.6.



Σχήμα 6.3: Το μοντέλο πρακτόρων O_3RTAA

6.3.2 Επικοινωνία πρακτόρων

Οι αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων **I** αφορούν τόσο την επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων του ίδιου επιπέδου, όσο και την επικοινωνία πρακτόρων διαφορετικών επιπέδων. Συγκεκριμένα, η ροή της πληροφορίας από την είσοδο προς την έξοδο υλοποιείται ως η ακολουθία των επικοινωνιών:

$$I(1) : I(A_{CA}(x) \rightarrow A_{DMA}(db)) \quad \forall x = 1, 2, \dots, K_{CA} \quad (6.4)$$

$$I(2) : I(A_{DMA}(db) \rightarrow A_{DA}(db)) \quad (6.5)$$

$$I(3) : I(A_{CA}(O_3) \rightarrow A_{DMA}(al)) \quad (6.6)$$

$$I(4) : I(A_{DMA}(al) \rightarrow A_{DA}(web)) \quad (6.7)$$

$$I(5) : I(A_{DMA}(al) \rightarrow A_{DA}(email)) \quad (6.8)$$

Ενώ η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων στο επίπεδο συνεισφοράς υλοποιείται ώς:

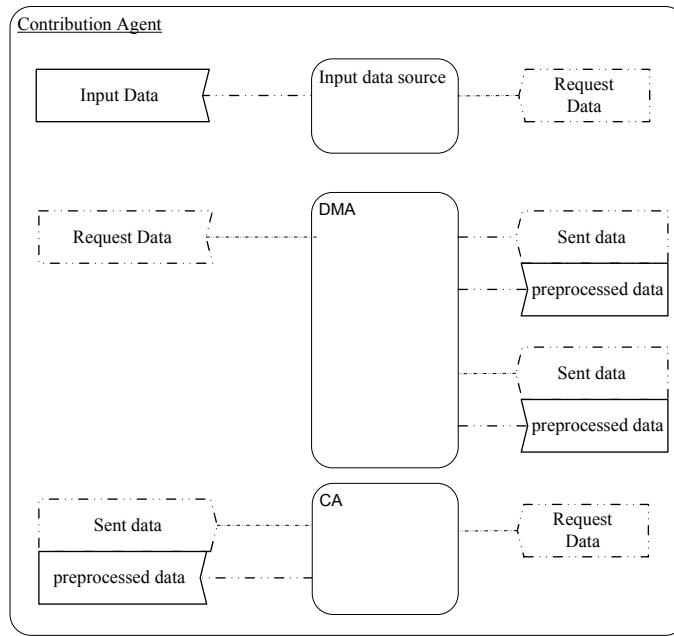
$$I(6) : I(A_{CA}(x) \rightarrow A_{CA}(y)), \quad x \neq y, \quad x, y = 1, \dots, K_{CA} \quad (6.9)$$

Τελικά ορίζουμε:

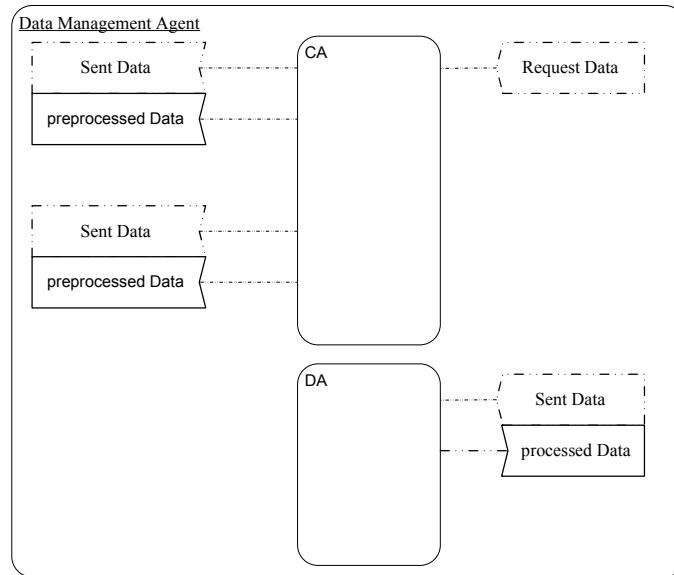
$$I(O_3RTAA) = \{I(1), I(2), I(3), I(4), I(5), I(6)\} \quad (6.10)$$

6.3.3 Οντολογία

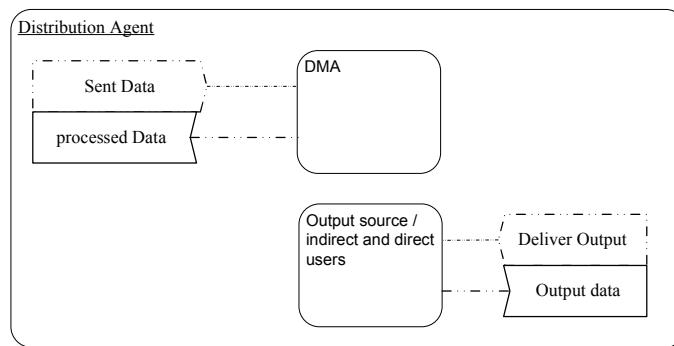
Τα μηνύματα που ανταλλάσσουν οι πράκτορες του O_3RTAA ακολουθούν μια γενική οντολογία **O**(O_3RTAA), η οποία αναπτύχθηκε με το πρόγραμμα σύνταξης οντολογιών Protégé-2000 [77]. Μέρος της οντολογίας που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.7. Η οντολογία **O**(O_3RTAA) περιγράφει όλες τις έννοιες του συστήματος και τα ΑΠΠ που



Σχήμα 6.4: Το εσωτερικό μοντέλο AORML του CA

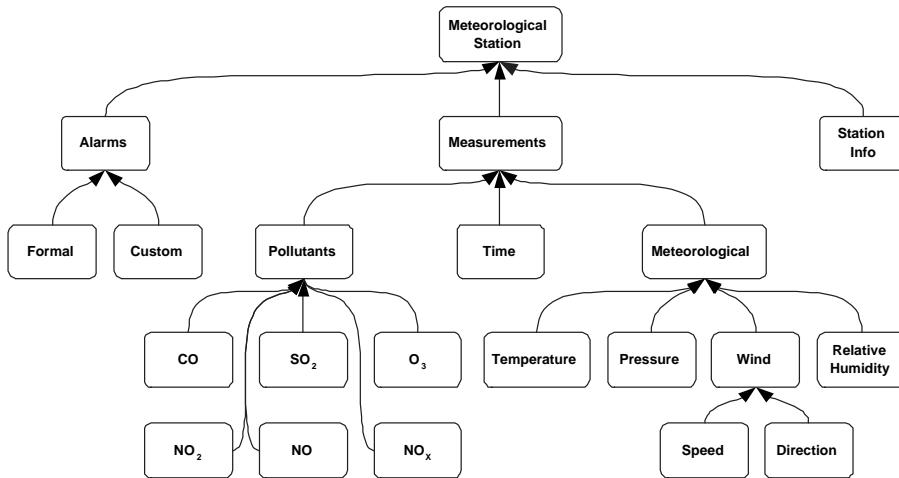


Σχήμα 6.5: Το εσωτερικό μοντέλο AORML του DMA



Σχήμα 6.6: Το εσωτερικό μοντέλο AORML του DA

ανταλλάσσουν, διαμορφώνουν ή μετασχηματίζουν οι πράκτορες του O₃RTAA. Για παράδειγμα, η έννοια ρύπος (pollutants) σχηματίζεται από τρία αντικείμενα: πραγματική τιμή (value), επίπεδο τιμών (level), και τάση (variability), ώστε να περιγράφει μια μέτρηση και ποσοτικά και ποιοτικά. Τα αντικείμενα αυτά κληρονομούνται σε όλες τις έννοιες-παιδιά, που όπως φαίνεται από το σχήμα είναι: SO₂, O₃, κλπ.



Σχήμα 6.7: Οι κύριες έννοιες του πεδίου εφαρμογής και η δομή της οντολογίας του συστήματος

6.3.4 Διορίες παράδοσης

Οι διορίες παράδοσης των μηνυμάτων των πρακτόρων ορίστηκαν σε λιγότερο από ένα λεπτό. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες του συγκεκριμένου σταθμού καταγράφουν μετρήσεις ανά δεκαπέντε λεπτά, η σύμβαση αυτή θεωρείται ικανοποιητική για τη λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες πίεσης χρόνου. Ακόμη αξίζει να σημειωθεί ότι η συμμόρφωση με τα πρότυπα της FIPA διασφαλίζει την σωστή συμπεριφορά των πρακτόρων για τη διαχείριση σφαλμάτων στην μετάδοση μηνυμάτων [62].

Παραπάνω η αρχιτεκτονική των πρακτόρων του O₃RTAA προδιαγράφηκε πλήρως ως μια δομή της μορφής της εξίσωσης 5.1, ως:

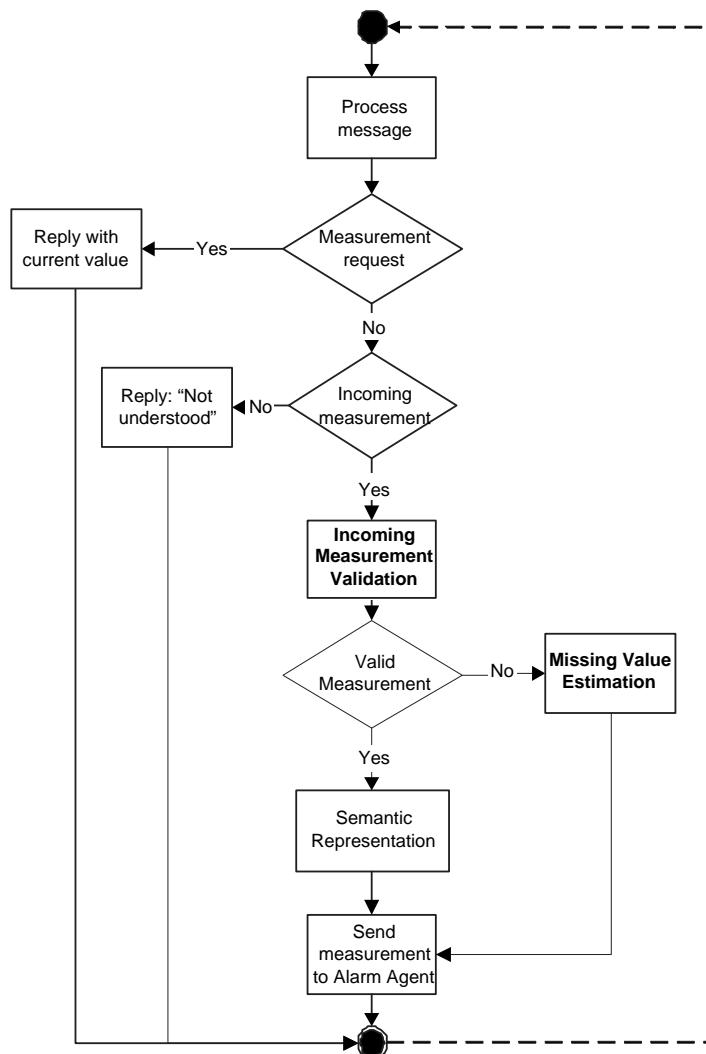
$$\text{O}_3\text{RTAA} = \langle \mathbf{A}, \mathbf{O}, \mathbf{I}, \mathbf{D} \rangle \quad (6.11)$$

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εσωτερική λειτουργία των πρακτόρων του συστήματος O₃RTAA.

6.4 Εσωτερική δομή πρακτόρων

6.4.1 Πράκτορας συνεισφοράς

Οι πράκτορες συνεισφοράς (CA) του O₃RTAA είναι υπεύθυνοι για την παρακολούθηση των τιμών διάφορων αέριων και μετεωρολογικών μεταβλητών. Κάθε στιγμιότυπο του CA είναι υπεύθυνο για έναν αισθητήρα του μετεωρολογικού σταθμού. Οι πράκτορες διάγνωσης συγκεντρώνουν τις μετρήσεις από τους αισθητήρες και είναι υπεύθυνοι να επιβεβαιώνουν την καλή λειτουργία τους. Σε περίπτωση που για οποιοδήποτε λόγο κάποια μέτρηση χαθεί ή είναι εσφαλμένη, οι CA είναι υπεύθυνοι να την αντικαταστήσουν.



Σχήμα 6.8: Η λογική δομή της συμπεριφοράς του πράκτορα διάγνωσης
(Σημείωση: Οι μηχανές συμπερασμού σημειώνονται **έντονα**)

Η λογική δομή του πράκτορα τύπου διάγνωσης CA παρουσιάζεται στο UML διάγραμ-

μα του Σχήματος 6.8. Κάθε μήνυμα που παραλαμβάνει ο CA ελέγχεται. Σε περίπτωση που είναι αίτημα αποστολής της τρέχουσας μέτρησης από κάποιον άλλον πράκτορα, ο CA απαντάει με το κατάλληλο μήνυμα. Σε περίπτωση που είναι νέα μέτρηση, τότε αυτή ελέγχεται για την ορθότητά της. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το μήνυμα δεν είναι κατανοητό και ο πράκτορας απαντά κατάλληλα. Η διαδικασία επικύρωσης των εισερχόμενων μετρήσεων περιλαμβάνει την εφαρμογή της αντίστοιχης μηχανής συμπερασμού. Το αποτέλεσμα του σχετικού μοντέλου αποφάσεων είναι ο χαρακτηρισμός της μέτρησης ως "έγκυρη" ή "άκυρη".

Στην πρώτη περίπτωση, η έγκυρη μέτρηση προεπεξεργάζεται σημασιολογικά: Ποιοτικές ερμηνείες της τρέχουσας τιμής υπολογίζονται από την πραγματική τιμή, όπως η περιοχή τιμών, η τάση ή η επιμονή. Η πραγματική τιμή, συνοδευόμενη από τις ποιοτικές της ερμηνείες, αποστέλλεται στον Alarm DMA.

Στη δεύτερη περίπτωση, δηλαδή όταν η μέτρηση είναι άκυρη, ενεργοποιείται η μηχανή συμπερασμού εκτίμησης των ελλιπών μετρήσεων. Αυτή αναλαμβάνει την αντικατάσταση της εσφαλμένης μέτρησης με μια ποιοτική εκτίμηση, π.χ. "η τιμή είναι χαμηλή". Η ποιοτική ερμηνεία της τιμής που λείπει προωθείται με τη σειρά της στον Alarm DMA.

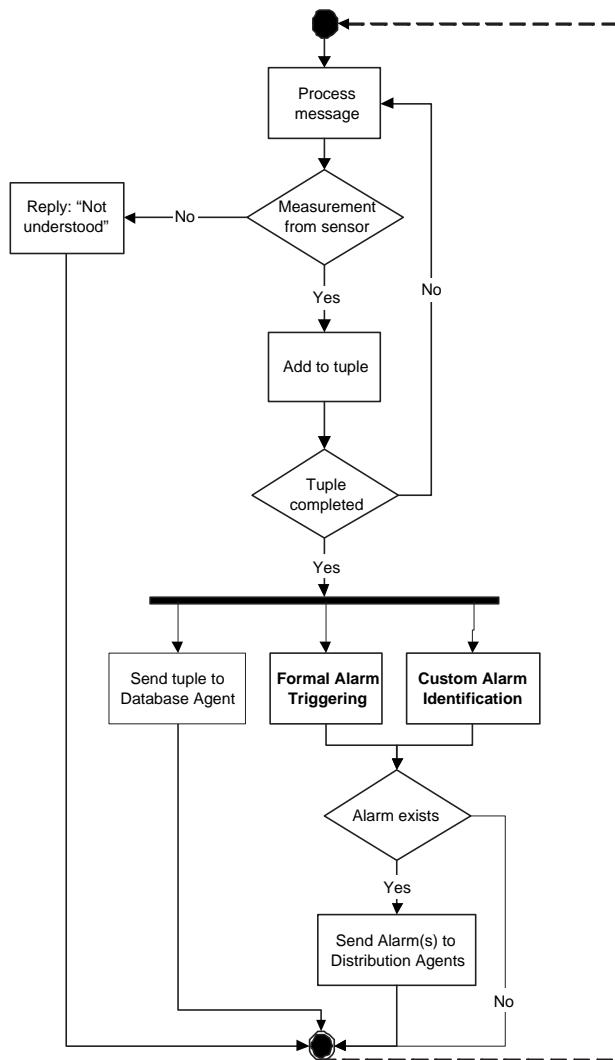
Στο σημείο αυτό υπογραμμίζεται ότι στη φάση αυτή της σχεδίασης και της ανάπτυξης του συστήματος δεν είναι απαραίτητος ο πλήρης καθορισμός των μηχανών συμπερασμού του πράκτορα. Τα πλήρη μοντέλα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 7.

Επίσης, ο CA υλοποιεί την κυκλική συμπεριφορά του JADE. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 6.8 με το διακεκομμένο αναδρομικό βέλος που ενώνει την τελική κατάσταση με την αρχική.

6.4.2 Πράκτορας Συναγερμού

Ο πράκτορας συναγερμού είναι υπεύθυνος για την ενεργοποίηση των συναγερμών, επίσημων και κατά παραγγελία. Οι επίσημοι συναγερμοί είναι εκείνοι που επιβάλλει ο νόμος και οριθετούν καταστάσεις πιθανά επικίνδυνες για την υγεία και την ασφάλεια των πολιτών. Οι κατά παραγγελία συναγερμοί είναι προειδοποιήσεις για τους χρήστες του συστήματος που αφορούν καταστάσεις που εκείνοι επιλέγουν. Στην παρούσα υλοποίηση, οι κατά παραγγελία συναγερμοί ενημερώνουν τους περιβαλλοντικούς επιστήμονες για συμβάντα που σχετίζονται με τη συγκέντρωση του οξοντος³ και αφορούν φαινόμενα

³Το οξον (O_3) είναι μια χημική ένωση απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία της ατμόσφαιρας του πλανήτη. Το στρώμα του οξοντος βρίσκεται στη στρατόσφαιρα και προστατεύει την επιφάνεια του πλανήτη από την υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου. Ωστόσο, η ύπαρξη του οξοντος κοντά στην επιφάνεια είναι επιβλαβής και απονοία συγκέντρωσης οξοντος αποτελεί ένα μέτρο ποιότητας του αέρα στο περιβάλλον.



Σχήμα 6.9: Η λογική δομή της συμπεριφοράς του πράκτορα συναγερμού
(Σημείωση: Οι μηχανές συμπερασμού σημειώνονται **έντονα**)

που μελετούν. Μια εξελιγμένη μορφή του συστήματος μπορεί να ενσωματώνει άλλους τύπους συναγερμών κατά παραγγελία, όπως προειδοποιήσεις για ασθενείς άσθματος, την πολιτική προστασία ή τη βιομηχανία.

Η ροή των εργασιών του πράκτορα συναγερμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.9. Πρώτα, ο Alarm DMA συγκεντρώνει τις μετρήσεις των αισθητήρων που έχουν προεπεξεργαστεί στο επίπεδο συνεισφοράς από τους πράκτορες διάγνωσης. Από τα μηνύματα των πρακτόρων CA, ο Alarm DMA συνθέτει την πλειάδα των μετρήσεων των αισθητήρων και μετά ενεργεί τρείς παράλληλες λειτουργίες:

- Στέλνει την πλειάδα των μετρήσεων στον πράκτορα ΒΔ, ώστε να αποθηκευθούν στη ΒΔ μετρήσεων.

- Ενεργοποιεί τους επίσημους συναγερμούς, μέσω της μηχανής συμπερασμού Formal Alarm Triggering Reasoning Engine (FAT-RE).
- Ενεργοποιεί τους συναγερμούς κατά παραγγελία, μέσω της μηχανής συμπερασμού Custom Alarm Triggering Reasoning Engine (CAT-RE).

Τέλος, οι συναγερμοί (επίσημοι και κατά παραγγελία) προωθούνται στον πράκτορα διανομής DA. Να σημειωθεί ότι η συμπεριφορά του Alarm DMA είναι επίσης χυκλική.

6.4.3 Πράκτορας Βάσης Δεδομένων

Ο πράκτορας ΒΔ είναι υπεύθυνος για την ανανέωση των ΒΔ Περιβαλλοντικών Μετρήσεων με τα δεδομένα που καταγράφουν οι αισθητήρες. Η εργασία αυτή, παρότι τετριμμένη, είναι μείζονος σημασίας για την απόδοση του συστήματος, καθότι υποκαθιστά ανθρώπους που είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση των δεδομένων. Ο πράκτορας ΒΔ λαμβάνει ένα μήνυμα από τον Alarm DMA που περιέχει την πλειάδα των τρέχουσων μετρήσεων. Αφού αποκτήσει πρόσβαση στη ΒΔ Μετρήσεων αποθηκεύει την πληροφορία στο κατάλληλο φορητό και τον αντίστοιχο πίνακα.

6.4.4 Πράκτορας διανομέας

Ο πράκτορας διανομέας προωθεί στους τελικούς χρήστες τους συναγερμούς που ενεργοποίησε ο Alarm DMA. Τη στιγμή που παραλαμβάνει ένα μήνυμα συναγερμού, ο DA επιλέγει τους κατάλληλους παραλήπτες και τα επιθυμητά μέσα διανομής με βάση τα προφίλ χρηστών. Στη συνέχεια, διαμορφώνει κατάλληλα την πληροφορία των συναγερμών και την αποστέλλει στους τελικούς παραλήπτες.

6.5 Υλοποίηση του Συστήματος Ο₃RTAA

6.5.1 Τεχνολογίες ανάπτυξης

Οι πράκτορες λογισμικού που σχεδιάστηκαν και καθορίστηκαν με λεπτομέρεια παραπάνω, υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια της πλατφόρμας Agent Academy, ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται στην εργασία [16]. Η διαδικασία κατασκευής των πρακτόρων με την πλατφόρμα Agent Academy περιλαμβάνει τον ορισμό των λειτουργιών των τύπων πρακτόρων, την οντολογία του πεδίου εφαρμογής, τις συνομιλίες πρακτόρων και την γλώσσα επικοινωνίας τους.

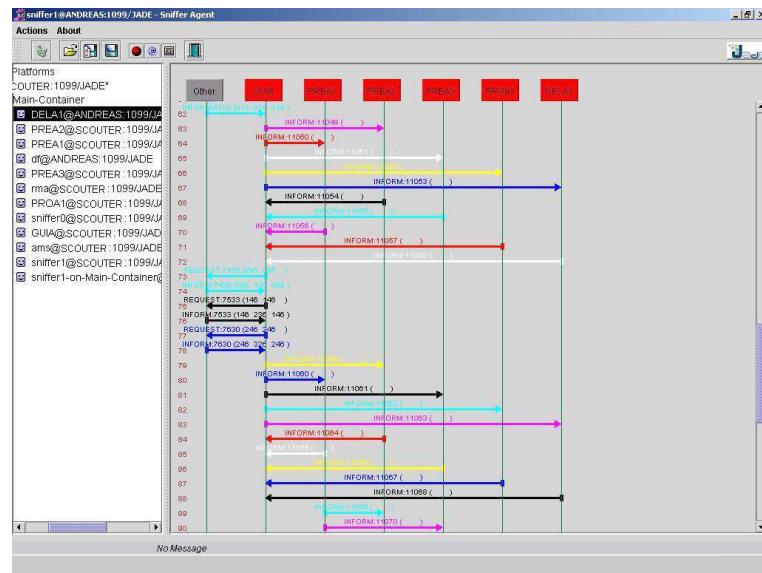
Το Agent Academy είναι ένα εργαλείο ανάπτυξης ΠΛ, ενδυναμωμένων με ικανότητες συμπερασμού, και το οποίο διατίθεται μέσω της άδειας less-GPL [1, 143, 142].

To Agent Academy υποστηρίζει την όλη διαδικασία ανάπτυξης μιας κοινότητας πρακτόρων λογισμικού. Συγκεκριμένα, μια εφαρμογή βασίζεται σε μια οντολογία, με βάση την οποία δημιουργούνται συμπεριφορές πρακτόρων, τύποι πρακτόρων και, τέλος, πράκτορες με περιορισμένες ικανότητες συμπεριφοράς. Στη συνέχεια, μέσω μιας διαδικασίας εκπαίδευσης, οι ΠΛ που κατασκευάστηκαν ενσωματώνουν μηχανές συμπεριφοράς, όπως αναφέρουμε και στην εργασία [16].

Η ανάπτυξη του συστήματος απαύτησε την συνδυασμένη χρήση μιας πλειάδας σύγχρονων διάφορων τεχνικών, προτύπων και τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν:

- Η πλατφόρμα JADE για την υλοποίηση των ΠΛ [26].
- Το πρόγραμμα σύνταξης οντολογιών και διαχείρισης γνώσης Protégé-2000.
- Ο πυρήνας JESS για την εκτέλεση των μηχανών συλλογισμού των πρακτόρων [68].

Τα πρότυπα της FIPA υιοθετήθηκαν για την επικοινωνία των πρακτόρων. Ένα στιγμιότυπο του συστήματος Ο₃RTAA από την πλατφόρμα JADE, όπου παρουσιάζεται η επικοινωνία των πρακτόρων απεικονίζεται στο Σχήμα 6.10.

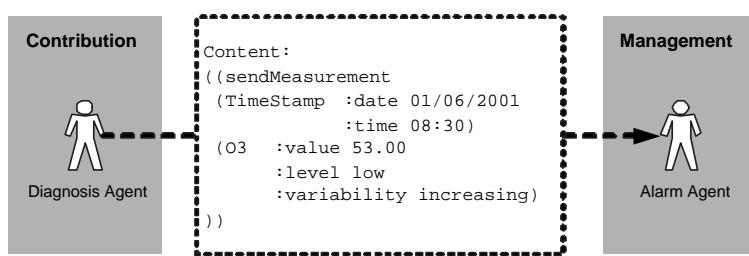


Σχήμα 6.10: Στιγμιότυπο της εφαρμογής Ο₃RTAA από το JADE

6.5.2 Η ροή της πληροφορίας

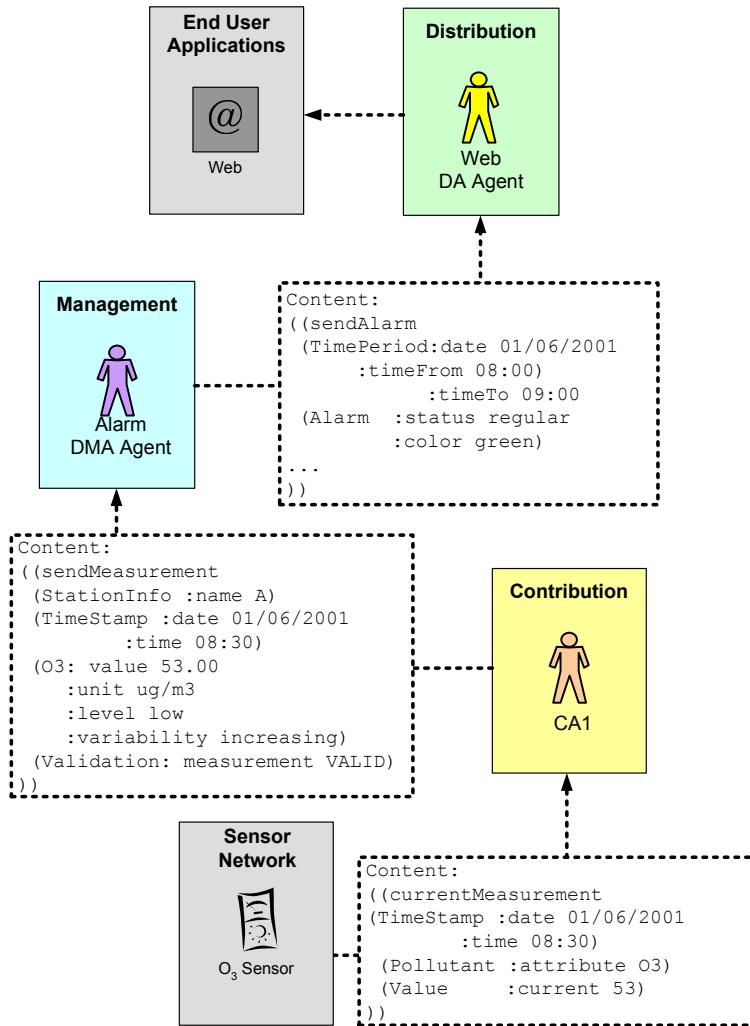
Στο Ο₃RTAA η πληροφορία ρέει ανάμεσα στους ΠΛ, με τη μορφή μηνυμάτων πρακτόρων, ενώ οι μηχανές συμπεριφοράς υποστηρίζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Ένα δείγμα μηνύματος που στέλνει ο $A_{CA}(O_3)$ στον $A_{DMA}(al)$ απεικονίζεται στο Σχήμα 6.11.

Χρησιμοποιώντας την οντολογία του O₃RTAA, ο CA που αντιστοιχεί στον αισθητήρα του όζοντος αποστέλλει την τρέχουσα συγκέντρωση του ρύπου στον Alarm DMA. Συγκεκριμένα το μήνυμα υλοποιεί το κατηγόριμα sendMeasurement, που ενσωματώνει δύο ΑΠΠ: το πρώτο είναι στιγμιότυπο του αντικειμένου TimeStamp, που ορίζει την ώρα καταγραφής της μέτρησης, ενώ το δεύτερο είναι στιγμιότυπο της έννοιας O₃, που κληρονομεί τα γνωρίσματα της γενικής κλάσης Pollutants, που όπως αναφέρθηκε στην §6.3.3 είναι η πραγματική τιμή (value), επίπεδο τιμών (level), και τάση (variability).



Σχήμα 6.11: Ο πράκτορας διάγνωσης του όζοντος αναφέρει στον πράκτορα συναγερμού την τρέχουσα μέτρησή του

Για να επιδείξουμε το περιεχόμενο των προηγμένων υπηρεσιών που παρέχει το σύστημα O₃RTAA, για την ολοκλήρωση των δεδομένων που καταγράφονται στον μετεωρολογικό σταθμό, την αποτίμηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας και την παροχή υπηρεσιών πληροφόρησης στους τελικούς χρήστες, παραθέτουμε ένα παράδειγμα (Σχήμα 6.12). Έστω λοιπόν ότι στο μετεωρολογικό σταθμό καταγράφεται μια νέα συγκέντρωση του όζοντος. Ο CA συλλέγει την τιμή του ρύπου και την επεξεργάζεται κατάλληλα. Η διαδικασία επικύρωσης της μέτρησης ενεργοποιείται μέσω της μηχανής συμπερασμού, και με βάση το αποτέλεσμα της, ενδεχομένως, εκτιμάται η εσφαλμένη μέτρηση. Ας υποθέσουμε ότι η μέτρηση είναι έγκυρη. Στην περίπτωση αυτή, ο CA προσαρτά τους σημασιολογικούς μετασχηματισμούς και την επικέτα επικύρωσης ('valid') στην τιμή της συγκέντρωσης και αποστέλλει το κατάλληλο μήνυμα στον πράκτορα Alarm DMA. Ο πράκτορας συναγερμού, με τη σειρά του, συγκεντρώνει τα μηνύματα που περιέχουν τις μετρήσεις του όζοντος και αποτίμα την ποιότητα της ατμόσφαιρας. Οι μηχανές συμπερασμού FAT-RE και CAT-RE ενεργοποιούνται και ο Alarm DMA αποφασίζει για το επίπεδο της ρύπανσης με βάση τους κατάλληλους δείκτες. Η απόφασή του (στην περίπτωση που εικονίζεται στο Σχήμα 6.12 είναι status: regular και color: green), κοινοποιείται στον πράκτορα διάχυσης, ο οποίος ενημερώνει τους κατάλληλους παραλήπτες μέσω ηλεκτρο-



Σχήμα 6.12: Η ροή της πληροφορίας διαμέσου των τριών επιπέδων του O₃RTAA και το περιεχόμενο των μηνυμάτων των πρακτόρων

νικού ταχυδρομείου.

Με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, η περιβαλλοντική πληροφορία προεπεξεργάζεται, μετασχηματίζεται και αποτιμάται χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση κάποιου ειδικού, ενώ μέσω ηλεκτρονικών υπηρεσιών καταλήγει στους τελικούς της αποδέκτες.

6.6 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφαμε ένα ΟΣΥΑΔΠ, που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας ΠΛ για την ενσωμάτωση προηγμένων χαρακτηριστικών και την παροχή υπηρεσιών πληροφόρησης και αποτίμησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας. Οι πράκτορες λογισμικού, δρώντας μεσολαβητικά, αποδίδουν την κατάλληλα επεξεργασμένη πληροφορία στους τελικούς της αποδέκτες (stakeholders).

Το σύστημα που υλοποιήθηκε είναι ενδυναμωμένο με προηγμένα χαρακτηριστικά, όπως η επικύρωση των καταγραφόμενων μετρήσεων, η εκτίμηση των ελλιπών μετρήσεων και ο υπολογισμός κατά παραγγελία συναγερμών, ενώ ταυτόχρονα αναλαμβάνει εργασίες όπως η παρακολούθηση, η αποθήκευση και οι υπηρεσίες πρόσβασης στα δεδομένα. Η αρχιτεκτονική των πρακτόρων του Ο3RTAA υποστηρίζει την επεκτασιμότητα της εφαρμογής.

Κεφάλαιο 7

Η διαδικασία λήψης αποφάσεων για την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα και η ενσωμάτωσή της σε πράκτορες

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογική θεώρηση και η πειραματική εφαρμογή της διαδικασίας υποστήριξης αποφάσεων στο σύστημα O₃RTAA. Επιδεικνύεται η λειτουργία των ΠΛ ως υπεύθυνους λήψης αποφάσεων για την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος στο επιχειρησιακό κέντρο ποιότητας αέρα στη Βαλένθια, Ισπανία.

7.1 Αποτίμηση της ποιότητας του αέρα

7.1.1 Δείκτες ποιότητας της ατμόσφαιρας

Συγκενριμένοι δείκτες (όρια, indicators) έχουν οριστεί τόσο στην Ευρώπη, όσο και σε όλο τον κόσμο για τον προσδιορισμό της ποιότητας της ατμόσφαιρας σε αστικές περιοχές. Ως παράδειγμα αναφέρονται η Ευρωπαϊκή Οδηγία 96/62/EK για την εκτίμηση και τη διαχείριση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος¹ και η Πράξη Καθαρού Αέρα της ομοσπονδιακής κυβέρνησης των ΗΠΑ για την πρόληψη της ρύπανσης και τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα.² Μια σε βάθος συζήτηση των δεικτών της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος και της σύνδεσής τους με πιθανές συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία είναι πέρα από τα πλαίσια της διατριβής. Ωστόσο, ένα σημείο εκκίνησης για τον αναγνώστη είναι η εργασία των Barratt et al. (2000) [19].

