

# always best connected

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ (Access Network Selection)

Φίλιππος Ζουρνατζής

*υπό την επίβλεψη των:*  
δρ. Ιωάννη Δημητρόπουλου &  
δρ. Μαλαματή Λούτα

Διπλωματική εργασία

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ





always  
best  
connected

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ  
(Access Network Selection)

Φίλιππος Ζουρνατζής

υπό την επίβλεψη του δρ. Ιωάννη Δημητρόπουλου  
&  
της επίκουρου καθηγήτριας του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής &  
Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας  
δρ. Μαλαματή Λούτα



Φίλιππος Ζουρνατζής  
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών  
Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας  
2012 Κοζάνη



στα αγαπημένα μου αδέρφια  
& στην Χρυσάνθη που είμαι σίγουρος...  
έχει τη δύναμη  
να παλέψει τα πάντα!

*...the test of true science is not whether men of  
genius have revealed some of nature's mysteries  
but whether men of lesser talent can learn to  
use their methods and reveal more.*

Howard Scott Gordon

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια δρ. Μαλαματή Λούτα για την πολύτιμη βοήθειά της, τόσο στην διαδικασία εύρεσης του θέματος της εργασίας, όσο και στην καθοδήγησή της, χωρίς την οποία δεν θα ήταν δυνατή η επιτυχής ολοκλήρωσή της. Κυρίως, όμως, την ευχαριστώ για την μεγάλη υπομονή της και την διαλλακτικότητά της αναφορικά με τεχνικά αλλά κυρίως χρονικά θέματα που εισήλθαν κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Έπειτα, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω το Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας και συγκεκριμένα το Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών και το προσωπικό της γραμματείας και της Βιβλιοθήκης του τμήματος, οι οποίοι στάθηκαν αρωγοί στην προσπάθειά μου, τόσο σε θέματα γραμματειακής υποστήριξης όσο και σε θέματα αναζήτησης συναφούς, με το θέμα της παρούσας, βιβλιογραφίας.

Τέλος, σε όσους παραμέλησα και δεν αφιέρωσα όσο χρόνο θα ήθελα μαζί τους, ας λάβουν την εργασία αυτή ως “τεκμήριο αθωότητας” όταν με κρίνουν.

*Φίλιππος Ζουρνατζής*

*Κοζάνη, Ιούνιος 2012*



## preface

This project consists of research in the area of seamless - intelligent communications. The work was done at the department of Informatics and Telecommunications Engineering at University of Western Macedonia, Kozani, Greece.

Parts of our research have appeared in the 16th IEEE Symposium on Computers and Communications - ISCC'11 Ionian University, Corfu, Greece and in the publication: M, Louta, P. Zournatzis, S. kraounakis, P. Sarigiannidis, I. Dimitropoulos "Towards realization of the ABC vision: a comparative survey of access network selection" 2011 IEEE Symposium on Computers & Communications (ISCC), pp. 472-477.

# abstract

Access Network Selection (ANS) providing the most appropriate networking technology for accessing and using services in a heterogeneous wireless environment constitutes the heart of the overall handover management procedure naming Always Best Connected (ABC) vision. The aim of this work is to survey representative vertical handover schemes proposed in related research literature with emphasis laid on the design of the ANS mechanism. Their distinct features are analyzed and a discussion on their relative merits and weaknesses is been held. Furthermore, a simple yet efficient technique is been introduced in order to estimate the best solution through eight alternatives for a number of user situations, considering five different criteria. Afterwards, we analyze and discuss the results. Finally, this work describes some critical but still open issues, aspects and challenges and our further plans.

# πρόλογος

Το θέμα που διαπραγματεύεται αυτή η διπλωματική εργασία, αποτελεί μέρος της έρευνας στην περιοχή των σύγχρονων & ευφυών τηλεπικοινωνιών τέταρτης γενιάς (4G).

Μέρος της εργασίας αυτής έχει παρουσιαστεί στο 16ο IEEE Symposium on Computers and Communications - ISCC'11, Κέρκυρα, Ιόνιο Πανεπιστήμιο, όπου και η δημοσίευση: M. Louta, P. Zournatzis, S. kraounakis, P. Sarigiannidis, I. Dimitropoulos "Towards realization of the ABC vision: a comparative survey of access network selection" 2011 IEEE Symposium on Computers & Communications (ISCC), pp. 472-477.

Η ορολογία που χρησιμοποιείται επιλέχθηκε όπου είναι δυνατόν να δίδεται με τον διεθνή -αγγλικό- όρο. Μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις, όπου υπάρχει δόκιμη ελληνική μετάφραση, χρησιμοποιούμε τον αντίστοιχο στην ελληνική.

Αναφορικά με το σύστημα της βιβλιογραφίας που παρατίθεται στο τέλος της εργασίας, αυτή εμφανίζεται με την σειρά που χρησιμοποιείται στο σώμα της εργασίας. Αυτός είναι και ο λόγος της διαφορετικής αρίθμησης από αυτήν των σημειώσεων που υπάρχουν στο κάτω μέρος των σελίδων που ακολουθούν. Μέσα στο κείμενο οι αναφορές σε βιβλιογραφικές πηγές, όταν οι τελευταίες αναφέρονται πρώτη φορά, δίδονται σε σημείωση στο κάτω μέρος της σελίδας, ενώ όταν συζητούμε συγκεκριμένες πηγές οι οποίες ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί προηγουμένως λαμβάνουν την αρίθμηση της βιβλιογραφίας που υπάρχει στο τέλος, με το σύμβολο [].

Στο τέλος της βιβλιογραφίας υπάρχουν πηγές που ενδέχεται να μην έχουν αναφορές στο κύριο σώμα της εργασίας αυτής: Για την μόρφωση σαφούς και ολοκληρωμένης γνώσης του θέματος που διαπραγματευόμαστε, μελετήθηκαν μία σειρά από εργασίες, ερευνητικές προτάσεις, υλοποιήσεις και εγχειρίδια που ενδέχεται να μην αναφέρονται στο κύριο σώμα της εργασίας αυτής, ως υποσημειώσεις. Εν τούτοις παρατίθενται στην βιβλιογραφία.

# περίληψη

Η επιλογή του δικτύου πρόσβασης (ANS—"Access Network Selection") παρέχει στο χρήστη την καταλληλότερη διαθέσιμη δικτυακή τεχνολογία για την χρήση εφαρμογών και υπηρεσιών στο τεταρτογενές ασύρματο περιβάλλον (4G). Η διαδικασία ANS αποτελεί την καρδιά ενός συνολικού μηχανισμού κάθετων μεταπομπών που θα επιτυγχάνει κάθε χρονική στιγμή την συνδεσιμότητα στο βέλτιστο δίκτυο και η οποία καλείται ABC προοπτική ("Always Best Connected").

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι παρουσιάσει αντιπροσωπευτικές υλοποιήσεις που έχουν έως σήμερα προταθεί με έμφαση στον σχεδιασμό του μηχανισμού ANS. Οι σχετικές προτάσεις μελετούνται και αναλύονται, ενώ συζητούνται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Στην συνέχεια προτείνεται μία νέα κατηγοριοποίηση των προτάσεων και με βάση αυτήν συγκρίνονται.

Επιπλέον, παρουσιάζεται η δική μας στρατηγική για την λύση του ANS προβλήματος και σχεδιάζεται ο δικός μας αλγόριθμος. Δίδονται και συζητιούνται τα αποτελέσματά του, ενώ στο τέλος αναφέρονται θέματα σχετικά με τις προκλήσεις και τις σύγχρονες τάσεις των ερευνητών, αλλά και σχέδια μελλοντικών βελτιώσεων της δικής μας προτεινόμενης στρατηγικής.

---

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

|   |           |
|---|-----------|
| ευχαριστίες   | viii      |
| abstract  | ix        |
| preface   | x         |
| πρόλογος  | xi        |
| περίληψη  | xii       |
| <br>  |           |
| ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ   | 13        |
| <br>  |           |
| <b>ε ι σ α γ ω γ ή</b>  | <b>19</b> |
| 1.1 ασύρματο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον                        | 20        |
| 1.2 η προοπτική του ABC   | 22        |
| 1.3 η ABC προοπτική από διαφορετικές πλευρές                    | 23        |
| 1.3.1 ABC από την πλευρά του διαχειριστή                        | 24        |
| 1.3.2 ABC από την πλευρά του χρήστη                             | 24        |
| 1.3.3 ABC από την πλευρά του παρόχου                            | 24        |
| 1.4 σενάρια του κοντινού μέλλοντος                              | 25        |
| 1.5 διάρθρωση εργασίας  | 26        |
| <br>  |           |
| <b>μ ε τ α π ο μ π ή</b>  | <b>28</b> |
| 2.1 η έννοια της μεταπομπής                                     | 29        |
| 2.2 κατηγορίες μεταπομπής                                       | 30        |
| 2.2.1 Ομάδα 1η: πώς γίνεται η μεταπομπή (hard/soft)             | 30        |
| 2.2.2 Ομάδα 2η: μεταπομπή κελιών & συστημάτων                   | 31        |
| 2.2.3 Ομάδα 3η: μεταπομπή ελεγχόμενη από ποιόν;                 | 32        |
| 2.2.4 Ομάδα 4η: λοιπές κατηγορίες                               | 33        |
| 2.2.5 Συνολική εικόνα   | 34        |
| 2.3 διαφορές μεταπομπής μεταξύ ομογενών & ετερογενών συστημάτων | 35        |
| 2.4 φάσεις μεταπομπής   | 36        |
| 2.4.1 Εποπτική αναφορά φάσεων                                   | 36        |
| 2.4.2 Ειδικότερα: η "αρχική" φάση                               | 38        |
| 2.4.3 Σημειώσεις για την φάση της "εφαρμογής"                   | 39        |

|         |  |           |
|---------|--|-----------|
| 2.5     | αξιόπιστη & διαφανής μεταπομπή   | 40        |
| 2.5.1   | <i>Σύγχρονες απαιτήσεις</i>  | 40        |
| 2.5.2   | <i>Αναδυόμενες τεχνολογίες</i>   | 41        |
| 2.5.3   | <i>Θέματα ενέργειας</i>  | 44        |
| 2.6     | κριτήρια απόφασης & επιλογής   | 46        |
| 2.6.1   | <i>Προφίλ χρήστη (user preferences)</i>  | 47        |
| 2.6.2   | <i>Χαρακτηριστικά δικτύων (network characteristics)</i>                            | 47        |
| 2.6.3   | <i>Δυνατότητες τερματικών (terminal capabilities)</i>                              | 47        |
| 2.6.4   | <i>Απαιτήσεις εφαρμογών και υπηρεσιών (application &amp; service requirements)</i> | 47        |
| 2.6.5   | <i>Πληροφορίες περιεχομένου (contextual information)</i>                           | 48        |
| 2.6.6   | <i>Χρησιμοποίηση κριτηρίων</i>   | 48        |
|         | <b>μ ε θ ο δ ο λ ο γ ί ε ς</b>   | <b>49</b> |
| 3.1     | παραδοσιακή μέθοδος - μέθοδοι "μοναδικού κριτηρίου"                                | 50        |
| 3.2     | συναρτήσεις απόφασης - score decision functions                                    | 51        |
| 3.3     | Multiple Criteria Decision Making (MCDM)   | 53        |
| 3.3.1   | <i>Εισαγωγή στην MCDM</i>  | 54        |
| 3.3.2   | <i>Κρίσιμα ζητήματα</i>  | 54        |
| 3.3.3   | <i>Τεχνικές MCDM</i>   | 56        |
| 3.3.3.1 | <i>Simple Additive Weighting (SAW)</i>   | 57        |
| 3.3.3.2 | <i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)</i>     | 57        |
| 3.3.3.3 | <i>Analytic Hierarchy Process (AHP) &amp; Grey Relational Analysis (GRA)</i>       | 59        |
| 3.3.4   | <i>Τάσεις MCDM</i>   | 62        |
| 3.4     | προβλήματα & αλγόριθμοι βελτιστοποίησης  | 62        |
| 3.4.1   | <i>Knapsack problem</i>  | 62        |
| 3.4.2   | <i>Bin Packing problems</i>  | 64        |
| 3.4.3   | <i>Population Migration Algorithm (PMA)</i>  | 64        |
| 3.4.4   | <i>Διαδικασία απόφασης Markov (MDP)</i>  | 65        |
| 3.5     | ασαφής Λογική (Fuzzy Logic - FL)   | 66        |
| 3.6     | η συμβολή των πολιτικών (policies)   | 67        |

|   |            |
|---|------------|
| 3.7 αναλυτικά: η τεχνική AHP                        | 69         |
| 3.8 αναλυτικά: η τεχνική FSR TOPSIS                 | 72         |
| <b>συγκριτική έρευνα</b>                            | <b>75</b>  |
| 4.1 παραδοσιακή μέθοδος                             | 76         |
| 4.2 συναρτήσεις απόφασης                            | 77         |
| 4.3 τεχνικές MCDM (σχέσεις & ιεραρχήσεις κριτηρίων) | 80         |
| 4.3.1 Εισαγωγικό σημείωμα για τις υλοποιήσεις MCDM  | 80         |
| 4.3.2 Υλοποιήσεις με χρήση TOPSIS                   | 81         |
| 4.3.3 Υλοποιήσεις με χρήση AHP/GRA                  | 82         |
| 4.3.4 Συμπεράσματα από την χρήση των τεχνικών MCDM  | 86         |
| 4.4 υλοποιήσεις με χρήση βελτιστοποίησης            | 87         |
| 4.4.1 Υλοποίηση με τον αλγόριθμο Knapsack           | 87         |
| 4.4.2 Υλοποιήσεις με αλγορίθμους FFD & PMA          | 89         |
| 4.4.3 Υλοποιήσεις με χρήση MDP                      | 90         |
| 4.5 η συμβολή των πολιτικών (policies)              | 91         |
| 4.6 η συμβολή της ασαφούς λογικής σε υλοποιήσεις    | 94         |
| 4.7 πράκτορες & διαπραγματεύσεις                    | 97         |
| 4.8 θέματα σύγκρισης & κριτικής                     | 100        |
| 4.8.1 Μία διαφορετική προσέγγιση κατηγοριοποίησης   | 100        |
| 4.8.2 Άξονες της νέας κατηγοριοποίησης              | 101        |
| 4.8.2.1 Στόχοι & έλεγχος                            | 101        |
| 4.8.2.2 Μεθοδολογίες & κριτήρια                     | 102        |
| 4.8.2.2 Σύγχρονες απαιτήσεις                        | 102        |
| 4.8.3 Εποπτική κατηγοριοποίηση υλοποιήσεων          | 103        |
| <b>στρατηγική &amp; υλοποίηση</b>                   | <b>105</b> |
| 5.1 κατάστρωση στρατηγικής                          | 106        |
| 5.2 υλοποιήσεις στρατηγικής                         | 109        |
| 5.2.1 Διατύπωση του προβλήματος                     | 109        |
| 5.2.2 υλοποίηση με AHP.                             | 110        |



|  |            |
|--|------------|
| 5.2.3 υλοποίηση με σύνθεση συνάρτησης απόφασης, AHP & πολιτικής        | 112        |
| 5.3 σύγκριση & συμπεράσματα  | 115        |
| <b>προκλήσεις &amp; μελλοντικές βελτιώσεις</b>                         | <b>119</b> |
| 6.1 μελλοντικές βελτιώσεις   | 120        |
| 6.2 μελλοντικές επεκτάσεις   | 121        |
| 6.3 μια σύγχρονη απαίτηση  | 122        |
| <b>αντί επιλόγου</b>   | <b>124</b> |
| <br>   |            |
| ΠΙΝΑΚΕΣ & ΣΧΗΜΑΤΑ  | 125        |
| <br>   |            |
| ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ  | 128        |
| <br>   |            |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ   | 131        |
| <br>   |            |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ  | 140        |
| <i>Παράρτημα I: κατηγορίες μεταπομπής</i>                              | 141        |
| <i>Παράρτημα II: σχέσεις κριτηρίων</i>                                 | 142        |
| <i>Παράρτημα III: στρατηγικές επιλογές υλοποιήσεων</i>                 | 143        |
| <i>Παράρτημα IV: στάδια κατάστρωσης στρατηγικής</i>                    | 144        |
| <i>Παράρτημα V: χαρακτηριστικά δικτύων</i>                             | 145        |
| <i>Παράρτημα VI: πίνακες τύπου A της AHP</i>                           | 146        |
| <i>Παράρτημα VII: πίνακας τύπου B της AHP</i>                          | 148        |
| <i>Παράρτημα VIII: πίνακες τύπου Γ(home)</i>                           | 149        |
| <i>Παράρτημα IX: πίνακες τύπου Γ(pedestrian)</i>                       | 150        |
| <i>Παράρτημα X: πίνακες τύπου Γ(low-speed)</i>                         | 151        |
| <i>Παράρτημα XI: πίνακες τύπου Γ(high-speed)</i>                       | 152        |
| <i>Παράρτημα XII: πίνακες τύπου Δ</i>                                  | 153        |
| <i>Παράρτημα XIII: τελικές κατατάξεις για την 1η υλοποίηση</i>         | 154        |
| <i>Παράρτημα XIV: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (1min)</i>   | 155        |
| <i>Παράρτημα XV: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (15 min)</i>  | 156        |
| <i>Παράρτημα XVI: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (30min)</i>  | 157        |
| <i>Παράρτημα XVII: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (60min)</i> | 158        |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Παράρτημα XVIII: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (120min)</i> | 159 |
| <i>Παράρτημα XIX: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (240min)</i>   | 160 |
| <i>Παράρτημα XX: MADM vs. MODM</i>                                       | 161 |

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

**Σ**το κεφάλαιο που ακολουθεί αναλύεται εν συντομία το σύγχρονο ασύρματο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον και ταυτόχρονα δίδονται σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά των ραδιοτεχνολογιών πρόσβασης (RAT - Radio Access Technologies). Η αναφορά στις τεχνολογίες αυτές μας βοηθά στο να κατανοήσουμε το μέγεθος της πολυπλοκότητας του περιβάλλοντος στο οποίο επιχειρούνται να δοκιμαστούν όλες οι τεχνικές επιλογές καταλληλότερου δικτύου. Στη συνέχεια εισάγεται η έννοια του “συνεχώς συνδεδεμένος στο κατάλληλο δίκτυο” (ABC - Always Best Connected), η οποία με την σειρά της οδηγεί στην ανάγκη απαρίθμησης των απαιτήσεων που εισάγει στα ετερογενή τέταρτης γενιάς ασύρματα περιβάλλοντα η ABC προοπτική. Τέλος, δίδεται η συνέχεια της διάρθρωσης της εργασίας αυτής.

## 1.1 ασύρματο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον

Οι τεχνολογίες επικοινωνιών και πληροφοριών έχουν ραγδαία αναπτυχθεί στη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Σήμερα, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να διαλέξει τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να επικοινωνεί επιλέγοντας μία ή περισσότερες από τις διαθέσιμες υπηρεσίες και εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, γεγονός που δεν ήταν δυνατόν να συμβεί μερικά χρόνια πριν, όταν απλά χρησιμοποιούσε το σταθερό τηλέφωνό του, το οποίο ήταν συνδεδεμένο με έναν αποκλειστικά πάροχο. Σήμερα, λοιπόν, υπάρχει η επιλογή μεταξύ αρκετών συστημάτων, παρόχων, υπηρεσιών και εφαρμογών. Ακριβώς στο σημείο αυτό έγκειται και το “δίλημμα” της επιλογής: υπάρχει, σαφώς, η ανάγκη να επιλεγεί μία αποδεκτή τεχνολογία για μία συγκεκριμένη υπηρεσία. Σε περίπτωση, λοιπόν, που υπάρχουν -όπως σήμερα- διάφορες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών, η επιλογή οφείλει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε οι απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσιών (QoS - Quality of Service) από την πλευρά του χρήστη να ικανοποιούνται. Στα σημερινά, υψηλού βαθμού δυναμικά, κινητά και ασύρματα τηλεπικοινωνιακά περιβάλλοντα, στα οποία υπάρχουν ήδη εκατομμύρια χρήστες και πλήθος ασύρματων αιτημάτων, τα χαρακτηριστικά των δικτύων αλλάζουν συνεχώς και με δυναμικό τρόπο.

Οι κινητές ασύρματες τεχνολογίες προσελκύνουν την προσοχή και την προτίμηση ολοένα και περισσότερων χρηστών, καθόσον παρέχουν την δυνατότητα πρόσβασης σε πληροφορίες και υπηρεσίες σε κινούμενους χρήστες. Το γεγονός της ανυπαρξίας μίας μοναδικής και απλής τεχνολογίας ασύρματης δικτύωσης, ικανής να παρέχει στον χρήστη ποιοτικές υπηρεσίες σε μεγάλη έκταση γεωγραφικές περιοχές, μας εισάγει επίσης στο πρόβλημα του “διλήμματος” της επιλογής μίας εκ του συνόλου των ασύρματων τεχνολογιών. Η επιλογή αυτή θα είναι δυναμική, στο μέτρο που ένας κινούμενος ή και ακίνητος ακόμη χρήστης θα αλλάζει τις προτιμήσεις του ή όταν τα χαρακτηριστικά των δικτύων θα μεταβάλλονται. Έτσι, οδηγούμαστε στην ανάγκη ύπαρξης ενός μηχανισμού μεταπήδησης από το υπάρχον ασύρματο δίκτυο στο νέο δίκτυο που έχει επιλεγεί.

Επιπλέον, τα μελλοντικά επικοινωνιακά συστήματα θα αυξήσουν σημαντικά την πολυπλοκότητα των τηλεπικοινωνιών, καθόσον θα περιέχουν χιλιάδες ετερογενής κόμβους με ποικίλες δυνατότητες και διάφορες τεχνολογίες δικτύωσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά η καθεμιά. Αυτή την στιγμή τα ασύρματα δίκτυα αλληλοκαλύπτονται μερικώς σε μία σχεδόν ιεραρχική κλίμακα: από τα προσωπικά ασύρματα δίκτυα (Bluetooth, PANs - Personal Area Networks), τα οικιακά και τοπικά δίκτυα (WLANs - Wireless Local Area Networks) και τα δίκτυα ευρείας περιοχής (WANs - Wide Area Networks). Η ιεραρχική αυτή αλληλοκάλυψη λύνει σχετικά εύκολα το πρόβλημα της συνδεσιμότητας σε έναν μεγάλο αριθμό κινούμενων χρηστών. Ωστόσο, στην τέταρτης γενιάς ασύρματη δικτύωση (4G) θα περιέχονται ετερογενή δίκτυα πρόσβασης, με διαφορετικά χαρακτηριστικά και ποικιλία προσφερόμενων υπηρεσιών από πολλούς παρόχους. Οι περισσότερες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης (RATs) που ήδη υπάρχουν θα συνεργάζονται, ώστε ο χρήστης να μπορεί κάθε στιγμή να επιλέξει την καταλληλότερη σε σχέση με τις απαιτήσεις του, το κόστος των υπηρεσιών που παρέχονται και άλλων παραγόντων που εδράζονται τόσο στις προτιμήσεις του χρήστη όσο και στο περιβάλλον μέσα στο οποίο αυτός κινείται. Η μεγάλη ποικιλία ετερογενών ασύρματων τεχνολογιών που χαρακτηρίζει τις ασύρματες τηλεπικοινωνίες, οδηγεί στην ανάγκη ανάπτυξης ενός ευφυούς και αποδοτικού συστήματος διαχείρισης μεταπομπών, ικανού να παρέχει διαφανή -από την πλευρά του χρήστη-

μετάβαση από το ένα δίκτυο στο άλλο. Προκειμένου να κατανοηθεί ο βαθμός πολυπλοκότητας του ασύρματου τηλεπικοινωνιακού περιβάλλοντος, ανατρέχουμε στον Πίνακα 1 που παρατίθεται παρακάτω.

Πίνακας 1.

Χαρακτηριστικά ετερογενών ασύρματων συστημάτων

| Access network type    | Frequency                    | Data rate      | Coverage    | Cost | Technology |
|------------------------|------------------------------|----------------|-------------|------|------------|
| Bluetooth              | 2.4 GHz                      | Max. 721 Kbps  | 0.1 - 10 m  | Low  | DSSS, FHSS |
| IEEE 802.11g           | 2.4 GHz                      | 54 Mbps        | 30 - 150 m  | Low  | OFDM       |
| IEEE 802.11b           | 2.4 GHz                      | 11 Mbps        | up to 100m  | Low  | DSSS       |
| IEEE 802.11a           | 5 GHz                        | 20 Mbps        | 50 - 300m   | Low  | OFDM, TDD  |
| HiperLAN2              | 5 GHz                        | 54 Mbps        | 150 m max.  | Low  | OFDM       |
| IMT2000, UMTS          | 2 GHz                        | Max. 2 Mbps    | 30m - 20 Km | High | FDD, TDD   |
| IEEE 802.20            | Below 3.5 GHz                | up to 9 Mbps   | 20Km        | High | OFDM       |
| IEEE 802.16            | 10 - 66 GHz                  | Max. 70 Mbps   | over 50 Km  | High | OFDM       |
| GSM, GPRS, HSCSD, EDGE | 900, 1800, 1900 MHz          | 9.6 - 384 Kbps | up to 35Km  | High | TDMA, FDD  |
| DAB                    | 176 - 230, 1452 - 1467.5 MHz | 1.5 Mbps       | up to 100Km | Low  | OFDM       |
| DVB-T                  | <860 MHz                     | 5-31 Mbps      | up to 100Km | Low  | OFDM       |

Στον πίνακα αυτόν βλέπουμε τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών που αποτελούν τα συστατικά ενός ετερογενούς ασύρματου τηλεπικοινωνιακού περιβάλλοντος. Από τον πίνακα αυτόν είναι φανερή η διαφορετικότητα κάθε τεχνολογίας όσο και τα αλληλοκαλυπτόμενα χαρακτηριστικά τους. Για παράδειγμα, τα δίκτυα UMTS (Universal Mobile Telephone System) υπερκαλύπτουν σε έκταση όλα τα τοπικά ασύρματα δίκτυα (πχ τα 802.11). Επιπλέον, κάθε τεχνολογία υποστηρίζει διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων. Κοιτάζοντας στον Πίνακα 1 βλέπουμε, για παράδειγμα, ότι το πρωτόκολλο IEEE 802.11b WLAN υποστηρίζει έως 11Mbps ενώ το GPRS (General Packet Radio Services) σαφώς χαμηλότερους ρυθμούς που αγγίζει τα 9.6 Kbps. Επιπρόσθετα, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ακριβώς λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών των δικτύων, δεν είναι δυνατόν να συγκριθεί με έναν ευθύ και εύκολο τρόπο, η ισχύς που λαμβάνεται στον τερματικό σταθμό από τους σταθμούς βάσης κάθε διαφορετικής ραδιοτεχνολογίας. Τέλος, ως αναφέρουμε ότι κάθε μία από τις τεχνολογίες αυτές είναι δυνατόν να προσφέρει διαφορετικά επίπεδα αξιοπιστίας, ασφάλειας, ποιότητας υπηρεσίας, εύρος διαθέσιμων εφαρμογών κ.α. Καθώς, λοιπόν, ένας κινητός (συνήθως) χρήστης θα περνά μέσα από την εμβέλεια διάφορων δικτύων, θα καλείται να αποφασίσει εάν για μια συγκεκριμένη υπηρεσία που προτιμά και η οποία παρέχεται από πολλά δίκτυα πρόσβασης, θα απαιτηθεί να “μεταπηδήσει” από το δίκτυο που είναι ήδη συνδεδεμένος σε κάποιο άλλο που καλύπτει καλύτερα τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του. Αυτή η απόφαση θα γίνεται λαμβάνοντας υπόψη διάφορα κριτήρια, όπως το κόστος, η ποιότητα, η εμβέλεια, αλλά και η κατανάλωση ενέργειας (πχ στο CDMA - Code Division Multiple Access, η κατανάλωση ενέργειας είναι πολλαπλάσια υψηλότερη συγκρινόμενη με τεχνολογίες WLANs).

## 1.2 η προοπτική του ABC

Σήμερα βρισκόμαστε στο κατώφλι μιας νέας εποχής στις κινητές τηλεπικοινωνίες. Η ετερογένεια των τεχνολογιών που υπάρχουν, η τεράστια ποικιλία υπηρεσιών, πολιτικών κόστους και τεχνικών χαρακτηριστικών, σε συνδυασμό με την ύπαρξη πολλών εκατοντάδων εκατομμυρίων χρηστών με διαφορετικές απαιτήσεις και ανάγκες συνιστούν ένα ιδιαίτερα επιβαρυσμένο με όρους πολυπλοκότητας περιβάλλον. Σε αυτό το πολύπλοκο περιβάλλον είναι αναγκαίο να συνεχίζει ο χρήστης να απολαμβάνει υψηλής ποιότητας προηγμένες υπηρεσίες, με τρόπο αποδοτικό τόσο αναφορικά με το κόστος τους όσο και με την κινητικότητα και τον τόπο παροχής τους. Τα νέας γενιάς ετερογενή ασύρματα δίκτυα πρόσβασης θα πρέπει να παρέχουν:

- υψηλή αποδοτικότητα με δυνατότητα σύνδεσης οπουδήποτε και οποτεδήποτε
- υποστήριξη πολυμεσικών υπηρεσιών με χαμηλό κόστος μετάδοσης
- χρήση νέας γενιάς τεματικών συσκευών με υποστήριξη ποικιλίας τεχνολογιών
- υποστήριξη εξατομικευμένων υπηρεσιών χρήστη
- δυνατότητα πρόσβασης υπηρεσιών από πολλούς διαφορετικούς παρόχους

Σε ένα τέτοιο περιβάλλον η απαίτηση των χρηστών έχει πλέον μετακινηθεί από το *συνεχώς συνδεδεμένος (always connected)* στο *συνεχώς συνδεδεμένος στο καλύτερο δίκτυο (always best connected)*. Αυτή η απαίτηση σημαίνει όχι μόνο την σύνδεση του τεματικού με κάποιο δίκτυο, αλλά την συνεχή σύνδεσή του στο καλύτερο από τα διαθέσιμα δίκτυα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο όρος λοιπόν *always best connected (ABC)* αναφέρεται στον καθορισμό του συνόλου των μηχανισμών και των κριτηρίων που επιτρέπουν τον χρήστη να συνδέεται σε διάφορα δίκτυα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο<sup>1</sup>. Με άλλα λόγια οι μηχανισμοί του ABC θα πρέπει να παρέχουν στον χρήστη την δυνατότητα επιλογής κάθε φορά στο πλέον κατάλληλο δίκτυο για κάθε συγκεκριμένη υπηρεσία/υπηρεσίες, λαμβάνοντας υπόψη τις παρούσες συνθήκες των δικτύων, τις προτιμήσεις του χρήστη αλλά και τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς των συστημάτων και των εφαρμογών<sup>2</sup>. Επομένως, ο τελικός χρήστης, χωρίς να νοιάζεται για τις συνθήκες της ασύρματης δικτύωσης και των όποιων προβλημάτων και εμποδίων που κάθε φορά προκύπτουν, ενδιαφέρεται αποκλειστικά να είναι πάντα συνδεδεμένος στο καταλληλότερο - καλύτερο (για τις απαιτήσεις του) δίκτυο.

Ο καθορισμός του όρου “καλύτερο” ή “καταλληλότερο” (το “best” του ακρωνυμίου ABC) εξαρτάται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες, όπως οι προσωπικές, εξατομικευμένες προτιμήσεις του χρήστη, οι προδιαγραφές και οι ικανότητες των τεματικών συσκευών, οι απαιτήσεις των εφαρμογών. Ακόμη, διάφοροι άλλοι παράγοντες υπεισέρχονται στον καθορισμό του καταλληλότερου δικτύου: θέματα ασφάλειας, πολιτικών, κατανάλωσης ενέργειας, διαθέσιμων δικτυακών πόρων αλλά και ζητήματα εμβέλειας και παρεμβολών συμμετέχουν δραστικά στην διαδικασία επιλογής. Σε εκείνη, δηλαδή, την διαδικασία όπου ο χρήστης παραμένει πάντα καλύτερα συνδεδεμένος: όχι μόνο πάντα συνδεδεμένος, αλλά συνδεδεμένος στην καλύτερη για αυτόν τεχνολογία πρόσβασης, κάθε στιγμή<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> G. Fodor, A. Eriksson, A. Tuoriniemi, Ericsson Research “Providing Quality of Service in Always Best Connected Networks”, IEEE Communications Magazine, 2003, pp. 154-163

<sup>2</sup> M. Louta, P. Zournatzis, S. Kraounakis, P. Sarigiannidis, I. Dimitropoulos “Towards realisation of the ABC vision: a comparative survey of access network selection” 2011 IEEE Symposium on Computers & Communications (ISCC), pp. 472-477

<sup>3</sup> E. Guatafsson, A. Jonsson, “Always Best Connected”, IEEE Wireless Communications, vol.10, 2003, pp. 49-55

Για να κατανοήσουμε την μεγάλη διαφορά που συντελείται μεταξύ των παραδοσιακών δικτύων πρόσβασης και των μελλοντικών τέταρτης γενιάς, ας συγκρίνουμε τα παραδοσιακά (ομογενή) δίκτυα με τα νέα (ετερογενή) περιβάλλοντα<sup>4</sup>: Αρχικά οι τερματικές συσκευές και τα δομικά στοιχεία των ομογενών δικτύων αναζητούν διαθέσιμα σημεία πρόσβασης μέσα στο ίδιο τηλεπικοινωνιακό σύστημα προκειμένου για ομογενή περιβάλλοντα, σε αντίθεση με τα ετερογενή δίκτυα όπου η αναζήτηση περιλαμβάνει διαφορετικά συστήματα. Ως αποτέλεσμα, επομένως, στα παραδοσιακά δίκτυα η επιλογή γίνεται μεταξύ σημείων πρόσβασης ίδιας τεχνολογίας, ενώ στα δίκτυα τέταρτης γενιάς τα σημεία πρόσβασης ανήκουν σε πολλαπλές ραδιοτεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης. Επιπλέον, η απόφαση μεταπομπής (handover) από ένα σημείο πρόσβασης σε άλλο στην κατηγορία των πρώτων δικτύων συμβαίνει συνήθως λόγω ενός κατωφλίου (κυρίως ισχύς σήματος), ενώ στα ετερογενή ασύρματα δίκτυα, πολλά γεγονότα μπορούν να οδηγήσουν στην απόφαση μεταπομπής. Τέλος, η διαδικασία προσαρμογής από το ένα σημείο πρόσβασης στο άλλο για τα παραδοσιακά ομογενή δίκτυα δεν είναι τόσο σημαντική (αφού όλα τα συστατικά δομικά στοιχεία του δικτύου χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία), σε αντίθεση με τα τέταρτης γενιάς δίκτυα, όπου η διαδικασία ολοκλήρωσης της μεταπομπής και προσαρμογής του τερματικού αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αφού η περιαγωγή γίνεται μεταξύ τεχνολογιών και συνθηκών που μεταβάλλονται δραστικά από δίκτυο σε δίκτυο.

Από τα παραπάνω γίνεται πλήρως κατανοητή η απαίτηση για ομαλή μεταπομπή από ένα σημείο πρόσβασης μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας δικτύου σε ένα άλλο σημείο πρόσβασης με διαφορετική τεχνολογία δικτύου από το προηγούμενο. Αυτή η διαδικασία, (seamless mobility)<sup>5</sup> αναφέρεται σαν το γεγονός όπου όλες οι υπάρχουσες υπηρεσίες που υλοποιούνται ήδη από το τερματικό του χρήστη είναι αναγκαίο να συνεχίζουν να λειτουργούν -χωρίς καμία διακοπή- κατά τη διάρκεια της μεταπομπής από ένα δίκτυο σε ένα άλλο.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, μπορούμε να διατυπώσουμε την έννοια της ABC προοπτικής, σαν την ικανότητα σύνδεσης κάθε χρονική στιγμή με το πλέον κατάλληλο δίκτυο. Η διαδικασία αυτή θα πρέπει να παραμένει διαφανής, ευέλικτη και άγνωστη στον τελικό χρήστη, μέσω μιας αποδοτικής διαδικασίας επιλογής δικτύου πρόσβασης (ANS - Access Network Selection).

### 1.3 η ABC προοπτική από διαφορετικές πλευρές<sup>6</sup>

Η προοπτική του “συνεχώς συνδεδεμένου στο καλύτερο δίκτυο” δεν καθορίζεται με τους ίδιους όρους ή και τις ίδιες προτεραιότητες από όλες τις ενδιαφερόμενες πλευρές. Κάθε μία από τις οντότητες που συμμετέχουν στην διαδικασία του ABC θέτει τις προτεραιότητές της, οι οποίες είναι ασφαλώς διαφορετικές και σε μεγάλο βαθμό αντικρουόμενες. Οι ερμηνείες που οι τελικοί χρήστες (καταναλωτές), οι διαχειριστές των συστημάτων και οι πάροχοι των υπηρεσιών δίνουν, ποικίλλουν ανάλογα με το ενδιαφέρον και το σκοπό του καθενός. Οι όροι, λοιπόν, “καταλληλότερο” ή “καλύτερο” εδράζονται τόσο σε αντικειμενικά όσο, όμως, και σε υποκειμενικά

<sup>4</sup> P. Vidales, J. Baliosian, J. Serrat, G. Mapp, F. Stajano, A. Hopper “Autonomic System for Mobility Support in 4G Networks” IEEE Journal on selected areas in Communications, vol. 23, pp. 2288-2304

<sup>5</sup> G. Nyberg, “Seamless Mobility - SEMO: a policy-based prototype for handovers in heterogeneous networks”, Master Thesis in Computing Science 20p, 2006, Umea University, dep. of Computing Science, Umea, Sweden.

<sup>6</sup> M. O'Droma, I. Ganchev, G. Morabito, R. Narcisi, N. Passas, S. Paskalis, V. Friderikos, A.S. Jahan, E. Tsontsis, C.F. Bader, J. Rotrou, H. Chaouchi “Always Best Connected Enabled 4G Wireless World”, in IST Mobile and Wireless Communications Summit, 2003.

θέματα και προτεραιότητες. Είναι φυσιολογικό κάθε “παίκτης” να προσπαθεί να ερμηνεύσει ανάλογα με τις δικές του προσδοκίες και απαιτήσεις το τί ακριβώς σημαίνει η ABC προοπτική. Αυτές οι προσδοκίες και απαιτήσεις οι οποίες πηγάζουν από κοινωνικοπολιτικούς και κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες, αλλά και από χαρακτηριστικά όπως η πυκνότητα του πληθυσμού σε μία περιοχή και οι γεωγραφικές - εδαφικές ιδιαιτερότητές της, οδηγούν σε διαφορετικές υλοποιήσεις.

#### 1.3.1 ABC από την πλευρά του διαχειριστή

Για τους διαχειριστές των δικτύων είναι επιθυμητό από την πλευρά τους να εξετάζουν τον βαθμό κατά τον οποίο οι χρήστες του δικτύου τους απολαμβάνουν την καλύτερη τηλεπικοινωνιακή πρόσβαση στο δίκτυο, ακολουθώντας το μοντέλο της επιχείρησής τους, το οποίο περισσότερο επηρεάζεται από οικονομικά και διαχειριστικά θέματα (όπως η προσεκτική τιμολογιακή πολιτική) παρά από θέματα σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου τους. Η πολιτική τους και οι προτεραιότητές τους σε γενικές γραμμές επηρεάζονται από την απάντηση στην εξής ερώτηση: ποιος είναι ο τρόπος και ποιο εκείνο το σημείο όπου η πλειοψηφία των χρηστών θα συνεχίζει να είναι ικανοποιημένη ώστε να μην αλλάξει διαχειριστή, ενόσω το οικονομικό όφελος για τον διαχειριστή θα μεγιστοποιείται; Για την επίλυση αυτής της “εξίσωσης” είναι απαραίτητο για τον διαχειριστή να διατηρεί μία άμεση επικοινωνία και επαφή με τον πάροχο των υπηρεσιών. Η επικοινωνία αυτή θα παρέχει την απαιτούμενη ευελιξία στον διαχειριστή, ώστε ο τελευταίος να αφουγκράζεται εγκαίρως τις τάσεις και τις προτιμήσεις των χρηστών. Αυτό θα του επιτρέψει να δίδει στον πάροχο (και ο πάροχος με την σειρά του στον τελικό χρήστη) βελτιωμένες τηλεπικοινωνιακές υποδομές, ώστε ο πάροχος να “χτίσει” πάνω τους νέες ελκυστικές πολυμεσικές υπηρεσίες για κατανάλωση από τους τελικούς χρήστες.

#### 1.3.2 ABC από την πλευρά του χρήστη

Ο τελικός χρήστης είναι ο λιγότερο τεχνικά καταρτισμένος και από την δική του πλευρά θα επιθυμούσε τη φθηνότερη κατά το δυνατόν πρόσβαση στο Internet και διαφανή πρόσβαση σε όλες τις υπηρεσίες που τον ενδιαφέρουν. Οι δύο καίριες από την πλευρά του απαιτήσεις, όπως είναι φυσικό, αποτελούν ο λόγος κόστος προς απόδοση και η αδιάλειπτη πρόσβαση στις υπηρεσίες. Τέτοιας φύσεως απαιτήσεις δημιουργούν νέες προκλήσεις στην τιμολογιακή πολιτική και γενικά στο οικονομικό μοντέλο των παρόχων και κατ' επέκταση των διαχειριστών, που δεν σχετίζονται -και σε αυτήν την περίπτωση- με ευθύ τρόπο με τεχνικής υφής ζητήματα, αλλά κυρίως με ζητήματα εμπορίου. Σε αυτήν την κατεύθυνση κινείται και η τάση των χρηστών να ζητούν την ανάπτυξη εξατομικευμένων τιμολογιακών πολιτικών.

#### 1.3.3 ABC από την πλευρά του παρόχου

Η προτεραιότητα των παρόχων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών είναι επικεντρωμένη στην ανοικτή φύση των διεπαφών και των διάφορων τεχνολογιών των δικτύων, ώστε να είναι δυνατή η εύκολη και με το μικρότερο δυνατό κόστος ανάπτυξη νέων πολυμεσικών εφαρμογών και σύγχρονων υπηρεσιών που θα καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών. Ο πάροχος δεν ενδιαφέρεται



και αυτός με την σειρά του τόσο σε τεχνικά θέματα, όσο στην δημιουργία και την διανομή ελκυστικών υπηρεσιών, ώστε να υπάρχουν διαρκώς κίνητρα για την πρόσβαση στο δίκτυο που εκμεταλλεύεται. Αν, λοιπόν, οι υπηρεσίες που παρέχει ο πάροχος είναι δημοφιλείς, όλο και περισσότεροι θα χρησιμοποιούν το δίκτυο, αυξάνοντας, τελικά, το κέρδος του. Από την άλλη πλευρά, οι χρήστες μπορούν να επωφεληθούν με την σειρά τους, καθόσον θα τους προσφέρονται όλο και περισσότερες και τεχνολογικά προηγμένες υπηρεσίες.

#### 1.4 σενάρια του κοντινού μέλλοντος

Για να κατανοήσουμε ότι τα δίκτυα τέταρτης γενιάς είναι ήδη εδώ και έχουν ήδη αρχίσει να υλοποιούνται, ας αναφέρουμε ένα σενάριο ενός χρήστη που δεν απέχει ούτε χρονικά ούτε τεχνικά από το να υλοποιηθεί στο άμεσο μέλλον.

Ο Φίλιππος ξυπνά το πρωί και συνδέεται με το φορητό του υπολογιστή μέσω του οικιακού ασύρματου δικτύου του στο Web. Αφού διαβάσει τα πρωινά νέα, αποφασίζει να ελέγξει την ηλεκτρονική του αλληλογραφία. Σε ένα από τα μηνύματα υπάρχει ένα αρκετά μεγάλο συνημμένο αρχείο και επιπλέον διάφορες υπερσυνδέσεις και ξεκινά το κατέβασμα του αρχείου. Συνειδητοποιώντας ότι έχει αργήσει για την δουλειά του, αποσυνδέει το φορητό του υπολογιστή από το προσωπικό οικιακό δίκτυο και ξεκινά για την δουλειά του. Αμέσως, ο φορητός υπολογιστής ψάχνει για κατάλληλα δίκτυα ώστε να συνεχιστεί το κατέβασμα του συνημμένου αρχείου του ηλεκτρονικού μηνύματος, μέσω τεχνολογίας πχ 3G. Φθάνοντας στο γραφείο του και ενώ έχει προγραμματιστεί μία πρωινή συνάντηση σε ένα άλλο κτήριο του οργανισμού που εργάζεται και βρίσκεται στην άλλη μεριά της πόλης, έκτακτα γεγονότα τον εμποδίζουν από το να απομακρυνθεί από το γραφείο του. Μέσω του τοπικού ασύρματου δικτύου λαμβάνει τελικά μέρος στην σημαντική συνάντηση εξ αποστάσεως. Στο παράδειγμα αυτό ο χρήστης μέσω κατάλληλων τερματικών συσκευών και διεπαφών που υπάρχουν σε αυτές, μπόρεσε να ικανοποιήσει την ανάγκη συνδεσιμότητας ενόσω δεν ήταν δυνατή η φυσική του παρουσία.

Το παραπάνω παράδειγμα φαίνεται εκ πρώτης όψεως τετριμμένο και η αποτυχία συνεχούς σύνδεσης απλά θα επέφερε δυσκολίες στην επαγγελματική δραστηριότητα του Φίλιππου. Ας προχωρήσουμε, λοιπόν, σε ένα άλλο παράδειγμα: Ο αγαπημένος σας ραδιοσταθμός εκπέμπει σε μία συγκεκριμένη συχνότητα. Όταν βάζετε τον δέκτη σας στους τόνους κύκλους ανά δευτερόλεπτο, συντονίζετε το κύκλωμα της κεραίας, έτσι ώστε να τραβάει από τους αιθέρες την συχνότητα του εν λόγω σταθμού. Αν στην λήψη σας παρεμβάλλονται άλλοι πομποί, δεν διαθέτετε άλλη ρεαλιστική επιλογή, παρά να περιμένετε ώσπου να εκλείψει το πρόβλημα. Στον καλύτερο απ' όλους τους δυνατούς κόσμους, ο δέκτης σας θα αντιδρούσε μεταπηδώντας αμέσως σε μια ανοιχτή εφεδρική συχνότητα που θα φέρει την εκπομπή του σταθμού. Μια τέτοια λύση υπερβαίνει τις δυνατότητες της σημερινής ασύρματης τεχνολογίας, πιθανώς δε, το συγκεκριμένο παράδειγμα κάνει το πρόβλημα να φαίνεται περισσότερο τετριμμένο από το παράδειγμα του Φίλιππου. Φανταστείτε, όμως, η παρεμβολή να διέκοπτε μια επείγουσα κλήση έκτακτης ανάγκης προς κάποιο κινητό τηλέφωνο, ενός ανθρώπου που άμεσα χρειάζεται βοήθεια (πχ πυρκαγιά, προβλήματα υγείας, έγκλημα). Σε μια τέτοια περίπτωση, η ταχεία μεταφορά της κλήσης σε ένα καθαρό διάυλο κυψέλης δεν θα απέβαινε απλώς βολική - πιθανόν να έσωζε κάποια ζωή.

## 1.5 διάρθρωση εργασίας

Η συνέχεια της εργασίας αυτής διαρθρώνεται σε άλλα πέντε κεφάλαια. Στα κεφάλαια αυτά θα καλυφθούν τα σημαντικότερα θέματα της συγκριτικής έρευνας για την καταλληλότερη επιλογή δικτύου πρόσβασης.

Συγκεκριμένα, στο δεύτερο κεφάλαιο περιέχονται θέματα αποσαφήνισης των εννοιών της μεταπομπής. Αρχικά αναλύονται τα είδη της μεταπομπής. Επιπλέον, εξετάζονται αναλυτικά οι διαφορές μεταπομπής μεταξύ ομογενών και ετερογενών συστημάτων επικοινωνιών και διερευνώνται οι κρίσιμοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, ώστε να επιτευχθεί στα ετερογενή δίκτυα ένας αξιόπιστος διαφανής (seamless) από την πλευρά του χρήστη μηχανισμός μεταπομπής. Εν συνεχεία ερευνούμε τις φάσεις του μηχανισμού μεταπομπής. Σε αυτό το σημείο εξετάζονται διεξοδικότερα οι δύο από τις τρεις φάσεις (στάδια) της διαδικασίας επιλογής δικτύου πρόσβασης (οι φάσεις δηλαδή που δεν αποτελούν την καρδιά της επιλογής, αλλά το αρχικό και το τελικό της στάδιο). Κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστεί από την αρχή ότι το ANS πρόβλημα, δηλαδή το πρόβλημα επιλογής του καταλληλότερου δικτύου πρόσβασης, ουσιαστικά αποτελεί την κεντρική φάση - στάδιο και την καρδιά της διαδικασίας μεταπομπής, το οποίο παρουσιάζεται διεξοδικά στα υπόλοιπα κεφάλαια. Στο ίδιο κεφάλαιο αναφέρονται κρίσιμες και απολύτως απαραίτητες απαιτήσεις των δομικών στοιχείων που αποτελούν τα δίκτυα τέταρτης γενιάς, αλλά και των τερματικών των χρηστών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μεταπομπής από ένα δίκτυο σε ένα άλλο διαφορετικής τεχνολογίας, ώστε να επιτυγχάνεται ομαλή και διαφανής μεταπήδηση. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες σημειώσεις σχετικά με το ζήτημα της κατανάλωσης ενέργειας. Στο τέλος του κεφαλαίου υπάρχει εκτενής αναφορά στα κριτήρια τα οποία λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του καταλληλότερου από τα διαθέσιμα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Στο τρίτο κεφάλαιο ανατρέχουμε στην βιβλιογραφική αντιμετώπιση του προβλήματος της επιλογής του καταλληλότερου δικτύου. Ερευνούμε τις μεθοδολογίες, τις στρατηγικές, τις τεχνικές και τους τρόπους εν γένει που οι ερευνητές προτείνουν στην προσπάθεια υλοποίησης της ABC προοπτικής. Γίνεται εκτενής αναφορά σε συγκεκριμένες μεθοδολογίες και σε κατάλληλους αλγορίθμους με τη βοήθεια των οποίων οδηγούμαστε στην επιλογή του καταλληλότερου δικτύου. Στο μέρος αυτό της εργασίας ανακαλύπτουμε τον τρόπο που μαθηματικά εργαλεία και θεωρίες που ανήκουν στην σφαίρα άλλων επιστημονικών πεδίων, βοηθούν στην επίλυση του δικού μας προβλήματος.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται αρκετές αντιπροσωπευτικές εργασίες, γεγονός που αποτελεί πολύτιμο στάδιο στην προσπάθεια ανάπτυξης και τεκμηρίωσης της δικής μας οπτικής. Στη συνέχεια αναπτύσσεται μία διαφορετική κατηγοριοποίηση από αυτές που έως τώρα έχουν προταθεί στο σύνολο της βιβλιογραφίας. Θεωρούμε σημαντικό το γεγονός ότι πρέπει αρχικά να κατανοηθεί πλήρως το πρόβλημα και να κατηγοριοποιηθούν οι προτεινόμενες λύσεις σε διαφορετική -από τις έως τώρα προτεινόμενες- βάση. Το βήμα αυτό αποτελεί πολύτιμο εργαλείο ώστε μετά την πλήρη και εις βάθος κατανόηση να είμαστε πλέον σε θέση να διατυπώσουμε την δική μας προοπτική, η οποία εδράζεται στην σύνθεση εκείνων των στοιχείων της επιστημονικής έρευνας τα οποία θεωρούμε ότι μπορούν να οδηγήσουν στην βέλτιστη επίλυση της επιλογής του καταλληλότερου δικτύου πρόσβασης.