Γενικά, ο υπολογισμός των δεικτών ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος είναι μια απλή, πλήρως καθορισμένη, ευθεία διαδικασία που καθορίζεται από τις σχετικές οδηγίες και το νομικό πλαίσιο. Στην Ευρώπη, οι δείκτες ποιότητας καθορίζονται σε σχέση με την

¹European Directive 92/62/EEC Βλέπε: <http://europa.eu.int/comm/environment/air/ambient.htm>

²US Clean Air Act (1990) <http://www.epa.gov/oar/caa/contents.html>

μέση τιμή της συγκεντρωσης ενός ρύπου σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ακόμη, με βάση τους δείκτες ορίζονται και τα όρια ενημέρωσης κοινού (information threshold), όρια συναγερμού πληθυσμού (alarm threshold), καθώς και άλλα (μακροπρόθεσμα) όρια με στόχο την προστασία της υγείας των πολιτών. Η σχετική Ευρωπαϊκή οδηγία 92/62/EK καθορίζει ότι το ευρύ κοινό πρέπει να ενημερώνεται για την υπέρβαση των ορίων ενημέρωσης κοινού και συναγερμού πληθυσμού. Τα όρια και οι δείκτες που ισχύουν στην Ευρώπη συνοψίζονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1: Δείκτες της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος

Ρύπος	Μονάδες	Χαρακτηρισμοί περιοχών μετρήσεων						
		Χαμηλή	S	Μέση	I	Υψηλή	A	Υπερβολική
Όξον επιφανείας	ppb (μ.ο. 1ώρα)	< 50		50 – 89		90 – 179		≥ 180
Μονοξείδιο του άνθρακα	ppb (κυλ..μ.ο. 8ωρο)	< 10		10 – 14		15 – 19		≥ 20
Διοξείδιο του αζώτου	ppb (μ.ο. 1ώρα)	< 150		150 – 299		300 – 399		≥ 400
Διοξείδιο του θείου	ppb (μ.ο. 15')	< 100		100 – 199		200 – 399		≥ 400

S: Όριο βάσης, I : Όριο ενημέρωσης, A : Όριο συναγερμού

7.1.2 Προβλήματα και ο ανθρώπινος παράγοντας

Στα δίκτυα παρακολούθησης του περιβάλλοντος των ΕΚΠΑ, αστοχίες των αισθητήρων εξαιτίας δυσλειτουργιών, καθυστέρησης δικτύου ή θορύβου μπορούν να οδηγήσουν σε απώλεια ή διαταραχή των δεδομένων. Κατά συνέπεια, οι συνακόλουθες διαδικασίες υπολογισμού των δεικτών και ενημέρωσης του κοινού, είτε εξουδετερώνονται, είτε καθίστανται αναξιόπιστες. Με τον τρόπο αυτό, η αβεβαιότητα σε επίπεδο δεδομένων, που κληρονομείται από τα δίκτυα αισθητήρων, επηρεάζει τον αποτελεσματικό υπολογισμό των δεικτών ποιότητας του αέρα.

Η πρακτική που εφαρμόζουν τα ΕΚΠΑ, για την αντιμετώπιση του προβλήματος βασίζεται στην ενασχόληση εξειδικευμένου δυναμικού. Περιβαλλοντικοί επιστήμονες απασχολούνται για να αναθεωρούν δεδομένα, να επιτηρούν δίκτυα αισθητήρων και να ενεργοποιούν τους σχετικούς δείκτες ποιότητας της ατμόσφαιρας. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως **διασφάλιση και έλεγχος ποιότητας** των δεδομένων (Quality Assurance-Quality Control: QA/QC). Σχετικά, η Υπηρεσία Περιβαλλοντικής Προστασίας των ΗΠΑ (Environmental Protection Agency - EPA) προτείνει μια διαδικασία διασφάλισης και ελέγχου της ποιότητας των δεδομένων μέσω της χοήσης (πολύπλοκων) εργαλείων γραφικής αναπαράστασης και αναθεώρησης δεδομένων. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν στο προσωπικό "να εξετάζει γρήγορα τα δεδομένα που έχονται από τους αισθητήρες" [84]. Αντίστοιχα, στο ΕΚΠΑ του Λονδίνου, η ευέλικτη ανάλυση δεδομένων υποστηρίζεται μέσω στατιστικών εργαλείων[19], ενώ στο ΕΚΠΑ του Τέξας, οι επιστήμονες θέτουν εμπειρικά κριτήρια

για να επικυρώνουν τα δεδομένα και να κάνουν προβλέψεις.

Καθίσταται σαφές ότι, παρόλο που ο υπολογισμός των δεικτών ποιότητας του αέρα είναι μια σχετικά απλή διαδικασία, οι απαιτούμενες προπαρασκευαστικές εργασίες, όπως η επικύρωση των μετρήσεων και η υποκατάσταση των εσφαλμένων ή ελλιπών μετρήσεων είναι σύνθετα και απαιτητικά προβλήματα, που συνήθως αναλαμβάνουν ειδικοί επιστήμονες. Η διασφάλιση και ο έλεγχος της ποιότητας των δεδομένων είναι μια επίπονη εργασία για την οποία απαιτείται η εμπλοκή του ανθρώπινου παραγοντα, πράγμα που καθιστά την γενικότερη διαδικασία χρονοβόρα. Η Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος αναφέρει ότι τα έγκυρα, αναθεωρημένα από τους ειδικούς, δεδομένα είναι διαθέσιμα μετά από ένα έως έξι μήνες, ανάλογα με το κράτος-μέλος [115]. Για το λόγο αυτό, η αυτοματοποίηση της διαδικασία επικύρωσης των δεδομένων και της υποκατάστασης των ελλιπών μετρήσεων σε συνθήκες πίεσης χρόνου είναι πολύτιμη.

7.2 Η διαδικασία λήψης αποφάσεων

7.2.1 Περιγραφή του προβλήματος

Στην διαδικασία αποτίμησης του αέρα του περιβάλλοντος εμπλέκονται δύο κινητήριες δυνάμεις. Η πρώτη σχετίζεται με την κοινωνική απαίτηση για πρόσβαση στην πληροφορία και την ενημέρωση του κοινού τη στιγμή που κάποιο επικίνδυνο περιστατικό βρίσκεται σε εξέλιξη. Η δεύτερη αφορά την αβεβαιότητα των δεδομένων που αντανακλάται ως ένας τεράστιος φόρτος εργασίας για τους περιβαλλοντολόγους. Στο πλαίσιο αυτό, ένα ΟΣΥΑΔΠ αναμένεται όχι απλά να υπολογίζει τους δείκτες ποιότητας του αέρα περιβάλλοντος, αλλά να:

- α. Να αντιμετωπίζει τα προβλήματα αβεβαιότητας δεδομένων,
- β. Να προσαρμόζεται σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον,
- γ. Να παρέχει στους πολίτες έγκαιρη και έγκυρη πληροφόρηση.

Αυτές οι επιθυμητές ιδιότητες ενός ΟΣΥΑΔΠ αποτίμησης της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος υποδεικνύουν μια διαδικασία λήψης αποφάσεων αντίστοιχη με αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1. Προαπαιτείται η συγχώνευση όλων των καταγραφών από τους αισθητήρες στο σύστημα και στην συνέχεια ακολουθούν τα εξής βήματα της διαδικασίας λήψης αποφάσεων:

B-1 Η επικύρωση όλων των μετρήσεων, δηλαδή ο έλεγχος της αξιοπιστίας των δεδομένων και η επισήμανση των ελλιπών ή εσφαλμένων καταγραφών.

B-2 Προαιρετικά, η υποκατάσταση των μη έγκυρων καταγραφών.

B-3 Ο υπολογισμός των επισήμων δεικτών και άλλων προσαρμοσμένων ορίων για την αποτίμηση της ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος.

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 6, στο O₃RTAA τις παραπάνω εργασίες τις αναλαμβάνουν πράκτορες λογισμικού. Οι πράκτορες συνεισφοράς, λειτουργώντας ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων καλούνται να ενσωματώσουν μια στρατηγική για την διασφάλιση και τον έλεγχο της ποιότητας των καταγραφόμενων δεδομένων. Ενώ, ο πράκτορας Alarm DMA αναλαμβάνει τον υπολογισμό των δεικτών ποιότητας της ατμόσφαιρας.



Σχήμα 7.1: Η διαδικασία υποστήριξης αποφάσεων που εμπλέκεται σε ένα ΣΠΔ αναγνώρισης

7.2.2 Κόμβοι απόφασης

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία της παραγράφου 5.3.3, καθορίζουμε τους κόμβους απόφασης που ενσωματώνουν οι πράκτορες του O₃RTAA. Ο υπολογισμός των επισήμων και των κατά παραγγελία συναγερμών που υπολογίζει ο Alarm DMA είναι μια απλή διεργασία για την οποία η νομοθεσία ή οι περιβαλλοντολόγοι, αντίστοιχα, έχουν προδιαγράψει πλήρως καθορισμένους, εξηγήσιμους κανόνες. Προφανώς, η εργασία αυτή μπορεί πολύ εύκολα να αυτοματοποιηθεί και να ανατεθεί σε ένα σύστημα πρακτόρων ή άλλο υπολογιστικό σύστημα. Για το λόγο αυτό ακολουθήθηκε ένα **αιτιοκρατικό μοντέλο απόφασης**.

Ωστόσο, οι εργασίες που αφορούν τους κόμβους απόφασης επικύρωσης των μετρήσεων και υποκατάστασης των μη εγκύρων είναι ένα ενδιαφέρον επιστημονικό πρόβλημα

το οποίο σχετίζεται με τις τοπικές συνθήκες και εποχικά φαινόμενα. Η αντιμετώπιση των δυσκολιών που σχετίζονται με τα δυναμικά και αβέβαια χαρακτηριστικά των περιβαλλοντικών συστημάτων, αποτελεί πρόκληση για τις τεχνικές εξόρυξης γνώσης. Ο Huang (2003) υποδεικνύει ότι οι διαχειριζόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες μεταβάλλονται συντοχώς και γι' αυτό απαιτείται περιοδικά ανανεώσιμη υποστήριξη αποφάσεων [92]. Σε μια πρώτη ανάγνωση, οι παραπάνω ιδιότητες μπορούν να υλοποιηθούν μέσω της εκμάθησης από τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας τεχνικές εξόρυξης γνώσης. Ως εκ τούτου, για την υλοποίηση των κόμβων απόφασης επικύρωσης δεδομένων και εκτίμησης των ελλιπών μετρήσεων, ακολουθήθηκε μια **στρατηγική εξόρυξης γνώσης** που εξηγείται παρακάτω.

7.2.3 Χρήση περιβαλλοντικών μετρήσεων για την επαγωγή μοντέλων πρόβλεψης

Παλαιότερες ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην χρήση τεχνικών εξόρυξης γνώσης σε ΣΠΔ κυρίως για την πρόγνωση επεισοδίων. Διάφορα μοντέλα έχουν δημιουργηθεί για την πρόγνωση (ενδεχομένως επικίνδυνων) φαινομένων στο κοντινό μέλλον. Για παράδειγμα, κλασσικά στατιστικά μοντέλα παλινδρόμησης [29, 108, 93], ανάλυση χρονοσειρών [32] και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα [183, 231] έχουν εφαρμοστεί για την πρόγνωση των τιμών συγκεντρωσης του όζοντος. Επίσης, τεχνικές περιπτωσιολογικού συμπερασμού (Case-based reasoning) [116] και μέθοδοι επαγωγής δένδρων κατηγοριοποίησης και παλινδρόμησης (Classification and regression trees, CART) [103] έχουν αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη συγκεντρώσεων διαφόρων αέριων ρύπων. Παρομοίως, ένα έμπειρο σύστημα οδηγούμενο από τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη του αποχρωματισμού των κοραλλιών³ [85].

7.2.4 Η προοπτική χρήσης των επαγωγικών μοντέλων πρόβλεψης στο O₃RTAA

Σε όλες τις προαναφερθείσες προσεγγίσεις, οι τεχνικές εξόρυξης γνώσης χρησιμοποιήθηκαν για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων που σχετίζεται με την **πρόγνωση επεισοδίων**. Αντιθέτως, στο πλαίσιο της αποτίμησης της ποιότητας της ατμόσφαιρας σε επιχειρησιακό επίπεδο που αναλαμβάνει το σύστημα O₃RTAA, ο βασικός στόχος της εφαρμογής τεχνικών εξόρυξης γνώσης και επαγωγής συμπερασματικών μοντέλων προσεγγίζεται από μια διαφορετική προοπτική:

Ο κύριος στόχος της εφαρμογής τεχνικών εξόρυξης γνώσης σε περιβαλλοντικά δεδομένα δεν περιορίζεται στην πρόγνωση επερχόμενων περιστατικών,

³Σημείωση: Ο αποχρωματισμός των κοραλλιών αποτελεί ένδειξη δυσμενών περιβαλλοντικών συνθηκών σε υδατινά οικοσυστήματα.

αλλά επεκτείνεται στην *έγκαιρη αποτίμηση* της τρέχουσας κατάστασης του περιβάλλοντος.

Η διαφοροποίηση αυτή στην προσέγγισή μας είναι μια συνέπεια των απαιτήσεων των ΟΣΥΑΔΠ πίεσης χρόνου: Η υποστήριξη των αποφάσεων είναι απαραίτητο να παρέχεται με σκοπό την έγκαιρη και αποτελεσματική διανομή αξιόπιστων πληροφοριών δίχως τη μεσολάβηση του ανθρώπινου παραγόντα.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζουμε την ανάπτυξη στρατηγικών λήψης αποφάσεων οδηγούμενων από τα δεδομένα για την αποτίμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης (machine learning).

7.2.5 Υπόθεση εργασίας

Στο συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής, μεγάλοι όγκοι περιβαλλοντικών δεδομένων που καταγράφηκαν από τα δίκτυα παρακολούθησης του περιβάλλοντος έχουν αναθεωρηθεί από ειδικούς, οι οποίοι προσάρτησαν ετικέτες επικύρωσης (validation tags) και δείκτες ποιότητας της ατμόσφαιρας. Η υπόθεση εργασίας είναι ότι η εφαρμογή τεχνικών εξόρυξης δεδομένων σε αυτές τις βάσεις μπορεί να καταλήξει σε αξιόπιστα μοντέλα πρόβλεψης, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για τη λήψη αποφάσεων. Ενδιαφέροντα πρότυπα που βρίσκονται κρυμμένα μέσα στα περιβαλλοντικά δεδομένα μπορούν να ανεβρεθούν και στη συνέχεια να ενσωματωθούν σε ένα ΟΣΥΑΔΠ. Με τον τρόπο αυτό, μοντέλα λήψης αποφάσεων οδηγούμενα-από-τα-γεγονότα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη μιας αυτόματης διαδικασίας έκδοσης συναγερμών και ενημέρωσης του κοινού, την στιγμή που κάποιο επεισόδιο λαμβάνει χώρα. Η προσέγγιση με ένα μοντέλο λήψης αποφάσεων οδηγούμενο-από-τα-γεγονότα είναι πλεονεκτική, καθότι λαμβάνει υπόψη τα τοπικά χαρακτηριστικά του εν λόγω προβλήματος, τα οποία μπορεί να το διαφοροποιούν από γενικές αρχές ή εμπειρικούς κανόνες. Κατά συνέπεια, η συνολική διαδικασία λήψης αποφάσεων εκτελείται με μεγαλύτερη ακρίβεια, μιας και τα μοντέλα οδηγούμενα-από-τα-δεδομένα προσαρμόζουν τη μέθοδο επίλυσης προβλημάτων στις τοπικές συνθήκες και στις χρονικά εξελισσόμενες τάσεις.

7.3 Εξόρυξη γνώσης από δεδομένα ποιότητας αέρα

7.3.1 Πειραματική διάταξη

Για να επιδείξουμε την ικανότητα των τεχνικών εξόρυξης γνώσης να αντιμετωπίσουν προβλήματα αβεβαιότητας των δεδομένων που συναντώνται σε ΟΣΥΑΔΠ, μελετήθηκε

η χρήση τους στην εκπαίδευση δύο μηχανών συμπερασμού (τεχνητών εκτιμητών). Οι εκτιμητές αυτοί καλούνται ο ένας να επικυρώσει τις καταγραφόμενες τιμές συγκεντρωσης του όξιντος επιφανείας και ο δεύτερος την υποκατάσταση των ελλιπών ή εσφαλμένων μετρήσεων. Οι δύο εκτιμητές ακολουθούν στρατηγικές οδηγούμενες-από-τα-δεδομένα που με επαγωγικό τρόπο εξορύχθηκαν από περιβαλλοντικά δεδομένα που καταγράφηκαν στην περιοχή της Βαλένθια, στην Ισπανία.

7.3.2 Διαθέσιμα δεδομένα και προεπεξεργασία

Τα διαθέσιμα δεδομένα συλλέχθηκαν σε τρεις μετεωρολογικούς σταθμούς, που είναι εγκατεστημένοι σε τρεις διακριτές τοποθεσίες στην περιοχή της Βαλένθια (Grau, Onda, Morella). Η θέση των σταθμών εικονίζεται στο Σχήμα 7.2



Σχήμα 7.2: Οι μετεωρολογικοί σταθμοί στην περιοχή της Βαλένθια, Ισπανία. (Η εικόνα δημιουργήθηκε με το AirView) [144]

Οι σταθμοί αυτοί καταγράφουν μετρήσεις ανά δεκαπέντε πρώτα λεπτά της ώρας για εννέα μεταβλητές, στις οποίες περιλαμβάνονται τόσο μετεωρολογικές παράμετροι, όσο και συγκεντρώσεις αέριων ρύπων. Η περίοδος δειγματοληψίας των διαθέσιμων δεδομένων αφορά την περίοδο 1999-2001 (τρία έτη). Οι καταγραφόμενες μεταβλητές και οι αντίστοιχες μονάδες μέτρησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2. Τα πρωτογενή δεδομένα συνοδεύονται από τις επικέτες επικύρωσης και τους δείκτες ποιότητας του αέρα του περιβάλλοντος, οι οποίοι έχουν προσαρτηθεί από περιβαλλοντικούς επιστήμονες με το χέρι, κατά τη διάρκεια της υπάρχουσας διαδικασίας αναθεώρησης δεδομένων του CEAM. Η επικέτα επικύρωσης χαρακτηρίζει την αντίστοιχη καταγραφή της συγκεντρωσης του όξιντος, ως έγκυρη (a) ή εσφαλμένη (l). Οι δείκτες ποιότητας της συγκεντρωσης του όξιντος του περιβάλλοντος αντιστοιχούν στις περιοχές τιμών ποιότητας του αέρα που ορίστηκαν για την περιοχή της Βαλένθια [131]. Συγκεκριμένα, η περιοχή τιμών του όξο-

ντος χαρακτηρίζεται ως χαμηλή (*low*), μέση (*medium*), υψηλή (*high*) ή υπερβολική (*very high*) και αντιστοιχίζεται στις περιοχές τιμών: $0 - 49\mu g/m^3$, $50 - 89\mu g/m^3$, $90 - 179\mu g/m^3$, και $\geq 180\mu g/m^3$.

Πίνακας 7.2: Αέριοι ρύποι και μετεωρολογικές παραμέτροι

Μεταβλητή	Σύμβολο	Τύπος	Μονάδες
1 Ημερομηνία	<i>D</i>	date	$\eta\eta - \mu\mu - \epsilon\epsilon$
2 Ώρα	<i>T</i>	time	$\omega\omega : \lambda\lambda$
3 Διοξείδιο του θείου	<i>SO₂</i>	real	$\mu g/m^3$
4 Όζον του περιβάλλοντος	<i>O₃</i>	real	$\mu g/m^3$
5 Μονοξείδιο του αζώτου	<i>NO</i>	real	$\mu g/m^3$
6 Διοξείδιο του αζώτου	<i>NO₂</i>	real	$\mu g/m^3$
7 Οξείδια του αζώτου	<i>NO_x</i>	real	$\mu g/m^3$
8 Ταχύτητα του ανέμου	<i>VEL</i>	real	<i>m/s</i>
9 Διεύθυνση του ανέμου	<i>DIR</i>	real	<i>deg</i>
10 Θερμοκρασία	<i>TEM</i>	real	$^{\circ}C$
11 Σχετική υγρασία	<i>HR</i>	real	%
12 Επικέτα επικύρωσης όζοντος	<i>VAL</i>	nominal	α (օρθή) \perp (εσφαλμένη)
13 Δείκτης στάθμης του όζοντος	<i>O₃Level</i>	nominal	L ($0 - 49\mu g/m^3$) M ($50 - 89\mu g/m^3$) H ($90 - 179\mu g/m^3$) V ($180\mu g/m^3$)

Τα αρχεία δεδομένων περιέχουν 105 216 εγγραφές για καθέναν από τους τρεις σταθμούς. Συνολικά είναι διαθέσιμες 315 648 εγγραφές, εκ των οποίων οι 16 304 εγγραφές χαρακτηρίζονται ως εσφαλμένες, και αντιστοιχούν στο 5.2% του συνόλου. Η εσφαλμένη μέτρηση της συγκέντρωσης του όζοντος μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, όπως πόλωση, θόρυβος, βλάβη του αισθητήρα ή του δικτύου μετάδοσης. Ως αποτέλεσμα, για περίπου τις μισές εσφαλμένες μετρήσεις δεν καταγράφηκε απολύτως τίποτα, ενώ για τις υπόλοιπες η ένδειξη που καταγράφηκε απορρίφθηκε από τον ειδικό επιστήμονα που εξέτασε τα δεδομένα. Η τιμή του δείκτη ποιότητας του όζοντος παίρνει τέσσερις ετικέτες (L, M, H, V). Η κατανομή των εγγραφών στις τέσσερις κλάσεις για όλα τα αρχεία δεδομένων είναι: 27.8%, 41.7%, 27.5% and 0.2%, αντίστοιχα. Τα στατιστικά για τα εννέα αρχεία δεδομένων παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

7.4 Δημιουργία των μοντέλων απόφασης

7.4.1 Μοντέλο υποστήριξης αποφάσεων για την επικύρωση καταγραφόμενων μετρήσεων

Η επικύρωση των μετρήσεων είναι εν γένει ένα πρόβλημα προσέγγισης συνάρτησης, που στα δίκτυα παρακολούθησης του περιβάλλοντος έχει αντιμετωπιστεί με τη χρήση διάφορων τεχνικών. Ενδεικτικά, αναφέρονται στατιστικές μέθοδοι [37], ανάλυση πρώτων

Πίνακας 7.3: Στατιστικά για τα αρχεία περιβαλλοντικών δεδομένων

#	Σταθμός	Έτος	Εγγραφές	Μετρήσεις συγκεντρώσεων όζοντος			Επίπεδα τιμών όζοντος			
				Ορθές	Εσφαλμένες	Ελλιπείς	L	M	H	V
1		1999	35,040	33,390	1,650	1,246	15,931	12,366	5,405	88
2	GRAU	2000	35,136	33,699	1,437	1,199	17,878	11,109	4,830	120
3		2001	35,040	33,187	1,853	925	19,971	12,294	1,742	108
4		1999	35,040	30,470	4,569	3,100	1,082	14,570	16,240	46
5	MORE	2000	35,136	31,881	3,255	607	2,653	15,054	16,779	43
6		2001	35,040	33,041	1,998	1,256	2,575	15,116	16,068	24
7		1999	35,040	34,318	722	238	8,626	17,279	8,851	46
8	ONDA	2000	35,136	34,881	255	147	9,241	17,460	8,267	21
9		2001	35,040	34,475	565	469	9,777	16,283	8,482	29

συνιστώσων [82], φίλτρα Kalman [187], δίκτυα πίστης [7], ή κανόνες συσχέτισης [230].

Ωστόσο, το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως εκτίμηση αν η καταγραφόμενη μέτρηση είναι ορθή ή εσφαλμένη. Εφόσον είναι διαθέσιμες οι ετικέτες επικύρωσης που κατέγραψε ο χρήστης το πρόβλημα επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων μπορεί να οριστεί ξανά, ως πρόβλημα κατηγοριοποίησης. Για τα συγκεκριμένα δεδομένα της Βαλένθια, παρατηρούμε ότι η ετικέτα επικύρωσης παίρνει δύο τιμές (α και 1) οπότε το πρόβλημα επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων καθίσταται ένα πρόβλημα κατηγοριοποίησης δύο κλάσεων. Εξαιτίας της άνισης κατανομής των δύο ετικετών, είναι απαραίτητο να επικεντρωθεί η προσοχή στην ανίχνευση την κλάσης της μειοψηφίας (1).

Το μοντέλο υποστήριξης αποφάσεων που αναπτύχθηκε για την επικύρωση καταγραφόμενων μετρήσεων χρησιμοποιεί την υπό εξέταση τιμή του όζοντος καθώς και τις πρόσφατες μετρήσεις του αισθητήρα του όζοντος και διάφορα μέτρα αυτών που υπολογίστηκαν στα αντίστοιχα παράθυρα χρόνου (ψευδομεταβλητές). Τα εννέα αρχεία περιβαλλοντικών δεδομένων υπέστησαν κατάλληλη προεπεξεργασία για τον υπολογισμό των σχετικών χαρακτηριστικών και διαμορφώθηκαν τα αντίστοιχα αρχεία γι' αυτό το πείραμα. Οι μεταβλητές του μοντέλου απόφασης φαίνονται στον Πίνακα 7.4. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται εννέα μεταβλητές εισόδου, που υπολογίζονται σε ένα άνυσμα ιστορίας ενενήντα λεπτών (διήλαδή οι τελευταίες έξι καταγραφές του αισθητήρα αποθηκεύονται ενδιάμεσα). Έξοδος του μοντέλου είναι η κατηγορική μεταβλητή `O3val`, η οποία παίρνει τις τιμές α και 1.

7.4.2 Μοντέλο υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση ελλιπών μετρήσεων

Η εκτίμηση της στάθμης της συγκέντρωσης του όζοντος του περιβάλλοντος είναι καταρχήν εφικτή. Η συγκέντρωση του όζοντος του περιβάλλοντος είναι γνωστό ότι σχετίζεται τό-

Πίνακας 7.4: Μεταβλητές του μοντέλου αποφάσης για την επικύρωση των καταγραφόμενων μετρήσεων

O3	Η τρέχουσα τιμή του όζοντος
O3-15	Η τιμή του όζοντος πριν 15 λεπτά
O3-45	Η τιμή του όζοντος πριν 45 λεπτά
O3-75	Η τιμή του όζοντος πριν 75 λεπτά
MinMax30	Η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του όζοντος τα τελευταία 30 λεπτά
MinMax60	Η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του όζοντος τα τελευταία 60 λεπτά
MinMax90	Η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής του όζοντος τα τελευταία 90 λεπτά
O3val	Η αντίστοιχη επικέτα (օρθή (a)/εσφαλμένη(1))

σο με τις συγκεντρώσεις των οξειδίων του αζώτου (NO , NO_2 , NO_X) [33], όσο και με τις μετεωρολογικές συνθήκες [93]. Παλαιότερες μελέτες έχουν επιδείξει ότι η εκτίμηση ελλιπών περιβαλλοντικών μετρήσεων μπορεί να γίνει με τεχνικές στατιστικής παλινδρόμησης, όπως για παράδειγμα με γραμμική παρεμβολή [84]. Ωστόσο, τα κλασσικά μοντέλα παλινδρόμισης περιορίζονται από εκ προοιμίου υποθέσεις, όπως η δομή του μοντέλου. Μια εμπειρική προσέγγιση του προβλήματος βασισμένη στα δεδομένα προτείνεται για την εκτίμηση ελλιπών μετρήσεων συγκέντρωσης όζοντος μέσω τεχνικών κατηγοριοποίησης.

Το πρόβλημα ορίζεται ως εξής: Στην περίπτωση που ένας αισθητήρας όζοντος του περιβάλλοντος δεν καταγράφει καμία μέτρηση ή η μέτρηση του απορρίπτεται από την διαδικασία επικύρωσης, τότε σκόπιμο είναι να εκτιμηθεί η τιμή της συγκέντρωσης του όζοντος από τις υπόλοιπες μεταβλητές που είναι διαθέσιμες. Υπό αυτήν την έννοια, το πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πρόβλημα προσέγγισης συνάρτησης. Καθότι όμως αυτό που πρώτιστα ενδιαφέρει δεν είναι η ακριβής τιμή της συγκέντρωσης που λείπει αλλά η περιοχή τιμών στην οποία ανήκει, το πρόβλημα τελικά μπορεί να επαναπροσδιοριστεί ως πρόβλημα κατηγοριοποίησης.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος ως προβλήματος κατηγοριοποίησης, αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα απόφασης για την εκτίμηση της στάθμης της συγκέντρωσης του όζοντος του περιβάλλοντος. Το πρώτο μοντέλο χρησιμοποιεί ως μεταβλητές εισόδου μόνο τις ταυτόχρονες μετρήσεις των άλλων αερίων ρύπων και των μετεωρολογικών μεταβλητών. Με τον τρόπο αυτό, επιχειρείται η δημιουργία ενός σχήματος λήψης αποφάσεων χωρίς μνήμη, καθότι χρησιμοποιούνται μόνον ταυτόχρονες μετρήσεις. Στο δεύτερο μοντέλο προσαρτώνται και ιστορικές μετρήσεις της συγκέντρωσης του όζοντος. Στο μοντέλο αυτό, γίνεται χρήση μιας περιορισμένης μνήμης για την αποθήκευση προηγούμενων τιμών του όζοντος. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ένας buffer τριάντα λεπτών, δηλαδή οι δύο πιο πρόσφατες μετρήσεις του όζοντος αποθηκεύονται και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση

της στάθμης της συγκέντρωσης του όξοντος. Και στα δύο μοντέλα μεταβλητή εξόδου είναι η περιοχή τιμών της συγκέντρωσης του όξοντος που λείπει, μια κατηγοριακή μεταβλητή που για το συγκεκριμένο πρόβλημα της περιοχής της Βαλένθια, παίρνει τέσσερεις τιμές (L, M, H, V). Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στα δύο μοντέλα απόφασης συνοψίζονται στον Πίνακα 7.5. Τα διαθέσιμα αρχεία δεδομένων προεπεξεργάστηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι κατάλληλα για την εκπαίδευση των μοντέλων απόφασης βασισμένων-σταδεδομένα.

Πίνακας 7.5: Μεταβλητές των μοντέλων υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση ελλιπών μετρήσεων

SO_2	Η ταυτόχρονη τιμή της συγκέντρωσης του SO_2
NO	Η ταυτόχρονη τιμή της συγκέντρωσης του NO
NO_2	Η ταυτόχρονη τιμή της συγκέντρωσης του NO_2
NO_x	Η ταυτόχρονη τιμή της συγκέντρωσης του NO_x
VEL	Η ταυτόχρονη τιμή της Ταχύτητας του Ανέμου (VEL)
TEM	Η ταυτόχρονη τιμή της Θερμοκρασίας (TEM)
HR	Η ταυτόχρονη τιμή της Σχετικής Υγρασίας (HR)
O_3-15	Η τιμή της συγκέντρωσης του O_3 πριν 15 λεπτά
O_3-30	Η τιμή της συγκέντρωσης του O_3 πριν 30 λεπτά
O_3Class	Η περιοχή τιμών της συγκέντρωσης του όξοντος που λείπει (L, M, H, V)

Οι μεταβλητές με πλάγια γράμματα χρησιμοποιούνται μόνο στο (δεύτερο) μοντέλο με μνήμη.

7.5 Αποτελέσματα

7.5.1 Επαγωγή δένδρων απόφασης, εκπαίδευση και έλεγχος

Μια εμπειρική προσέγγιση για τη δημιουργία μοντέλων λήψης αποφάσεων βασισμένων στα δεδομένα χρησιμοποιήθηκε και για τις δύο περιπτώσεις. Ο αλγόριθμος C4.5 επαγωγής δένδρων απόφασης του Quinlan [172] χρησιμοποιήθηκε και συγκεκριμένα η υλοποίησή του στο περιβάλλον ανάλυσης γνώσης WEKA [222] με την ονομασία J48. Η χρήση του C4.5 έγινε για την επαγωγή δένδρων απόφασης των οποίων οι κόμβοι καθορίζουν ανισότητες για τις τιμές των αντίστοιχων περιβαλλοντικών μεταβλητών εισόδου και τα φύλλα του καθορίζουν την ετικέτα εξόδου (απόφαση). Δύο μέθοδοι ακαδέματος των δένδρων απόφασης χρησιμοποιήθηκαν για την βελτίωση των ικανοτήτων λήψης αποφάσεων των δένδρων απόφασης: α. Κλάδεμα με βάση τον παραγόντα εμπιστοσύνης των κανόνων και β. Κλάδεμα με βάση τη μείωση του σφάλματος.

Συνολικά, αναπτύχθηκαν, εκπαιδεύτηκαν και ελέγχθηκαν είκοσι τρία σχήματα εκπαίδευσης με τον αλγόριθμο C4.5, χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες επιλογές:

- Επαγωγή δένδρου απόφασης χωρίς τη χρήση κάποιας τεχνικής ακαδέματος (Unprunned U) - 1 σχήμα.

- β. Επαγωγή δένδρου απόφασης με τη χρήση της τεχνικής κλαδέματος με βάση τον παράγοντα εμπιστοσύνης των κανόνων (C), για τις τιμές $C = 0.05, 0.1, \dots, 0.45, 0.5$ (Confidence Factor Prunning C) - 10 σχήματα.
- γ. Επαγωγή δένδρου απόφασης με τη χρήση της τεχνικής κλαδέματος με βάση τη μείωση του σφάλματος, για επαναλήψεις $N = 2, 3, 5, 10, 20, \dots, 500, 1000$ (Reduced Error Prunning N) - 12 σχήματα.

Τα παραπάνω σχήματα εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκαν για την επαγωγή δένδρων απόφασης τόσο για το μοντέλο επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων, όσο και για το μοντέλο εκτίμησης ελλιπών μετρήσεων. Τα είκοσι τρία σχήματα εκπαίδευσης εφαρμόστηκαν σε όλα τα προετοιμασμένα αρχεία μετρήσεων. Η εκπαίδευση (επαγωγή) των δένδρων απόφασης έγινε με κοινό τρόπο ανεξάρτητα από σταθμό, έτος ή μοντέλο απόφασης. Συγκεκριμένα, έγιναν εννέα πειράματα για κάθε μοντέλο ή δεκαοκτώ πειράματα στο σύνολο, από 23 σχήματα εκπαίδευσης το καθένα.

Η κοινή διαδικασία ελέγχου και εκπαίδευσης ήταν η ακόλουθη: Για κάθε πείραμα οι πρώτες μισές εγγραφές (που αντιστοιχούν στην περίοδο Ιανουάριος-Ιούνιος του έτους) χρησιμοποιήθηκαν για εκπαίδευση. Οι υπόλοιπες μισές εγγραφές (που αντιστοιχούν στην περίοδο Ιούλιος-Δεκέμβριος του έτους) χρησιμοποιήθηκαν για έλεγχο. Η διαδικασία επιλέχθηκε για να εξαριθμωθεί η ικανότητα του αλγόριθμου C4.5 για την επαγωγή δένδρων απόφασης που είναι προσαρμόσιμα τόσο στο χώρο (δηλαδή σταθμό), όσο και στο χρόνο (δηλαδή έτος). Στο σύνολο επιβλέφθηκε η εκπαίδευση $9 \times 23 = 207$ επαναλήψεων για κάθε μοντέλο ή 414 επαναλήψεις συνολικά.

7.5.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Αποτελέσματα για το μοντέλο επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων

Μια συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το μοντέλο επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων παρατίθεται στον Πίνακα 7.6. Τα αποτελέσματα του δένδρου που υπερτερεύει σε καθένα από τα εννέα πειράματα παρουσιάζεται μαζί με τις παραμέτρους του σχήματος εκπαίδευσης και τον αριθμό των κανόνων του δένδρου. Συνολικά, η ακρίβεια ορθής επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων στα δεδομένα ελέγχου είναι εξαιρετικά υψηλή, καθότι ο μέσος όρος επιτυχίας αγγίζει το 98.3%. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μειοψηφούσα κλάση αντιστοιχεί στο 5.2% του συνόλου των εγγραφών, θεωρήθηκε ως ένα μέτρο αποδοχής των αποτελεσμάτων η ακρίβεια ορθού συμπερασμού των δένδρων που ανέρχεται στο 95%. Υπό το σκεπτικό αυτό θεωρείται αξιοπρόσεκτη

η ικανότητα συμπερασμού των δένδρων που εξάχθηκαν για την επικύρωση των καταγραφόμενων μετρήσεων. Ακόμη, η μειοψηφούσα κλάση (1) αναγνωρίζεται σωστά στις περισσότερες των περιπτώσεων. Η ακρίβεια αναγνώρισης της μειοψηφούσας κλάσης υπερβαίνει το 88% στις περισσότερες περιπτώσεις και το μέτρο ανάκλησής της έχει μέση τιμή που εγγίζει το 71.5%. Καθίσταται λοιπόν φανερό ότι τα δένδρα απόφασης που προέκυψαν αναγνωρίζουν με επιτυχία τις λανθασμένες μετρήσεις, όχι μόνο όταν πρόκειται για ελλιπείς μετρήσεις αλλά και στις περιπτώσεις που ο ειδικός επιστήμονας τις είχε απορρίψει. Υπ’ αυτήν την έννοια, η χρήση δένδρων λήψης αποφάσεων συνιστούν μία εναλλακτική μέθοδο συμπερασμού για την επικύρωση των καταγραφόμενων μετρήσεων βασισμένη στα δεδομένα με ικανότητα προσαρμογής τόσο στη χρονική και χωρική διάσταση των δεδομένων, όσο και τις εμπειρίες του ειδικού επιστήμονα που αναθεώρησε τα δεδομένα.

Αποτελέσματα για το μοντέλο εκτίμησης ελλιπών μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 7.4.2, αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα απόφασης για την εκτίμηση των ελλιπών ή εσφαλμένων μετρήσεων της συγκεντρωσης του όζοντος. Το πρώτο χρησιμοποιεί μόνο τις ταυτόχρονες συγκεντρώσεις άλλων αερίων ρύπων και μετεωρολογικών μεταβλητών, και ως εκ τούτου αποτελεί ένα μοντέλο δίχως μνημονικό. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα δένδρα που υπερτερούν στα εννέα πειράματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.7. Το δεύτερο μοντέλο συνδυάζει τις σύγχρονες τιμές των μεταβλητών των υπολοίπων ρύπων και των μετεωρολογικών μεταβλητών με τις πρόσφατες τιμές της συγκεντρωσης του όζοντος. Τα αποτελέσματα του μοντέλου με μνήμη συνοψίζονται στην Πίνακα 7.8. Τα δένδρα χωρίς μνήμη έχουν πολύ καλή επίδοση, ωστόσο εκείνα με μνήμη υπερτερούν σε όλες τις περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα για το μοντέλο με μνήμη έχουν ακρίβεια αναγνώρισης με μέση τιμή 93.75% στα δεδομένα ελέγχου. Τα εξαιρετικά αποτελέσματα υποδηλώνουν την ικανότητα των τεχνικών εξόρυξης γνώσης να δημιουργήσουν μοντέλα υποστήριξης αποφάσεων για την εκτίμηση της στάθμης του όζοντος με μεγάλη επιτυχία.

7.5.3 Ενσωμάτωση των μοντέλων απόφασης στους ΠΛ - Επίδειξη

Τα μοντέλα συμπερασμού που εξιρύχθηκαν χρησιμοποιώντας τεχνικές εξόρυξης γνώσης, ενσωματώθηκαν στους CA με τη χρήση του Agent Academy. Ενδεικτικά δένδρα αποφάσεων για τα δύο μοντέλα παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.3 και 7.3. παρουσιάζονται Για το λόγο αυτό, τα μοντέλα γνώσης αναπαραστήθηκαν σε μορφή PMML και μεταγλωττί-

Πίνακας 7.6: Αποτελέσματα για το μοντέλο επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων (εκπαίδευση και έλεγχος)

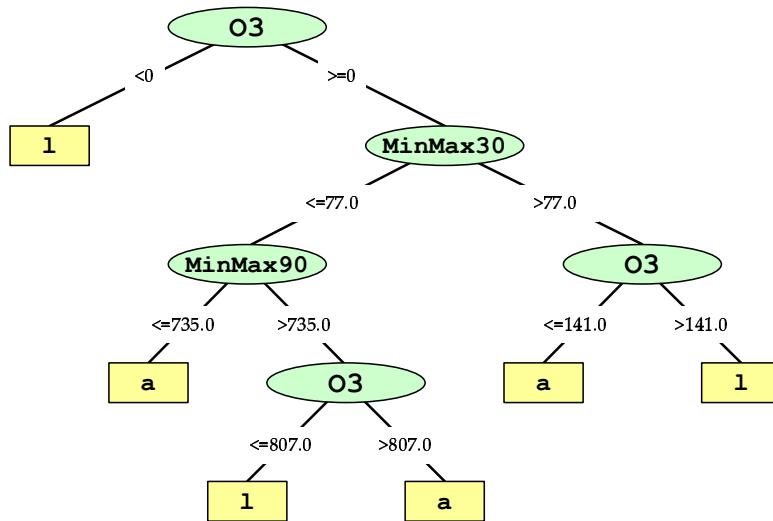
Αρχείο δεδομένων	Σταθμός	Φάση Εκπαίδευσης			Φάση Έλεγχου		
		Ακρίβεια Αναγνώρισης	Επιλογές Σχήματος	Αριθμός Κανόνων	Ακρίβεια αναγνώρισης (συνολικά)	Ανάκληση (για την επικέτα 1)	
GRAU	1999	99.62	-N 5	10	98.64	89.47	40.91
	2000	99.77	-N 3	4	99.68	98.88	83.02
	2001	99.91	-U	35	95.29	93.71	57.20
MORE	1999	99.69	-C 0.5	13	97.45	96.92	85.41
	2000	98.41	-N 30	15	99.47	88.12	97.67
	2001	98.69	-N 10	15	97.48	86.79	79.96
ONDA	1999	99.64	-N 3	3	97.72	93.03	32.69
	2000	99.75	-C 0.05	8	99.80	61.90	78.00
	2001	99.86	-N 3	6	99.74	99.69	88.01

Πίνακας 7.7: Αποτελέσματα για το μοντέλο εκτίμησης ελλιπών μετρήσεων (μοντέλο δύχως μνήμη)

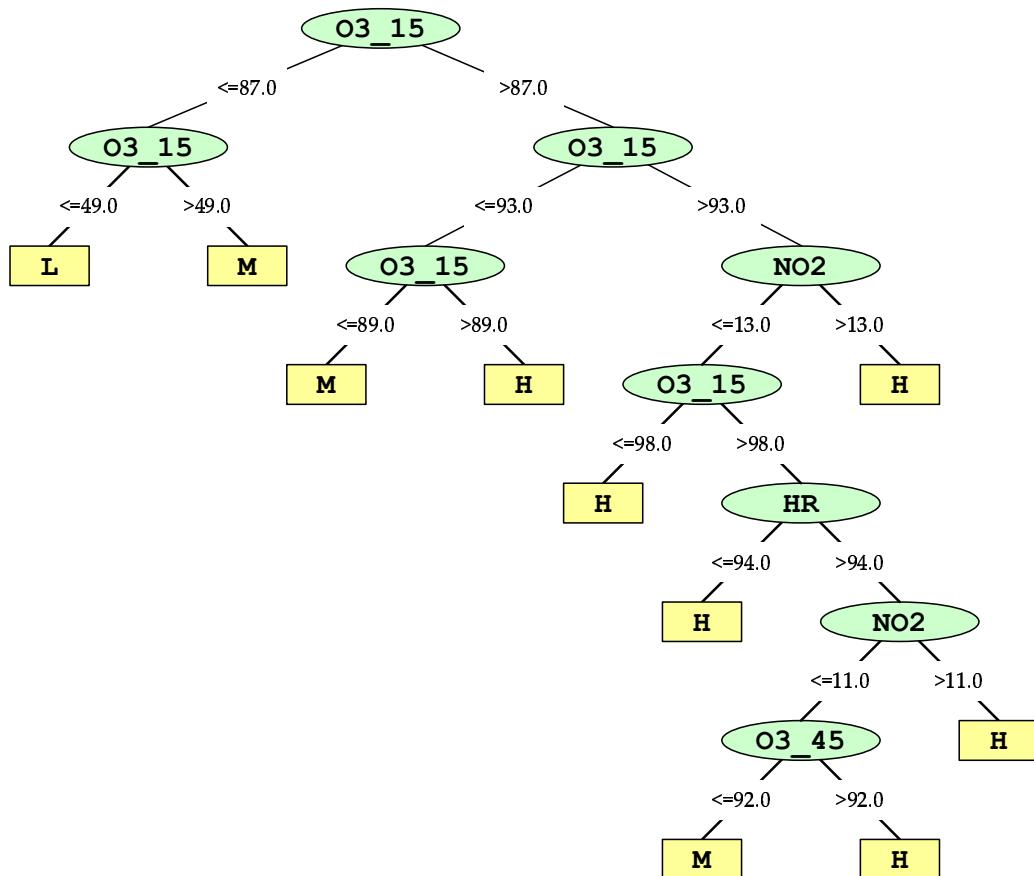
Αρχείο δεδομένων	Αναγνώριση (εκπαίδευση)	Επιλογές Σχήματος	Αριθμός Κανόνων	Αναγνώριση (έλεγχος)
Σταθμός	Έτος			
GRAU	1999	79.45	N 300	53
	2000	79.66	N 300	40
	2001	86.15	N 200	72
MORE	1999	87.41	N 20	248
	2000	87.29	N 2	355
	2001	84.52	N 30	235
ONDA	1999	75.37	N 300	63
	2000	73.22	N 200	85
	2001	65.72	N 1000	24

Πίνακας 7.8: Αποτελέσματα για το μοντέλο εκτίμησης ελλιπών μετρήσεων (μοντέλο με μνήμη)

Αρχείο δεδομένων	Αναγνώριση (εκπαίδευση)	Επιλογές Σχήματος	Αριθμός Κανόνων	Αναγνώριση (έλεγχος)
Σταθμός	Έτος			
GRAU	1999	94.03	N 10	71
	2000	94.97	C 0.05	68
	2001	96.29	N 2	68
MORE	1999	97.58	N 50	7
	2000	96.69	C 0.05	4
	2001	97.49	N 50	20
ONDA	1999	90.68	N 1000	3
	2000	91.70	N 3	64
	2001	92.45	N 30	11



Σχήμα 7.3: Δένδρο αποφάσεων για το μοντέλο επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων (για το σταθμό ONDA και το έτος 2001)



Σχήμα 7.4: Δένδρο αποφάσεων για το μοντέλο εκτίμησης ελλιπών μετρήσεων (για το σταθμό ONDA και το έτος 2001)

```

<PMML>
  <DataDictionary numberOfFields="8">
  ...
  </DataDictionary>
  <TreeModel modelName="...">
    <MiningSchema>
      <MiningField name="O3" usageType="active" />
      <MiningField name="O3_15" usageType="active" />
      <MiningField name="O3_45" usageType="active" />
      <MiningField name="O3_75" usageType="active" />
      <MiningField name="MinMax30" usageType="active" />
      <MiningField name="MinMax60" usageType="active" />
      <MiningField name="MinMax90" usageType="active" />
      <MiningField name="O3val" usageType="predicted"/>
    </MiningSchema>
    ...
    <Node score="a">
      <SimplePredicate field="O3" operator="lessOrEqual" value="0" />
      <Node score="l"><TRUE /></Node>
      <Node score="a">
        <SimplePredicate field="O3" operator="greaterThan" value="0" />
        <Node score="a">
          <SimplePredicate field="MinMax30" operator="lessOrEqual" value="77" />
          <Node score="a">
            <SimplePredicate field="MinMax90" operator="lessOrEqual" value="735" />
            <Node score="a"><TRUE /></Node>
          </Node>
          <Node score="a">
            <SimplePredicate field="MinMax90" operator="greaterThan" value="735" />
            <Node score="a">
              <SimplePredicate field="O3" operator="lessOrEqual" value="807" />
              <Node score="l"><TRUE /></Node>
            </Node>
            <Node score="a">
              <SimplePredicate field="O3" operator="greaterThan" value="807" />
              <Node score="a"><TRUE /></Node>
            </Node>
          </Node>
        <Node score="a">
          <SimplePredicate field="MinMax30" operator="greaterThan" value="77" />
          <Node score="a">
            <SimplePredicate field="O3" operator="lessOrEqual" value="141" />
            <Node score="a"><TRUE /></Node>
          </Node>
          <Node score="a">
            <SimplePredicate field="O3" operator="greaterThan" value="141" />
            <Node score="l"><TRUE /></Node>
          </Node>
        </Node>
      </Node>
    </Node>
  ...
  </TreeModel>
</PMML>

```

(defrule rule-0 (O3 ?O3)
 (test (<= ?O3 0))
 => (store O3val l))

(defrule rule-1 (O3 ?O3)
 (test (> ?O3 0))
 (MinMax30 ? MinMax30)
 (test (<= ?MinMax30 77))
 (MinMax90 ? MinMax90)
 (test (<= ?MinMax90 735))
 => (store O3val a))

(defrule rule-2 (MinMax90 ?MinMax90)
 (test (<= ?MinMax90 735))
 (O3 ?O3)
 (test (<= ?O3 807))
 => (store O3val a))

(defrule rule-3 (MinMax90 ?MinMax90)
 (test (> ?MinMax90 735))
 (O3 ?O3)
 (test (<= ?O3 807))
 => (store O3val a))

(defrule rule-4 (O3 ? O3)
 (test (> ? O3 807))
 => (store O3val a))

(defrule rule-5 (MinMax30 ?MinMax30)
 (test (> ?MinMax30 77))
 (O3 ? O3)
 (test (<= ?O3 141))
 => (store O3val l))

(defrule rule-6 (O3 ? O3)
 (test (<= ? O3 141))
 => (store O3val a))

Σχήμα 7.5: Αναπαράσταση του μοντέλου επικύρωσης των καταγραφόμενων μετρήσεων (για το σταθμό ONDA και το έτος 2001, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.3) σε μορφή PMML (αριστερά) και οι αντίστοιχοι κανόνες προκτόρων σε JESS (δεξιά)

στηκαν σε κανόνες εκτελέσιμους σε περιβάλλον JESS [16]. Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζεται ένα τμήμα των κανόνων σε PMML και των αντίστοιχων κανόνων JESS.

7.6 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο τούτο παρουσιάστηκε η εφαρμογή τεχνικών εξόρυξης γνώσης για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων που εμπλέκονται σε ένα ΣΠΔ αναγνώρισης. Η εμπειρική μέθοδος που ακολουθήθηκε κατέληξε σε αξιόπιστα μοντέλα λήψης αποφάσεων. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιδεικνύουν την ικανότητα των τεχνικών εξόρυξης γνώσης για υποστήριξη της διαδικασίας έγκαιρης λήψης αποφάσεων με τρόπο οδηγούμενο από τα δεδομένα, ικανό να προσαρμόζεται στις τοπικές συνθήκες και σε χρονικά εξελισσόμενες τάσεις. Συγκεκριμένα, η βασισμένη στα δεδομένα προσέγγιση κατόρθωσε να αντιμετωπίσει την αβεβαιότητα δεδομένων που εμφανίζεται σε ένα ΣΠΔ Αναγνώρισης Ποιότητας Αέρα Περιβάλλοντος. Τα δύο κύρια προβλήματα τέτοιων δικτύων, που αφορούν την χαμηλή ποιότητα των δεδομένων και τις χρονικά εξελισσόμενες συνθήκες, αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία.

Το σύστημα O₃RTAA εγκαταστάθηκε ως πιλοτική εφαρμογή στο Κέντρο Μεσογειακών Περιβαλλοντικών Μελετών (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo), στη Βαλένθια, Ισπανία, ως έργο επίδειξης του ερευνητικού προγράμματος Agent Academy, σε συνεργασία με την εταιρεία IDI-EIKON.

Το συγκεκριμένο σύστημα έχει παρουσιαστεί στο διεθνές περιοδικό Management of Environmental Quality [13]. Αναφορά στο σύστημα O₃RTAA και την εργασία του κεφαλίου αυτού γίνεται στην κεντρική ιστοσελίδα της AAAI⁴ για τις εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης στην γεωργία, τη διαχείριση φυσικών πόρων και το περιβάλλον. Επίσης, το O₃RTAA έχει αναφερθεί σε άρθρα των NewsFactor Innovation [132], ACM TechNews [4], AI in the News [3] και Complexity Digest [71], ενδεικτικά του ενδιαφέροντος της επιστημονικής κοινότητας.

⁴<http://www.aaai.org/AITopics/html/agri.html> [2]

Μέρος III

**Πράκτορες Λογισμικού για την
προσομοίωση σεναρίων και την
υποστήριξη αποφάσεων**

Κεφάλαιο 8

Ο μηχανισμός διάχυσης της επιρροής σε μια κοινωνία πρακτόρων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα κοινωνικό μοντέλο διάχυσης της επιρροής, για την προσομοίωση της διαπροσωπικής επικοινωνίας. Το μοντέλο αυτό ενσωματώνεται στη συνέχεια σε ένα ΟΣΥΑΠΣ, που λέγεται DAWN, και αναπτύχθηκε ως ΣΠακολούθωντας την μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4. Τμήματα του κεφαλαίου έχουν παρουσιαστεί στο συνέδριο της iEMSs (2004) και τη HELECO (2005) και έχουν δημοσιευτεί στα περιοδικά IEEE CiSE και SCS Simulation.

8.1 Εισαγωγικά

8.1.1 Γενικά (σκοπός-κίνητρο)

Καθημερινά, οι καταναλωτές εκτίθενται σε διαφημιστικές εκστρατείες που φιλοδοξούν να επιδράσουν στην διαδικασία λήψης αποφάσεών τους και τελικά να επηρεάσουν την συμπεριφορά τους. Ωστόσο, τα μηνύματα των ΜΜΕ, ακόμη και όταν έχουν άμεση πρόσβαση σε μεγάλα ακροατήρια, δεν είναι πάντα αποδοτικά (υπό την έννοια της εκπλήρωσης των στόχων του πελάτη που διαφημίζεται). Μερικές φορές μπορεί να έχουν τα εντελώς αντίθετα αποτελέσματα από τα επιθυμητά. Αυτό συμβαίνει διότι η **διαπροσωπική επικοινωνία** (Mouth-to-mouth communication) [199] παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στον τρόπο που α. διαμορφώνεται η συμπεριφορά του καταναλωτή, β. εισάγονται οι νεωτερισμοί, και γ. οικοδομείται η φήμη ενός προϊόντος. Διαμέσου των καναλιών της καθημερινής κοινωνικής επαφής, φίλοι, συγγενείς, συνάδελφοι, γείτονες και γνωστοί επηρεάζουν τις καταναλωτικές πρακτικές του κάθε ατόμου. Αναγνωρίζοντας το φαινόμενο αυτό, μια σειρά από υπολογιστικά πειράματα διαξάγονται για να διερευνήσουν πώς μια εκστρατεία ενημέρωσης μπορεί να επηρεάσει τις συνήθειες του καταναλωτή και κατά συνέπεια

τις μελλοντικές πωλήσεις ενός αγαθού η προϊόντος.

Η κοινωνική αλληλεπίδραση και η διαπροσωπική επιρροή έχουν μελετηθεί ευρέως από τους κοινωνιολόγους, τους οικονομολόγους και τους διαφημιστές. Η διάχυση της πληθώρας των ερεθισμάτων, που στέλνουν τα MME στο κοινό, είναι κοινά παραδεκτό ότι αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία που σχετίζεται με τις διαπροσωπικές επαφές και τον κοινωνικό ιστό. Για το λόγο αυτό, οι εκστρατείες ενημέρωσης θεωρείται ότι έχουν έμμεσο αντίκτυπο στην συμπεριφορά του καταναλωτή. Ωστόσο, οι προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας (Macro-level simulation) που περιλαμβάνουν κοινωνικές παραμέτρους στα μοντέλα τους, όπως την δύναμη της διαφήμισης ή τον απόηχο μιας εκστρατείας ενημέρωσης, συνήθως περιορίζονται σε γενικευμένες και μάλλον απλοϊκές προσεγγίσεις.

Σε μια προσπάθεια να αναπαρασταθεί το φαινόμενο με ένα σημασιολογικά πιο συνεπή τρόπο, αλλά και για να μοντελοποιηθεί πιο ζεαλιστικά, αναπτύξαμε ένα **μηχανισμό διάχυσης της επιρροής** (Influence diffusion mechanism), ακολουθώντας τις αρχές της Κοινωνικής Προσωμοίωσης με Πράκτορες (ΚΠμΠ). Το μοντέλο υλοποιείται ως ένα ΣΠ, που αποτελείται από μια κοινωνία αλληλεπιδρώντων, αυτόνομων, Πρακτόρων-Καταναλωτών (Consumer agents ή CA). Σε ένα περιβάλλον εικονικού κοινωνικού ιστού, οι ΠΛ προσομοιώνουν τις κοινωνικές αλληλεπιδράσεις και μέσω του μηχανισμού διάχυσης της επιρροής, πείθουν ο ένας τον άλλον και παίρνουν αποφάσεις. Ο μηχανισμός αυτός επιδείχθηκε σε μια εφαρμογή που προσπαθεί να προσομοιώσει την ανταπόκριση των καταναλωτών νερού σε μια εκστρατεία ενημέρωσης μιας μεγάλης αστικής περιοχής για την εξοικονόμηση του νερού.

8.1.2 Προσομοίωση με μοντέλα πολλών πρακτόρων

Η **κοινωνική προσομοίωση με πράκτορες** (Agent-based social simulation ή ΚΠμΠ) αναδείχθηκε τα τελευταία χρόνια ως αποτέλεσμα πολυθεματικών ερευνητικών προσπαθειών, που σχετίζονται με τη μοντελοποίηση με πράκτορες (Agent-based-modeling), τη τεχνητή ζωή (Artificial life), την κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη (Distributed Artificial Intelligence), και τις γνωστικές επιστήμες (Cognitive science). Στην περίπτωση αυτή, η έννοια του **πράκτορα λογισμικού** χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει τα φυσικά αίτια (actors), τα ευπλεκόμενα μέρη (stakeholders), τους φυσικούς οργανισμούς, και γενικότερα τις οντότητες που σχετίζονται με το προσομοιόμενο σύστημα. Οι διάφορες μέθοδοι της ΚΠμΠ [73] έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα σε μεγάλο εύρος πεδίων, που περιλαμβάνει την οικολογία, τις κοινωνικές επιστήμες, τη φομποτική, την περιβαλλοντική αποτίμηση και τα παιχνίδια με τον υπολογιστή. Σκοπός της ΚΠμΠ αποτελεί η μελέτη των μοντέλα δράσης

ενός συνόλου από αυτόνομα άτομα, είτε για την επίτευξη ενός κοινού σκοπού, είτε για την εξίγγιση της κοινής συμπεριφοράς βάσει των χαρακτηριστικών των ατόμων ενός συνόλου. Υπό την έννοια αυτή, οι τεχνικές ΚΠμΠ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για **προσομοιώσεις μικρής κλίμακας** (Micro-level simulations), που εξερευνούν τον τρόπο διαμόρφωσης των συνηθειών του καταναλωτή, ως συνέπεια μιας εκστρατείας ενημέρωσης.

Τελευταία, έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα προσομοίωσης μικρής κλίμακας για την προσομοίωση των διαπροσωπικών σχέσεων και των δυναμικών σχηματισμού άποψης (Opinion dynamics). Ανάμεσα σε αυτά είναι τα μοντέλα Sznajd-Weron για την διαμόρφωση των τιμών [197, 198] και την εξέλιξη των ατομικών απόψεων [219]. Τέτοια μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της κοινωνικής απόκρισης στα σήματα των MME και τις συνέπειες της διαπροσωπικής επικοινωνίας σε "ανταγωνιστικά" περιβάλλοντα, όπως στις προεδρικές εκλογές των ΗΠΑ, σε αγορές δυοπωλίου ή ολιγοπωλίου και στη διείσδυση νέων προϊόντων.

Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κοινωνική προσομοίωση που σχετίζεται με τη διαχείριση φυσικών πόρων, όπως για παράδειγμα η εφοδιαστική αλυσίδα του νερού στις αστικές περιοχές. Αυτό συμβαίνει διότι η εφοδιαστική αλυσίδα του νερού στις αστικές περιοχές αντανακλά μια ιδιόμορφη μονοπωλιακή αγορά ενός φυσικού αγαθού, του οποίου η αξία συμπεριλαμβάνει μια οικονομική, αλλά και μία περιβαλλοντική διάσταση. Πράγματι, η ατομική κατανάλωση του νερού δε σχετίζεται αποκλειστικά με την τιμή του, αντιθέτως συνδέεται με την αντίληψη και τη συμπεριφορά του ατόμου, την περιβαλλοντική του επαγρύπνηση και την κοινωνική του υπευθυνότητα. Γίνεται αντιληπτό ότι, ακόμη και αν κάποιοι άνθρωποι έχουν παρόμοιες απόψεις για τις περιβαλλοντικές αξίες, ωστόσο δεν έχουν την ίδια καταναλωτική συμπεριφορά και πολύ περισσότερο δεν έχουν την ίδια διάθεση να τροποποιήσουν τη συμπεριφορά τους αυτή. Για μια τέτοια ιδιόρρυθμη αγορά αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ΚΠμΠ για τη διερεύνηση των συνεπειών μιας εκστρατείας ενημέρωσης στην αστική ζήτηση του νερού.

8.2 Από τις θεωρίες κοινωνικής επικοινωνίας στο μηχανισμό διάχυσης της επιρροής

8.2.1 Μοντέλα κοινωνικής επικοινωνίας

Το απλούστερο μοντέλο κοινωνικής επιρροής που προσομοιώνει το πώς το κοινό αντιδρά στα μηγύματα των MME είναι το απλό **μοντέλο "ερεθίσματος-απόκρισης"** (Stimulus-response model), σύμφωνα με το οποίο τα MME μπορούν να επηρεάζουν το κοινό άμεσα

και ομοιόμορφα. Συγκεκριμένα, μέσω των μηνυμάτων τους ερεθίζουν το κοινό, το οποίο αποκρίνεται και έτσι επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το μοντέλο αυτό θεωρεί τα άτομα ενός κοινωνικού συνόλου ως παθητικούς αποδέκτες και εγκαταλείφθηκε τη δεκαετία του 1960, μετά την περίφημη μελέτη των Katz και Lazarsfeld [107] που εισήγαγε **το μοντέλο επικοινωνίας με ροή δύο βημάτων** (Two-step flow communication model). Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, τα σήματα των MME δεν επηρεάζουν άμεσα όλη την κοινωνία. Αντιθέτως, διεισδύουν μέσω του δικτύου των κοινωνικών συνδέσεων. Συγκεκριμένα, το μοντέλο επικοινωνίας με ροή δύο βημάτων περιγράφει την διάδοση της επιρροής σε μια κοινωνία βασιζόμενο στην **ατομική συμπεριφορά** (Individual behavior). Τα μηνύματα επιρροής των MME διαδίδονται στον κοινωνικό ιστό, δια μέσου μεταδοτικών ατόμων, οι οποίοι ονομάζονται "γνωμηγέτες" (Opinion leader) και οι οποίοι υποτίθεται ότι έχουν την εκτίμηση των οικείων και των γνωστών τους. Η συμπεριφορά των τελευταίων επηρεάζεται έμμεσα από τους γνωμηγέτες και γι'αυτό ονομάζονται "**ακόλουθοι κοινής γνώμης**" (Opinion follower). Η προσέγγιση της διάχυσης της επιρροής μέσω της ροής δύο βημάτων θεωρεί τους γνωμηγέτες να συμπεριφέρονται ως μεσάζοντες, ανάμεσα στα απρόσωπα MME (διαφημιστές) και την πλειοψηφία της κοινωνίας (καταναλωτές) [186]. Υπό την έννοια αυτή, η αντίδραση στα μηνύματα των MME μεσιτεύεται από τις κοινωνικές σχέσεις, ενώ η αποτελεσματικότητα των μηνυμάτων δεν είναι άμεση, αλλά περιορίζεται από τις διαπροσωπικές σχέσεις και την κοινωνική επιρροή. Η θεωρία της επικοινωνίας με ροή δύο βημάτων επικρίθηκε γιατί θεωρεί όλους τους γνωμηγέτες ως ενεργούς παραλήπτες και όλους τους ακόλουθους της κοινής γνώμης ως παθητικούς αποδέκτες της πληροφορίας που διανέμουν τα MME [137]. Πρόσφατες έρευνες ισχυρίζονται ότι η διάχυση των ιδεών δεν είναι μια απλή διαδικασία δύο βημάτων. Μια προσέγγιση **πολλαπλών βημάτων** είναι γενικότερα αποδεκτή, καθώς συνδυάζει την άμεση και την έμμεση φύση της κοινωνικής επιρροής σε πολλαπλά επίπεδα. Ωστόσο, οι θεωρίες επικοινωνίας με ροή δύο ή περισσότερων βημάτων είναι θεμελιώδεις για την περιγραφή του φαινομένου της διάχυσης της πληροφορίας σε μια κοινωνία καταναλωτών. Απότοκα των θεωριών είναι το "**μοντέλο διάχυσης των νεωτερισμών**" [181] και το "**μοντέλο του ιού ιδεών**" (ideavirus model) [75]. Συνοψίζοντας, οι φίλοι, οι γνωστοί, οι γείτονες, οι συγγενείς, οι συνάδελφοι κ.ο.κ. ασκούν επιρροή στην καταναλωτική συμπεριφορά ενός ατόμου [186].

Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η ατομική συμπεριφορά και λήψη αποφάσεων παιζει σημαντικό ρόλο για το σχηματισμό της κοινής γνώμης και τάσεων της κοινωνίας. Για το λόγο αυτό, οι συμβατικές μακροσκοπικές προσεγγίσεις προσομοίωσης των εκστρατειών ενημέρωσης υποφέρουν από την στρεβλή αναπαράσταση των γενεσιοναργών παραγόντων

με σημασιολογικώς φτωχές αναπαραστάσεις. Πιο συνεπείς προσεγγίσεις που αναπαριστούν τις ακριβείς γενεσιοναργές αυτίες, όπως η ατομική συμπεριφορά, είναι ικανές να αποκαλύψουν εναλλακτικές προσεγγίσεις των φαινομένων που μελετώνται, να επαναδιατυπώσουν τις συνέπειες των κοινωνικών παραμέτρων και να διερευνήσουν την συσχέτιση της ατομικής συμπεριφοράς με τις κοινές αλλαγές. Υποκινούμενοι από τις παραπάνω διαπιστώσεις, αναπτύξαμε έναν μηχανισμό διάχυσης της επιρροής, υιοθετώντας μια προσέγγιση ΚΠμΠ για την προσομοίωση της ατομικής καταναλωτικής συμπεριφοράς. Η κοινωνική αλληλεπίδραση ανάμεσα στους καταναλωτές και η διάδοση των μηνυμάτων επιρροής ανάμεσα τους προσομοιώνονται στο ΟΣΥΑΠΣ πολλών πρακτόρων που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό με την επωνυμία DAWN.