Στο επόμενο κεφάλαιο (5ο) συζητείται η κατάστρωση της δικής μας στρατηγικής. Στη συνέχεια περιέχονται όλα τα θέματα που αφορούν την κατάστρωση του δικού μας αρχικά -απλού- αλγορίθμου. Δίδονται τα δεδομένα του προβλήματος και δύο υλοποιήσεις με τα αποτελέσματά τους. Στο τέλος προχωρούμε στον σχολιασμό και την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Το τελευταίο, έκτο, κεφάλαιο αναφέρεται σε θέματα μελλοντικών σχεδίων ανάπτυξης και βελτίωσης του αλγορίθμου που προτείνεται στην παρούσα εργασία. Πάνω στα σχέδια αυτά παρουσιάζεται η μελλοντική ανάπτυξη ενός καινοτόμου περιβάλλοντος προσομοίωσης και συζητούνται περαιτέρω σχετικά θέματα.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# μ ε τ α π ο μ π ή

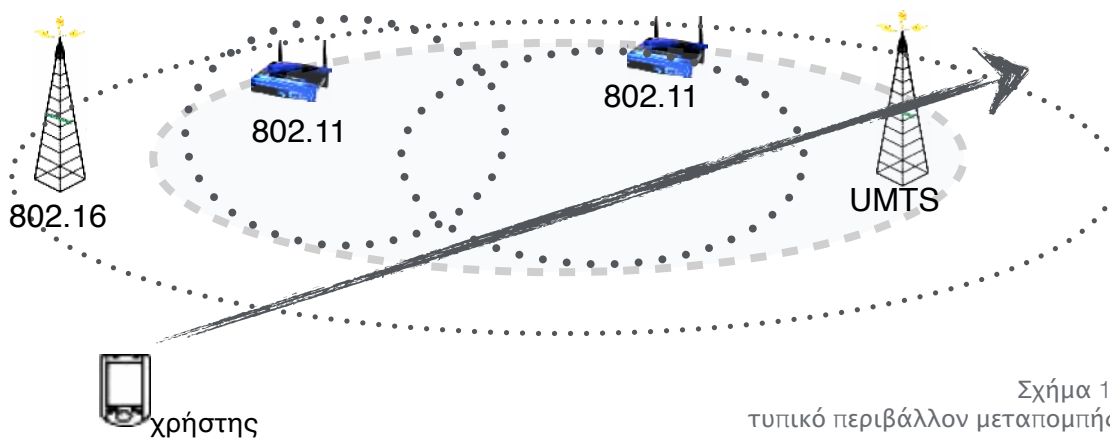
---

**Σ**το κεφάλαιο αυτό ασχολούμαστε με την μεταπομπή (*handover* ή *handoff*), την μεταπήδηση δηλαδή από το δίκτυο στο οποίο είμαστε συνδεδεμένοι σε ένα άλλο το οποίο έχει επιλεγεί. Αφού αποσαφηνιστεί η έννοια αυτή και κατανοηθεί πλήρως η κομβική σημασία της στο πρόβλημα επιλογής δικτύου πρόσβασης (*ANS*), αναφέρονται οι κατηγορίες μεταπομπής και εν συνεχεία ερευνώνται οι διαφορές των μεταπομπών που συμβαίνουν μεταξύ ομογενών δικτύων από την μια και ετερογενών από την άλλη. Εν συνεχεία μελετώνται τα στάδια της διαδικασίας μεταπομπής. Στο σημείο αυτό γίνεται πλήρως αντιληπτό γιατί οι φάσεις - στάδια της μεταπομπής αποτελούν ακριβώς η πραγματοποίηση της *ABC* προοπτικής και γιατί η κεντρική φάση της μεταπομπής αποτελεί τη λύση του *ANS* προβλήματος. Στην συνέχεια του κεφαλαίου εξετάζουμε τις απαιτήσεις και τα κρίσιμα χαρακτηριστικά που οφείλουν να έχουν τα τερματικά και τα δίκτυα, ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί μία μεταπομπή με διαφανή και ομαλό για τον χρήστη τρόπο. Εδώ σημειώνονται και οι σύγχρονες απαιτήσεις για όσο δυνατόν λιγότερο ενεργοβόρα συστήματα.. Το κεφάλαιο κλείνει με μία εκτενής αναφορά στα κριτήρια που δύναται να λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία της επιλογής του καταλληλότερου ραδιοδικτύου πρόσβασης.

## 2.1 η έννοια της μεταπομπής

Η έννοια της μεταπομπής ή διαπομπής (ο διεθνής όρος είναι handover ή handoff) αναφέρεται στο γεγονός κατά το οποίο ένας κινητός κόμβος αλλάζει το σημείο σύνδεσής του από ένα δίκτυο πρόσβασης σε ένα άλλο<sup>7</sup>. Με άλλα λόγια η μεταπομπή είναι το σύνολο των διεργασιών που επιτρέπουν σε έναν τερματικό σταθμό να παραμένει συνδεδεμένος καθώς “μεταναστεύει” από το σημείο πρόσβασης ενός δικτύου σε σημείο πρόσβασης κάποιου άλλου δικτύου<sup>8</sup>. Γίνεται, λοιπόν, φανερό από τους παραπάνω ορισμούς ότι το κρίσιμο κατά τις διαδικασίες μεταπομπής είναι η παραμονή του τερματικού σε ενεργό κατάσταση<sup>9</sup> χωρίς να χάνεται καμία χρονική στιγμή η σύνδεση του χρήστη με κάποιο δίκτυο, καθώς ο τελευταίος κινείται μεταξύ διαφορετικών δικτύων. Καταλαβαίνουμε ότι σε φυσικό επίπεδο η μεταπομπή δεν είναι τίποτε περισσότερο από μία διαδικασία σχετική με τις συχνότητες εκπομπής και λειτουργίας των δικτύων πρόσβασης. Ο πρωταρχικός σκοπός της μεταπομπής είναι να παραμείνει συνδεδεμένος ο τελικός χρήστης. Άρα όσο αυτός θα απομακρύνεται από τον σταθμό βάσης ή το σημείο πρόσβασης, τόσο το σήμα από αυτές τις οντότητες θα γίνεται ολοένα και πιο αδύναμο, με αποτέλεσμα την τελική διακοπή της σύνδεσης, εάν δε μεταπηδήσει “συχνοτικά” σε κάποιον άλλον διαθέσιμο σταθμό βάσης ή σημείο πρόσβασης. Για τον λόγο αυτό εισήχθη στα τηλεπικοινωνιακά (κυρίως κινητά) ραδιοδίκτυα η έννοια της μεταπομπής. Και ακριβώς αυτή ήταν η αρχική της λειτουργία. Στα πολύπλοκα όμως ραδιοδίκτυα τέταρτης γενιάς, οι διαδικασίες μεταπομπής δεν χρησιμοποιούνται μόνο για να είμαστε απλά πάντα συνδεδεμένοι.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα δίκτυα 4G διαθέτουν μία ευρεία γκάμα ραδιοτεχνολογιών και σε αυτό το περιβάλλον θα γίνεται, όχι μόνο η παραμονή σε ένα δίκτυο, αλλά η παραμονή στο πλέον κατάλληλο από τα διαθέσιμα, αφού αναμένεται κάθε χρονική στιγμή ο χρήστης να βρίσκεται στην εμβέλεια δύο ή και περισσότερων διαφορετικής ραδιοτεχνολογίας δίκτυα πρόσβασης. Η μεταπομπή φαίνεται παραστατικά στο παρακάτω σχήμα: ένας χρήστης κατά την κίνησή του, βρίσκεται στην εμβέλεια διάφορων δικτύων (802.11, UMTS, 802.16). Η επιλογή της καταλληλότερης λύσης έγκειται στον αποτελεσματικό σχεδιασμό των διαδικασιών μεταπομπής, στις απαιτήσεις του ίδιου του χρήστη και στην κατάσταση των δικτύων πρόσβασης.



Σχήμα 1.  
τυπικό περιβάλλον μεταπομπής

<sup>7</sup> βλ. [5]

<sup>8</sup> F. Siddiqui, S. Zeadally, “Mobility management across hybrid wireless networks: Trends and challenges”, Computer Communications vol. 29, 2006, pp. 1363-1385

<sup>9</sup> A. Murtaza, M. Ahmed, “Decision algorithm and procedure for fast handover between 3G and WLAN” Technical report, IDE1039, 2010, School of information science, computer and electrical engineering, Halmstas University.

## 2.2 κατηγορίες μεταπομπής

Είναι κατανοητό ότι διαφορετικού είδους μεταπομπές μπορούν να συμβαίνουν, ανάλογα με το τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον, τις πολιτικές και τις προτιμήσεις των χρηστών, τα χαρακτηριστικά των δικτύων και την τεχνολογία που καθένα από αυτά χρησιμοποιεί. Παρακάτω παρουσιάζονται όλα τα είδη μεταπομπών που αναφέρονται στην σχετική βιβλιογραφία. Τα είδη μεταπομπών έχουν ομαδοποιηθεί σε τέσσερα διαφορετικά σύνολα, ώστε η συνολική εποπτεία τους να είναι πιο εύκολη. Η ομαδοποίηση αυτή δεν προκύπτει από την βιβλιογραφία και είναι απλώς ενδεικτική. Στην ορολογία κάθε τύπου μεταπομπής προτιμάται -στις περισσότερες των περιπτώσεων- ο αγγλικός όρος, έναντι της ελληνικής μετάφρασης, καθόσον το σύνολο της βιβλιογραφίας είναι στην αγγλική και η άκριτη μετάφρασή τους περισσότερο θα μπερδέψει τους αναγνώστες, παρά θα προσθέσει σχετική γνώση.

### 2.2.1 Ομάδα 1η: πώς γίνεται η μεταπομπή (hard/soft)

Μία μεταπομπή μπορεί να χαρακτηριστεί ως *hard* όταν ο κινητός χρήστης μπορεί μόνον να επικοινωνεί σε ένα αποκλειστικά κανάλι με ένα και μοναδικό σταθμό βάσης κάθε φορά. Όταν ο κινητός κόμβος (χρήστης) έχει δυνατότητα να επικοινωνεί με περισσότερα από ένα κωδικοποιημένα κανάλια (όπως στην περίπτωση του CDMA), γεγονός που του επιτρέπει την επικοινωνία με περισσότερους σταθμούς βάσης, η μεταπομπή χαρακτηρίζεται ως *soft*<sup>10</sup>.

Η μεταπομπή θεωρείται ως *make - before - break* όταν μία νέα σύνδεση μεταξύ κινητού κόμβου και σταθμού βάσης δημιουργείται πριν ελευθερωθεί η σύνδεση που προϋπάρχει μεταξύ κινητού κόμβου και παλιού σταθμού βάσης. Αντίθετα, στην περίπτωση που η σύνδεση στον νέο σταθμό βάσης εγκαθιδρυθεί μετά την αποσύνδεση από τον παλιό σταθμό, τότε η μεταπομπή ονομάζεται *break - before - make*. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε ως αποτέλεσμα την παντελή διακοπή της σύνδεσης την στιγμή της μεταπήδησης από τον έναν σταθμό βάσης στον άλλον. Αντίθετα, στην *make - before - break* περίπτωση μεταπομπής η σύνδεση του κινητού δεν διακόπτεται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με την προώθηση πακέτων μεταξύ του παλιού και νέου σταθμού βάσης (ή σημείου πρόσβασης), είτε με το να επιτραπεί για κάποιο χρονικό διάστημα στον κινητό χρήστη να είναι ενεργά συνδεδεμένος με δύο ταυτόχρονα σταθμούς ή σημεία. Σε αυτήν την περίπτωση η παλαιά σύνδεση δεν ελευθερώνεται παρά μόνο όταν η νέα έχει εγκαθιδρυθεί πλήρως.

Πολλοί ερευνητές<sup>11 12</sup> ασχολούμενοι με το θέμα της μεταπομπής συγχέουν τις έννοιες *hard* και *soft* με τις αντίστοιχες *break - before - make* και *make - before - break*. Η διαφορά των δύο αυτών κατηγοριών έγκειται στην κατανόηση του κριτηρίου με το οποίο κατηγοριοποιούνται. Στην πρώτη κατηγορία το κριτήριο αφορά την δυνατότητα επικοινωνίας του κινητού χρήστη με έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης: Όσο δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα, η μεταπομπή χαρακτηρίζεται ως *hard*, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ως *soft*. Στην δεύτερη κατηγορία το κριτήριο βασίζεται στον τρόπο υλοποίησης της διαπομπής: έστω, λοιπόν, ότι μέσω λύσης του

<sup>10</sup> J. McNair, F. Zhu "Vertical Handoffs in Fourth-Generation Multinetwork Environments", IEEE Wireless Communications, 2004, pp. 8-15.

<sup>11</sup> βλ. [5]

<sup>12</sup> M. Kassar, B. Kervella, G. Pujolle "An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks", Computer Communications 31, 2008, pp. 2607-2620

ANS προβλήματος έχει επιλεγεί το καταλληλότερο δίκτυο για μεταπομπή. Πώς θα γίνει αυτή; Θα διακόψω πρώτα την υφιστάμενη σύνδεση και έπειτα θα συνδεθώ στο νέο δίκτυο, ή πρώτα θα συνδεθώ στο νέο δίκτυο και στην συνέχεια αφού εγκαθιδρυθεί πλήρως η νέα σύνδεση θα διακόψω την παλιά; Κατάφαση στο πρώτο μέλος του ερωτήματος μας οδηγεί σε break - before - make μεταπομπή, ενώ θετική απάντηση στο δεύτερο μας οδηγεί σε make - before - break διαδικασία μεταπομπής.

Σε κάθε περίπτωση, για να αποφευχθεί η σύγχυση που προκαλείται μπορούμε με ευκολία να καταλήξουμε στο εξής απλό συμπέρασμα που αποτελεί και την πρόταση της δικής μας οπτικής: μία soft/smooth<sup>13</sup> μεταπομπή δεν μπορεί παρά να είναι make - before - break, ενώ μία hard χαρακτηρίζεται ως break - before - make. Αυτό βέβαια, δε σημαίνει ότι μία συσκευή που μπορεί να επικοινωνεί με περισσότερα από ένα ραδιοκανάλια και άρα με περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης / σημεία πρόσβασης και ως εκ τούτου εκ των δυνατοτήτων της χαρακτηρίζεται ως soft, δεν υπάρχει πιθανότητα να αναγκαστεί για διάφορους λόγους να ξεκινήσει μία μεταπομπή που θα χαρακτηριστεί ως break - before - make. Θα πρέπει να γίνει, λοιπόν, αντιληπτό ότι η soft/hard κατηγοριοποίηση αναφέρεται στην δυνατότητα που έχουν/στερούνται τα τεμαχικά να επικοινωνούν με περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης, ενώ ο διαχωρισμός σε make - before - break / break - before - make σχετίζεται με την διαδικασία μεταπομπής, άσχετα με την δυνατότητα του τεμαχικού.

Τέλος, αν η μεταπομπή βελτιώνει την ποιότητα ελαχιστοποιώντας την καθυστέρηση της διαδικασίας (handover latency) ονομάζεται *fast*, ενώ εάν ελαχιστοποιεί την απώλεια πακέτων (packet loss) ονομάζεται *smooth*<sup>14</sup>.

### 2.2.2 Ομάδα 2η: μεταπομπή κελιών & συστημάτων

Όταν μέσω των διαδικασιών μεταπομπής μεταβαίνουμε σε διαφορετικό ραδιοδιάλο της ίδιας κυψέλης ή κελιού, η μεταπομπή αναφέρεται ως *intracell*. Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις μεταπομπής δεν απαιτείται καμία λειτουργία μεταφοράς της ζεύξης. Αντίθετα, όταν στην μεταπομπή -ως αποτέλεσμα της κίνησης του χρήστη- έχουμε μετακίνηση από μία κυψέλη σε μία άλλη, τότε μιλάμε για *intercell* διαδικασίες, όπου εδώ απαιτούνται μηχανισμοί επαναδρομολόγησης και πολλές φορές εγκαθίδρυσης της σύνδεσης.

Παραδοσιακά, η διαδικασία μεταπομπής θεωρούνταν ως ένας μηχανισμός που λάμβανε χώρα μέσα σε ένα ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιούσε αποκλειστικά την ίδια τεχνολογία πρόσβασης (πχ ανάμεσα σε κελιά των κυψελωτών δικτύων). Αυτός ο τύπος μεταπομπής ονομάζεται *intra - system* ή *horizontal*. Η οριζόντια μεταπομπή, με άλλα λόγια, συμβαίνει μεταξύ ομογενών κελιών ενός ασύρματου δικτύου πρόσβασης. Σήμερα, με την ολοένα αυξανόμενη αλληλοεπικάλυψη ασύρματων δικτύων πρόσβασης, οι διαδικασίες μεταπομπής είναι πολύ περισσότερο πολύπλοκες και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα για τις οριζόντιου τύπου μεταπομπές δεν μπορούν να εφαρμοστούν στις περιπτώσεις αυτές<sup>15</sup>. Οι μεταπομπές της

<sup>13</sup> βλ. [2]

<sup>14</sup> βλ. [10]

<sup>15</sup> E. Stevens-Navarro, U. Pineda-Rico, J. Acosta-Elias "Vertical Handover in beyond Third Generation (B3G) Wireless Networks", International Journal of Future Generation Communication and Networking, vol. 1, no. 1, 2008, pp. 51-58.

τελευταίας περίπτωσης, όπου συμβαίνουν μεταξύ διαφορετικών σημείων πρόσβασης/σταθμών βάσης που ανήκουν σε διαφορετικά δίκτυα (πχ μεταξύ WLAN και UMTS) ονομάζονται *inter-system* ή *vertical*. Οι κάθετες (*vertical*) μεταπομπές συμβαίνουν μέσα σε ετερογενή συστήματα δικτύων πρόσβασης, όπου υπάρχουν διαφορές σε διάφορα κρίσιμα θέματα, όπως το διαθέσιμο εύρος ζώνης, ο προσφερόμενος ρυθμός δεδομένων κ.α. Τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των υπό μεταπομπή δικτύων σε αυτήν την περίπτωση οδηγούν σε πολύπλοκες διαδικασίες, συγκρινόμενες με τις περιπτώσεις οριζόντιας μεταπομπής. Ας σημειωθεί<sup>16</sup> ότι οι όροι *horizontal* και *vertical* προέρχονται από την αλληλοεπικαλυπτόμενη δομή των δικτύων.

Περαιτέρω, οι κάθετες διαδικασίες μεταπομπής κατηγοριοποιούνται σε *upward* και *downward*<sup>17</sup>. Οι πρώτες συμβαίνουν από ένα δίκτυο μικρής εμβέλειας και υψηλών ρυθμών μετάδοσης σε ένα άλλο δίκτυο μεγαλύτερης εμβέλειας αλλά μικρότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων. Από την άλλη, σε *downward* μεταπομπές ο κινητός κόμβος αποσυνδέεται από ένα δίκτυο που παρέχει ευρεία κάλυψη, αλλά χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και συνδέεται σε ένα που παρέχει μεν περιορισμένη εμβέλεια, αλλά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Για την καλύτερη κατανόηση ας θεωρήσουμε την ενδεικτική αλλά αντιπροσωπευτική περίπτωση δύο δικτυακών τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης: το κυψελωτό UMTS και ένα WLAN. Το ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) μπορεί για το παράδειγμά μας να θεωρηθεί το δίκτυο μικρής μεν εμβέλειας αλλά μεγάλης -σχετικά- προσφοράς ρυθμού δεδομένων, ενώ το κυψελωτό κινητής τηλεφωνίας δίκτυο UMTS ως ένα ευρείας εμβέλειας αλλά σαφώς μικρότερων ρυθμών μετάδοσης δικτυακό σύστημα. Οι μεταπομπές από το WLAN στο UMTS καλούνται *upwards*, ενώ εκείνες από το UMTS στο WLAN, καλούνται *downwards*.

### 2.2.3 Ομάδα 3η: μεταπομπή ελεγχόμενη από ποιόν;

Πέρα από τους τύπους και τις κατηγορίες των μεταπομπών, η διαδικασία μεταπομπής και συγκεκριμένα ο μηχανισμός απόφασης μεταπομπής είναι δυνατόν να βρίσκεται ενσωματωμένος σε μία δικτυακή οντότητα ή στο τερματικό του χρήστη. Για να ληφθεί μία απόφαση μεταπομπής συνήθως απαιτούνται κάποιες μετρήσεις (που χρησιμεύουν ως κατώφλια απόφασης) και κάποιες πληροφορίες σχετικές με το πότε και το που της μεταπομπής. Αυτές οι πληροφορίες και οι μετρήσεις παρέχονται από τον μηχανισμό απόφασης. Έτσι, αν η οντότητα του δικτύου έχει τον κύριο έλεγχο για την απόφαση μεταπομπής, τότε χαρακτηρίζουμε τις μεταπομπές ως ελεγχόμενες από το δίκτυο (*NCHO - Network Controlled HandOver*). Αντίθετα, στις ελεγχόμενες από τον κινητό χρήστη μεταπομπές (*MCHO - Mobile Controlled HandOver*), το τερματικό του χρήστη οφείλει να συλλέξει όλες τις απαραίτητες μετρήσεις και πληροφορίες αφουγκραζόμενο το δικτυακό περιβάλλον, προβαίνοντας μόνος του στην λήψη απόφασης μεταπομπής. Εκτός από αυτές τις δύο κατηγορίες μπορούμε να προχωρήσουμε και στις δημιουργία άλλων δύο: Η πρώτη, κατά την οποία οι πληροφορίες και οι μετρήσεις από το τερματικό του χρήστη χρησιμοποιούνται από το δίκτυο, ώστε το τελευταίο να λάβει απόφαση, ονομάζεται *Mobile - Assisted HandOver (MAHO)*, ενώ η δεύτερη, όπου το δίκτυο παρέχει στον χρήστη απαραίτητες, για την λήψη (από τον χρήστη) απόφασης, πληροφορίες καλείται *Network - Assisted HandOver (NAHO)*.

<sup>16</sup> βλ. [7]

<sup>17</sup> βλ. [7], [10].



Οι στρατηγικές NCHO<sup>18</sup> δεν φαίνεται να είναι ικανές να εφαρμοστούν σε ετερογενή δικτυακά συστήματα. Το όραμα των ετερογενών δικτυακών τηλεπικοινωνιών έχει στην καρδιά του τις προτεραιότητες και τις απαιτήσεις του χρήστη. Στρατηγικές που θα του αφαιρούν το πλεονέκτημα να αποφασίζει ο ίδιος ανάλογα με τα κριτήρια που θέτει δεν είναι αποδεκτές και απορρίπτονται ως μη ταιριαστές στην προοπτική του ABC από την πλευρά του χρήστη.

Οι MAHO τεχνικές χρησιμοποιούνται στα 2G και 3G ασύρματα δίκτυα<sup>19</sup>, όπου τα κινητά τερματικά των χρηστών αποστέλλουν μετρήσεις στις οντότητες της δικτυακής δομής, ώστε οι τελευταίες με την βοήθεια των πληροφοριών που συλλέγουν από τα τερματικά να προχωρούν στην λήψη της απόφασης μεταπομπής. Στα ετερογενή, όμως, δίκτυα η τεχνική MAHO παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα<sup>20</sup>. Αρχικά, τα θέματα ασφαλείας που υπεισέρχονται οδηγούν σε αύξηση τόσο της πολυπλοκότητας όσο και της καθυστέρησης. Οι οντότητες των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων χρησιμοποιούν και ανταλλάσσουν μεταξύ τους συμφωνητικά (πιστοποιητικά) ασφαλείας (SA - Security Association). Με τη σειρά του και ο χρήστης χρησιμοποιεί τα δικά του SAs, τα οποία μάλιστα είναι διαφορετικά για κάθε υπηρεσία που χρησιμοποιείται, για κάθε πάροχο στον οποίο είναι συνδρομητής. Σε ένα πολύπλοκο και ετερογενές ασύρματο δίκτυο, με μεγάλο αριθμό χρηστών, (οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικές υπηρεσίες με διαφορετικά επίπεδα ασφαλείας), παρόχων και διαχειριστών δικτύων, η διακίνηση πλεονάζουσας πληροφορίας οδηγεί στην αύξηση της πολυπλοκότητας και της καθυστέρησης κατά την διαδικασία μεταπομπής. Οι τεχνικές δυσκολίες αυξάνονται εάν συλλογιστούμε ότι η δικτυακή οντότητα που είναι επιφορτισμένη (στην στρατηγική MAHO) με την λήψη απόφασης μεταπομπών, θα έχει να διαχειριστεί τεράστιο πλήθος αιτημάτων, διαφορετικών μεταξύ τους, αφού κάθε χρήστης θα έχει τις δικές του προτεραιότητες, τις δικές του ανάγκες και προτιμήσεις. Τέλος, δεν πρέπει να μας διαφεύγει το γεγονός ότι η αποστολή σε μία τρίτη δικτυακή οντότητα προσωπικών δεδομένων και προτιμήσεων των χρηστών δεν είναι σίγουρο ότι θα έχει την αποδοχή τους, ούτε ότι δεν θα αντιμετωπίσει νομικά εμπόδια.

Η προσέγγιση MCHO φαίνεται να είναι η καταλληλότερη επιλογή στα τέταρτης γενιάς ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, καθώς το τερματικό του χρήστη θα έχει την πρωτοβουλία και τον έλεγχο της μεταπομπής. Μία τέτοια στρατηγική προσδίδει ευελιξία στα συστήματα και μειώνει τόσο την πολυπλοκότητα όσο και την συνολική επιβάρυνση στην διακίνηση δεδομένων στο δίκτυο. Οποσδήποτε, όμως, θα απαιτηθεί ακόμη και σε αυτήν την προσέγγιση μία είδους συνεργασία με τις οντότητες του δικτύου. Τα τερματικά των χρηστών θα χρειάζονται κάποιες χρήσιμες για την λήψη απόφασης πληροφορίες από τα δίκτυα, όπως πολιτικές κόστους, ρυθμό μετάδοσης, διαθέσιμο εύρος ζώνης κ.α. Έτσι, καταλήγουμε σε συστήματα μεταπομπής που θα χαρακτηρίζονται ως MCHO/NAHO.

#### 2.2.4 Ομάδα 4η: λοιπές κατηγορίες

Πριν κλείσουμε το θέμα των τύπων και των κατηγοριοποιήσεων των μεταπομπών, θα ήταν ενδιαφέρον να εξετάσουμε δύο γενικότερες κατηγορίες μεταπομπής.

<sup>18</sup> Α. Κανατάς, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Παντός "Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών", εκδ. Παπασωτηρίου, 2008, Αθήνα.

<sup>19</sup> D. Nishth, "Handoff in Cellular systems" IEEE Personal Communications, 1998

<sup>20</sup> W. Zhang, J. Jaehnert, K. Dolzer "Design and Evaluation of a Handover Decision Strategy for 4th Generation Mobile Networks", in Proc. of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003 (VTC 2003 - Spring), vol. 3, pp. 1969 - 1973

Η πρώτη κατηγορία<sup>21</sup> διαχωρίζει τις μεταπομπές ανάλογα με το γεγονός που τις προκαλεί. Έτσι έχουμε “εξαναγκασμένες” (*imperative / forced handoff*) μεταπομπές, όταν αυτές ξεκινούν λόγω ενός φυσικού ή τεχνικού συμβάντος σχετικού με την διαθεσιμότητα του δικτύου, όπως για παράδειγμα την χαμηλή στάθμη λαμβανόμενου σήματος και τις “εναλλακτικές” (*alternative / user handoff*) μεταπομπές όπου το αίτιο εδράζεται στις προτιμήσεις - απαιτήσεις του χρήστη. Η δεύτερη περίπτωση παρέχει στο χρήστη καλύτερη απόδοση αφού ξεκινά πάντα λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του.

Η τελευταία κατηγορία<sup>22</sup> που μελετούμε σχετίζεται αποκλειστικά με τα αποτελέσματα που θα έχει η μεταπομπή για τον χρήστη. Έτσι διακρίνουμε μεταξύ “προσδοκώμενης” (*anticipated*) και “μη - προσδοκώμενης” (*unanticipated*) μεταπομπής. Για να κατανοήσουμε τις διαφορές ας δούμε ένα παράδειγμα: Ένας χρήστης είναι συνδεδεμένος σε ένα WLAN και κάποια στιγμή, αν και απολαμβάνει σύμφωνα με τις προτιμήσεις του υψηλής ποιότητας υπηρεσίες, αντιλαμβάνεται ότι έχει εισέλθει στην εμβέλεια ενός ασύρματου WAN δικτύου (πχ του 802.16). Γνωρίζοντας ότι η εμβέλεια του WLAN είναι περιορισμένη σε σχέση με αυτήν του WAN και υπό τον όρο ότι θα συνεχίζει να του παρέχεται το ίδιο QoS και από το νέο μεγαλύτερης εμβέλειας δίκτυο, μπορεί -αν και δεν είναι άμεσα απαραίτητο- να προβεί στην μεταπομπή από το WLAN στο ασύρματο WAN, σκεπτόμενος ότι αν συνεχίζει να κινείται κάποια χρονική στιγμή ούτως ή άλλως θα χρειαστεί να γίνει κάποια μεταπομπή καθώς το ληφθέν σήμα από το WLAN θα βαίνει όλο και μειούμενο. Αντίθετα, εάν ο χρήστης ακυρώσει την μεταπομπή και σκεφτεί να την εκτελέσει αργότερα, τότε οδηγούμαστε σε “μη-προσδοκώμενη” μεταπομπή.

#### 2.2.5 Συνολική εικόνα

Στις παραπάνω παραγράφους αναλύσαμε διεξοδικά τις κατηγορίες και τους τύπους των μεταπομπών που εμφανίζονται στην σχετική βιβλιογραφία. Θα ήταν σκόπιμο να κλείσουμε το θέμα των τύπων και των κατηγοριοποιήσεων των μεταπομπών, σταχυολογώντας από τα όσα παραπάνω αναλυτικά εκτέθηκαν τα πιο σημαντικά κατά την άποψή μας στοιχεία. Αρχίζοντας, λοιπόν, είδαμε μια μεγάλη διαφορά στις μεταπομπές: την κάθετη και την οριζόντια. Προηγουμένως, σχολιάσαμε την διάκριση *make - before - break* και *break - before - make* που αποτελεί κομβικής σημασίας θέμα, στην προσπάθειά μας να συνθέσουμε την δική μας οπτική. Το ίδιο κρίσιμη είναι και η κατηγοριοποίηση μεταξύ NCHO/MAHO/MCHO/NAHO καθώς αν ανάλογα με τις επιλογές του σχεδιαστή, άλλες απαιτήσεις θα χρειάζονται στην δομή του συστήματος, αν αυτό έχει χαρακτηριστικά MAHO και άλλες αν επιλεγεί η προοπτική MCHO. Τέλος, η απαίτηση μία μεταπομπή να μην χαρακτηρίζεται ως *imperative / forced* (εξαναγκασμένη) οδηγεί σε διαφορετικές σχεδιαστικές λύσεις. Έτσι, λοιπόν, κρατούμε για την ώρα τις τέσσερις αυτές πολύ σημαντικές διακρίσεις, ώστε να τις χρησιμοποιήσουμε αργότερα συνθέτοντας σταδιακά την δική μας οπτική στο πρόβλημα της επιλογής του καταλληλότερου κάθε στιγμή δικτύου. Για την καλύτερη κατανόηση των κατηγοριών και του τρόπου που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο Παράρτημα Ι όπου

<sup>21</sup> βλ. [10]

<sup>22</sup> βλ. [7]

σχηματικά δίδεται μια εποπτική εικόνα όλων όσων αναλυτικά παραθέσαμε στην παράγραφο αυτήν.

### 2.3 διαφορές μεταπομπής μεταξύ ομογενών & ετερογενών συστημάτων

Η ικανότητα να προβαίνουμε στην καταλληλότερη επιλογή δικτύου πρόσβασης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες σχετικούς με το δίκτυο στο οποίο ο τερματικός σταθμός είναι ήδη συνδεδεμένος και με το δίκτυο στο οποίο επιθυμεί να μεταφερθεί. Για παράδειγμα, η απόφαση να προβούμε σε μεταπομπή η οποία να χαρακτηρίζεται ως MCHO μπορεί να εκτελείται με την βοήθεια πρακτόρων (agents) οι οποίοι θα βρίσκονται εγκατεστημένοι στην τερματική συσκευή του χρήστη και θα δρουν βασισμένοι σε πολιτικές που αφορούν το εύρος ζώνης, τον φόρτο του δικτύου, την εμβέλεια του, το κόστος, το παρεχόμενο επίπεδο ασφάλειας, αλλά και σε πολιτικές σχετικές με τις απαιτήσεις και τις προτιμήσεις του ίδιου του χρήστη. Έτσι, εάν το νέο δίκτυο στο οποίο ο χρήστης ενδιαφέρεται να μεταφερθεί δεν παρέχει ικανό επίπεδο ασφάλειας, τότε μπορεί να παραμείνει στο αρχικά συνδεδεμένο δίκτυο, ακυρώνοντας την διαδικασία μεταπομπής. Ίσως, όμως, να υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιήσει τις κοστοβόρες αλλά ασφαλείς υπηρεσίες που προσφέρει το νέο δίκτυο (πχ για να έχει πρόσβαση στο επαγγελματικό του ηλεκτρονικό ταχυδρομείο από το δίκτυο UMTS) και από την άλλη πλευρά να επιθυμεί όλες οι άλλες εφαρμογές του να παρέχονται από το, λιγότερο ασφαλές -αλλά σαφώς φθηνότερο-, δίκτυο στο οποίο είναι ήδη συνδεδεμένος (πχ web από ένα WLAN που εκτελεί ένα από τα 802.11 ασύρματα πρωτόκολλα).

Παραδοσιακά, η μεταπομπή σε ομογενή περιβάλλοντα (horizontal handovers) βασίζεται στην ποιότητα του ραδιοκαναλιού, η οποία εκτιμάται κυρίως από την ισχύς του λαμβανόμενου σήματος (RSS - Received Signal Strength) αλλά και από άλλα σχετικά θέματα διαθεσιμότητας πόρων δικτύου. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται αυτόματα και είναι επαναλαμβανόμενες περιοδικά ώστε όταν πέσουν κάτω από ένα ορισμένο ποσό να ξεκινήσει η διαδικασία μεταπομπής σε ένα νέο ραδιοκανάλι ή σε μία νέα κυψέλη του ίδιου -όμως- συστήματος ασύρματης πρόσβασης. Η χρήση όμως του RSS ως το μοναδικό μέτρο απόφασης για την πραγματοποίηση ή όχι μιας μεταπομπής περιορίζει την ικανότητα του τερματικού να ξεκινά διαδικασίες μεταπομπών όταν υπάρχουν και άλλοι -πέρα από το πιθανό RSS κατώφλι- λόγοι, όπως πχ θέματα ασφάλειας. Επίσης, οι παραδοσιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις οριζόντιες μεταπομπές, δεν επιτρέπουν στον χρήστη να προβεί στην επιλογή -ο ίδιος- του δικτύου πρόσβασης της αρεσκείας του, θεωρώντας εκ των προτέρων δεδομένο ότι υπάρχει μόνο μία τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης δικτύου.

Στα ετερογενή περιβάλλοντα οι επιθυμίες του χρήστη αποτελούν μία από τις πλέον σημαντικές παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία των μεταπομπών, που όπως παραπάνω αναλύσαμε, χαρακτηρίζονται ως κάθετες (vertical handovers) σε αυτές τις περιπτώσεις. Στις παραδοσιακές μεθόδους, κατά τις διαδικασίες μεταπομπής ανταλλάσσονται πακέτα πληροφοριών και το ενδιαφέρον εστιάζεται απλώς στην επαλήθευση παραλαβής τους μεταξύ των σημείων πρόσβασης ή των σταθμών βάσης. Αντίθετα, στις κάθετες μεταπομπές δεν ενδιαφερόμαστε για το αν μεταφέρονται σωστά μόνο ομότιμα πακέτα, αλλά και πληροφορίες

σηματοδοσίας και περιεχομένου (όπως επίπεδο ασφάλειας, εγγυήσεις ποιότητας υπηρεσίας, επικεφαλίδες αυθεντικοποίησης και ταυτοποίησης κ.α.). Τέλος, οι παραδοσιακές μεταπομπές είναι σχεδιασμένες αποκλειστικά για ομογενή συστήματα όπου χρησιμοποιείται το ίδιο πρωτόκολλο σηματοδοσίας, η ίδια τεχνική δρομολόγησης και τα ίδια μοντέλα διαχείρισης δικτύου. Από την άλλη πλευρά, στα σύγχρονα ετερογενή περιβάλλοντα, οι κινητοί τερματικοί σταθμοί, οι σταθμοί βάσης, τα σημεία πρόσβασης, οι δρομολογητές των συστημάτων, μιας και ανήκουν σε διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών συστήματα, θα πρέπει να είναι σε θέση να συνεργάζονται μεταξύ τους.

Στόχος της σύντομης αυτής αναφοράς στις διαφορές των μεταπομπών μεταξύ ετερογενών και ομογενών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων ήταν να κατανοηθεί ότι ο σχεδιασμός των μηχανισμών είναι τελείως διαφορετικός ανάλογα με το περιβάλλον εφαρμογής τους. Ανάλογα, δηλαδή, με το εάν έχουμε ομογενή ή ετερογενή τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Αυτό το γεγονός είναι απολύτως αναγκαίο να εμπεδωθεί πλήρως από τον αναγνώστη προτού προχωρήσουμε στην συζήτηση σε θέματα που αφορούν τις φάσεις των (κάθπτων) μεταπομπών. Αναφορικά, δε, με τις απαιτήσεις των τερματικών και των δικτύων, όπως επίσης και με τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την λήψη απόφασης, πέρα από κάποιες νύξεις στην παρούσα παράγραφο, θα ασχοληθούμε εκτενέστερα σε επόμενες παραγράφους του ίδιου κεφαλαίου.

## 2.4 φάσεις μεταπομπής

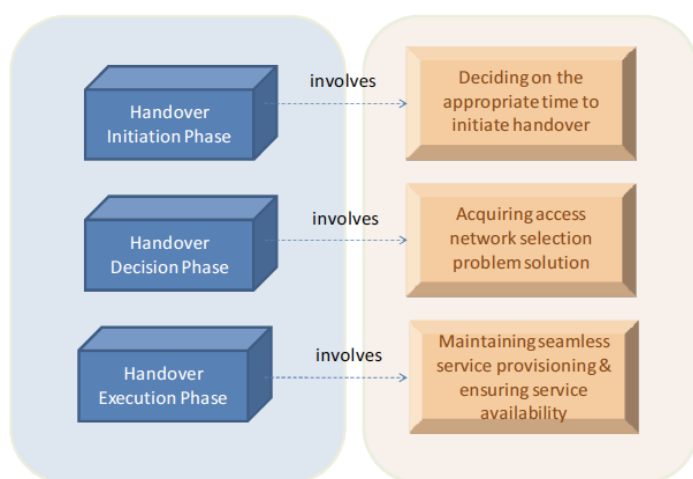
Αν και η εργασία αυτή είναι επικεντρωμένη στις πολιτικές και τους τρόπους με τους οποίους επιλέγουμε το καλύτερο δίκτυο πρόσβασης (ANS) κρίνεται σκόπιμο να αναφέρουμε σε αυτήν την παράγραφο όλη την διαδικασία του Always Best Connected, εκθέτοντας όλες τις φάσεις του και ερευνώντας με αυτόν τον τρόπο κρίσιμα θέματα που ανακύπτουν στην αρχική -κυρίως- φάση. Η επιλογή της αναφοράς σε όλες τις φάσεις των μεταπομπών στοχεύει επίσης να καταδείξει ότι το ζήτημα του “συνεχώς καλύτερα συνδεδεμένου χρήστη” έχει πολλαπλές πλευρές και ότι η κατάσταση ενός αλγορίθμου δεν λύνει το ζήτημα όσο αποδοτικός και να είναι αυτός. Επίσης, στοχεύει να παρουσιάσει στον αναγνώστη ολόκληρο το πλαίσιο του προβλήματος, ώστε να έχει μία εποπτική εικόνα για το σύνολο της στρατηγικής. Επιπρόσθετα, προσδοκούμε να ενσωματώσουμε την παρούσα εργασία σε μελλοντικές όπου θα ερευνούν άλλες φάσεις και στάδια της ABC προοπτικής, ώστε εν τέλει σε ένα ευρύτερο πλαίσιο να προταθεί μία ολοκληρωμένη αντιμετώπιση του θέματος. Τέλος, ο κυριότερος λόγος για τον οποίο συζητούμε με αρκετή λεπτομέρεια τις φάσεις των μεταπομπών είναι επειδή σκοπός στο σημείο αυτό είναι να κατανοήσει ο αναγνώστης ότι η εργασία αυτή (που θα αναδειχθεί από το αμέσως επόμενο κεφάλαιο) έχει ως πεδίο έρευνας εκείνη τη φάση της μεταπομπής που καλούμε ANS (Access Network Selection) και με την οποία ασχολούμαστε λεπτομερέστατα στα υπόλοιπα κεφάλαια. Η προοπτική του ABC, δηλαδή η μεταπομπή στο καλύτερο κάθε φορά δίκτυο, χωρίζεται σε φάσεις, η μια εκ των οποίων (που αποτελεί και την καρδιά της επιλογής) αποτελεί την λύση του ANS προβλήματος.

### 2.4.1 Εποπτική αναφορά φάσεων

Στο σύνολο της σχετικής βιβλιογραφίας αναφέρονται τρεις φάσεις μεταπομπών. Οι περισσότεροι ερευνητές δίδουν ονομασίες που σχετίζονται ακριβώς με την επιφορτισμένη εργασία

κάθε φάσης, ενώ κάποιοι άλλοι απλά τις απαριθμούν με αριθμούς. Στην εργασία αυτή<sup>23</sup> επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν ονόματα που σχετίζονται άμεσα με την σειρά με την οποία εκτελούνται οι φάσεις αυτές. Έτσι, λοιπόν, πρώτα έχουμε την φάση της “έναρξης” (initiation), ενώ στο τέλος έχουμε την φάση της “εκτέλεσης” (execution). Για την δεύτερη φάση σκόπιμα δεν χρησιμοποιείται ο παραπάνω τρόπος ονοματοδοσίας. Ακολουθούμε στην φάση αυτή την τάση του συνόλου σχεδόν της βιβλιογραφίας για έναν και μοναδικό σκοπό: να καταδείξουμε την σημαντικότητά της. Έτσι, λοιπόν, δίδεται η ονομασία στάδιο “απόφασης” (decision phase), χρησιμοποιώντας έναν όρο που σχετίζεται άμεσα με την εργασία που εκτελείται στην φάση αυτή, ώστε να αντανακλάται η κρισιμότητά της στο σύνολο της διαδικασίας.

Σύμφωνα με τα ανωτέρω λοιπόν παραθέτουμε την δική μας οπτική για τις φάσεις της διαχείρισης των μεταπομπών σχηματικά στο διπλανό σχήμα (Σχήμα 2.). Στην πρώτη φάση αποφασίζεται ο κατάλληλος χρόνος έναρξης της διαδικασίας μεταπομπής. Συλλέγονται, στο στάδιο αυτό, όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που είναι αναγκαίο να λάβουμε υπόψη μας, ώστε να αποφασίσουμε αν και πότε θα



Σχήμα 2. Φάσεις μεταπομπής

γίνει η μεταπομπή. Οι πληροφορίες αυτές προέρχονται από την ανίχνευση όλων των διαθέσιμων δικτύων που βρίσκονται στην εμβέλεια του χρήστη και συλλέγονται όλα τα σχετικά χαρακτηριστικά τους. Αυτός είναι και ο λόγος που στην σχετική βιβλιογραφία αναφέρεται εναλλακτικά ως “εξερεύνηση δικτύων” (network discovery)<sup>24</sup>, “συλλογή πληροφοριών” (information gathering)<sup>25</sup> ή “εξερεύνηση συστήματος” (system discovery)<sup>26</sup>. Η δεύτερη φάση αφορά την απόφαση επιλογής του καταλληλότερου δικτύου πρόσβασης για κάθε μία από τις υπηρεσίες που επιθυμεί ο χρήστης (η λύση του ANS προβλήματος) και την αποστολή οδηγιών στην επόμενη φάση για την εκτέλεση της απόφασης που έχει παρθεί. Η επιλογή γίνεται σταθμίζοντας κριτήρια και χρησιμοποιώντας στρατηγικές και μεθοδολογίες, εκμεταλλευόμενοι όμως και τις πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί στο αρχικό πρώτο στάδιο. Στο τελευταίο -τρίτο- στάδιο εισερχόμαστε στη φάση της εκτέλεσης, όπου εφαρμόζεται η απόφαση που λήφθηκε στις προηγούμενες φάσεις. Στην φάση αυτή δίδεται επίσης η ονομασία “εφαρμογή” (implementation)<sup>27</sup>. Η φάση αυτή περιλαμβάνει την επαναδρομολόγηση της σύνδεσης, την μεταφορά της, δηλαδή, στο νέο σημείο πρόσβασης. Θα πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη σημασία ώστε αυτή η μεταφορά να γίνεται κατά ομαλό και διαφανή -από την πλευρά του χρήστη- τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η συνέχεια και η διαθεσιμότητα της υπηρεσίας ή της εφαρμογής

<sup>23</sup> βλ. [2]

<sup>24</sup> βλ. [7]

<sup>25</sup> βλ. [10] και R. Pries, D. Staehle, D. Hock, M. Hirth “A Policy - Based Vertical Handover System”, Report No 471, University of Wuerzburg, Germany, 2010

<sup>26</sup> βλ. [11]

<sup>27</sup> βλ. [7]

που λειτουργεί στον τερματικό του χρήστη χωρίς διακοπές ή διαλείψεις. Στο στάδιο της εκτέλεσης περιλαμβάνονται ζητήματα πιστοποίησης ταυτότητας, ενώ επίσης γίνεται μεταφορά πληροφοριών χρήστη. Πριν προχωρήσουμε στην αναλυτικότερη παρουσίαση του πρώτου σταδίου, ας σημειωθεί ότι υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές<sup>28</sup> όπου η πρώτη και η δεύτερη φάση θεωρούνται ως μία που ονομάζεται φάση απόφασης, ενώ η τρίτη χωρίζεται σε δύο ανεξάρτητες την ράδιο - μεταφορά ζεύξης (radio link transfer) και την ανάθεση ράδιο - καναλιού (channel assignment). Στην συνέχεια θα δούμε εκτενέστερα την πρώτη φάση, δηλαδή την φάση της έναρξης. Με τη φάση της απόφασης, η οποία είναι και η λύση του ANS προβλήματος, όπως προαναφέρθηκε, ασχολούμαστε διεξοδικά από το επόμενο κεφάλαιο στο σύνολο της εργασίας που ακολουθεί. Όσον αφορά την τρίτη φάση του μηχανισμού μεταπομπής, εξετάζεται παρακάτω σε ξεχωριστή παράγραφο σε συνδυασμό με τα νέα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν οι οντότητες των συστημάτων ώστε να επιτυγχάνεται διαφανής από την πλευρά του χρήστη και ομαλή μεταπομπή.

#### 2.4.2 Ειδικότερα: η “αρχική” φάση

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, κατά τη διάρκεια της αρχικής φάσης συλλέγονται όλες εκείνες οι πληροφορίες που απαιτούνται ώστε να προσδιοριστεί εάν υπάρχει πραγματικά ανάγκη για μεταπομπή και σε θετική περίπτωση δρομολογούνται οι αρχικές διαδικασίες. Σε αυτό το στάδιο του μηχανισμού, οι πληροφορίες είτε προέρχονται από τους σταθμούς πρόσβασης ή τα σημεία πρόσβασης των δικτυακών συστημάτων, είτε σε περίπτωση άλλων αρχιτεκτονικών (πχ MAHO) μεταφέρονται από το τερματικό του. Στην πιο αποκεντρωμένη προοπτική του MCHO/NAHO ο τερματικός σταθμός των χρηστών θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος με πολλαπλές διεπαφές κάθε μια από τις οποίες θα συνεργάζεται με μια συγκεκριμένη τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης<sup>29</sup>. Έτσι, ο τερματικός σταθμός θα είναι σε θέση να γνωρίζει πόσα και ποια δίκτυα είναι κάθε στιγμή διαθέσιμα. Σημειώνεται<sup>30</sup> ότι το εάν προχωρήσουμε στο να προβούμε στην απόφαση να επιλέξουμε ένα άλλο δίκτυο από το ήδη υπάρχον, εξαρτάται, εν πολλοίς στις πληροφορίες του σταδίου αυτού και για αυτόν τον λόγο αποτελεί σημαντικότατο μέρος της συνολικής διαδικασίας. Αυτό, βέβαια, εισάγει -πέραν των άλλων- και σημαντικά θέματα ενέργειας, τα οποία θα εξετάσουμε αμέσως παρακάτω στην εργασία αυτήν.

Η απόφαση για την απόρριψη ή όχι εδράζεται σε πολλές παραμέτρους. Στις περισσότερες προτάσεις αλλά και στις ήδη υλοποιημένες στρατηγικές<sup>31 32</sup> καθορίζεται ένα επίπεδο σήματος, ως στάθμη. Όταν καθοριστεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο λαμβανόμενου σήματος (RSS, Received Signal Strength) ως το ελάχιστο χρησιμοποιήσιμο σήμα για αποδεκτή ποιότητα κάποια υπηρεσίας, χρησιμοποιείται ένα ελαφρώς ισχυρότερο επίπεδο σήματος ως “κατώφλι” (threshold) ή “υστέρηση” (hysteresis). Το κατώφλι αυτό χρησιμοποιείται ώστε να εμποδιστούν διαδοχικές μεταπομπές (“ping - pong effect”). Στις περιπτώσεις αυτές, λοιπόν, αν η λαμβανόμενη ισχύς από έναν άλλο σταθμό βάσης, μετρούμενη περιοδικά ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα είναι

<sup>28</sup> ενδεικτικά βλ [9]

<sup>29</sup> Στην επόμενη παράγραφο σκιαγραφούνται εν συντομία οι τρόποι με τους οποίους ο τερματικός σταθμός του χρήστη μπορεί να εξοπλιστεί με τέτοιες δυνατότητες.

<sup>30</sup> D. Cavalcanti, N. Nandiraju, D. Nandiraju, D. P. Agrawal, A. Kumar “Connectivity opportunity selection in heterogeneous wireless multi-hop networks”, Pervasive and Mobile Computing, Elsevier, 2008, pp. 1574-1192.

<sup>31</sup> T. S. Rappaport “Wireless Communications, Principles and Practice”, 2nd Edition, Prentice - Hall, 2002

<sup>32</sup> H. Holma, A. Toskala, “WCDMA for UMTS, Radio Access for 3G Mobile Communications”, Wiley, 2004, England

μεγαλύτερη κατά ένα ποσό (το κατώφλι), τότε δίδεται η εντολή μεταπομπής. Η εισαγωγή χρονικών διαστημάτων στοχεύει αφενός στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αλλά επίσης και στην αποφυγή περίπτωσης λανθασμένης εκτίμησης, λόγω πχ στιγμιαίων διαλειψων μικρής κλίμακας. Ένα σημαντικό τεχνικό μειονέκτημα<sup>33</sup> των μεθόδων αυτών είναι η αδυναμία τους να διαχωρίσουν την ισχύ του φέροντος (carrier, C) του σταθμού βάσης από την ολική ισχύ παρεμβολής από γειτονικούς σταθμούς βάσης (interference, I). Ως αποτέλεσμα μία ζεύξη, με μεγάλη συνολικά λαμβανόμενη ισχύ, μπορεί να διατηρεί χαμηλό λόγο ισχύς του ενδιαφερόμενου σταθμού βάσης προς συνολική ισχύς  $[C/(C+I)]$ . Απαιτούνται, λοιπόν, άλλα, πέρα από το RSS, κριτήρια εκτίμησης της ποιότητας ζεύξης όπως το BER (Bit Error Rate), CIR (Carrier to Interferences Ratio), SIR (Signal to Interferences Ratio) SNR (Signal to Noise Ratio).

Οι παραδοσιακές αυτές τεχνικές λειτουργούν αποτελεσματικά σε ομογενής οριζόντιες μεταπομπές, όπως επίσης και σε μεταπομπές μεταξύ WCDMA (Wideband CDMA) και GSM (Global System for Mobile Communications)<sup>34</sup>. Στην περίπτωση των τέταρτης γενιάς συστημάτων, όμως, θα πρέπει να βρεθεί ένας απλός και αποτελεσματικός τρόπος, ώστε να λαμβάνονται υπόψη ακόμη και στο αρχικό στάδιο και άλλα κριτήρια που εδράζονται στις προτιμήσεις του χρήστη κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Για να κατανοήσουμε την διαφορετική οπτική στα μελλοντικά συστήματα, ας υποθέσουμε ότι όλα τα τεχνικά, βασισμένα στα χαρακτηριστικά των δικτύων, κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη (BER, CIR, RSS, SIR κ.α.) ικανοποιούνται από το δεδομένο δίκτυο πρόσβασης. Έστω, λοιπόν, ο κινητός τερματικός χρήστης επιθυμεί μία συγκεκριμένη υπηρεσία και εφαρμογή (πχ e-mail/SMTP) με αυξημένο όμως επίπεδο ασφάλειας. Στο ήδη συνδεδεμένο δίκτυο υπάρχει η δυνατότητα πρόσβασης στην υπηρεσία αυτή, αλλά το επίπεδο ασφάλειας που προσφέρεται δεν είναι αποδεκτό από τον χρήστη. Τότε, εάν η αρχική φάση λαμβάνει μόνο τα παραδοσιακά κριτήρια υπόψη της, ο χρήστης δε θα μπορέσει να ικανοποιηθεί, αφού ο μηχανισμός στο πρώτο στάδιο της μεταπομπής δεν θα είναι ικανός να εκτιμήσει την επιθυμία του χρήστη για μεταπήδηση σε άλλο δίκτυο. Στο ίδιο αποτέλεσμα θα κατέληγε η απόφαση για μεταπομπή, εάν εκτός από το επίπεδο ασφάλειας, ο χρήστης επιθυμούσε βέλτιστο κόστος υπηρεσίας σε σχέση με την λαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσίας. Συμπερασματικά, είναι αναγκαίο, πλέον, ακόμη και στο αρχικό στάδιο της μεταπομπής να λαμβάνονται και άλλα -πέραν των σχετικών με την κατάσταση των δικτύων- κριτήρια που εδράζονται στις επιθυμίες του χρήστη, ώστε η εκτίμηση για απόφαση μεταπομπής να τον ικανοποιεί.