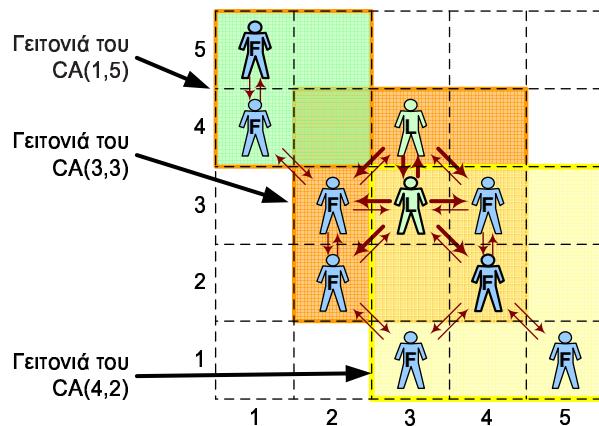
8.2.2 Κοινωνικό πλέγμα και η έννοια της γειτονίας

Στο εικονικό περιβάλλον του DAWN η έννοια του πράκτορα χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των πραγματικών καταναλωτών. Οι εν λόγω πράκτορες ονομάζονται **πράκτορες καταναλωτές (CA)** και κατανέμονται με τυχαίο τρόπο σε ένα τετραγωνικό δικτύωμα. Μια εκστρατεία ενημέρωσης δίνει το έναντιμα στους καταναλωτές, ο καθένας από τους οποίους επηρεάζεται σε διαφορετικό βαθμό μέσω των έμμεσων καναλιών της κοινωνικής αλληλεπίδρασης. Συγκεκριμένα, οι γειτονικοί CA ανταλλάσσουν μηνύματα προσομοιώνοντας με τον τρόπο αυτό την διαπροσωπική επικοινωνία. Κάθε CA υλοποιεί ταυτόχρονα δύο συμπεριφορές (ρόλους):

- a. Ο CA προσομοιώνει το **ρόλο του καταναλωτή**, που αφορά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με την κατανάλωση. Η συμπεριφορά του καταναλωτή βασίζεται στην αντίληψη του πράκτορα για το εικονικό του περιβάλλον και επιτρέπει στον πράκτορα να επηρεάζεται από τους γείτονές του.
- β. Ο CA προσομοιώνει το **ρόλο του κοινωνικού γείτονα**, που σχετίζεται με τη δύναμη ενός καταναλωτή να επηρεάζει τους γείτονές του, λειτουργώντας ως γνωμηγέτης που επηρεάζει τους ακόλουθους της κοινής γνώμης. Ο ρόλος του γείτονα επιτρέπει στον CA να επηρεάζει τους γνωστούς του.

Μια διευθέτηση εικονικής κοινωνικής γειτονιάς παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.1. Οι πράκτορες καταναλωτές (συμβολίζονται με $CA_i : CA(x, y)$) τοποθετούνται τυχαία επί ενός διδιάστατου πλέγματος μεγέθους 5×5 και σχηματίζουν γειτονιές τύπου Moore ακτίνας ίσης με ένα, το οποίο σημαίνει ότι ο καθένας μπορεί να έχει μέχρι και 8 γείτονες¹.

¹Ο ορισμός της γειτονιά του Moore είναι αυτός του Weisstein [218]



Σχήμα 8.1: Εικονική γειτονιά πρακτόρων καταναλωτών και οι δυνάμεις επιρροής

Έτσι για παράδειγμα, ο $CA(1,4)$ είναι ο μόνος γείτονας του $CA(1,5)$, ενώ ο $CA(3,3)$ είναι γείτονας με τους $CA(2,2)$, $CA(2,3)$, $CA(3,4)$, $CA(4,2)$ και $CA(4,3)$. Παρομοίως, κάθε CA_i ορίζει μια γειτονιά, εντός της οποίας υλοποιείται ένα μοντέλο επικοινωνίας σύνθετης ροής, δια των μηνυμάτων των πρακτόρων.

Να σημειωθεί ότι το πλέγμα αναπαριστά κοινωνική και όχι γεωγραφική εγγύτητα. Η γενικότητα της προσέγγισης δεν περιορίζεται από τη η χρήση του τετραγωνικού πλέγματος. Μάλιστα, διαφορετικοί τύποι δικτύων για την αναπαράσταση του κοινωνικού ιστού μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως τρισδιάστατα πλέγματα, γράφοι ή δίκτυα ελευθέρας κλίμακας (scale-free networks) [18]. Ωστόσο η αποτύπωση του κοινωνικού ιστού και η αναπαράστασή του μέσω τεχνητών δικτύων είναι μια επίπονη και πολύπλοκη διαδικασία, αντικείμενο μελέτης της κοινωνιολογίας και πέραν του σκοπού της διατριβής.

8.2.3 Ο μηχανισμός διάχυσης της επιρροής

Ο μηχανισμός διάχυσης της επιρροής υλοποιείται μέσω της επικοινωνίας των πρακτόρων σε κάθε μια γειτονιά. Σε αντιστοιχία με τους πραγματικούς καταναλωτές, που αλληλοεπηρεάζονται μέσω της διαπροσωπικής επικοινωνίας, οι πράκτορες καταναλωτές προσομοιώνουν το φαινόμενο μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων πρακτόρων. Η **δύναμη της επιρροής** (Power of influence) που έχουν οι άνθρωποι αναπαρίσταται χρησιμοποιώντας αριθμητικά κοινωνικά βάρη (*sw*) που ανταλλάσσονται οι CA . Με βάση τη μεταφορά αυτή, οι γνωμηγέτες, δηλαδή εκείνοι που έχουν μεγάλη δύναμη επιρροής, αναπαριστώνται από CA που στέλνουν κοινωνικά βάρη με μεγάλες τιμές. Αντιθέτως, οι ακόλουθοι της κοινής γνώμης έχουν περιορισμένη ικανότητα να επηρεάσουν τους γείτονές τους και γι' αυτό προσγειώνονται με πράκτορες που στέλνουν μικρά κοινωνικά βάρη. Στη σχηματική αναπαράσταση του Σχήματος 8.1, οι CA που συμπεριφέρονται ως γνωμηγέτες συμβολίζονται

με L και η δύναμη της επιρροής τους συμβολίζεται με το παχύ βέλος. Αντίστοιχα, οι ακόλουθοι της κοινής γνώμης συμβολίζονται με F και τα στενά βέλη αναπαριστούν την δύναμη της επιρροής τους. Τα βάρη που διαχέουν οι γνωμηγέτες (sw_L) είναι μεγαλύτερα από τα βάρη που διαχέουν οι ακόλουθοι της κοινής γνώμης (sw_F). Δηλαδή, ισχύει: $sw_L > sw_F$, που φανερώνει την μεγαλύτερη δύναμη επιρροής των γνωμηγετών.

8.2.4 Αντίληψη των κοινωνικών σημάτων και η συνάρτηση διάθλασης

Η συμπεριφορά του επιρρεάζεσθαι

Στο εικονικό περιβάλλον των αυτόνομων πρακτόρων του DAWN, η επιρροή διαχέεται ανάμεσα στους γειτονικούς πράκτορες. Στην πράξη όμως, κάθε καταναλωτής αντιλαμβάνεται τα ερεθίσματα που λαμβάνει από τους γείτονές του με διαφορετικό τρόπο: Κάποιοι είναι πιο δεκτικοί και πρόθυμοι να αλλάξουν τις καταναλωτικές τους συνήθειες, ενώ άλλοι επηρεάζονται λιγότερο από την διαπροσωπική επικοινωνία. Καθώς το κάθε άτομο αντιδρά ανόμοια στην κοινωνική επιρροή στην οποία εκτίθεται, οι CA σχεδιάζονται έτσι ώστε να διαφοροποιούν την απόκρισή τους μέσω της χρήσης μιας **συνάρτησης διάθλασης**.

Καθότι η κοινωνική επιρροή έχει αθροιστικά αποτελέσματα, κάθε CA συγκεντρώνει τα κοινωνικά βάρη που λαμβάνει από τους γείτονές του και υπολογίζει το άθροισμά τους, το οποίο αναπαριστά το βαθμό κατά τον οποίο έχει εκτεθεί στην κοινωνική επιρροή. Σε αναλογία με τη συμπεριφορά του πραγματικού καταναλωτή, ο κάθε CA_i στο χρονικό διάστημα t υπολογίζει μια **μεταβλητή κοινωνικότητας** $S(i, t)$, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\begin{aligned} S(i, t) &= D_i(x_i(t)), \\ \text{όπου } x_i(t) &= \sum_{j=1}^{N_i} (sw_{j \rightarrow i}) \\ \text{και επομένως είναι } S(i, t) &= D_i \left[\sum_{j=1}^{N_i} (sw_{j \rightarrow i}) \right] \end{aligned} \quad (8.1)$$

όπου $sw_{j \rightarrow i}$ είναι τα κοινωνικά βάρη που συγκεντρώνει ο CA_i από τους N_i πράκτορες που εδρεύουν στην γειτονιά του ($j = 1, 2, \dots, N_i$) και D_i είναι η συνάρτηση διάθλασης, που θυμίζει το άθροισμα x_i των κοινωνικών βαρών. Η συνάρτηση D_i εισάγεται για να αναπαραστήσει την ικανότητα των καταναλωτών να αντιλαμβάνονται τα κοινωνικά σήματα με διαφορετικό τρόπο και αντιστοιχεί στην συμπεριφορά του καθενός να δέχεται επιρροές. Γενικά, η συνάρτηση διάθλασης μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή. Στην απλούστερη περίπτωση η συνάρτηση διάθλασης είναι μια γραμμική συνάρτηση. Τότε, οι καταναλωτές

που είναι πιο ανοιχτοί σε επιρροές τρίτων, είναι πιο πρόθυμοι να αναθεωρήσουν την καταναλωτική τους συμπεριφορά² και μπορούν να αναπαρασταθούν από μια συνάρτηση διάθλασης με μεγάλη κλίση. Από την άλλη μεριά, οι κοινωνικά απαθείς καταναλωτές ενσωματώνουν συναρτήσεις διάθλασης D_i με μικρή κλίση. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 8.1, οι καταναλωτές $CA(1, 4)$ και $CA(3, 1)$ εκτίθενται στην ίδια κοινωνική επιρροή, αφού και οι δύο γειτνιάζουν με δύο ακόλουθους της κοινής γνώμης. Συγκεκριμένα, οι $CA(1, 5)$ και $CA(2, 3)$ είναι οι γείτονες του $CA(1, 4)$, και οι $CA(2, 2)$ και $CA(4, 2)$ οι γείτονες του $CA(3, 1)$. Έτσι ο $CA(1, 4)$ δέχεται την κοινωνική επιρροή από τους $CA(1, 5)$ και $CA(2, 3)$ που είναι ίση με:

$$\sum_{j=1}^{N_{CA(1,4)}} (sw_{j \rightarrow CA(1,4)}) = sw_{CA(1,5) \rightarrow CA(1,4)} + sw_{CA(2,3) \rightarrow CA(1,4)} = 2sw_F$$

Ενώ, η κοινωνική επιρροή στην οποία εκτίθεται ο $CA(3, 1)$ υπολογίζεται ως:

$$\sum_{j=1}^{N_{CA(3,1)}} (sw_{j \rightarrow CA(3,1)}) = sw_{CA(2,2) \rightarrow CA(3,1)} + sw_{CA(4,2) \rightarrow CA(3,1)} = 2sw_F$$

Παρότι οι $CA(1, 4)$ και $CA(3, 1)$ εκτίθενται στην ίδια ποσότητα επιρροής αντιλαμβάνονται με διαφορετικό τρόπο την κοινωνική επιρροή, καθώς η μεταβλητή κοινωνικότητας του καθενός υπολογίζεται ως:

$$S(CA(1, 4), t) = D_{CA(1,4)} \left[\sum_{j=1}^{N_{CA(1,4)}} (sw_{j \rightarrow CA(1,4)}) \right] = D_{CA(1,4)} [2sw_F] \quad (8.2)$$

$$S(CA(3, 1), t) = D_{CA(3,1)} \left[\sum_{j=1}^{N_{CA(3,1)}} (sw_{j \rightarrow CA(3,1)}) \right] = D_{CA(3,1)} [2sw_F] \quad (8.3)$$

και αφού γενικά είναι $D_{CA(1,4)} \neq D_{CA(3,1)}$, είναι και $S(CA(1, 4), t) \neq S(CA(3, 1), t)$. Δηλαδή, παρόλο που οι $CA(1, 4)$ και $CA(3, 1)$ εκτίθενται στην ίδια ποσότητα επιρροής, τελικώς επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο. Η χρήση της συνάρτησης διάθλασης καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο η κοινωνική επιρροή γίνεται δεκτή από τον κάθε πράκτορα καταναλωτή και αντανακλά την διάθεσή του να αναθεωρεί τις καταναλωτικές του πρακτικές σε διαφορετικό βαθμό.

²Οι διαφημιστές αναφέρονται σε αυτούς τους καταναλωτές ως opinion seekers

8.3 Ο προσομοιωτής DAWN

8.3.1 Λειτουργικές απαιτήσεις

Οι βασικές λειτουργίες του Συστήματος Περιβαλλοντικής Διαχείρισης Εκτίμησης Σεναρίων μέσω της προσομοίωσης της εφοδιαστικής αλυσίδας του νερού DAWN είναι:

- α. Η αποτίμηση των συνεπειών της εφαρμογής εναλλακτικών σεναρίων τιμολόγησης του νερού, μέσα από ένα προσαρμόσιμο, φιλικό πρόσ το χρήστη, εργαλείο προσομοίωσης.
- β. Η παροχή αξιόπιστων αποτελεσμάτων με απότελο σκοπό την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.
- γ. Η μοντελοποίηση της κοινωνικής συμπεριφοράς των μεμονωμένων καταναλωτών και η ενσωμάτωσή της στα ήδη υπάρχοντα μοντέλα υπολογισμού της κατανάλωσης.

Οι χρήστες της πλατφόρμας DAWN (επιστήμονες, αναλυτές, υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων) βασιζόμενοι στην εμπειρία τους και στη διαθεσιμότητα των δεδομένων ακολουθούν μια συγκεκριμένη διαδικασία χρήσης του εργαλείου. Η διαδικασία προσομοίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.2 και περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

α. Συλλογή δεδομένων και σχεδιασμός σεναρίων

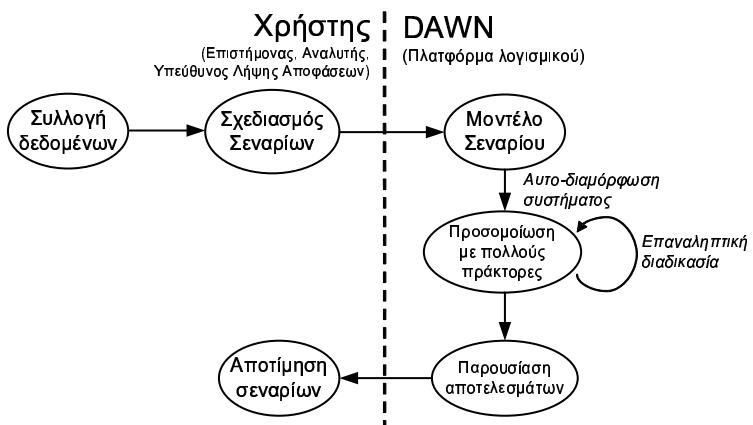
Ο χρήστης προετοιμάζει το σενάριο προσομοίωσης καθορίζοντας ένα σύνολο παραμέτρων για την τιμολογιακή πολιτική που υιοθετεί η εταιρεία ύδρευσης και το μοντέλο συμπεριφοράς των καταναλωτών. Οι παράμετροι αυτοί εισάγονται στο σύστημα μέσω μιας γραφικής διεπαφής.

β. Αυτο-διαμόρφωση του συστήματος

Το DAWN επεξεργάζεται το σενάριο που εισήγαγε ο χρήστης. Η διαδικασία προσομοίωσης αρχικοποιείται και στιγμιότυπα των πράκτορων λογισμικού που αναπαριστούν τους καταναλωτές δημιουργούνται χωρίς άλλη παρέμβαση του χρήστη.

γ. Προσομοίωση του σεναρίου

Η διαδικασία προσομοίωσης εκκινείται. Η προσομοίωση γίνεται σε επαναλαμβανόμενα βήματα. Καθένα από τα βήματα αυτά προσομοιώνει ένα χρονικό διάστημα κατά το οποίο οι CA καταναλώνουν νερό.



Σχήμα 8.2: Διάγραμμα λειτουργιών του προσομοιωτή DAWN

δ. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Όσο η προσομοίωση εκτελείται, η συνολική κατανάλωση νερού και η ατομική κατανάλωση του κάθε πράκτορα παρουσιάζονται στο χρήστη. Όταν η προσομοίωση ολοκληρωθεί, αποθηκεύονται τα τελικά αποτελέσματα.

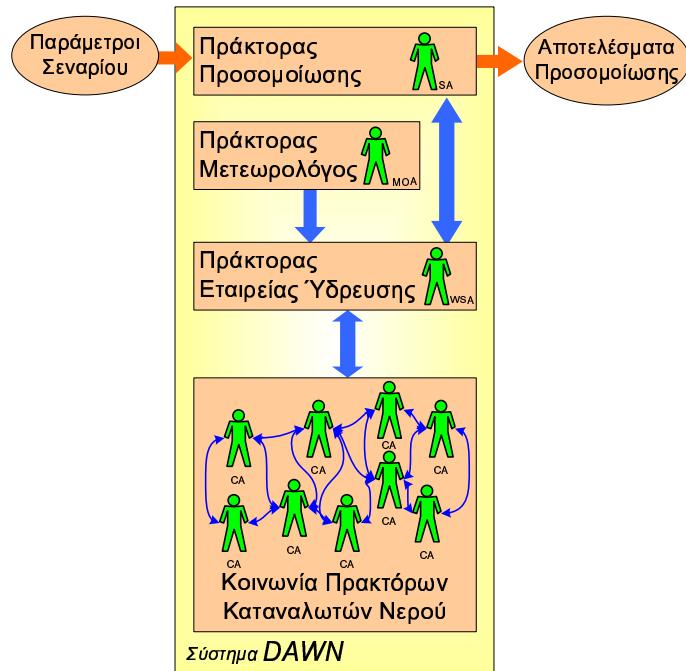
ε. Αποτίμηση των αποτελεσμάτων των σεναρίων

Τα ποσοτικά αποτελέσματα των σεναρίων που προσομοιώθηκαν με το DAWN αποτιμώνται από το χρήστη. Η συγκριτική μελέτη των αποτελεσμάτων μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Να σημειωθεί ότι η παραμετροποίηση του υβριδικού μοντέλου του DAWN είναι στη διακριτική ευχέρεια του χρήστη μέσα από μια γραφική διεπαφή.

8.3.2 Η εφοδιαστική αλυσίδα ζήτησης του νερού σε αστικές περιοχές και η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων

Η εφοδιαστική αλυσίδα ζήτησης του νερού σε αστικές περιοχές εμπλέκει κυρίως δύο οντότητες. Από τη μια, είναι η **εταιρεία ύδρευσης** που υδροδοτεί μια αστική περιοχή, εφαρμόζει την πολιτική τιμολόγησης του νερού και οργανώνει εκστρατείες ενημέρωσης και εκπαίδευσης των καταναλωτών. Από την άλλη, είναι οι **καταναλωτές νερού**, κάτοικοι της αστικής περιοχής, οι οποίοι καταναλώνουν το νερό και αναλαμβάνουν το κόστος του. Η εφοδιαστική αλυσίδα κατανάλωσης του νερού μοντελοποιείται με μια διαδικασία διαδοχικών ενεργειών των καταναλωτών και της εταιρείας ύδρευσης. Πρώτα, η εταιρεία ύδρευσης εφαρμόζει μια πολιτική διαχείρισης της ζήτησης του νερού. Στη συνέχεια, οι καταναλωτές αντιδρούν σε αυτή, αναθεωρώντας συν τω χρόνω την ατομική τους κατανάλωση, ανάλογα με την τιμή του νερού, την κοινωνική επιρροή που δέχονται, τις μετεωρολογικές συνθήκες και άλλες καθορισμένες παραμέτρους. Τέλος, η εταιρεία ύδρευσης



Σχήμα 8.3: Η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων της πλατφόρμας DAWN

αναθεωρεί την πολιτική της περιοδικά.

Στο DAWN όλοι οι εμπλεκόμενοι φορείς αναπαριστώνται με πράκτορες. Έτσι, υπάρχει ο πράκτορας της εταιρείας ύδρευσης (Water Supplier Agent - WSA) καθώς και μια κοινωνία πρακτόρων καταναλωτών (CA), η οποία αναπαριστά τον πληθυσμό της αστικής περιοχής. Κάθε CA μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε ένα μεμονωμένο καταναλωτή ή ένα σύνολο καταναλωτών με κοινές ανάγκες και συμπεριφορά.

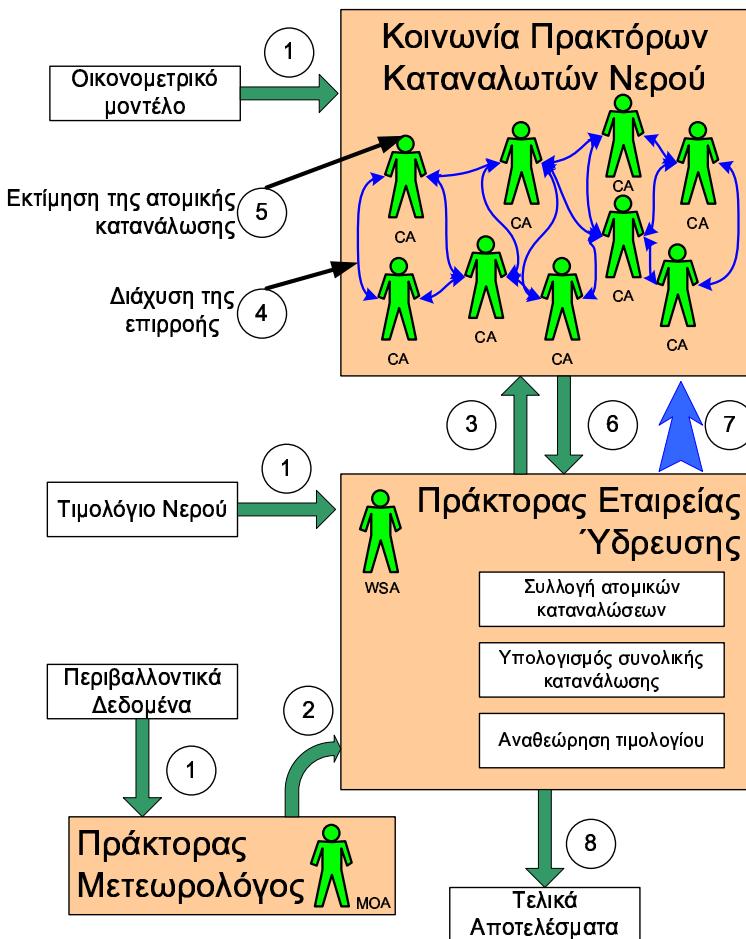
Ακόμη, στο σύστημα προστίθεται και ένας πράκτορας μετεωρολόγος (MOA) που παρέχει τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν. Στο σύστημα προσομοίωσης οι πράκτορες αναλαμβάνουν τις υπευθυνότητες των πραγματικών εμπλεκομένων μερών και ένας πράκτορας προσομοίωσης (simulator agent-SA) συντονίζει την όλη διαδικασία. Ο τελευταίος είναι υπεύθυνος για τη γραφική διεπαφή του συστήματος και τον ορισμό των εναλλακτικών σεναρίων τιμολόγησης.

Η αρχιτεκτονική πολλών πρακτόρων του DAWN, που περιγράφηκε παραπάνω, παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 8.3.

8.3.3 Η επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης

Η προσομοίωση με πολλούς πράκτορες λογισμικού εκτελείται σε οκτώ βήματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.4, και αναλύονται παρακάτω:

Βήμα 1 Εισαγωγή σεναρίου και αρχικοποίηση. Ο χρήστης καθορίζει το σενάριο που



Σχήμα 8.4: Η επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης του DAWN. Οι αριθμοί σε κύκλο αντιστοιχούν σε βήματα της διαδικασίας.

θα προσομοιωθεί. Συγκεκριμένα, ορίζει την πολιτική τιμολόγησης του νερού, το οικονομετρικό μοντέλο ζήτησης του νερού και παρέχει τα μετεωρολογικά δεδομένα του σεναρίου. Στη συνέχεια, δυναμικά αρχικοποιούνται όλοι οι πράκτορες και ξεκινά η επαναληπτική διαδικασία της προσομοίωσης.

Βήμα 2 Ο MOA ενημερώνει τον WSA για τις μετεωρολογικές συνθήκες, που επικρατούν στον κύκλο προσομοίωσης t .

Βήμα 3 Οι CA καλούνται να καταναλώσουν νερό για την χρονική περίοδο t . Ο WSA τους ενημερώνει για τις τρέχουσες μετεωρολογικές συνθήκες και την τιμή του νερού που καταναλώθηκε την προηγούμενη χρονική περίοδο ($t - 1$).

Βήμα 4 Η κοινωνία των πρακτόρων καταναλωτών δραστηριοποιείται κοινωνικά. Συγκεκριμένα, οι CA επικοινωνούν μεταξύ τους υλοποιώντας το μοντέλο διάχυσης της επιρροής.

Βήμα 5 Κάθε καταναλωτής υπολογίζει τις ανάγκες του σε νερό, λαμβάνοντας υπόψη το αποτέλεσμα της διαδικασίας κοινωνικοποίησης, την τιμή του νερού και τις μετεωρολογικές συνθήκες.

Βήμα 6 Ο WSA συλλέγει τις ατομικές καταναλώσεις και υπολογίζει την συνολική κατανάλωση στον κύκλο προσομοίωσης t .

Βήμα 7 Ο WSA αναθεωρεί την τιμολογιακή του πολιτική (αν χρειάζεται) και εκκινεί τον επόμενο κύκλο προσομοίωσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το Βήμα 2.

Βήμα 8 Όταν η επαναληπτική διαδικασία ολοκληρωθεί, τα τελικά αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο χρήστη.

8.4 Μοντελοποίηση με πράκτορες

8.4.1 Μεθοδολογική προσέγγιση

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφαλαίο 4, το σύστημα DAWN μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα μοντέλο τεσσάρων τύπων πρακτόρων $DAWN_{model}$:

$$DAWN_{model} = \{A_{SA}, A_{WSA}, A_{CA}, A_{MOA}\} \quad (8.4)$$

Το τελικό σύστημα DAWN αποτελείται από ένα στιγμιότυπο του τύπου πράκτορα SA ($K_{SA} = 1$), από ένα στιγμιότυπο του τύπου πράκτορα WSA ($K_{WSA} = 1$), από K_{CA} στιγμιότυπα του τύπου πράκτορα CA (ο ακριβής αριθμός των οποίων καθορίζεται από το χρήστη κατά την εκτέλεση του συστήματος), από ένα το πολύ στιγμιότυπο του τύπου MOA ($K_{MOA} = 0$ ή 1 , ανάλογα με το αν ο χρήστης εισάγει μετεωρολογικές παραμέτρους). Επομένως, το σύστημα DAWN συνίσταται από το σύνολο των πρακτόρων:

$$\mathbf{A}(DAWN) = \{A_{SA}(1), A_{WSA}(1), A_{MOA}(0 \text{ ή } 1), A_{CA}(1), \dots, A_{CA}(K_{CA})\} \quad (8.5)$$

Το μοντέλο των πρακτόρων του DAWN με τη χρήση της Gaia παρουσιάζεται παρακάτω στην παραγραφή 8.4.3.

Οι αλληλεπιδράσεις των πρακτόρων **I** αφορούν τόσο την επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων καταναλωτών, μέσω της οποίας υλοποιείται ο μηχανισμός διάχυσης της επιρροής, όσο και την επικοινωνία των πρακτόρων καταναλωτών με τους υπόλοιπους πράκτορες του

συστήματος. Συγκεκριμένα, σε κάθε κύκλο της προσομοίωσης εκτελείται η ακολουθία των επικοινωνιών:

$$I(1) : I(A_{SA}(1) \rightarrow A_{WSA}(1)) \quad (8.6)$$

$$I(2) : I(A_{WSA}(1) \rightarrow A_{MOA}(1)) \quad (8.7)$$

$$I(3) : I(A_{MOA}(1) \rightarrow A_{WSA}(1)) \quad (8.8)$$

$$I(4) : I(A_{WSA}(1) \rightarrow A_{CA}(i)) \quad (8.9)$$

$$I(5) : I(A_{CA}(i) \rightarrow A_{CA}(j)) \quad (8.10)$$

$$I(6) : I(A_{CA}(j) \rightarrow A_{CA}(i)) \quad (8.11)$$

$$I(7) : I(A_{CA}(i) \rightarrow A_{WSA}(1)) \quad (8.12)$$

$$I(8) : I(A_{WSA}(1) \rightarrow A_{SA}(1)) \quad (8.13)$$

όπου $i = 1, 2, \dots, K_{CA}$, και $j = 1, 2, \dots, N_i$

Επίσης, κατά την εκτέλεση της πλατφόρμας ο SA δύναται να επικοινωνεί με τους CA, ώστε να ανασύρει την κατάσταση του κάθε καταναλωτή και να ανανεώνει τη γραφική διεπαφή του συστήματος, κατά παραγγελία του χρήστη. Η επικοινωνία αυτή υλοποιείται ως:

$$I(9) : I(A_{SA}(1) \rightarrow A_{CA}(i)) \quad (8.14)$$

$$I(10) : I(A_{CA}(i) \rightarrow A_{SA}(1)) \quad (8.15)$$

όπου $i = 1, 2, \dots, K_{CA}$

Τελικά ορίζουμε, το σύνολο των επικοινωνιών των πρακτόρων του DAWN ως εξής:

$$\mathbf{I}(\text{DAWN}) = \{I(1), I(2), I(3), I(4), I(5), I(6), I(7), I(8), I(9), I(10)\} \quad (8.16)$$

Να σημειωθεί ότι η επικοινωνία μεταξύ WSA και MOA ($I(2)$ και $I(3)$) και μεταξύ SA και CA είναι προαιρετικές. Το σύνολο των επικοινωνιών των πρακτόρων του DAWN που περιγράφεται στην εξίσωση 8.16 είναι το μέγιστο. Κατ' ελάχιστον όμως οι επικοινωνίες των πρακτόρων του DAWN είναι:

$$\mathbf{I}(\text{DAWN}) = \{I(1), I(4), I(5), I(6), I(7), I(8)\} \quad (8.17)$$

8.4.2 Ρόλοι πρακτόρων

Η μεθοδολογία Gaia για την ανάλυση και τη σχεδίαση ΣΠ [228] χρησιμοποιήθηκε για να καθοριστούν με λεπτομέρεια τόσο τα μακροσκοπικά (κοινωνικά), όσο και τα μικροσκοπικά (εσωτερικά) χαρακτηριστικά των ΠΛ του DAWN με λεπτομέρεια. Η λειτουργία των ΠΛ στην Gaia προδιαγράφεται χρησιμοποιώντας ρόλους πρακτόρων. Η έννοια το ρόλου

στη Gaia θεωρείται ως η αφηρημένη προδιαγραφή της λειτουργίας μας οντότητας. Οι πράκτορες του DAWN προδιαγράφηκαν με τη Gaia, ως ακολούθως.

Ο πράκτορας WSA υλοποιεί ένα και μοναδικό ρόλο, αυτόν του Προμηθευτή Νερού (WATERSUPPLIER). Ο ρόλος WATERSUPPLIER ενσωματώνει τις κύριες λειτουργίες της εταιρείας ύδρευσης: Η άσκηση ερωτημάτων στους καταναλωτές νερού για την ατομική τους κατανάλωση, ο υπολογισμός της συνολικής κατανάλωσης, και η αναθεώρηση της τιμολογιακής πολιτικής. Τα χαρακτηριστικά του ρόλου WATERSUPPLIER παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.5. Ο WATERSUPPLIER επιτρέπεται να διαβάζει τις ατομικές καταναλώσεις, να γράφει την συνολική κατανάλωση σε κάθε βήμα της προσομοίωσης και να αλλάξει την πολιτική τιμολόγησης του νερού.

Role Schema : WaterSupplier (WS)									
Description : Simulates the activities of the Water Supplier Agency. In each simulation cycle, WS asks all consumers for their water demands. Having collected all individuals consumption, calculates the respective costs and informs all CAs. It also calculates the total demand and potentially revises the water-pricing policy. The total consumption is presented to the user.									
Protocols and Activities : <u>WaitStartStep</u> , <u>DecideWaterPrice</u> , <u>MetDataQuery</u> , <u>QueryConsumer</u> , <u>SendStepResults</u> , <u>CalculateStepTotalConsumption</u>									
Permissions : <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>Reads</td><td>price-pricing model</td></tr> <tr><td>Reads</td><td>personal consumptions</td></tr> <tr><td>Writes</td><td>step total consumption</td></tr> <tr><td>Changes</td><td>price-pricing model</td></tr> </table>		Reads	price-pricing model	Reads	personal consumptions	Writes	step total consumption	Changes	price-pricing model
Reads	price-pricing model								
Reads	personal consumptions								
Writes	step total consumption								
Changes	price-pricing model								
Responsibilities: Liveness: $WS = (\underline{WaitStartStep} . MetDataQuery . \underline{DecideWaterPrice} .$ $\underline{QueryConsumer} + \underline{CalculateTotalConsumption} . SendStepResults) +$ Safety: True									

Σχήμα 8.5: Ο ρόλος πράκτορα WATERSUPPLIER

Οι πράκτορες CA υλοποιούν δύο ρόλους συμπεριφοράς. Αυτόν του καταναλωτή (WATERCONSUMER) και αυτόν του γείτονα (CONSUMERNEIGHBOUR). Ο ρόλος WATERCONSUMER καθιορίζει τη λειτουργία του CA να καταναλώνει νερό, ενώ ο ρόλος CONSUMERNEIGHBOUR ενσωματώνει την ικανότητα για κοινωνική αλληλεπίδραση. Ο ρόλος WATERCONSUMER καθιστά ικανό ένα CA να υπολογίζει την ατομική του κατανάλωση νερού σε κάθε κύκλο της προσομοίωσης, ενσωματώνοντας ένα οικονομετρικό μοντέλο. Η κατανάλωση ενός WATERCONSUMER επηρεάζεται από την συμπεριφορά του ως CONSUMERNEIGHBOUR. Ο ρόλος WATERCONSUMER προδιαγράφεται στο Σχήμα 8.6.