#### 2.4.3 Σημειώσεις για την φάση της "εφαρμογής"

Αφήνοντας την ενασχόληση με την δεύτερη φάση του μηχανισμού μεταπομπής για τα επόμενα κεφάλαια της εργασίας αυτής, για λόγους ολοκληρωμένης και πλήρους εποπτείας του συνολικού θέματος του ABC, παρουσιάζουμε στο σημείο αυτό, εν συντομία, μερικά κρίσιμα θέματα που ανακύπτουν από την τρίτη φάση της μεταπομπής. Το στάδιο αυτό είναι επιφορτισμένο με την εφαρμογή -την εκτέλεση- των αποφάσεων των δύο προηγούμενων σταδίων. Η μεταπήδηση από το παλαιό στο νέο επιθυμητό δίκτυο πραγματοποιείται σε αυτό το στάδιο. Ο

<sup>33</sup> S. Nanda, "Teletraffic models for urban and suburban microcells: Cell sizes and handoff rates", IEEE Trans. Veh. Tech., vol. 42, 1993, pp. 673-682.

<sup>34</sup> βλ. [18]

κύριος στόχος και η κύρια απαίτηση είναι η διαδικασία αυτή να είναι ομαλή, λειτουργική και διαφανής από την πλευρά του χρήστη, καθόσον ο τελευταίος δεν ενδιαφέρεται για τις τεχνικές λεπτομέρειες της μεταπομπής, αλλά αποκλειστικά για το βαθμό της δικής του ικανοποίησης ανάλογα με τις επιθυμίες του. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές προτάσεις που προσπαθούν να αντιμετωπίσουν το ζήτημα της διαφάνειας και ομαλότητας της μεταπήδησης από το ένα δίκτυο στο άλλο. Προτείνονται βελτιώσεις στις αρχιτεκτονικές στοιβάδες πρωτοκόλλων<sup>35</sup>, νέα σχήματα βασισμένα σε πράκτορες (agents)<sup>36</sup>, βελτιώσεις του CoA (Care of Addresses)<sup>37</sup> και του MIP (Mobile IP)<sup>38</sup>. Το MIP είναι ένα πρωτόκολλο διαχείρισης προορισμένο να λύνει το πρόβλημα της ανακατεύθυνσης των πακέτων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις μεταπομπής. Η έκτη έκδοση του πρωτοκόλλου αυτού (MIPv6) παρέχει σημαντικές βελτιώσεις εισάγοντας την τεχνική “βελτιστοποίησης δρομολόγησης” (route optimisation). Μία περαιτέρω βελτίωση του πρωτοκόλλου MIPv6, το “ιεραρχικό” (Hierarchical MIPv6)<sup>39</sup> έχει ως στόχο την ελαχιστοποίηση του φόρτου σηματοδοσίας μεταξύ τερματικών σταθμών και δικτυακών οντοτήτων. Τέλος έχουν προταθεί<sup>40</sup> και τεχνικές ανεξάρτητες από το MIP.

Πριν κλείσουμε το κεφάλαιο της μεταπομπής αναφέροντας τα κριτήρια που μπορούν να λαμβάνονται υπόψη στην διαδικασία λήψης απόφασης, ας δούμε εν τάχει το θέμα της διάφανης ομαλής μετάβασης από ένα ραδιοδίκτυο στο άλλο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά με τα οποία θα πρέπει να είναι εφοδιασμένος τόσο ο χρήστης όσο και τα δομικά συστατικά των συστημάτων, ώστε να είναι ικανά να προσφέρουν ομαλή και διάφανη μεταπομπή.

## 2.5 αξιόπιστη & διαφανής μεταπομπή

Για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε έναν αποδοτικό μηχανισμό μεταπομπών, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας κάποιες σημαντικές ιδιότητες που θα προδιαγράφουν και θα διατρέχουν όλα τα στάδια υλοποίησης του μηχανισμού. Παρακάτω θα αναφέρουμε αυτές τις προδιαγραφές που πρέπει να τηρηθούν και στη συνέχεια θα εξετάσουμε ορισμένες από τις αναδυόμενες τεχνολογίες που βοηθούν προς αυτήν την κατεύθυνση. Στο τέλος, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί εν συντομία το σημαντικό θέμα του περιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας κατά τις διαδικασίες μεταπομπής.

### 2.5.1 Σύγχρονες απαιτήσεις

Αρχικά, κατανοούμε ότι οι μεταπομπές θα πρέπει να προλαμβάνουν τις διαλείψεις και να αποφεύγουν τις παρεμβολές. Οι παρεμβολές μπορεί να προέρχονται από την ίδια κυψέλη (αλλά άλλο ραδιοκανάλι, όπως συμβαίνει στις περιπτώσεις του UMTS), από το ίδιο ραδιοκανάλι (“co-

<sup>35</sup> N. Passas, S. Paskalis, A. Kaloxylou, F. Bader, R. Narcisi, E. Tsontsis, A. S. Jahan, H. Aghvami “Enabling technologies for the ‘always best connected’ concept”, Wireless Communications and Mobile Computing 2005, pp. 175-191

<sup>36</sup> E. Bircher, T. Braun “An Agent-based Architecture for Service Discovery and Negotiation in Wireless Networks” Wired/Wireless Internet Communications, 2nd International Conference, Springer, 2004, pp. 295-313

<sup>37</sup> B. Sousa, K. Pentikousis, M. Curado “A Multiple Care of Addresses Model”, 2011 IEEE Symposium on Computers & Telecommunications, ISCC 2011, pp. 485-490

<sup>38</sup> C.E. Perkins, “Mobile networking through mobile IP”, IEEE Internet Computing, vol. 2, 1998, pp. 58-69

<sup>39</sup> N. Montavont, T. Noel “Handover management for mobile nodes in IPv6 networks”, IEEE Communications Magazine vol. 40 (8), 2002, pp. 38-43.

<sup>40</sup> T. Choi, S. Seo, J. Song “ABC<sup>2</sup>: A New Approach to Seamless Mobility Using Cellular Networks and WLANs” IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008, pp. 2675-2680



channel”, από γειτονικές κυψέλες και από όλα τα είδη θορύβου. Με κατάλληλες τεχνικές και διαμορφώσεις σημάτων θα πρέπει να περιορίζονται στο ελάχιστο όλα τα παραπάνω είδη παρεμβολών.

Σημαντικό, επίσης, είναι να μπορέσουμε να ελαχιστοποιήσουμε τις μη απαραίτητες μεταπομπές, ώστε να βελτιωθεί η απόδοση του συνολικού μηχανισμού μεταπομπής. Η συνεχής μεταπομπή δημιουργεί τον κίνδυνο άρνησης υπηρεσίας και αυξάνει το συνολικό φόρτο στο δίκτυο. Έτσι, με διάφορους τρόπους (πολιτικές, χρησιμοποίηση κατωφλίων κ.α) γίνεται προσπάθεια μείωσης των ανώφελων μεταπομπών που πολλές φορές οδηγούν και στο φαινόμενο επαναλαμβανόμενων μεταπηδήσεων (ping - pong effect).

Ένα σύγχρονο σύστημα μεταπομπών δεν μπορεί, επίσης, παρά να είναι αξιόπιστο. Η αξιοπιστία εδώ εννοείται με όρους ομαλότητας: είναι απαραίτητο ο μηχανισμός να εγγυάται την υψηλή ποιότητα των δεδομένων και των εφαρμογών που μεταφέρονται και εκτελούνται αντίστοιχα κατά τη διάρκεια της μεταπομπής και φυσικά μετά την μεταπήδηση στο νέο δίκτυο. Σε αυτό μπορούν να φανούν χρήσιμες οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών των δικτύων (πχ SIR, SNR, BER κ.α.).

Τέλος, ο μηχανισμός μεταπομπών απαραίτητα θα πρέπει να είναι ομαλός και διαφανής από την πλευρά του χρήστη. Στην διεθνή ορολογία αυτό συνήθως αναφέρεται<sup>41</sup> ως “*seamless mobility*”. Με απλά λόγια ο όρος σημαίνει την διατήρηση της λειτουργίας όλων των εφαρμογών που εκτελούνται στον τερματικό σταθμό κατά τη διάρκεια της μεταπομπής χωρίς καμία διακοπή<sup>42</sup>. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει η σύνδεση να παραμένει ενεργή όταν ο τερματικός σταθμός αλλάζει σημείο πρόσβασης. Σε μία τέτοια περίπτωση, λοιπόν, ο χρήστης θα μπορεί να κινείται μέσα στο ετερογενές ασύρματο περιβάλλον, μεταπηδώντας από δίκτυο σε δίκτυο, χωρίς, ωστόσο, ο ίδιος να αντιλαμβάνεται οτιδήποτε που σχετίζεται με την αυξομείωση της ποιότητας των εφαρμογών που εκτελούνται στο τερματικό του (κλήσεις φωνής, μεταφορά αρχείων, κλήσεις εικόνας κ.α.) και αυτός είναι ακριβώς ο λόγος που ονομάζουμε την απαίτηση αυτή ως διαφανής και ομαλή από την πλευρά του χρήστη. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι η απαίτηση για διαφάνεια δεν αφορά μόνο τον χρήστη αλλά και τα ανώτερα επίπεδα των συνόλων των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται από όλα τα δίκτυα πρόσβασης. Αποτέλεσμα της προδιαγραφής αυτής είναι ότι τα χαμηλότερα επίπεδα (δικτύου και ζεύξης) είναι επιφορτισμένα να ενσωματώσουν στις διεργασίες τους την προσφορά διαφάνειας και ομαλότητας της διαδικασίας μεταπομπής στα ανώτερα επίπεδα.

### 2.5.2 Αναδυόμενες τεχνολογίες

Για να υλοποιηθεί ένας μηχανισμός που θα ενσωματώνει τις απαιτήσεις για αξιοπιστία, ομαλότητα και διαφάνεια, ώστε να αποκτά ο χρήστης πρόσβαση σε ποικίλες υπηρεσίες και εφαρμογές μέσω διαφορετικών δικτύων, θα πρέπει ο τελευταίος να εξοπλιστεί με κατάλληλους τερματικούς σταθμούς. Οι σταθμοί αυτοί θα έχουν την δυνατότητα να φέρουν εις πέρας το

<sup>41</sup> ενδεικτικά βλ. M. Yliantilla, M. Makela, J&P Pahlavan, “Analysis of handover in a location-aware vertical multi-access network”, Computer Networks 47 (2), 2005, pp. 185-201.

<sup>42</sup> L. J. Chen, T. Sun, B. Chen, V. Rajendran, M. Gerla “A smart decision model for vertical handoff”, in proc. 4th ANWIRE International Workshop on Wireless Internet and Reconfigurability, Athens, Greece, 2004

μεγαλύτερο μέρος της συνολικής διαδικασίας μεταπομπής, μιας και στις MAHO/NA προσεγγίσεις το κυριότερο βάρος πέφτει στην πλευρά του χρήστη.

Έτσι, λοιπόν, οι τερματικές συσκευές των χρηστών θα πρέπει να είναι ικανοί να<sup>43</sup>:

- αντιλαμβάνονται το περιβάλλον στο οποίο κινούνται, ερευνώντας τα διαθέσιμα δίκτυα και τις δυνατότητές τους.
- επιλέγουν και ενεργοποιούν τις συνδέσεις στα σημεία πρόσβασης των επιθυμητών δικτύων
- έχουν πρόσβαση, επεξεργάζονται και αποθηκεύουν τα προφίλ των χρηστών, και
- υποστηρίζουν με αποδοτικό τρόπο την αδιάλειπτη παροχή των υπηρεσιών και των εφαρμογών κατά τη διαδικασία μεταπομπής.

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω έχουν προταθεί από την βιβλιογραφία<sup>44</sup> δύο, κυρίως, τεχνικές σχεδίασης των τερματικών και των συσκευών του χρήστη.

Η πρώτη περιλαμβάνει συσκευές ικανές να υποστηρίζουν πολλαπλή πρόσβαση δικτυακών συστημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται με ενσωμάτωση πολλών διαφορετικών διεπαφών και συγκεκριμένου λογισμικού που επιτρέπει την εναλλαγή μεταξύ των διεπαφών. Οι συσκευές αυτές που αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως “*multimode terminals*”<sup>45</sup>, θα επιτρέπουν την λήψη δεδομένων από πολλαπλούς φορείς δικτύου διαφορετικών χαρακτηριστικών και τεχνολογιών και θα είναι σε θέση να επιλέγουν, αυτόνομα την ενεργοποίηση της διεπαφής που είναι η καλύτερη για μία δεδομένη εφαρμογή. Η επιλογή αυτή θα βασίζεται σε πολιτικές του χρήστη. Για παράδειγμα, αν ένας χρήστης έχει ρυθμίσει την τερματική του συσκευή ώστε να συνδέεται πάντα στο φθηνότερο δίκτυο, τότε όποτε ο χρήστης αυτός θα εισέρχεται στην εμβέλεια των 802.11 δικτύων, θα επιλέγονται τα δίκτυα αυτά. Ωστόσο, θα πρέπει να λαμβάνονται και άλλες παράμετροι υπόψη, όπως το QoS.

Η δεύτερη τεχνολογία που χρησιμοποιείται είναι η SDR (Software Define Radio)<sup>46 47</sup>. Χρησιμοποιείται προσαρμόσιμο λογισμικό και ευέλικτες πλατφόρμες υλικού προκειμένου να αντιμετωπιστεί η συνεχόμενα αυξανόμενη πολυπλοκότητα στα συστήματα τηλεπικοινωνιών, όπως τεχνικές διαμόρφωσης, πρωτόκολλα, υπηρεσίες και αλλαγές προτύπων<sup>48</sup>. Η τεχνολογία SDR εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα των επαναπρογραμματίσιμων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ώστε να χτιστεί ένα ανοιχτής αρχιτεκτονικής λογισμικό ραδιοσυστημάτων. Με την SDR διευκολύνεται η ενσωμάτωση στο λογισμικό ορισμένων κρίσιμων ζητημάτων των ραδιοτεχνολογιών, όπως της διαμόρφωσης / αποδιαμόρφωσης, κωδικοποίησης, πρωτοκόλλων επιπέδου ζεύξης κ.α. Ένα εξ ολοκλήρου βασισμένο στο υλικό σύστημα ραδιοτεχνολογίας χαρακτηρίζεται από περιορισμούς που εξ ορισμού το υλικό έχει, καθώς όλες οι λειτουργίες του είναι

<sup>43</sup> X. Haibo, T. Hui, Z. Ping “A novel terminal - controlled handover scheme in heterogeneous wireless networks”, Elsevier, Computers and Electrical Engineering vol. 36, 2010, pp. 269 - 279.

<sup>44</sup> βλ.[7]

<sup>45</sup> S. McCann, W. Grotting, A. Pandolfi, E. Hepworth “Next Generation Multimode Terminals” in proc. on 5th IEEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies (3G 2004) The Premier Technical Conference for 3G and Beyond (CP503), London, UK, 2004

<sup>46</sup> M. Dimitris, “Seamless Mobility”, ACR Group, Motorola, [http://www.motorola.com/mot/doc/1/1874\\_MotDoc.pdf](http://www.motorola.com/mot/doc/1/1874_MotDoc.pdf)

<sup>47</sup> SDR Forum, <http://www.sdrforum.org>

<sup>48</sup> J. Hoffmeyer “Radio software download for commercial wireless reconfigurable devices”, IEEE Communications Magazine vol. 42 (3), 2004, pp. 526-532.

σταθερές. Αντίθετα, τα συστήματα που θα χρησιμοποιούν την SDR επεκτείνουν την λειτουργικότητά τους σε ένα ευρύ σύνολο συστημάτων ραδιοπρόσβασης που χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα ζεύξης, καθώς θα είναι σε θέση να επαναδιαμορφώνουν δυναμικά τις λειτουργίες τους. Μία μεγάλη ποικιλία συστημάτων ασύρματης πρόσβασης είναι δυνατόν να ενσωματωθούν με την SDR τεχνολογία σε ένα τερματικό σταθμό, όπως πχ Bluetooth, WLAN, WCDMA, GPRS κ.α.

Τέλος, η ενσωμάτωση γνωστικής ραδιοτεχνολογίας (CR - Cognitive Radios) στα δικτυακά συστήματα πρόσβασης και στα νέας γενιάς “έξυπνα” κινητά τερματικά (SMT - Smart Mobile Terminals) μπορεί να οδηγήσει σε “ευφυή” συστήματα<sup>49</sup>. Η CR είναι ικανή να αντιλαμβάνεται το περιβάλλον, να προσαρμόζεται σε αυτό με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο και να βελτιώνει την απόδοση του συστήματος μέσω διαδικασιών αυτό - μάθησης και αυτοοργάνωσης<sup>50</sup>

Κλείνοντας, γίνεται κατανοητό ότι πέραν από τα τερματικά θα πρέπει και σε επίπεδο δικτύων πρόσβασης ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες πρέπει να βελτιωθούν και να συνδυαστούν αποτελεσματικά με νέες αναδυόμενες, ώστε να οδηγηθούμε στο ζητούμενο: την δημιουργία ενός αξιόπιστου σύγχρονου συστήματος μεταπομπών στα νέα ετερογενή περιβάλλοντα. Πολλές τεχνολογίες έχουν προταθεί ώστε να υλοποιήσουν αυτές τις απαιτήσεις από την πλευρά των δικτύων. Όλες οι προσεγγίσεις δεν επιχειρούν στο ίδιο επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων. Έτσι, τεχνικές MIP/MIPv6 και κάποιες βελτιώσεις τους ενσωματώνονται στο επίπεδο δικτύου (οι τεχνικές αυτές αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία των προτάσεων στο σύνολο της βιβλιογραφίας)<sup>52</sup>. Άλλες προσεγγίσεις<sup>53</sup> <sup>54</sup> περιλαμβάνουν τεχνολογίες που δρουν στο επίπεδο εφαρμογής (πχ SIP - Session Initiation Protocol) ή στο επίπεδο μεταφοράς (πχ mSCTP - mobile Stream Control Transmission Protocol). Επιχειρώντας μία εποπτική εικόνα, παραθέτουμε στον πίνακα που της επόμενης σελίδας (Πίνακας 2) όλες τις τεχνολογίες (υπάρχουσες και αναδυόμενες) οι πιστεύουμε ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην προσπάθεια δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου συστήματος μεταπομπών στο νέας τέταρτης γενιάς ετερογενές ασύρματο περιβάλλον.

<sup>49</sup> C. Ceken, S. Yarkan, H. Arslan “Interference aware vertical handoff decision algorithm for quality of service support in wireless heterogeneous networks”, Elsevier, Computer Networks, vol. 54 (5), 2010, pp. 726-740.

<sup>50</sup> P. Demestichas, V. Stavroulaki, A. Boscovic, A. Lee, J. Strassner “m@ANGEL: Autonomic Management Platform for Seamless Cognitive Connectivity to the Mobile Internet”, IEEE Communications Magazine, vol. 6, 2006, pp. 118-127.

<sup>51</sup> P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki “Introducing Cognitive Systems to the B3G Wireless World”, Cognitive Wireless Networks, Springer, 2007, pp. 253-269.

<sup>52</sup> ενδεικτικά D. Fan, L. Ni, A. Esfahanian “HOPOVER: a new handoff protocol for overlay networks”, in Proc. of the IEEE International Conference on Communications, 5, 2002, pp. 3234-3239.

<sup>53</sup> N. Banerjee, W. Ku, K. Basu, S. Das “Analysis of SIP-based mobility management in 4G wireless networks”, Elsevier, Computer Communications, vol. 27 (8), 2004, pp. 697-707.

<sup>54</sup> M. Li, Y. Fei, V. Leung, T. Randhawa “A new method to support UMTS/WLAN vertical handover using SCTP”, IEEE Wireless Communications vol. 11 (4), 2004, pp. 44-51.

Πίνακας 2.  
Χαρακτηριστικά κρίσιμων τεχνολογιών

| τεχνολογία  | δυνατότητες   |
|---|---|
| 4G networks   | Αρχιτεκτονική που ενσωματώνει τα περισσότερα και σημαντικότερα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, παρέχοντας πληθώρα από διαφορετικές υπηρεσίες και δυνατότητες        |
| Internet Protocol (IP)                              | Παρέχει τον κορμό και μία διαστρωματωμένη βασική αρχιτεκτονική για την διασύνδεση διαφορετικών δικτύων  |
| Mobile IP (MIP)                                     | Επιτρέπει την διατήρηση της IP καθώς το τερματικό κινείται μεταξύ διαφορετικών δικτύων  |
| Mobile IP v.6 (MIPv6)                               | Παρέχει νέες δυνατότητες στο MIP, βελτιώνοντας την διαδικασία   |
| Mobile Stream control transmission protocol (mSCTP) | Εφαρμόζεται στο επίπεδο μεταφοράς και παρέχει διαφανείς και ομαλές συνθήκες περιαγωγής μεταξύ διαφορετικών δικτύων πρόσβασης                                    |
| Session Initiation Protocol (SIP)                   | Εφαρμόζεται στο επίπεδο εφαρμογής και επιτρέπει την χωρίς διακοπή αδιάλειπτη παροχή υπηρεσιών   |
| Multimodes Terminals / Smart Mobile Terminals (SMT) | Συσκευές που προχωρούν στην επιλογή ANS ελαχιστοποιώντας την χειροκίνητη επέμβαση του χρήστη  |
| Software Define Radios (SDR)                        | Στοιχεία λογισμικού στα δίκτυα και τις συσκευές των οποίων οι παράμετροι και οι τρόποι λειτουργίας αλλάζουν δυναμικά, καθώς μεταβάλλεται το δικτυακό περιβάλλον |
| Cognitive Radios (CR)                               | Υποστηρίζει διαδικασίες αυτοοργάνωσης, αυτό - μάθησης και αυτοπροσαρμογής.  |

### 2.5.3 Θέματα ενέργειας

Πέρα από τις “πράσινες” πολιτικές και την γενικότερη απαίτηση της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας που εδράζεται στις περιβαλλοντολογικές ευαισθησίες, το ζήτημα της ενέργειας εισέρχεται στο σχεδιασμό των συστημάτων και με έναν πολύ πιο άμεσο τρόπο:

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε οδηγηθεί στην σχεδίαση ενός μηχανισμού, έχουμε ενσωματώσει σε αυτό όλες τις απαιτήσεις που προαναφέρθηκαν και ακόμη έχουμε αντιμετωπίσει επιτυχώς θέματα ασυμβατότητας των τεχνολογιών. Εάν σε ένα τέτοιο, όπως φαίνεται για την ώρα επιτυχημένο, μηχανισμό η κινητή συσκευή του χρήστη έχει όλες τις διεπαφές τις ενεργοποιημένες και συνεχώς κάθε φορά που μεταβάλλεται το περιβάλλον επικοινωνεί με τους σταθμούς βάσης και τα σημεία πρόσβασης, τότε σε σύντομο χρονικό διάστημα, η συσκευή του χρήστη θα πάψει να λειτουργεί καθώς θα έχει καταναλωθεί όλη η αποθηκευμένη του ενέργεια! Ένα τέτοιο λοιπόν σύστημα όχι μόνο δεν θα είναι επιτυχημένο, αλλά ουσιαστικά άχρηστο για την πλειονότητα των χρηστών. Καταλαβαίνουμε, λοιπόν, ότι η κατανάλωση ενέργειας είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που οφείλουμε να λάβουμε υπόψη μας. Και αυτό για έναν περαιτέρω κρίσιμο λόγο: ως φανταστούμε ότι μία συγκεκριμένη υπηρεσία παρέχεται από ένα σύστημα με υψηλότερη ποιότητα αλλά και μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και από ένα άλλο με χαμηλότερη -αλλά αποδεκτή- ποιότητα και χαμηλή κατανάλωση. Σε μία τέτοια περίπτωση, υποθέτοντας ότι ο χρήστης είναι κινητός, το θέμα της διατήρησης της ενέργειας σε χαμηλούς ρυθμούς κατανάλωσης

αποκτά μέγιστη σημασία. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι τα θέματα ενέργειας υπεισέρχονται στο σχεδιασμό ενός αποδοτικού συστήματος με πολλούς τρόπους. Τόσο κατά τη διαδικασία ανίχνευσης του περιβάλλοντος, όσο και κατά την κύρια διαδικασία επιλογής του καταλληλότερου δικτύου.

Ο περιορισμός της κατανάλωσης ενέργειας αντιμετωπίζεται σε κάθε στάδιο του σχεδιασμού με διαφορετικό τρόπο. Έτσι, αρχικά γίνεται προσπάθεια από τους μηχανικούς για σχεδιασμό λιγότερο ενεργοβόρων κινητών συσκευών ενώ με νέες τεχνολογίες σύγχρονα υλικά επιχειρείται η αποδοτικότερη αποθήκευση ενέργειας στους συσσωρευτές (μπαταρίες) των συσκευών. Επίσης, από την πλευρά των τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης εισάγονται βελτιώσεις στα πρωτόκολλα δικτύωσης που στοχεύουν στην λιγότερη κατανάλωση ενέργειας<sup>55</sup>.

Ανεξάρτητα από τον βελτιωμένο τρόπο διαχείρισης της ενέργειας από πλευρά κατασκευών και πρωτοκόλλων, θα πρέπει να ενσωματώσουμε την απαίτηση για κατά το δυνατόν λιγότερο ενεργοβόρα συστήματα στο σχεδιασμό των φάσεων της μεταπομπής. Στην αρχική φάση της μεταπομπής μπορούμε να αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα εισάγοντας χρονικούς περιορισμούς: Έτσι, οι διεπαφές των συσκευών δεν θα είναι συνεχώς ενεργοποιημένες, αλλά θα ενεργοποιούνται ανά μία χρονική περίοδο και θα μένουν σε αυτήν την κατάσταση για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η χρονική αυτή περίοδος μπορεί να είναι σταθερή (fixed) ή να μεταβάλλεται ανάλογα με την κατάσταση του χρήστη (πχ όταν ο χρήστης κινείται με μεγάλη ταχύτητα η περίοδος θα μικραίνει, ενώ όταν παραμένει στάσιμος θα μεγιστοποιείται ο χρόνος που θα μεσολαβεί ανάμεσα στις ενεργοποιήσεις, αφού σε τέτοια περίπτωση δεν αναμένεται μεταβολή του δικτυακού του περιβάλλοντος σύντομα). Ο χρόνος για τον οποίο παραμένουν ενεργοποιημένες οι διεπαφές μπορεί και αυτός με τη σειρά του να είναι προκαθορισμένος και σταθερός είτε να μεταβάλλεται με τέτοιον, όμως, τρόπο ώστε από την μία πλευρά να μην καταναλώνεται μεγάλο ποσό ενέργειας, αλλά από την άλλη να μπορεί να επιτευχθεί ο σκοπός της αρχικής φάσης, δηλαδή της συλλογής των απαραίτητων πληροφοριών (πχ σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο και συχνές παρεμβολές ο χρόνος παραμονής στην κατάσταση ενεργοποίησης θα πρέπει να είναι υψηλότερος σε σχέση με τον χρόνο που θα ισχύει σε ένα περιβάλλον χωρίς θόρυβο και άνευ σημαντικών παρεμβολών).

Δεν πρέπει να μας διαφεύγει σε αυτές τις περιπτώσεις, όμως, το γεγονός ότι ο καθορισμός του χρόνου δεν μπορεί να αποβεί εις βάρος της ανίχνευσης του περιβάλλοντος. Είναι σημαντικό να περιορίζουμε την κατανάλωση ενέργειας, αλλά δεν πρέπει να ξεχνάμε τον στόχο μας, δηλαδή την εκμετάλλευση του καλύτερου από τα υπάρχοντα δίκτυα για δεδομένες επιθυμίες του χρήστη. Αυτό μας οδηγεί σε έναν ανταγωνισμό<sup>56</sup> μεταξύ του χρόνου και της ανίχνευσης όπου το βέλτιστο σημείο ισορροπίας είναι το ζητούμενο.

Στη φάση της απόφασης του καταλληλότερου δικτύου, στην λύση του προβλήματος ANS, μπορούμε να μειώσουμε την κατανάλωση ενέργειας εισάγοντας στον αλγόριθμο επιλογής ένα κριτήριο για την κατάσταση της μπαταρίας της συσκευής, ή ακόμη γενικότερα τον λόγο ποιότητας προς κατανάλωση ενέργειας για κάθε δίκτυο και κάθε διαφορετική υπηρεσία. Η δεύτερη επιλογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με την δεδομένη κατάσταση της

<sup>55</sup> βλ. ενδεικτικά A. Stamou, E. Stavrou "Energy Consumption Evaluation on the MAC layer of PRCSMA" master thesis in Science in Telecommunication Engineering & Management, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2008.

<sup>56</sup> C. Wen-Tsuen, L. Jen-Chu, H. Hsieh-Kuan, "An adaptive scheme for vertical handoffs in wireless overlay networks" in Proc. of the 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2004, pp. 111-112.

μπαταρίας του τερματικού και τις επιθυμίες του χρήστη, οδηγώντας κάθε δεδομένη περίοδο σε διαφορετική λύση. Στην τελευταία περίπτωση αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή στην συσκευή πινάκων με πληροφορίες κατανάλωσης ενέργειας κάθε

Πίνακας 3. Κατανάλωση ενέργειας

| Technology                     | Transmit mode (W) | Receive mode (mW) | Idle mode (mW) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| 3G: CDMA 1X wireless modem NIC | 2,8               | 495               | 82             |
| ORINOCO IEEE 802.11b NIC       | 1,3               | 900               | 740            |

τεχνολογίας πρόσβασης (όπως ο πίνακας που παρατίθεται παραπάνω - Πίνακας 3.), ή να συλλέγεται η πληροφορία αυτή από κάθε δίκτυο στην πρώτη φάση της μεταπομπής.

## 2.6 κριτήρια απόφασης & επιλογής

Διάφορα κριτήρια χρησιμοποιούνται ή προτείνονται<sup>57</sup> να χρησιμοποιηθούν τόσο ώστε να αποφασίσουμε εάν μία μεταπομπή είναι αναγκαία ή όχι, όσο και κατά την διαδικασία επιλογής του καταλληλότερου δικτύου μεταπήδησης. Όπως έχουμε αναφέρει παραπάνω<sup>58</sup> στις παραδοσιακές τεχνικές μόνο το RSS (και εν συνεχεία μέσω βελτιώσεων και κάποια άλλα χαρακτηριστικά του δικτύου πχ SNR) και η διαθεσιμότητα νέου κελιού / ραδιοσυχνότητας λαμβανόταν υπόψη. Στα δικτυακά περιβάλλοντα που μελετάμε στην παρούσα εργασία θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και άλλα δεδομένα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια σε ολόκληρη την διαδικασία του μηχανισμού μεταπομπής. Από την δική μας οπτική προτείνεται<sup>59</sup> μία συγκεκριμένη ομαδοποίηση των κριτηρίων, ώστε να είναι ευκολότερη η κατανόηση της σημασίας του καθενός και ο τρόπος που επιδρά κάθε κριτήριο στις διαδικασίες απόφασης και επιλογής. Έτσι, μπορούμε να διακρίνουμε τα κριτήρια που σχετίζονται με τις απαιτήσεις και τις επιθυμίες του χρήστη, δηλαδή το προφίλ του (*“user preferences”*), άλλα που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά, τις απαιτήσεις και τις δυνατότητες των υπηρεσιών και των εφαρμογών (*“service & application requirements”*), κάποια που αναφέρονται στις δυνατότητες των τερματικών (*“terminal capabilities”*). Επίσης, υπάρχουν κριτήρια που αφορούν την ποιότητα της ζεύξης καθώς και άλλα θέματα των δικτύων (*“network characteristics”*) ενώ κάποια άλλα χαρακτηριστικά μπορούν να ομαδοποιηθούν και να αναφέρονται εν συντομία ως πληροφορίες περιεχομένου (*“contextual information”*) καθώς έχουν σχέση με συγκεκριμένες πληροφορίες που κάθε φορά είναι διαφορετικές (πχ κατάσταση μπαταρίας τερματικής συσκευής). Παρακάτω αναφέρουμε εν συντομία κάποια από τα κριτήρια που ανήκουν σε καθεμία από τις ομάδες που περιγράψαμε. Είναι κατανοητό ότι κάποια από τα κριτήρια μπορούν να ανήκουν σε περισσότερες από μία ομάδες. Για παράδειγμα, τα ζητήματα ενέργειας σχετίζονται τόσο με τις πληροφορίες περιεχομένου (επίπεδο στάθμης μπαταρίας συσκευής), με τα χαρακτηριστικά του κάθε δικτύου (κατανάλωση ενέργειας σε κάθε δίκτυο), με τις εφαρμογές (απαιτήσεις ενέργειας κάθε εφαρμογής) αλλά και με τις εκάστοτε επιθυμίες - προφίλ του χρήστη (πχ “οικιακό”, “ταξίδι” κ.α.). Για τον λόγο αυτόν, στο παράρτημα (Παράρτημα II) παρατίθεται ένα διάγραμμα στο οποίο εμφανίζονται οι σχέσεις μεταξύ ομάδων και κάποιων γενικών κριτηρίων. Λαμβάνοντας υπόψη το

<sup>57</sup> βλέπε χαρακτηριστικά μεταξύ άλλων τα [7], [9], [10].

<sup>58</sup> βλέπε παραπάνω § 2.4.2

<sup>59</sup> βλ. [2]

γεγονός της αλληλοσυσχέτισης και της ποικιλομορφίας των κριτηρίων, τη δυναμική φύση τους, όπως επίσης και την ανάγκη διαχείρισης απρόβλεπτων καταστάσεων που πιθανόν να συμβούν, κατανοούμε και στο σημείο αυτό την εξαιρετικά υψηλού βαθμού πολυπλοκότητα της διαδικασίας μεταπομπής.

#### 2.6.1 Προφίλ χρήστη (user preferences)

Στην ομάδα αυτήν ανήκουν όλα εκείνα τα κριτήρια με τα οποία ο τελικός χρήστης χτίζει τα προφίλ του ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις επιθυμίες του. Ενδεικτικά μπορούμε να αναφέρουμε το κόστος, το απαιτούμενο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας και ασφάλειας κ.α. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι στους αλγορίθμους που χρησιμοποιούμε προτιμάται να λαμβάνουμε υπόψη τα κριτήρια το ένα σε σχέση με το άλλο, ώστε να εισέρχεται ο βαθμός σημαντικότητας του ενός σχετικά με τον βαθμό σημαντικότητας του άλλου κριτηρίου. Αυτό σημαίνει βέβαια ότι τα σχετιζόμενα μεταξύ τους κριτήρια έχουν κάποια “ανταγωνιστική” σχέση μεταξύ τους. Έτσι, για παράδειγμα, μπορούμε να πούμε ότι στο προφίλ του χρήστη έχει μεγαλύτερη σημασία να πούμε ότι δίδεται βαρύτητα στον λόγο κόστος προς επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας, παρά να λάβουμε ξεχωριστά υπόψη τα δύο κριτήρια αυτά<sup>60</sup>.

#### 2.6.2 Χαρακτηριστικά δικτύων (network characteristics)

Συγκαταλέγονται κριτήρια που αφορούν γενικά την ποιότητα ζεύξης, όπως η ισχύς λαμβανόμενου σήματος (RSS), ο ρυθμός λανθασμένων bits (BER), ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR), ο λόγος ισχύος του φέροντος προς την ισχύ των παρεμβολών (CIR), το διαθέσιμο εύρος ζώνης, η δεδομένη κίνηση (φόρτος) του καθενός δικτύου, η κατανάλωση ενέργειας για κάθε ένα από τα δίκτυα, η απώλεια πακέτων μέσα στα δίκτυα, τα κόστη πρόσβασης, παραμονής και χρησιμοποίησης των δικτύων (πολιτικές κοστολόγησης), παρεχόμενα επίπεδα ασφάλειας κ.α.

#### 2.6.3 Δυνατότητες τερματικών (terminal capabilities)

Οι υπηρεσίες που είναι δυνατόν να υποστηρίξει το τερματικό, η γενική κατανάλωση ενέργειας σε κάθε τύπο συσκευής, η δυνατότητα κάθε συσκευής να διαχειρίζεται προφίλ χρήστη είναι κριτήρια που ανήκουν στην ομάδα αυτήν και περιορίζουν κατά μεγάλο βαθμό το εύρος των υποψήφιων δικτύων. Για παράδειγμα, μία τελευταίας τεχνολογίας συσκευή έχει καλύτερες δυνατότητες από την αμέσως προηγούμενή της και είναι ικανή να υποστηρίξει υπηρεσίες με αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας σε σχέση με μία παλαιότερη συσκευή.

#### 2.6.4 Απαιτήσεις εφαρμογών και υπηρεσιών (application & service requirements)

Στα κριτήρια αυτής της ομάδας συγκαταλέγονται οι απαιτήσεις σε πόρους δικτύων και ενέργειας για κάθε συγκεκριμένη υπηρεσία και εφαρμογή, όπως επίσης και το κόστος της

<sup>60</sup> Στην συνέχεια της εργασίας (κεφάλαιο 3) θα δούμε έναν αποδοτικό τρόπο με τον οποίο μπορούμε να λαμβάνουμε υπόψη την σχέση των κριτηρίων μεταξύ τους.

καθεμιάς ξεχωριστά. Έτσι, μπορούμε να αναφέρουμε τον αναγκαίο ελάχιστο ρυθμό δεδομένων, το επίπεδο ασφάλειας που παρέχει κάθε υπηρεσία, την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή στην καθυστέρηση διάδοσης κ.α.

#### 2.6.5 Πληροφορίες περιεχομένου (contextual information)

Δυναμικά στοιχεία που συνεχώς μεταβάλλονται περιλαμβάνονται ως κριτήρια στην ομάδα αυτήν. Για παράδειγμα, η δεδομένη κατάσταση μπαταρίας του χρήστη, η ταχύτητα κίνησής του, η τοποθεσία που βρίσκεται και τα γεωμορφολογικά της χαρακτηριστικά κ.α.

#### 2.6.6 Χρησιμοποίηση κριτηρίων

Κλείνοντας την αναφορά αυτή, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ανάλογα με την φύση των κριτηρίων αλλά και τις πολιτικές του χρήστη χρησιμεύουν σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας μεταπομπής. Έτσι, ορισμένα από τα κριτήρια προτιμώνται να χρησιμοποιούνται στην αρχική φάση όπου ερευνάται η ανάγκη μεταπομπής και κάποια άλλα στο κύρια στάδιο του μηχανισμού, δηλαδή στην επιλογή του καταλληλότερου δικτύου. Για παράδειγμα, κριτήρια που σχετίζονται με την ποιότητα ζεύξης και τις πληροφορίες θέσης χρησιμοποιούνται κατά κόρον στο αρχικό στάδιο, ενώ κριτήρια που αναφέρονται στην ενέργεια, την τιμολογιακή πολιτική (κόστος) και τα επίπεδα ασφάλειας χρησιμεύουν κατά την φάση επίλυσης του ANS προβλήματος. Δεν πρέπει να παραβλέπουμε όμως το γεγονός ότι στην πλειονότητά τους τα κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά το δοκούν, ανάλογα με την οπτική και τον τρόπο υλοποίησης που καθένας προτείνει. Επίσης, ας θυμηθούμε ότι η σύγχρονη τάση είναι να χρησιμοποιείται η σχέση μεταξύ κριτηρίων (μέσω κλασμάτων που αντικατοπτρίζουν τους λόγους), ώστε να λαμβάνεται υπόψη η σημαντικότητα του ενός σε σχέση με το άλλο.



---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# μ ε θ ο δ ο λ ο γ ί ε ς

---

**Σ**το κεφάλαιο αυτό περιγράφονται μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την λύση του προβλήματος ANS. Ξεκινώντας από τις παραδοσιακές μεθόδους, περνάμε στις συναρτήσεις απόφασης και από εκεί σε τεχνικές MCDM. Έπειτα βλέπουμε τις τεχνικές των βελτιστοποιήσεων, ενώ περαιτέρω αναφέρονται δύο ακόμη μέθοδοι: η ασαφής λογική και οι τεχνικές πολιτικών (policies). Οι μεθοδολογίες παρουσιάζονται με τρόπο σαφή και περιεκτικό χωρίς όμως να υπάρχει μεγάλη εμβάθυνση σε αυτές. Στο σημείο αυτό οφείλουμε να διευκρινίσουμε ότι υπάρχουν στην βιβλιογραφία και άλλες τεχνικές που χρησιμοποιούνται, οι οποίες όμως δεν έχουν προταθεί παρά από πολύ περιορισμένο αριθμό ερευνητών και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, ούτε κρίνεται σκόπιμη, η αναφορά τους στο σημείο αυτό<sup>61</sup>. Εδώ δεν αναφέρονται συγκεκριμένα παραδείγματα υλοποίησης και αυτό διότι αμέσως στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε έναν μεγάλο αριθμό υλοποιημένων παραδειγμάτων. Εάν τυγχάνει ο αναγνώστης να γνωρίζει ήδη τις μεθοδολογίες αυτές, τότε η ανάγνωση του κεφαλαίου αυτού δεν είναι υποχρεωτική.

---

<sup>61</sup> Ουσιαστικά πρόκειται για μια επιπλέον μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν πιθανότητες, εκτιμήσεις αλλά και διαπραγματεύσεις μέσω πρακτόρων.

### 3.1 παραδοσιακή μέθοδος - μέθοδοι “μοναδικού κριτηρίου”

Στις παραδοσιακές μεθόδους ένα κριτήριο λαμβάνεται υπόψη στην διαδικασία μεταπομπής. Συνήθως αυτό είναι το RSS ή κάποια άλλα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην ποιότητα των δικτύων (πχ CIR, BER). Το μοναδικό κριτήριο χρησιμοποιείται τόσο στην αρχική φάση, όσο και στην φάση εκτέλεσης. Στις περιπτώσεις αυτές δεν υπάρχει το -κρίσιμο για εμάς- δεύτερο στάδιο: Όταν ένα μέγεθος, όπως το RSS, πέσει κάτω από αυτό που ορίζεται ως ανεκτό, τότε δίδεται κατευθείαν στο στάδιο της εκτέλεσης η απόφαση για μεταπομπή στο δίκτυο όπου το RSS θα βρίσκεται σε ικανοποιητικό επίπεδο. Οι μέθοδοι αυτοί αποτελούν την πλειοψηφία στις οριζόντιες μεταπομπές, στις μεταπομπές, δηλαδή, που γίνονται μεταξύ του ίδιου δικτύου. Υπάρχουν όμως στην βιβλιογραφία<sup>62</sup> προτάσεις που εφαρμόζουν βελτιώσεις των παραδοσιακών μεθόδων ακόμη και στις κάθετες μεταπομπές. Οι βελτιώσεις αυτές αφορούν κυρίως την λήψη άλλου -πέραν από το RSS- κριτηρίου<sup>63</sup> ή στην “ενίσχυση” του RSS με την εισαγωγή κατωφλιών<sup>64</sup> ή και υστερήσεων<sup>65</sup>. Επίσης, υπάρχουν υλοποιήσεις<sup>66</sup> όπου ένας αριθμός συναφών κριτηρίων ομαδοποιείται σε ένα γενικότερο κριτήριο και στη συνέχεια το κριτήριο αυτό συγκρίνεται με το επιθυμητό κατώφλι κάτω του οποίου εκτελείται μεταπομπή. Μπορούμε να ονομάσουμε τις παραδοσιακές μεθόδους ως μεθόδους “μοναδικού κριτηρίου” ή “κατωφλίου”, ώστε να συμπεριλαμβάνουν όλες τις περιπτώσεις που είτε χρησιμοποιείται ένα μοναδικό κριτήριο, είτε μία ομάδα κριτηρίων (όλων σχετικών μεταξύ τους).

Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των μεθοδολογιών “μοναδικού κριτηρίου” πηγάζει ακριβώς από το όνομά τους. Στις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται οι παραδοσιακές μέθοδοι, λαμβάνεται υπόψη μονόπλευρα μόνο ένα από τα ζητήματα που απασχολούν τις μεταπομπές στα σύγχρονα ετερογενή ασύρματα περιβάλλοντα. Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι δεν εισάγονται στην διαδικασία επιλογής, εάν υπάρχει τέτοια διαδικασία σε αυτού του είδους τους μηχανισμούς! Ο χρήστης, λοιπόν, δεν έχει να επιλέξει τίποτε, οι επιθυμίες του παραμερίζονται και ζητήματα ασφάλειας, ενέργειας και κόστους αγνοούνται. Απλά μόλις η ποιότητα (στις περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται πολλαπλά συναφή κριτήρια ως ένα συνολικό) της ζεύξης πέσει ή μόλις πχ το SNR μειωθεί τόσο ώστε να μην είναι επιτρεπτό αποφασίζεται όχι μόνο η ανάγκη για μεταπομπή, αλλά και η εκτέλεσή της σε ένα άλλο δίκτυο.

Από την άλλη, δεν πρέπει να παραλείπεται ως πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής η απλότητά της. Δεν υπεισέρχεται σε πολύπλοκα ζητήματα και παραμένει εύκολα υλοποιήσιμη. Το γεγονός της απλότητάς της σε συνδυασμό με την ήδη χρήση της σε συστήματα και τις βελτιώσεις που έχει δεχθεί<sup>67</sup> που αυξάνουν σαφώς την αποδοτικότητά της, δεν επιτρέπει τον αποκλεισμό της από τον σχεδιαστή ενός μηχανισμού μεταπομπής. Άλλωστε, ένας τέτοιος μηχανισμός οφείλει να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο πολύπλοκος. Αυτός είναι ο λόγος που στην δική μας υλοποίηση τον χρησιμοποιούμε, όχι ως κύρια μέθοδος, αλλά ως βοηθητική στο πρώτο στάδιο της μεταπομπής. Η

<sup>62</sup> Ενδεικτικά βλ. K. Yang, I. Gondal, B. Qiu, L. S. Dooley “Combined SINR Based Vertical Algorithm for Next Generation Heterogeneous Wireless Networks”, IEEE, in Proc. of Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2007, pp. 4483-4487.

<sup>63</sup> Βλ. [41]

<sup>64</sup> Gregory P. Pollioni, “Trends in Handover Design”, IEEE Communications Magazine, vol. 34, 1996, pp. 82-90.

<sup>65</sup> M. A. Latif, A. A. Khan, “Quality of Service during Vertical Handover in 3G/4G Wireless Networks”, master thesis in Science in Electrical Engineering with Emphasis on Telecommunications, Blekinge Institute of Technology, 2009.

<sup>66</sup> Βλ. [14]

<sup>67</sup> Ενδεικτικά βλ. P. Marichamy, S. Chakrabati and S. L. Maskara, “Overview of handoff schemes in cellular mobile networks and their comparative performance evaluation”, IEEE, VTC’99, vol. 3, 1999, pp. 1486-1490.

ιδέα μας να τον χρησιμοποιήσουμε στο στάδιο της απόφασης για μεταπομπή οφείλεται ακριβώς στην ανάγκη το στάδιο αυτό να είναι όσο το δυνατόν λιγότερο πολύπλοκο και χρονοβόρο. Οι λεπτομέρειες για τον τρόπο χρήσης της μεθόδου αυτής στην δική μας πρόταση, θα συζητηθούν στο αντίστοιχο κεφάλαιο.

### 3.2 συναρτήσεις απόφασης - score decision functions

Οι μεθοδολογίες αυτές βασίζονται στην χρησιμοποίηση πολλών και διαφορετικής ομάδας κριτηρίων. Με βάση τα κριτήρια καταστρώνονται παραμετρικές σχέσεις, όπως κόστους, ποιότητας υπηρεσίας (QoS), χρησιμότητας κ.α. Η βέλτιστη λύση είναι αυτή που μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί την συνάρτηση που έχει κατασκευαστεί, με τις ανωτέρω σχέσεις, ανάλογα με τη φύση της. Έτσι, σε συνάρτηση αποκλειστικά με παραμέτρους κόστους απαιτείται η ελαχιστοποίησή της, ενώ σε συνάρτηση με παραμέτρους QoS η μεγιστοποίησή της. Από την δική μας πλευρά ονομάζουμε τις μεθοδολογίες αυτές ως “συναρτήσεις απόφασης βασισμένες στο αποτέλεσμα” (“score decision functions”), θέλοντας να καταδείξουμε το γεγονός ότι η μέθοδος είναι η ίδια είτε μας ενδιαφέρει το μέγιστο αποτέλεσμα είτε το ελάχιστο. Το αποτέλεσμα δηλαδή δεν εδράζεται στην διαφορετική μεθοδολογία, αλλά στην κατάστρωση της συνάρτησης, στην επιλογή των κριτηρίων και την κατασκευή των παραμετρικών σχέσεων.

Μία σημαντική καινοτομία της μεθοδολογίας αυτής είναι ότι για κάθε ένα κριτήριο ή σύνολο συναφούς κριτηρίων χρησιμοποιούνται δείκτες που απεικονίζουν την σημαντικότητά τους, τα λεγόμενα βάρη (weights). Κάθε κριτήριο διαθέτει έναν πολλαπλασιαστικό αριθμό (βάρος) για κάθε διαθέσιμο δίκτυο. Το άθροισμα των βαρών που χρησιμοποιούνται για κάθε κριτήριο σε καθένα από τα υποψήφια για επιλογή δίκτυα ισούνται πάντα με την μονάδα. Έτσι επιτυγχάνεται η απαραίτητη ισότιμη -ανάλογη δηλαδή με την σημαντικότητά τους- συμμετοχή στην συνάρτηση. Η εισαγωγή των βαρών αντικατοπτρίζει ένα είδος σχετικότητας μεταξύ των κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη, κάτι το οποίο είναι απόλυτα θεμιτό σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, όπως αυτά που μελετούμε.

Η γενική μορφή της μεθοδολογίας έχει ως εξής: Έστω έχουμε  $n$  υποψήφια δίκτυα, τότε η συνάρτηση τίθεται ως<sup>68</sup>:

$$f^n = \sum_s \sum_i w_{s,i} \cdot p_{s,i}^n$$

όπου  $s$  είναι η κάθε υπηρεσία,  $p_{s,i}^n$  η παραμετροποιημένη σχέση για το  $i$  κριτήριο σε σχέση με την κάθε  $s$  υπηρεσία στο  $n$  δίκτυο. Η ποσότητα  $w_{s,i}$  είναι το βάρος (η σημαντικότητα) υποθέτοντας ότι χρησιμοποιούμε το  $i$  κριτήριο για την  $s$  υπηρεσία. Θα πρέπει φυσικά  $\sum_i w_s = 1$ .

Οι μεθοδολογίες αυτές μας προσφέρουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές. Κατ' αρχήν στις περιπτώσεις των συναρτήσεων χρησιμοποιούνται περισσότερα του ενός κριτήρια. Αυτό σημαίνει ότι λαμβάνονται ευρύτερες παράμετροι υπόψη πέρα από την

<sup>68</sup> βλ. [9]

ποιότητας της ζεύξης. Το σημαντικότερο, όμως, πλεονέκτημα είναι το γεγονός ότι στην μεθοδολογία αυτή συσχετίζεται η σημαντικότητα των κριτηρίων. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιώντας -όπως είπαμε παραπάνω- βάρη εισέρχεται μία είδους σύγκριση μεταξύ των κριτηρίων, οπότε ιεραρχούνται ανάλογα το πόσο σημαντικά είναι ανά υπηρεσία και ανά δίκτυο. Η χρήση βαρών είναι πολύ κρίσιμη για τις διαδικασίες όπου πρέπει να ληφθεί μία απόφαση επιλογής και αυτό διότι ανάλογα με το βάρος, την σημασία που έχει για κάθε έναν κινητό χρήστη το κάθε κριτήριο, δύναται να οδηγούμαστε σε διαφορετικά αποτελέσματα απόφασης και επιλογής. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι αν και εισάγεται μία πολύ σημαντική και κρίσιμη καινοτομία (αυτήν των βαρών), εν τούτοις, αυτό δεν έχει μεγάλη επίδραση στην πολυπλοκότητα της μεθοδολογίας σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθοδολογίες, γεγονός πολύ επιθυμητό.

Οι μέθοδοι αυτές εμπεριέχουν, όμως, και μειονεκτήματα. Το σημαντικότερο από όλα ανακύπτει από την σχεδίαση των παραμετρικών σχέσεων. Η κατάστρωση των σχέσεων αυτών οφείλει να γίνεται από μηχανικούς που πλήρως αντιλαμβάνονται το πρόβλημα και έχουν ευρεία εποπτική εικόνα τόσο των απαιτήσεων του χρήστη όσο και της κατάστασης του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο ο τελευταίος θα κινείται. Η διαδικασία αυτή, ακριβώς λόγω της εμπειρικής φύσης της, ενέχει την μεγαλύτερη δυσκολία στην κατασκευή της. Μία μόνο αστοχία, όσο καλά δομημένος και να είναι ο αλγόριθμος μπορεί να οδηγήσει σε εντελώς μη επιθυμητά αποτελέσματα. Πέρα από την βασική αυτή αδυναμία, οι συναρτήσεις απόφασης βασισμένες στο αποτέλεσμα, είναι περισσότερο πολύπλοκες από τις παραδοσιακές μεθόδους, αν και συγκρινόμενες με αυτές, η πολυπλοκότητά τους είναι σχετικά μικρή αναλογιζόμενοι τα καινοτόμα στοιχεία που εισάγουν στην προσπάθεια επίλυσης του ANS προβλήματος.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστούν δύο θέματα που ίσως δεν έγιναν πλήρως αντιληπτά από τον αναγνώστη (σχετικός και ο Πίνακας 4.). Το ένα σχετίζεται με τον ακριβή καθορισμό των βαρών και το δεύτερο με τα δεδομένα που εισέρχονται στις παραμετρικές σχέσεις. Ξεκινώντας από το δεύτερο και υποθέτοντας ότι οι παραμετρικές σχέσεις αναφέρονται

Πίνακας 4.  
κρίσιμα ζητήματα  
σχεδιασμού

|                      | fixed value    | dynamic value                  |
|----------------------|----------------|--------------------------------|
| παραμετρικές σχέσεις | αυτόματα       | διαδικασία άντλησης            |
| συμμετοχή χρήστη     | μόνο στην αρχή | πιθανότητα συνεχούς καθορισμού |

στην κατανάλωση της ενέργειας και στο κόστος των υπηρεσιών, αντιλαμβανόμαστε ότι μπορούν να λαμβάνουν τα δεδομένα τους (mW/h και €/min) από προκαθορισμένους πίνακες. Οι πίνακες με τέτοιες σταθερές τιμές μπορεί είτε να βρίσκονται ήδη αποθηκευμένες στον τερματικό του χρήστη, είτε αυτού του

είδους η πληροφορία να εκπέμπεται από τα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης. Με τέτοιας φύσης παραμετρικές σχέσεις η απόφαση επιλογής χάνει το δυναμικό της χαρακτήρα και αποκτά έναν περισσότερο τετριμμένο χαρακτήρα. Αν όμως οι παραμετρικές σχέσεις χρειάζονται διαρκώς μεταβαλλόμενες πληροφορίες, όπως στις περιπτώσεις ποιότητας της ζεύξης, της ταχύτητας του χρήστη κ.α. ο μηχανισμός πρέπει απαραίτητα να τις συλλέξει από τις οντότητες δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση εισέρχεται το ζήτημα της πολυπλοκότητας (οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν πολιτικές, όπως θα δούμε παρακάτω, μπορούν να βοηθήσουν εδώ, στην κατεύθυνση μείωσης της πολυπλοκότητας). Το άλλο θέμα που ανακύπτει από την προσεκτική

μελέτη των μεθοδολογιών αυτών είναι το ζήτημα του ποσοτικού καθορισμού των βαρών. Με ποιόν τρόπο θα ορίσουμε, δηλαδή, ποιο κριτήριο είναι σημαντικότερο και σε ποιο βαθμό. Στην περίπτωση που έχουμε προκαθορισμένες πληροφορίες (fixed) αυτό μπορεί να γίνει χειροκίνητα από τον χρήστη μία μόνο φορά στην αρχικοποίηση της συσκευής του. Όταν, όμως, αλλάξει δυναμικά το περιβάλλον και οι πληροφορίες που απαιτούνται δεν είναι εκ των προτέρων σίγουρα καθορισμένες, αλλά μεταβάλλονται δυναμικά με τον χρόνο, τότε ανακύπτει το πρόβλημα της ιεράρχησης των κριτηρίων μέσω χρήσης των βαρών. Επειδή δεν είναι δυνατόν να αναμιγνύεται με ενεργό χειροκίνητο τρόπο ο χρήστης κάθε φορά που μεταβάλλονται σε τέτοιο βαθμό οι πληροφορίες ώστε να απαιτείται επαναπροσδιορισμός τους, αυτό αντιμετωπίζεται με την δημιουργία προφίλ σε συνδυασμό με την ύπαρξη πολιτικών.

Η πρώτη βιβλιογραφική αναφορά της μεθόδου των συναρτήσεων σε υλοποίηση μεταπομπής ήταν το 1999<sup>69</sup>. Από τότε πολλές υλοποιήσεις έχουν σχεδιαστεί, καθώς η συγκεκριμένη μεθοδολογία πληροί τις κρίσιμες απαιτήσεις απλότητας και ευρύτητας κάλυψης, και είναι αρκετά δημοφιλής. Κάποιοι<sup>70</sup> προτείνουν συναρτήσεις χρησιμότητας (utility functions) προσπαθώντας να μεγιστοποιηθεί η υπεραξία του καταναλωτή (consumer surplus), σε άλλες εργασίες καταστρώνονται συναρτήσεις κόστους<sup>71</sup>, ποιότητας υπηρεσίας<sup>72</sup>, βαθμού ωφέλειας (awareness functions)<sup>73</sup> κ.α. Θεωρούμε την μέθοδο αυτήν σημαντική για την απλότητάς της και την δυνατότητα ιεράρχησης των κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη. Όμως, δεν πρέπει να μας διαφεύγει το γεγονός του κινδύνου της αστοχίας στο στάδιο κατάστρωσης των παραμετρικών σχέσεων, όπως επίσης και των προβλημάτων όπου ανακλύπουν δυναμικές και απρόβλεπτες καταστάσεις στο περιβάλλον κίνησης του χρήστη.

### 3.3 Multiple Criteria Decision Making (MCDM)

Η μεθοδολογία MCDM αποτελεί μία νέα σχετικά πρόταση επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων και προέρχεται από το γνωστικό πεδίο της Επιχειρησιακής Έρευνας. Ασχολούμαστε στην παρούσα εργασία εκτενέστερα από τις άλλες μεθοδολογίες, καθώς αυτή αποτελεί την συντριπτική πλειοψηφία των προτάσεων λύσεων στην σχετική με το θέμα μας βιβλιογραφία. Έτσι, αφού δούμε κάποια βασικά εισαγωγικά χαρακτηριστικά της και συζητήσουμε ορισμένα κρίσιμα ζητήματα, αναλύουμε τεχνικές υλοποίησης της MCDM, ενώ τέλος σημειώνουμε τις σύγχρονες τάσεις σε αυτό το ερευνητικό πεδίο.

<sup>69</sup> H. J. Wang, R. H. Katz, J. Giese, "Policy - Enabled Handoffs Across Heterogeneous Wireless Networks", in WMCSA, New Orleans, LA, USA, 1999

<sup>70</sup> ενδεικτικά βλ. O. Ormond, P. Perry, J. Murphy, "Network Selection Decision in Wireless Heterogeneous Networks" in Proc. of IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2005.

<sup>71</sup> ενδεικτικά βλ. F. Zhu, J. McNair "Multiservice Vertical Handoff Decision Algorithms", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2006, pp. 1-13.

<sup>72</sup> ενδεικτικά βλ. [6]

<sup>73</sup> S. Zhang, W. Zhou, F. Ma, J. Song, "Novel Network/Terminal Cooperative Selection Mechanism for Modern Service Industry", on 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009, pp. 1-5.

### 3.3.1 Εισαγωγή στην MCDM

Η πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων (Multiple Criteria Decision Making - MCDM<sup>74</sup>) αναφέρεται σε διαδικασίες όπου λαμβάνονται αποφάσεις λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια, συνήθως ανταγωνιστικά μεταξύ τους. Για παράδειγμα, στην προσωπική μας ζωή η αγορά ενός αυτοκινήτου υπεισέρχονται κριτήρια όπως τιμή, κυβισμός, ασφάλεια, άνεση κ.α. Η μεθοδολογία του MCDM προέρχεται από το γνωστικό πεδίο της Επιχειρησιακής Έρευνας. Στην πολυκριτηριακή μεθοδολογία μπορούμε να διαχωρίσουμε δύο μεγάλες κατηγορίες προβλημάτων<sup>75</sup>. Από την μία είναι ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων, ανταγωνιστικών η μία με την άλλη που δε μπορούν να επιτευχθούν όλες ταυτόχρονα (MODM - Multiple Objective Decision Making) και από την άλλη προβλήματα επιλογής εναλλακτικής λύσης από ένα σύνολο εναλλακτικών προτάσεων οι οποίες προσδιορίζονται από τις παραμέτρους τους, τα κριτήρια ή τις ιδιότητές τους (MADM - Multiple Attribute Decision Making). Καταλαβαίνουμε, λοιπόν, ότι οι τεχνικές MODM απευθύνονται σε προβλήματα βελτιστοποίησης<sup>76</sup> καθώς προσπαθούμε να βρούμε το σημείο στο οποίο θα έχουμε μία λύση η οποία θα ανταποκρίνεται βέλτιστα στο σύνολο των υπάρχουσων. Από την άλλη οι τεχνικές MADM δεν διαθέτουν από την αρχή ένα σύνολο λύσεων, αλλά προσπαθούν με την βοήθεια των εναλλακτικών προτάσεων και των κριτηρίων να κατασκευάσουν ένα μοντέλο από το οποίο θα επιλεγεί η καταλληλότερη από τις επιτρεπτές λύσεις<sup>77</sup>. Με άλλα λόγια στα προβλήματα που σχετίζονται με την επιλογή, οι εναλλακτικές είναι δεδομένες και ο αριθμός τους, συνήθως, πεπερασμένος. Αντίθετα, στα προβλήματα τα σχετικά με την βελτιστοποίηση μιας λύσης, το εύρος στο οποίο την αναζητούμε είναι συνήθως άπειρο, (φραγμένο ανάμεσα σε περιορισμούς, αλλά σε συνεχή διάστημα)<sup>78</sup>. Οπτικά η διαφορά φαίνεται στο σχήμα που παρατίθεται στο Παράρτημα XX, στο τέλος της εργασίας. Κατανοούμε, έτσι, ότι το πρόβλημα του ANS μπορεί να χαρακτηριστεί ως MADM, καθώς δεν έχουμε έτοιμες λύσεις που ανταγωνίζεται η μία την άλλη, όπως στις περιπτώσεις των MODM τεχνικών. Εδώ αντιμετωπίζουμε πολλαπλά κριτήρια που οδηγούν σε πολλές εναλλακτικές, μία εκ των οποίων καλούμαστε να επιλέξουμε. Το ορθότερο θα ήταν, λοιπόν, να αποκαλούμε την μεθοδολογία των περιπτώσεων αυτών ως MCDM/MADM. Εν τούτοις, θα ακολουθήσουμε το σύνολο σχεδόν της βιβλιογραφίας που παραλείπει το MADM και αναφέρεται με τον γενικό όρο στις υλοποιήσεις που ανήκουν εδώ.

### 3.3.2 Κρίσιμα ζητήματα

Η MCDM μεθοδολογία έχει χρησιμοποιηθεί σε πάρα πολλούς τομείς της οικονομικής, τεχνολογικής, επιχειρηματικής αλλά και προσωπικής ζωής. Αν και τα προβλήματα που επιλύονται με την χρήση της ποικίλλουν και διαφέρουν κατά πολύ μεταξύ τους, υπάρχουν κάποια κρίσιμα θέματα που απαντώνται σε κάθε υλοποίηση. Τα θέματα αυτά εδράζονται κυρίως<sup>79</sup> στα κριτήρια

<sup>74</sup> M. ZELENY, "Multiple Criteria Decision Making", McGraw - Hill, 1982.

<sup>75</sup> J. Malczewski "GIS and Multicriteria Decision Analysis", John Wiley and Sons, 1999.

<sup>76</sup> K.S. Babu, N.V. S. Raju, M. S. Reddy, D.N. Rao "The Material Selection for typical wind turbine blades using a MADM approach & analysis of blades", in Proc of MCDM2006, Chania, Greece, 2006.

<sup>77</sup> X. Cio, "Delta Utility Models in Decision - based Design", a dissertation pres. to the Faculty of The Graduate College of the Univ. of Nebraska, Lincoln, Nebraska, 2006.

<sup>78</sup> L. Xu, J.B. Yang, "Introduction to Multi-Criteria Decision Making and the Evidential Reasoning Approach", working paper 0106, Manchester School of Management, Univ. of Manchester, Institute of Science and Technology, 2001.

<sup>79</sup> βλ. [52]

και τις ιδιότητές τους. Η κατανόηση των ζητημάτων που αμέσως παρακάτω σημειώνονται κρίνεται απολύτως αναγκαία και σημαντική, ώστε να μπορέσουμε να αναζητήσουμε στην δική μας υλοποίηση τρόπους αντιμετώπισής τους.

Αρχικά, τα κριτήρια (αλλιώς οι ιδιότητες) που χρησιμοποιούνται είναι πολλά σε αριθμό. Αυτό, από μόνο του οδηγεί σε μία γραμμική πολυπλοκότητα. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, όμως, τα κριτήρια αυτά σχετίζονται μεταξύ τους. Επιπλέον, κάποια από τα κριτήρια μπορεί να διαχωρίζονται περαιτέρω σε περισσότερες υποκατηγορίες (πχ στην δική μας περίπτωση, όπου η ποιότητα ζεύξης μπορεί να διαχωριστεί στο BER, SNR, RSS κ.τ.λ.). Καταλαβαίνουμε, λοιπόν, ότι η πολυπλοκότητα αυξάνει γεωμετρικά αν συνυπολογίσουμε τόσο το γεγονός της αλληλεξάρτησης των κριτηρίων, όσο και την πιθανότητα ιεραρχικής δομής τους (κατηγορίες, υποκατηγορίες). Η αλληλεξάρτηση, η σχέση, δηλαδή όπως προαναφέρθηκε, μεταξύ κριτηρίων συνήθως δεν είναι προσθετική, αλλά ανταγωνιστική. Για παράδειγμα, στο πρόβλημα της αγοράς του αυτοκινήτου, η τιμή ως κριτήριο είναι ανταγωνιστική συνήθως ως προς την άνεση που αυτό προσφέρει.

Επιπλέον, τα κριτήρια διαφέρουν στις μονάδες μέτρησης (πχ η κατανάλωση ενέργειας μετριέται σε mW ενώ το κόστος σε €). Επίσης, τις περισσότερες φορές, διαφέρουν και στην φύση τους, αφού κάποια μπορεί να μετριοούνται αντικειμενικά, δηλαδή ποσοτικά (πχ το BER), ενώ κάποια άλλα μόνο υποκειμενικά (πχ υψηλό, μέτριο, χαμηλό, ανύπαρκτο προσφερόμενο επίπεδο ασφάλειας). Ακόμη, οι τιμές των κριτηρίων μπορεί να προβλέπονται (πχ η τιμή ενός αυτοκινήτου) ή να μην μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια (πχ στην κατανάλωση καυσίμου εισέρχεται η ιδιότητα της τιμής του καυσίμου η οποία μεταβάλλεται δυναμικά, τοπικά και χρονικά). Επομένως, κατανοούμε ότι δεν υπάρχει μία συγκεκριμένη οπτική αναφορικά με τον τρόπο χειρισμού των κριτηρίων, καθόσον η υβριδική τους συνολική εικόνα καθιστά την αντιμετώπιση κάθε προβλήματος με διαφορετικό τρόπο.

Οι τεχνικές MCDM εμπεριέχουν την έννοια της επιφύλαξης. Αυτό πηγάζει από το γεγονός ότι δεν μπορούμε να είμαστε πάντα εντελώς σίγουροι όταν καταστρώνουμε σχέσεις που εμπεριέχουν υποκειμενικές κρίσεις και επιθυμίες. Επιπρόσθετα η επιφύλαξη εδράζεται επίσης στο γεγονός ότι πολλές από τις ιδιότητες που χρησιμοποιούμε πιθανόν να μην είναι εξ ολοκλήρου διαθέσιμες είτε ακόμη και να μην διατίθενται καθόλου. Δεν πρέπει επίσης να μας διαφεύγει η τεράστια κλίμακα και το μεγάλο βάθος της μεθοδολογίας αυτής. Για παράδειγμα, ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός που ασχολείται με την ποιότητα της διαχείρισης (European Foundation for Quality Management - EFQM) έχει εκδώσει μοντέλα MCDM με τρία επίπεδα κριτηρίων. Το πρώτο επίπεδο αποτελείται από εννέα κριτήρια, το δεύτερο από τριάντα δύο και το τρίτο από εκατόν εβδομήντα τέσσερα. Υπάρχουν, όμως, και μοντέλα που εμπεριέχουν δέκα επίπεδα και περισσότερα από εννιακόσια κριτήρια. Τέλος, ας σημειώσουμε ότι όλα τα κριτήρια, άσχετα από την φύση, την βεβαιότητα και την αντικειμενικότητά τους, μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο είδη. Τα κριτήρια που επιθυμούμε να μεγιστοποιηθούν και ανήκουν την κατηγορία της ωφέλειας (*“profit criteria”*) και αυτά που επιθυμούμε να ελαχιστοποιηθούν και ανήκουν στην κατηγορία του κόστους (*“cost criteria”*).

Τα ανωτέρω κρίσιμα ζητήματα εμπεριέχονται στην καρδιά των προβλημάτων που αντιμετωπίζει η MCDM μεθοδολογία. Η πιθανή έλλειψη πληροφορίας, οι διαφορετικές υποκειμενικές επιθυμίες που επηρεάζουν τις διαφορετικές σχέσεις μεταξύ κριτηρίων, η

ανταγωνιστική φύση των τελευταίων και η τεράστια κλίμακά τους, μας οδηγούν στο συμπέρασμα της τεράστιας πολυπλοκότητας της μεθοδολογίας.

### 3.3.3 Τεχνικές MCDM

Αν και η MCDM μεθοδολογία μετράει μόλις σαράντα περίπου χρόνια ζωής έχει αναπτυχθεί ραγδαία. Σε αυτό βοήθησε και η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, καθιστώντας με την υπολογιστική τους ισχύ, πιο εύκολο το χειρισμό και την λύση εξαιρετικά πολύπλοκων προβλημάτων. Στην καρδιά των προβλημάτων αυτών υπάρχουν τα κριτήρια με τα οποία καλούμαστε να λάβουμε μία απόφαση. Τα κριτήρια αυτά συνήθως ανήκουν σε δύο μεγάλες διακριτές κατηγορίες: τα κριτήρια ωφέλειας και τα κριτήρια κόστους. Η ιδεατή λύση σε ένα πρόβλημα MCDM θα έπρεπε να λαμβάνει το μέγιστο δυνατό όφελος από την πρώτη κατηγορία, ενώ ταυτόχρονα να ελαχιστοποιούσε την ζημία των κριτηρίων που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία<sup>80</sup>. Η ερώτηση που ανακύπτει είναι αν είναι δυνατό και πως μπορεί να επιτευχθεί. Οι πιθανές απαντήσεις στην ερώτηση αυτή, οδήγησαν στην κατάστρωση πολλών μεθόδων, τεχνικών και αλγορίθμων MCDM<sup>81</sup>. Γενικά, μπορούμε, όμως να παρατηρήσουμε ότι οι μέθοδοι MCDM είναι πολυπληθείς και στο ερευνητικό πεδίο συνεχώς προτείνονται νέες βελτιωμένες τεχνικές<sup>82</sup>.

Τρεις από τις δημοφιλέστερες θα δούμε εν τάχει στη συνέχεια. Η επιλογή τους έγινε με βάση την χρησιμοποίησή τους στην σχετική με το θέμα μας βιβλιογραφία. Αν και οι τεχνικές αυτές δεν αναλύονται διεξοδικά στην παρούσα εργασία, εν τούτοις, ο αναγνώστης μπορεί να αρκεστεί στο πίνακα που παραθέτουμε παρακάτω (Πίνακας 5.) και να συνεχίσει την ανάγνωση στην επόμενη παράγραφο του κεφαλαίου αυτού, χωρίς την περαιτέρω μελέτη των λεπτομερειών των τεχνικών.

Πίνακας 5.  
δημοφιλείς τεχνικές MCDM

|   |  |
|---|--|
| <b>SAW</b><br>(Simple Additive Weighting)   | Ο συνολικός βαθμός (score) κάθε εναλλακτικής επιλογής προκύπτει από το άθροισμα όλων των κανονικοποιημένων με βάρη τιμών των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται.                               |
| <b>TOPSIS</b><br>(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) | Το δίκτυο που επιλέγεται ως το καταλληλότερο είναι αυτό που βρίσκεται πιο κοντά στην ιδεατή λύση και πιο μακριά από την χειρίστη λύση.   |
| <b>AHP/GRA</b><br>(Analytic Hierarchy Process)/ (Grey Relation Analysis)          | Το πρόβλημα αποσυντίθεται σε υπό - προβλήματα και υπολογίζονται οι τιμές των βαρών για καθένα από αυτά (AHP). Τα δίκτυα κατατάσσονται και επιλέγεται αυτό με την υψηλότερη κατάταξη (GRA). |

<sup>80</sup> E. Triantaphyllou, "Multi criteria decision making method: a comparative study", Kluwer academic publishers, Applied optimization series, vol. 44, 2002.

<sup>81</sup> C. L. Hwang, K. Yoon, "Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications", Springer - Verlag, 1981.

<sup>82</sup> Παρακάτω στο ίδιο κεφάλαιο παρατίθεται μία σύντομη αναφορά στις νέες αυτές προτινόμενες μεθόδους MCDM



### 3.3.3.1 Simple Additive Weighting (SAW)

Η μέθοδος αυτή είναι η παλαιότερη, η πλέον γνωστή και η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος από όλες τις τεχνικές MCDM<sup>83</sup>. Το σύνολο  $S_j$  των κανονικοποιημένων τιμών (μέσω βαρών) όλων των κριτηρίων για την  $j$  εναλλακτική λύση δίδεται από την σχέση:

$$S_j = \sum_{i=1}^m \omega_i \tilde{r}_{ij}.$$

όπου  $\omega_i$  είναι το βάρος του  $i$  κριτηρίου,  $r_{ij}$  η κανονικοποιημένη τιμή του  $i$  κριτηρίου για την  $j$  εναλλακτική λύση,  $i = 1, \dots, m$  και  $j = 1, \dots, n$  με  $m$  το πλήθος των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται και  $n$  ο αριθμός των εναλλακτικών λύσεων που συγκρίνονται. Η μεγαλύτερη τιμή του  $S_j$  αντιστοιχεί στην βέλτιστη εναλλακτική λύση.

Η μέθοδος SAW όπως προκύπτει και από την ανωτέρω σχέση χρησιμοποιείται όταν όλα τα κριτήρια μεγιστοποιούνται. Όταν, δηλαδή, η βέλτιστη εναλλακτική λύση είναι αυτή που μας οδηγεί σε αύξηση των τιμών των κριτηρίων. Αυτό το μειονέκτημα της μεθόδου παρακάμπτεται με την εισαγωγή διάφορων μαθηματικών σχέσεων<sup>84</sup>, όπως η:

$$\bar{r}_{ij} = \frac{r_{ij}^*}{\max_j r_{ij}^*},$$

όπου  $\max_j r_{ij}^*$ , είναι η μέγιστη τιμή του  $i$  κριτηρίου όλων των  $j$  εναλλακτικών λύσεων. Η σχέση αυτή είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη στην πράξη.

Σε πολλές περιπτώσεις<sup>85</sup> χρησιμοποιείται επιπλέον η κανονικοποίηση ή ο μετασχηματισμός των αρχικών δεδομένων, με τέτοιο τρόπο ώστε η μέγιστη τιμή κάθε κριτηρίου να ισοδυναμεί με την μονάδα. Τέλος, ένας ακόμη περιορισμός της τεχνικής αυτής αποτελεί η απαίτηση ότι όλα τα κριτήρια λαμβάνουν αποκλειστικά θετικές τιμές. Έτσι, σε προβλήματα όπου έχουμε αρχικά αρνητικές τιμές κριτηρίων, αυτές μετασχηματίζονται σε θετικές χρησιμοποιώντας διάφορους μαθηματικούς τύπους μετασχηματισμών, όπως ο παρακάτω<sup>86</sup>:

$$\bar{r}_{ij} = r_{ij} + \left| \min_j r_{ij} \right| + 1$$

### 3.3.3.2 Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε μόλις το 1981<sup>87</sup>. Στην μέθοδο αυτήν επιλέγεται η εναλλακτική λύση που είναι πιο κοντά στην ιδεατή και πιο μακριά από την χειρότερη. Αρχικά,

<sup>83</sup> MT. Chu, J. Shyu, GH. Tzeng, R. Khosla "Comparison among three analytical methods for knowledge communities group - decision analysis", Expert systems with applications, vol. 33 (4), 2007. pp. 1011-1024

<sup>84</sup> Ενδεικτικά: V. Podvezko, "The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS", Engineering Economics, vol 22 (2), 2011. pp. 134-146

<sup>85</sup> Για παράδειγμα βλ. [53] και [55] όπου υπάρχει κετενή βιβλιογραφική αναφορά για την αντιμετώπιση παρόμοιων περιπτώσεων.

<sup>86</sup> R. Ginevicius, V. Podvezko, "Some problems of evaluating multicriteria decision methods", International Journal of Management and Decision Making, vol. 8 (5/6), 2007. pp. 527-539

<sup>87</sup> βλ. [53].

κατασκευάζουμε τον κανονικοποιημένο πίνακα απόφασης  $R$ . Ένας τρόπος για να το πετύχουμε αυτό<sup>88</sup> είναι να υπολογίσουμε για κάθε κριτήριο που λαμβάνουμε υπόψη, την τιμή του διαιρούμενη με το σύνολο των κανονικοποιημένων τιμών<sup>89</sup>. Έτσι, το στοιχείο  $r_{ij}$  του ζητούμενου πίνακα  $R$ , θα είναι:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

όπου  $x_{ij}$ , είναι η κανονικοποιημένη τιμή μετρούμενη για το  $j$  κριτήριο της  $i$  εναλλακτικής λύσης. Αυτό μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε τιμές με την ίδια μονάδα μέτρησης της “απόστασης”, ώστε να μπορούμε να τις διαχειριστούμε με ισοτιμία.

Στη συνέχεια απαιτείται η εισαγωγή βαρών στις τιμές του πίνακα  $R$ . Με την βοήθεια ενός συνόλου βαρών  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  ο νέος πίνακας  $V$  που προκύπτει είναι:

$$V = RW = \begin{pmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ \cdot & & & \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{pmatrix}$$

όπου  $m$  είναι ο αριθμός των εναλλακτικών και  $n$  ο αριθμός των κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη.

Θα πρέπει βεβαίως να υπολογίσουμε την βέλτιστη και την χειρίστη ιδεατή λύση. Αν την βέλτιστη ιδεατή την συμβολίζουμε με  $A^+$  και την χειρίστη ιδεατή με  $A^-$ , τότε αυτές θα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$A^+ = \{ (\max v_{ij} | j \in J_1), (\min v_{ij} | j \in J_2), i=1, 2, 3, \dots, m \} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^* \}$$

$$A^- = \{ (\min v_{ij} | j \in J_1), (\max v_{ij} | j \in J_2), i=1, 2, 3, \dots, m \} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^- \}$$

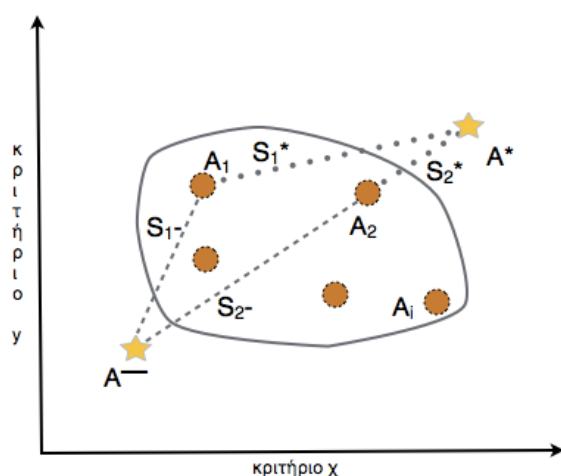
όπου το σύνολο  $J_1$  σχετίζεται με κριτήρια ωφέλειας και το σύνολο  $J_2$  με κριτήρια κόστους. Με αυτόν τον τρόπο έχουν προστεθεί στις εναλλακτικές λύσεις και οι δύο που έχουν κατασκευαστεί σύμφωνα με τα παραπάνω: η βέλτιστη ιδεατή και η χειρίστη ιδεατή.

Στη συνέχεια θα υπολογίζεται η απόσταση κάθε εναλλακτικής από τις δύο ιδεατές λύσεις, την βέλτιστη και την χειρίστη  $S_{i^+}$  και  $S_{i^-}$ , αντίστοιχα (σχετικό και το σχήμα της επόμενης σελίδας, Σχήμα 3.):

$$S_{i^+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2}, \text{ for } i=1, 2, 3, \dots, m, \quad S_{i^-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \text{ for } i=1, 2, 3, \dots, m.$$

<sup>88</sup> βλ. [49], [51].

<sup>89</sup> ουσιαστικά μιλάμε για την κλασική “ευκλείδεια” απόσταση.



Σχήμα 3. Ευκλείδεια απόσταση σε χώρους 2-διαστάσεων

και επιλέγουμε ως προτιμώμενη την λύση με την μεγαλύτερη απόσταση από την χειρίστη ιδεατή και την μικρότερη απόσταση από την βέλτιστη ιδεατή. Σε αυτήν την μέθοδο γίνεται μία υπόθεση που δεν είναι εκ των προτέρων εύκολα διακριτή από τον αναγνώστη: οι τιμές των κριτηρίων που λαμβάνουμε υπόψη στην διαδικασία επιλογής μιας από τις εναλλακτικές λύσεις θα πρέπει να μεταβάλλονται μονοτονικά. Οποιαδήποτε άλλη μεταβολή στις τιμές (είτε προς την κατεύθυνση της αύξησης, είτε προς αυτής της μείωσης) μας οδηγεί σε προβλήματα κανονικοποίησης και δυσκολίες - πολλές φορές αξεπεράστες- εφαρμογής της τεχνικής αυτής.

Η τεχνική TOPSIS δέχθηκε πολλές βελτιώσεις ώστε να αντιμετωπίζει με καλύτερο τρόπο τα ζητήματα MCDM. Μία από αυτές μελετάται ως αυτόνομη ενότητα στο τέλος του κεφαλαίου αυτού<sup>90</sup>.

### 3.3.3.3 Analytic Hierarchy Process (AHP) & Grey Relational Analysis (GRA)

Οι τεχνικές αυτές μελετούνται μαζί καθόσον τις περισσότερες φορές χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό, αφού η δεύτερη προϋποθέτει την ύπαρξη της πρώτης<sup>91</sup>. Η AHP είναι μία τεχνική που σχετίζεται κυρίως με την σχέση των κριτηρίων μεταξύ τους, ενώ η GRA σχετίζεται με την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων.

❖ *Analytic Hierarchy Process*: Η AHP έχει χρησιμοποιηθεί σε πάρα πολλούς τομείς όπου αντιμετωπίζουμε πολύπλοκα περιβάλλοντα στα οποία πρέπει να λάβουμε μία απόφαση. Ενδεικτικά έχει εφαρμοστεί σε προβλήματα επιλογής μιας από πολλές προτεινόμενες λύσεις, σε θέματα κατανομής πόρων, για προβλέψεις, για την μέγιστη συνολική ποιότητα διαχείρισης κ.α<sup>92</sup>. Κάθε πολύπλοκη κατάσταση σχετική με δομές, μετρήσεις και συνθέσεις είναι ένα καλό πεδίο

<sup>90</sup> Βλέπε 3.8

<sup>91</sup> Το αντίστροφο, όπως θα δοίμε στην συνέχεια δεν ισχύει. Η AHP τεχνική μπορεί να συνδυαστεί με άλλες πέραν της GRA. Στο σημείο αυτό μελετούνται ταυτόχρονα καθόσον στην πλειοψηφία της σχετικής βιβλιογραφία αναφέρονται μαζί.

<sup>92</sup> Για μία σχετικά εκτενής αναφορά εφαρμογών βλ. E. H. Forman, S. I. Gass, "The Analytic Hierarchy Process: An Exposition", Operations Research, vol. 49(4), 2001, pp. 469-486.

εφαρμογής της τεχνικής αυτής. Ωστόσο, η AHP σπάνια χρησιμοποιείται αποκλειστικά μόνη της. Στην συντριπτική πλειοψηφία των εφαρμογών χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές και κυρίως δρα υποστηρικτικά σε άλλες μεθόδους<sup>93</sup>. Επειδή η τεχνική αυτή είναι πολύ σημαντική και μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τον καθορισμό βαρών σε προβλήματα ANS, παρατίθεται πλήρως αναλυτικά στο τέλος του κεφαλαίου σε αυτόνομη παράγραφο<sup>94</sup>. Ας δούμε, όμως, κάποια βασικά σημεία της<sup>95</sup>. Αρχικά, το πρόβλημα αναλύεται σε έναν αριθμό στοιχείων απόφασης, τα οποία εκ νέου αναλύονται περαιτέρω σε άλλα στοιχεία, έτσι ώστε να προκύψει ένα είδος ιεραρχικής δομής, στο χαμηλότερο επίπεδο της οποίας βρίσκουμε τις εναλλακτικές λύσεις. Στη συνέχεια, κάθε στοιχείο απόφασης της ιεραρχίας συγκρίνεται με κάθε άλλο. Οι συγκρίσεις αυτές πραγματοποιούνται με τη βοήθεια πινάκων, το μέγεθος των οποίων σχετίζεται με το μέγεθος και το εύρος της ιεραρχικής δομής. Στην πραγματικότητα, κάθε στοιχείο των πινάκων αντανακλά τον βαθμό σημαντικότητας ενός στοιχείου σε σχέση με κάποιο άλλο. Έπειτα, αφού υπολογιστούν τα σχετικά βάρη που χρησιμοποιούνται στα στοιχεία απόφασης και διαμορφώνουν την τελική λύση, το αρχικό πρόβλημα επανασυντίθεται. Εν τάχει, λοιπόν, τα κυριότερα βήματα της AHP είναι<sup>96</sup>:

- αρχικά κατασκευάζουμε την ιεραρχική δομή, διαιρώντας το πρόβλημά μας σε διάφορα στοιχεία απόφασης.

- στη συνέχεια δημιουργούμε τις σχέσεις των στοιχείων απόφασης με αναμεταξύ τους συγκρίσεις

- έπειτα εκτιμούμε τα σχετικά βάρη των στοιχείων της απόφασης

- σειρά έχει η διαδικασία της επαλήθευσης μέσω της αρχής της συνέπειας (consistency)

- στο τέλος συνθέτουμε το πρόβλημα και συνδυάζουμε τα βάρη ώστε να καθορίσουμε το τελικό σύνολο των εκτιμήσεων για κάθε διαφορετική εναλλακτική απόφαση.

❖ *Grey Relational Analysis*<sup>97</sup>: Στον πραγματικό κόσμο υπάρχουν δύο τύποι στοιχείων: αυτά που από πριν είναι καλά ορισμένα με ακρίβεια και αυτά που δεν είναι δυνατόν να ορίσουμε από την αρχή με πλήρη την έννοιά τους. Τα πρώτα ονομάζονται λευκά (“white elements”), ενώ τα δεύτερα χαρακτηρίζονται γκριζα (“grey elements”). Ο βαθμός σχετικότητας μεταξύ γκριζου και λευκού στοιχείου ονομάζεται ως σχέση Grey (“Grey relationship”) και αποτελεί το κλειδί για την λύση προβλημάτων αβεβαιότητας. Η τεχνική GRA είναι μία αποδοτική μέθοδος κατασκευής και ανάλυσης των σχέσεων για μία διακεκριμένη ακολουθία στοιχείων. Μία από τις ακολουθίες αποτελεί την ακολουθία αναφοράς (“reference sequence”). Η σχέση Grey μεταξύ της ακολουθίας αναφοράς και των υπολοίπων ακολουθιών μπορεί να εκτιμηθεί υπολογίζοντας στον συντελεστή GRC (“Grey Relational Coefficient”), μέσω επιπέδων ομοιοτήτων και διαφορών. Η ακολουθία με την μεγαλύτερη τιμή GRC είναι η επιθυμητή. Στο σημείο αυτό ας δούμε τα βήματα της τεχνικής αυτής<sup>98</sup>:

<sup>93</sup> J. M. Alexander, T. L. Saaty “Conflict Resolution - The Analytic Hierarchy Process”, Praeger, New York, 1989.

<sup>94</sup> Βλέπε 3.7

<sup>95</sup> D. Charilas, O. Markaki, D. Nikitopoulos, M. Theologou, “Packet-switched network selection with the highest QoS in 4G networks”, Elsevier, Computer Networks, vol. 52, 2008. pp.248-258.

<sup>96</sup> T.L. Saaty and L.G. Vargas. Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, the Netherlands, 2001.

<sup>97</sup> J. L. Deng “Introduction to grey system theory” The Journal of Grey System, vol. 1 (1), 1989, pp. 1-24.

<sup>98</sup> βλ. [62] και Ng K. W. David “Grey system and grey relational model” ACM SIGIGE Bulletin, vol. 20(2), 1994. pp.2-9.

- κατηγοριοποίηση των ακολουθιών σε τρία είδη προσδοκιών: “larger-the-better”, “smaller-the-better” και “nominal-the-best”

- καθορισμός του κάτω, πάνω και “εγκρατούς” (moderate) ορίου των στοιχείων των ακολουθιών

- κανονικοποίηση δεδομένων
- καθορισμός ιδανικών (λευκών) ακολουθιών
- υπολογισμός του συντελεστή GRC
- επιλογή της εναλλακτικής ακολουθίας με τη μεγαλύτερη τιμή GRC

Μελετώντας από μαθηματική σκοπιά την τεχνική GRA<sup>99</sup>, ας υποθέσουμε ότι έχουμε  $n$  ακολουθίες τις  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  καθεμία από τις οποίες έχει  $m$  στοιχεία. Δηλαδή, έχουμε τις ακολουθίες:  $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m))$ , όπου  $i=1, 2, \dots, n$

Τα δεδομένα των ακολουθιών κανονικοποιούνται με τις τρεις έννοιες προσδοκιών, “larger-the-better”, “smaller-the-better” και “nominal-the-best” και θα έχω αντίστοιχα τις σχέσεις:

$$x_i^*(j) = \frac{x_i(j) - l_j}{u_j - l_j}$$

$$x_i^*(j) = \frac{u_j - x_i(j)}{u_j - l_j}$$

$$x_i^*(j) = 1 - \frac{|x_i(j) - m_j|}{\max\{u_j - m_j, m_j - l_j\}}$$

όπου  $u_j = \max\{x_1(j), x_2(j), \dots, x_n(j)\}$  και  $l_j = \min\{x_1(j), x_2(j), \dots, x_n(j)\}$  ενώ,  $m_j$  είναι η τιμή στόχος στην κατάσταση *nominal-the-best* και  $j=1, 2, \dots, k$ . Η ιδεατή ακολουθία  $(X_0)$  καθορίζεται ώστε να περιέχει όλα τα όρια (πάνω, κάτω και εγκρατούς) στις έννοιες των προσδοκιών. Ο συντελεστής GRC στη συνέχεια υπολογίζεται από την σχέση:

$$GRC_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max}}{\Delta_i + \Delta_{\max}}$$

όπου  $\Delta_i = |x_0^*(j) - x_i^*(j)|$ ,  $\Delta_{\max} = \max_{(i,j)}(\Delta_i)$  και  $\Delta_{\min} = \min_{(i,j)}(\Delta_i)$ . Η ακολουθία με την μεγαλύτερη τιμή συντελεστή GRC είναι αυτή που επιλέγεται ως η βέλτιστη.

<sup>99</sup> Q. Song, A. Jamalipour, “An adaptive quality-of-service network selection mechanism for heterogeneous mobile networks”, *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2005 vol 5, Wiley, pp. 697-708.

### 3.3.4 Τάσεις MCDM

Η MCDM μεθοδολογία εφαρμόζεται σε μεγάλο αριθμό προβλημάτων σε πάρα πολλούς τομείς της σύγχρονης ζωής. Από την οικονομική επιστήμη, μέχρι την μελέτη κοινωνικών φαινομένων και από τον βιομηχανικό σχεδιασμό μέχρι τις τηλεπικοινωνίες, ο ρόλος των τεχνικών MCDM είναι πολύπλευρος και σπουδαίος. Για τον λόγο αυτό η μεθοδολογία αυτή συνεχίζει να εξελίσσεται. Συνεχώς αναπτύσσονται νέες τεχνικές ή ήδη υπάρχουσες βελτιώνονται. Μία από αυτές τις τεχνικές ασχολείται με την φύση των κριτηρίων<sup>100</sup>. Όσες μεθόδους MCDM έχουμε συναντήσει έως τώρα οι τιμές των βαρών για τα κριτήρια που λαμβάνονταν υπόψη, έστω και μετά από κάποιας μορφής επεξεργασία, ήταν σταθερές κατά τη διάρκεια της επίλυσης του προβλήματος. Στην νέα αυτή τεχνική αντί για σταθερές τιμές βαρών, χρησιμοποιούνται δυναμικά χαρακτηριστικά που προσομοιάζουν πιστότερα την συμπεριφορά των κριτηρίων στα οποία εφαρμόζονται. Επίσης, μία ακόμη νέα τεχνική, η λεγόμενη ERA (*“Evidential Reasoning Approach”*<sup>101</sup>), αντί ενός κλασσικού πίνακα αποφάσεων, χρησιμοποιεί εκτεταμένους πίνακες. Σε αυτούς του πίνακες κάθε ιδιότητα της εναλλακτικής λύσης περιγράφεται από μία καταναμημένη αξιολόγηση, χρησιμοποιώντας μία δομή πεποιθήσεων. Για παράδειγμα, ένα αποδεκτό αποτέλεσμα ενός τέτοιου πίνακα με χρήση δομής πεποιθήσεων σε ένα πρόβλημα ποιότητας του κινητήρα ενός αυτοκινήτου θα ήταν { (εξαιρετική 60%), (καλή 40%), (μέτρια 0%), (κακή 0%), (κάκιστη 0%)}, γεγονός που σημαίνει ότι στο δεδομένο πρόβλημα αναμένουμε κατά 60% η ποιότητα να είναι εξαιρετική και κατά 40% καλή. Το πλεονέκτημα χρήσης τέτοιων δομών είναι ότι μπορεί η τεχνική αυτή να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα που συμπεριλαμβάνουν τόσο ακριβής κριτήρια, όσο και τύπους κριτηρίων που οι τιμές τους χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα, όπως πιθανότητες ή οι ασάφειες σε υποκειμενικές κρίσεις.

## 3.4 προβλήματα & αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Στα μαθηματικά και στην επιστήμη των υπολογιστών ένα πρόβλημα χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης (*“optimization problem”*) όταν αναζητείται η καταλληλότερη από όλες τις εφικτές λύσεις. Η μεθοδολογία αυτή βρίσκει πραγματικά τεράστια εφαρμογή σε όλους τους τομείς της έρευνας, της επιχειρηματικότητας αλλά και στην καθημερινή ζωή. Στο σημείο αυτό θα δούμε ορισμένους αλγόριθμους βελτιστοποίησης που έχουν χρησιμοποιηθεί στην προσπάθεια λύσης του ANS προβλήματος. Συγκεκριμένα μελετούμε το πρόβλημα knapsack και βλέπουμε προσεγγιστικούς αλγορίθμους που έχουν εφαρμοστεί στην βιβλιογραφία της ABC προοπτικής.

### 3.4.1 Knapsack problem

Αντίθετα με τις τεχνικές που είδαμε στην μεθοδολογία MCDM το πρόβλημα του σακιδίου μελετάται για πάνω από έναν αιώνα, αφού παρουσιάζεται, με διαφορετικές ονομασίες, στην

<sup>100</sup> S. Khanmohammadi, R. Almeida Ribeiro, J. Jassbi, “Multi Criteria Decision Making Using Dynamics of criteria”, in Proc. of the 11th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED03).

<sup>101</sup> J. B. Yang, “Rule and utility based evidential reasoning approach for multiple attribute decision analysis under uncertainty”, European Journal of Operational Research, vol. 131 (1), 2001. pp.31-61.

βιβλιογραφία ήδη από το 1897<sup>102</sup>! Το πρόβλημα του σακιδίου, όπως λέγεται στην γλώσσα μας, είναι ένα πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης: Δοσμένου ενός συνόλου από στοιχεία, καθένα από τα οποία έχει το δικό του βάρος και μία συγκεκριμένη αξία, προσδιορίζεται ο αριθμός εκείνων των στοιχείων που συμπεριλαμβάνεται στην συλλογή (του σακιδίου) με τέτοιο τρόπο ώστε το βάρος του σακιδίου να είναι ίσο ή μικρότερο από μία τιμή και ταυτόχρονα η συνολική αξία του σακιδίου να μεγιστοποιείται. Με άλλα λόγια, δηλαδή, προσπαθούμε να μεγιστοποιήσουμε το κέρδος χωρίς ωστόσο να παραβιάσουμε την χωρητικότητα και την αντοχή του σακιδίου<sup>103</sup>. Ένα τυπικό πρόβλημα Knapsack διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

Θεωρούμε  $C$  την χωρητικότητα του σακιδίου και έστω ένα σύνολο  $N$  αντικειμένων, δηλαδή  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_N\}$ . Κάθε αντικείμενο  $O_i$  έχει βάρος  $w_i$  και η αξία του στο τελικό κέρδος, όταν συμπεριλαμβάνεται στο σακίδιο, είναι  $p_i$ . Εφαρμόζοντας τον περιορισμό  $x_i, x_i \in \{0, 1\}$ , τότε αν το  $O_i$  αντικείμενο τοποθετηθεί μέσα στο σάκο, το κέρδος μας αυξάνεται κατά  $x_i p_i$  ενώ η διαθέσιμη πλέον, μετά την τοποθέτηση του  $O_i$  αντικειμένου, χωρητικότητα του σακιδίου μειώνεται κατά  $x_i w_i$ . Ο στόχος είναι να οδηγηθούμε σε ένα τέτοιο γέμισμα του σάκου, ώστε να μεγιστοποιείται το κέρδος χωρίς να παραβιάζεται η χωρητικότητά του. Μαθηματικά αυτό μπορούμε να το εκφράσουμε με τις παρακάτω σχέσεις<sup>104</sup>:

$$Z = \sum_{i=1}^N p_i x_i \quad \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N w_i x_i \leq C$$

όπου η πρώτη ζητούμε να μεγιστοποιηθεί καθόσον θα τηρείται η δεύτερη σχέση (περιορισμός).

Εκτός από τα προβλήματα με ένα σάκο του οποίου την μαθηματική εκφραση παραθέσαμε και ονομάζονται 0-1 knapsack, υπάρχουν και άλλου είδους, όπως τα MMKP (“*Multiple choice Multiple dimension Knapsack Problems*”) προβλήματα<sup>105</sup>. Στα τελευταίου είδους, έχουμε  $N$  σύνολα στοιχείων, όπου από κάθε σύνολο μπορεί να επιλεγεί ακριβώς ένα μόνο στοιχείο για το γέμισμα των  $M$  διαθέσιμων σάκων. Μία παραλλαγή του παραπάνω μαθηματικού μοντέλου, ώστε να συμπεριλαμβάνει όλων των κατηγοριών τα knapsack προβλήματα, με την χρήση  $M$  σακιδίων  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_M\}$ , μπορεί να διατυπωθεί ως εξής<sup>106</sup>:

Θεωρούμε ένα σύνολο  $O$  από  $N$  στοιχεία  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_N\}$  και ένα σύνολο  $K$  από  $M$  σακιδίων  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_M\}$ , όπου κάθε σάκος  $k_j$ , έχει χωρητικότητα  $C_j$ . Επίσης, συμβολίζουμε με  $p_{ij}$  την αύξηση του κέρδους, αν το στοιχείο  $O_i$  τοποθετηθεί στο  $k_j$  σακίδιο και αντίστοιχα ως  $w_{ij}$  την μείωση της χωρητικότητας του σακιδίου. Έτσι, η απαίτηση μεγιστοποίησης του κέρδους από το γέμισμα όλων των σακιδίων από τα στοιχεία, χωρίς να παραβιάζεται η χωρητικότητα κανενός από τους σάκους μπορεί μαθηματικά να εκφραστεί με τις παρακάτω σχέσεις:

<sup>102</sup> ενδεικτικά βλ. την εργασία G. B. Mathews “On the partition of numbers”, Proceedings of the London Mathematical Society vol. 28, 1897. pp. 486-490.

<sup>103</sup> C. Lee, J. Lehoczky, R. Rajkumar, D. Siewiorek, “On QoS optimization with discrete QoS options”, IEEE, Real Time Technology and Applications Symposium, 1999.

<sup>104</sup> D. Pisinger, “Algorithms for Knapsack problems”, Ph.D. dissertation Dept. of Computer Science, University of Copenhagen, Denmark, 1995.

<sup>105</sup> για μία εκτενής αναφορά των ειδών και των κατηγοριών των προβλημάτων Knapsack, βλ. [69]

<sup>106</sup> η γενική μαθηματική φόρμουλα του knapsack προβλήματος που σε αυτό το σημείο δίδεται είναι γνωστή ως GAP (“*Generalized Assignment Problem*”)

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} p_{ij}, x_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{και} \quad \text{s.t.} \sum_{i=1}^N x_{ij} w_{ij} \leq C_j, \forall j \in \{1, \dots, M\}$$

όπου ζητούμε να μεγιστοποιηθεί η πρώτη σχέση, ενόσω θα τηρείται ο περιορισμός της δεύτερης.

### 3.4.2 Bin Packing problems

Τα προβλήματα της κατηγορίας αυτής είναι παρόμοια με τα προβλήματα σακιδίου, όσον αφορά τις έννοιες που χρησιμοποιούν. Διαφέρουν ως προς τα ερωτήματα που προσπαθούν να λύσουν. Το βασικό πρόβλημα των δοχείων (“bins”) διατυπώνεται ως εξής<sup>107</sup>: Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σύνολο από στοιχεία των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται μεταξύ του μηδενός και της μονάδας. Επίσης, στη διάθεσή μας υπάρχουν ένα σύνολο από δοχεία, των οποίων η χωρητικότητα καθενός ισούται ακριβώς με την μονάδα. Το ερώτημα που τίθεται είναι να βρούμε την συσκευασία των στοιχείων στα δοχεία, πως δηλαδή θα στοιβάξουμε τα στοιχεία στα δοχεία με τέτοιο τρόπο που να μην υπερχειλίζουν τα τελευταία αλλά και να χρησιμοποιηθούν κατά το δυνατόν λιγότερα δοχεία. Τα προβλήματα τέτοιου είδους καλούνται “off-line” όταν διαθέτουμε πλήρη πληροφορία όλων των στοιχείων που πρέπει να συσκευαστούν στα δοχεία, ενώ όταν για το μέγεθος (τις ιδιότητες) κάθε επόμενου στοιχείου δεν διαθέτουμε από πριν γνώση, αλλά την ανακτούμε μόνο κατά τη διάρκεια συσκευασίας του, τα προβλήματα καλούνται “on-line”<sup>108</sup>. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος που προτείνονται για την λύση των προβλημάτων συσκευασίας σε δοχεία είναι ο δημοφιλής και γνωστός “First Fit Decreasing”<sup>109</sup> (FFD) και διάφορες βελτιώσεις και παραλλαγές του. Καθώς δεν είναι σκοπός της παρούσας εργασίας να αναλύσουμε κάθε αλγόριθμο, παραπέμπουμε τον αναγνώστη στην βιβλιογραφία που παραθέτουμε σε περίπτωση που επιθυμεί να τους μελετήσει εις βάθος<sup>110</sup>. Αρκούμαστε να αναφέρουμε ότι FFD αλγόριθμοι ανήκουν στην κατηγορία των προσεγγιστικών αλγορίθμων (όπως και αυτοί που είδαμε στα knapsack προβλήματα).

### 3.4.3 Population Migration Algorithm (PMA)

Τα φαινόμενα της μετανάστευσης πληθυσμών μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν σε κατάσταση των λεγόμενων PMA αλγορίθμων. Οι τελευταίοι, όπως και όλοι οι ανωτέρω που είδαμε στις παραπάνω παραγράφους ανήκουν στην μεγάλη κατηγορία των προσεγγιστικών αλγορίθμων. Οι PMA έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς που σχετίζονται με την οικονομική θεωρία αλλά και τον βιομηχανικό σχεδιασμό. Όμως, υπάρχουν βιβλιογραφικές αναφορές<sup>111</sup> που

<sup>107</sup> E. Coffman, M. Garey, D. Johnson, “Approximation algorithms for bin packing: A survey”, Approximation Algorithms for NP-Hard Problems, 1996. pp. 46-93.

<sup>108</sup> E. Coffman, J. Csirik, D. Woeginger, “Approximate solutions to bin packing problems”, Technical Report Woe-29, Institut für Mathematik B, TU Graz, Austria, 1999.

<sup>109</sup> X. Gu, G. Chen, “Performance analysis and improvement for some linear on-line bin-packing algorithms”, Journal of Combinatorial Optimization, vol.4 (6), 2002.

<sup>110</sup> για μία εκτενή αναφορά βελτιωμένων FFD αλγορίθμων βλ. B. Xing, N. Venkatasubramanian, “Multi-Constraint Dynamic Access Selection in Always Best Connected Networks”, The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2005.

<sup>111</sup> X. Wang, H. Cheng, P. Qin, M. Huang, L. Guo, “ABC Supported Handoff Decision Scheme Based on Population Migration”, Evo Applications, part II, LNCS 6025, Springer - Verlag, Berlin, 2010. pp.111-120.



προσεγγίζουν το ANS πρόβλημα με την χρήση τέτοιου αλγορίθμου. Αυτός είναι και ο λόγος που στη συνέχεια θα αναφέρουμε εν συντομία την βασική ιδέα και τον κορμό τους.