Ο ρόλος CONSUMERNEIGHBOUR περιγράφει τη συμπεριφορά του CA να λειτουργεί ως γείτονας ενός WATERCONSUMER. Κάθε CONSUMERNEIGHBOUR διαχέει την

Role Schema : WaterConsumer (WC)	
Description : Simulates the behavior of an individual consumer. Based on an econometric model calculates its personal water consumption during each simulation step.	
Protocols and Activities : ReceivePriceAndMetData, ContactNeighbour, <u>ConsumeWater</u> , <u>DisplayStatus</u> , SendPersonalConsumption	
Permissions : Reads neighbours list,demand curve parameters,step Id, water price, met data Writes step personal consumption	
Responsibilities: Liveness: $WC = (ReceivePriceAndMetData . ContactNeighbour^* . ConsumeWater^* . SendPersonalConsumption)^+ DisplayStatus^*$ Safety: personal water consumption > 0	

Σχήμα 8.6: Ο ρόλος πράκτορα WATERCONSUMER

κοινωνική του επιρροή στον WATERCONSUMER. Η κοινωνική επιρροή ανταλλάσσεται με τη μορφή των κοινωνικών βαρών που συζητήθηκε παραπάνω. Έτσι, η αλληλεπίδραση των ρόλων WATERCONSUMER και CONSUMERNEIGHBOUR υλοποιεί τον μηχανισμό διάχυσης της επιρροής. Ο CONSUMERNEIGHBOUR είναι ικανός να αντιλαμβάνεται τις αιτήσεις του WATERCONSUMER, να υπολογίζει την επιρροή του και να γράφει τα κοινωνικά του βάρη. Ο ρόλος CONSUMERNEIGHBOUR περιγράφεται στο Σχήμα 8.7.

Role Schema : ConsumerNeighbour (CN)	
Description : Simulates the behavior of a neighbour consumer, participating in a social interaction process. It propagates its influence to all its neighbours, upon request. Its personal influence is represented as a "social weight".	
Protocols and Activities : <u>CalculateWeights</u> , <u>ReplyNeighbour</u>	
Permissions : Reads demand curve social parameters, step Id Writes social parameters weights	
Responsibilities: Liveness: $CN = (CalculateWeights, ReplyNeighbour)^+$ Safety: neighbour E [myNeighbours List]	

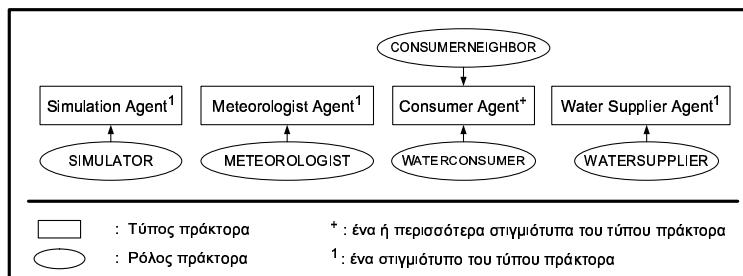
Σχήμα 8.7: Ο ρόλος πράκτορα CONSUMERNEIGHBOUR

Με παρόμοιο τρόπο, καθορίστηκαν οι ρόλοι METEOROLOGIST για τον MOA και SIMULATOR για τον SA.

8.4.3 Μοντέλο πρακτόρων

Η διαδικασία προδιαγραφής του DAWN ολοκληρώνεται με το μοντέλο πρακτόρων (agent model), που περιγράφει τους γενικούς τύπους πρακτόρων που εμπλέκονται στην εφαρμογή.

μογή και τον αριθμό των στιγμιοτύπων τους που απαιτούνται. Το μοντέλο πρακτόρων του DAWN απεικονίζεται στο σχήμα 8.8. Συμπεριλαμβάνονται οι τέσσερις γενικοί τύποι πρακτόρων (SA, WSA, CA and MOA) στους οποίους αντίθενται οι αντίστοιχοι ρόλοι. Ένα στιγμιότυπο των SA, WSA and MOA απαιτείται, ενώ περισσότερα από ένα στιγμιότυπα του CA χρειάζονται για τη δημιουργία της κοινότητας των καταναλωτών. Να σημειωθεί ότι κάθε στιγμιότυπο του CA ταυτόχρονα ενσωματώνει δύο ρόλους: το ρόλο του WATERCONSUMER και το ρόλο του CONSUMERNEIGHBOUR.



Σχήμα 8.8: Το μοντέλο πρακτόρων DAWN

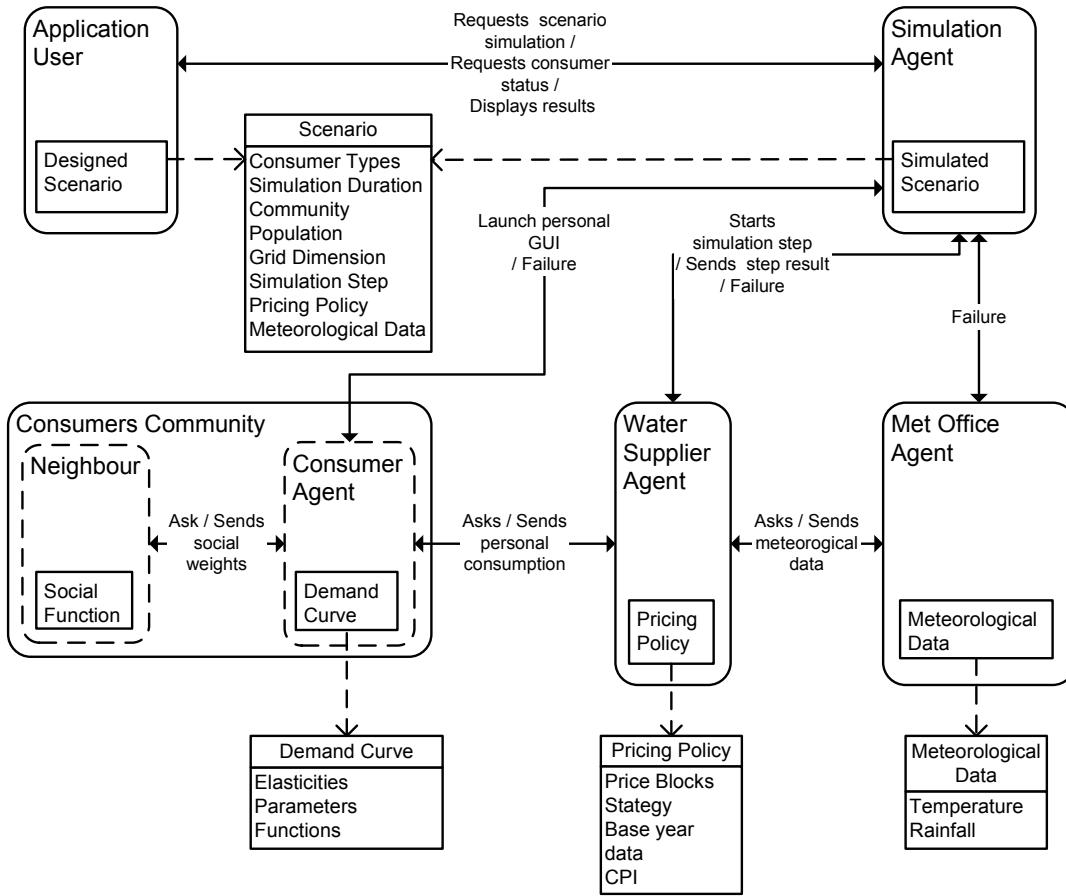
8.4.4 Επικοινωνία πρακτόρων

Η αλληλεπίδραση των πρακτόρων προδιαγράφηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα μοντελοποίησης Agent-Object-Relationship Modeling Language (AORML) [215]. Στο Σχήμα 8.9 παρουσιάζεται το εξωτερικό διάγραμμα πρακτόρων (external agent diagram). Κάθε CA, για να υπολογίζει την ατομική του κατανάλωση, επικοινωνεί με τους γείτονές του, και ανταλλάσσει κοινωνικά βάρον. Όλες οι πρόσθετες λειτουργίες της πλατφόρμας ενσωματώθηκαν στο Σχήμα 8.9, όπως οι λειτουργίες διαχείρισης και το γραφικό περιβάλλον χρήστη. Να σημειωθεί πως ο χρήστης της πλατφόρμας θεωρείται και αυτός ως μια οντότητα που συμπεριλαμβάνεται στο AORML διάγραμμα.

8.4.5 Οντολογία της εφαρμογής

Τα μηνύματα πρακτόρων που ανταλλάσσονται οι πράκτορες του DAWN ακολουθούν μια οντολογία (**O(DAWN)**) που αναπτύχθηκε με το Protégé-2000 [152]. Ένα τμήμα της οντολογίας παρατίθεται στο Σχήμα 8.10, που παρουσιάζει τις έννοιες, τα κατηγορήματα και τις ενέργειες των πρακτόρων. Για παράδειγμα, η έννοια κοινωνική παράμετρος (Parameter) αποτελείται από δύο υποδοχές (slot): name, and value που περιγράφουν το όνομα και την τιμή του κοινωνικού βάρους.

Συνοψίζοντας, στην παραγραφο αυτή προδιαγράφηκε πλήρως η αρχιτεκτονική των



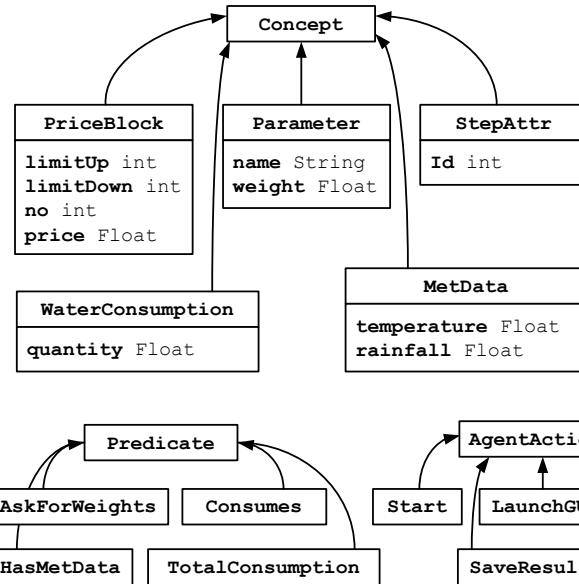
Σχήμα 8.9: Εξωτερικό διάγραμμα πρακτόρων σε AORML

πρακτόρων του DAWN στη μορφή της εξίσωσης:

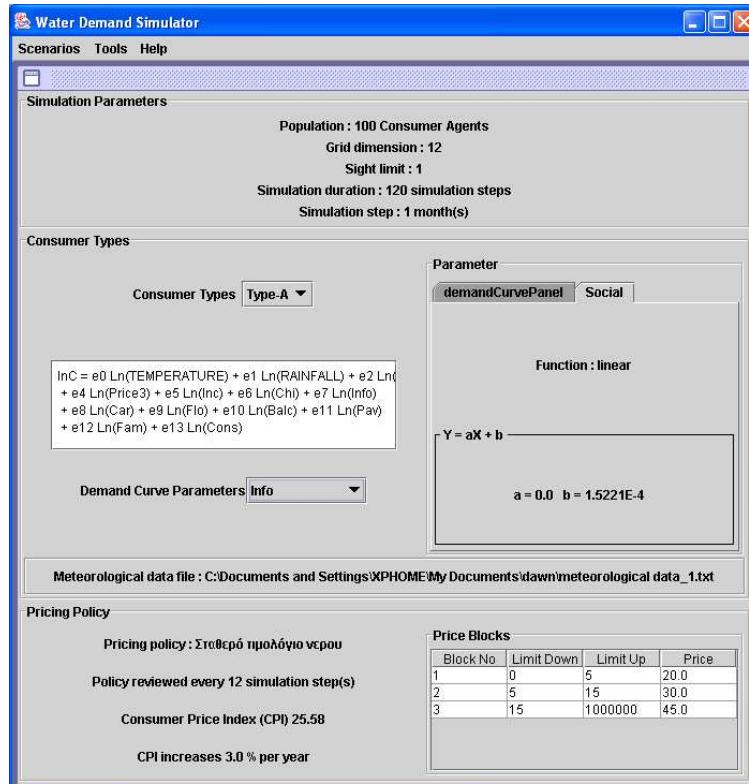
$$\text{DAWN} = \langle \mathbf{A}(\text{DAWN}), \mathbf{I}(\text{DAWN}), \mathbf{O}(\text{DAWN}) \rangle \quad (8.18)$$

8.5 Υλοποίηση

Το DAWN υλοποιήθηκε με πράκτορες λογισμικού σε Java, χρησιμοποιώντας το JADE [26], και είναι συμβατό με τις τυποποιήσεις της FIPA [62]. Ένα στιγμότυπο της γραφικής διεπαφής παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.11. Ο χρήστης του DAWN δεν χρειάζεται να έχει γνώση υπολογιστών ή να έχει κατανοήσει πλήρως όλες τις λειτουργίες της πλατφόρμας. Το φιλικό πρόσωπο του χρήστη γραφικό περιβάλλον και το πλήρως παραμετροποίησμα μοντέλο του DAWN επιτρέπουν στο χρήστη να δημιουργεί σενάρια και πράκτορες, εύκολα και γρήγορα. Το DAWN επιδείχθηκε στην προσομοίωση της αστικής κατανάλωσης του νερού για την περιοχή της Θεσσαλονίκης, που συζητείται στο επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 8.10: Οντολογία εννοιών, κατηγορημάτων και ενεργειών πρακτόρων για την προσομοίωση της εφοδιαστικής αλυσίδας του νερού



Σχήμα 8.11: Στιγμότυπο της γραφικής διεπαφής της πλατφόρμας DAWN

8.6 Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφαμε ένα γενικό μοντέλο προσομοίωσης της διάχυσης της κοινωνικής επιρροής που χρησιμοποιεί πράκτορες ως κοινωνικούς εικονογράφους. Ένα εργαλείο γενικής χρήσης, πλήρως παραμετροποιήσιμο, το DAWN, αναπτύχθηκε ακολουθώντας τη μεθοδολογία του Κεφαλαίου 4. Θεωρίες κοινωνικής προσομοίωσης συνδέθηκαν σε ένα μοντέλο πρακτόρων για την ανάπτυξη ενός ΟΣΥΑΠΣ και οι ΠΛ του DAWN προσομοιώνουν τον κοινωνικό ιστό και την διαποσωπική επικοινωνία. Το DAWN αναπτύχθηκε για την διερεύνηση μέσω της προσομοίωσης των συνεπειών μιας εκστρατείας ενημέρωσης στις συνήθειες των καταναλωτών και την μελλοντική ζήτηση ενός φυσικού αγαθού, όπως το νερό.

Στο επόμενο Κεφάλαιο επιδεικνύεται η χρήση του, ενώ έμφαση δίνεται στη συλλογιστική των πρακτόρων.

Κεφάλαιο 9

Προσομοίωση σεναρίων με πράκτορες για την αστική κατανάλωση νερού

Η εφαρμογή χρήσης του μοντέλου διάχυσης της επιφρόνης και της πλατφόρμας κοινωνικής προσομοίωσης με πράκτορες DAWN για την προσομοίωση του κύκλου του νερού στην αστική περιοχή της Θεσσαλονίκης επιδεικνύονται στο κεφάλαιο τούτο. Μέρη του κεφαλαίου έχουν παρουσιαστεί στο συνέδριο της iEMSs (2004) και τη HELECO (2005) και έχουν δημοσιευτεί στα περιοδικά IEEE CiSE και SCS Simulation.

9.1 Διαχείριση νερού στις αστικές περιοχές

9.1.1 Γενικά

Στις μέρες μας, η αυξανόμενη ζήτηση του νερού αναδεικνύει την έντονη ανάγκη ανάπτυξης εναλλακτικών πολιτικών για την διαχείριση των υδάτινων πόρων με ένα ολοκληρωμένο τρόπο. Οι ακασικές προσεγγίσεις που σχετίζονται με την όλη και αυξανόμενη παραγωγή νερού για την κάλυψη της ζήτησης καλούνται να λάβουν υπόψη τη συντήρηση των δικτύων υποδομής, την αναβάθμιση των υπηρεσιών προς τους καταναλωτές, τη διαχείριση της ζήτησης του νερού καθώς και το νέο ευρύ θεσμικό πλαίσιο διαχείρισης των υδάτινων πόρων που προϋποθέτει τη συμμετοχή του κοινού στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Ο προσανατολισμός της διαχείρισης του νερού αστικής χρήσης προς τη βιώσιμη ανάπτυξη είναι στενά συνδεδεμένος με την εφαρμογή πολιτικών διαχείρισης του νερού που έχουν σαν αποτέλεσμα την ισορροπία ανάμεσα στην επέκταση των αναγκών και την εξοικονόμηση του νερού [220, 221]. Τέτοιες πολιτικές απαιτούν την ολοκληρωμένη προσέγγιση των περιβαλλοντικών, καθώς επίσης και των κοινωνικών και οικονομικών πτυχών της διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Η διαχείριση της ζήτησης του νερού μπορεί σίγουρα να οδηγήσει στην αποτελεσματικότερη και αποδοτική διαδικασία λήψης αποφάσεων

για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων [168, 11]. Τα οικονομικά κίνητρα, οι πολιτικές τιμολόγησης του νερού, η δημόσια συμμετοχή και η ευαισθητοποίηση των πολιτών, καθώς επίσης και οι εκστρατείες εκπαίδευσης και πληροφόρησης είναι σήμερα ισχυρά εργαλεία διαχείρισης της ζήτησης, που μπορούν να συμβάλουν στην διαδικασία εξισορρόπησης της εφοδιαστικής αλυσίδας του νερού.

Η προσέγγιση των αναγκών σε νερό μέσω της κατασκευής μεγάλων υδροδοτικών έργων σταδιακά οδήγησε στη μείωση των διαθέσιμων ποσοτήτων γλυκού νερού, καθώς και στην υπερεκμετάλλευση και την υποεκτίμηση του νερού. Οι εταιρείες ύδρευσης σήμερα καλούνται να συνδυάσουν δομικές και μη αλλαγές, λαμβάνοντας υπόψη την αυξανόμενη κατά κεφαλήν χρήση νερού, την αύξηση του πληθυσμού, την αστικοποίηση, τη ρύπανση, τον περιορισμό των διαθεσίμων πόρων και τον αυξανόμενο ανταγωνισμό για τις διάφορες χρήσεις του νερού. Η χάραξη της πολιτικής διαχείρισης του νερού πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις προτιμήσεις και τα συμφέροντα όλων των μερών που επηρεάζονται.

Η διαμόρφωση πολιτικής για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι γενικά μια απαιτητική εργασία, που προϋποθέτει να μελετηθούν σε βάθος όλοι οι παράγοντες και οι συνθήκες συμπεριλαμβανομένης της ζήτησης του νερού και της διαθεσιμότητας των υδάτινων πόρων. Επιστημονικές μέθοδοι και εργαλεία που προσομοιώνουν τον κύκλο διαχείρισης του νερού αναλαμβάνουν την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Η χρήση των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων μπορεί να είναι είτε επιχειρησιακή (operational), είτε διερευνητική (exploratory). Η χρήση των προσομοιωτών αποσκοπεί συνήθως στη διερεύνηση των συνεπειών που θα έχει η εφαρμογή κάποιας πολιτικής. Υπό την έννοια αυτή, ο **κύριος στόχος ενός εργαλείου προσομοίωσης** δεν είναι να προβλέψει την ακριβή κατάσταση του συστήματος, αλλά να εξερευνήσει πώς θα εξελιχθεί το σύστημα ως αποτέλεσμα της συγκεκριμένης πολιτικής.

Η τιμολόγηση του νερού στις αστικές περιοχές είναι μια σύνθετη διαδικασία που απαιτεί τη μελέτη οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Η συγκρότηση μιας πολιτικής τιμολόγησης του νερού σχετίζεται με την διερεύνηση της ζήτησης του νερού και τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Για τη μελέτη των αναγκών αστικής κατανάλωσης του νερού έχει αναπτυχθεί πληθώρα στατιστικών και οικονομετρικών τεχνικών που επικεντρώνονται στην αναζήτηση κατάλληλων πολιτικών διαχείρισης της ζήτησης του νερού. Οι πολιτικές αυτές, μεταξύ άλλων, προσφέρουν κίνητρα για την εξοικονόμηση του νερού [148].

Στο πλαίσιο που σκιαγραφήθηκε παραπάνω, σε αυτό το κεφάλαιο επιδεικνύεται η χρήση του DAWN για την υποστήριξη της διαδικασίας σχεδιασμού μιας πολιτικής τιμο-

λόγησης του νερού. Το DAWN, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 8, αποτελεί ένα εργαλείο λογισμικού που επιτρέπει την αποτύμηση εναλλακτικών πολιτικών νερού, που επιτρέπει στους αναλυτές και τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να καθορίσουν διαφορετικά σενάρια τιμολόγησης και να διερευνήσουν τις συνέπειες που θα έχει η εφαρμογή τους σε ένα εικονικό περιβάλλον. Παρακάτω, επιδεικνύονται οι ικανότητες του DAWN για την προσομοίωση της κοινωνικής αλληλεπίδρασης των καταναλωτών.

Οι αρχές της ΚΠμΠ και το μοντέλο διάχυσης της επιρροής που ενσωματώθηκαν στο DAWN, επιτρέπουν στον χρήστη να διερευνήσει τα **επακόλουθα της εφαρμογής μιας πολιτικής τιμολόγησης του νερού** στη συνολική κατανάλωση, χρησιμοποιώντας μια κοινωνία των πρακτόρων λογισμικού, που περιγράφηκε στην παράγραφο 8.3. Το DAWN υποστηρίζει την κοινωνική αλληλεπίδραση μεταξύ των καταναλωτών, η οποία ενεργοποιείται χρησιμοποιώντας την επικοινωνία πρακτόρων. Κατά συνέπεια, οι παράμετροι που έχουν επιπτώσεις στην κατανάλωση νερού και συνδέονται με την καταναλωτική συμπεριφορά μπορούν να περιληφθούν στα σενάρια του DAWN. Το εργαλείο που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται μαζί με πραγματικά αποτελέσματα της εφαρμογής του στην περιοχή Θεσσαλονίκης, χρησιμοποιώντας συνδυασμένα στοιχεία που λήφθηκαν από την Εταιρεία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Θεσσαλονίκης (ΕΥΑΘ) και από ερωτηματολόγια καταναλωτών.

9.1.2 Διαχείριση της ζήτησης του νερού

Οι όροι **διαχείριση της ζήτησης νερού** και **εξοικονόμηση των υδάτινων αποθεμάτων** αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία με την ίδια έννοια. Η διαχείριση της ζήτησης ορίζεται ως η διαδικασία επιλογής συγκεκριμένων ενεργειών από ένα σύνολο διαθέσιμων επιλογών που στοχεύει στην επίτευξη συγκεκριμένων στόχων κατανάλωσης [17, 145]. Από την άλλη, η **εξοικονόμηση** του νερού ορίζεται ως η **κοινωνικά ευεργετική μείωση της χοήσης νερού** ή των απωλειών του νερού [22]. Ο όρος "κοινωνικά ευεργετική" υπονοεί την ανταλλαγή μεταξύ κερδών και απωλειών των ενεργειών διαχείρισης του νερού. Συνεπώς, ο κύριος στόχος της διαχείρισης της ζήτησης ή της εξοικονόμησης του νερού είναι η ενθάρρυνση των καταναλωτών προς αποδοτικότερη χοήση του νερού.

Τέτοιες πολιτικές διαχείρισης της ζήτησης περιλαμβάνουν για παράδειγμα:

- εκστρατείες εκπαίδευσης των καταναλωτών για το πώς να τροποποιήσουν τις συνήθειες χοήσης και να μειώσουν την κατανάλωση νερού.
- προώθηση της χοήσης τεχνολογιών εξοικονόμησης του νερού.
- προώθηση του μη υδροβόρου αστικού εξωραϊσμού.

- υιοθέτηση στρατηγικών τιμολόγησης που αποθαρρύνουν τις υδροβόρες χρήσεις του νερού.
- υιοθέτηση οικονομικών κινήτρων για την ενθαρρυνση της συνετής χρήσης του νερού.

Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων στις εταιρείες ύδρευσης παίρνουν αποφάσεις για την υλοποίηση ή μη τέτοιων πολιτικών χωρίς να έχουν επαρκή στοιχεία για τα αποτελέσματα εφαρμογής τους. Είναι απαραίτητη λοιπόν μια διαδικασία αποτίμησης των εναλλακτικών πολιτικών που να ποσοτικοποιεί τα αποτελέσματα της εφαρμογής των πολιτικών διαχείρισης της ζήτησης του νερού. Η διαδικασία αυτή αφορά τον υπολογισμό της μελλοντικής ζήτησης του νερού ως συνέπεια της εφαρμογής των συγκεκριμένων πολιτικών διαχείρισης και συμπεριλαμβάνει την κατανόηση των συμπεριφορών ζήτησης και των επιλογών χρήσης του νερού.

Ένας από τους παραγόντες που επηρεάζουν την μεταβολή της ζήτησης του νερού και πρέπει να ληφθεί υπόψη στη διαδικασία αποτίμησης είναι η κοινωνική συμπεριφορά και η συσχέτισή της με τη διαδικασία ορθολογικής χρήσης του νερού. Η εξοικονόμηση του νερού είναι μια ιδέα επί της οποίας η μεγάλη πλειοψηφία των καταναλωτών δείχνει να συμφωνεί "επί της αρχής". Ωστόσο, η αποδοχή της ιδέας αυτής στην πράξη και η υιοθέτηση της στην καθημερινή καταναλωτική πρακτική είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Ο σχεδιασμός πολιτικών εξοικονόμησης νερού απαιτεί την συνεργασία των πολιτών μέσω συμμετοχικών διαδικασιών και της εκπαίδευσης των καταναλωτών.

Η εκπαίδευση και η ενημέρωση των καταναλωτών μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα των μέτρων εξοικονόμησης [49, 150, 179]. Για το λόγο αυτό πολλές εταιρείες ύδρευσης διεξάγουν εκστρατείες ενημέρωσης και εκπαίδευσης ως ένα εργαλείο διαχείρισης της ζήτησης μέσω της αλλαγής των καταναλωτικών συνηθειών των πολιτών που αποσκοπεί στην εξοικονόμηση του νερού. Τα αποτελέσματα των πολιτικών αυτών είναι δύσκολο να απεικονισθούν. Αφενός, οι εκστρατείες ενημέρωσης έχουν ένα άμεσο αντίκτυπο στους αποδέκτες καταναλωτές¹ και, αφετέρου, οι συμμετέχοντες διαδίδονται στον κοινωνικό τους περίγυρο τις αρχές της εξοικονόμησης του νερού. Κατ' αυτόν τον τρόπο τα σήματα εξοικονόμησης του νερού διαδίδονται σε όλη την κοινωνία.

9.1.3 Η αστική κατανάλωση του νερού και ο κοινωνικός παράγοντας

Η εκτίμηση της ζήτησης του νερού είναι ένα θέμα που απασχολεί τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Διάφορες οικονομικές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί και έχουν συσχετίσει την κατανάλωση του νερού τόσο με την τιμή του, όσο και με άλλους παραγόντες, όπως το

¹ωστόσο ο αντίκτυπος δεν είναι ο ίδιος σε όλους τους συμμετέχοντες

εισόδημα, ο τύπος και η σύνθεση της κατοικίας, η βροχόπτωση και η θερμοκρασία, κ.α. Με τη χρήση οικονομικών μεθόδων υπολογίζονται οι **ελαστικότητες**² των παραμέτρων που επηρεάζουν την κατανάλωση. Ωστόσο μέχρι πρόσφατα μικρή έμφαση έχει δοθεί στις κοινωνικές πτυχές της ζήτησης του νερού.

Η κοινωνική παράμετρος που αναπαριστά τα αποτελέσματα μιας εκστρατείας ενημέρωσης κατά τη διάρκεια εφαρμογής της συνήθως μοντελοποιείται ως μια ανεξάρτητη μεταβλητή των οικονομικών μοντέλων (και συμβολίζεται ως WIC εκ του Well-informed consumers). Οι ελαστικότητες της παραμέτρου που αναφέρονται στην βιβλιογραφία κυμαίνονται μεταξύ -0.04 και -0.19, δηλαδή έχουν μια ευμεγέθη τιμή. Ωστόσο, αυτά τα ποιοτικά αποτελέσματα δεν αντανακλούν την κοινωνική συμπεριφορά των μεμονωμένων καταναλωτών νερού, αλλά ολόκληρης της κοινωνίας στο σύνολό της. Για να ξεπεραστεί αυτός ο σκόπελος, το DAWN υιοθέτησε μια προσέγγιση πολλών πρακτόρων για τη διερεύνηση της συσχέτισης της κοινωνικής συμπεριφοράς των μεμονωμένων καταναλωτών νερού με την εξοικονόμηση του νερού.

9.1.4 Μοντέλα πρακτόρων για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων

Τα τελευταία χρόνια, διάφορα μοντέλα ΚΠμΠ έχουν αναπτυχθεί σε εφαρμογές διαχείρισης υδάτινων πόρων. Αρκετά ερευνητικά έργα έχουν προσπαθήσει να προσομοιώσουν τις κοινωνικές πτυχές της κατανάλωσης νερού σε διαφορετικά πεδία εφαρμογής. Οι εφαρμογές που παρουσιάζονται παρακάτω συζητήθηκαν στην παράγραφο 4.2, ως προς τις τεχνολογίες πρακτόρων που ενσωματώνουν. Εδώ δίνεται έμφαση στο πεδίο εφαρμογής και τις πτυχές της διαχείρισης υδάτινων πόρων που προσεγγίζουν.

Ένα παραδειγμα τέτοιου έργου είναι το EOS [47], που ανέπτυξε ένα μοντέλο πρακτόρων συνεργατικής διαχείρισης οικοσυστήματος. Το EOS επιδείχθηκε στην προσομοίωση της υδατικής λεκάνης του ποταμού Fraser. Τα μοντέλα πρακτόρων χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των εμπλεκομένων οντοτήτων και των στρατηγικών μεσολάβησης.

Ένα δεύτερο παραδειγμα είναι το έργο SINUSE, που ακολουθεί μια προσέγγιση με πράκτορες για την ολοκληρωμένη διαχείριση μιας υδατικής λεκάνης. Τα μοντέλα πρακτόρων του SINUSE χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των αλληλεπιδράσεων του υδροφορέα και των χρηστών νερού, ενώ συνυπολογίζεται και η κοινωνική συμπεριφορά

² Η έννοια της ελαστικότητας στη μικρο-οικονομία χρησιμοποιείται όποτε υπάρχει μια σχέση αιτίου-αποτελέσματος ανάμεσα σε δύο μεταβλητές. Η ελαστικότητα ορίζεται ως η ποσοστιαία μεταβολή μιας μεταβλητής σε σχέση με την ποσοστιαία μεταβολή μιας άλλης μεταβλητής. Η ελαστικότητα του x ως προς y ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση: $E_{x,y} = \frac{\%change\ in\ x}{\%change\ in\ y} = \frac{\partial \ln(x)}{\partial \ln(y)} = \frac{\partial y}{\partial x}$ (Βλ. σχ. www.wikipedia.org).

των αγροτών [57].

Σε μια παρόμοια προσπάθεια, στο NEGOWAT ένα υβριδικό μοντέλο πρακτόρων διαπραγματεύεται τις ανταγωνιστικές χρήσεις νερού σε μια περιοχή μάστευσης υδροφόρου ορίζοντα (ground-water catchment area) [48]. Οι αρχές των κυψελοειδών αυτομάτων και της επικοινωνίας πρακτόρων συνδιάστηκαν για να προσομοιώσουν τις αλληλεπιδράσεις του κύκλου του νερού, ενώ οι πράκτορες χρησιμοποιήθηκαν για να αναπαραστήσουν τους αγρότες της περιοχής.

Το πρόγραμμα SHADOC [20], αποτίμησε πρακτικές άρδευσης στον Σενεγάλη, χρησιμοποιώντας τεχνικές ΚΠμΠ. Στο σύστημα αυτό οι πράκτορες αναπαριστούν τους αγρότες της κοιλάδας του Σενεγάλη. Ένα μοντέλο που βασίστηκε στο SHADOC είναι το CATCHSHAPE [23], στο οποίο οι πράκτορες προσομοιώνουν τις ιδιότητες της λεκάνης απορροής και τις αποφάσεις των αγροτών.

Το ερευνητικό έργο FIRMA (Freshwater Integrated Resource Management with Agents) εφάρμοσε μοντέλα πρακτόρων για την προσομοίωση των φυσικών, υδρολογικών, κοινωνικών και οικονομικών διαστάσεων της διαχείρισης υδάτινων πόρων σε υδρολογικές λεκάνες [72]. Οι πράκτορες του FIRMA χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των καταναλωτών και των προμηθευτών νερού και της κυβέρνησης σε διάφορα επίπεδα αναπαράστασης. Μια από τις επιδεικτικές εφαρμογές του FIRMA αφορούσε τον Τάμεση (Αγγλία). Η πιλοτική εφαρμογή Thames [21, 146] διερευνά τις επιπτώσεις της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας στην διαθεσιμότητα των υδάτινων πόρων στη νότια Αγγλία, μοντελοποιώντας την ξήτηση νερού των καταναλωτών της περιοχής χρησιμοποιώντας πράκτορες. Οι πράκτορες στο Thames επικοινωνούν ο ένας με τον άλλον ανταλάσσοντας απόψεις (endorsements). Στην προσέγγιση αυτή, η κοινωνική συμπεριφορά προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας πράκτορες που παρατηρούν ο ένας τον άλλον.

Τέλος, το μοντέλο Adour αναπτύχθηκε για την προσομοίωση των διαπραγματεύσεων χρήστης νερού στο επίπεδο υδρολογικής λεκάνης ενσωματώνοντας οικονομικά μοντέλα σε πράκτορες. Ένα τυπικό οικονομικό μοντέλο παζαρέματος με τη χρήση πρακτόρων εφαρμόστηκε στην λεκάνη απορροής Adour, στην Νότια Γαλλία. Επτά πράκτορες (τρεις αγρότες, δύο περιβαλλοντικές μη-κυβερνητικές οργανώσεις, ένας διαχειριστής νερού και ένας φορολογούμενος) [201] διαπραγματεύονται την διαθέση των υδάτινων αποθεμάτων.

Οι παραπάνω προσπάθειες σχετίζονται με τη διαχείριση των υδάτινων πόρων και εφαρμόστηκαν σε περιοχές μέσης κλίμακας, όπως υδροφορείς, λεκάνες απορροής, κλπ. Στην προσέγγιση που ακολουθήσαμε αναπτύσσοντας το DAWN στόχος μας είναι να προσομοιώσουμε κάτι διαφορετικό: την αλυσίδα προσφοράς-ξήτησης του νερού σε μια αστική

περιοχή. Ακολουθώντας μια προσέγγιση μικρής κλίμακας και χρησιμοποιώντας πράκτορες ως κοινωνικούς εικονογράφους, το DAWN καλείται να υποστηρίξει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων που σχετίζεται με την τιμολόγηση του νερού.