Όπως προδίδει το όνομά του, ο PMA προσομοιάζει με φαινόμενα της ανθρώπινης κοινωνίας τα προβλήματα που προσπαθεί να λύσει. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιεί το φαινόμενο της μετανάστευσης πληθυσμών. Στηρίζεται σε παραδοχές που πηγάζουν από αυτό το κοινωνικό φαινόμενο: Άτομα μεταναστεύουν σε μία συγκεκριμένη τοπική περιοχή. Η μετανάστευση σε αυτήν την προτιμώμενη περιοχή συνεχίζεται έως ότου η πίεση που ασκείται από τον υπερπληθυσμό της περιοχής φτάσει ένα άνω αποδεκτό όριο. Από την στιγμή που ξεπεραστεί το όριο αυτό, τα άτομα απομακρύνονται από την περιοχή και αναζητούν νέες ευκαιρίες μεταναστεύοντας σε άλλες περιοχές. Το ερώτημα που τίθεται σε αυτά τα προβλήματα είναι πως θα βρεθεί το σημείο όπου τα άτομα σε μία περιοχή στην οποία έχουν μεταναστεύσει θα απολαμβάνουν τις επιθυμίες τους ενόσω η περιοχή δεν θα ξεπερνά τα όρια υπερπληθυσμού. Ο αναγνώστης αντιλαμβάνεται αμέσως τις αναλογίες τοπικής περιοχής μετανάστευσης και ασύρματου δικτύου, μεταναστών και τερματικών, πίεσης υπερπληθυσμού και φόρτου δικτύου, επιθυμιών ατόμων και προτιμήσεων χρηστών. Ο αλγόριθμος PMA χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές από την θεωρία παιγνίων (Pareto optimal, Nash Equilibrium)<sup>112</sup>

#### 3.4.4 Διαδικασία απόφασης Markov (MDP)

Η διαδικασία απόφασης Markov<sup>113</sup> (Markov Decision Process - MDP) προσφέρει ένα μαθηματικό πλαίσιο μοντελοποίησης προβλημάτων απόφασης, σε περιπτώσεις όπου η έκβαση τους είναι μερικώς τυχαία και μερικώς ελεγχόμενη από αυτόν που λαμβάνει τις αποφάσεις: Σε κάθε χρονική στιγμή όπου απαιτείται να παρθεί μία απόφαση, η διαδικασία βρίσκεται σε μία κατάσταση  $s$  και πρέπει να επιλεγεί μία ενέργεια, έστω  $a$  που είναι διαθέσιμη στην κατάσταση  $s$ . Με την ενέργεια αυτή στη συνέχεια (την επόμενη χρονική στιγμή) μεταφερόμαστε σε μία νέα κατάσταση  $s'$ , η οποία έχει αποδώσει όφελος  $R_a(s, s')$ <sup>114</sup>.

Λεπτομερέστερα, η MDP αποτελείται από τέσσερα στοιχεία:  $S$  όπου περιλαμβάνει ένα πεπερασμένο σύνολο καταστάσεων,  $A$  ένα πεπερασμένο σύνολο ενεργειών,  $P_a(s, s')$  η πιθανότητα η ενέργεια  $a$  στην κατάσταση  $s$  την στιγμή  $t$  να οδηγήσει σε μία άλλη κατάσταση  $s'$  την χρονική στιγμή  $t+1$ , όπου  $P_a(s, s') = \Pr(s_{t+1} = s' | s_t = s, a_t = a)$  και  $R_a(s, s')$  το άμεσο όφελος που λαμβάνεται μετά την μετάβαση στην κατάσταση  $s'$  από την  $s$  με πιθανότητα  $P_a(s, s')$ . Όταν βρισκόμαστε στην κατάσταση  $s$  ορίζουμε μία πολιτική  $\pi(s)$  η οποία καθορίζει τις πράξεις μας (την επιλογή της κατάστασης στην οποία θα μεταβούμε). Ο στόχος της MDP διαδικασίας είναι να επιλεγεί εκείνη η πολιτική  $\pi$  που θα μεγιστοποιεί το συνολικό όφελος που λαμβάνεται από την αλλαγή καταστάσεων<sup>115</sup>.

<sup>112</sup> βλ. [75].

<sup>113</sup> R. Bellman, "A Markovian Decision Process", Journal of Mathematics and Mechanics, 1957. vol. 6(4), pp. 679-684.

<sup>114</sup> M. Puterman, "Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming", John Wiley and Sons, 1994.

<sup>115</sup> E. Altman, "Constrained Markov Decision Processes", Chapman & Hall/CRC, 1999.

### 3.5 ασαφής Λογική (Fuzzy Logic - FL)

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι κλασικές τεχνικές των μεθοδολογιών που έχουμε μέχρι τώρα παραθέσει δεν είναι ικανές να χειριστούν αποτελεσματικά ιδιότητες και κριτήρια που εμπεριέχουν ένα είδος ασαφείας και ανακρίβειας. Πολύ δε περισσότερο όταν η ανακρίβεια πηγάζει από την ίδια την φύση των κριτηρίων και από τις υποκειμενικές κρίσεις, γνώμες, επιθυμίες και πεποιθήσεις των χρηστών. Για αυτόν τον λόγο απαιτούνται τεχνικές ικανές να συνδυάζουν υποκειμενικές αξιακές κρίσεις με αντικειμενικά κριτήρια. Τέτοιες μεθοδολογίες και τεχνικές μας προσφέρει η θεωρία της ασαφούς λογικής<sup>116</sup> και μας βοηθούν να αναπαραστήσουμε με “αυστηρό” μαθηματικό τρόπο ασαφείς, ανακριβείς και συγκεχυμένες ποσότητες. Πριν προχωρήσουμε στην σύντομη παρουσίασή της<sup>117</sup>, είναι απαραίτητο να τονίσουμε ότι η μεθοδολογία αυτή δρα στο συνολικό πρόβλημα βοηθητικά και σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές. Αποτελεί ουσιαστικά ένα πολύτιμο βοήθημα που χρησιμοποιείται συνδυαστικά με άλλες μεθοδολογίες και όχι μία ανεξάρτητη λύση του προβλήματος.

Η θεωρία αυτή εισήχθη στην επιστήμη στα μέσα της δεκαετίας του '60 από τον Zadeh<sup>118</sup>. Η ιδέα ήταν βασισμένη στην αρχή της ασυμβατότητας, σύμφωνα με την οποία η υψηλή ακρίβεια δεν συμβαδίζει (είναι ασύμβατη) με την υψηλή πολυπλοκότητα. Έτσι, όσο μεγαλύτερος ο βαθμός πολυπλοκότητας ενός συστήματος, τόσο μικρότερο βαθμό ακρίβειας αναμένουμε να έχει το σύστημα αυτό. Για την αντιμετώπιση της αρχής αυτής ο Zadeh πρότεινε την εξής λύση: την κατά προσέγγιση αντιστροφή της πολυπλοκότητας του συστήματος με την ακρίβεια με την οποία αυτό μπορεί να αναλυθεί. Δήλωνε, δε, βέβαιος, ότι από την στιγμή που οι ιδέες του πραγματικού κόσμου, του κόσμου όπου ζούμε, εμφανίζονται να είναι συγκεχυμένες στη φύση, άραγε υπάρχει η λογική αιτία και το κίνητρο να προσαρμόζουμε και τις μηχανές σε αυτήν την προσέγγιση<sup>119</sup>. Με την βοήθεια της FL εισήχθη η έννοια της βεβαιότητας στον φυσικό κόσμο, κάτι συνηθισμένο στην καθημερινή συμπεριφορά του ανθρώπου, αλλά πρωτόγνωρο στην κλασική θεωρία υπολογισμών<sup>120</sup>. Έτσι, κατέστη τετριμμένη η ενσωμάτωση της ανθρώπινης εμπειρίας στην επίλυση προβλημάτων στα οποία οι συμβατικές τεχνικές δυσκολευόταν ή και αδυνατούσαν να χρησιμοποιηθούν λόγω της εξαιρετικά υψηλής πολυπλοκότητας που παρουσίαζε η εφαρμογή τους. Η FL παρέχει ένα πλαίσιο με την βοήθεια του οποίου μπορούμε να αναπαραστήσουμε με μαθηματικές σχέσεις την ανακρίβεια, την ασαφεία και την μη στατιστικά ελεγχόμενη αβεβαιότητα του πραγματικού κόσμου<sup>121</sup>, καθώς αποτελεί μία μέθοδο συλλογιστικής με λογικές εκφράσεις οι οποίες περιγράφουν μέλη ασαφών συνόλων<sup>122</sup>.

<sup>116</sup> Η μετάφραση στην ελληνική βιβλιογραφία του όρου Fuzzy είναι ασαφής ή συγκεχυμένος. Εν τούτοις, καθόσον θεωρούμε ότι ο όρος συγκεχυμένος δεν καλύπτει όλο το νοηματικό εύρος της θεωρίας αυτής, ενώ ο όρος ασαφής δεν περιλαμβάνει στην έννοιά του το στοιχείο της γνώσης, θα συνεχίσουμε από δω και πέρα να χρησιμοποιούμε αποκλειστικά τον αγγλικό όρο Fuzzy Logic ή την συντομογραφία του FL. Άλλωστε το 1990 ο όρος “fuzzy” απέσπασε στην Ιαπωνία το χρυσό μετάλλιο ως νέα λέξη που -σύμφωνα με τους Ιάπωνες ενσωμάτωσε και την έννοια της ευφύιας. Έκτοτε, χρησιμοποιείται σε όλες τις γλώσσες του κόσμου αυτούσια και όχι μεταφρασμένη.

<sup>117</sup> Για μία αρκετά πλήρη και εκτενής αναφορά βιβλιογραφίας σχετικής με τη θεωρία FL, βλ. C. Carlsson, R. Fuller, “Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments”, Fuzzy Sets and Systems, vol.78, 1996. pp. 136-153.

<sup>118</sup> L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets”, Information and Control, vol.8, pp 338-353, 1965.

<sup>119</sup> L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets”, Outline of a new approach to the analysis of complex systems”, IEEE Trans. Systems, Man, Cybern., vol. 3, 1973.

<sup>120</sup> Chen C. H., “Fuzzy logic and neural network handbook”, McGraw-Hill, 1996.

<sup>121</sup> D. E. Thomas, B. Armstrong - Helouvy, “Fuzzy logic control - A taxonomy of demonstrated benefits”, in Proc. of IEEE GLOBE-COM'90 San Diego, California, USA, 1990. vol. 1, pp. 7-11.

<sup>122</sup> S. J. Russell, P. Norvig, “Artificial Intelligence: a modern approach”, 2nd ed., Prentice Hall, 2003.

Ένα ασαφούς λογικής σύστημα (“*fuzzy logic system*”) αποτελείται από τρία κύρια μέρη<sup>123</sup>. Το πρώτο μέρος (που ονομάζεται “*fuzzifier*”) μετατρέπει τις τιμές εισόδου του συστήματος σε ασαφής μεταβλητές, στις οποίες οι φυσικές ποσότητες των τιμών εισόδου αναπαριστώνται από γλωσσικές μεταβλητές. Οι τελευταίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ως εισοδοί στο δεύτερο μέρος του συστήματος, την μηχανή συμπερασμάτων (“*fuzzy inference engine*”), από την οποία προκύπτουν κανόνες και επίπεδα συμπερασμάτων και νέα ασαφή γλωσσικά σύνολα. Το τελευταίο μέρος του συστήματος (“*defuzzifier*”) είναι υπεύθυνο να μετατρέψει τα ασαφή γλωσσικά σύνολα σε σταθερές, σαφής, μαθηματικές τιμές, αποδίδοντας στο καθένα και έναν αριθμό. Έτσι, επιτυγχάνεται η μετατροπή ασαφών όρων, κρίσεων, προτιμήσεων και πεποιθήσεων σε μαθηματικές τιμές που μπορούν εύκολα πλέον να επεξεργαστούν από άλλες τεχνικές. Με άλλα λόγια η μεθοδολογία της ασαφούς λογικής, ουσιαστικά μας επιτρέπει να παραστήσουμε φυσικές λέξεις ή προτάσεις που χρησιμοποιούμε στην καθομιλουμένη, σε ένα μαθηματικό πλαίσιο<sup>124</sup>. Η ασαφής λογική έχει χρησιμοποιηθεί ακόμη και σε εμπορικά προϊόντα με μεγάλη επιτυχία. Όμως, οφείλουμε να σημειώσουμε ότι πολλοί<sup>125</sup> ασκούν κριτική στην ικανότητά της να χειρίζεται μεγάλες βάσεις κανόνων που διαθέτουν αλυσίδες συμπερασμών, αφού τα συστήματα στα οποία έχει έως σήμερα ενσωματωθεί είναι σχετικά λιγότερο πολύπλοκα και απαιτούν λίγους κανόνες για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά.

### 3.6 η συμβολή των πολιτικών (policies)

Στο σημείο αυτό μεταφερόμαστε σε μία άλλη -διαφορετικής φύσης- μεθοδολογία. Όλες οι παραπάνω μεθοδολογίες που είδαμε προερχόταν από αυτόνομα επιστημονικά πεδία. Η μεθοδολογία που θα συζητήσουμε εδώ δεν σχετίζεται ακριβώς και αποκλειστικά με κάποιο γνωστικό πεδίο επιστημονικής έρευνας, αλλά την συναντούμε να εφαρμόζεται σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές στο σύνολο των προβλημάτων που επιχειρούνται να λυθούν σε όλα τα πεδία έρευνας. Με άλλα λόγια, η πολιτική είναι οι ενέργειες στις οποίες πρέπει να προβούμε ή να απορρίψουμε σε κάθε στάδιο ενός προβλήματος απόφασης και επιλογής. Με δεδομένο και από τα πριν καλά καθορισμένο το σύνολο των πολιτικών, αποφασίζεται ποια ακριβώς θα είναι η ενέργεια στην οποία πρέπει να προβεί η οντότητα που προσπαθεί να λύσει ένα πρόβλημα.

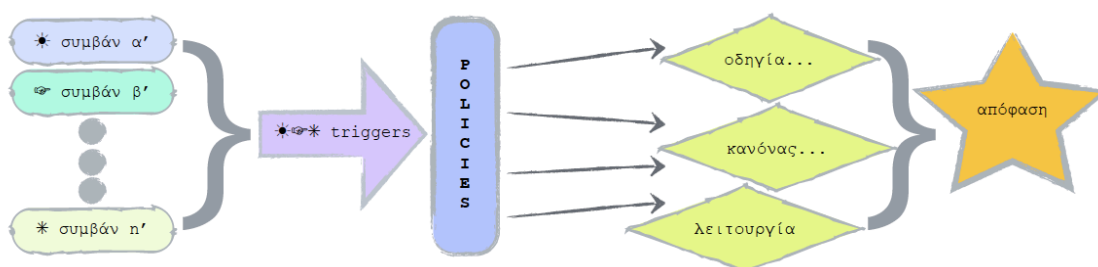
Ένα σύστημα διαχείρισης, λοιπόν, βασισμένο σε πολιτικές είναι αυτό στο οποίο η λειτουργία του είναι καθορισμένη από ένα σύνολο κανόνων και οδηγιών. Αυτές μπορούν να ενεργοποιούνται (“*triggered*”) από οποιοδήποτε συμβάν σχετικό με το πρόβλημα που επιχειρείται να λυθεί. Οι πολιτικές ορίζουν επ’ ακριβώς τον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζεται το συμβάν αυτό. Το αποτέλεσμα των πολιτικών εμφανίζεται ως μία απόφαση<sup>126</sup>. Στο σχήμα της επόμενης σελίδας (Σχήμα 4.) εμφανίζεται παραστατικά η διαδικασία που μόλις αναφέραμε.

<sup>123</sup> L. X. Wang, “Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis”, Prentice-Hall, NJ, USA, 1994.

<sup>124</sup> F. Herreraa, E. Lopez, M.A. Rodríguez, “A linguistic decision model for promotion mix management solved with genetic algorithms”, Elsevier, Fuzzy Sets & Systems. 2002, vol 131, pp. 47-61.

<sup>125</sup> Ενδεικτικά βλ. C. Elkan “The paradoxical success of fuzzy logic”, in Proc. of 11th National Conference on Artificial Intelligent (AAAI-93), 1993, AAAI Press, pp.698-703.

<sup>126</sup> D. C. Verma, “Policy Based Networking, Architecture and Algorithms”, New Riders Publishing, 2000.



Σχήμα 4. Η διαδικασία απόφασης με χρήση πολιτικών

Ο σχεδιασμός των συστημάτων που χρησιμοποιούν πολιτικές στην προσπάθειά τους να επιτύχουν τους τιθέμενους στόχους, οφείλει να γίνεται προσεχτικά και εφόσον έχουν κατανοηθεί πλήρως όλες οι πτυχές του προβλήματος, του συστήματος και του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί. Διαφορετικά, ενέχει ο κίνδυνος να εμπεριέχονται πολιτικές που ενώ σε πρώτη ανάγνωση φαίνονται ανεξάρτητες μεταξύ τους, ουσιαστικά να είναι ανταγωνιστικές και να οδηγούν σε απρόβλεπτα και μη αναμενόμενα αποτελέσματα. Η κατάστρωση πολιτικών δεν είναι πάντα μία τετριμμένη εργασία. Ιδίως σε περιπτώσεις όπου οδηγούμαστε σε χρήση πολλών κανόνων και οδηγιών θα πρέπει να βρεθεί ένας αποδοτικός τρόπος μεταφοράς των πολιτικών και υλοποίησής τους με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι κατανοητές από το σύστημα. Υπάρχουν, ωστόσο, αρκετά εργαλεία και βοηθήματα που μας επιτρέπουν αυτήν την μετατροπή. Ενδεικτικά, ας αναφέρουμε την γλώσσα Ponder. Μια γλώσσα υψηλού επιπέδου που παρέχει τον τρόπο εξειδίκευσης και κατανομής των οδηγιών και κανόνων των πολιτικών στις διάφορες οντότητες των συστημάτων<sup>127</sup>.

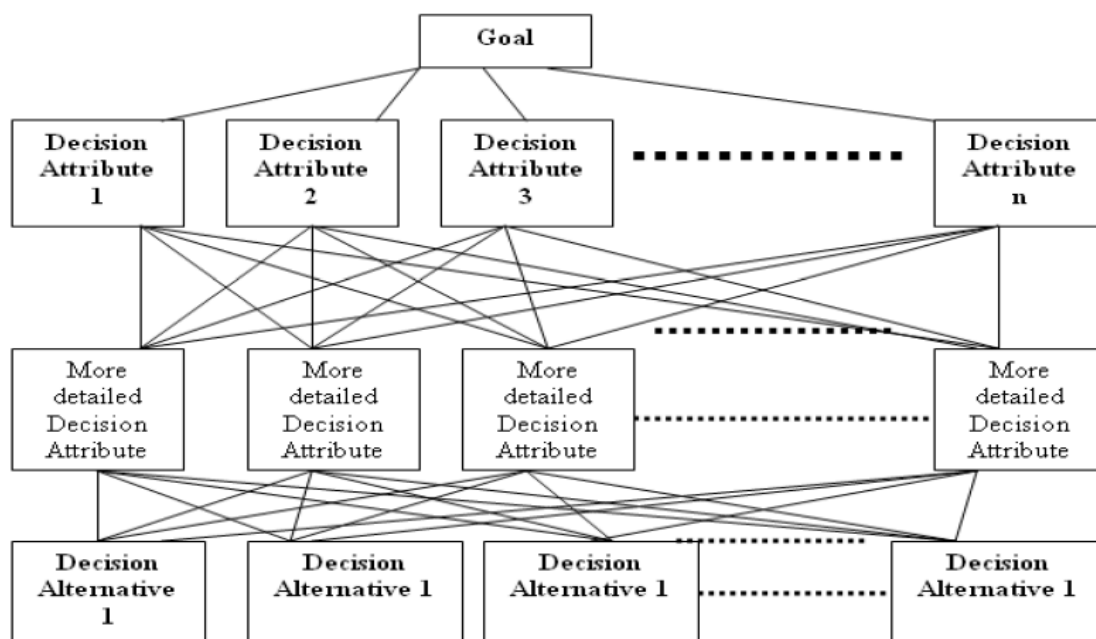
Η εισαγωγή πολιτικών σε ένα σύστημα παρέχει στον σχεδιαστή του ορισμένα μοναδικά πλεονεκτήματα: Με την χρήση πολιτικής, μπορούμε να εξασφαλίζουμε τον διαχωρισμό του συστήματος σε διακριτά αρθρωτά επίπεδα. Αυτό μας επιτρέπει την ευκολότερη μελέτη και βελτίωση της απόδοσης του συστήματος, αφού μας δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής βελτιώσεων αυτόνομα σε ένα επίπεδο χωρίς την ανάγκη να μεταβληθούν τα υπόλοιπα. Έτσι, επιπλέον επιτυγχάνεται η ευχερέστερη διαχείριση του συνολικού μηχανισμού. Επιπρόσθετα, με την χρήση μεθόδων πολιτικής, το σύστημα υλοποιεί ευκολότερα διάφορα σενάρια καταστάσεων στα οποία μπορεί να βρεθεί, δηλαδή διάφορα “προφίλ” χρήστη/δικτύων. Η προσεκτική αξιοποίηση των μηχανισμών πολιτικών πιστεύουμε ότι οδηγεί σε πιο αυτοματοποιημένα αλλά συγχρόνως προσαρμόσιμα στις ανάγκες του χρήστη συστήματα. Κλείνοντας, είναι αναγκαίο να τονίσουμε ότι η αποκλειστική χρήση πολιτικών δεν είναι ορθολογική, καθώς υπάρχει κίνδυνος στο σχεδιασμό να οδηγηθούμε σε αντικρουόμενες συμπεριφορές. Αλλά ακόμη και αν παρακαμφθεί ο κίνδυνος αυτός, το θέμα της πολυπλοκότητας του σχεδιασμού θα μας οδηγεί συνέχεια σε μειονεκτήματα, όπως την αδυναμία βελτίωσης και προσαρμοστικότητάς του. Μόνο, λοιπόν, ως βοηθητική σε άλλες τεχνικές που παραπάνω μελετήσαμε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε συνδυαστικά την μέθοδο των πολιτικών, με τρόπο που η συνεισφορά της σε όλο το εγχείρημα θα κρίνεται αποδοτική με όρους μείωσης της πολυπλοκότητας.

<sup>127</sup> N. Damianou, N. Dulay, E. Lupu, M. Sloman, “The Ponder Policy Specification Language”, in Proc. of the 2nd IEEE International Workshop on Policies for Distributed Systems (POLICY 2001). 2001. pp. 18-39.

### 3.7 αναλυτικά: η τεχνική AHP

Η AHP (“Analytic Hierarchy Process”) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται σε προβλήματα όπου έχουμε να λάβουμε υπόψη πολλαπλά κριτήρια. Αναπτύχθηκε από τον Saaty<sup>128</sup> ο οποίος εξέτασε τον τρόπο με τον οποίο θα καθορίζεται η σχετικότητα της σημαντικότητας των κριτηρίων σε ένα πρόβλημα MCDM. Η διαδικασία επιτυγχάνει να ενσωματώσει κρίσεις - επιθυμίες και μας παρέχει ένα αποτελεσματικό τρόπο επεξεργασίας των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται. Η AHP βασίζεται σε τρεις αρχές: Δομή του μοντέλου, συγκριτική ταξινόμηση των εναλλακτικών λύσεων και των κριτηρίων και τέλος σύνθεση του προβλήματος. Αναλυτικά τα βήματα της AHP αναφέρονται με λεπτομέρεια παρακάτω:

❖ *Βήμα 1ο:* Ένα σύνθετο πρόβλημα απόφασης δομείται ιεραρχικά. Όπως φαίνεται και σχηματικά στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.) αρχικά αποδομείται σε αλληλένδετα κριτήρια και εναλλακτικές απόφασης. Στην AHP είναι σημαντικό η αποδόμηση να πραγματοποιηθεί με έναν τρόπο παρόμοιο με τα διαγράμματα δέντρων συγγένειας. Τέλος, η ιεραρχία θα πρέπει να



Σχήμα 5. Ιεραρχική δομή προβλήματος

διακρίνεται σε τουλάχιστο τρία επίπεδα: ο συνολικός στόχος του προβλήματος στην κορυφή, πολλαπλά κριτήρια που καθορίζουν τις διαθέσιμες εναλλακτικές στο μέσο και τις εναλλακτικές αποφάσεις στο κατώτερο επίπεδο.

❖ *Βήμα 2ο:* Στο στάδιο αυτό λαμβάνουν χώρα οι συγκρίσεις των εναλλακτικών και των κριτηρίων. Από τη στιγμή που το πρόβλημα έχει αποσυντεθεί και η ιεραρχία της δομής έχει ήδη καταστρωθεί, αρχίζει η διαδικασία καθορισμού των προτεραιοτήτων με στόχο τον ορισμό της σχέσης σημαντικότητας των κριτηρίων κάθε επιπέδου. Η εναλλάξ σύγκριση των κριτηρίων ξεκινά από το δεύτερο επίπεδο και τερματίζεται στο κατώτερο επίπεδο της ιεραρχικής δομής, στο

<sup>128</sup> Βλ. [60].

| βάρη    | λεκτική κλίμακα   | εξήγηση   |
|---------|---|---|
| 1       | Ισότιμη σημασία των δύο στοιχείων (ισοδυναμία σημαντικότητας) | Τα δύο στοιχεία συμβάλλουν εξίσου                                       |
| 3       | Μέτρια σημαντικότητα του ενός στοιχείου έναντι του άλλου      | Το ένα στοιχείο υπερέχει ελαφρά από το άλλο                             |
| 5       | Ισχυρή σημαντικότητα του ενός στοιχείου έναντι του άλλου      | Το ένα στοιχείο υπερτερεί σαφέστατα του άλλου                           |
| 7       | Πολύ ισχυρή σημαντικότητα του ενός στοιχείου έναντι του άλλου | Η υπεροχή του ενός σε σχέση με το άλλο στοιχείο είναι ισχυρά δεσπόζουσα |
| 9       | Ακραία προτίμηση του ενός από το άλλο στοιχείο.               | Κατά κράτος υπεροχή του ενός από το άλλο στοιχείο                       |
| 2,4,6,8 | Ενδιάμεσες τιμές  | Συνδυάζουν τα ενδιάμεσα στάδια  |

Πίνακας 6.

Η κλίμακα εννέα επιπέδων της κατά ζεύγη σύγκρισης στην ΑΗΡ.

επίπεδο των εναλλακτικών. Σε κάθε επίπεδο τα κριτήρια συγκρίνονται ανά ζεύγη σύμφωνα με την επιρροή τους και την σχετικότητα τους με τα κριτήρια που βρίσκονται στα ανώτερα επίπεδα. Η σύγκριση στην ΑΗΡ βασίζεται σε μία προκαθορισμένη τυποποιημένη κλίμακα εννέα σταδίων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6<sup>129</sup>.

Ας υποθέσουμε ότι  $C = \{C_j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$  το σύνολο των κριτηρίων. Το αποτέλεσμα της κατά ζεύγη σύγκρισης των  $n$  κριτηρίων μπορεί να συνοψισθεί σε έναν  $(n \times n)$  πίνακα  $A$  στον οποίο κάθε στοιχείο  $a_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ) είναι το πηλίκο των βαρών των κριτηρίων, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \dots & a_{33} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & \dots & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \text{ όπου } a_{ij} = 1, \text{ για } j = i \text{ και } a_{ij} = 1 / a_{ji} \text{ για } a_{ij} \neq 0 \quad (1)$$

❖ *Βήμα 3ο:* Στο σημείο αυτό πρέπει να προσδιορισούν οι υποκειμενικοί και αντικειμενικοί παράγοντες. Αντικειμενικοί είναι όλοι όσοι μπορούν να μετρηθούν άμεσα. Έτσι, η κατά ζεύγη σύγκριση μπορεί να επιτευχθεί κατευθείαν από τον λόγο του  $i^{th}$  παράγοντα (στην κλίμακα 1 έως 9 που είδαμε προηγουμένως) προς τον  $j^{th}$  παράγοντα. Με αυτόν τρόπο ο πίνακας  $A$  της σχέσης (1) γίνεται:

$$A = \begin{bmatrix} m_1 / m_1 & m_1 / m_2 & \dots & \dots & m_1 / m_n \\ m_2 / m_1 & m_2 / m_2 & m_2 / m_3 & \dots & m_2 / m_n \\ \dots & \dots & m_3 / m_3 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_n / m_1 & m_n / m_2 & \dots & \dots & m_n / m_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

129 T.L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process", McGraw - Hill, New York, 1980. και T. L. Saaty, "How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process" Interfaces, 1994. vol. 24 (6), pp.19-43.

όπου  $m_k$  μετρούμενη τιμή (από το 1 έως το 9) του αντικειμενικού παράγοντα για την  $k^{th}$  εναλλακτική. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για τους παραπάνω πίνακες ισχύει η σχέση:

$$Aw = nw$$

όπου  $w$  είναι το διάνυσμα προτεραιότητας (ή σημαντικότητας) και  $n$  ο αριθμός των στοιχείων που συγκρίνονται. Σε αυτήν την περίπτωση της απολύτως συνεπούς σύγκρισης, μπορούμε επίσης να γράψουμε:  $a_{ij} = \alpha_{ik} \alpha_{kj}$  για όλα τα  $(i, j, k)$

Οι υποκειμενικοί παράγοντες είναι αυτοί που προέρχονται από τις ανθρώπινες προτιμήσεις. Καθώς, λοιπόν, οι συγκρίσεις είναι υποκειμενικές η συνέπεια των αποφάσεων πρέπει να επαληθευτούν μέσω του δείκτη συνέπειας ConR (“Consistency Ratio”).

❖ *Βήμα 4ο:* Στη συνέχεια αναπτύσσουμε έναν κανονικοποιημένο πίνακα  $A'$  που προκύπτει διαιρώντας κάθε ένα στοιχείο της στήλης του πίνακα  $A$  με το άθροισμα των τιμών της στήλης αυτής. Έτσι, θα πρέπει, εάν δεν έχουμε υποπέσει σε κάποιο λάθος, το άθροισμα των στοιχείων κάθε στήλης στον κανονικοποιημένο πίνακα  $A'$  να ισούται με την μονάδα.

$$A' = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_n a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum_n a_{i2}} & \dots & \dots & \frac{a_{1n}}{\sum_n a_{in}} \\ \frac{a_{21}}{\sum_n a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum_n a_{i2}} & \dots & \dots & \frac{a_{2n}}{\sum_n a_{in}} \\ \vdots & \dots & \frac{a_{33}}{\sum_n a_{i3}} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{n1}}{\sum_n a_{i1}} & \dots & \dots & \dots & \frac{a_{nm}}{\sum_n a_{in}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

❖ *Βήμα 5ο:* Τώρα υπολογίζουμε κάθε γραμμή του κανονικοποιημένου πίνακα. Οι υπολογισμοί αυτοί μας δίνουν το διάνυσμα προτεραιότητας (ή σημαντικότητας)  $P$  των εναλλακτικών προτιμήσεων σε σχέση με τα κριτήρια που λαμβάνουμε υπόψη. Και εδώ οι τιμές θα πρέπει προστιθέμενες να δίνουν αποτέλεσμα την μονάδα.

$$P = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{bmatrix} \quad \text{όπου } p_k = \text{AVG} (k^{th} \text{ γραμμή του πίνακα } A') \quad (4)$$

❖ *Βήμα 6ο:* Βρίσκουμε το διάνυσμα Eigen (ιδιοδιάνυσμα)  $(\Lambda)$  ως εξής:

$$\Lambda = (A \times P) / P = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Η μέγιστη Eigen τιμή (μέγιστη ιδιοτιμή),  $\lambda_{max}$ , μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\lambda_{max} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}{n} \quad (6).$$

❖ *Βήμα 7ο:* Για να καθορίσουμε αν η διαδικασία είναι αποδεκτή (ρεαλιστική) αναπτύσσουμε έναν τρόπο ποσοτικού προσδιορισμού του πίνακα. Εάν  $w$  είναι ο πίνακας στήλης των σχετικών βαρών  $w_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), τότε λέμε ότι ο πίνακας  $A$  είναι συνεπής (αποδεκτός και ρεαλιστικός) αν ισχύει η σχέση  $Aw=nw$ .

❖ *Βήμα 8ο:* Σε αυτό το σημείο υπολογίζουμε την συνέπεια της κατάστρωσης του σχεδίου μας χρησιμοποιώντας την σχέση:  $ConR=CI/RI$ , όπου  $CI$  είναι ο δείκτης συνέπειας του πίνακα με  $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$  και  $RI$  η τυχαία ασυνέπεια που προέρχεται από έτοιμες τιμές (βλ. Πίνακα 7.) με  $RI=1.98(n-2)/2$ .

❖ *Βήμα 9ο:* Η τεχνική AHP ανέχεται χωρίς να οδηγήσει σε λάθος εκτιμήσεις κάποιο ποσό ασυνέπειας και σύμφωνα με τον Saaty<sup>130</sup> εάν το λόγος συνέπειας (CoR) είναι μικρότερος του 10%, τότε το επίπεδο ασυνέπειας είναι αποδεκτό. Σε αντίθετη περίπτωση, με υψηλότερη τιμή ασυνέπειας, θα πρέπει τα στοιχεία του πίνακα  $A$  να αναθεωρηθούν.

❖ *Βήμα 10ο:* Η τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων καθορίζεται από τον πολλαπλασιασμό του διανύσματος προτεραιότητας των κριτηρίων (που προκύπτει από τον πίνακα AHP του πρώτου επιπέδου) με αυτό των προτεραιοτήτων που προκύπτει από κάθε AHP πίνακα του επόμενου επιπέδου για κάθε εναλλακτική απόφαση και κάθε αντικείμενο.

| αριθμός<br>εναλλακτικών<br>(n) | τυχαία<br>ασυνέπεια<br>(RI) |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 3                              | 0,58                        |
| 4                              | 0,90                        |
| 5                              | 1,12                        |
| 6                              | 1,24                        |
| 7                              | 1,32                        |
| 8                              | 1,41                        |
| 9                              | 1,45                        |
| 10                             | 1,49                        |

Πίνακας 7.  
Τιμές τυχαίας ασυνέπειας

### 3.8 αναλυτικά: η τεχνική FSR TOPSIS

Η τεχνική FSR TOPSIS<sup>131</sup> (“Fuzzy Set Representation”) ουσιαστικά αποτελεί για μια βελτίωση της μεθοδολογίας TOPSIS, καθώς εισάγονται στοιχεία της ασαφούς λογικής (“Fuzzy Logic”). Χρησιμοποιείται όπως και η “απλή” TOPSIS για να παραχθεί η τελική κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών στα προβλήματα MCDM. Οι εναλλακτικές αναπαριστώνται ως διανύσματα σε έναν  $n$  - διαστάσεων Ευκλείδειο χώρο, όπου κάθε διάσταση αντιστοιχεί σε κάθε κριτήριο. Η κατάταξη των εναλλακτικών γίνεται σύμφωνα με την εγγύτητά τους στην ιδεατή και στην μη - ιδεατή λύση (ιδεατό διάνυσμα). Οι τελευταίες λύσεις μοντελοποιούνται ως υποθετικές εναλλακτικές επιλογές οι οποίες αντικατοπτρίζουν την βέλτιστη και την χειρίστη αντίστοιχα ωφέλεια για κάθε κριτήριο. Ας μη ξεχνάμε ότι η κλασσική τεχνική TOPSIS εισάγει την έννοια της “σχετικής” απόστασης, η οποία όπως είδαμε συναρτάται από τις Ευκλείδειες αποστάσεις κάθε εναλλακτικής πρότασης από δύο ιδεατούς στόχους, τον βέλτιστο και τον χειρίστο. Ωστόσο, οι στόχοι αυτοί μπορεί να είναι αντικρουόμενοι και προκειμένου να παρακάμψουμε το πρόβλημα της ασυνέπειας που τυχόν να παρουσιαστεί σε τέτοιες περιπτώσεις, εισάγεται η FSR. Με την βοήθεια της τεχνικής αυτής μία νέα συνάρτηση (άθροισμα)

<sup>130</sup> T.L. Saaty, “How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process”, European Journal of Operational Research, 1990, vol. 48, pp. 9-26.

<sup>131</sup> I. Chamodrakas, I. Lefteriotis, D. Martakos, “In-depth analysis and simulation study of an innovative fuzzy approach for ranking alternatives in multiple attribute decision making problems based on TOPSIS”, Elsevier, Applied Soft Computing vol.11, 2011, pp. 900-907.



μοντελοποιεί τον κίνδυνο της ασυνέπειας των μηχανισμών απόφασης σύμφωνα με τρία επίπεδα “αισιοδοξίας”: αποστροφή κινδύνου (“*risk - aversion*”), ουδετερότητα κινδύνου (“*risk - neutrality*”), αναζήτηση κινδύνου (“*risk - seeking*”). Έτσι, τα στάδια της κλασικής τεχνικής TOPSIS τροποποιούνται ώστε να εισαχθούν οι συναρτήσεις κριτηρίων ποιότητας υπηρεσίας (“*Quality of Service*”) που απαιτούνται για κάθε εφαρμογή. Τα βήματα λοιπόν της νέας βελτιωμένης τεχνικής είναι:

❖ *Βήμα 1ο*: Κατασκευάζουμε τον πίνακα απόφασης:

$$r_{ijc} = u_{ijc}$$

όπου  $u_{ijc}$  είναι η ωφέλεια της εναλλακτικής  $i$  που λαμβάνεται από το κριτήριο  $j$  για τον  $c$  τύπο QoS των εφαρμογών. Από την στιγμή που οι τιμές της ωφέλειας είναι καθαροί αριθμοί, χωρίς μονάδες μέτρησης και κανονικοποιημένες στο διάστημα  $[0, 1]$  δεν ανακύπτει ανάγκη επιπλέον κανονικοποίησης του πίνακα απόφασης, σε αντίθεση με την κλασική μέθοδο.

❖ *Βήμα 2ο*: Κατασκευάζουμε τον πίνακα βαρών:

$$v_{ijc} = w_{jc} r_{ijc}$$

όπου  $w_{jc}$  είναι το βάρος του  $j$  κριτηρίου για το προφίλ του χρήστη που αντιστοιχεί στο  $c$  επίπεδο QoS της εφαρμογής. Για τον προσδιορισμό των βαρών για κάθε κριτήριο χρησιμοποιείται η τεχνική της ασαφούς λογικής που αναπτύχθηκαν σε ενότητα που προηγήθηκε.

❖ *Βήμα 3ο*: Καθορίζουμε την ιδεατή βέλτιστη ( $A^+$ ) και την ιδεατή χειρίστη ( $A^-$ ) λύση, αντίστοιχα:

$$A^+ = (w_{1c}, w_{2c}, \dots, w_{nc})$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των κριτηρίων

$$A^- = 0$$

Στο στάδιο αυτό τροποποιείται η κλασική τεχνική TOPSIS, καθώς μοντελοποιούνται οι δύο ιδεατές λύσεις, βέλτιστη και χειρίστη, ως διάνυσμα των βαρών των κριτηρίων και ως μηδενικό διάνυσμα, αντίστοιχα.

$$S_{ic}^+ = \sqrt{\sum_j (u_{ijc} - w_{jc})^2}$$

$$S_{ic}^- = \sqrt{\sum_j v_{ijc}^2}$$

❖ *Βήμα 4ο:* Μετρούμε την απόσταση των εναλλακτικών από τις ιδεατές, βέλτιστη ( $S_{ic}^+$ ) και χειρίστη ( $S_{ic}^-$ ), αντίστοιχα, λύσεις που καθορίσαμε στο προηγούμενο βήμα:

$$\mu_{ic}^+ = \frac{1}{1 + S_{ic}^+}$$

$$\mu_{ic}^- = \frac{S_{ic}^-}{1 + S_{ic}^-}$$

*Βήμα 5ο:* Υπολογίζουμε τον βαθμό συμμετοχής (“membership degrees”) του ασαφούς συνόλου για τις εναλλακτικές που βρίσκονται εγγύτερα στην βέλτιστη ιδεατή και τις

$$\mu_{ic}^{+ \cap -} = 1 - \min[1, [(1 - \mu_{ic}^+)^p + (1 - \mu_{ic}^-)^p]^{1/p}]$$

εναλλακτικές που βρίσκονται μακρύτερα από την χειρίστη ιδεατή λύση<sup>132</sup>:

*Βήμα 6ο:* Υπολογίζουμε την κατάταξη της κάθε εναλλακτικής πρότασης<sup>133</sup>: Η παράμετρος  $p$  αντανακλά το μέτρο της αποστροφής κινδύνου και οι τιμές 1, 2 και  $\infty$  αντιστοιχούν, κατά σειρά, στην αποστροφή κινδύνου, την ουδετερότητα κινδύνου και την αναζήτηση κινδύνου<sup>134</sup>. Ωστόσο, σε προβλήματα ANS είναι συνετό<sup>135</sup> να θεωρείται μόνο η περίπτωση ουδετερότητας κινδύνου, όπου  $p=2$ .

<sup>132</sup> Οι βαθμοί συμμετοχής προέρχονται από μοντέλο που προτείνεται στο: H.J. Zimmermann, P. Zysno, Quantifying vagueness in decision models, European Journal of Operational Research, 1985, vol.22. pp. 148–158.

<sup>133</sup> Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με το μοντέλο που προτείνεται στο: R.R. Yager, “On a general class of fuzzy connectives”, Fuzzy Sets and Systems 1980, vol. 4. pp. 235–242.

<sup>134</sup> Βλ. [93]

<sup>135</sup> I. Chamodrakas, D. Martakos, “A utility-based fuzzy TOPSIS method for energy efficient network selection in heterogeneous wireless networks”, Elsevier, Applied Soft Computing, 2011, vol. 11(4). pp. 3734-3743.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

# ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ

---

**Σ**το μέρος αυτό της εργασίας ασχολούμαστε με τις δημοσιευμένες έρευνες που υπάρχουν σχετικά με την λύση του ANS προβλήματος. Έως τώρα μελετήσαμε όλο το θεωρητικό πλαίσιο του προβλήματος επιλογής του καταλληλότερου δικτύου. Είδαμε αναλυτικά και κατανοήσαμε την φύση του προβλήματος, τις φάσεις του, όλα εκείνα τα κριτήρια που δύναται να λαμβάνονται υπόψη. Επίσης, αναφέραμε τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται από τους ερευνητές στην προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος επιλογής. Πριν, λοιπόν, προχωρήσουμε στην δική μας οπτική, κρίνεται επιβεβλημένο να ανατρέξουμε στην βιβλιογραφία και να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο άλλοι ερευνητές προσεγγίζουν το θέμα. Ιδιαίτερη προσοχή δίδεται εκτός από τον τρόπο υλοποίησης (μεθοδολογία) που επιλέγεται σε καθεμία εργασία, στο ζήτημα του ελέγχου της συνολικής διαδικασίας, στα κριτήρια που χρησιμοποιούνται και σε ζητήματα ενέργειας και διαπραγμάτευσης όπου αυτά τίγονται από τους συγγραφείς. Η δομή του κεφαλαίου αυτού ακολουθεί αυτήν του προηγούμενου: Κατατάσσουμε τις σχετικές εργασίες που μελετούμε ανάλογα με την μεθοδολογία που χρησιμοποιούν και σχολιάζουμε διάφορα θέματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

#### 4.1 παραδοσιακή μέθοδος

Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι μεθοδολογίες μοναδικού κριτηρίου χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε οριζόντιες μεταπομπές. Ελάχιστες είναι οι προσεγγίσεις κάθετων μεταπομπών με χρήση ενός μόνο κριτηρίου.

Στην [41] οι ερευνητές προτείνουν την αλλαγή του RSS ως κριτηρίου απόφασης με τον λόγο SINR (“Signal to Interference and Noise Ratio”). Το νέο αυτό κριτήριο αντανακλά με καλύτερο τρόπο την ποιότητα της ζεύξης, καθόσον λαμβάνει υπόψη του τόσο τις παρεμβολές που τυχόν υπάρχουν όσο και τον θόρυβο που επηρεάζει το κανάλι επικοινωνίας. Είναι κατανοητό ότι με τη χρήση αποκλειστικά του RSS δεν επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή επίδοση του συστήματος, καθόσον δεν λαμβάνονται υπόψη τα ανωτέρω χαρακτηριστικά που σχετίζονται άμεσα και έχουν μεγάλη σημασία σε ασύρματα περιβάλλοντα. Σε περιβάλλοντα όπου συνυπάρχουν τεχνολογίες 802.11 και UMTS/WCDMA οι οποίες παρέχουν πολυμεσικό περιεχόμενο και υπηρεσίες, η χρήση του RSS δεν οδηγεί σε βέλτιστη απόδοση: Το κριτήριο αυτό δεν σχετίζεται παρά ελάχιστα με το QoS, με αποτέλεσμα την κατάρωση ενός αλγορίθμου ο οποίος δεν θα διαθέτει ευαισθησία και επίγνωση σε θέματα ποιότητας υπηρεσίας. Έτσι, είναι πολύ πιθανόν οι μεταπομπές που θα εκτελεστούν να είναι πρόωρες, μη αναγκαίες ή ακόμη και μη επιθυμητές. Στην ανάλυση που παρατίθεται στην εργασία αυτή φαίνεται ότι η χρήση του SINR παρέχει μεγαλύτερη απόδοση για τους τελικούς χρήστες σε σχέση με την χρήση του RSS, καθώς το κριτήριο αυτό εμπεριέχει έναν “δείκτη” ποιότητας ζεύξης και ένα επίπεδο ευαισθησίας QoS, σαφώς μεγαλύτερο από το RSS. Δεν πρέπει, επίσης, να μας διαφεύγει το γεγονός ότι η βελτίωση αυτή είναι δυνατόν να εφαρμοστεί σε διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος, με διαφορετικά επίπεδα θορύβου το καθένα και διαφορετικό βαθμό παρεμβολών.

Σε πλήθος άλλων εργασιών χρησιμοποιείται η τεχνική της χρήσης ενός μοναδικού κριτηρίου, αλλά αποκλειστικά για την αρχική φάση απόφασης εκτέλεσης μεταπομπής. Ενδεικτικά, στην [42] χρησιμοποιείται το RSS σε συνδυασμό με υστέρηση και κατώφλι ως κριτήριο στην αρχική φάση του ABC, δηλαδή στην φάση αρχικοποίησης, όπου αποφασίζεται η ανάγκη μεταπομπής ή όχι. Η εισαγωγή υστέρησης αποσκοπεί στην βελτίωση της αρχικής φάσης και στην παράκαμψη του φαινομένου συνεχούς μεταπομπής από το ένα στο άλλο δίκτυο (“ping-pong effect”).

Τέλος, στην [14] οι ερευνητές μελετούν μία σειρά από κριτήρια τα οποία στη συνέχεια με την χρήση πολιτικών οδηγούν στην επιλογή του καταλληλότερου δικτύου. Σε αυτήν την εργασία, δηλαδή, δεν εκμεταλλεύονται τα κριτήρια μόνο στην αρχική φάση, αλλά τα συνθέτουν με πολιτικές και στην κύρια -δεύτερη- φάση της επιλογής του καταλληλότερου στοιχείου. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται ως κατώφλι ενεργοποίησης των αντίστοιχων πολιτικών είναι το SNR, το jitter και ο αριθμός επανεκπομπών ανά πακέτο.

Είναι σημαντικό να τονιστεί και σε αυτό το σημείο<sup>136</sup> ότι παρά το γεγονός ότι η χρήση των τεχνικών “μοναδικού κριτηρίου” απαντάται, κυρίως, στις παραδοσιακές τεχνικές, καθόλου δεν μειώνει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα που διαθέτει όπως η απλότητά της, η δυνατότητα προσαρμογής της τεχνικής αυτής στις απαιτήσεις του σχεδιαστή, αλλά και ο περιορισμός του φαινομένου ping - pong.

<sup>136</sup> Αναλυτικότερα ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην ενότητα 2.4.2. του 2ου κεφαλαίου της παρούσας εργασίας.

## 4.2 συναρτήσεις απόφασης

Την μεθοδολογία αυτή την συναντούμε στην πλειοψηφία των υλοποιήσεων. Είτε ως ανεξάρτητη και αυτοτελής, είτε, συνηθέστερα, σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές προερχόμενες από τις μεθοδολογίες βελτιστοποίησης και MCDM. Παρακάτω θα συζητήσουμε πολλές από τις υλοποιήσεις αυτές.

Σε μία από τις αρχικές εργασίες<sup>137</sup> λαμβάνονται υπόψη τρία επίπεδα κριτηρίων: Το πρώτο αποτελείται από τα αρχικά κριτήρια: κόστος, jitter, και καθυστέρηση. Στο δεύτερο επίπεδο βρίσκουμε την αναδιάταξη των προηγούμενων κριτηρίων και οδηγούμαστε σε δύο νέα: την απόδοση (που συμπεριλαμβάνει το jitter και την καθυστέρηση) και ονομάζεται ωφέλεια  $U$  και το κόστος  $C$ . Στο τρίτο επίπεδο συνδυάζουμε τα δύο παραπάνω σύνολα κριτηρίων σε μία συνάρτηση: το αποτέλεσμα της αφαίρεσης ( $U - C$ ). Στόχος της εργασίας αυτής είναι η μεγιστοποίηση του αποτελέσματος της αφαίρεσης αυτής.

Μία άλλη προσέγγιση<sup>138</sup> λαμβάνει υπόψη της περισσότερα κριτήρια στα οποία συγκαταλέγεται και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, αλλά κανένα που να αφορά αποκλειστικά τις προτιμήσεις του χρήστη. Στη συνέχεια κατασκευάζεται μια συνάρτηση και ζητείται η μεγιστοποίηση της τιμής της. Στην εργασία αυτή δεν δίνονται λεπτομέρειες κατάστρωσης της συνάρτησης που προτείνεται. Απλά μόνο ο τύπος της, ο οποίος αποτελεί ένα άθροισμα τεσσάρων παραγόντων, όσα και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται.

Εισερχόμενοι σε λεπτομέρειες κατάστρωσης συναρτήσεων μπορούμε να δούμε κάποιες υλοποιήσεις που διαφέρουν από κάποιες άλλες. Έτσι, στην [27] λαμβάνονται υπόψη κριτήρια σχετικά με το κόστος, τα χαρακτηριστικά των δικτύων και την κατανάλωση ενέργειας. Με την χρήση αυτών των συνόλων κριτηρίων ορίζεται μια συνάρτηση μέγιστου αποτελέσματος (“score function”), όπου κάθε ένα από τα σύνολα κριτηρίων αναπαρίσταται μαθηματικά με χρήση της συνάρτησης  $1/e$ . Αντίθετα, στην [9] χρησιμοποιείται για αυτήν την αναπαράσταση η συνάρτηση  $\ln$ . Φυσικά οι δύο προσεγγίσεις διαφέρουν ακριβώς μόνο σε αυτό το σημείο και ίσως στα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη. Και στις δύο απαιτείται η μεγιστοποίηση της τιμής της score function. Η αναφορά σε λεπτομέρειες τέτοιου βάθους κρίνεται σκόπιμη για να κατανοηθεί το πόσο σημαντική είναι η διαδικασία κατάστρωσης μιας συνάρτησης και σε πόσες επί μέρους αποφάσεις πρέπει ο σχεδιαστής με προσεκτικό τρόπο να προβεί<sup>139</sup>.

Το γεγονός ότι λαμβάνονται υπόψη σε αυτές τις μεθοδολογίες πληθώρα κριτηρίων, δε σημαίνει αυτομάτως ότι ο μηχανισμός λαμβάνει όλες τις παραμέτρους με την ίδια βαρύτητα. Κάθε μία από τις υλοποιήσεις που συζητούμε, ρίχνει το βάρος της σε συγκεκριμένες παραμέτρους του προβλήματος. Για παράδειγμα, υπάρχει μία πρόταση λύσης του ANS προβλήματος με όρους ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας<sup>140</sup>. Εδώ δίδεται ιδιαίτερη έμφαση σε θέματα ενέργειας και προτείνεται μια στρατηγική αντιμετώπισης που στοχεύει στην ελάχιστη δυνατή κατανάλωση μπαταρίας από τις τερματικές συσκευές. Αυτό βέβαια δεν γίνεται μονόπλευρα, αλλά

<sup>137</sup> J. Noonan, P. Perry, J. Murphy “Client Controlled Network Selection”, on Proc. of 5th IEE International Conference 3G2004, 2004, pp. 543-547.

<sup>138</sup> Q.T. Nguyen-Vuong, N. Agoulmine, Y. Ghamri-Doudane, “Terminal-Controlled Mobility Management in Heterogeneous Wireless Networks”, IEEE Communications Magazine, 2007, vol. 45(4), pp. 122-129.

<sup>139</sup> Θα συζητήσουμε περισσότερο για το ζήτημα αυτό σε επόμενο κεφάλαιο κατά την διαδικασία κατάστρωσης της δικής μας λύσης.

<sup>140</sup> R. Trestian, O. Ormond, G.M. Muntean, “Power-friendly access network selection strategy for heterogeneous wireless multimedia networks” on Proc. of Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2010 IEEE International Symposium, pp. 1-5.

λαμβάνονται υπόψη και άλλα σύνολα κριτηρίων που σχετίζονται με την ποιότητα υπηρεσίας, το κόστος και τα δεδομένα του κινητού σταθμού (ταχύτητα χρήστη). Καταστρώνονται τρεις συναρτήσεις ωφέλειας (“utility function”) και ζητείται η μέγιστη δυνατή τιμή τους.