9.1.5 Η εφοδιαστική αλυσίδα ζήτησης του νερού στο DAWN

Στο DAWN, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στην παράγραφο 8.3, μια κοινωνία πρακτόρων λογισμικού αναπαριστά τους μεμονωμένους καταναλωτές νερού και θεωρείται ως ένα δείγμα του συνόλου των καταναλωτών. Η εικονική κοινωνία των πρακτόρων καταναλωτών νερού (*CA*) αντιδρά στην εφαρμογή διαφορετικών πολιτικών τιμολόγησης του νερού που εφαρμόζει η εταιρεία ύδρευσης, προσομοιώνοντας την δυναμική συμπεριφορά των πραγματικών καταναλωτών. Οι *CA* ακολουθούν ένα οικονομετρικό μοντέλο για την εκτίμηση των αναγκών τους σε νερό, το οποίο έχει επεκταθεί με ένα μοντέλο κοινωνικής δράσης. Η κοινωνική αλληλεπίδραση υλοποιείται μέσω του **μηχανισμού διάχυσης της επιρροής**, που ενσωματώνεται στους *CA*.

9.2 Συλλογιστική των πρακτόρων

9.2.1 Το οικονομετρικό μοντέλο

Διάφορα μοντέλα εκτίμησης της ζήτησης του νερού έχουν αναπτυχθεί, ανάλογα με τη φύση και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων [42, 28, 216]. Η εκτίμηση της ζήτησης του νερού γίνεται χρησιμοποιώντας ένα γενικό μοντέλο της μορφής $C = f(P, Z)$, που συσχετίζει την κατανάλωση του νερού C με την τιμή του νερού P και άλλους παράγοντες Z [10] και υπολογίζεται με βάση την γενική εξίσωση:

$$C_{it} = \alpha + \mathbf{P}_{it}\beta + \mathbf{Z}_{it}\gamma + \epsilon_{it} \quad (9.1)$$

όπου

- $C_{i,t}$ είναι η κατανάλωση του νερού του καταναλωτή i του υδρομέτρου t για τη χρονική περίοδο t .
- \mathbf{P}_{it} είναι το διάνυσμα των μέτρων της τιμής του νερού, για τον καταναλωτή i και για την περίοδο t .
- \mathbf{Z}_{it} είναι το διάνυσμα των λοιπών παραμέτρων, για τον καταναλωτή i και για την περίοδο t .
- Οι παράγοντες α, β, γ αντιστοιχούν στις ελαστικότητες των παραμέτρων.

- ϵ_{it} το ενδεχόμενο σφάλμα.

Το οικονομετρικό μοντέλο που υιοθετήθηκε στο DAWN υπολογίζει την κατανάλωση νερού C_{it} του καταναλωτή i στο χρονικό διάστημα t από τη σχέση:

$$\ln C_{it} = \sum_k e_k \ln(f_k[P_{t-1}]) + \sum_l e_l \ln(f_l[Z_t]) \quad (9.2)$$

όπου P είναι η τιμή του νερού, Z είναι οι άλλες παραμετροί που επηρεάζουν τη ζήτηση, και e είναι οι αντίστοιχες ελαστικότητες. Το μοντέλο αυτό είναι αναπροσαρμόσιμο, καθώς ο χορήστης μπορεί να ορίσει όλες τις μεταβλητές, συναρτήσεις και ελαστικότητες μέσω της γραφικής διεπαφής του DAWN.

Το οικονομετρικό μοντέλο εφαρμόζεται από κάθε CA για τον υπολογισμό της κατανάλωσής του. Στην εξίσωση 9.2 οι κοινωνικές παραμετροί ενσωματώνονται ως μεταβλητές του διανύσματος Z .

9.2.2 Το κοινωνικό μοντέλο και ο μηχανισμός διάχυσης της επιρροής

Το κοινωνικό μοντέλο που ενσωματώνεται στο DAWN υλοποιείται μέσω της δραστηριοποίησης κάθε πράκτορα, ως κοινωνικού εικονογράφου, δια του μηχανισμού διάχυσης της επιρροής. Η αλληλεπίδραση κάθε CA με τον κοινωνικό του περίγυρο υλοποιείται μέσω του *Μηχανισμού Διάχυσης της Επιρροής*, ο οποίος στηρίζεται την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ των πρακτόρων. Συγκεκριμένα οι πράκτορες CA τοποθετούνται επί ενός τετραγωνικού πλέγματος που αναπαριστά τον κοινωνικό ιστό (βλ. §8.2).

Οι πράκτορες του περίγυρου επηρεάζουν έναν καταναλωτή, αποστέλλοντας κοινωνικά βάρη (*sw*), που αναπαριστούν την δύναμη της πειθούς τους. Οι τιμές των κοινωνικών βαρών αυξάνονται ανάλογα με την ικανότητα του κάθε πράκτορα να πείθει τους γύρω του. Σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, t , ο κάθε CA λαμβάνει τα κοινωνικά βάρη των γειτόνων του, που έχουν σωρευτικά αποτελέσματα, και υπολογίζει τις κοινωνικές του μεταβλητές σύμφωνα με την εξίσωση 8.1 που επαναλαμβάνεται εδώ.

$$S(i, t) = D_i \left[\sum_{j=1}^{N_i} (sw_{j \rightarrow i}) \right] \quad (8.1)$$

όπου *sw* είναι τα κοινωνικά βάρη που λαμβάνει από τον περίγυρό του N και D_i είναι η συνάρτηση διάθλασης του πράκτορα, μέσω της οποίας ο κάθε πράκτορας μεταγλωτίζει την προσλαμβάνουσα επιρροή που δέχεται από τους γύρω του με διαφορετικό τρόπο.

Στο DAWN ο χορήστης ορίζει διάφορους τύπους καταναλωτών οι οποίοι συμπεριφέρο-

νται διαφορετικά, διαχέοντας διαφορετικά βάρη (*sw*) και ενσωματώνοντας διαφορετικές συναρτήσεις διάθλασης (D_i). Η συνάρτηση διάθλασης, γενικά, μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή. Στα πειράματα που ακολουθούν χρησιμοποιήσαμε γραμμικές συναρτήσεις. Ωστόσο, τόσο η δομή του προτεινόμενου μοντέλου, όσο και η υλοποίηση του DAWN, επιτρέπουν την χρήση διαφορετικών τύπων συναρτήσεων (πολυωνυμικών, εκθετικών, λογαριθμικών, κλπ).

9.2.3 Υβριδικό μοντέλο DAWN

Στο DAWN το κοινωνικό μοντέλο ενσωματώνεται στο γενικό οικονομετρικό μοντέλο δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό μοντέλο $C = f(P, S, Z')$, όπου S είναι το διάνυσμα των κοινωνικών μεταβλητών. Οι κοινωνικές παραμετροί που συμπεριλαμβάνονται στο διάνυσμα Z της εξίσωσης 9.2 εξαιρούνται και σχηματίζεται το διάνυσμα Z' δίχως κοινωνικές μεταβλητές. Οι κοινωνικές μεταβλητές πλέον ενσωματώνονται στο μοντέλο, μέσω του διανύσματος S . Τελικά, η ποσότητα του νερού που καταναλώνει ο πράκτορας i στο χρονικό διάστημα t υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\ln C_{it} = \sum_k e_k \ln(f_k[P_{t-1}]) + \sum_{l'} e_{l'} \ln(f_{l'}[Z'_t]) + \sum_m e_m \ln(f_m[D_i(\sum_{i \in N_i} sw_t)]) \quad (9.3)$$

Με τον τρόπο αυτό ενσωματώνεται ένα μοντέλο κοινωνικής προσομοίωσης με πράκτορες σε ένα κλασσικό οικονομικό μοντέλο πρόβλεψης.

9.3 Πειράματα

9.3.1 Εφαρμογή στη μητροπολιτική περιοχή της Θεσσαλονίκης

Η χρήση του προσομοιωτή DAWN επιδείχθηκε για την εκτίμηση της ζήτησης του νερού στην ευρύτερη περιοχή του αστικού συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης. Προηγούμενες μελέτες που βασίστηκαν σε δεδομένα καταναλωτών της ΕΥΑΘ και σε μελέτες ερωτηματολογίων καταναλωτών κατέληξαν σε μια συνάρτηση ζήτησης του νερού για τη μητροπολιτική περιοχή της Θεσσαλονίκης [112, 148].

Δεδομένα που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά των καταναλωτών και άλλες μεταβλητές του πληθυσμού συλλέχθηκαν μέσω ερωτηματολογίων από τον Τομέα Υδραυλικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ. Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχήθηκαν με τα τιμολόγια των καταναλωτών από τα αρχεία της ΕΥΑΘ και καλύπτουν την περίοδο 1994-2000. Τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν 1356 οικιακούς καταναλωτές. Ακόμη, για τον

συνυπολογισμό των κλιματολογικών συνθηκών, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το Μετεωρολογικό Σταθμό του ΑΠΘ. Συνολικά, ήταν διαθέσιμες 25.764 παρατηρήσεις από τα ερωτηματολόγια, τους λογαριασμούς των καταναλωτών και τις μετεωρολογικές χρονοσειρές. Με βάση τις παρατηρήσεις αυτές, στη διατριβή του ο Μεντές εξάγει το οικονομετρικό μοντέλο ζήτησης του νερού, για την περιοχή της Θεσσαλονίκης [136, 148], το οποίο ακολουθεί την εξίσωση 9.3 και περιλαμβάνει τις μεταβλητές που εκτίθενται στον Πίνακα 9.1.

Πίνακας 9.1: Μεταβλητές και ελαστικότητες για το μοντέλο της Θεσσαλονίκης

Μεταβλητή	Ελαστικότητα	
Marginal price	MP	-0.340
Marginal price squared	MP^2	-0.308
Marginal price cubed	MP^3	0.158
Temperature	TEM	0.100
Rainfall	RNF	-0.015
Well informed consumers	WIC	-0.368
Family income	INC	0.351
Having many children	CHI	0.194
Car washing	CAR	0.055
Watering plants	W	0.128
Cleaning balconies	B	0.043
Cleaning pavements	P	0.032
Household residents	RES	0.026

Στο μοντέλο της Θεσσαλονίκης, πέραν των άλλων παραμέτρων, μελετήθηκε και η μεταβλητή της ενημέρωσης και επαγρύπνησης των καταναλωτών (WIC). Στην διατριβή του, ο Μεντές παρατήρησε ότι οι εργαζόμενοι της ΕΥΑΘ, παρότι δεν πληρώνουν για το νερό που καταναλώνουν, δεν καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες. Συγκεκριμένα, ο βαθμός ενημέρωσης και επαγρύπνησης υπολογίστηκε αναλυτικά ότι έχει μια αρνητική συσχέτιση με την κατανάλωση, όπως φαίνεται και από την τιμή της ελαστικότητας που υπολογίστηκε στο -0.368 [148]. Κατά τον Μεντέ, η εξήγηση του φαινομένου είναι ότι οι ενημερωμένοι καταναλωτές εξοικονομούν νερό ακόμη και αν δεν έχουν οικονομικά κίνητρα [136]. Η παρατήρηση αυτή αναδεικνύει την δυναμική εξοικονόμησης του νερού μέσω εκστρατειών ενημέρωσης και εκπαίδευσης για την επαγρύπνηση των καταναλωτών.

9.3.2 Παραμετροποίηση και βαθμονόμηση

Οι παράμετροι που σχετίζονται με την επαγρύπνηση των καταναλωτών αντιστοιχήθηκαν σε μια κοινωνική μεταβλητή του μοντέλου DAWN με σκοπό την συσχέτιση της κοινωνικής συμπεριφοράς των καταναλωτών με την κατανάλωση νερού. Οι παράμετροι των

Πίνακας 9.2: Τύποι πρακτόρων - καταναλωτών

Τύπος Καταναλωτή	Πληθυσμός	Ικανότητα	Αντίληψης
Προώθησης			
Τύπος Α	10%	Μεγάλη	Μικρή
Τύπος Β	20%	Καθόλου	Καθόλου
Τύπος Γ	30%	Μικρή	Μεγάλη
Τύπος Δ	40%	Μικρή	Μικρή

πειραμάτων ορίστηκαν σε αναλογία με το μοντέλο ζήτησης του νερού για τη Θεσσαλονίκη που επεκτάθηκε με το μοντέλο κοινωνικής προσομοίωσης του DAWN. Η ελαστικότητα της μεταβλητής WIC του κλασσικού μοντέλου ορίστηκε ως η ελαστικότητα μιας κοινωνικής μεταβλητής S , της μορφής της εξίσωσης 8.1, που πλέον αναπαριστά την κοινωνική αλληλεπίδραση των καταναλωτών. Συγκεκριμένα μια κοινωνία εκατό πρακτόρων καταναλωτών ανέλαβε να προσομοιώσει τους καταναλωτές και ορίστηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι συμπεριφοράς καταναλωτών νερού με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία, όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

Τύποι καταναλωτών

Δημιουργήθηκαν τέσσερεις τύποι πρακτόρων-καταναλωτών, σε σχέση με τις ικανότητές τους να προωθούν και να αντιλαμβάνονται σήματα εξοικονόμησης του νερού. Οι τύποι αυτοί παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.2. Στα πειράματά μας, θεωρήθηκε ότι μονάχα το 10% του συνολικού πληθυσμού επηρεάζεται άμεσα από μια εκστρατεία ενημέρωσης των καταναλωτών. Οι καταναλωτές τύπου Α ενεργούν ως γνωμηγέτες και αναπαριστούν τους περιβαλλοντικά υπεύθυνους πολίτες, που προωθούν τα σήματα περιβαλλοντικής επαγρύπνησης και εξοικονόμησης νερού στους γείτονές τους. Συγκεκριμένα, μια εκστρατεία ενημέρωσης των καταναλωτών θεωρείται ότι ενεργοποιεί τους καταναλωτές Τύπου-Α, οι οποίοι υιοθετούν άμεσα (early adopters) πρακτικές εξοικονόμησης του νερού. Για το λόγο αυτό, θεωρείται μικρή η ικανότητά τους να εξοικονομήσουν περαιτέρω νερό που καταναλώνουν.

Ένα ποσοστό 20% των καταναλωτών αντιστοιχίζεται στους κοινωνικά απαθείς καταναλωτές, που γενικά αδιαφορούν για τις περιβαλλοντικές αξίες. Οι καταναλωτές αυτοί (Τύπος-Β) θεωρούνται ότι ούτε προωθούν τα σήματα εξοικονόμησης του νερού, ούτε τα λαμβάνουν υπόψη τους για να διαμορφώσουν την καταναλωτική τους συμπεριφορά. Οι καταναλωτές Τύπου-Β υιοθετούν μια αρνητική συμπεριφορά σχετικά με την εξοικονόμηση του νερού.

Το υπόλοιπο 70% των καταναλωτών, θεωρείται ότι επηρεάζεται έμμεσα από την εκ-

στρατεία ενημέρωσης. Οι καταναλωτές αυτοί λειτουργούν ως ακόλουθοι της κοινής γνώμης και γενικά είναι κοινωνικά ευαίσθητοι. Επηρεάζονται διαμέσου της επιρροής που δέχονται από τους γνωμηγέτες. Οι καταναλωτές διακρίθηκαν σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία (Τύπος-Γ, 30% του πληθυσμού) συγκεντρώνει τους καταναλωτές εκείνους που είναι διαθέσιμοι να αλλάξουν εύκολα τις καταναλωτικές τους πρακτικές (opinion seekers). Ωστόσο, έχουν ανάγκη κάποιας ενθάρρυνσης που δέχονται από τους γνωμηγέτες. Οι καταναλωτές του Τύπου-Γ χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να αντιλαμβάνονται και να υιοθετούν γρήγορα τα σήματα εξοικονόμησης του νερού που δέχονται. Το υπόλοιπο 40% των καταναλωτών (Τύπος-Δ) αντιστοιχούν στο μέσο καταναλωτή, που δέχεται την πληροφορία από τους οικείους του (opinion receivers), ωστόσο υιοθετεί μια παθητική στάση σε σχέση με την εξοικονόμηση του νερού. Έτσι οι καταναλωτές του Τύπου-Δ χρειάζεται να εκτεθούν σε υψηλά επίπεδα επιρροής, ώστε να αναθεωρήσουν τις καταναλωτικές τους πρακτικές.

Οι παραπάνω παραδοχές βασίστηκαν στα αποτελέσματα της μελέτης του ερωτηματολογίου των καταναλωτών νερού της Θεσσαλονίκης [112]. Για παράδειγμα, η πλειοψηφία των ερωτηθέντων είπαν ότι θα ήταν δεκτικοί σε μια εκστρατεία ενημέρωσης, ενώ εκείνοι που είχαν αρνητική στάση περιορίστηκαν σε ένα ποσοστό της τάξης του 20% και το οποίο αντιστοιχήθηκε στους CA Τύπου-Β. Μια άλλη ερώτηση της έρευνας αφορούσε τον αυτοπροσδιορισμό της καταναλωτικής συμπεριφοράς. Περίπου το ένα τρίτο των ερωτηθέντων ισχυρίστηκε ότι θα μπορούσε να μειώσει την ποσότητα του νερού που καταναλώνει δίχως να επηρεαστεί η ποιότητα της ζωής τους. Οι καταναλωτές της συγκεκριμένης ομάδας δείχνουν πρόθυμοι να εξοικονομήσουν νερό, ωστόσο χρειάζονται κάποια ενθάρρυνση για να αναθεωρήσουν τις συνήθειές τους. Για το λόγο αυτό αναπαριστώνται από τους CA τύπου-Γ. Αντιστούχως ορίστηκαν και οι υπόλοιποι τύποι καταναλωτών.

Κοινωνικό πλέγμα, βάρη και συναρτήσεις διάθλασης

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, αντιστοιχήσαμε την πραγματική κοινωνία των καταναλωτών χρησιμοποιώντας πράκτορες του DAWN, που τυχαία κατανεμήθηκαν σε ένα διδιάστατο πλέγμα. Χρησιμοποιήσαμε ένα πλέγμα 12×12 και εκατό CA. Μεγάλη ικανότητα προώθησης σημάτων εξοικονόμησης νερού αντιστοιχεί στην αποστολή κοινωνικών βαρών (*sw*) με μεγαλύτερες τιμές. Ενώ η δεκτικότητα στην κοινωνική επιρροή διαθλάται μέσω της συνάρτησης D_i . Χρησιμοποιήθηκαν γραμμικές συναρτήσεις για τις συνάρτησης D_i , ωστόσο θεωρήσαμε ότι η μεγάλη ικανότητα αντίληψης της κοινωνικής επιρροής αντιστοιχεί σε μια συνάρτηση διάθλασης με διπλάσια κλίση από εκείνη που

αντιστοιχεί στην συνάρτηση διάθλασης με μικρή ικανότητα αντίληψης.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στο κλασικό οικονομετρικό μοντέλο η μεταβλητή WIC συμπεριλήφθηκε στο διάνυσμα Z της εξίσωσης 9.2. Η δύναμη των ενημερωμένων καταναλωτών διαπιστώθηκε εμπειρικά [136] ότι αυξάνεται κατά 6% κάθε τρία χρόνια και η τιμή της μεταβλητής WIC ακολουθεί την εξίσωση:

$$WIC(t) = 0.06 \frac{(t - t_0)}{36} WIC(t_0) + WIC(t_0) \quad (9.4)$$

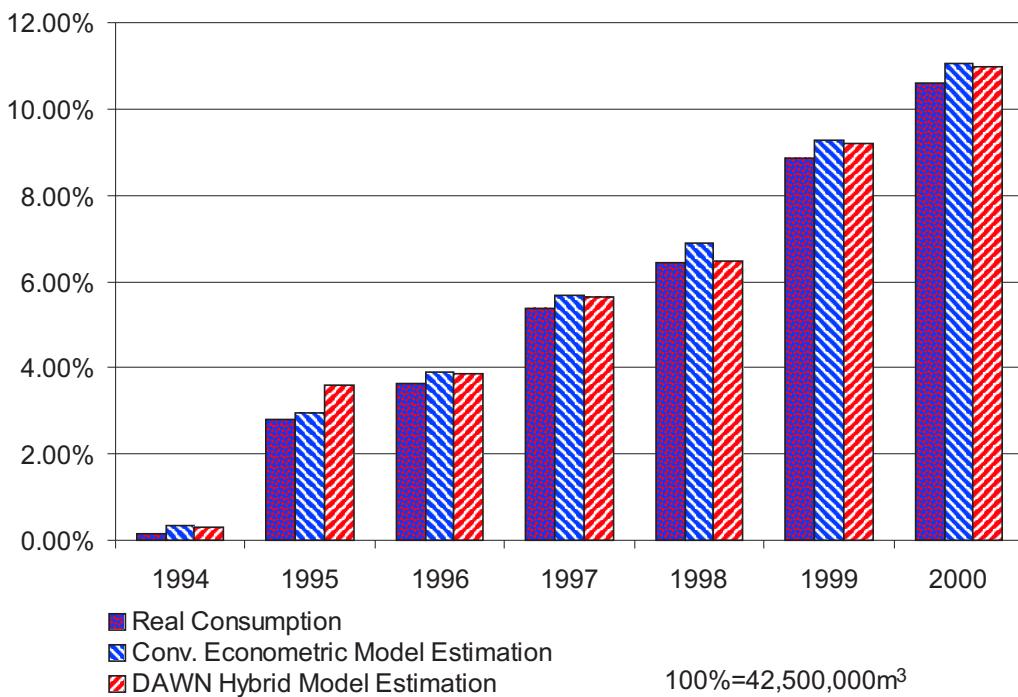
όπου ο χρόνος t εκφράζεται σε μήνες. Για το λόγο αυτό ορίστηκε ότι η τιμή του βάρους που ανταλάσσουν οι ΚΑίση με το λόγο $\frac{0.06}{36} WIC(t_0)$, ενώ για τους γνωμηγέτες θεωρήθηκε ότι έχει τη διπλάσια τιμή.

Βαθμονόμηση

Οι λοιπές παράμετροι του υβριδικού μοντέλου DAWN ορίστηκαν σε αντιστοιχία με τις παραδοχές της διατριβής του Μεντέ [136], που περιγράφηκαν συνοπτικά στην προηγούμενη παράγραφο. Το υβριδικό μοντέλο DAWN παραμετροποιήθηκε για την περιοχή της Θεσσαλονίκης και ακολούθως προσομοιώθηκε η περίοδος κατανάλωσης 1994-2000, για την οποία υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία. Τα αποτελέσματά του υβριδικού μοντέλου συγκρίθηκαν με τις πραγματικές τιμές αλλά και με την κλασική οικονομετρική προσέγγιση [136] και είχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στο διάγραμμα του Σχήματος 9.1 αντιπροσωπαύονται οι πραγματική κατανάλωση, η εκτίμηση της κλασικής μεθόδου [136] και η εκτίμηση του DAWN. Το μέσο σφάλμα εκτίμησης του κλασσικού οικονομετρικού μοντέλου ήταν 0,452%, ενώ του μοντέλου DAWN ήταν 0,449%. Θεωρήθηκε, λοιπόν, ότι το μοντέλο DAWN βαθμονομήθηκε με επιτυχία. Στη συνέχεια, το καλιμπραρισμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της ζήτησης του νερού στην περιοχή της Θεσσαλονίκης για την περίοδο 2004-2010.

9.3.3 Τα εναλλακτικά σενάρια πολιτικών εξοικονόμησης

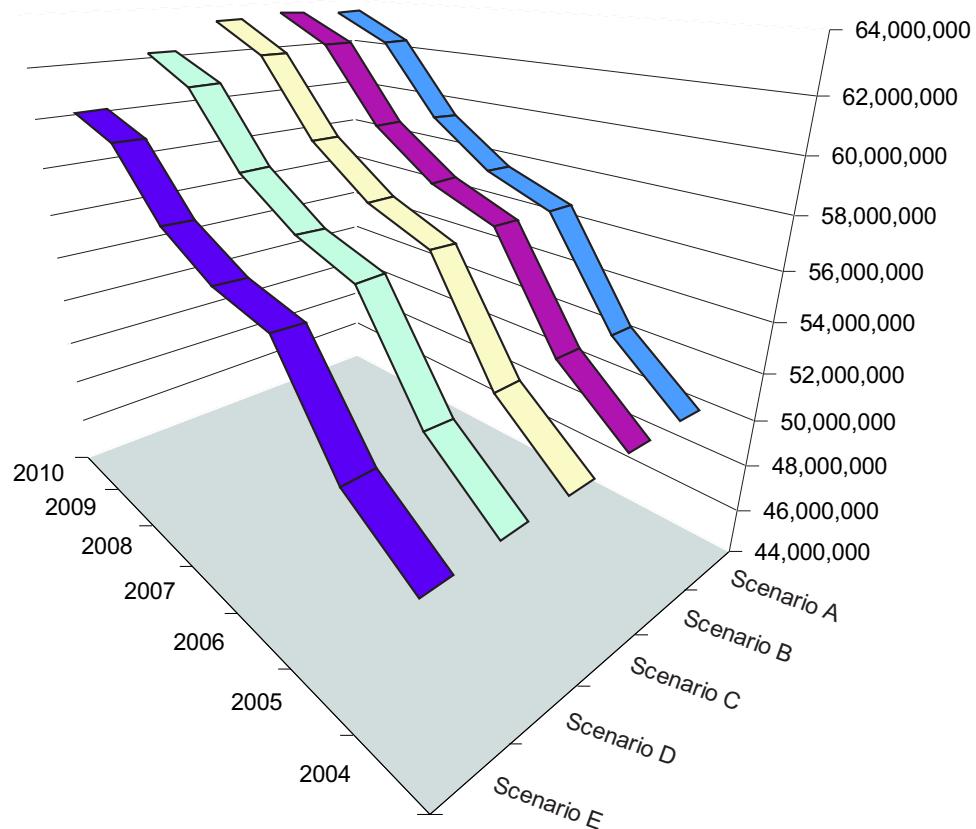
Το μοντέλο DAWN χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση πέντε εναλλακτικών σεναριών τιμολόγησης. Σε κάθε σενάριο, η εταιρεία ύδρευσης αναθεωρεί την τιμολογική της πολιτική σε επήσια βάση, ενώ οι υποθέσεις του κάθε σεναρίου είναι:



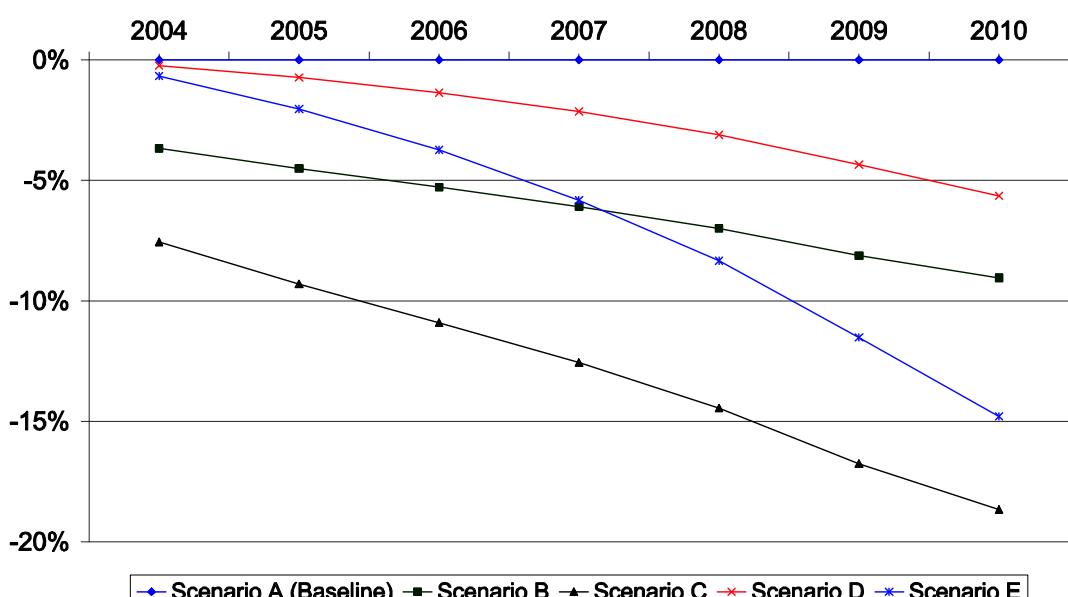
Σχήμα 9.1: Συγκριτικά αποτελέσματα για την περίοδο βαθμονόμησης του μοντέλου: Ετήσια αύξηση της συνολικής κατανάλωσης του νερού

- Σενάριο A** Η τιμή του νερού αποπληθωρίζεται (αυξάνεται κατά 3%), χωρίς κάποια εκστρατεία ενημέρωσης των καταναλωτών.
- Σενάριο B** Η τιμή του νερού αυξάνεται κατά 5%, χωρίς κάποια εκστρατεία ενημέρωσης των καταναλωτών.
- Σενάριο C** Η τιμή του νερού αυξάνεται κατά 7.5%, χωρίς κάποια εκστρατεία ενημέρωσης των καταναλωτών.
- Σενάριο D** Η τιμή του νερού αποπληθωρίζεται και εφαρμόζεται μια εκστρατεία ενημέρωσης των καταναλωτών μέσης κλίμακας.
- Σενάριο E** Η τιμή του νερού αποπληθωρίζεται και εφαρμόζεται μια εκστρατεία ενημέρωσης των καταναλωτών μεγάλης κλίμακας.

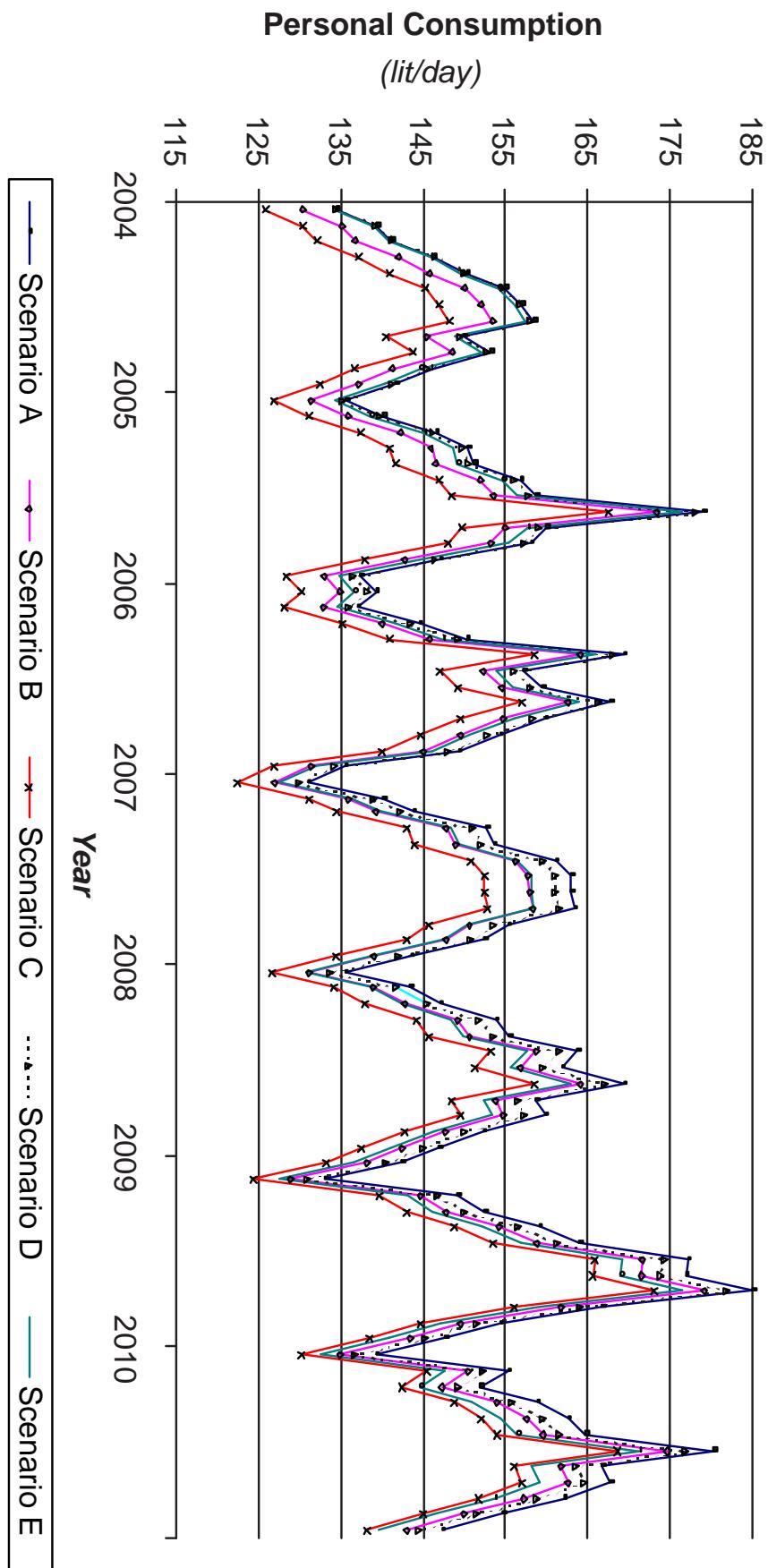
Έχοντας καθορίσει παραπάνω τους τύπους των CA, την καμπύλη ζήτησης και το κοινωνικό μοντέλο για την περιοχή της Θεσσαλονίκης, χρησιμοποιήσαμε το DAWN για να αποτιμήσουμε τις συνέπειες εφαρμογής των πέντε εναλλακτικών σεναρίων. Στη επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης του DAWN θεωρήσαμε ότι κάθε κύκλος προσομοίωσης αντιστοιχεί σε ένα μήνα.