Μία άλλη προσέγγιση δίνει έμφαση στο κέρδος του συστήματος<sup>141</sup>. Καταλαβαίνουμε, λοιπόν, ότι αυτή η πρόταση κινείται στην λογική της λύσης του ANS προβλήματος από την πλευρά του δικτύου. Η συνάρτηση που προτείνεται ονομάζεται συνάρτηση κέρδους συστήματος (“System Profit”) και για την κατάστρωσή της λαμβάνονται υπόψη κριτήρια όπως το κόστος, η ποιότητα υπηρεσίας κ.α.

Άλλες προσεγγίσεις σχετίζονται με την μεγιστοποίηση μίας συνάρτησης που ονομάζεται “υπεραξία καταναλωτή” (“consumer surplus”). Σε μία τέτοια προσέγγιση<sup>142</sup> οι ερευνητές προτείνουν μία στρατηγική βασισμένη στην χρησιμότητα την οποία απολαμβάνει ο χρήστης και η οποία πρέπει να μεγιστοποιείται. Συγκεκριμένα, επικεντρώνονται σε υπηρεσίες μη πραγματικού χρόνου, όπου εκτιμάται ο χρόνος ολοκλήρωσης της κάθε υπηρεσίας (λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη συμπεριφορά) σε κάθε ένα από τα διαθέσιμα δίκτυα. Στη συνέχεια επιλέγεται εκείνο το δίκτυο που βάσιμα υποτίθεται ότι θα αυξάνει την υπεραξία του καταναλωτή, με όρους κατανάλωσης ενέργειας, κόστους κ.α.

Έως τώρα βλέπουμε ότι οι προσεγγίσεις κινούνται προς την μεγιστοποίηση κάποιας συνάρτησης. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν προτάσεις που να ζητούν την ελαχιστοποίησή της. Έτσι, οι F. Zhu και J. McNair<sup>143</sup> αφού λάβουν υπόψη στον μηχανισμό που καταστρώνουν διάφορα κριτήρια που σχετίζονται με την ποιότητα υπηρεσίας κατασκευάζουν μία συνάρτηση της οποίας αναζητούν την ελάχιστη τιμή ως την βέλτιστη λύση. Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι το εάν η βέλτιστη λύση θα είναι αυτή που θα μεγιστοποιεί ή θα ελαχιστοποιεί μία συνάρτηση, εξαρτάται από τα κριτήρια που λαμβάνουμε υπόψη και τον τρόπο κατασκευής της συνάρτησης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η κατασκευή της συνάρτησης έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να ζητείται η ελαχιστοποίησή της. Αυτός είναι και ο λόγος που στις περιπτώσεις αυτές οι συναρτήσεις ονομάζονται συναρτήσεις κόστους (“cost functions”). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτήν την εργασία οι παράγοντες που υπεισέρχονται στην συνάρτηση που προτείνεται, προέρχονται από την επεξεργασία των κριτηρίων σε συνδυασμό με διάφορες πολιτικές που χρησιμοποιούνται. Ο μηχανισμός που προτείνεται προσαρμόζεται τόσο σε συστήματα που ο έλεγχος ασκείται από την τερματική συσκευή (MCHO) όσο και σε συστήματα NCHO, όπου η διαδικασία ελέγχεται από τις οντότητες του δικτύου.

Τον ίδιο στόχο της ελαχιστοποίησης της τιμής της συνάρτησης συναντούμε και στην εργασία των C. Yiping και Y. Yuhang<sup>144</sup>. Οι συγγραφείς λαμβάνουν μία σειρά από κριτήρια, τα οποία σχετίζονται τόσο με τις προτιμήσεις του χρήστη, τα χαρακτηριστικά του δικτύου αλλά και τις απαιτήσεις των εφαρμογών και θέματα ενέργειας. Ο μηχανισμός που προτείνουν παρέχει την συλλογή των σχετικών με το QoS πληροφοριών από όλα τα διαθέσιμα δίκτυα. Το ANS που

<sup>141</sup> L. Huang, K. A. Chew, R. Tafazolli, “Network Selection for One-to-Many Services in 3G-Broadcasting Cooperative Networks”, in Proc. of IEEE International Conference on Vehicular Technology, vol. 5, 2005, pp. 2999-3003.

<sup>142</sup> βλ. [46] και O. Ormond, J. Murphy, G.-M. Muntcan, “Utility-based Intelligent Network Selection in Beyond 3G Systems” in Proc. of the IEEE International Conference on Communications, vol. 4, 2006, pp. 1831-1836.

<sup>143</sup> F. Zhu, J. McNair “Multiservice Vertical Handoff Decision Algorithms”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2006. Vol. 2006, pp. 1-13.

<sup>144</sup> C. Yiping, Y. Yuhang, “A New 4G Architecture Providing Multimode Terminals Always Best Connected Services”, IEEE Wireless Communications, vol. 14, 2007, pp. 36-41.

καταστρώνεται επιτρέπει στον χρήστη να προβαίνει σε εξατομικευμένες επιλογές, δίνοντας την δυνατότητα να αλλάζει ο ίδιος την σημαντικότητα των κριτηρίων (επιλέγοντας διαφορετικά βάρη) ανάλογα με τις απαιτήσεις του και τις επιθυμίες του. Μία απλή συνάρτηση κόστους η οποία ζητείται να λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της, κατασκευάζεται και ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης ακολουθεί στην συνέχεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κρίσιμο σημείο της “διάφανης” και “ομαλής” μεταπομπής βασίζεται στην τεχνολογία πρωτοκόλλων MIPv6.

Στην κατηγορία των τεχνικών αυτών συμπεριλαμβάνονται και προτάσεις οι οποίες χρησιμοποιούν περισσότερες από μία συναρτήσεις στα σχήματά τους. Έτσι στην [6] οι ερευνητές καταστρώνουν τρεις συναρτήσεις: μια συνάρτηση κόστους στην οποία λαμβάνονται υπόψη το εύρος ζώνης, η κατανάλωση ενέργειας και το κόστος, μία συνάρτηση όπου αντανakλάται το παρεχόμενο επίπεδο QoS και τέλος μία συνάρτηση που αντιπροσωπεύει το κόστος που απαιτείται για την παροχή συγκεκριμένης υπηρεσίας με συγκεκριμένες απαιτήσεις QoS. Σε αυτήν την περίπτωση ζητείται η ελαχιστοποίηση της πρώτης και τρίτης συνάρτησης και η μεγιστοποίηση της δεύτερης. Μία ανάλογη προσέγγιση βρίσκουμε και στην [16]. Μόνο που σε αυτήν την περίπτωση οι συναρτήσεις σχετίζονται με το QoS που απαιτείται για συγκεκριμένες ανελαστικές<sup>145</sup> υπηρεσίες και οι οποίες τελικά εισέρχονται σε μία νέα συνάρτηση κόστους. Στη συνέχεια μέσω ενός αλγορίθμου που οι συγγραφείς ονομάζουν CSA (“Connectivity opportunity Selection Algorithm”), λαμβάνεται η απόφαση επιλογής του καταλληλότερου διαθέσιμου δικτύου.

Οι προσεγγίσεις που είδαμε είναι ενδεικτικές των λύσεων που προτείνονται. Στην βιβλιογραφία υπάρχει σημαντικά μεγάλος αριθμός ερευνών που προσπαθούν να λύσουν το ANS πρόβλημα χρησιμοποιώντας τεχνικές συναρτήσεων απόφασης. Έγινε προσπάθεια να κατηγοριοποιηθούν όλες αυτές και να παρουσιαστούν οι πιο αντιπροσωπευτικές σύντομα, με εύληπτο τρόπο και χωρίς να εισερχόμαστε σε λεπτομέρειες που δεν προσθέτουν κάτι στο γενικό πλαίσιο του ANS προβλήματος. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι η μεθοδολογία αυτή μπορεί να συνδυαστεί με άλλες τεχνικές. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ασαφής λογική ή τεχνικές AHP στην προσπάθεια καθορισμού των βαρών των κριτηρίων που εισέρχονται στους παράγοντες των συναρτήσεων. Επίσης, μπορούν να συνδυαστούν με τους παραδοσιακούς τρόπους που είδαμε προηγουμένως, όπως και με την χρήση πολιτικών. Μία τέτοια προσέγγιση είναι αυτή που προτείνεται από τους Q. T. Nguyen, N. Agoulmine και Y. Ghamri-Doudane<sup>146</sup>. Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν αρχικά ένα RSS κατώφλι σε συνδυασμό με πολιτικές. Στην συνέχεια, εάν έχει αποφασιστεί η μεταπομπή σε άλλο δίκτυο, καταστρώνεται το μαθηματικό μοντέλο της συνάρτησης απόφασης, λαμβάνοντας υπόψη την διαθεσιμότητα άλλων δικτύων, το κόστος, την ποιότητα ζεύξης, την ταχύτητα του χρήστη και θέματα ενέργειας. Στην προσπάθεια να καθοριστεί ο βαθμός σημαντικότητας καθενός από τα κριτήρια, χρησιμοποιείται η ασαφής λογική. Έτσι, καταλήγουμε σε ένα μηχανισμό ο οποίος συνδυάζει πολιτικές, κατώφλια, συναρτήσεις απόφασης και ασαφής λογική.

<sup>145</sup> Λέγοντας ανελαστικές, εννοούμε υπηρεσίες τέτοιας φύσεως που για να παρασχεθούν απαιτούν συγκεκριμένο παρεχόμενο επίπεδο ποιότητας, κάτω του οποίου δεν δύναται να λειτουργήσουν. Για παράδειγμα, το βίντεο και η κλήση φωνής, σε αντίθεση με υπηρεσίες όπως ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και FTP όπου δεν υπάρχουν αυστηρές προδιαγραφές για να προσφερθούν.

<sup>146</sup> Q.T. Nguyen-Vuong, N. Agoulmine, Y. Ghamri-Doudane “A user-centric and context-aware solution to interface management and access network selection in heterogeneous wireless environments”, Elsevier, Computer Networks 2008. vol. 52, pp. 3358-3372.

### 4.3 τεχνικές MCDM (σχέσεις & ιεραρχίες κριτηρίων)

Η χρήση τεχνικών της MCDM μεθοδολογίας εμφάνισε αρχικά μία αυξητική τάση. Έτσι, οι ερευνητές αφού εγκατέλειψαν την παραδοσιακή μέθοδο, προσπάθησαν να ενσωματώσουν τεχνικές MCDM στις τεχνικές συναρτήσεων αποφάσεων. Πλέον, όμως, η τάση είναι να χρησιμοποιούνται οι τεχνικές MCDM σε συνδυασμό με τεχνικές άλλων μεθοδολογιών. Παρακάτω θα αναλύσουμε κάποιες από τις υλοποιήσεις που προτείνονται στην βιβλιογραφία και χρησιμοποιούν τεχνικές MCDM, όμως κρίνεται σκόπιμο προηγουμένως να εισάγουμε γενικά τον αναγνώστη στο θέμα.

#### 4.3.1 Εισαγωγικό σημείωμα για τις υλοποιήσεις MCDM

Έγινε κατανοητό, ήδη από το προηγούμενο κεφάλαιο, ότι οι τεχνικές της MCDM μεθοδολογίας χρησιμοποιούνται κυρίως στην προσπάθεια καθορισμού του βαθμού σημαντικότητας ενός κριτηρίου από ένα άλλο. Η ανάγκη να ληφθούν περισσότερα του ενός κριτήρια (ή σύνολα κριτηρίων) οδήγησε στην απόρριψη των παραδοσιακών μεθόδων (μέθοδος “μοναδικού κριτηρίου”) και την υιοθέτηση συναρτήσεων αποφάσεων (όπως είδαμε αμέσως παραπάνω). Όταν οι επιστήμονες άρχισαν να χρησιμοποιούν τις συναρτήσεις αυτές, ανέκυψε το θέμα της ιεράρχησης, με όρους σημαντικότητας, των κριτηρίων που λαμβάνονται υπόψη. Σε ποιο κριτήριο πρέπει να δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα; Εάν αλλάξει δυναμικά το περιβάλλον ή κάποιος άλλος παράγοντας (πχ ταχύτητα χρήστη) πως θα γίνει η αναδιάταξη της σημαντικότητας των κριτηρίων; Για να επιτευχθεί μία ιεράρχηση, απαιτείται προηγουμένως, όπως είναι φυσικό, μία είδους σύγκριση. Έτσι, οδηγηθήκαμε στην χρήση βαρών, τεχνική που είναι δεδομένη σε άλλα επιστημονικά πεδία.

Η εισαγωγή των βαρών μας παρέχει έναν σχετικά εύκολο τρόπο σύγκρισης και κατάταξης των κριτηρίων. Όμως και εδώ ανακύπτει ένα σημαντικό πρόβλημα: Πώς διαφορετικής φύσης, μεγεθών και μονάδων μέτρησης κριτήρια μπορούν να ληφθούν υπόψη με έναν “ισότιμο” και ενιαίο τρόπο; Πώς, δηλαδή, τα βάρη που θα προσαρμοστούν σε κάθε κριτήριο θα αντανακλούν όντως την σημαντικότητα του κριτηρίου σε σχέση με τα υπόλοιπα, εφόσον κάθε ένα από αυτά μετράται διαφορετικά; Για την λύση του προβλήματος αυτού υπάρχουν ήδη έτοιμες τεχνικές προερχόμενες από το πεδίο της Επιχειρησιακής Έρευνας. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές ανήκουν στην κατηγορία της μεθοδολογίας MCDM. Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο<sup>147</sup>, οι κυριότερες από αυτές τις τεχνικές είναι η SAW (“*Simple Additive Weighting*”), η TOPSIS (“*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*”) και ο συνδυασμός των AHP (“*Analytic Hierarchy Process*”)/GRA (“*Grey Relational Analysis*”). Παρακάτω, θα δούμε υλοποιήσεις που χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνικές. Πριν κλείσουμε το εισαγωγικό αυτό σημείωμα, είναι απαραίτητο να τονίσουμε, ώστε να καταστεί πλήρως κατανοητό στον αναγνώστη, ότι οι τεχνικές αυτές σπάνια χρησιμοποιούνται αυτοτελώς και, πλέον, στην μεγάλη πλειοψηφία των προβλημάτων συνδυάζονται με τεχνικές από την μεθοδολογία των συναρτήσεων αποφάσεων, των πολιτικών αλλά και της ασαφούς λογικής (“*Fuzzy Logic*”). Οι υλοποιήσεις που ακολουθούν παρουσιάζονται σε δύο υποενότητες. Καθόσον η τεχνική SAW δεν χρησιμοποιείται πλέον, αφού λόγω της απλούστευσης που προτείνει δεν κατορθώνει να αντιμετωπίσει αποδοτικά την δυναμική

147 Βλ. ενότητα 3.3



κατάταξη των κριτηρίων, θα περάσουμε κατευθείαν στις υλοποιήσεις με χρήση των δύο άλλων μεθόδων: TOPSIS και AHP/GRA.

#### 4.3.2 Υλοποιήσεις με χρήση TOPSIS

Σε μία από τις αντιπροσωπευτικότερες προσεγγίσεις επίλυσης του ANS προβλήματος<sup>148</sup> με την χρήση της μεθόδου “*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*” (TOPSIS), μία διαδικασία απόφασης για έναν μηχανισμό NHO προτείνεται, κατά την οποία διάφοροι αλγόριθμοι οι οποίοι “τρέχουν” στην πλευρά του δικτύου, βοηθούν την οντότητα απόφασης, παρέχοντας όλες τις απαραίτητες πληροφορίες. Κατά την διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα ο καθορισμός των βαρών και της σημαντικότητας των κριτηρίων, προκειμένου εν συνεχεία να καταταχθούν οι εναλλακτικές λύσεις και να επιλεγεί η βέλτιστη. Για κάθε κριτήριο υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ καλύτερης ιδεατής και χειρότερης ιδεατής λύσης. Το αρχιτεκτονικό πλαίσιο μέσα στο οποίο λαμβάνουν χώρα οι διαδικασίες περιλαμβάνει ένα κόμβο συλλογής δεδομένων (DCN - *Data Collection Node*) ο οποίος ευθύνεται για την συλλογή των χαρακτηριστικών των δικτύων, ένα κόμβο ανακοίνωσης υπηρεσίας (SAN - *Service Announcement Node*) που παρέχει πληροφορίες σχετικές με τις υπηρεσίες και έναν κόμβο ταυτοποίησης και αυθεντικοποίησης (AAA - *Authentication, Authorization and Accounting Node*) που παρέχει υπηρεσίες πιστοποίησης. Οι κόμβοι αυτοί παρέχουν τα δεδομένα στην οντότητα του δικτύου, η οποία υπολογίζει την κατάταξη των εναλλακτικών δικτύων και παρέχει την πληροφορία αυτήν στην τερματική συσκευή. Συγκεκριμένα, κάθε υποψήφιο εναλλακτικό δίκτυο  $i$  συμβολίζεται ως

$$NW_i = [CB_i, TB_i, AB_i, U_i, D_i, J_i, L_i]$$

όπου:

$CB_i$ : κόστος ανά byte

$TB_i$ : συνολικό παρεχόμενο εύρος ζώνης

$AB_i$ : μέγιστο παρεχόμενο εύρος ζώνης ανά δίκτυο και ανά χρήστη

$U_i$ : ωφελιμότητα παρόντος δικτύου

$D_i$ : packet delay

$J_i$ : packet jitter

$L_i$ : packet loss

ενώ τα  $N$  εναλλακτικά υποψήφια δίκτυα παρουσιάζονται σε έναν πίνακα απόφασης

$NW$ :

$$NW = \begin{bmatrix} CB_1 & TB_1 & AB_1 & U_1 & D_1 & J_1 & L_1 \\ CB_2 & TB_2 & AB_2 & U_2 & D_2 & J_2 & L_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ CB_N & TB_N & AB_N & U_N & D_N & J_N & L_N \end{bmatrix}$$

<sup>148</sup> F. Bari, V. C.M. Leung, “Automated Network Selection in a Heterogeneous Wireless Network Environment”, IEEE Network, vol.21, 2007, pp. 34-40.

Στην συνέχεια, με βάση τον πίνακα *NW* εφαρμόζεται η τεχνική TOPSIS. Κανονικοποιούνται οι τιμές κάθε κριτηρίου, καθορίζεται η σχετική σημαντικότητα κάθε κριτηρίου και προσαρμόζονται ανάλογα οι κανονικοποιημένες τιμές του πίνακα. Εν συνεχεία υπολογίζονται η βέλτιστη και η χειρίστη από τις εναλλακτικές λύσεις (αναφέρονται ως ιδεατές) και για κάθε δίκτυο που θεωρείται υποψήφιο μετράται η εγγύτητα  $S$  από τις ιδεατές λύσεις. Στο τέλος υπολογίζεται η παράσταση  $P$  για κάθε δίκτυο και αυτό με την μεγαλύτερη τιμή  $P$  επιλέγεται.

$$P = \frac{S_{\text{WORST}}}{S_{\text{BEST}} + S_{\text{WORST}}}$$

Στην [96] οι συγγραφείς προτείνουν την βελτιωμένη τεχνική FSR TOPSIS. Σε ένα περιβάλλον όπου συνυπάρχουν τρία διαφορετικής τεχνολογίας δίκτυα ασύρματης πρόσβασης (802.11, 802.16, UMTS), λαμβάνουν υπόψη τους τρία κριτήρια: το συνολικό εύρος ζώνης, την καθυστέρηση και την κατανάλωση ενέργειας. Αναζητούν την βέλτιστη επιλογή σε δύο διαφορετικές καταστάσεις (contextual infos): την κινητικότητα ή όχι του χρήστη, για τέσσερις διαφορετικές εφαρμογές: video, video conference, video streaming και web browsing. Προκειμένου να καθορισθεί ο βαθμός σημαντικότητας κάθε κριτηρίου για κάθε ένα από τα δίκτυα σε κάθε μία από τις καταστάσεις του χρήστη για κάθε διαφορετική χρήση υπηρεσίας, προτείνεται η εισαγωγή ασαφούς λογικής σε ορισμένα από τα στάδια της μεθόδου TOPSIS. Η σημαντικότερη καινοτομία που πετυχαίνουν με αυτόν τον τρόπο είναι μία νέα προσέγγιση σε εκείνο το βήμα της TOPSIS, όπου καθορίζεται η σχετικότητα της σημαντικότητας κάθε κριτηρίου έναντι του άλλου<sup>149</sup>: εδώ, χρησιμοποιείται η ασαφής λογική που παρέχει μία αναπαράσταση των λεκτικών εκφράσεων “very low”, “low”, “fair”, “high” και “very high”, σε αριθμητικές τιμές και διευκολύνει κατά μεγάλο βαθμό τον αποτελεσματικότερο καθορισμό των βαρών κάθε κριτηρίου (για κάθε διαφορετικό δίκτυο, κατάσταση χρήστη και υπηρεσία). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η προσαρμογή κάθε βάρους σε κάθε κατάσταση και εν συνεχεία εφαρμόζονται τα υπόλοιπα στάδια της τεχνικής FSR TOPSIS<sup>150</sup>. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της βελτιωμένης αυτής τεχνικής είναι το γεγονός ότι αντιμετωπίζει επιτυχώς θέματα ασυνέπειας που ανακύπτουν στην μέθοδο TOPSIS, όταν η τελευταία καλείται να διαχειριστεί διάφορες πολύπλοκες καταστάσεις, όπως ο συνδυασμός πολλών κριτηρίων με διάφορες καταστάσεις του χρήστη, με ποικιλία εφαρμογών σε διάφορα διαφορετικά εναλλακτικά -και υποψήφια επιλογής- δίκτυα. Από την άλλη μεριά όμως, θα πρέπει να μελετηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος καθώς αναμένεται με την εισαγωγή της ασαφούς λογικής μία αύξηση στην πολυπλοκότητα του μηχανισμού, γεγονός που, ίσως, οδηγεί σε χρονοβόρες, τελικά, λύσεις.

#### 4.3.3 Υλοποιήσεις με χρήση AHP/GRA

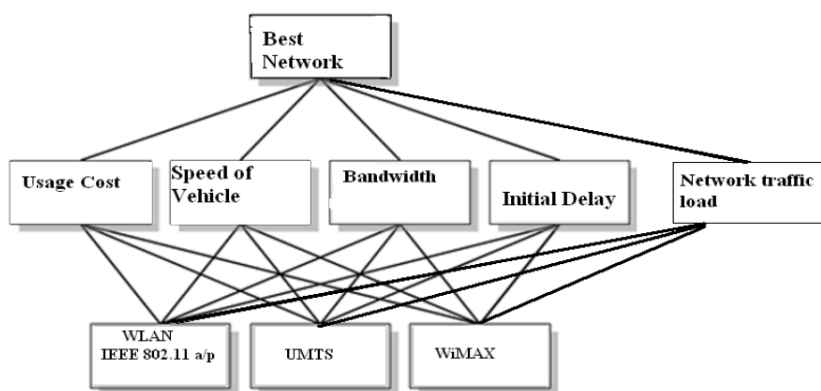
Όπως επανειλημμένα έχουμε πει, η τεχνική AHP (“Analytic Hierarchy Process”) είναι η πλέον δημοφιλής στην σχετική βιβλιογραφία. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει σε συνδυασμό με την εύκολη κατάστρωση της τεχνικής οδηγούν στην ολοένα και αυξανόμενη χρήση της από τους ερευνητές. Επιπλέον, ο συνδυασμός της AHP με άλλες τεχνικές όπως η GRA και η Ασαφής

<sup>149</sup> I. Lassoued, J. M. Bonnin, Z. B. Hamouda, A. Belgith, “A methodology for evaluating vertical handoff decision mechanisms”, in Proc. of the 7th International Conference on Networking, Mexico, 2008. pp. 377-384.

<sup>150</sup> Βλ. ενότητα 3.8

Λογική την αναδεικνύει σε μία από τις πλέον εύχρηστες τεχνικές επίλυσης προβλημάτων απόφασης με πολυκριτήρια. Παρακάτω θα μελετήσουμε υλοποιήσεις τόσο αυτόνομης χρήσης της ΑΗΡ, όσο και υλοποιήσεις που συνδυάζουν την τεχνική αυτή με αλγορίθμους GRA ή και με χρήση της ασαφούς λογικής.

Στην εργασία που αρχικά θα μελετήσουμε η ΑΗΡ χρησιμοποιείται αυτόνομα. Εδώ<sup>151</sup> οι συγγραφείς προχωρούν περαιτέρω και σε προσομοίωση του μηχανισμού που προτείνουν, με την χρήση του εργαλείου Simulink της Matlab. Στόχος τους είναι η αποδοτικότερη από την πλευρά του χρήστη επιλογή του καταλληλότερου δικτύου σε κινούμενα περιβάλλοντα, δηλαδή σε χρήστη ο οποίος κινείται με μεγάλες ταχύτητες (ως επιβάτης οχήματος) στα πλαίσια ενός ευρύτερου σχεδιασμού Ευφυών Συστημάτων Μεταφοράς (ITS - “*Intelligent Transportation Systems*”)<sup>152</sup>. Η τεχνική ΑΗΡ χρησιμοποιείται ώστε να λυθεί το πρόβλημα επιλογής σε ένα περιβάλλον όπου πέρα από την ταχύτητα του χρήστη, υπάρχει μια ποικιλία από διαφορετικής τεχνολογίας δίκτυα ασύρματης πρόσβασης. Λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό απόφασης και επιλογής οι επιθυμίες και οι απαιτήσεις του χρήστη, το κόστος χρήσης, οι τύποι και οι απαιτήσεις των εφαρμογών, αλλά και η ταχύτητα του τερματικού και από αυτήν την οπτική μπόυμε να χαρακτηρίσουμε την προσέγγιση ως “*user - centric*”. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη περιεχόμενο από το περιβάλλον, πληροφορίες, δηλαδή, που αφορούν τα χαρακτηριστικά των δικτύων όπως το RSS, η αρχική καθυστέρηση σύνδεσης σε κάθε δίκτυο, ο φόρτος στα δίκτυα και το παρεχόμενο εύρος ζώνης. Κάθε ένα από αυτά τα κριτήρια χρησιμοποιείται για διαφορετικό σκοπό και σε διαφορετικό στάδιο του μηχανισμού που προτείνεται. Έτσι, πχ θεωρούν το RSS ως έναν παράγοντα που μπορεί να ενεργοποιεί το σύνολο του μηχανισμού, εάν αυτό πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Εάν αυτό συμβεί, ξεκινά η κύρια διαδικασία με στόχο την κατάταξη κατά προτεραιότητα των δικτύων στα οποία μπορεί να μεταπεμφθεί ο χρήστης. Τέλος, προσεγγίζουν την υλοποίηση θεωρώντας δύο κατηγορίες τηλεπικοινωνιακής κίνησης (εφαρμογών): την συμβατική (φωνή) και το video streaming. Οι συγγραφείς οδηγούνται στην κατασκευή της



Σχήμα 6. Ιεραρχία κριτηρίων για επιλογή του βέλτιστου δικτύου

ιεραρχικής δομής η οποία φαίνεται διπλανό στο σχήμα (Σχήμα 6.). Στην κορυφή βρίσκεται ο στόχος, δηλαδή το βέλτιστο δίκτυο. Στο επόμενο επίπεδο της δομής βρίσκονται τα κριτήρια που λαμβάνονται

υπόψη, όπως τα αναφέραμε παραπάνω. Στο κατώτερο επίπεδο βρίσκονται οι εναλλακτικές επιλογές, δηλαδή τα δίκτυα

<sup>151</sup> S. Dhar, A. Ray, R. Bera, “Design and Simulation of Vertical Handover Algorithm for Vehicular Communication”, International Journal of Engineering Science and Technology, vol. 2 (10), 2010, pp. 5509 - 5525.

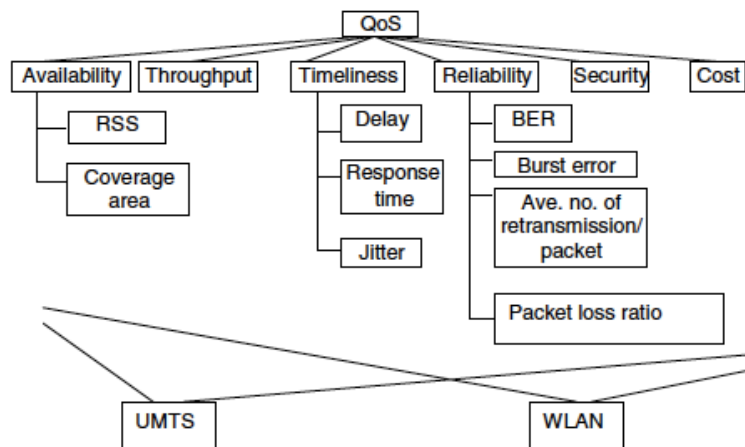
<sup>152</sup> J. L. Adler, V. J. Blue, “Toward the design of intelligent traveler information systems”, Elsevier, Transportation Research part C: Emerging Technologies, vol. 6 (3), pp. 157-172.

ασύρματης πρόσβασης 802.11 (WLAN), 802.16 (WiMAX) και UMTS. Στην συνέχεια κατασκευάζεται ο πίνακας πρώτου επιπέδου για την επιλογή προτεραιότητας σύμφωνα με τα πέντε κριτήρια που αναφέρθηκαν και φαίνονται στο σχήμα για την επιλογή ενός δικτύου. Έπειτα, καταστρώνονται οι πίνακες δεύτερου επιπέδου όπου εμφανίζεται η προτεραιότητα επιλογής κάθε δικτύου για κάθε ένα ξεχωριστά από τα πέντε κριτήρια, με αποτέλεσμα τέσσερις νέους πίνακες. Η ταχύτητα θεωρείται αντικειμενικός παράγοντας και δεν κατασκευάζεται πίνακας για αυτήν. Στο τέλος εισάγουν τα δεδομένα στο μοντέλο απόφασης που έχουν σχεδιάσει με την βοήθεια του προγράμματος Simulink της Matlab και εξάγουν τα αποτελέσματά τους. Συνολικά η προσέγγιση που επιλέγουν οι ερευνητές χαρακτηρίζεται από την χρησιμοποίηση ενός αντικειμενικού παράγοντα: της ταχύτητας του χρήστη. Επιπλέον, μπορούμε να σημειώσουμε ότι εάν και δηλώνεται η πρόθεση να ληφθούν υπόψη πολλά κριτήρια που σχετίζονται με τις επιθυμίες και τις απαιτήσεις του χρήστη, εν τούτοις, μόνο το κόστος συμπεριλαμβάνεται στον σχεδιασμό τους, ενώ απουσιάζουν από την πρότασή τους ζητήματα κατανάλωσης ενέργειας τα οποία αποκτούν καίρια σημασία σε περιβάλλοντα κίνησης του τερματικού σταθμού. Κλείνοντας σημειώνουμε ότι η προσέγγιση που ακολουθείται στην εργασία αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελεγχόμενη από τον χρήστη (MCHO/NAHO) με τις οντότητες δικτύου να αναλαμβάνουν έναν βοηθητικό ρόλο παροχής όλων των πληροφοριών που απαιτούνται ώστε να τροφοδοτηθεί η τεχνική AHP και εν συνεχεία ο υπόλοιπος μηχανισμός απόφασης και επιλογής.

Στην παραπάνω εργασία είδαμε μία υλοποίηση που χρησιμοποίησε αυτόνομα την AHP τεχνική. Όπως, όμως, επανειλημμένα έχουμε τονίσει, η AHP συχνά συνδυάζεται με άλλες τεχνικές (και αυτό είναι ένα από τα πλεονεκτήματά της). Στην [62] χρησιμοποιείται η AHP σε συνδυασμό με την τεχνική GRA (*“Grey Relational Analysis”*). Οι συγγραφείς αναπτύσσουν μία διαδικασία καθορισμού του καταλληλότερου από τρία δίκτυα μεταγωγής πακέτου (UMTS, WLAN και GPRS). Η καταλληλότητα εδώ ορίζεται με όρους προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας (QoS), επομένως επιλέγεται ως καταλληλότερο το δίκτυο που προσφέρει κάθε φορά το υψηλότερο QoS. Ειδικότερα, αρχικά καθορίζονται οι σημαντικότεροι παράμετροι που επηρεάζουν το επίπεδο QoS: η καθυστέρηση (*“delay”*), το *“jitter”*, η πιθανότητα απώλειας πακέτου (*“loss probability”*), η αξιοπιστία (*“reliability”*) και η απόδοση (*“throughput”*). Στη συνέχεια προτείνονται δύο μεθοδολογίες για την εύρεση της σχετικότητας των βαρών και της σημαντικότητας των παραγόντων αυτών. Έπειτα, χρησιμοποιείται η σχετικότητα αυτή για να τροφοδοτηθούν οι πίνακες της τεχνικής AHP. Συγκεκριμένα, από την στιγμή που η μέθοδος AHP απαιτεί την προηγούμενη γνώση της σχέσης μεταξύ των παραγόντων (κριτηρίων) που χρησιμοποιούνται, προτείνονται δύο μέθοδοι εύρεσης της σχέσης αυτής. Και οι δύο προτεινόμενες τεχνικές χρησιμοποιούν σύνολα μετρήσεων και όχι κλασικά ερωτηματολόγια. Αφού, λοιπόν, καθοριστούν πλήρως οι σχέσεις μεταξύ των κριτηρίων, τροφοδοτούνται οι πίνακες της τεχνικής AHP από τους οποίους παρέχονται τα τελικά βάρη των κριτηρίων. Εν συνεχεία τα βάρη αυτά και οι αντίστοιχες μέσες τιμές των παραγόντων QoS, εφαρμόζονται για καθένα από τα τρία διαφορετικά δίκτυα. Η κανονικοποίηση που απαιτεί η GRA, στην εργασία αυτή γίνεται τοποθετώντας τους παράγοντες στις κλίμακες *“smaller-the-better”* και *“larger-the-better”*, ανάλογα με την φύση τους. Για παράδειγμα, η καθυστέρηση εισάγεται στην πρώτη κλίμακα σε αντίθεση με την απόδοση η οποία εισάγεται στην δεύτερη. Στο τέλος, υπολογίζεται ο παράγοντας GRC και το δίκτυο με τη μεγαλύτερη τιμή του παράγοντα αυτού επιλέγεται ως η βέλτιστη λύση. Αυτή η υλοποίηση έχει ως κεντρικό άξονα τον χρήστη και τις απαιτήσεις του σε ποιότητα

υπηρεσίας, συνεπώς έχουμε μια “user-centric” θεώρηση, ενώ επιπλέον έγκειται στο σύστημα του δικτύου να αποφασίσει πιο από τα δίκτυα παρέχει το καλύτερο για το χρήστη επίπεδο QoS και άρα από αυτήν την πλευρά χαρακτηρίζεται ως μια NCHO/MAHO προσέγγιση.

Μία ακόμη εργασία όπου συνδυάζονται οι μέθοδοι AHP και GRA είναι η [65]. Οι ερευνητές προκειμένου να παράσχουν ένα αποδοτικό από την σκοπιά του χρήστη μηχανισμό απόφασης και επιλογής, συνδυάζουν την AHP με την GRA ώστε να προβούν στην βέλτιστη απόφαση. Η πρώτη τεχνική, ως γνωστόν, καθορίζει την σχέση μεταξύ των κριτηρίων και η δεύτερη στη συνέχεια κατατάσσει τα εναλλακτικά διαθέσιμα δίκτυα. Με άλλα λόγια χρησιμοποιείται η AHP για να οριστούν οι προτεραιότητες και ο βαθμός σημαντικότητας διάφορων παραγόντων σχετικών με το QoS που ο χρήστης απαιτεί και εν συνεχεία εφαρμόζεται η GRA ώστε να αποφασιστεί ποιο από τα υποψήφια δίκτυα ικανοποιεί με βέλτιστο τρόπο τις απαιτήσεις του χρήστη. Τα κριτήρια και οι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στον μηχανισμό φαίνονται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 7.), το οποίο αποτελεί την δομή της AHP τεχνικής που προτείνουν οι συγγραφείς. Αξίζει, πριν συνεχίσουμε να συζητούμε την εργασία αυτή, να μελετήσουμε προσεκτικότερα το Σχήμα 7. και το αντίστοιχο σχήμα που παραθέσαμε στην σελίδα 83 (Σχήμα 6.) μιλώντας και εκεί για υλοποίηση με χρήση της ίδιας τεχνικής. Στο πρώτο επίπεδο, όπου τοποθετείται ο στόχος στο διπλανό σχήμα φαίνεται να καταλαμβάνει το QoS, ενώ στο προηγούμενο σχήμα υπήρχε το “βέλτιστο” δίκτυο. Η σημαντική αυτή διαφορά έγκειται ακριβώς στον τρόπο χρήσης της AHP. Ανατρέχοντας στην εργασία που σχετίζεται με το σχήμα της σελίδας 83,



Σχήμα 7. Δομή τεχνικής AHP με στόχο τον καθορισμό των σχετικών με το QoS κριτηρίων

βλέπουμε ότι οι ερευνητές εκεί χρησιμοποίησαν αυτοτελώς την AHP ως την μοναδική τεχνική στον μηχανισμό απόφασης και επιλογής που προτείνουν. Αυτός είναι ο λόγος που τοποθετούν στο πρώτο επίπεδο ακριβώς το ζητούμενο του συνόλου του μηχανισμού: το βέλτιστο δίκτυο. Στην εργασία που μελετούμε τώρα, η τεχνική AHP χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλες μεθοδολογίες. Αποτελεί, λοιπόν, εδώ ένα μέρος του συνολικού μηχανισμού. Και μάλιστα, εκείνο το μέρος κατά το οποίο καθορίζεται η σχετικότητα των κριτηρίων και των βαρών τους, ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο παρεχόμενο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Στόχος, δηλαδή, της AHP στην εργασία αυτή είναι το καταλληλότερο επίπεδο QoS και αυτός είναι ο λόγος που η ιεραρχική δομή και ο στόχος είναι διαφορετικές από την προσέγγιση του σχήματος της σελίδας 83 (Σχήμα 6.).

Συνεχίζοντας την συζήτηση στην εργασία που μελετούμε και βλέποντας το Σχήμα 7., κατανοούμε ότι υπάρχουν πάρα πολλά σε αριθμό κριτήρια και παράγοντες, όλα σχετικά με το

QoS. Περαιτέρω μελέτη του σχήματος<sup>153</sup> μας οδηγεί και σε ένα είδος κατηγοριοποίησης, με πρώτο επίπεδο την ποιότητα υπηρεσίας, δεύτερο επίπεδο τους παράγοντες που επηρεάζουν το QoS και τέλος σε τρίτο επίπεδο τα γενικά στοιχεία από τα οποία επηρεάζεται κάθε παράγοντας. Στο τέλος της δομής τοποθετούνται τα υποψήφια εναλλακτικά δίκτυα πρόσβασης που στην περίπτωση που μελετούμε είναι το δίκτυο πρόσβασης 802.11 (WLAN) και το UMTS. Ο συνολικός μηχανισμός που προτείνουν οι συγγραφείς αποτελείται από τρία μέρη: συλλογή δεδομένων, επεξεργασία δεδομένων και απόφαση. Δύο τύποι δεδομένων συλλέγονται: τα δεδομένα που σχετίζονται με τον χρήστη και τα δεδομένα που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Τα σχετικά με τον χρήστη δεδομένα χρησιμεύουν ως είσοδος στην τεχνική AHP, και από την τεχνική αυτή εν συνεχεία προέρχονται τα γενικά βάρη  $GW$  των παραγόντων του δευτέρου επιπέδου και τα τοπικά βάρη  $LW$  των στοιχείων του τρίτου επιπέδου. Έτσι, τα τελικά βάρη των κριτηρίων  $W$  είναι η σύνθεση των τοπικών και των αντίστοιχων γενικών βαρών. Αντίστοιχα τα δεδομένα που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των δικτύων κανονικοποιούνται με την βοήθεια της τεχνικής GRA σύμφωνα με δύο κλίμακες: “larger-the-better” και “smaller-the-better” (η κλίμακα “nominal-the-best” δε χρησιμοποιείται). Στη συνέχεια με την βοήθεια των βαρών  $W$  που καθορίστηκαν πρωτίτερα από την τεχνική AHP, προχωρούμε στον υπολογισμό του παράγοντα GRC. Το δίκτυο με την μεγαλύτερη τιμή αυτού του παράγοντα επιλέγεται για μεταπομπή. Κλείνοντας την αναφορά μας σε αυτή την υλοποίηση, μπορούμε να πούμε ότι κρίνοντας από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται και το στήσιμο του μηχανισμού συνάγεται ασφαλώς το συμπέρασμα ότι η λύση που προτείνεται κινείται στο χώρο της “user-centric” λογικής. Επιπλέον, από τον τρόπο κατάστρωσης του μηχανισμού, αλλά κυρίως από την ενσωμάτωση του μηχανισμού στα επίπεδα της στοιβάδας πρωτοκόλλων που προτείνουν οι ερευνητές, βάσιμα υποθέτουμε ότι η παρούσα είναι μία MCHO/NAHO προσέγγιση του προβλήματος ANS.

#### 4.3.4 Συμπεράσματα από την χρήση των τεχνικών MCDM

Κλείνοντας την αναφορά στην χρήση των τεχνικών MCDM, είναι σημαντικό να συνοψίσουμε τα κυριότερα σημεία. Έτσι, αρχικά πρέπει να γίνει πλήρες κατανοητό ότι οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται αυτούσιες και αυτόνομες σε κάποιες από τις υλοποιήσεις. Είδαμε, όμως, ότι η πλειοψηφία των ερευνητών τις εφαρμόζει στις υλοποιήσεις σε συνδυασμό με τεχνικές που προέρχονται από άλλες μεθοδολογίες. Είδαμε, για παράδειγμα, την υλοποίηση της TOPSIS με χρήση Ασαφούς λογικής ή την υλοποίηση της AHP σε συνδυασμό με την GRA. Αφήνοντας πίσω την ενότητα των τεχνικών MCDM, δε σημαίνει ότι δεν θα τις συναντήσουμε ξανά στο παρόν κεφάλαιο. Παρακάτω, θα δούμε και άλλες υλοποιήσεις που στον μηχανισμό τους συμπεριλαμβάνουν τις τεχνικές που είδαμε στην ενότητα αυτήν.

Κάποιοι ερευνητές προσπάθησαν να συγκρίνουν τεχνικές MCDM. Σε μία τέτοια εργασία<sup>154</sup> οι συγγραφείς προχωρούν στην σύγκριση τριών τεχνικών, των SAW, TOPSIS και GRA. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης έδειξαν μια παρόμοια απόδοση των δύο πρώτων τεχνικών, ενώ η τεχνική GRA παρέχει ελαφρώς υψηλότερο εύρος ζώνης και χαμηλότερη

<sup>153</sup> Q. Song, A. Jamalipour, “A Network Selection Mechanism for Next Generation Networks”, IEEE, in Proc. of 2005 IEEE International Conference on Communications, 2005. ICC 2005. vol. 2 pp. 1418-1422.

<sup>154</sup> E. Stevens-Navarro, V. Wong, “Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks”, in Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), 2006. vol. 2, pp. 947-951.

καθυστέρηση για τις διαδραστικές και προσκηνιακές διαδικτυακές κινήσεις φορτίου. Η AHP χρησιμοποιήθηκε και στις τρεις τεχνικές για τον καθορισμό των βαρών που απαιτείται για τον ορισμό της σχετικότητας της σημαντικότητας κάθε κριτηρίου που χρησιμοποιείται. Τέλος, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και οι τρεις αλγόριθμοι εξαρτούν την απόδοσή τους από τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη στην λύση του προβλήματος. Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξε μία ακόμη εργασία<sup>155</sup>.

#### 4.4 υλοποιήσεις με χρήση βελτιστοποίησης

Συνεχίζουμε το “ταξίδι” μας στην σχετική με το θέμα μας βιβλιογραφία, εξετάζοντας στο σημείο αυτό υλοποιήσεις όπου χρησιμοποιούνται τεχνικές που πηγάζουν από την μεθοδολογία των βελτιστοποιήσεων.

##### 4.4.1 Υλοποίηση με τον αλγόριθμο Knapsack

Ξεκινώντας από τις τεχνικές Knapsack σε μία εργασία<sup>156</sup>, οι συγγραφείς αναλύουν τις επιπτώσεις της ABC προοπτικής σε ένα ασύρματο περιβάλλον όπου συνυπάρχουν δύο τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, η UMTS και η 802.11. Προσδιορίζουν τις κύριες απαιτήσεις, μελετούν σημαντικά θέματα που ανακύπτουν και σημειώνουν τους περιορισμούς που βάζουν τα σημερινά δίκτυα στην προοπτική του ABC. Εν συνεχεία, προτείνουν ένα γενικό μοντέλο που βασίζεται στην έννοια της ωφέλειας - χρησιμότητας (“*utility-based*”). Στο μοντέλο αυτό γίνεται προσπάθεια να μεγιστοποιηθεί η ωφέλεια του χρήστη μέσω της κατανομής πεπερασμένων πόρων, ώστε να καλύπτονται οι απαιτήσεις QoS των εφαρμογών, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη το κόστος που επωμίζεται ο χρήστης από αυτήν την κατανομή πόρων. Η προσέγγιση αυτή μοντελοποιείται ως ένα πρόβλημα Knapsack<sup>157</sup>. Συγκεκριμένα, το μοντέλο τους βασίζεται στις παρακάτω υποθέσεις: Κάθε εφαρμογή  $A_i$ , με  $i = \{1, 2, \dots, N\}$  του χρήστη απαιτεί για να λειτουργήσει την μεταφορά μιας “ροής” πόρων  $F(A_i) = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{iF_i}\}$ . Οι πόροι που απαιτούν οι εφαρμογές, μπορεί να στηρίζονται σε διαφορετικά επίπεδα QoS. Κάθε επίπεδο QoS αντιστοιχίζεται μοναδικά στους συνολικούς διαθέσιμους πόρους. Οι διαθέσιμοι πόροι είναι πεπερασμένοι. Η ωφέλεια της εφαρμογής είναι το σύνολο όλων των ωφελειών που προέρχονται από όλες τις ροές πόρων που διατίθενται σε αυτήν την εφαρμογή. Η ωφέλεια χρήστη είναι το σύνολο των ωφελειών όλων των ενεργών εφαρμογών που εκτελούνται. Επιπλέον, συμβολίζεται με  $Q$  ο χώρος που αντικατοπτρίζει το QoS και ως  $q$  το διάνυσμα σε αυτόν τον χώρο (πχ ένα συγκεκριμένο επίπεδο QoS) και επίσης ως  $R$  ο χώρος των διαθέσιμων συνολικών πόρων και ως  $x$  ένα διάνυσμα στον χώρο αυτόν (πχ ένα συγκεκριμένο ποσό από τους πόρους). Έτσι, η σχέση

$$q_{ij} = \{q_1^{\bar{u}}, \dots, q_{N(\bar{u})}^{\bar{u}}\}$$

<sup>155</sup> L. Wang, D. Binet, “Mobility-based Network Selection Scheme in Heterogeneous Wireless Networks”, IEEE, in Proc. of 69th Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009, pp. 1-5.

<sup>156</sup> V. Gazis, N. Alonistioti, L. Merakos, “Toward a Generic “Always Best Connected” Capability in Integrated WLAN/UMTS Cellular Mobile Networks (and Beyond)”, IEEE Wireless Communications, vol. 12, 2005, pp. 20-29.

<sup>157</sup> Για την ίδια εργασία βλ. και το V. Gazis, N. Housos, N. Alonistioti, L. Merakos. “On the Complexity of ‘Always Best Connected’ in 4G Mobile Networks”, IEEE, in Proc. of 58th Vehicular Technology Conference, 2003. VTC Fall 2003, vol. 4, pp. 2312-2316.

εκφράζει το QoS που “υπάρχει” στη ροή πόρων  $F_{i,j}$ . Στην ανωτέρω σχέση η ποσότητα  $N(i,j)$  συμβολίζει τον αριθμό των επιπέδων QoS της ροής.

Στη συνέχεια οι ερευνητές προχωρούν σε ορισμένες αντιστοιχίσεις: ποιότητα - προς - πόρους, ποιότητα - προς - ωφέλεια και πόροι - προς - κόστος και αμέσως μετά καταστρώνουν τις σχέσεις ωφέλειας εφαρμογών και χρήστη, οι οποίες παρατίθενται ενδεικτικά:

$$U(A_i) = \sum_{j=1}^{F_i} u(q_{ij}) \quad U = \sum_{i=1}^N U(A_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{F_i} u(q_{ij})$$

Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουν λίγο αργότερα να καθορίσουν την συνολική ωφέλεια (θετική ή αρνητική) με την εξής μαθηματική φόρμα:

$$u_{ij}^{marginal}(f_{ij}) = u(f_{ij}) - c(f_{ij}) = u(q_{ij}) - c(q_{ij})$$

Τέλος, αφού προχωρήσουν στην υπόθεση ότι το κόστος είναι συγκεκριμένο και σταθερό παντού, καταλήγουν τελικά στην σχέση:

$$u_{ij}^{marginal}(f_{ij}) = u^{marginal}(q_{ij})$$

Η σχέση αυτή εκφράζει την συνολική ωφέλεια του χρήστη και την οποία στην συγκεκριμένη προσέγγιση οι ερευνητές προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν.

Για να κατορθώσουν την μεγιστοποίηση της τιμής της τελευταίας σχέσης, αντιμετωπίζουν όλη την ανωτέρω κατάστρωσή τους σαν ένα πρόβλημα σακιδίου (“*Knapsack problem*”) με την εξής λογική:

- ❖ ο αριθμός των ροών αντιστοιχεί στον αριθμό των συνόλων των στοιχείων
- ❖ το “ποσό” του QoS που μεταφέρεται με κάθε ροή, αντιστοιχεί μοναδικά σε ένα στοιχείο του συνόλου το οποίο πρέπει να τοποθετηθεί στο σακίδιο
- ❖ κάθε υποψήφιο εναλλακτικό δίκτυο αντιστοιχεί σε ένα σακίδιο με συγκεκριμένη χωρητικότητα
- ❖ η συνολική ωφέλεια του χρήστη αντιστοιχεί στο κέρδος που προσπορίζεται από τα στοιχεία που είναι τοποθετημένα στο σακίδιο
- ❖ οι απαιτήσεις πόρων κάθε “ποσού” QoS αντιστοιχεί στο βάρος κάθε στοιχείου που τοποθετείται στο σακίδιο
- ❖ η επιλογή ενός επιπέδου QoS αντιπροσωπεύεται από την επιλογή ενός ακριβώς στοιχείου από κάθε σύνολο στοιχείων και την τοποθέτησή του στο σακίδιο.

Με αυτόν τον τρόπο αναζητούμε το μέγιστο δυνατό κέρδος που θα μας αποφέρει η τοποθέτηση ενός στοιχείου από κάθε διαθέσιμο σύνολο στοιχείων στο σακίδιο, χωρίς ωστόσο να παραβιαστεί η χωρητικότητά του!

Η πολυπλοκότητα των βημάτων που εκθέσαμε παραπάνω φαίνεται να είναι αυξημένη σημαντικά, γεγονός που ενδέχεται να μειώνει την αξία της τεχνικής Knapsack. Εν τούτοις,



παραμένει μία δημοφιλής τεχνική για τη λύση του ANS προβλήματος. Στο τέλος της εργασίας αυτής, οι συγγραφείς παρουσιάζουν ένα αντικειμενοστραφή μοντέλο, με την χρήση της γλώσσας UML (“*Unified Modelling Language*”), για το σύνολο του μηχανισμού, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως “*network-centric*”, αφού κάθε δίκτυο προσπαθεί να προσφέρει με όρους που αυτό ελέγχει το καλύτερο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας στο χρήστη. Τέλος, η όλη διαδικασία τοποθετείται στις οντότητες των τερματικών συσκευών, επομένως η συγκεκριμένη είναι μία MCHO προσέγγιση.

#### 4.4.2 Υλοποιήσεις με αλγορίθμους FFD & PMA

Στην [74] οι συγγραφείς μοντελοποιούν το πρόβλημα απόφασης και επιλογής ως ένα MCDAS (“*Multi-constraint dynamic access selection*”) πρόβλημα, όπως το ονομάζουν. Στην συνέχεια εφαρμόζουν μία σειρά από παραλλαγές του γνωστού FFD (“*First Fit Decreasing*”) αλγορίθμου, ώστε να λύσουν το πρόβλημα. Στην προσέγγισή τους δεν αναφέρουν αν η υλοποίησή τους είναι MCHO ή NCHO, ούτε υπάρχει στο κείμενό τους οποιαδήποτε αναφορά ή νύξη για αυτό το ζήτημα. Επιπλέον, από τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη βάσιμα υποθέτουμε ότι η πρότασή τους συγκαταλέγεται στις “*user-centric*” λύσεις. Ας ξεκινήσουμε όμως βλέποντας κάποια από τα κύρια σημεία της στρατηγικής τους. Αρχικά το πρόβλημα μοντελοποιείται μαθηματικά ως εξής: Συμβολίζουν ως  $F=f_1, f_2, \dots, f_n$  το σύνολο των ροών για κάθε υποψήφιο δίκτυο πρόσβασης και ως  $A=A_1, A_2, \dots, A_m$  το σύνολο των διαθέσιμων δικτύων. Οι ροές περιγράφονται χρησιμοποιώντας τετράδες κριτηρίων και τα δίκτυα χρησιμοποιώντας πεντάδες κριτηρίων. Επίσης, ανακαλούν και μία συνάρτηση με την οποία αντιστοιχίζουν μία ροή σε ένα δίκτυο. Καταλήγουν, λοιπόν, στην διατύπωση του εξής προβλήματος (το οποίο ονομάζουν MCDAS). Δοσμένου ενός συνόλου από ροές  $F$  της μορφής  $f_i = (ap_i, p_i, bw_i, d_i)$  και ενός σταθερού και προκαθορισμένου συνόλου δικτύων  $A$  της μορφής  $A_j = (BW_j, D_j, B_j, PT_j, PR_j)$  βρες εκείνες τις αναθέσεις (αντιστοιχίσεις) των ροών στα δίκτυα ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος και η ανικανοποίηση του χρήστη. Οι αναγνώστες αντιλαμβάνονται αμέσως την ομοιότητα της διατύπωσης του παραπάνω προβλήματος με τους αλγορίθμους bin packing που είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, λοιπόν, οι συγγραφείς εφαρμόζουν μία σειρά από αλγορίθμους bin packing, ξεκινώντας από τον απλούστερο και γνωστότερο FFD και καταλήγοντας σε περισσότερο πολύπλοκες εκδοχές του, λύνοντας ουσιαστικά ένα πρόβλημα ANS.

Στην [75] οι ερευνητές προσεγγίζουν το πρόβλημα της απόφασης και επιλογής του καταλληλότερου από τα υποψήφια δίκτυα ασύρματης πρόσβασης, συνδυάζοντας τεχνικές και μαθηματικά εργαλεία που προέρχονται από οικονομικές και κοινωνικές επιστήμες. Στην διαδικασία απόφασης και επιλογής λαμβάνονται υπόψη ένα μεγάλο εύρος από κριτήρια σχετικά με τα χαρακτηριστικά του δικτύου, τις απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας των εφαρμογών, τις επιθυμίες του χρήστη, την κατανάλωση ενέργειας και την ταχύτητα του τερματικού σταθμού κάθε δεδομένη χρονική στιγμή. Κατανοούμε, λοιπόν, την προσπάθεια των ερευνητών να συμπεριλάβουν στον μηχανισμό που προτείνουν, όσο το δυνατόν περισσότερα κριτήρια. Το γεγονός αυτό πιθανολογούμε πως οδηγεί σε κάποιας αυξημένης σημασίας πολυπλοκότητα, κάτι το οποίο όπως αναμένει να αποδειχθεί. Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπόψη όλα αυτά τα σύνολα κριτηρίων, οι συγγραφείς αναζητούν να βρουν την καταλληλότερη λύση, θεωρώντας έναν αριθμό

δικτύων που παρέχουν ασύρματη πρόσβαση σε έναν αριθμό τερματικών συσκευών. Βασιζόμενοι στον αλγόριθμο PMA που είδαμε εν τάχει στο προηγούμενο κεφάλαιο και με την βοήθεια της θεωρίας παιγνίων, προσπαθούν να βρουν το σημείο Pareto - optimal το οποίο αποτελεί και την λύση, κάτω από τις συνθήκες που διαμορφώνει η ισορροπία Nash (“*Nash Equilibrium*”) μεταξύ της ωφέλειας του χρήστη και της ωφέλειας του δικτυακού παρόχου. Από την φύση των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται στην προσέγγιση αυτή αλλά και από την ισορροπία Nash (ανάμεσα στο χρήστη και το δίκτυο) το σημείο της οποίας αναζητούμε, αντιλαμβανόμαστε πως η υλοποίηση αυτή ανήκει τόσο στην οικογένεια των “*user-centric*”, όσο και σε αυτήν του “*network-centric*”, ενώ τέλος δεν δύναται να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα για το αν η πρόταση αυτή των ερευνητών είναι μία MCHO ή NCHO προσέγγιση, καθώς δεν παρέχεται καμία σχετική πληροφορία.

#### 4.4.3 Υλοποιήσεις με χρήση MDP

Στο σημείο αυτό, πριν κλείσουμε τις αναφορές μας σε υλοποιήσεις με χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης, κρίνεται σκόπιμο να δούμε -εν τάχει- μία υλοποίηση που βασίζεται στην λεγόμενη διαδικασία απόφασης Markov (MDP - “*Markov Decision Process*”). Ο κυριότερος λόγος, πέρα από αυτόν της πληρότητας της διπλωματικής αυτής εργασίας, είναι ότι οι προσεγγίσεις που εφαρμόζουν την MDP, ενέχουν στο εσωτερικό τους τον συνδυασμό και άλλων τεχνικών και κυρίως των πολιτικών (“*policies*”). Πράγματι, ανατρέχοντας στην οικεία παράγραφο του προηγούμενου κεφαλαίου, θα δούμε ότι η ίδια η MDP απαιτεί την ύπαρξη πολιτικών. Αργότερα, θα δούμε μία ακόμη υλοποίηση που χρησιμοποιεί την semi-MDP σε συνδυασμό με έναν αριθμό άλλων τεχνικών.

Σκοπός της εργασίας των E. Navvaro, V. Wong και Y. Lin<sup>158</sup> είναι ο καθορισμός των συνθηκών κάτω από τις οποίες είναι αποδοτική μία διαδικασία κάθετης μεταπομπής. Οι συγγραφείς μοντελοποιούν το πρόβλημα ως μία διαδικασία απόφασης Markov (MDP). Καταστρώνονται και εισάγονται για αυτόν τον λόγο δύο συναρτήσεις: μία που αποκαλείται ανταμοιβή ζεύξης και σχετίζεται με την ωφέλεια που αποκομίζεται από την μεταπομπή σε μία ζεύξη και μία που αποκαλείται συνάρτηση κόστους σηματοδότησης και σχετίζεται με την επιβάρυνση του δικτύου στο οποίο γίνεται η μεταπομπή. Η λογική της στρατηγικής των ερευνητών εδράζεται στην αναζήτηση εκείνου του σημείου όπου θα μεγιστοποιείται η πρώτη συνάρτηση ταυτόχρονα με την κατά το δυνατόν ελαχιστοποίηση της δεύτερης. Με άλλα λόγια ο στόχος της MDP είναι να μεγιστοποιείται η αναμενόμενη συνολική ωφέλεια για κάθε νέα μεταπομπή. Η μαθηματική έκφραση που καταστρώθηκε είναι η εξής:

$$v(\mathbf{s}) = \max_{a \in A} \left\{ r(\mathbf{s}, a) + \sum_{\mathbf{s}' \in S} \lambda P[\mathbf{s}' | \mathbf{s}, a] v(\mathbf{s}') \right\}$$

όπου  $v(\mathbf{s})$  είναι η αναμενόμενη ωφέλεια,  $A$  ένα σύνολο που περιέχει τις πιθανές ενέργειες (πχ επιλογή ή όχι χρήσης του συγκεκριμένου δικτύου),  $r(\mathbf{s}, a)$  η συνάρτηση ανταμοιβής ζεύξης και  $P[\mathbf{s}' | \mathbf{s}, a]$  οι πιθανότητες μετάβασης του συστήματος σε μία άλλη κατάσταση. Αποτέλεσμα

<sup>158</sup> Βλ. [11] αλλά και E. S. Navvaro, V. W.S. Wong, Y. Lin, “A Vertical Handoff Decision Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks”, IEEE, in Proc. of Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2007, pp. 3199-3204.

της λύσης του προβλήματος αυτού είναι η απόκτηση μίας σταθερής και κατάλληλης πολιτικής που θα αποφασίζει πότε θα γίνεται η μεταπομπή και σε ποιο δίκτυο. Οι συγγραφείς αναφέρουν ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μηχανισμού που προτείνουν παρέχουν βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν μεθόδους SAW και GRA. Η προσέγγιση αυτή καταλήγει σε μια καθορισμένη πολιτική που θα ακολουθείται κάθε φορά που η τερματική συσκευή θα βρίσκεται στο δίλημμα της μεταπομπής από ένα δίκτυο σε ένα άλλο. Όμως, οι συγγραφείς της δεν λαμβάνουν υπόψη μερικά κρίσιμα ζητήματα που πιθανόν να οδηγούν σε μείωση της απόδοσης της πρότασής τους, είτε ακόμη και σε άρνηση μεταπομπής από τις οντότητες του δικτύου, όπως το ζήτημα της ποιότητας υπηρεσίας, η ισορροπία φορτίου στα δίκτυα, η διαχείριση και ο διαμοιρασμός των πόρων του δικτύου και γενικά θέματα που αφορούν την βέλτιστη διαχείριση του δικτυακού περιβάλλοντος.

#### 4.5 η συμβολή των πολιτικών (policies)

Όπως έχουμε αναφέρει στο τρίτο κεφάλαιο, ένα σύστημα διαχείρισης βασισμένο στην μεθοδολογία των πολιτικών, είναι εκείνο το σύστημα του οποίου η λειτουργία καθορίζεται από ένα συγκεκριμένο σύνολο από κανόνες και οδηγίες. Οι πολιτικές (policies) δεν είναι τίποτε περισσότερο από έναν αριθμό κανόνων και οδηγιών. Ένα αποδοτικό σύστημα βασισμένο στις πολιτικές θα πρέπει να διαθέτει καλά προκαθορισμένες, σταθερές και ευκρινείς κανόνες και οδηγίες, ώστε το σύστημα να παραμένει αξιόπιστο, επιδεικνύοντας σταθερότητα σε δυναμικές αλλαγές του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί. Παρακάτω θα μελετήσουμε ορισμένες υλοποιήσεις που χρησιμοποιούν πολιτικές.

Αρχικά ας εξετάσουμε μία προσέγγιση που χρησιμοποιεί δύο σύνολα πολιτικών<sup>159</sup>. Οι συγγραφείς προτείνουν ένα σύστημα όπου με την βοήθεια πολιτικών θα ελέγχεται τόσο η βέλτιστη αποδοχή αιτήσεων σύνδεσης τερματικών σταθμών σε ένα δίκτυο, όσο και η βέλτιστη απόφαση επιλογής ενός δικτύου από τερματικούς σταθμούς. Καταστρώνονται για αυτόν τον λόγο δύο πολιτικές: Η πρώτη, η πολιτική “αποδοχής κλήσεων” εκ μέρους της δικτυακής οντότητας, είναι υπεύθυνη για την κατανομή των αιτήσεων υπηρεσιών στα δίκτυα, βασιζόμενη στην υπάρχουσα κατάσταση τους με όρους φόρτου και πόρων. Η δεύτερη, η πολιτική “διαχείριση κινητικότητας”, επικεντρώνεται στην μεταπομπή μεταξύ δικτύων και συγκεκριμένα στην αρχική φάση της, με σκοπό ο χρήστης να απολαμβάνει συνεχώς ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας. Η αρχιτεκτονική της πρώτης πολιτικής περιλαμβάνει μία δομή για την καταχώρηση της χωρητικότητας και του φόρτου των δικτύων, μία δομή απόφασης (PDP - “*Policy Decision Point*”) η οποία δέχεται τα αιτήματα πρόσβασης από τον τερματικό σταθμό και αφού εκτιμήσει λαμβάνοντας υπόψη την πολιτική και τα διαθέσιμα δικτυακά χαρακτηριστικά, επιλέγει το δίκτυο πρόσβασης. Τέλος, υπάρχει και η δομή επιβολής και εκτέλεσης της απόφασης που λαμβάνεται στο PDP και η οποία ονομάζεται PEP (“*Policy Enforcement Point*”). Αντίστοιχα, οι ίδιες δομές συνθέτουν και την δεύτερη πολιτική. Μόνο που η λειτουργία των δύο πρώτων είναι σαφώς διαφορετική: Η πρώτη δομή σε αυτήν την περίπτωση καταχωρεί πληροφορίες σχετικές με το επίπεδο απόδοσης της ζεύξης και άλλες που σχετίζονται με την ποιότητα υπηρεσίας. Η

<sup>159</sup> βλ. 1) K. Murray, D. Pesch, R. Mathur, “Policy Based Mobility Management in Heterogeneous Wireless Networks for Smart Space Environment”, in Proc. of CSSN IT&T Conference, Oct. 2003.

2) K. Murray, R. Mathur, D. Pesch, “Intelligent access and mobility management in heterogeneous wireless networks using policy”, in Proc of the 1st International symposium of Information and Communication Technologies, ISICT’03, 2003. pp. 181-186.

λειτουργία του PDP διαφέρει μόνο ως προς το γεγονός ενεργοποίησής της. Ενώ στην πρώτη πολιτική ενεργοποιείται από αιτήσεις του τερματικού, σε αυτήν την πολιτική ενεργοποιείται από διάφορα κατώφλια που χρησιμοποιούνται, όπως πχ το μειωμένο QoS ή ακόμη η μη διαθεσιμότητα δικτύου. Η προσέγγιση αυτή συνδυάζει τις πολιτικές με τις τεχνικές κατωφλίων, αφού τα τελευταία χρησιμοποιούνται για να ενεργοποιηθεί η λειτουργία των πολιτικών. Γενικά, τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη αναφέρονται κυρίως σε χαρακτηριστικά δικτύων και η σχεδίαση τείνει να κινείται προς την μεριά του δικτύου, καθόσον δεν χρησιμοποιούνται κριτήρια όπως οι επιθυμίες του χρήστη, το κόστος ή η κατανάλωση ενέργειας. Μπορούμε, λοιπόν, να χαρακτηρίσουμε την προσέγγιση ως “network-centric” η οποία όμως ελέγχεται από την τερματική συσκευή, καθόσον η απόφαση για μεταπομπή λαμβάνεται από την δεύτερη πολιτική η οποία ενσωματώνεται στις τερματικές συσκευές και άρα έχουμε μία MCHO/NAHO υλοποίηση.

Στην [4] οι συγγραφείς ενσωματώνουν θέματα αυτόνομων υπολογιστικών μεθόδων (με χρήση “αυτόματων”) στο προτεινόμενο σύστημά τους που ονομάζουν (PROTON). Το σύστημα βασίζεται σε πολιτικές, ώστε να παρέχεται στους χρήστες η απαραίτητη υποστήριξη κατά την επιλογή του καταλληλότερου δικτύου. Ο κυριότερος σκοπός του PROTON έγκειται στην επιτυχής αντιμετώπιση δύο μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα τέταρτης γενιάς δικτυακά περιβάλλοντα ασύρματης πρόσβασης: την ετερογένεια και την δυναμική συμπεριφορά του περιβάλλοντος<sup>160</sup>. Για την παράκαμψη του πρώτου μειονεκτήματος οι ερευνητές προτείνουν την δημιουργία ενός μηχανισμού ικανού να αφογκράζεται και να αισθάνεται τις αλλαγές του περιβάλλοντος και τη σχεδίαση ενός μοντέλου αποτελεσματικών πολιτικών ικανού να παρέχει στις τερματικές συσκευές την απαιτούμενη ευελιξία και προσαρμοστικότητα. Επιπλέον καταστρώνουν μία ιεραρχία τριών επιπέδων των πληροφοριών περιβάλλοντος ώστε να αντεπεξέλθουν στην χαρακτηριστική δυναμικότητά του. Η αρχιτεκτονική του PROTON διαιρείται σε συστατικά που εδράζονται στο δίκτυο και συστατικά που ενσωματώνονται στην τερματική συσκευή. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται διότι μία κεντροποιημένη αρχιτεκτονική θα χαρακτηριζόταν από σημαντικά αυξημένη πολυπλοκότητα και η ευελιξία της για περαιτέρω βελτίωση μέσω πχ ενσωμάτωσης νέων πολιτικών και συστατικών, θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη. Εν τούτοις, η λειτουργικότητα του συνόλου του μηχανισμού, όπως τονίζουν οι συγγραφείς, παραμένει στην πλευρά των τερματικών συσκευών και υπό αυτήν την έννοια το σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως MCHO/NAHO. Τα συστατικά που βρίσκονται στην πλευρά του δικτύου περιέχουν στοιχεία σχετικά με τις προδιαγραφές και την ανάπτυξη των πολιτικών, ενώ αυτά που βρίσκονται στην πλευρά των χρηστών οργανώνονται σε τρία επίπεδα: διαχείριση περιεχομένου (πληροφοριών), διαχείριση πολιτικών και επίπεδο εκτέλεσης. Οι ερευνητές στο σύστημά τους χρησιμοποιούν το σχήμα ECA (“event-condition-action”) δηλαδή συμβάν - συνθήκη - πράξη κατά την σχεδίαση των προδιαγραφών των πολιτικών που χρησιμοποιούν. Σε αυτό το σχήμα οι πολιτικές είναι ουσιαστικά κανόνες που εξειδικεύουν τις πράξεις στις οποίες πρόκειται να προβεί το σύστημα, όταν ορισμένες προκαθορισμένες συνθήκες τηρούνται. Αρχικά, όμως, θα πρέπει το σύστημα να ενεργοποιηθεί, όταν κάποια συμβάντα σημειωθούν. Έγκειται στον σχεδιαστή του συστήματος να καθορίσει τα συμβάντα αυτά. Έτσι μπορούμε να ορίσουμε κάποια κατώφλια σχετικά με την ποιότητα των χαρακτηριστικών των δικτύων ή να διαμορφώσουμε μία συνάρτηση

<sup>160</sup> P. Vidales, R. Chakravorty, “PROTON: A Policy-based Solution for Future 4G devices”, in Proc. of 5th IEEE International Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks, POLICY04, 2004.

ωφέλειας, της οποίας η τιμή θα πρέπει να παραμένει μεγαλύτερη από μία ορισμένη τιμή. Ένας τέτοιος κανόνας πολιτικής φαίνεται παρακάτω:

```
inst oblig /ProtonPolicies/Obligs/CheckupPolicy {
  on PhysicalConnection(nic);
  subject /ProtonPMAs/HandoverPMA;
  target t = /ProtonTargets/HandoverExecutor;
  do t.networkSelectionEvent(nic);
  when t.isLinked(nic);
}
```

Ο συνολικός μηχανισμός κατασκευάζεται με την βοήθεια της τεχνικής “μετατροπές πεπερασμένων καταστάσεων” (FST - “*Finite State Transducers*”), η οποία αποτελείται από “αυτόματα” των οποίων οι μεταβάσεις από μία κατάσταση σε μία άλλη χαρακτηρίζονται με μοναδικό τρόπο (δηλαδή αποκτούν μία ξεχωριστή ετικέτα - όνομα). Ο χαρακτηρισμός αυτός δεν είναι τυχαίος αλλά καθορίζεται από τις ετικέτες που διαθέτει οι είσοδοι και οι έξοδοι του “αυτόματου”. Στον μηχανισμό PROTON μπορεί σχετικά εύκολα κανείς να ενσωματώσει κατώφλια ως συμβάντα ενεργοποίησης, να τροποποιήσει τα αυτόματα ώστε να μεταβαίνουν με διαφορετικό τρόπο και να λειτουργούν υπό άλλες συναρτήσεις και έτσι να προσανατολίσουμε συνολικά το σύστημα είτε προς την πλευρά του χρήστη, είτε προς την πλευρά του δικτύου. Τονίσαμε προηγουμένως ότι το σύστημα ελέγχεται από την οντότητα που βρίσκεται στην τερματική συσκευή. Αυτό όμως δεν σημαίνει κατ’ ανάγκη ότι το σύστημα είναι “*user-centric*”. Για να μπορέσουμε να προσδώσουμε σε έναν μηχανισμό τον χαρακτηρισμό του user ή network centric θα πρέπει να μελετήσουμε εις βάθος το σύστημα και να δούμε εάν αυτό λειτουργεί λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του χρήστη ή κατά κύριο λόγο τις ανάγκες του δικτύου, άσχετα από ποια οντότητα ελέγχεται η όλη διαδικασία. Στην περίπτωση που μελετούμε, λοιπόν, δεν είναι δυνατόν να προβούμε σε κανένα από τους δύο χαρακτηρισμούς, καθώς ο μηχανισμός, ανάλογα με τα κριτήρια που θα λαμβάνει υπόψη θα βρίσκεται κάθε φορά εγγύτερα είτε στον ένα είτε στον άλλο χαρακτηρισμό.

Στην εργασία [14] οι ερευνητές παρουσιάζουν τρεις διαφορετικές πολιτικές πάνω στις οποίες βασίζουν τον μηχανισμό λήψης απόφασης και επιλογής της κάθετης μεταπομπής από το υπάρχον στο βέλτιστο υποψήφιο δίκτυο πρόσβασης, υποθέτοντας την ύπαρξη δύο διαφορετικών ραδιοτεχνολογιών, του 802.11 και του UMTS. Οι πολιτικές αυτές είναι ο φόρτος της κυψέλης / κελιού, οι περιορισμοί QoS και η κινητικότητα του χρήστη. Όλες οι πληροφορίες που τροφοδοτούν τις πολιτικές αποθηκεύονται σε ένα κεντρικό σημείο της αρχιτεκτονικής των δικτύων, το οποίο οι συγγραφείς ονομάζουν SGSN (“*Serving GPRS Support Node*”). Οι πολιτικές που εισάγονται στον μηχανισμό δεν χρησιμοποιούνται με τον ίδιο τρόπο. Έτσι, η πρώτη πολιτική χρησιμεύει ως ανιχνευτής ενεργοποίησης συμβάντων, ως δηλαδή την οντότητα που θα ενεργοποιήσει το σύνολο της διαδικασίας: Όποτε ο φόρτος σε μία κυψέλη ή κελί είναι υψηλός ή για κάποιον λόγο δεν παρέχεται στον χρήστη το προσδοκώμενο επίπεδο QoS, ενεργοποιείται με την βοήθεια της πρώτης πολιτικής η διαδικασία μεταπομπής. Η δεύτερη πολιτική είναι υπεύθυνη για την επιλογή του καταλληλότερου δικτύου με όρους απαιτήσεων QoS, ενώ η τρίτη λειτουργεί ως δικλείδα ασφαλείας, αποτρέποντας συνεχόμενες μη χρήσιμες μεταπομπές (πχ όταν η ταχύτητα του χρήστη είναι αυξημένη, δεν υπάρχει λόγος να ερευνηθεί η μεταπομπή από το UMTS στο 802.11 δίκτυο, καθώς η κάλυψη του τελευταίου είναι σχετικά μικρή).

Τέλος, στην [13] οι συγγραφείς σχεδιάζουν μια στρατηγική απόφασης και επιλογής δικτύου για τα all-IP δίκτυα. Ο μηχανισμός στηρίζεται σε δύο πολιτικές οι οποίες καταστρώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συλλέγουν από το δίκτυο όλες τις κρίσιμες πληροφορίες που απαιτούνται για την λειτουργία τους, ώστε να εκτελεστεί η μεταπομπή με όσο το δυνατόν μικρότερη επιβάρυνση σε φόρτο, χρόνο και σπατάλη πόρων δικτύου. Τέτοιας φύσεως πληροφορίες είναι το QoS και το σύνολο των πληροφοριών σχετικών με την πιστοποίηση, την εξουσιοδότηση, την διαχείριση λογαριασμών και την χρέωση (AAAC - “*Authentication, Authorization, Accounting, Charging*”). Στο σημείο αυτό ας σημειώσουμε ότι και μόνο από το γεγονός ότι λαμβάνονται υπόψη τέτοιου είδους πληροφορίες μπορούμε να καταλήξουμε με ασφάλεια στο συμπέρασμα ότι ο προτεινόμενος μηχανισμός λειτουργεί εις όφελος του δικτύου, υπό την έννοια ότι επιλέγεται η καταλληλότερη με όρους δικτύου (πχ φόρτος, προσφερόμενο QoS) υποψήφια τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης. Η πρώτη πολιτική στοχεύει στην αποδοτικότερη χρήση της χωρητικότητας ενός δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη ένα κατώφλι, μία νέα αίτηση χρήστη ερευνάται για το αν θα γίνει αποδεκτή ή όχι. Η απάντηση εξαρτάται από το αν η αποδοχή του νέου χρήστη ξεπερνά ή όχι ένα συγκεκριμένο όριο φόρτου. Η διαφορά φόρτου μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση:

$$\Delta L = \frac{1}{1 + \frac{W}{v \cdot E_b/N_0 \cdot R}}$$

όπου  $W$  είναι ο αποκαλούμενος “*chip rate*”,  $R$  ο ρυθμός bit της εφαρμογής,  $E_b/N_0$  είναι η θεωρούμενη ενέργεια ανά bit χρήστη διαιρούμενη με την φασματική πυκνότητα θορύβου και  $v$  η θεωρούμενη δραστηριότητα του χρήστη (πχ υπηρεσία φωνής). Έτσι, λοιπόν, για μία συγκεκριμένη εφαρμογή ο χρήστης αν συμπεράνει την αύξηση του φόρτου στο δίκτυό του, μπορεί μέσω αυτής της σχέσης να υπολογίσει εάν το νέο υποψήφιο δίκτυο είναι λιγότερο επιβαρυνόμενο. Στους ίδιους υπολογισμούς προβαίνει από την μεριά του και το δίκτυο. Βασίζομενη στις πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί, η λειτουργία της δεύτερης πολιτικής είναι να ελέγχει όλα τα υποψήφια δίκτυα σε σχέση με διάφορα κριτήρια. Εάν περισσότερα του ενός δίκτυα ικανοποιούν τα κριτήρια, τότε θα πρέπει να γίνει μία επιλογή του πλέον καταλληλότερου δικτύου. Έτσι, στο σύνολο των κριτηρίων προσαρμόζονται βάρη και, εν συνεχεία, με τεχνικές AHP ή ασαφούς λογικής, επιτυγχάνεται η σύνθεση και η σύγκρισή τους, ώστε να βρεθεί το καταλληλότερο από όλα τα υποψήφια για μεταπομπή δίκτυα.

#### 4.6 η συμβολή της ασαφούς λογικής σε υλοποιήσεις

Στο σημείο αυτό θα μελετήσουμε δύο υλοποιήσεις. Η μία προσεγγίζει το πρόβλημα του ANS χρησιμοποιώντας αποκλειστικά την ασαφή λογική (FL - “*Fuzzy Logic*”), ενώ η δεύτερη την εντάσσει σε ένα ευρύτερο πλαίσιο στρατηγικής υλοποίησης.

Η πρώτη εργασία είναι η [33]. Σε αυτήν παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος απόφασης βασισμένος στην FL. Οι παράμετροι: ρυθμός δεδομένων, ο δείκτης λαμβανόμενης ισχύος σήματος, RSSI (“*Received Signal Strength Indicator*”) και η ταχύτητα του χρήστη λαμβάνονται υπόψιν και χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο FL σύστημα προκειμένου να αποφασιστεί εάν ο χρήστης θα προχωρήσει σε μία μεταπομπή και σε θετική περίπτωση να επιλεγεί το βέλτιστο

δίκτυο στο οποίο θα μεταπεμφθεί. Οι συγγραφείς τονίζουν ότι η υλοποίησή τους προϋποθέτει την ύπαρξη νέων SMT<sup>161</sup> (“*Smart Mobile Terminals*”) τερματικών συσκευών.

Υποθέτοντας, λοιπόν, την χρήση μίας τέτοιας συσκευής, όταν ένα νέο σημείο πρόσβασης δικτύου (AP - “*Access Point*”) είναι διαθέσιμο, η SMT λαμβάνει ένα πακέτο το οποίο στέλνεται με ευρεία εκπομπή από το AP. Από το πακέτο αυτό εξάγονται οι σχετικοί παράμετροι με τα χαρακτηριστικά του δικτύου που αναφέρθηκαν παραπάνω. Εν συνεχεία καλείται ο FL αλγόριθμος, ο οποίος λαμβάνει και επεξεργάζεται τους παράγοντες αυτούς, παράγοντας ως αποτέλεσμα μία τιμή εξόδου η οποία καλείται τιμή υποψηφιότητας AP, εν συντομία APCV (“*Access Point Candidacy Value*”). Οι τιμές των APCV γενικά αποτελούνται από έναν πραγματικό αριθμό (νούμερο) ώστε να είναι εύκολη η περαιτέρω επεξεργασία ή σύγκρισή τους. Για παράδειγμα, η τιμή τους μπορεί να κυμαίνεται από το 1 έως το 10, όπου το 1 αντιστοιχεί στο ασθενέστερο ενώ το δέκα στο ισχυρότερο επίπεδο υποψηφιότητας. Παρεμπιπτόντως, ας τονιστεί ότι όλες οι πληροφορίες που προέρχονται από το AP μαζί με την τιμή του παράγοντα APCV αποθηκεύονται στην τερματική συσκευή, για μελλοντική χρήση.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται ωστόσο υπολογιστούν τα APCV από όλα τα διαθέσιμα δίκτυα. Αμέσως μετά την ολοκλήρωσή της, οι τιμές των APCV κάθε υποψήφιου διαθέσιμου δικτύου συγκρίνονται με την τιμή του τρέχοντος δικτύου. Αν η διαφορά μεταξύ των συγκρινόμενων τιμών είναι ίση ή μεγαλύτερη από την τιμή ενός κατωφλίου (που εδώ παίζει το ρόλο της υστέρησης) η οποία ορίζεται από τον χρήστη, τότε η διαδικασία συνεχίζεται, λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα ταχύτητα χρήστη. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ακριβώς για να προληφθούν μη απαραίτητες μεταπομπές. Για παράδειγμα, αν ο χρήστης αναπτύσσει υψηλή σχετικά ταχύτητα, τότε δεν είναι συνετό να εξετάζονται ως υποψήφια, τα δίκτυα ραδιοτεχνολογίας 802.11, λόγω της περιορισμένης γεωγραφικής εμβέλειάς τους. Από τη στιγμή που εφαρμοστεί και ο παράγοντας της ταχύτητας, όσα δίκτυα παραμένουν υποψήφια κατατάσσονται ανάλογα με τις τιμές APCV. Το δίκτυο με την μεγαλύτερη τιμή APCV επιλέγεται ως το βέλτιστο και εκτελείται σε αυτό η μεταπομπή του χρήστη.

Βλέπουμε λοιπόν έναν τρόπο υλοποίησης της FL σε έναν σχετικά εύκολο μηχανισμό μεταπομπής. Δεν πρέπει να μας διαφεύγει όμως ότι η λύση που προτείνεται από τους συγγραφείς προϋποθέτει την ύπαρξη συσκευών με σαφώς εξελιγμένα χαρακτηριστικά. Επίσης, ας σημειωθεί ότι ενώ ο έλεγχος της διαδικασίας παραμένει στον χρήστη (MCHO/NAHO), εν τούτοις, η προσέγγιση που ακολουθείται χαρακτηρίζεται ως μάλλον “*network-centric*”, καθόσον τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη σχετίζονται σχεδόν αποκλειστικά με τα χαρακτηριστικά των δικτύων. Τέλος, ας μη μας διαφεύγει ότι όλες οι πληροφορίες και οι τιμές APCV αποθηκεύονται στην τερματική συσκευή του χρήστη για μελλοντική χρήση, γεγονός που προσδίδει ένα είδος μάθησης εξ εμπειρίας στο μηχανισμό μεταπομπής.

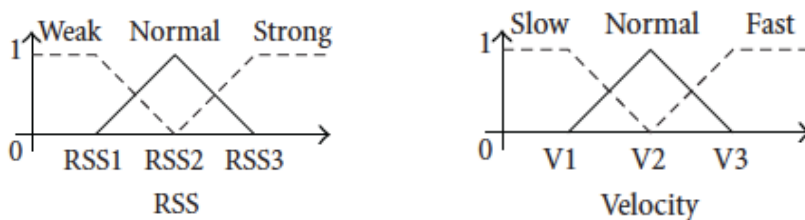
Η επόμενη εργασία που μελετούμε χαρακτηρίζεται από την συνδυαστική χρήση αρκετών διαφορετικών τεχνικών. Οι συγγραφείς<sup>162</sup> στην [10] προτείνουν ένα σύστημα βασισμένο στις πληροφορίες περιεχομένου: πολλαπλά σύνολα κριτηρίων που προέρχονται από τόσο από την πλευρά του δικτύου, όσο και από την πλευρά του χρήστη, συλλέγονται και χρησιμοποιούνται ως

<sup>161</sup> Με το θέμα των SMT βλέπε την ενότητα 2.5.2

<sup>162</sup> Βλέπε επίσης και: M. Kassar, B. Kervella, G. Pujolle, “An Intelligent Handover Management System for Future Generation Wireless Networks”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking - Intelligent Systems for Future Generation Wireless Networks, vol. 2008, art. No 6, 2008.

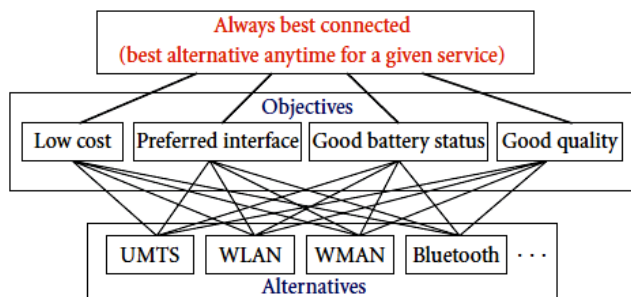
είσοδοι σε αλγορίθμους απόφασης μεταπομπής και επιλογής δικτύου. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται πολιτικές ώστε να οδηγηθούν σε ένα αποδοτικότερο μηχανισμό.

Αναλυτικότερα, τα κριτήρια που συλλέγονται κατηγοριοποιούνται σε αυτά που σχετίζονται με το δίκτυο (παράμετροι QoS, κάλυψη, αρχικό κόστος, BER κ.α.) και αυτά που σχετίζονται με τον χρήστη (προτιμήσεις, δυνατότητες τερματικής συσκευής, κατάσταση μπαταρίας συσκευής, ταχύτητα κ.α.). Το σύνολο αυτής της πληροφορίας, που οι συγγραφείς ονομάζουν (“context-aware”), παρέχεται στον υπόλοιπο μηχανισμό μέσω πολιτικών: Τα κριτήρια αυτά χρησιμεύουν ως παράμετροι στην ενεργοποίηση διάφορων πολιτικών, οι οποίες με την σειρά τους παρέχουν τους κανόνες και τις οδηγίες τους στον υπόλοιπο μηχανισμό. Σημειώνεται, ότι οι συγγραφείς χρησιμοποιούν το σχήμα “if-then” για τους κανόνες που περιγράφουν τις πολιτικές που καταστρώνουν (if συνθήκη - then ενέργεια). Το γεγονός ότι συλλέγεται ένας σημαντικά αυξημένος αριθμός συνόλων κριτηρίων καθιστά το σύστημα επεξεργασίας τους εξαιρετικά πολύπλοκο. Για να άρουν το πρόβλημα της πολυπλοκότητας, οι ερευνητές χρησιμοποιούν τον συνδυασμό των τεχνικών FL και AHP. Η χρήση της FL δεν περιορίζεται μόνο στην κύρια φάση του μηχανισμού, αλλά επεκτείνεται και στην αρχική φάση. Στην τελευταία λαμβάνονται τέσσερα κριτήρια ως “κατώφλια”: το RSS, το εύρος ζώνης, η κάλυψη του δικτύου και η ταχύτητα του χρήστη. Σε καθένα από αυτά ενσωματώνεται ένα ασαφές γλωσσικό σύνολο. Για παράδειγμα, στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 8.) ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει τα ασαφή σύνολα που ενσωματώνονται στην ταχύτητα και στο RSS. Ο συνδυασμός τους, οδηγεί στην απόφαση έναρξης της μεταπομπής ή όχι.



Σχήμα 8. Συναρτήσεις ασαφών συνόλων για το RSS και την ταχύτητα

Πριν προχωρήσουν στην τεχνική AHP, οι ερευνητές εισάγουν άλλα δύο στάδια στον μηχανισμό τους: Το πρώτο, που ονομάζεται “criteria scoring”, αποτελεί ένα στάδιο προρύθμισης, όπου καθορίζεται η σημαντικότητα κάθε συλλεγόμενου κριτηρίου σύμφωνα με τις προτιμήσεις του χρήστη. Κατά το δεύτερο στάδιο που ονομάζουν “network scoring”, όλα τα διαθέσιμα δίκτυα αξιολογούνται και συγκρίνονται με βάση τα κριτήρια του πρώτου σταδίου. Εν συνεχεία οι συγγραφείς καταστρώνουν την δομή της τεχνικής AHP (Σχήμα 9.). Η ιεραρχία της δομής αποτελείται από τρία επίπεδα: στην κορυφή βρίσκεται ο στόχος του συνεχώς συνδεδεμένου στο βέλτιστο δίκτυο, στο δεύτερο επίπεδο τοποθετούνται οι παράγοντες που χρησιμοποιούνται στην λήψη απόφασης (χαμηλό κόστος, αποδεκτή ποιότητα, προτιμήσεις, καλή κατάσταση μπαταρίας), ενώ στο κατώτερο επίπεδο βρίσκουμε τις εναλλακτικές λύσεις. Η τεχνική AHP όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι



Σχήμα 9. Δομή AHP



συγγραφείς επιλέγεται λόγω της ικανότητάς της να υπολογίζει την σχετικότητα της σημαντικότητας των παραγόντων που βρίσκονται στο δεύτερο επίπεδο της δομής. Μέσα από τρία υποστάδια της AHP καταλήγουν στην λύση του ANS προβλήματος: Αρχικά υπολογίζονται οι προτεραιότητες (τα βάρη) για κάθε παράγοντα συγκρινόμενος με όλους τους άλλους. Στην συνέχεια υπολογίζονται τα βάρη των διαθέσιμων δικτύων σε σχέση με καθένα από τους παράγοντες. Τέλος, καταστρώνεται η τελική μαθηματική σχέση, όπου για κάθε δίκτυο υπολογίζεται το συνολικό αποτέλεσμα (“score”) λαμβάνοντας υπόψιν το σύνολο των παραγόντων. Το δίκτυο με την μεγαλύτερη τιμή αποτελέσματος είναι αυτό που επιλέγεται ως βέλτιστο. Αναφορικά με την φάση της εκτέλεσης της επιλογής μεταπομπής, οι συγγραφείς προτείνουν τις λειτουργίες που προσφέρει η τεχνολογία mIP. Στην εργασία αυτή, φαίνεται ένας τρόπος συνδυασμού πολλών τεχνικών: είδαμε, για παράδειγμα, να συνδυάζεται η μέθοδος κατωφλίου με τεχνικές ασαφούς λογικής και η μεθοδολογία πολιτικών με την AHP. Η τόσο ευρεία συνδυαστική χρήση κατατάσσει στις πλέον ενδιαφέρουσες την υλοποίηση αυτή. Κλείνοντας, αξ σημειωθεί ότι ο έλεγχος του συνόλου του μηχανισμού ασκείται από την τερματική συσκευή (MCHO/NAHO) με το μέρος του δικτύου να προσφέρει τις απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται. Επίσης, από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται βάσιμα οδηγούμαστε στο συμπέρασμα της “user-centric” στρατηγικής.

#### 4.7 πράκτορες & διαπραγματεύσεις

Στο σημείο αυτό επιλέχθηκε να δοθεί μία ακόμη υλοποίηση η οποία δεν χρησιμοποιεί ως κύριο συστατικό της κάποια από τις μεθοδολογίες που είδαμε αναλυτικά στο 3ο κεφάλαιο. Στην [21] οι ερευνητές προτείνουν μία αρχιτεκτονική βασισμένη σε πράκτορες και στην αποκαλούμενη “Αγορά” (“market-place”), όπου οι χρήστες ανιχνεύουν υπηρεσίες που προσφέρουν ασύρματα δίκτυα, διαπραγματεύονται με τους παρόχους των δικτύων αυτών για ζητήματα τιμολόγησης και ποιότητας, επιλέγουν την βέλτιστη υπηρεσία και τελικά προσαρμόζουν τις τερματικές συσκευές τους ρυθμίζοντάς τις σύμφωνα με τις απαιτήσεις της επιλεγόμενης υπηρεσίας. Η αρχιτεκτονική του συστήματος περιλαμβάνει τρία επίπεδα: επίπεδο δικτύου, επίπεδο υποστήριξης κινητικότητας - συνδεσιμότητας και ένα τρίτο επίπεδο που ουσιαστικά είναι αυτό που ασχολείται με το κύριο μέρος του μηχανισμού επιλογής της καλύτερης υπηρεσίας. Το τελευταίο αυτό επίπεδο συνεργάζεται με τρεις τύπους πρακτόρων: τον πράκτορα χρήστη, τον πράκτορα αγορά και τον πράκτορα πάροχο. Οι διαπραγματεύσεις μεταξύ των πρακτόρων μπορεί να ενεργοποιούνται από τον πράκτορα είτε του παρόχου, είτε του χρήστη. Ο ρόλος της “Αγοράς” είναι να διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ πωλητών (πάροχοι) και πελατών (χρήστες). Σε κάποια απλά προβλήματα διαπραγμάτευσης πρακτόρων, απαιτούνται αποκλειστικά μόνο πράκτορες σχετικοί με πωλητές και πελάτες. Όμως, σε ένα περιβάλλον όπως το τεταρτογενές ασύρματο, θα πρέπει με κάποιο τρόπο οι “πωλητές” και οι “πελάτες” να συναντηθούν, να βρουν ο ένας τον άλλον. Αυτός είναι ο λόγος που οι συγγραφείς εισαγάγουν και τον πράκτορα “αγορά”.

Ειδικότερα, ο πράκτορας του χρήστη έχει ως κύρια αποστολή του να εξασφαλίσει τις υπηρεσίες που επιθυμεί ο χρήστης. Ως εκ τούτου, ο πράκτορας είναι εφοδιασμένος με διάφορες επιπρόσθετες λειτουργίες, όπως η επικοινωνία του με τον χρήστη, η διαπραγμάτευση με τον πάροχο, η κατάλληλη προσαρμογή της τερματικής συσκευής του χρήστη. Για τον λόγο αυτό, χωρίζεται ο πράκτορας σε τρία μέρη: τον ΤΑ (“Travel Assistant”), τον πράκτορα

διαπραγμάτευσης NA (*“Negotiation Agent”*) και το εργαλείο διαμόρφωσης CT (*“Configuration Tool”*). Ο TA είναι η διεπαφή του πράκτορα με τον χρήστη και η οντότητα με την οποία ο χρήστης ελέγχει τον πράκτορά του. Επικοινωνεί με τον χρήστη μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος GUI (*“Graphical User Interface”*) και εξουσιοδοτεί τον NA και το CT για διάφορα θέματα, ενώ επίσης είναι εκείνη η οντότητα που ελέγχει την έναρξη και την παύση του NA. Ο πράκτορας διαπραγμάτευσης είναι μία ευφυή οντότητα λογισμικού που επικοινωνεί με τον πράκτορα της αγοράς συλλέγοντας πληροφορίες για τους διαθέσιμους παρόχους και τις υπηρεσίες που αυτοί προσφέρουν. Το εργαλείο διαμόρφωσης CT λαμβάνει από το TA όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και οδηγίες, όπως χρόνος έναρξης και διάρκεια υπηρεσίας, τεχνολογία δικτύου κ.α. Εν συνέχεια με βάση τις πληροφορίες αυτές προχωρά στις απαραίτητες ρυθμίσεις της τερματικής συσκευής του χρήστη (πχ ρύθμιση της διεύθυνσης IP, κλειδιά WEP (*“Wired Equivalent Privacy”*), ονόματα χρήστη και κωδικοί). Αργότερα προχωρά στην εγκαθίδρυση των απαιτούμενων ζεύξεων.

Ο πράκτορας του παρόχου έχει ως στόχο την παροχή υπηρεσιών με τον καλύτερο δυνατό τρόπο από την σκοπιά του παρόχου τους. Κάνει γνωστή την παρουσία του στο ασύρματο περιβάλλον, μέσω της εγγραφής του στην Αγορά σύμφωνα με τους κανόνες του πράκτορα αυτής. Ο ρόλος του πράκτορα της Αγοράς είναι να φέρει κοντά τους πράκτορες του χρήστη και του παρόχου. Για αυτόν τον λόγο παρέχει ορισμένες πληροφορίες στους χρήστες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών των παρόχων και των δικτύων στα οποία ανήκουν αυτοί, όπως τεχνολογίες που υποστηρίζει, αποδεκτές μεθόδους πληρωμής κ.α. Ο πράκτορας του χρήστη εν συνέχεια αποφασίζει για τους παρόχους που θα επιλέξει. Μπορεί όμως να ενημερώσει τον χρήστη για διάφορες επιλογές που υπάρχουν σχετικά με τις παρεχόμενες υπηρεσίες, οι οποίες δεν συμπεριλαμβάνονται στις επιθυμίες και τις προτεραιότητες του χρήστη. Έτσι, μέσω του GUI εάν ο χρήστης αλλάξει τις προτιμήσεις του, τότε η ανωτέρω διαδικασία επικοινωνίας των πρακτόρων του χρήστη και της αγοράς επαναλαμβάνεται. Η προσέγγιση αυτή λαμβάνει υπόψη της ένα μεγάλο σύνολο κριτηρίων και ως προς αυτόν τον λόγο μπορεί να θεωρηθεί πλεονεκτική σε σχέση με άλλες. Επίσης, μπορεί να ρυθμιστεί με τέτοιους τρόπους ώστε είτε να αποτελεί μία λύση κεντρική ως προς τον χρήστη (*“user-centric”*) είτε ως προς το δίκτυο (*“network-centric”*). Όμως, όπως έγινε πιστευόμε κατανοητό, η οντότητα που κατέχει τον έλεγχο της διαδικασίας και στις δύο περιπτώσεις θα συνεχίζει να είναι η κινητή τερματική συσκευή. Με άλλα λόγια ο προτεινόμενος από τους συγγραφείς μηχανισμός δεν μπορεί παρά να χαρακτηριστεί ως MCHO/NAHO.

Αν και οι τεχνικές που σχετίζονται με πράκτορες και διαπραγματεύσεις μπορεί να φανούν χρήσιμες στη λύση του προβλήματος ANS, εν τούτοις, δεν υπάρχουν παρά ελάχιστες υλοποιήσεις στην βιβλιογραφία. Μία από αυτές ήταν η ανωτέρω που μόλις μελετήσαμε. Πριν κλείσουμε την παρούσα ενότητα, κρίνεται σκόπιμο να συζητήσουμε μία ακόμη υλοποίηση<sup>163</sup>. Αυτή τη φορά, όμως, οι ερευνητές χρησιμοποιούν τους πράκτορες και τις διαπραγματεύσεις συνδυαστικά με τεχνικές άλλων μεθοδολογιών. Αναπτύσσουν ένα σχήμα ευαίσθητο σε θέματα QoS που βασίζεται σε διαπραγματεύσεις. Προσπαθούν να βρουν το σημείο ισορροπίας μεταξύ της ευχαρίστησης (ωφέλειας) που απολαμβάνει ο χρήστης και της αποδοτικότητας του δικτύου. Ειδικότερα, προκειμένου να βρεθεί το καταλληλότερο δίκτυο προς μεταπομπή, καταστρώνουν μία συνάρτηση

<sup>163</sup> Q. Song, A. Jamalipour, “A quality of service negotiation-based vertical handoff decision scheme in heterogeneous wireless systems”, *European Journal of Operational Research*, vol. 191, 2008, pp. 1059- 1074.

απόφασης. Η συνάρτηση αυτή λαμβάνει υπόψιν της τα παρακάτω σύνολα κριτηρίων: προτιμήσεις του χρήστη, συνθήκες δικτύων και απαιτήσεις εφαρμογών με όρους QoS (συμπεριλαμβανομένων των RSS, εύρος ζώνης, καθυστέρηση, BER, και κόστους). Προηγουμένως, σχεδιάζεται μία μέθοδος εξερεύνησης και αναζήτησης του δικτυακού περιβάλλοντος που βασίζεται σε χρονικά διαστήματα ώστε να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Επιπλέον, ένας μηχανισμός μέτρησης του QoS ενσωματώνεται στην συνάρτηση απόφασης, ώστε να εξακριβωθεί αν το επιλεγόμενο δίκτυο είναι όντως το βέλτιστο. Οι παράγοντες της ποιότητας υπηρεσίας κανονικοποιούνται, συγκρίνονται και συνδυάζονται στο εσωτερικό της συνάρτησης, με τη βοήθεια μία λογαριθμικής μεθόδου. Τα βάρη των παραμέτρων που προκύπτουν είτε υπολογίζονται με την τεχνική AHP, είτε καθορίζονται απευθείας από τον χρήστη με τη βοήθεια ενός ερωτηματολογίου με μορφή GUI.

Όπως σε όλες τις τεχνικές της μεθοδολογίας συναρτήσεων απόφασης, έτσι και δω, το δίκτυο με την μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης προτιμάται και τοποθετείται στην κορυφή της λίστας κατάταξης των όλων των διαθέσιμων δικτύων. Με σκοπό να ληφθεί υπόψη και η πλευρά του δικτύου, η τελική απόφαση λαμβάνεται μετά από διαπραγμάτευση των δύο πλευρών: χρήστη και δικτύου. Οι κυριότεροι σκοποί της πλευράς του δικτύου μπορεί να σχετίζονται με την μεγιστοποίηση της χρήσης των πόρων ή με την μακροπρόθεσμη ωφέλεια που προσπορίζεται αυτό από την χρησιμοποίηση των πόρων του.

Το πρόβλημα μοντελοποιείται στο σημείο αυτό ως μία διαδικασία απόφασης ήμι - Markov (“*semi-MDP*”) και λύνεται με την βοήθεια των γνωστικών αλγορίθμων Q-Learning: Σε περίπτωση παραβίασης του επιπέδου QoS, η αίτηση του χρήστη (νέα αίτηση ή αίτηση μεταπομπής) απορρίπτεται. Διαφορετικά, επιλέγεται μία ενέργεια σύμφωνα με την κατάλληλη πολιτική που χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα, αν ο αποδοχέας της κλήσης διαθέτει υψηλότερη τιμή  $Q$  (“*Q-value*”) η αίτηση γίνει αποδεκτή, ενώ κρίνεται ως απορριπτέα σε αντίθετη περίπτωση. Στο τέλος, το προβλεπόμενο αποτέλεσμα αποστέλλεται στο χρήστη πληροφορώντας τον σε ποιες περιπτώσεις η αίτησή του έγινε αποδεκτή και σε ποιες όχι, ώστε ο τελευταίος να είναι σε θέση να υποθέσει βάσιμα την αναμενόμενη απάντηση τις επόμενες φορές που θα αιτηθεί νέες αιτήσεις κάτω από παρόμοιες συνθήκες.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι σε αυτήν την υλοποίηση γίνεται χρήση αρκετών τεχνικών από τις μεθοδολογίες που είδαμε: η καρδιά της σχεδίασης αποτελείται από μία συνάρτηση απόφασης. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται κατώφλια χρόνου για την ακρόαση του περιβάλλοντος, ώστε να μην σπαταλιέται άκριτα ενέργεια. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιείται στον καθορισμό των βαρών η τεχνική AHP, ενώ επίσης σχεδιάζεται μία διαδικασία Markov. Εν συνεχεία, λαμβάνει χώρα μία διαπραγμάτευση μεταξύ πρακτόρων που βρίσκονται ο ένας στην πλευρά του δικτύου και ο άλλος σε αυτήν του χρήστη, ενώ τέλος μπορούμε να βρούμε κάποια ψήγματα εμπειρικής συμπεριφοράς της τερματικής συσκευής. Η χρήση και ο συνδυασμός τόσων τεχνικών καθιστούν ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα την προσέγγιση αυτήν, όμως θα πρέπει να ερευνηθεί η πολυπλοκότητα και η επιβάρυνση που επιφέρει η λειτουργία της στο δίκτυο. Κλείνοντας, αν και κατανοείται από την παράθεση που ακολούθησε, ως αναφέρουμε ότι η πρόταση αυτή κατατάσσεται ως μία “*network-centric*” υλοποίηση.

## 4.8 Θέματα σύγκρισης & κριτικής

Έχουμε ολοκληρώσει, πλέον, την αναφορά μας και την μελέτη στις υλοποιήσεις που προτείνονται στη σχετική βιβλιογραφία. Ξεκινώντας από τις προσεγγίσεις με τις παραδοσιακές τεχνικές, συνεχίσαμε στην μελέτη κατάστρωσης συναρτήσεων απόφασης και έπειτα είδαμε πως αντιμετωπίζεται με την χρήση τεχνικών της μεθοδολογίας MCDM το πρόβλημα σύγκρισης κριτηρίων διαφορετικής φύσης. Προχωρήσαμε στη μελέτη αλγορίθμων προερχόμενων από το επιστημονικό πεδίο της βελτιστοποίησης και αμέσως μετά είδαμε υλοποιήσεις που οι συγγραφείς τους προτείνουν την χρήση πολιτικών, ασαφούς λογικής αλλά και πρακτόρων στην προσπάθειά τους να προσεγγίσουν αποδοτικά την λύση του ANS προβλήματος. Στις περισσότερες από τις υλοποιήσεις που παραθέσαμε παραπάνω, είδαμε τα κριτήρια που λαμβάνουν υπόψη αλλά και θέματα που σχετίζονται με ζητήματα ελέγχου της διαδικασίας. Παρακάτω θα προσπαθήσουμε να προβούμε σε μία σύγκριση όλων των προαναφερόμενων παραδειγμάτων. Η σύγκριση, όμως, που ακολουθεί θα γίνει πάνω σε μία διαφορετική βάση από αυτές που υπάρχουν σε άλλες εργασίες. Έτσι, λοιπόν, αφού πρώτα ορίσουμε την βάση πάνω στην οποία κατηγοριοποιούμε τις υλοποιήσεις που είδαμε, συνεχίζουμε επιχειρώντας με εποπτικό τρόπο να συγκρίνουμε τις εργασίες. Η σύγκριση και η παράθεση των εργασιών στην προτεινόμενη από μέρος μας βάση, γίνεται πέρα από την απόκτηση μιας εποπτικής και συνοπτικής εικόνας του χώρου της σχετικής βιβλιογραφίας, για έναν ακόμη σπουδαίο λόγο: μέσα από την διαφορετική κατηγοριοποίηση που προτείνουμε και την εφαρμογή της στην διαδικασία σύγκρισης, ξεπηδά η έννοια της κατάστρωσης της στρατηγικής. Ο τρόπος, δηλαδή, με τον οποίο ένας ερευνητής θα προχωρεί βήμα - βήμα, λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις και τις θέσεις του στο ζήτημα, στην σχεδίαση του δικού του τρόπου αντιμετώπισης του ANS προβλήματος.