Σχήμα 9.2: Ετήσια συνολική κατανάλωση



Σχήμα 9.3: Συγκριτική εκτίμηση της κατανάλωσης νερού μείωσης της κατανάλωσης



Σχήμα 9.4: Κατά κεφαλή κατανάλωση για την περίοδο 2004-2010

9.3.4 Αποτελέσματα και συμπεράσματα της προσομοίωσης

Στο Σχήμα 9.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των πέντε εναλλακτικών σεναρίων με το DAWN. Η χρήση του προσομοιωτή DAWN, ανέδειξε με ποσοτικό τρόπο την επίδραση της κοινωνικής αλληλεπίδρασης των καταναλωτών στην συνολική ζήτηση του νερού. Το Σχήμα 9.4 παρουσιάζει τη μηνιαία κατά κεφαλή κατανάλωση για την περίοδο 2004-2010 και το Σχήμα 9.3 τη συγκριτική εκτίμηση της κατά κεφαλήν μείωσης της κατανάλωσης.

Η εφαρμογή πολιτικών διαχείρισης που υιοθετούν εκστρατείες ενημέρωσης και εκπαίδευσης των καταναλωτών μπορούν να έχουν σημαντικά αποτελέσματα στην εξοικονόμηση του νερού. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή μιας εκστρατείας μέσης κλίμακας (Σενάριο D) έχει αντίστοιχα αποτελέσματα με την αύξηση της τιμής του νερού κατά 5% (Σενάριο B). Ακόμη, παρατηρήθηκε ότι μια εκστρατεία ενημέρωσης των καταναλωτών έχει πολλαπλασιαστικά αποτελέσματα στο πέρασμα του χρόνου. Τέλος, μια εκστρατεία ενημέρωσης μεγάλης κλίμακας (Σενάριο E) μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμό της τάξης του 5% της συνολικής κατανάλωσης του νερού.

Μέρος IV

Επίλογος

Κεφάλαιο 10

Σύνοψη, συμπεράσματα και προεκτάσεις της διατριβής

10.1 Ανακεφαλαίωση

Η παρούσα διατριβή θεμελίωσε και επέδειξε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εργασίας για την εφαρμογή της τεχνολογίας πρακτόρων λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση της διατριβής θεωρεί τους πράκτορες λογισμικού, ως μια κοινή δομική μονάδα για την ανάλυση, προδιαγραφή και ανάπτυξη ΣΠΠ. Συγκεκριμένα, ορίστηκε μια εργαλειοθήκη που περιλαμβάνει τρεις γενικευμένους τύπους πρακτόρων: α) τους πράκτορες φορείς πληροφορίας, β) τους πράκτορες που δρούν ως υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων, και γ) τους πράκτορες που ενεργούν ως κοινωνικοί εικονογράφοι. Οι τρεις αυτοί τύποι πρακτόρων της εργαλειοθήκης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης περιβαλλοντικής πληροφορίας, υποστήριξης αποφάσεων για το περιβάλλον, και προσομοίωσης σεναρίων. Στην παρούσα διατριβή, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων για παροχή συνδυασμένων υπηρεσιών υποστήριξης αποφάσεων και διαχείρισης πληροφορίας ή προσομοίωσης σεναρίων σε περιβαλλοντικές εφαρμογές.

Σε ένα δεύτερο επίπεδο, που σχετίζεται με τη διαδικασία ανάπτυξης λογισμικού, προσδιορίστηκε ένας οδηγός καλής χρήσης για την ανάλυση, προδιαγραφή και ανάπτυξη συστημάτων πρακτόρων στην περιβαλλοντική πληροφορική.

Τέλος, το παραπάνω πλαίσιο εργασίας σε συνδιασμό με τον οδηγό καλής χρήσης επιδείχθηκε στην ανάπτυξη α) ενός προσαρμόσιμου ευφυούς συστήματος παροχής υποστηρικτικών υπηρεσιών διαχείρισης και διάχυσης περιβαλλοντικής πληροφορίας για την αποτίμηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας, και β) ενός ολοκληρωμένου συστήματος κοι-

νωνικής προσομοίωσης με πράκτορες για την προσομοίωση της εφοδιαστικής αλυσίδας κατανάλωσης του νερού αστικής χρήσης.

10.1.1 Συμπεράσματα και συνεισφορά της διατριβής

Μεταξύ των κυριότερων συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη της ενσωμάτωσης πρακτόρων λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική, περιλαμβάνονται και τα εξής:

- α. Η χρήση πρακτόρων λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική υποστηρίζει την ανάπτυξη ανοιχτών και κατανεμημένων συστημάτων, καθώς εγκολπώνει μια εγγενή προσέγγιση διασποράς δεδομένων και κατανεμημένου έλεγχου. Έτσι, δεν είναι απαραίτητο να καθοριστεί ένα κεντρικό σημείο ελέγχου σε ένα ΣΠΠ. Με τον τρόπο αυτό υποστηρίζονται αποτελεσματικά αρθρωτές, αποκεντρωμένες, και ημι-δομημένες αρχιτεκτονικές που είναι απαραίτητες στην περιβαλλοντική πληροφορική.
- β. Επίσης, η χρήση ΠΛ στην περιβαλλοντική πληροφορική συμβάλει στη ανάπτυξη διαφανών εργαλείων που να αντιμετωπίζουν τα εγγενή προβλήματα του πεδίου εφαρμογής που σχετίζονται με την πολυθεματικότητα των περιβαλλοντικών επιστημών, τις συχνά συγκρουόμενες όψεις των χρηστών και τις διαφορετικές προτεραιότητες και αξίες των εμπλεκομένων μερών. Επιπρόσθετα, τα προβλήματα αβεβαιότητας σε επίπεδο δεδομένων, δομής, και μοντέλων που ενέχουν τα ΣΠΠ μπορούν να αντιμετωπιστούν με τη χρήση της τεχνολογίας των πρακτόρων.
- γ. Τέλος, οι ΠΛ αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάπτυξη και παροχή προηγμένων υπηρεσιών σε ένα ΣΠΠ. Οι ΠΛ έχουν την ικανότητα να αναλάβουν ένα διαμεσολαβητικό ρόλο που θα παρέχει υπηρεσίες σε ένα ανοιχτό περιβάλλον εργασίας. Το κενό πληροφορίας που αναδεικνύει η Ατζέντα 21 (βλέπε § 2.1), μπορεί να γεφυρωθεί χρησιμοποιώντας ΠΛ, που θα αναλάβουν ένα ρόλο μεσίτευσης πληροφορίας στους ολοένα και περισσότερους αποδέκτες των περιβαλλοντικών δεδομένων (κυβερνήσεις, μη-κυβερνητικές οργανώσεις, ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια, πολίτες, κλπ).

Η συνεισφορά της παρούσας προσέγγισης έχει πολλές πτυχές και μπορεί να αναλυθεί ως εξής:

- A. Το πλαίσιο εργασίας που θεμελιώθηκε στην παρούσα διατριβή καθορίζει με λεπτομέρεια την μεθοδολογική προσέγγιση του μηχανικού λογισμικού για την ανά-

πτυξή συστημάτων πρακτόρων στο πεδίο εφαρμογής της περιβαλλοντικής πληροφορικής. Όπως συζητήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η αξιοποίηση της τεχνολογίας των πρακτόρων ποικίλει ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής και η παρούσα θεώρηση αποτελεί την πρώτη κάθετη, γενικευμένη προσέγγιση των συστημάτων περιβαλλοντικού λογισμικού με πράκτορες.

- B. Η τεχνολογία των πρακτόρων λογισμικού προσέγγιστηκε με μεθοδικό και ολοκληρωμένο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη τις σύγχρονες ανάγκες και τις προκλήσεις που καλείται να αναλάβει η περιβαλλοντική πληροφορική. Με την παρούσα διατριβή, οι πράκτορες λογισμικού καθίστανται μια τεχνολογική υποδομή προσιτή στην περιβαλλοντική πληροφορική, ενισχύοντας τις δυνατότητες για την εφαρμογή των υπολογιστών με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος.
- C. Το ολοκληρωμένο πλαίσιο εργασίας που εισάγει η παρούσα διατριβή, θεωρεί την έννοια του πράκτορα λογισμικού, ως μια κοινή δομική μονάδα που χρησιμοποιείται σε ολόκληρη τη διαδικασία ανάλυσης, προδιαγραφής και ανάπτυξης ενός συστήματος περιβαλλοντικού λογισμικού. Με τον τρόπο αυτό υποστηρίζεται μια διαδικασία ταχείας υλοποίησης και αναθεώρησης λογισμικού σε ένα ΣΠΠ. Η δυνατότητα ανακύκλωσης των πρακτόρων λογισμικού σε διαφορετικές εφαρμογές αποτελεί ένα επιπλέον πλεονέκτημα της προσέγγισης.
- D. Η εφαρμογή του πλαισίου εργασίας που εισάγει η παρούσα διατριβή έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία μοντέλων υψηλής μεταδοτικότητας, τα οποία εκμεταλλεύονται τα ανθρωπόμορφα χαρακτηριστικά των πρακτόρων. Η έννοια το πράκτορα λογισμικού στην περιβαλλοντική πληροφορική αποτελεί μια μεταφορά που είναι εύκολο να αντιληφθούν οι επιστήμονες του περιβάλλοντος. Ως εκ τούτου, μπορούν να συμμετέχουν σε όλες τις φάσεις ανάλυσης και μοντελοποίησης ενός ΣΠΠ. Η συμμετοχή των επιστημόνων του περιβάλλοντος στις φάσεις ανάλυσης και μοντελοποίησης των ΣΠΠ είναι μια από τις βασικές προϋποθέσεις για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης στα ΣΠΠ.

10.2 Πιθανές επεκτάσεις της διατριβής

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην ανάπτυξη συστημάτων πρακτόρων σε εφαρμογές περιβαλλοντικής πληροφορικής. Το πεδίο εφαρμογής είναι ιδιαίτερα ευρύ και προφανώς δεν επιδείχθηκε η χρήση του πλαισίου εργασίας σε όλες τις θεματικές ενότητες. Μελλοντικές προσπάθειες θα μπορούσαν να εστιαστούν στην ανάπτυξη επιδεικτικών

εφαρμογών σε διαφορετικά πεδία εφαρμογής, όπως σε συστήματα βιομηχανικής πιστοποίησης (Eco-label, EMAS, ISO-14000), ή σε συστήματα ολοκληρωμένης διαχείρισης του κύκλου ζωής υλικών και προϊόντων σε μια γραμμή παραγωγής.

Μια ενδιαφέρουσα προέκταση της παρούσας διατριβής, θα μπορούσε να επικεντρωθεί στη θεμελίωση μιας εύρωστης θεωρητικής προσέγγισης για την υποστήριξη συμμετοχικών διαδικασιών στην διαδικασία χάραξης πολιτικής για το περιβάλλον. Μια τέτοια προπτική διαφαίνεται ότι θα έρθει στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος τα επόμενα χρόνια και ήδη συμπεριλαμβάνεται στην οδηγία 2000/60/ΕC για την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτινων πόρων.

Τέλος, αντικείμενο περαιτέρω έρευνας να αποτελέσει η επέκταση του πλαισίου εργασίας για την ολοκλήρωση υπηρεσιών σε υψηλότερο επίπεδο, επιδεικνύοντας την ολοκλήρωση μετα-δεδομένων, μετα-μοντέλων και μετα-υπηρεσιών. Η ενσωμάτωση συναφών τεχνολογιών, όπως οι δικτυακές υπηρεσίες (web-services) και το σημασιολογικό δίκτυο (semantic web) θα μπορούσε να συμβάλλει σε μια τέτοια κατεύθυνση.

Βιβλιογραφία

- [1] AA. Agent Academy: A Data Mining Framework for Developing Intelligent Agents. IST project (IST-2000-31050, The Agent Academy Consortium, 2002. Available online: <http://AgentAcademy.iti.gr>. 112
- [2] AAAI. AI applications in agriculture, natural resource management, and the environment. In *AAAI webpage*. The American Association for Artificial Intelligence, 2004. Available online: <http://www.aaai.org/AITopics/html/agri.html>. 133
- [3] AAAI. I.T. may help clean a polluted sea, say researchers. *AI in the News* (July 2004). Available online: <http://www.aaai.org/AITopics/html/archvE7.html#july16c>. 133
- [4] ACM. Timely topics for IT professionals. *ACM TechNews* 6, 670 (July 19 2004). Available online: <http://www.acm.org/technews/articles/2004-6/0719m.html#item2>. 133
- [5] Agent Oriented Software Pty. Ltd. *JACK Intelligent Agents Agent Manual*, 4.1 ed. Carlton South, Victoria, Australia, October 2004. 47
- [6] AgentLink. AgentLink: The EU network of excellence on agent-based computing, 1998-2005. Available online: <http://www.agentlink.org>. 2
- [7] Alag, S., Agogino, A. M., and Morjaria, M. A methodology for intelligent sensor measurement, validation, fusion, and fault detection for equipment monitoring and diagnostics. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing* 15, 4 (2001), 307-320. 125
- [8] Albert, M., Laengle, T., and Woern, H. Development tool for distributed monitoring and diagnosis systems. In *Proc. of the 13th Int'l Workshop on Principles of Diagnosis* (Semmering, Austria, 2002), M. Stumptner and F. Wotawa, Eds., pp. 158-164. 52, 57
- [9] Alcamo, J. Scenarios as tools for international environmental assessments. Environmental Issue Report No 24, European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark, 2001. 16
- [10] Arbues, F., Garcia-Valinas, M. A., and Martinez-Espineira, R. Estimation of residential water demand: A state-of-the-art review. *Journal of Socio-Economics* 32, 1 (2003), 81-102. 163

- [11] Arlosoroff, S. Promoting water resource management in the Middle East. *Water Engineering* (1997), 6-16. 158
- [12] Athanasiadis, I. N., Kaburlasos, V. G., Mitkas, P. A., and Petridis, V. Applying machine learning techniques on air quality data for real-time decision support. In *Proc. 1st Int'l Symposium on Information Technologies in Environmental Engineering (ITEE-2003)* (Gdansk, Poland, June 2003), ICSC-NAISO Publishers, p. 51. 104
- [13] Athanasiadis, I. N., and Mitkas, P. A. An agent-based intelligent environmental monitoring system. *Management of Environmental Quality* 15, 3 (May 2004), 238-249. 93, 133
- [14] Athanasiadis, I. N., and Mitkas, P. A. Applying agent technology in environmental management systems under real-time constraints. In *Trans. 2nd Int'l Environmental Modelling and Software Society Biennial Congress: Complexity and Integrated Resources Management* (Osnabrueck, Germany, June 2004), C. Pahl, S. Schmidt, A. E. Rizzoli, and A. Jakeman, Eds., vol. 2, iEMSSs: Manno, Switzerland, pp. 531-536. **Best student paper and presentation prize in Integrated Systems.** 77
- [15] Athanasiadis, I. N., and Mitkas, P. A. Supporting the decision-making process in environmental monitoring systems with knowledge discovery techniques. In *Knowledge-based Services for the Public Sector Symposium (Workshop III: Knowledge Discovery for Environmental Management)* (Bonn, Germany, June 2004), H. Voss, M. Wachowicz, S. Dzeroski, and A. Lanza, Eds., KDnet, pp. 1-12. 104
- [16] Athanasiadis, I. N., Mitkas, P. A., Laleci, G. B., and Kabak, Y. Embedding data-driven decision strategies on software agents: The case of a multi-agent system for monitoring air-quality indexes. In *Concurrent Engineering: The Vision for the Future Generation in Research and Applications* (Madeira, Portugal, July 2003), R. Jardim-Goncalves, J. Cha, and A. Steiger-Garcao, Eds., vol. 1, Balkema Publishers, pp. 23-30. 104, 112, 113, 133
- [17] AWWA. *Water Conservation Strategies*. American Water Works Association, 1980. 159
- [18] Barabási, A.-L., and Albert, R. Emergence of scaling in random networks. *Science* 286 (October 1999), 509-512. 142
- [19] Barratt, B. The Hertfordshire and Bedfordshire air pollution monitoring network. Annual Report 1999, SEIPH - Environmental Research Group, King's College, London, UK, May 2000. 117, 118
- [20] Barreteau, O., and Bousquet, F. SHADOC: A multi-agent model to tackle viability of irrigated systems. *Annals of Operations Research* 94 (2000), 139-162. 54, 58, 162
- [21] Barthelemy, O., Moss, S., Downing, T., and Rouchier, J. Policy modelling with ABSS: The case of water demand management. CPM Report No. 02-92, Centre for Policy Modelling, The Business School, Manchester Metropolitan University, 2001. 56, 58, 162
- [22] Baumann, D. D., Boland, J. J., and Sims, J. H. The problem of defining water conservation. The Cornett Papers, University of Victoria, Victoria, British Columbia, Canada, 1980. 159

- [23] Becu, N., Walker, P. P. A., Barreteau, O., and Page, C. L. Agent based simulation of a small catchment water management in Northern Thailand: Description of the CATCHSCAPE model. *Ecological Modelling* 170 (2003), 319-331. 54, 58, 162
- [24] Bellifemine, F., Caire, G., Poggi, A., and Rimassa, G. JADE-A white paper. *EXP in search of innovation* 3, 3 (September 2003), 6-19. 28
- [25] Bellifemine, F., Poggi, A., and Rimassa, G. Developing multi-agent systems with JADE. In *Proc. of 7th Int'l Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (ATAL-2000)* (Boston, MA, 2000). Available online: <http://jade.cseit.it>. 47, 72, 91
- [26] Bellifemine, F., Poggi, A., and Rimassa, G. JADE: A FIPA-2000 compliant agent development environment. In *Proc. of the 5th Int'l Conf. Autonomous Agents* (Montreal, Canada, 2001), ACM, pp. 216-217. 47, 72, 91, 113, 154
- [27] Berger, M., Rusitschka, S., Toropov, D., Watzke, M., and Schlichte, M. Porting distributed agent-middleware to small mobile devices. In *Workshop on Ubiquitous Agents on embedded, wearable, and mobile devices* (Bologna, July 2002). 29
- [28] Billings, R. B., and Agthe, D. E. Price elasticities for water: A case of increasing block rates. *Land Economic* 56, 1 (1979), 73-84. 163
- [29] Bordignon, S., Gaetan, C., and Lisi, F. Nonlinear models for ground-level ozone forecasting. *Statistical Methods and Applications* 11 (2002), 227-246. 121
- [30] Brauer, W., Nickles, M., Rovatsos, M., Wei , G., and Lorentzen, K. F. Expectation-oriented analysis and design. In *Agent-Oriented Software Engineering II, Second International Workshop, AOSE 2001* (2002), M. Wooldridge, G. Weiss, and P. Ciancarini, Eds., vol. 2222 of *LNCS*, Springer-Verlag, pp. 226-244. 47
- [31] Ceccaroni, L., Cortés, U., and Sàncchez-Marrè, M. OntoWEDSS: Augmenting environmental decision-support systems with ontologies. *Environmental Modelling & Software* 19 (2004), 785-797. 54
- [32] Chen, L.-J., Islam, S., and Biswas, P. Nonlinear dynamics of hourly ozone concentrations: Nonparametric short term prediction. *Atmospheric Environment* 32, 11 (1998), 1839-1848. 121
- [33] Clappa, L. J., and Jenkin, M. E. Analysis of the relationship between ambient levels of O₃, NO₂ and NO as a function of NO_x in the UK. *Atmospheric Environment* 35, 36 (2001), 6391-6405. 126
- [34] Cohen, P. R., and Levesque, H. J. Intention is choice with commitment. *Artificial Intelligence* 42, 2-3 (1990), 213-261. 47
- [35] Cortés, U., Sàncchez-Marrè, M., Ceccaroni, L., R-Roda, I., and Poch, M. Artificial intelligence and environmental decision support systems. *Applied Intelligence* 13, 1 (2000), 77-91. 21
- [36] Cortés, U., Sàncchez-Marrè, M., R-Roda, I., and Riaño, D. Binding environmental sciences and artificial intelligence on ECAI 98. *AI Communications* 12 (1999), 261-265. 11

- [37] Cox, M. G., Harris, P. M., Milton, M. J. T., and Woods, P. T. Method for evaluating trends in ozone concentration data and its application to data from the UK Rural Ozone Monitoring Network. NPL Report CMSC 15/02, National Physical Laboratory, Middlesex, UK, 2002. 124
- [38] Cranefield, S., and Purvis, M. Integrating environmental information: Incorporating metadata in a distributed information systems architecture. *Advances in Environmental Research* 5 (2001), 319-325. 51, 57
- [39] DAML. The DARPA Agent Markup Language homepage, 2000. Available online: <http://www.daml.org>. 47
- [40] Dance, S., and Gorman, M. Intelligent agents in the Australian Bureau of Meteorology. In *Proc. of the 1st Int'l Workshop on "Challenges in Open Agent Systems" held at AAMAS'02* (Bologna, Italy, July 2002). 51, 57
- [41] Dance, S., Gorman, M., Padgham, L., and Winikoff, M. An evolving multi agent system for meteorological alerts. In *Proc. of the 2nd international joint conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS-03* (2003), ACM Press, pp. 966-967. 51, 57, 81
- [42] Danielson, L. E. An analysis of residential demand for water using micro time-series data. *Water Resources Research* 15, 4 (1979), 763-767. 163
- [43] Davis, D. Agent-based decision-support framework for water supply infrastructure rehabilitation and development. *Computers, Environment and Urban Systems* 24 (2000), 173-190. 54, 57
- [44] Davis, D., and Sharp, B. The application of expert system and agent technology to water mains rehabilitation decision making. *New Review of Applied Expert Systems* 5 (1999), 5-18. 54, 57
- [45] De Giacomo, G., Lespérance, Y., and Levesque, H. J. ConGolog, a concurrent programming language based on the situation calculus. *Artificial Intelligence* 121, 1-2 (2000), 109-169. 47
- [46] Denisov, N., Christoffersen, L., et al. Impact of environmental information on decision-making processes and environment. Occasional Paper Series 01 2001, UNEP-GRID-Arendal, 2001. 11
- [47] Doran, J. Intervening to achieve co-operative ecosystem management: Towards an agent based model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4, 2 (2001). 161
- [48] Ducrot, R., Page, C. L., Bommel, P., and Kuperb, M. Articulating land and water dynamics with urbanization: An attempt to model natural resources management at the urban edge. *Computers, Environment and Urban Systems* 28 (2004), 85-106. 162
- [49] Dziegielewski, B., et al. *Evaluating Urban Water Conservation Programs: A Procedures Manual*. California Urban Water Agencies, 1992. 160
- [50] EEA. Multilingual glossary of environmental terms. Tech. rep., European Environmental Agency, 2004. Available online: <http://glossary.eea.eu.int>. xxiv

- [51] EMAS. The EU Eco-Management and Audit Scheme (EMAS). DG environment, European Commission, 1995. Available online: <http://europa.eu.int/comm/environment/emas/>. See also: Council Regulation (EEC) No 1836/93. 23
- [52] Etzioni, O., and Weld, D. S. Intelligent agents on the internet: Fact, Fiction, and Forecast. *IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications* 10, 4 (1995), 44-49. 36
- [53] Farquhar, A., Fikes, R., and Rice, J. The Ontolingua server: A tool for collaborative ontology construction. Technical Report KSL-96-26, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, 1996. 45, 47
- [54] Felluga, B., Gauthier, T., Genesh, A., Haastrup, P., Neophytou, C., Poslad, S., Preux, D., Plini, P., Santouridis, I., Stjernholm, M., and Würtz, J. Environmental data exchange for inland waters using independent software agents. Report 20549 EN, Institute for Environment and Sustainability, European Joint Research Centre, Ispra, Italy, April 2003. 51, 57, 81
- [55] Fensel, D., Horrocks, I., van Harmelen, F., Decker, S., Erdmann, M., and Klein, M. C. A. OIL in a nutshell. In *Knowledge Acquisition, Modeling and Management, 12th International Conference, EKAW 2000* (2000), R. Dieng and O. Corby, Eds., vol. 1937 of LNCS, Springer-Verlag, pp. 1-16. 47
- [56] Fensel, D., van Harmelen, F., Horrocks, I., McGuinness, D. L., and Patel-Schneider, P. F. OIL: An ontology infrastructure for the semantic web. *IEEE Intelligent Systems* 16, 2 (2001), 38-45. 47
- [57] Feuillette, S., Bousquet, F., and Goulven, P. L. SINUSE: A multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table. *Environmental Modelling & Software* 18 (2003), 413-427. 55, 58, 162
- [58] Finin, T., Labrou, Y., and Mayfield, J. KQML as an agent communication language. In *Software Agents*, J. M. Bradshaw, Ed. AAAI Press/The MIT Press, 1997, pp. 291-316. 43, 47
- [59] FIPA. Agent Specifications. Web-page, Foundation for Intelligent Physical Agents, 1999. Available online: <http://www.fipa.org>. 91
- [60] FIPA. Ontology Service Specification. Doc. No. XC00086 D, Foundation of Physical Intelligent Agents, Geneva, Switzerland, 2001. 91
- [61] FIPA. ACL Message Structure Specification. Doc. No. SC00061 G, Foundation of Physical Intelligent Agents, Geneva, Switzerland, 2002. 47, 91
- [62] FIPA. Agent Management Specification. Doc. No. SC00023 G, Foundation of Physical Intelligent Agents, Geneva, Switzerland, 2002. 91, 108, 154
- [63] FIPA. Semantic Language (SL) Content Language Specifications. Doc. No. SC00008 I, Foundation of Physical Intelligent Agents, Geneva, Switzerland, 2002. 91
- [64] Foner, L. N. Entertainming agents: A social case study. In *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents* (Marina del Rey, CA, USA, February 1997), ACM Press, pp. 122-129. 27

- [65] Fox, J., and Das, S. *Safe and Sound: Artificial intelligence in hazardous situations.* AAAI and MIT Press, 1994. 21
- [66] Franklin, S., and Graesser, A. Is it an agent, or just a program?: A taxonomy for autonomous agents. In *Proceedings of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages* (1996), Springer-Verlag, pp. 21-35. 26
- [67] Friedman-Hill, E. J. *Jess in Action.* Manning Publications, 2003. 92
- [68] Friedman-Hill, E. J. Jess, the expert system shell for the Java platform. version 6.1, Sandia National Laboratories, CA, 2003. Available online: <http://herzberg.ca.sandia.gov/jess/>. 92, 113
- [69] Frysinger, S. P. An integrated environmental information system (ieis) for corporate environmental management. *Advances in Environmental Research* 5 (2001), 361-367. 20
- [70] Genesereth, M. R., and Fikes, R. E. Knowledge interchange format. Version 3.0, Reference manual. Technical Report Logic-92-4, Computer Science Department, Stanford University, 1992. Available online: <http://www.cs.umbc.edu/kse/kif/>. 47
- [71] Gershenson, C. The Publications Column. *Complexity Digest* 2004-29, 44 (2004). Available online: http://www.comdig.org/article.php?id_article=17194. 133
- [72] Gilbert, N., et al. Freshwater Integrated Resource Management with Agents: The FIRMA project summary. Available online: <http://firma.cfpm.org>, 2001-2003. 162
- [73] Gilbert, N., and Troitzsch, K. G. *Simulation for the Social Scientist.* Open University Press, 1999. 138
- [74] Giunchiglia, F., Mylopoulos, J., and Perini, A. The Tropos software development methodology: processes, models and diagrams. In *Software Engineering III, Third International Workshop, AOSE-2002*, F. Giunchiglia, J. Odell, and G. Weiss, Eds., LNCS. Springer-Verlag, 2003. 47, 59, 72
- [75] Godin, S. *Unleashing the Ideavirus.* Simon and Schuster, 2002. 140
- [76] Green, S., Hurst, L., Nangle, B., Cunningham, P., Somers, F., and Evans, R. Software agents: A review. Technical report TCS-CS-1997-06, Trinity College Dublin, Dublin, 1997. 26, 28, 30
- [77] Grosso, W. E., Eriksson, H., Fergerson, R. W., Gennari, J. H., Tu, S. W., and Musen, M. A. Knowledge modeling at the millennium, The design and evolution of Protégé-2000. SMI report No: SMI-1999-0801, Medical Informatics Group, School of Medicine, Stanford University, 1999. Available online: <http://protege.stanford.edu>. 45, 47, 92, 106
- [78] Guariso, G., and Werthner, H. *Environmental Decision Support Systems.* John Wiley & Sons, 1989. 20
- [79] Günter, O. *Environmental Information Systems.* Springer, 1998. 12, 19

- [80] Haagsma, I., and Johanns, R. Decision support systems: An integrated approach. In *Environmental Systems* (1994), P. Zannetti, Ed., vol. II, pp. 205-212. 20
- [81] Haklay, M. From environmental information systems to environmental informatics: Evolution and meaning. Working Paper Series 7, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, May 1999. 19, 20
- [82] Harkat, M.-F., Mourot, G., and Ragot, J. Sensor failure detection and isolation of an air quality monitoring network using principal component analysis. In *Proc. of the Symposium Techniques Avancées et Stratégies Innovantes en Modélisation et Commandes Robustes des Processus Industriels* (France, 2004), ISA, The Instrumentation, Systems and Automation Society. 125
- [83] Harremo, P., et al. Late lessons from early warnings: The precautionary principle 1896-2000. Environmental Issue Report 22, European Topic Centre on Air Quality, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, January 2002. 79
- [84] Hedges, S. Ozone monitoring, mapping, and public outreach: Delivering real-time ozone information to your community. Technical Report EPA-625-R-99-007, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA, September 1999. 118, 126
- [85] Hendee, J. C., Mueller, E., Humphrey, C., and Moore, T. A data-driven expert system for producing coral bleaching alerts at Sombrero Reef in the Florida Keys. *Bulletin of Marine Science* 69, 2 (2001), 673-684. 121
- [86] Hewitt, C. Viewing control structures as patterns of passing messages. *Artificial Intelligence* 8, 3 (1977), 323-364. 27
- [87] Hilty, L. M., Page, B., Radenmacher, F. J., and Riekert, W.-F. Database technologies for environmental data management. In *Environmental Informatics: Methodology and Applications of environmental information processing*, N. M. Avouris and B. Page, Eds., vol. 6 of *EuroCourses, Computer and information science*. Kluwer Academic Publishers for the Commission of the European Communities, 1995, pp. 39-51. 20
- [88] Hilty, L. M., Page, B., Radenmacher, F. J., and Riekert, W.-F. Environmental informatics as a new discipline of applied computer science. In *Environmental Informatics: Methodology and Applications of environmental information processing*, N. M. Avouris and B. Page, Eds., vol. 6 of *EuroCourses, Computer and information science*. Kluwer Academic Publishers for the Commission of the European Communities, 1995, pp. 1-11. 13, 21, 23, 60
- [89] Hilty, L. M., and Ruddy, T. F. The information society and sustainable development. Series A: Discussion paper 2000-03, Solothurn University of Applied Sciences, Northwestern, Switzerland, May 2000. 20, 21
- [90] Hilty, L. M., and Ruddy, T. F. Resource productivity in the information age. *Futura* 2 (2002), 76-84. 20, 21
- [91] Hindriks, K. V., de Boer, F. S., van der Hoek, W., and Meyer, J.-J. C. A formal embedding of AgentSpeak(L) in 3APL. In *Advanced Topics in Artificial Intelligence, 11th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence* (1998), G. Antoniou and J. K. Slaney, Eds., vol. 1502 of *LNAI*, Springer-Verlag, pp. 155-166. 47

- [92] Huang, G. H., and Chang, N. B. Perspectives of environmental informatics and systems analysis. *Journal of Environmental Informatics* 1, 1 (2003), 1-6. 12, 13, 121
- [93] Huang, L.-S., and Smith, R. L. Meteorologically-dependent trends in urban ozone. *Environmetrics* 10, 1 (1999), 103-118. 121, 126
- [94] Huhns, M. N., and Stephens, L. M. Multiagent systems and societies of agents. In *Multiagent Systems: A modern approach to Distributed Artificial Intelligence*, G. Weiss, Ed. MIT Press, 2000, ch. 2, pp. 79-120. 41, 42, 43, 45
- [95] IFIP. Computers and the environment. Working group 5.11, International Federation for Information Processing, 1999. Available online: <http://www.enviromatics.org>. 12
- [96] ISO. The ISO14000 series of standards and guidance documents. Technical committee 207 on environmental management, International Organization for Standardization's (ISO), 1993. Available online: <http://www.tc207.org>. 23
- [97] JACK. JACK intelligent agents, 1998. Available online: <http://www.agent-software.com.au>. 47
- [98] JATLite. JATLite: Java Agent Template, Lite, 2000. Available online: <http://java.stanford.edu/>. 47
- [99] Jennings, N. R. An agent-based approach for building complex software systems. *Communications of the ACM* 44, 4 (2001), 35-41. 45
- [100] Jennings, N. R., Sycara, K., and Wooldridge, M. J. A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 1 1, 1 (1998), 7-38. 31
- [101] Jennings, N. R., and Wooldridge, M. J. Applications of intelligent agents. In *Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets*, N. R. Jennings and M. Wooldridge, Eds. Springer-Verlag, 1998, pp. 3-28. 30, 32
- [102] Jeon, H., Petrie, C., and Cutkosky, M. R. JATLite: A Java agent infrastructure with message routing. *IEEE Internet Computing* 4, 2 (2000). 47
- [103] Kalapanidas, E., and Avouris, N. Short-term air quality prediction using a case based classifier. *Environmental Modelling & Software* 16, 3 (2001), 263-272. 121
- [104] Kalapanidas, E., and Avouris, N. Air quality management using a multi-agent system. *International Journal of Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering* 17, 2 (2002), 119-130. 53, 57, 81
- [105] Karatzas, K., Masouras, A., Kaprara, A., Basoukos, A., Papaioannou, I., Slini, T., and Moussiopoulos, N. Environmental information systems and the concept of environmental informatics. In *Environmental Online Communication*, A. Scharl, Ed. Springer-Verlag, 2004, pp. 3-9. 12
- [106] Kashyap, V. Design and creation of ontologies for environmental information retrieval. In *Proc. of the 12th Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management (KAW'99)* (Banff, Canada, 1999). 51, 57
- [107] Katz, E., and Lazarsfeld, P. *Personal Influence*. Free Press, 1955. 140

- [108] Kim, H.-Y., and Guldmann, J.-M. Modeling air quality in urban areas: A cell-based statistical approach. *Geographical Analysis* 33 (2001). 121
- [109] Knapik, M., and Johnson, J. *Developing Intelligent Agents for Distributed Systems*. Computing McGraw-Hill, 1998. 45
- [110] Koeppen-Seliger, B., Ding, S. X., and Frank, P. M. European research projects on multi-agents-based fault diagnosis and intelligent fault tolerant control. In *Plenary Lecture IAR Annual Meeting* (Strasbourg, 2001). 52, 57
- [111] Kok, K., Valkering, P., Carmichael, J., Hinkel, J., Athanasiadis, I. N., Salmi, O., Moreau, V., and Steenhof, P. Problem formulation and classification in integrated assessment modeling. In *Puzzle Solving for Policy II*, J. Rotmans et al., Eds. ICIS, in print. 17
- [112] Kolokytha, E., Mylopoulos, Y., and Mentes, A. Evaluating demand management aspects of urban water policy - A field survey in the city of Thessaloniki-Greece. *Urban Water* 4 (2002), 391-400. 165, 168
- [113] KQML. The UMBC KQML webpage, 1999. Available online: <http://www.cs.umbc.edu/kqml/>. 43, 47
- [114] Labrou, Y., Finin, T., and Peng, Y. Agent communication languages: The current landscape. *IEEE Intelligent Systems* 14, 2 (1999), 45-52. 43, 47
- [115] Larssen, S., and Hagen, L. O. Air pollution monitoring in Europe. Problems and trends. Topic Report 26-1996, European Topic Centre on Air Quality, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, November 1996. 119
- [116] Lekkas, G. P., Avouris, N. M., and Viras, L. G. Case-based reasoning in environmental monitoring applications. *Applied Artificial Intelligence* 8 (1994), 359-376. 121
- [117] LePoire, D. J., Arnish, J. J., Klett, T. R., Johnson, R. L., and Chen, S.-Y. Pathways to enhance environmental assessment information systems. *Informing Science Journal* 7 (2000), 117-128. 16, 23
- [118] Lester, J. Introduction to the special issue on intelligent user interfaces. *AI Magazine* 22, 4 (2001), 13-14. 28
- [119] Lhuillier, N., Tomaiuolo, M., and Vitaglione, G. Security in multi-agent systems:JADE-S goes distributed. *EXP in search of innovation* 3, 3 (September 2003). 29
- [120] Loibl, W., and Toetzer, T. Modeling growth and densification processes in suburban regions-simulation of landscape transition with spatial agents. *Environmental Modelling & Software* 18 (2003), 553-563. 55, 58
- [121] Lubchenco, J., et al. Environmental science and engineering for the 21st century: The role of the National Science Foundation: Interim report. NSB 99-133, Task Force on the Environment, National Science Foundation, 1999. 11
- [122] Lubchenco, J., et al. Environmental science and engineering for the 21st century: The role of the National Science Foundation. NSB 00-22, Task Force on the Environment, National Science Foundation, 2000. Available online: <http://www.nsf.gov/pubs/2000/nsb0022/start.htm>. 11

- [123] Luck, M., McBurney, P., and Preist, C., Eds. *Agent Technology: Enabling Next Generation Computing, A Roadmap for Agent Based Computing*. AgentLink, 2003. 32, 46
- [124] Luck, M., McBurney, P., Preist, C., and Guilfoyle, C., Eds. *Agent technology roadmap*. AgentLink, 2002. 32
- [125] Maes, P., Ed. *Designing Autonomous Agents - Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*. MIT Press, 1990. 2, 48
- [126] Mahalingam, K., and Huhns, M. An ontology tool for distributed information environments. *IEEE Computer* 30, 6 (1997), 80-83. 45, 47
- [127] Malheiro, B., and Oliveira, E. An intelligent distributed system for environmental management. In *Environmental Informatics: Methodology and Applications of Environmental Information Processing*, N. Avouris and B. Page, Eds., vol. 6 of *EuroCourses, Computer and information science*. Kluwer Academic Publishers for the Commission of the European Communities, 1995, pp. 355-370. 53, 57
- [128] Malheiro, B., and Oliveira, E. Environmental decision support: A distributed artificial intelligence approach. In *Proc. of the International Symposium and Workshop: Environment and Interaction* (Porto, Portugal, 1996). 53, 57
- [129] Malheiro, B., and Oliveira, E. Environmental decision support: A multi-agent approach. In *Proc. of the First International Conference on Autonomous Agents (Agents'97)* (Marina del Rey, CA, U.S.A., 1997), ACM. 53, 57
- [130] Mangina, E. *Review of software products for Multi-Agent Systems*. AgentLink, 2002. 26, 32, 46, 47, 48, 50, 72
- [131] Mantilla, E., and Perez, J. G. Strategies for the automated evaluation of meteorological temporary series and air quality. CEAM Report, Fundacion Centro de Estudios Ambientales del Mediteraneo, September, 2002. 123
- [132] Martin, M. I.T. may help clean a polluted sea. In *TechNews*. NewsFactor Innovation, July 16 2004. Available online: <http://science.newsfactor.com/perl/story/25911.html>. 133
- [133] Mathevet, R., Bousquet, F., Page, C. L., and Antona, M. Agent-based simulations of interactions between duck population, farming decisions and leasing of hunting rights in the Camargue (Southern France). *Ecological Modelling* 165 (2003). 55, 58
- [134] Matsatsinis, N., Moraitis, P., Psomatakis, V., and Spanoudakis, N. An agent-based system for products penetration strategy selection. *Applied Artificial Intelligence* 17, 10 (2003), 901-925. 54, 58
- [135] Matsatsinis, N. F., Moraitis, P. N., Psomatakis, V. M., and Spanoudakis, N. I. Towards an intelligent decision support system for differentiated agricultural products. In *Proc. of the 5th International Conference of the Decision Sciences Institute* (Athens, Greece, July 1999). 54, 58
- [136] Mentes, A. K. *Management of urban water: Development of an integrated system for evaluating elective water tariffs*. PhD Dissertation, Civil Engineering Dept, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 2001. 166, 169

- [137] Mershams, G., and Skinner, C. *New insights into communication and public relations*. Heinemann Publ., 1999. 140
- [138] Michener, W. Ecoinformatics: Advances in information management and metadata development. In *Long Term Research in Ecology: Cross-Site Collaborations for the Future* (Albuquerque, New Mexico, 1997). Available online: <http://lternet.edu/asm/1997/michener>. 14
- [139] Michener, W. K., Brunt, J. W., and Vanderbilt, K. L. Ecological informatics: a long-term ecological research perspective. In *SCI2002: Proceedings of the 6th World Multiconference on Systematics, Cybernetics and Informatics* (Orlando, Florida, USA, July 2002), N. Callaos, J. Porter, and N. Rishe, Eds., vol. VII, IIIS, pp. 390-395. 14
- [140] Micucci, D. Exploiting the kaleidoscope architecture in an industrial environmental monitoring system with heterogeneous devices and a knowledge-based supervisor. In *Proc. of the 14th international conference on Software Engineering and Knowledge Engineering* (2002), ACM Press, pp. 685-688. 53, 57, 81
- [141] Milis, M. A multi-agent system for managing and controlling meteorological radar data. Diploma thesis, Electrical and Computer Engineering Dept, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 2004. 96
- [142] Mitkas, P. A., Kehagias, D., Symeonidis, A. L., and Athanasiadis, I. N. A framework for constructing multi-agent applications and training intelligent agents. In *Proc. of Autonomous Agents & Multi-Agent Systems (AAMAS 2003) at the Agent-Oriented Software Engineering (AOSE-2003) Workshop* (Melbourne, Australia, July 2003), P. Giorgini, J. P. Mueller, and J. Odell, Eds., pp. 1-15. Revised version published in LNCS series. 112
- [143] Mitkas, P. A., Symeonidis, A. L., Kehagias, D., Athanasiadis, I. N., Laleci, G., Kurt, G., Kabak, Y., Acar, A., and Dogac, A. An agent framework for dynamic agent retraining: Agent Academy. In *Challenges and Achievements in e-business and e-work* (Prague, Czech Republic, October 2002), B. Stanford-Smith, E. Chiozza, and M. Edin, Eds., IOS Press, pp. 757-764. 112
- [144] Mol, V. Airview: Air quality visualization instrument for Europe on the web. European Topic Centre for Air and Climate Change Ver. 3.0, European Environmental Agency, 2004. 123
- [145] Moomaw, R. L., and Warner, L. The adoption of municipal water conservation - an unlikely event? *Water Resources Bulletin* 17 (1981), 1029-1034. 159
- [146] Moss, S., Downing, T., and Rouchier, J. Demonstrating the role of stakeholder participation: An agent based social simulation model of water demand policy and response. CPM Report No. 00-76, Centre for Policy Modelling, The Business School, Manchester Metropolitan University, 2000. 56, 58, 162
- [147] Murthy, V. K., and Krishnamurthy, E. Interacting agents in networks: E-auction and emergence in e-marketing. In *23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'03)* (Rhode Island, USA, May 2003), p. 628. 29
- [148] Mylopoulos, Y. A., Mentes, A. K., and Theodossiou, I. Modeling residential water demand using household data: A cubic approach. *Water International* 29, 1 (2004), 105-113. 158, 165, 166

- [149] Neumann, H., Schuster, G., Stuckenschmidt, H., Visser, U., and Vögele, T. Intelligent brokering of environmental information with the BUSTER system. In *International Symposium Informatics for Environmental Protection* (Zurich, Switzerland, 2001), L. M. Hilty and P. W. Gilgen, Eds., vol. 30 of *Umwelt-Informatik Aktuell*, Metropolis, pp. 505-512. 52, 57
- [150] Nieswiadomy, M. L. Estimating urban residential water demand: Effects of price and structure, conservation and education. *Water Resources Research* 28, 3 (1992), 609-615. 160
- [151] Nodine, M. H., Fowler, J., Ksiezyk, T., Perry, B., Taylor, M., and Unruh, A. Active information gathering in InfoSleuth. *International Journal of Cooperative Information Systems* 9, 1-2 (2000), 3-28. 51, 57
- [152] Noy, N. F., Sintek, M., Decker, S., Crubézy, M., Fergerson, R. W., and Musen, M. A. Creating semantic web contents with Protege-2000. *IEEE Intelligent Systems* 16, 2 (2001), 60-71. 45, 47, 92, 153
- [153] Nute, D., Potter, W. D., Maier, F., Wang, J., Twery, M., Rauscher, H. M., Knopp, P., Thomasma, S., Dass, M., Uchiyama, H., and Glende, A. NED-2: An agent-based decision support system for forest ecosystem management. *Environmental Modelling & Software* 19 (2004), 831-843. 53, 57
- [154] Nwana, H. S. Software agents: An overview. *Knowledge Engineering Review* 11, 3 (1996), 205-244. 39
- [155] Nwana, H. S., Ndumu, D. T., Lee, L. C., and Collis, J. C. ZEUS: a toolkit and approach for building distributed multi-agent systems. In *Proceedings of the Third International Conference on Autonomous Agents (Agents'99)* (Seattle, WA, USA, 1999), O. Etzioni, J. P. Müller, and J. M. Bradshaw, Eds., ACM Press, pp. 360--361. 47
- [156] Odell, J., Parunak, H. v. D., and Bauer, B. Extending UML for agents. In *Proc. of the 2nd Int'l Workshop on Agent-Oriented Information Systems* (Berlin, Germany, 2000), iCue Publishing. 72, 85
- [157] OIL. Ontology Inference Layer, 2001. Available online: <http://www.ontoknowledge.org/oil/>. 47
- [158] Omicini, A. SODA: Societies and infrastructures in the analysis and design of agent-based systems. In *Agent-Oriented Software Engineering I, First International Workshop, AOSE 2000*, P. Ciancarini and M. Wooldridge, Eds., vol. 1957 of *LNCS*. Springer-Verlag, 2001, pp. 185-193. 47
- [159] Ouellet, R., and Ogbuji, U. Introduction to DAML. *O'Reilly XML.com* (January 2002). Available online: <http://www.xml.com/pub/a/2002/01/30/daml1.html>. 47
- [160] Page, B., and Hilty, L. M., Eds. *Umweltinformatik - Informatikmethoden für Umweltschutz und Umweltforschung*. Handbuch der Informatik, Band 13.3. R. Oldenbourg Verlag, 1994. 12, 13
- [161] Page, B., and Voigt, K. Recent history and development of environmental information systems and databases in Germany. *Online Information Review* 27, 1 (2003), 37-50. 80

- [162] Parunak, H. v. D. Blue-collar agents: Experience and issues in the development and deployment of industrial agent-based systems. In *Proc. of the 4th Int'l Conf. on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM'99)* (Lancashire, 1999), The Practical Application Company Ltd, pp. 3-9. 45, 49
- [163] Parunak, H. v. D. Agents in overalls: Experiences and issues in the development and deployment of industrial agent-based systems. *International Journal of Cooperative Information Systems* 9 (2000), 209-227. 49
- [164] Peirce, M. Computer-based models in integrated environmental assessment. Technical Report No 14, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, February 1998. 16
- [165] Perini, A., and Susi, A. Developing a decision support system for integrated production in agriculture. *Environmental Modelling & Software* 19 (2004), 821-829. 53, 57, 59
- [166] Pitt, W. C., Box, P. W., and Knowlton, F. F. An individual-based model of canid populations: modelling territoriality and social structure. *Ecological Modelling* 166 (2003), 109-121. 56, 58
- [167] Pitts, G., and Fowler, J. InfoSleuth: An emerging technology for sharing distributed environmental information. In *Information Systems and the Environment*. National Academy Press, 2001, pp. 159-172. 11, 51, 57, 81
- [168] Postel, S. *Last Oasis: Facing Water Scarcity*. Worldwatch Institute, 1992. 158
- [169] Purvis, M., Cranefield, S., and Nowostawski, M. A distributed architecture for environmental information systems. In *Environmental Software Systems-Environmental Information and Decision Support*. Kluwer Academic Publishers, 2000, pp. 49-56. 51, 57, 81
- [170] Purvis, M., Cranefield, S., Ward, R., Nowostawski, M., Carter, D., and Bush, G. A multi-agent system for the integration of distributed environmental information. *Environmental Modelling & Software* 18 (2003), 565-572. 51, 57
- [171] Purvis, M., Hwang, P., Purvis, M., Cranefield, S., and Schievink, M. Interaction protocols for a network of environmental problem solvers. The Information Science Discussion Paper Series 2002/02, Department of Information Science, University of Otago, Dunedin, New Zealand, April 2002. 51, 57
- [172] Quinlan, J. R. *C4.5 Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann, 1993. 127
- [173] Radermacher, F., Riekera, W.-F., Page, B., and Hilty, L. Trends in environmental information processing. In *Proceedings of the IFIP Congress 94* (1994), R. Raubold and K. Brunnstein, Eds., vol. 2, Elsevier Science. 12
- [174] Rao, A. S., and Georgeff, M. P. BDI agents: From theory to practice. In *Proc. First International Conference on Multiagent Systems, ICMAS-95* (1995), V. R. Lesser and L. Gasser, Eds., The MIT Press, pp. 312-319. 47
- [175] Rautenstrauch, C., and Patig, S., Eds. *Environmental Information Systems in Industry and Public Administration*. Idea Group Publishing, 2001. 12
- [176] Recknagel, F., Ed. *Ecological Informatics: Understanding Ecology by Biologically-Inspired Computation*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2002. 14, 15

- [177] Recknagel, F. Ecological applications of adaptive agents. In *Ecological Informatics: Understanding Ecology by Biologically-Inspired Computation*, F. Recknagel, Ed. Springer-Verlag, 2003, pp. 73-88. 55, 58
- [178] Recknagel, F. Simulation of aquatic food web and species interactions by adaptive agents embodied with evolutionary computation: a conceptual framework. *Ecological Modelling* 170 (2003), 291-302. 55, 58
- [179] Renwick, M. E., and Green, R. D. Do residential water demand side management policies measure up? An analysis of eight California water agencies. *Journal of Environmental Economics and Management* 40 (2000), 37-55. 160
- [180] Rizzoli, A., and Young, W. Delivering environmental decision support systems: Software tools and techniques. *Environmental Modelling & Software* 12, 23 (1997), 237-249. 21
- [181] Rogers, E. *Diffusion of innovations*, 4th ed. Free Press, 1995. 140
- [182] Rotmans, J. Methods for Integrated Assessment: The challenges and opportunities ahead. *Environmental Modeling and Assessment* 3 (1998), 155-179. 16, 61
- [183] Ruiz-Suarez, J. C., Mayora-Ibara, O. A., Torres-Jimenez, J., and Ruiz-Suarez, L. G. Short-term ozone forecasting by artificial neural networks. *Advances in Engineering Software* 23, 3 (1995), 143-149. 121
- [184] Russell, S. J., and Norvig, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach (The Intelligent Agent Book)*. Prentice Hall, 1995. 28
- [185] Sàncchez, M., Cortés, U., Lafuente, J., R-Roda, I., and Poch, M. DAI-DEPUR: an integrated and distributed architecture for wastewater treatment plants supervision. *Artificial Intelligence in Engineering* 10 (1996), 275-285. 54, 58
- [186] Schiffman, L., and Kanuk, L. L. *Consumer Behavior*, 8th ed. Prentice Hall, 2004. 140
- [187] Schneider, S. J., and Oezguener, U. A framework for data validation and fusion, and fault detection and isolation for intelligent vehicle systems. In *Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Vehicles* (1998), IEEE, pp. 533-538. 125
- [188] Seco, J. C., Correia, L., and Pinto-Ferreira, C. A multiagent system for pollutant monitoring. In *Proceedings of the Sixth IberoAmerican Conference on Artificial Intelligence* (Lisbon, Portugal, 1998). 52, 57
- [189] Seco, J. C., Correia, L., and Pinto-Ferreira, C. A society of agents in environmental monitoring. In *From Animals to Animats: Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behaviour* (Zurich, Switzerland, 1998). 52, 57
- [190] SHOE. Simple HTML Ontology Extension, 2001. Available online: <http://www.cs.umd.edu/projects/plus/SHOE/>. 47
- [191] Simon, H. *The Sciences of the Artificial*. MIT Press, 1996. 41
- [192] Singh, M. Considerations on agent communication. In *Proc. of the 1997 FIPA Workshop* (1997), FIPA. 41

- [193] Song, H., Franklin, S., and Negatu, A. Sumpy: A fuzzy software agent. In *Proceedings of the ISCA 5th International Conference on Intelligent Systems* (Reno, Nevada, USA, June 1996), pp. 124 - 128. 27
- [194] Sundsted, T. An introduction to agents. How to Java, JavaWorld.com, June 1998. Available online: http://www.javaworld.com/javaworld/jw-06-1998_29.html
- [195] Swarm Development Group (SDG). The Swarm simulation system. In *Swarm 2000 Conference Proceedings* (Utah,USA, 2001), W. Pitt, Ed., p. 1-10. 56
- [196] Swayne, D. Applying computer research to environmental problems. *Environmental Modelling & Software* 18 (2003), 485-486. 24, 50
- [197] Sznajd-Weron, K., and Weron, R. A simple model of price formation. *International Journal of Modern Physics C* 13, 1 (2002), 115-123. arXiv:cond-mat/0101001. 139
- [198] Sznajd-Weron, K., and Weron, R. How effective is advertising in duopoly markets? *Physica A* 324 (2003), 437-444. 139
- [199] Tanimoto, J., and Fujii, H. A study on diffusional characteristics of information on a human network analyzed by a multi-agent simulator. *The Social Science Journal* 40 (2003), 479-485. 137
- [200] The Ecoinformatics Collaboratory at University of Vermont. Frequently asked questions, 2004. Available online: <http://ecoinformatics.uvm.edu/faq.html>. 14
- [201] Thoyer, S., Morardet, S., Rio, P., Simon, L., Goodhue, R., and Rausser, G. A bargaining model to simulate negotiations between water users. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4, 2 (2001). 55, 58, 162
- [202] Tochtermann, K., and Maurer, H. Knowledge management and environmental informatics. *Journal of Universal Computer Science* 6, 5 (2000), 517-536. 24
- [203] Tveit, A. A survey of agent-oriented software engineering. Proc. of the First NTNU CSGS Conference, May 2001. 29
- [204] UN Earth Summit. *Agenda 21*. Conference on Environment and Development (UNCED). Department of public information, United Nations, Rio de Janeiro, Brazil, 1992. Available online: www.un.org/esa/sustdev/agenda21.htm. 11
- [205] Valeontis, K., et al. Information Technology TermBase INFORTERM. Group elot/te48/oe1 'information technology terminology', Hellenic Society for Terminology (ELETO), Hellenic Organization for Standardization (ELOT), Athens University of Economics and Business - Department of Informatics (AUEB-DI), 2001. Available online: <http://www.cs.aueb.gr/eleto-INFORTERM>. xxiv
- [206] Valeontis, K., Valeontis, N., Orfanos, T., Alexopoulos, A., Nikolaki, A., and Zeriti, K. Telecommunications TermBase TELETERM. Tech. rep., Hellenic Telecommunications Organization (OTE), Hellenic Society for Terminology (ELETO), Hellenic Organization for Standardization (ELOT), 2004. Available online: <http://www.moto-teleterm.gr>. xxiv

- [207] van Asselt, M. B. A., Ed. *Perspectives in Uncertainty and Risk - The PRIMA Approach to Decision Support*. Kluwer Academic Publishers, 2000. 24
- [208] van Asselt, M. B. A., Rotmans, J., and Greeuw, S. C., Eds. *Puzzle-solving for policy: A provisional handbook for integrated assessment*. International Centre for Integrative Studies and European Forum for Integrated Assessment, Maastricht, The Netherlands, 2001. 16
- [209] van der Sluijs, J., and Jäger, J. Towards a typology for computer tools for participatory integrated assessment. ULYSSES working paper, 1998. 17
- [210] van Lamsweerde, A. Requirements engineering in the year 00: a research perspective. In *Proc. 22nd International Conference on Software Engineering (ICSE 00)* (2000), p. 5-49. 47
- [211] Visser, U., and Stuckenschmidt, H. Intelligent, location-dependent acquisition and retrieval of environmental information. In *Proc. of 21st Urban Data Management Symposium* (Vienna, Italy, 1999). 52, 57
- [212] Visser, U., Stuckenschmidt, H., Wache, H., and Vögele, T. Using environmental information efficiently: Sharing data and knowledge from heterogeneous sources. In *Environmental Information Systems in Industry and Public Administration*, C. Rautenstrauch and S. Patig, Eds. IDEA Group, Hershey, USA & London, UK, 2001, pp. 41-73. 52, 57
- [213] Voigt, K. Environmental information databases. In *Encyclopedia of Computational Chemistry*, P. v. R. Schleyer et al., Eds., vol. 3 (Databases and Expert Systems). John Wiley and Sons, 1998, pp. 941-952. 19
- [214] Wagner, G. A UML profile for agent-oriented modeling. Technical Report, Eindhoven Univ. of Technology, The Netherlands, 2002. 47, 72, 106
- [215] Wagner, G. The Agent-Object-Relationship metamodel: Towards a unified conceptual view of state and behavior. *Information Systems* 28, 5 (2003), 475-504. 47, 72, 85, 106, 153
- [216] Weber, J. A. Forecasting demand and measuring elasticity. *American Water and Wastewater Association Journal* 77, 5 (1989), 57-65. 163
- [217] Weiss, G., Ed. *Multiagent Systems: A modern approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT Press, 2000. 28
- [218] Weisstein, E. W. Moore neighborhood. A Wolfram web resource, MathWorld.com, Accessed: Sept. 2004. Available online: <http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>. 141
- [219] Weron, K. S., and Sznajd, J. Opinion evolution in closed community. *International Journal of Modern Physics C* 11, 6 (2000), 1157-1165. arXiv:cond-mat/0101130. 139
- [220] Westerhoff, G., and Lane, T. Competitive ways to run water utilities. *American Water and Wastewater Association Journal* 88, 4 (1996), 96-101. 157
- [221] Winpenny, J. *Managing Water as an Economic Resource*. Routledge, N.Y., 1997. 157

- [222] Witten, I. H., and Frank, E. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations*. Morgan Kaufmann publishers, USA, 1999. 127
- [223] Wooldridge, M. Agent-based software engineering. *IEE Proceedings on Software Engineering* 144, 1 (February 1997), 26-37. 30
- [224] Wooldridge, M. Intelligent agents. In *Multiagent Systems: A modern approach to distributed Artificial Intelligence*, G. Weiss, Ed. MIT Press, 2000, ch. 1, pp. 27-78. 30, 32, 33, 34, 35, 36
- [225] Wooldridge, M., Ed. *Reasoning About Rational Agents*. The MIT Press, 2000. 47
- [226] Wooldridge, M., and Ciancarini, P. Agent-oriented software engineering. In *Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering*, S. K. Chang, Ed., vol. 1. World Scientific, 2001, pp. 507-522. 29
- [227] Wooldridge, M., and Jennings, N. R. Intelligent agents: Theory and practice. *The Knowledge Engineering Review* 10, 2 (1995), 115-152. 29
- [228] Wooldridge, M., Jennings, N. R., and Kinny, D. The GAIA methodology for agent-oriented analysis and design. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 3, 3 (2000), 285-312. 47, 72, 85, 106, 150
- [229] Wooldridge, M. J., and Jennings, N. R. Software engineering with agents: Pitfalls and pratfalls. *IEEE Internet Computing* 3, 3 (1999), 20-27. 30
- [230] Yairi, T., Kato, Y., and Hori, K. Fault detection by mining association rules from house-keeping data. In *Proc. of the 6th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space* (Montreal, Canada, 2001). 125
- [231] Yi, J., and Prybutok, V. R. A neural network model for the prediction of daily maximum ozone concentration in an industrialized urban area. *Environmental Pollution* 92, 3 (1996), 349-357. 121
- [232] Yu, E. Towards modelling and reasoning support for early-phase requirements engineering. In *Proc. of the 3rd IEEE Int. Symp. on Requirements Engineering* (Washington, USA, 1997), IEEE. 47, 72, 85
- [233] Yu, E. Agent-oriented modelling: Software versus the World. In *Agent-Oriented Software Engineering II, Second International Workshop, AOSE 2001*, M. Wooldridge, G. Weiss, and P. Ciancarini, Eds., vol. 2222 of *LNCS*. Springer-Verlag, 2002, pp. 206-225. 47
- [234] Zambonelli, F., Jennings, N. R., and Wooldridge, M. Developing multiagent systems: the GAIA methodology. *ACM Trans on Software Engineering and Methodology* 12, 3 (2003), 317-370. 47, 72, 106
- [235] ZEUS. The ZEUS toolkit, 1999. Available online: <http://www.labs.bt.com/projects/agents/zeus/index.htm>. 47

Οι αριθμοί στο τέλος κάθε αναφοράς αντιστοιχούν στις σελίδες της διατοιβής όπου εμφανίζεται η συγκεκριμένη αναφορά.

- Agent Academy, 112
- Environmental Modeling and Software, 19
- IFIP, 12
- JADE, 110
- Journal of Environmental Informatics, 19
- KQML, 43
- Tropos, 59
- US Clean Air Act, 80
- WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis), 127
- Αιτιατή αλυσίδα, 17
- Ακόλουθος κοινής γνώμης, 140
- Ανάλυση προβλήματος, 71
- Ανάπτυξη διεπαφών, 13
- Ανάπτυξη του συστήματος, 72
- Αναλυτικές μέθοδοι, 16
- Αντικείμενα περιβαλλοντικής πληροφορίας, 62
- Ασαφής λογική, 15
- Ατζέντα 21, 9
- Ατομική συμπεριφορά, 140
- Αυτονομία, 30
- Βάσεις δεδομένων, 13
- Γενετικοί αλγόριθμοι, 15
- Γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, 13
- Γνωμηγέτης, 140
- Γραφικά υπολογιστών, 13
- Διάχυση γνώσης, 79
- Διαπροσωπική επικοινωνία, 137
- Διαχείριση γνώσης, 13
- Διαχείριση της ζήτησης νερού, 159
- Διαχείριση του νερού, 157
- χάραξη πολιτικής, 158
- Δύναμη της επιρροής, 142
- Εκστρατεία ενημέρωσης, 138
- Εκτίμηση των ελλιπών μετρήσεων, 110
- Ελαστικότητα, 161
- Εξοικονόμηση των υδάτινων αποθεμάτων, 159
- Επικοινωνία πρακτόρων, 41
- Βασικός πράκτορας, 42
- Ενεργός πράκτορας, 42
- Ομότιμος πράκτορας, 42
- Παθητικός πράκτορας, 42
- διαπραγμάτευση, 41
- συντονισμός, 41
- Επικύρωση των εισερχόμενων μετρήσεων, 110
- Εταιρεία ύδρευσης, 146
- Ευρωπαϊκή Οδηγία 92/72/EEC, 80
- Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος, 79
- Εφοδιαστική αλυσίδα ζήτησης του νερού, 146
- Ηλεκτρονικές υπηρεσίες πληροφόρησης, 82
- Θεωρία δράσης λόγου, 43
- Κέντρα Παρατήρησης και Παρακολούθησης του Περιβάλλοντος, 77
- Καταναλωτές νερού, 146
- Κατανεμημένη τεχνητή νοημοσύνη, 27
- Κενό πληροφορίας, 10, 24
- Κλασικά πληροφοριακά συστήματα, 22

- Κοινωνικά βάρη, 142
 Κυψελοειδή αυτόματα, 162
- Μέτρα αναχαίτισης, 78
 Μεσολαβητής, 100
 Μεταβλητή κοινωνικότητας, 143
 Μηνύματα πρακτόρων, 42
 Μηχανισμός διάχυσης της επιρροής, 142
 Μοντέλο επικοινωνίας με ροή δύο βημάτων, 140
 Μοντέλο ερεθίσματος-απόκρισης, 139
 Μοντελοποίηση και προσομίωση, 13
- Οικολογική πληροφορική, 14
 Οικοπληροφορική, 14
 Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Διαχείρισης Πληροφορίας, 60, 78
 Ολοκληρωμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων και Προσομοίωσης Σεναρίων, 61
 Ολοκληρωμένα πληροφοριακά συστήματα, 23
 Ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αποτίμηση, 16
 Οντολογία, 44, 85
- Περιβαλλοντικά δεδομένα
 απουσία δεδομένων, 82
 θεματικά δεδομένα, 20
 με γεωγραφική αναφορά, 20
 με χρονική αναφορά, 20
 χαμηλής ποιότητας, 82
 Περιβαλλοντική πληροφορία
 επίπεδα, 9
 μεταδεδομένα, 12
 συνδεδομένα, 12
 Περιβαλλοντική πληροφορική, 12, 17
 Πράκτορας
 έννοια, 25
 ανακλαστική συμπεριφορά, 25
 ανακλαστικός, 34
 αντίληψη, 34
 αυτονομία, 25, 36
 αυτόνομος, 26
 διαμεσολάβηση, 25
 ενέργεια, 34
 εσωτερική αρχιτεκτονική, 33
 ευφυούς διεπαφής, 28
 κινητός, 28
 λογισμικό, 26, 29
- με κατάσταση, 35
 προνοητική συμπεριφορά, 25
 τεχνητής ζωής, 26
 τυπικός, 32, 64
 χαρακτηριστικά
 αυτοδυναμία, 37
 εκπαίδευση, 37
 ευελιξία, 37
 κινητικότητα, 37
 κοινωνικότητα, 37
 ομιλητικότητα, 37
 προσήλωση, 36
 προσαρμοστικότητα, 37
 συνεργατικότητα, 36
 χαρακτήρας, 37
 χρονική συνέχεια, 37
 Πράκτορας - Υπεύθυνος λήψης αποφάσεων, 83
 Πράκτορας - Φορέας πληροφορίας, 83
 Πράκτορας καταναλωτής, 141
 Πράκτορας λογισμικού, 138
 Πράκτορας με μνήμη, 34
 Πράκτορες και αντικείμενα, 30
 Προσαρμόσιμοι πράκτορες, 15
 Προσομοίωση
 μεγάλης κλίμακας, 138
 μικρής κλίμακας, 139
 στόχος, 158
 Πρωτόκολλο επικοινωνίας πρακτόρων, 43
- Ρόλοι πρακτόρων, 150
 Ρόλος πράκτορα-γείτονα, 141
 Ρόλος πράκτορα-καταναλωτή, 141
- Σημασιολογία, 41, 85
 Σημειολογία, 41
 Συμμετοχικές μέθοδοι, 16
 Συνάρτηση διάθλασης, 143
 Συνθήκες πίεσης χρόνου, 79
 Συστήματα Παρακολούθησης και Διαχείρισης Περιβαλλοντικής Πληροφορίας, 60, 77
 Συστήματα Περιβαλλοντικής Πληροφορίας βιομηχανικού ενδιαφέροντος, 21
 Συστήματα Προσομοίωσης Σεναρίων, 60
 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για το Περιβάλλον, 20, 60

-
- Συστήματα ανάλυσης και υπολογιστικής
αποτίμησης, 22
 - Συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου,
22
 - Συστήματα πρακτόρων
 - ανακλαστικών, 40
 - διεπαφής, 40
 - ετερογενών, 41
 - κινητών, 40
 - πληροφορίας, 40
 - συνεργατικών, 40
 - υβριδικών, 40
 - Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων και
σχεδιασμού, 22
 - Συστημάτα Περιβαλλοντικής Πληροφορί-
ας, 19
 - Σχεδίαση του συστήματος, 71
 - Σχολές ανάπτυξης πρακτόρων, 27
 - Σύνταξη, 41
 - Σύντηξη πληροφορίας, 79
 - Σύστημα πρακτόρων, 30

 - Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, 15
 - Τεχνικές Ανάπτυξης Λογισμικού με Πρά-
κτορες, 29
 - Τεχνικές μηχανικής μάθησης, 13
 - Τιμολόγηση του νερού
επακόλουθα, 159

 - Υπολογιστικό σύστημα ολοκληρωμένης πε-
ριβαλλοντικής αποτίμησης, 17

©Ιωάννης Ν. Αθανασιάδης 2004-2005

Η παρούσα διατριβή στοιχειοθετήθηκε από τον συγγραφέα με το L^AT_EX, την περίοδο από τον Απρίλιο του 2004 ως το Φεβρουάριο του 2005. Η επιμέλεια όλων των σχημάτων είναι του συγγραφέα. Επιτρέπεται η μερική ή ολική ανατύπωση του παρόντος με την προϋπόθεση ότι το ανάτυπο συμπεριλαμβάνει το εξώφυλλο και την παρούσα σελίδα με το όνομα και τα στοιχεία επικοινωνίας του συγγραφέα.

Στοιχεία του συγγραφέα:

Ιωάννης Ν. Αθανασιάδης,
(*ioannis@athanasiadis.info*)

www.athanasiadis.info