### 4.8.1 Μία διαφορετική προσέγγιση κατηγοριοποίησης

Η πλέον κλασική και αναγνωρισμένη κατηγοριοποίηση των σχετικών εργασιών, βρίσκεται στην εργασία [10] των M. Kassar, B. Kervella, G. Pujolle. Οι προγενέστερες αυτής εργασίες στο σύνολο τους περιέχουν ψήγματα κατηγοριοποίησης και σε καμία δεν υπάρχει αναλυτική συζήτηση για το θέμα που συζητούμε στην υποενότητα αυτήν. Οι μεταγενέστερες, δε, στην πλειοψηφία τους, μόνο επιφανειακά αναφέρουν το ζήτημα, μη εισερχόμενες σε μία πραγματική μελέτη των κατηγοριών και παραπέμποντας για το θέμα στην εργασία [10].

Στην εργασία αυτήν οι συγγραφείς χρησιμοποιώντας την λέξη “στρατηγικές” προχωρούν στην κατηγοριοποίηση της σχετικής βιβλιογραφίας σε πέντε είδη: στρατηγικές βασισμένες σε συναρτήσεις απόφασης, στρατηγικές με κέντρο τον χρήστη, στρατηγικές MAD (ουσιαστικά πρόκειται για αυτό που εμείς ονομάζουμε μεθοδολογίες MCDM), στρατηγικές βασισμένες στην ασαφής λογική και τα νευρωνικά δίκτυα και τέλος σε αυτές που βασίζονται στην γνώση του περιεχομένου των πληροφοριών. Όλες οι σχετικές εργασίες σύμφωνα με τους συγγραφείς ανήκουν σε μία κατηγορία από τις προαναφερόμενες. Και συνεχίζουν, προτείνοντας την σύνθεση κάποιων από αυτές τις στρατηγικές σε ένα δικό τους σχήμα (το οποίο εκτενώς συζητήσαμε σε προηγούμενη ενότητα του κεφαλαίου αυτού). Όμως, σύμφωνα με την δική μας οπτική, η ανωτέρω προτεινόμενη κατηγοριοποίηση παρουσιάζει ένα κύριο σοβαρότατο μειονέκτημα: ορίζει ως διαφορετικές στρατηγικές ανόμοιες έννοιες και μεθοδολογίες. Για παράδειγμα, άλλο είναι να επιλέξω τεχνικές MCDM και άλλο να προσδώσω στο σύστημά μου χαρακτήρα “user-centric”.

Είναι διαφορετικό να ονομάζω την στρατηγική μου ως βασιζόμενη στην FL και διαφορετικό να χρησιμοποιώ τεχνικές FL απόφασης για την υλοποίησή της. Με άλλα λόγια, πιστεύουμε, πως οι συγγραφείς συγχέουν καταρχήν την έννοια της στρατηγικής με την έννοια της επιλογής τεχνικών από τις διαθέσιμες μεθοδολογίες για την υλοποίηση της πρότασής τους.

#### 4.8.2 Άξονες της νέας κατηγοριοποίησης

Μία στρατηγική στην δική μας οπτική, ορίζεται ως το ευρύτερο πλαίσιο στο οποίο συμπεριλαμβάνονται τόσο οι τεχνικές και οι μεθοδολογίες, όσο και ζητήματα κεντρικότητας και ελέγχου της υλοποίησής μας σε σχέση με τον χρήστη ή με το δίκτυο. Για εμάς η στρατηγική είναι το σύνολο των επιλογών που ο σχεδιαστής θα κάνει, ώστε σύμφωνα με τις προτεραιότητές του να προβεί στο σχεδιασμό του συστήματός του. Καταστρώνοντας την στρατηγική του, θα κληθεί να επιλέξει από μία γκάμα διαφορετικών μεθοδολογιών και τεχνικών, από διαφορετικής φύσεως κριτήρια, θα επιλέξει αν το σύστημά του θα είναι κεντρικοποιημένο γύρω από τον χρήστη ή το δίκτυο, θα εξετάσει ζητήματα ενέργειας και ίσως ζητήματα ευελιξίας εισάγοντας νέες τεχνικές σε τμήματα του μηχανισμού που θα σταδιακά θα κτίζει. Η δική μας κατηγοριοποίηση κινείται με βάση ακριβώς αυτούς τους άξονες. Ακολουθεί μία λεπτομερέστερη αναφορά σε αυτούς.

##### 4.8.2.1 Στόχοι & έλεγχος

Λογίζουμε ως στόχους την επιθυμία του σχεδιαστή να υλοποιήσει ένα σύστημα που θα λαμβάνει υπόψη του τον χρήστη ή το δίκτυο. Ο στόχος λοιπόν θα κινείται ανάμεσα σε αυτά τα δύο σύνορα: από την μία πλευρά είναι οι επιθυμίες και οι απαιτήσεις του χρήστη (ελαχιστοποίηση κόστους, μεγιστοποίηση λαμβανόμενης ποιότητας κ.α.) και από την άλλη οι οντότητες του δικτύου (αποδοτικότερη χρησιμοποίηση πόρων, ελαχιστοποίηση πιθανότητας άρνησης υπηρεσίας λόγω φόρτου κ.α.). Μεταξύ των δύο αυτών “άκρων” κινούνται οι υλοποιήσεις. Όταν αυτές είναι εγγύτερα στην πλευρά του χρήστη τις αποκαλούμε “*user-centric*”, ενώ όταν κλείνουν περισσότερο προς το σύστημα (δίκτυο) αποκαλούνται “*network - centric*”.

Ένα ακόμη καίριο ζήτημα στην σχεδίαση αποτελεί ο έλεγχος της διαδικασίας μεταπομπής. Όπως αναφέρθηκε και στο οικείο εδάφιο της παρούσας εργασίας (κατηγορίες μεταπομπής), ο έλεγχος μπορεί να ασκείται είτε από το δίκτυο με την βοήθεια της τερματικής συσκευής, οπότε καταλήγουμε σε NCHO/ΜΑΗΟ προσεγγίσεις, είτε από τον τερματικό σταθμό με την βοήθεια του δικτύου, οπότε οι προσεγγίσεις χαρακτηρίζονται ως MCHO/ΝΑΗΟ.

Στο σημείο αυτό οφείλουμε να σημειώσουμε την λεπτή διαφορά στις έννοιες των στόχων και των ελέγχων. Οι δύο αυτοί άξονες ουσιαστικά είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και άρα ο σχεδιαστής μπορεί κατ’ αρχήν να επιλέξει ελεύθερα έναν από τους δύο στόχους χωρίς να έχει από τα πριν επιλέξει το είδος του ελέγχου. Με άλλα λόγια, ο συνδυασμός μας οδηγεί σε τέσσερις καταστάσεις: NCHO/network, MCHO/network, NCHO/user και MCHO/user. Αυτές είναι οι δυνατές επιλογές για τον σχεδιαστή. Όμως, αυτό δε σημαίνει ότι όλες είναι αποδοτικές. Για παράδειγμα αν επιθυμούμε να καταστρώσουμε μία *user-centric* υλοποίηση, τότε δεν υπάρχει κανένας λόγος να επιλεγεί μία προσέγγιση NCHO, καθώς εάν αυτό συμβεί θα πρέπει η οντότητα που θα ασκεί τον έλεγχο και η οποία θα βρίσκεται στο δίκτυο, να λειτουργεί λαμβάνοντας υπόψη

τις επιθυμίες του άλλου “παίκτη” που εδράζονται σε άλλη οντότητα, εν προκειμένω την τερματική συσκευή του χρήστη.

#### 4.8.2.2 Μεθοδολογίες & κριτήρια

Οι επόμενοι άξονες της στρατηγικής είναι οι μεθοδολογίες και τα κριτήρια. Ανάλογα, λοιπόν, με την φύση του προβλήματος, θα επιλέξουμε ορισμένες τεχνικές από τις μεθοδολογίες που είδαμε παραπάνω. Η επιλογή μπορεί να γίνει από μία μεγάλη γκάμα τεχνικών και φυσικά μπορούν αυτές να συνδυαστούν. Έγκειται στον σχεδιαστή του συστήματος να επιλέξει εκείνες τις τεχνικές που θα καθιστούν την υλοποίησή του αποδοτική. Οι μεθοδολογίες, όπως έχουμε δει, που έχει στην διάθεσή του ο σχεδιαστής είναι η παραδοσιακή, οι συναρτήσεις απόφασης, η MCDM με τις τεχνικές τις, η θεωρία βελτιστοποίησης με τους αλγορίθμους της, η ασαφής λογική και η μεθοδολογία πολιτικών.

Το θέμα των κριτηρίων είναι λίγο περισσότερο πολύπλοκο, καθόσον στην επιλογή των συνόλων των κριτηρίων εμπλέκονται και θέματα στόχων. Εάν, για παράδειγμα, επιλεγεί μία προσέγγιση με στόχο τις ανάγκες του χρήστη, τότε και τα κριτήρια που θα ληφθούν υπόψη στην πλειοψηφία τους οφείλουν να σχετίζονται με τον χρήστη και τη συσκευή του. Επομένως, το ζήτημα της επιλογής των κριτηρίων συναρτάται με ευθύ τρόπο με την επιλογή του στόχου. Τα κριτήρια μπορεί να έχουν μία ιεραρχία, δηλαδή πολλά μαζί να ορίζουν ένα διακριτό και ανεξάρτητο σύνολο. Για παράδειγμα, η κατάσταση της μπαταρίας της συσκευής, το προφίλ του χρήστη, η κατανάλωση ενέργειας από την συσκευή, τις εφαρμογές του χρήστη και το δίκτυο ορίζουν ένα σύνολο κριτηρίων: αυτό της ενέργειας. Επιπλέον, πολλά μαζί σύνολα κριτηρίων οδηγούν στην σύνθεση μεγαλύτερων συνόλων, τα οποία τελικά αποτελούν έναν από τους άξονες της στρατηγικής. Στην ερώτηση, λοιπόν, τί είδους κριτήρια θα επιλέξω για να δημιουργήσω την δική μου στρατηγική, η απάντηση δεν θα πρέπει να είναι ούτε κριτήρια ενέργειας, ούτε η κατάσταση της μπαταρίας της συσκευής. Η επιλογή γίνεται με βάση τα σύνολα: προτιμήσεις χρήστη, χαρακτηριστικά δικτύου, δυνατότητες τερματικών, απαιτήσεις υπηρεσιών και εφαρμογών, πληροφορίες περιεχομένου. Για τις σχέσεις μεταξύ των απλών κριτηρίων, των συνόλων ομοειδών κριτηρίων και των κριτηρίων που τελικά επιλέγουμε, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο παράρτημα II της παρούσας εργασίας.

#### 4.8.2.2 Σύγχρονες απαιτήσεις

Τέλος, επιλέχθηκαν τρία ζητήματα που από την πλευρά μας θεωρούνται ως πολύ σημαντικά σε θέματα σχεδίασης μηχανισμών ANS: το ζήτημα της ενέργειας, το ζήτημα της διαπραγμάτευσης και το ζήτημα της ικανότητας μάθησης από προηγούμενες καταστάσεις. Αναφορικά με το πρώτο, αξ σημειωθεί ότι για εμάς αποτελεί κεντρικός άξονας μιας στρατηγικής και όχι απλά μόνο ένα από τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη. Θα πρέπει λοιπόν όλος ο μηχανισμός να είναι έτσι σχεδιασμένος ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας, μία σύγχρονη απαίτηση που διαπερνά όλα τα πεδία της επιστήμης. Σχετικά με τα δύο επόμενα ζητήματα αρκεί να σημειώσουμε ότι ενσωματώνοντας μηχανισμούς διαπραγμάτευσης αντιμετωπίζουμε ευκολότερα δυναμικές και απρόβλεπτες καταστάσεις, ενώ με την βοήθεια της

ικανότητας μάθησης το σύστημά μας αποκτά ένα είδος ευφυίας, πολύ χρήσιμη σε αυτοματοποιημένα περιβάλλοντα.

#### 4.8.3 Εποπτική κατηγοριοποίηση υλοποιήσεων

Στο σημείο αυτό επιχειρείται η κατηγοριοποίηση των κυριότερων από τις υλοποιήσεις που είδαμε. Για κάθε μία από αυτές αναφέρουμε τους βασικούς άξονες της στρατηγικής τους, όπως ακριβώς παραπάνω τους αναλύσαμε: τον στόχο της, το ζήτημα του ελέγχου του μηχανισμού, την μεθοδολογία στην οποία ανήκει η τεχνική ή η κύρια από τις συνδυαζόμενες τεχνικές που χρησιμοποιούνται, τα κριτήρια -ως σύνολα- που λαμβάνονται υπόψιν στην καθεμία προσέγγιση, εάν αντιμετωπίζονται με ευρύτερο τρόπο τα θέματα ενέργειας και τέλος αναφέρεται η ύπαρξη ή όχι μηχανισμών διαπραγμάτευσης και ικανότητας μάθησης. Ο πίνακας που προκύπτει<sup>164</sup> παρουσιάζεται στο παράρτημα ΙΙΙ στο τέλος της εργασίας αυτής. Παρατίθεται όμως -σε μικρότερες διαστάσεις- για λόγους ευκολίας ακριβώς παρακάτω (Πίνακας 8.).

| ref. No [ ] | Objectives / Control                      | Decision Criteria  | Methodology               | Power Efficiency | Negotiation          | Learning               |
|-------------|---|--|---------------------------|------------------|----------------------|------------------------|
| 4           | network centric / MCHO                    | Network characteristics<br>Terminal capabilities   | policies (PROTO1)         | X                | X                    | X                      |
| 10          | user centric / MCHO                       | User preferences<br>Network characteristics  | MCDM (AHP) & Fuzzy Sets   | X                | X                    | X                      |
| 11 & 114    | network centric / ?                       | Network characteristics  | Optimization (MDP)        | X                | X                    | X                      |
| 13          | user centric / MCHO                       | Network characteristics<br>Application requirements  | Policies                  | X                | X                    | X                      |
| 14          | network centric / NCHO                    | network characteristics<br>Contextual Info   | Policies                  | X                | X                    | X                      |
| 21          | both user & network centric / MCHO - NAHO | User preferences<br>Network characteristics<br>Terminal capabilities                             | Policies                  | X                | ✓<br>(fully)         | X                      |
| 33          | network centric / MCHO                    | network characteristics<br>Contextual Info   | Fuzzy Logic               | X                | X                    | ✓<br>(extra limited)   |
| 46 & 103    | user centric / MCHO                       | User preferences<br>Network characteristics  | DF (consumer surplus)     | X                | X                    | X                      |
| 62          | user centric / MCHO                       | Network characteristics<br>Application requirements  | MCDM (AHP/GRA)            | X                | X                    | X                      |
| 75          | both user & network centric / ?           | User preferences<br>Network characteristics<br>Terminal capabilities                             | Optimization (PMA)        | X                | ✓<br>(extra limited) | X                      |
| 96          | network centric / MCHO                    | Network characteristics  | MCDM (FSR TOPSIS)         | ✓                | X                    | X                      |
| 100         | user centric / MCHO                       | User preferences<br>Network characteristics<br>Application requirements                          | DF                        | ✓                | X                    | X                      |
| 101         | user centric / MCHO                       | User preferences<br>Network characteristics<br>Terminal capabilities                             | DF (utility functions)    | ✓                | X                    | X                      |
| 102         | network centric / NCHO                    | Network characteristics<br>Application requirements  | DF (system profit)        | X                | X                    | X                      |
| 104         | user centric / MCHO                       | User preferences<br>Network characteristics<br>Terminal capabilities                             | DF & Fuzzy Logic          | ✓                | X                    | X                      |
| 105         | user centric / MCHO - NAHO                | Network characteristics<br>Terminal capabilities<br>User preferences                             | MCDM (TOPSIS)             | X                | X                    | X                      |
| 107         | user centric / MCHO - NAHO                | User preferences<br>Network characteristics<br>Contextual Info                                   | MCDM (AHP)                | X                | X                    | X                      |
| 112         | network centric / NCHO                    | User preferences<br>Network characteristics<br>Application requirements                          | Optimization (Knapsack)   | X                | X                    | X                      |
| 118         | network centric / NCHO                    | User preferences<br>Network characteristics<br>Application requirements<br>Terminal capabilities | optimization (semi - MDP) | X                | ✓<br>(limited)       | ✓<br>(operator's side) |

Πίνακας 8.  
στρατηγικές επιλογές υλοποιήσεων

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, πιστεύουμε ότι έγινε πλήρως κατανοητό στον αναγνώστη το πόσο σημαντικό γεγονός αποδεικνύεται η εξ' αρχής κατάστρωση μιας στρατηγικής. Ουσιαστικά, το στάδιο αυτό της σχεδίασης είναι το σημαντικότερο καθώς ακριβώς εδώ θα γίνουν όλες εκείνες

<sup>164</sup> Βλ. ανάλογο πίνακα στο [2], όπου περιέχονται, όμως, λιγότερες βιβλιογραφικές αναφορές

οι κρίσιμες επιλογές: Γνωρίζοντας τις προδιαγραφές του συστήματός του, ο σχεδιαστής θα πρέπει να προβεί σε κρίσιμες αποφάσεις.

Αρχικά, λοιπόν, θα πρέπει να αποφασιστεί ο πρώτος άξονας: ο στόχος. Πού θα στοχεύει το σύστημα που θα υλοποιηθεί; Που θα δοθεί περισσότερο βάρος; στην πλευρά του χρήστη ή του δικτύου. Μόλις απαντηθούν τέτοιας φύσεως ερωτήματα και επιλεγεί ο στόχος, αμέσως ανακύπτει το ζήτημα των κριτηρίων: Ποια κριτήρια επιθυμώ και ποια οφείλω να λάβω υπόψη, με δεδομένη την επιλογή στόχου; Εν συνεχεία και ανάλογα με το πλήθος των κριτηρίων που έχουν επιλεγεί, ο σχεδιαστής προχωρά στον συνδυασμό διάφορων τεχνικών από διάφορες μεθοδολογίες. Με διαφορετικό τρόπο χειρίζονται τα κριτήρια οι παραδοσιακές μέθοδοι και με διαφορετικό οι μέθοδοι MCDM. Τι θα ήταν χρησιμότερο με όρους απλότητας, ευελιξίας, απόδοσης για κάθε στάδιο του μηχανισμού; Περαιτέρω, αποφασίζεται εάν θα ενσωματωθούν επιπλέον επιλογές όπως θέματα ενέργειας και τεχνικές διαπραγμάτευσης και μάθησης. Τέλος, ανάλογα με όλες τις παραπάνω επιλογές, ο σχεδιαστής θα πρέπει να προβεί και σε μία τελευταία: από ποιόν θα ασκείται ο τελικός έλεγχος του μηχανισμού; Που θα βρίσκεται η δομή που θα ελέγχει τον μηχανισμό; στον χρήστη ή στο δίκτυο (MCHO/NCHO); και επιπλέον, στην έτερη οντότητα που δε θα ασκεί τον έλεγχο θα δοθεί κάποιος βοηθητικός ρόλος (MAHO/NAHO)

Τα στάδια της κατάστρωσης της στρατηγικής φαίνονται σχηματικά στο Παράρτημα IV. Εδώ, αξ σημειωθεί ότι για κάθε στάδιο ο σχεδιαστής καλείται να προβεί σε επιλογές και αποφάσεις, ανάλογα με τις δικές του απαιτήσεις.



---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

# στρατηγική & υλοποίηση

---

**Το** κεφάλαιο αυτό χωρίζεται σε δύο μεγάλα και διακριτά μέρη: στο πρώτο συζητούμε την διαδικασία κατάστρωσης της δικής μας στρατηγικής. Σύμφωνα με αυτά που προαναφέρθηκαν, μελετούμε βήμα - βήμα τις επιλογές στις οποίες προβαίνουμε και τις αποφάσεις τις οποίες καλούμαστε να λάβουμε. Στο δεύτερο μέρος, καταστρώνουμε μία πρώτη, απλή, στα μέτρα και τα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας, υλοποίηση και σχολιάζουμε τα αποτελέσματά της. Είναι σημαντικό να τονιστεί σε αυτό το σημείο, ότι η υλοποίηση αφορά ένα αρκετά απλοποιημένο σε σχέση με την στρατηγική μας, σχήμα. Δεν παύει, όμως, να αποτελεί ένα μέρος της. Μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις τις οποίες σαφώς δέχεται, θα συζητηθούν στα πλαίσια του τελευταίου κεφαλαίου.

## 5.1 κατάσταση στρατηγικής

Όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό σημείωμα της προηγούμενης σελίδας, στο σημείο αυτό θα ξεκινήσουμε την κατάσταση της στρατηγικής μας, σύμφωνα με τις προδιαγραφές που θα πρέπει να πληρούνται και τις προτεραιότητες που θεωρούμε σημαντικές να τηρούνται από έναν μηχανισμό ANS. Έως τώρα έχουμε δει με αρκετή λεπτομέρεια όλες τις πλευρές του ANS προβλήματος: Αρχικά, μελετήσαμε την φύση του προβλήματος, συζητήσαμε θέματα ειδών μεταπομπών, τις φάσεις της κάθετης μεταπομπής, τα κριτήρια που δύναται να λαμβάνονται υπόψη. Επιπλέον, παραθέσαμε μία σειρά από μεθοδολογίες, τεχνικές και αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για την λύση του προβλήματος. Στο τέλος, συζητήσαμε ορισμένες από τις αντιπροσωπευτικότερες υλοποιήσεις που υπάρχουν στην σχετική βιβλιογραφία και περαιτέρω προχωρήσαμε στην σύγκρισή τους, μέσω μιας νέας δικής μας οπτικής στο θέμα της κατηγοριοποίησης. Ο αναγνώστης, λοιπόν, έχει εφοδιαστεί, πιστεύουμε, με όλες τις απαραίτητες γνώσεις στα πλαίσια των προηγούμενων κεφαλαίων και θα είναι εύκολο να παρακολουθήσει και να κατανοήσει τις επιλογές μας.

Για να θεωρηθεί μία στρατηγική επιτυχημένη, θα πρέπει -πέρα από άλλα θέματα- να συνακολουθεί τις προτεραιότητες του σχεδιαστή. Για αυτόν το λόγο και παρατίθενται ευθύς αμέσως:

❖ Το πρώτο σημαντικό ζήτημα ανακύπτει από την ερώτηση: για ποιόν σχεδιάζεται το σύστημα; ή διαφορετικά, σε ποιόν στοχεύει το σύστημα; Θεωρούμε ότι ο μηχανισμός θα πρέπει να είναι στραμμένος στις ανάγκες, τις επιθυμίες και τις προτεραιότητες του χρήστη, ο οποίος είναι και ο τελικός καταναλωτής όλων των τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Η επιλογή αυτή δεν πηγάζει απλά από “ατομικισμό” ή την ταύτιση των σχεδιαστών με το προφίλ των χρηστών, αλλά ουσιαστικά εδράζεται στις εξής παραμέτρους: Πρώτον, ένας καταναλωτής που απολαμβάνει τις υπηρεσίες που προτιμά σύμφωνα με τις προτεραιότητές του, ένας χρήστης που οι επιθυμίες του υλοποιούνται και ένα άτομο του οποίου οι ανάγκες καλύπτονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, αποτελούν έναν ευχαριστημένο αγοραστή - πελάτη που δεν θα έχει κανέναν λόγο να αλλάξει τις καταναλωτικές προτιμήσεις του σε σχέση με τον πάροχο. Δεύτερον, ένας πάροχος που το πελατολόγιό του θα αποτελείται από ευχαριστημένους “πιστούς” χρήστες, θα μπορεί να προβαίνει σε ασφαλείς επενδύσεις (καθόσον τα έσοδά του δεν θα αναμένεται να μειώνονται λόγω αποχώρησης των χρηστών) ανάπτυξης νέων εξελιγμένων εφαρμογών. Τρίτον, ένας διαχειριστής δικτύου προτιμά να συνεργάζεται με παρόχους εύρωστους και άνετους οικονομικά, ώστε και αυτός από την μεριά του να προχωρά σε επέκταση και βελτίωση των δικτυακών του υποδομών, αλλά και στην εισαγωγή νέων καινοτόμων δικτυακών δομών. Καταλαβαίνουμε, λοιπόν, ότι ο στόχος της τοποθέτησης του χρήστη στο κέντρο του μηχανισμού (“user centric”) έχει ως αποτέλεσμα την προσπόριση σημαντικού οφέλους για όλες τις πλευρές.

❖ Σειρά έχει ο καθορισμός των κριτηρίων που θα λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία επιλογής του βέλτιστου από τα εναλλακτικά υποψήφια δίκτυα. Όπως τονίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το στάδιο αυτό είναι άρρηκτα συνδεδεμένο και σχετίζεται με ευθύ τρόπο με την προηγούμενη απόφασή μας, στο βαθμό που οι επιλογές μας ενδέχεται να μας απομακρύνουν από τον στόχο. Επομένως, στο παρόν στάδιο αρκεί να απαντήσουμε προσεκτικά στο ερώτημα: πόσα και ποια από τα κριτήρια που έχουμε την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε, θα συμπεριλάβουμε τελικά στον μηχανισμό; Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα δεν είναι

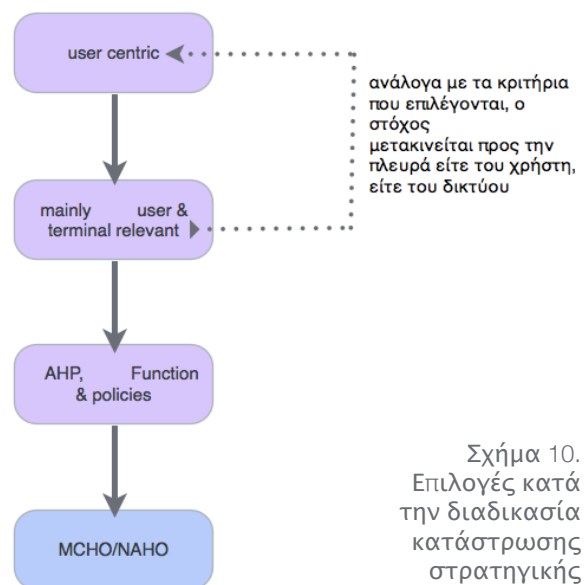
τετριμμένη, ούτε τόσο εύκολη όσο αρχικά μπορεί να υποθεθεί. Ο συνολικός αριθμός κριτηρίων έχει αντίκτυπο στην υλοποίηση του μηχανισμού, καθώς αναμένουμε μία αύξηση της πολυπλοκότητας ταυτόχρονα με την αύξηση των κριτηρίων. Ας σημειωθεί ότι η αύξηση αυτή είναι πολύ σημαντική και επιβαρύνει συνολικά το σύστημα σε περιπτώσεις χρήσης τεχνικών από τις μεθοδολογίες MCDM και βελτιστοποίησης. Επιπλέον, δεν θα εκμεταλλευτούμε όλα τα κριτήρια με τον ίδιο τρόπο. Έτσι, ξεκινώντας από το σχέδιο του παραρτήματος II και έχοντας πάντα στο νου μας τον στόχο, όπως αυτός καθορίστηκε πιο πριν, επιλέγουμε να συμπεριλάβουμε αρχικά ορισμένα κριτήρια από όλες τις κατηγορίες. Τόσο, λοιπόν, οι προτιμήσεις του χρήστη, οι δυνατότητες των τερματικών συσκευών, τα χαρακτηριστικά των δικτύων, όσο και οι πληροφορίες περιεχομένου και οι απαιτήσεις των εφαρμογών κρίνονται σημαντικά ζητήματα, τα οποία δεν μπορούν να αφήσουν αδιάφορο τον σχεδιαστή. Από αυτά όμως, κάποια είναι σημαντικότερα, σύμφωνα με τον στόχο μας. Έτσι, σημειώνουμε αρχικά την καίρια θέση που θα πρέπει να καταλαμβάνουν τα σχετικά με τον χρήστη κριτήρια: οι προτιμήσεις του και οι πληροφορίες περιεχομένου. Στην συνέχεια, επιδρούν στην τελική απόφαση με σημαντικό τρόπο κριτήρια που σχετίζονται τόσο με τις ικανότητες του τερματικού σταθμού, όσο και με τις απαιτήσεις των εφαρμογών. Τέλος, ένας ιδιαίτερος και διακριτός ρόλος αναμένεται για τα χαρακτηριστικά των δικτύων. Όπως έχει ήδη γίνει κατανοητό, όλα τα παραπάνω δεν είναι παρά σύνολα κριτηρίων (γεγονός που φαίνεται παραστατικά και στο παράρτημα II). Έγκειται στο στάδιο της υλοποίησης της στρατηγικής η εξειδικευμένη επιλογή τους. Από την παραπάνω κατάταξη και αξιολόγηση των κριτηρίων φαίνεται έκδηλα ότι η τάση της στρατηγικής μας “γέρνει” ισχυρά προς την πλευρά του χρήστη, γεγονός απόλυτα αναμενόμενο και, φυσικά, ευπρόσδεκτο. Βέβαια, το ότι συμπεριλήφθηκαν κριτήρια σχετικά με τα χαρακτηριστικά των δικτύων, μας απομακρύνει κάπως από τον χρήστη, όμως ο ιδιαίτερος ρόλος που επιφυλάσσουμε στα τελευταία, σχετικοποιεί εξαιρετικά την απομάκρυνση αυτήν.

❖ Αφού έχουμε καθορίσει τον στόχο και έχουμε επιλέξει τα σύνολα των κριτηρίων που επιθυμούμε να συμπεριληφθούν στο μηχανισμό μας, το επόμενο βήμα είναι να ασχοληθούμε με τις τεχνικές και τους αλγόριθμους που οι μεθοδολογίες επίλυσης μας προσφέρουν. Επειδή ο αριθμός των κριτηρίων που θα χρησιμοποιήσουμε είναι σημαντικά μεγάλος, τίθεται εξ' αρχής το πρόβλημα του καθορισμού της σημαντικότητας του ενός έναντι του άλλου. Εάν τα κριτήρια ήταν σαφώς λιγότερα, η εργασία αυτή θα ήταν σχετικά εύκολη, ενώ με έως τρία κριτήρια ο καθορισμός της σημαντικότητάς τους αποτελεί υπόθεση μερικών λεπτών. Όμως, η πρόσθεση και άλλων περιπλέκει σε τέτοιο βαθμό την εργασία αυτή, ώστε εξ' ορισμού να καταλήγουμε σε λύσεις τεχνικών MCDM. Επειδή, όμως, θεωρούμε ότι ακόμη και στο εσωτερικό ενός αλγορίθμου τον έλεγχο θα πρέπει να τον ασκεί ο σχεδιαστής, οδηγούμαστε στην συνδυαστική χρήση των τεχνικών της μεθοδολογίας MCDM με μεθοδολογίες συναρτήσεων απόφασης. Με άλλα λόγια χρησιμοποιούμε τεχνικές για τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων και εν συνεχεία εκμεταλλευόμαστε τα αποτελέσματά τους, λαμβάνοντάς τα υπόψιν στην συνάρτηση απόφασης που καταστρώνεται. Λεπτομέρειες για το θέμα της επιλογής μιας από τις τεχνικές της MCDM μεθοδολογίας, όπως και οι διαδικασίες κατάστρωσης της συνάρτησης, δίδονται στο στάδιο της υλοποίησης και δεν αναλύονται περαιτέρω στην παρούσα φάση. Τέλος, θα πρέπει να καθορίσουμε πως θα μεταχειριστούμε τα κριτήρια που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των δικτύων. Όπως τονίσαμε, επιφυλάσσεται ένας ιδιαίτερος ρόλος για αυτά. Καθώς ο στόχος μας είναι ισχυρά προσκολλημένος στην πλευρά του χρήστη, δεν είναι δυνατή η χρήση πολλών κριτηρίων δικτύου

στην καρδιά της επιλογής. Όμως, όπως έχουμε δει και σε διάφορες άλλες υλοποιήσεις, μπορούμε έξοχα να τα χρησιμοποιήσουμε στην αρχική φάση της απόφασης για μεταπομπή. Για να γίνει αυτό ευκολότερα διαχειρίσιμο, προσθέτουμε στις μεθοδολογίες μας και τις πολιτικές. Πρέπει, όμως, να τονιστεί ότι οι πολιτικές δεν θα χρησιμοποιούν αποκλειστικά κριτήρια σχετικά με τα χαρακτηριστικά των δικτύων. Η κατάστρωση των πολιτικών, αποτελεί και αυτή αρμοδιότητα της φάσης υλοποίησης της στρατηγικής.

❖ Ένα σημαντικό -από πλευράς αρχιτεκτονικής- θέμα είναι ο έλεγχος της διαδικασίας. Το ερώτημα που θα πρέπει να απαντηθεί τίθεται ως εξής: Σε ποια δομή, ποιας πλευράς θα τοποθετηθεί ο μηχανισμός λήψης απόφασης μεταπομπής και επιλογής δικτύου; και, στην έτερη οντότητα - πλευρά θα ανατεθεί κάποιος διακριτός ρόλος; Από τη στιγμή που έχουμε ως στόχο τον χρήστη και λαμβάνουμε έναν μεγάλο αριθμό, σχετικών με την πλευρά του, κριτηρίων θα ήταν αναπάντεχη και εξαιρετικά μη αναμενόμενη η τοποθέτηση του ελέγχου σε δικτυακές δομές. Από την άλλη μεριά όμως δεν θα πρέπει να μας διαφεύγει το γεγονός ότι χρησιμοποιούμε και κριτήρια που σχετίζονται με το δίκτυο. Έτσι, λοιπόν, καταλήγουμε στην απόφασή μας να τοποθετήσουμε τον έλεγχο του μηχανισμού στην πλευρά του τερματικού σταθμού (MCHO), υποβοηθούμενος, όμως, από την πλευρά του δικτύου (NAHO)<sup>165</sup>.

Ολοκληρώνοντας, λοιπόν, την κατάστρωση των βασικών σημείων της στρατηγικής μας, για την υλοποίηση ενός μηχανισμού απόφασης μεταπομπής και επιλογής του βέλτιστου από τα υποψήφια εναλλακτικά διαθέσιμα δίκτυα, συνοψίζουμε τα εξής: Ο μηχανισμός έχει ως στόχο του τον χρήστη, τις απαιτήσεις και τις προτιμήσεις του (“user centric”). Ο έλεγχός του τοποθετείται στην τερματική συσκευή του χρήστη με βοηθητικό ρόλο να ασκεί η οντότητα του δικτύου, καταλήγοντας σε ένα MCHO/NAHO σχήμα. Λαμβάνονται, κατά το δυνατόν και σε ισορροπία με θέματα απόδοσης και πολυπλοκότητας, αυξημένος αριθμός κριτηρίων. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται κριτήρια σχετικά με τον χρήστη, το περιβάλλον και την συσκευή του, ενώ ως λιγότερο σημαντικά -αλλά με ιδιαίτερο ρόλο- επιλέγονται κριτήρια που αφορούν τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Ο μηχανισμός χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό τριών τεχνικών: μία συνάρτηση απόφασης, εφαρμογή του αλγορίθμου AHP<sup>166</sup> για τον καθορισμό των βαρών και πολιτικές σε διάφορες μορφές και στάδια της συνολικής υλοποίησης. Οπτικά, οι επιλογές μας φαίνονται στο Σχήμα 10.



<sup>165</sup> Θέματα που σχετίζονται με τα κρίσιμα ζητήματα της διαπραγμάτευσης και της μάθησης εξ εμπειρίας και τα οποία προσδίδουν σύγχρονα χαρακτηριστικά στο σύνολο του μηχανισμού, συζητιούνται στο επόμενο κεφάλαιο ως μελλοντικές προοπτικές και προεκτάσεις.

<sup>166</sup> Ο λόγος της επιλογής της AHP αντί άλλων τεχνικών της MCDM μεθοδολογίας αναφέρεται αμέσως παρακάτω.

## 5.2 υλοποιήσεις στρατηγικής

Με βάση τις επιλογές που κάναμε στην προηγούμενη ενότητα, οφείλουμε να υλοποιήσουμε την στρατηγική μας. Στα όρια και τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δόθηκε βάρος και θεωρήθηκε σκόπιμη και προτιμότερη η ανάλυσή μας σε θέματα κατανόησης του επιστημονικού πεδίου της κάθετης μεταπομπής, παρά η εξ' αρχής υλοποίηση μιας στρατηγικής: αποτελεί ισχυρή πεποίθηση ότι η πλήρης θεωρητική εμβάθυνση είναι προαπαιτούμενη μιας καλής και αποδοτικής υλοποίησης. Αυτός είναι ο κύριος λόγος που στην εργασία αυτή παρουσιάζονται δύο απλές υλοποιήσεις και όχι η συνολική υλοποίηση της στρατηγικής μας, ζήτημα το οποίο θα μας απασχολήσει μελλοντικά. Δεν εισερχόμαστε σε σύγχρονα θέματα και σε περαιτέρω αναλύσεις, καθώς στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα παρουσιαστεί μία εφαρμογή αποκλειστικά της τεχνικής AHP και μία ακόμη που συνδυάζει μία συνάρτηση απόφασης με την τεχνική AHP και την παρουσία μιας πολιτικής. Πριν όμως ξεκινήσουμε, ας σημειώσουμε ότι οι τρεις κυριότεροι από τους λόγους που μας οδήγησαν να επιλέξουμε την AHP από το σύνολο των τεχνικών της MCDM μεθοδολογίας είναι:

- ❖ Η ικανότητα της AHP να μας παρέχει μία δομημένη ιεραρχία της πολυπλοκότητας,
- ❖ Η χρησιμοποίηση κλίμακας για τις συγκρίσεις και η δυνατότητα σύγκρισης όχι απευθείας των εναλλακτικών, αλλά των κριτηρίων που λαμβάνουμε υπόψη, και
- ❖ Η ανάλυση του προβλήματος με απλό και κατανοητό τρόπο και η επανασύνθεσή του με την βοήθεια των υπολογισμένων βαρών της σημαντικότητας των χρησιμοποιούμενων κριτηρίων.

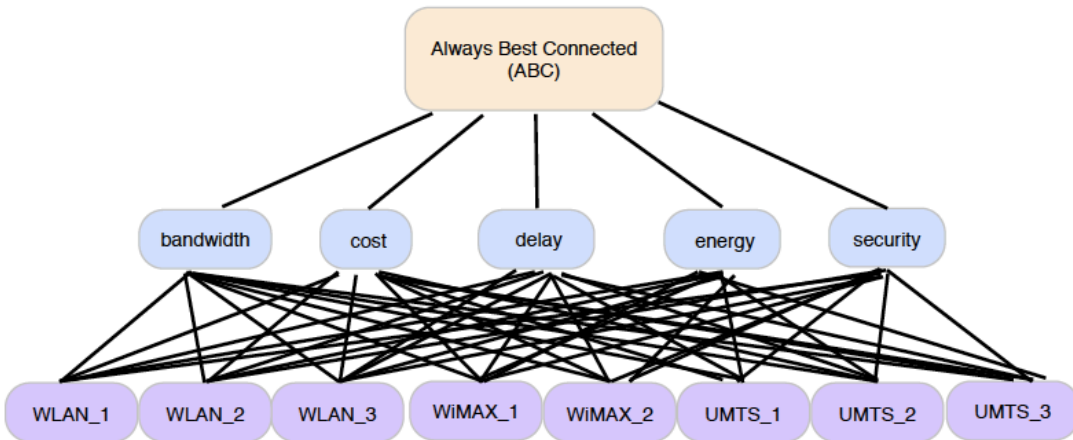
### 5.2.1 Διατύπωση του προβλήματος

Πριν δούμε τις δύο υλοποιήσεις, ας παρουσιάσουμε τα δεδομένα του προβλήματός μας: Θεωρούμε, λοιπόν, ότι έχουμε ένα περιβάλλον στο οποίο διατίθενται τρεις διαφορετικές τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης, οι 802.11, 802.16 και UMTS. Επιπλέον, θεωρούμε ότι έχουμε τρία διαφορετικά δίκτυα της πρώτης κατηγορίας, δύο διαφορετικά δίκτυα της δεύτερης κατηγορίας και τρία διαφορετικά της τρίτης. Και τα οκτώ, συνολικά, υποψήφια εναλλακτικά δίκτυα έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Λαμβάνουμε ως κριτήρια για την επιλογή μας το εύρος ζώνης, το κόστος, την καθυστέρηση, την κατανάλωση ενέργειας και το επίπεδο ασφάλειας. Ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά<sup>167</sup>, φαίνεται στο παράρτημα V. Πέρα από τα δίκτυα αυτά, ορίζουμε τέσσερις καταστάσεις ή προφίλ χρήστη: χρήση στο σπίτι (home), χρήση ενώ ο χρήστης περπατά (pedestrian), κινείται σε όχημα με χαμηλή ταχύτητα, όπως πχ κίνηση με μέσα μαζικής μεταφοράς ή κίνηση στην πόλη σε ώρες αιχμής (low-speed), και τέλος όταν ο χρήστης επιβαίνει σε όχημα που κινείται με υψηλή ταχύτητα, όπως στην περίπτωση πχ επιβατηγού αυτοκινήτου σε αυτοκινητόδρομους ή άλλες εθνικές οδικές αρτηρίες (high-speed). Τέλος, μελετούμε το αποτέλεσμα της επιλογής για τρεις διαφορετικές προτιμήσεις εφαρμογών του χρήστη: υπηρεσία φωνής (voice), υπηρεσία video και ασφαλής περιήγηση στον ιστό (secure web browsing). Αναζητούμε, λοιπόν, το βέλτιστο δίκτυο για κάθε κατάσταση και για κάθε μια από τις υπηρεσίες που επιθυμεί να έχει πρόσβαση ο χρήστης.

<sup>167</sup> Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά (bandwidth, delay, energy) προέρχονται από το [96]

5.2.2 υλοποίηση με AHP.

Αρχικά κατασκευάζουμε την ιεραρχία και την δομή του προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα εναλλακτικά δίκτυα και τα κριτήρια που χρησιμοποιούμε με στόχο την επιλογή του βέλτιστου από τα δίκτυα αυτά. Στο ανώτερο, λοιπόν, επίπεδο βρίσκουμε τον στόχο (ABC), στο αμέσως επόμενο μεσαίο επίπεδο τα κριτήρια που χρησιμοποιούμε και στο κατώτερο τρίτο επίπεδο τις εναλλακτικές προτάσεις που διαθέτουμε. Η δομή της ιεραρχίας φαίνεται σχηματικά παρακάτω:



Σχήμα 11.  
Δομή & ιεραρχία AHP στην δική μας υλοποίηση

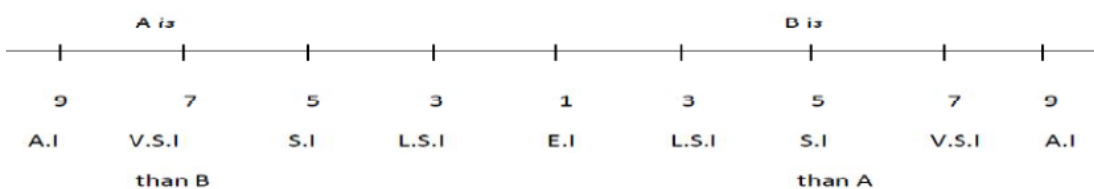
Οι συγκρίσεις που γίνονται, ακολουθούν το μοντέλο εννέα βαθμίδων. Σε κάθε πίνακα οι διαγώνιες τιμές ισούνται πάντα με την μονάδα. Γεμίζουμε μόνο το επάνω από τη διαγώνιο μέρος του πίνακα καθώς το κάτω μέρος του, προκύπτει από το πάνω σύμφωνα με την σχέση:

$$a_{ij} = 1/a_{ji}$$

Στην συνέχεια της διαδικασίας κατασκευάζουμε για κάθε κριτήριο έναν πίνακα 8x8 με την σύγκριση των δικτύων. Από τους πίνακες αυτούς υπολογίζουμε τον δείκτη συνέπειας *CI* (Consistency Index) και εν συνεχεία τον λόγο συνέπειας *CoR* (Consistency Ratio), ο οποίος δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 0.1 και δίνεται από την σχέση:

$$CR = CI/RI$$

Η κλίμακα των εννέα βαθμίδων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 12.) ενώ η τυχαία ασυνέπεια, δηλαδή η ποσότητα *RI* (Random Consistency Index) στον Πίνακα 7. της σελίδας 72.



Σχήμα 12.  
Κλίμακα σύγκρισης εννέα βαθμίδων

Οι πίνακες αυτοί, τους οποίους ονομάζουμε τύπου Α, μαζί με τις τιμές CI, CoR και τα βάρη που προκύπτουν φαίνονται στο Παράρτημα VI. Από τους πέντε αυτούς πίνακες προκύπτει ο πίνακας βαρών 8x5 των χαρακτηριστικών των δικτύων ανά κριτήριο, τον οποίο ονομάζουμε τύπου Β και παρατίθεται στο παράρτημα VII. Από τον τελευταίο πίνακα μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα, όπως την πρωτοκαθεδρία σε θέματα εύρους ζώνης των 802.11 και σε θέματα ασφάλειας των UMTS δικτύων. Εν συνεχεία, για κάθε ένα από τα διαθέσιμα προφίλ (καταστάσεις) κατασκευάζουμε τους 5x5 πίνακες για κάθε υπηρεσία. Οι πίνακες αυτοί που αφορούν τις καταστάσεις “home”, “pedestrian”, “low - speed” και “high - speed”, μαζί με τα χαρακτηριστικά τους και τα βάρη που προκύπτουν παρουσιάζονται στα παραρτήματα VIII, IX, X και XI αντίστοιχα (πίνακες τύπου Γ). Τέλος, καταστρώνονται και οι πίνακες 5x3 για κάθε προφίλ, όπου εμφανίζεται το βάρος κάθε υποψήφιου δικτύου, για κάθε υπηρεσία, σε κάθε ένα από τα διαθέσιμα προφίλ του χρήστη. Οι πίνακες αυτοί (τύπου Δ) παρουσιάζονται στο παράρτημα XII. Με κατάλληλες μαθηματικές πράξεις, καταλήγουμε στην συνέχεια στους πίνακες τελικής κατάταξης για κάθε διαφορετική κατάσταση (προφίλ). Οι πίνακες αυτοί παρατίθενται εδώ (αλλά και στο παράρτημα XIII για λόγους ευκολίας):

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (home) |       |       |                 | ΚΑΤΑΤΑΞΗ (pedestrian) |       |       |                 |
|-----------------|-------|-------|-----------------|-----------------------|-------|-------|-----------------|
| HOME            | voice | video | secure browsing | PEDESTRIAN            | voice | video | secure browsing |
| Wifi 1          | 22,22 | 22,26 | 17,32           | Wifi 1                | 19,34 | 17,23 | 11,07           |
| Wifi 2          | 20,42 | 21,45 | 18,54           | Wifi 2                | 17,64 | 16,56 | 12,40           |
| Wifi 3          | 20,00 | 22,69 | 20,32           | Wifi 3                | 17,22 | 17,42 | 13,01           |
| WiMAX 1         | 10,78 | 9,25  | 9,26            | WiMAX 1               | 10,23 | 8,94  | 8,43            |
| WiMAX 2         | 10,75 | 9,00  | 8,33            | WiMAX 2               | 9,86  | 8,17  | 6,83            |
| UMTS 1          | 4,65  | 4,34  | 6,19            | UMTS 1                | 6,70  | 7,74  | 10,68           |
| UMTS 2          | 5,13  | 4,97  | 8,59            | UMTS 2                | 8,44  | 10,44 | 15,98           |
| UMTS 3          | 6,06  | 6,07  | 11,45           | UMTS 3                | 10,57 | 13,51 | 21,60           |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (low speed) |       |       |                 | ΚΑΤΑΤΑΞΗ (high speed) |       |       |                 |
|----------------------|-------|-------|-----------------|-----------------------|-------|-------|-----------------|
| LOW SPEED            | voice | video | secure browsing | HIFH SPEED            | voice | video | secure browsing |
| Wifi 1               | 16,84 | 15,81 | 9,98            | Wifi 1                | 13,70 | 11,89 | 8,42            |
| Wifi 2               | 15,52 | 15,26 | 11,38           | Wifi 2                | 12,85 | 11,40 | 9,71            |
| Wifi 3               | 15,28 | 16,11 | 11,73           | Wifi 3                | 12,86 | 11,85 | 10,21           |
| WiMAX 1              | 9,88  | 8,7   | 8,07            | WiMAX 1               | 9,41  | 8,48  | 7,97            |
| WiMAX 2              | 9,20  | 7,72  | 6,32            | WiMAX 2               | 8,36  | 7,14  | 6,17            |
| UMTS 1               | 8,23  | 8,70  | 11,52           | UMTS 1                | 10,12 | 11,37 | 12,64           |
| UMTS 2               | 10,99 | 12,40 | 17,40           | UMTS 2                | 14,18 | 16,33 | 19,08           |
| UMTS 3               | 14,09 | 15,69 | 23,60           | UMTS 3                | 18,52 | 21,53 | 25,80           |

Πίνακας 9. Τελικές κατατάξεις AHP

Από την προσεκτική παρατήρησή τους καταλαβαίνουμε ότι τα δίκτυα 802.11 προτιμώνται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ενώ από την άλλη τα δίκτυα UMTS μόνο όταν ο χρήστης επιθυμεί αυξημένο επίπεδο ασφάλειας. Τα δίκτυα 802.16 δεν φαίνεται να προτιμώνται σε καμία

από τις περιπτώσεις. Αυτό κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στην ίδια τη φύση τους: προσπαθούν να παρομοιάσουν στα πολύ επιτυχημένα 802.11, καλύπτοντας ένα σοβαρό μειονέκτημα των τελευταίων, την μικρή περιοχή κάλυψης. Στην προσπάθεια αύξησης της γεωγραφικής κάλυψης, μειώνονται τα άλλα χαρακτηριστικά που διαθέτουν. Ο προσεκτικός αναγνώστης θα διαπιστώσει την ύπαρξη αποτελέσματος για τα δίκτυα 802.11 ακόμη και υπό συνθήκες αυξημένης ταχύτητας. Γνωρίζουμε ότι ο συνδυασμός υψηλής ταχύτητας και μικρής γεωγραφικής κάλυψης μας οδηγεί σε συνεχόμενες άχρηστες στην ουσία μεταπομπές. Το γεγονός αυτό θα έπρεπε να έχει προβλεφθεί. Αν και δεν παρουσιάζουν υψηλό σκορ, εν τούτοις δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Σε περιπτώσεις όπου δεν θα υπάρχουν κάποια άλλα δίκτυα, ίσως να αποφασιστεί (σύμφωνα πάντα με αυτά τα αποτελέσματα) μία μεταπομπή στα 802.11 ακόμη και αν κινούμαστε με μεγάλη ταχύτητα σε έναν αυτοκινητόδρομο. Τονίζουμε, όμως, ότι το σκέλος της υλοποίησης που μόλις παρουσιάσαμε ασχολείται με την αποκλειστική εφαρμογή της τεχνικής AHP και τίποτε παραπάνω. Η τεχνική αυτή μας παρέχει πολλά πλεονεκτήματα, αλλά δεν μπορεί να αντιμετωπίσει θέματα, όπως αυτό που συζητάμε εδώ. Αμέσως παρακάτω, στην υλοποίηση με συνδυασμό τεχνικών που ακολουθεί, θα δούμε έναν τρόπο να αντιμετωπίζουμε τέτοιες μη επιθυμητές καταστάσεις.

### 5.2.3 υλοποίηση με σύνθεση συνάρτησης απόφασης, AHP & πολιτικής

Στο σημείο αυτό θα δούμε μία ακόμη υλοποίηση η οποία συνθέτει την τεχνική που είδαμε παραπάνω με την κατασκευή μιας συνάρτησης απόφασης και την ύπαρξη μιας πολιτικής. Αρχικά, ας προσπαθήσουμε να καταστρώσουμε την συνάρτηση απόφασης. Από την στιγμή που χρησιμοποιούμε πέντε κριτήρια, άρα η συνάρτησή μας θα αποτελείται από το άθροισμα πέντε όρων: έναν όρο που σχετίζεται με το εύρος ζώνης ( $B_n$ ), έναν που σχετίζεται με το κόστος ( $C_n$ ), έναν με την καθυστέρηση ( $D_n$ ), τον ( $E_n$ ) που αφορά την κατανάλωση ενέργειας και τέλος τον όρο ( $S_n$ ) για το προσφερόμενο επίπεδο ασφάλειας. Ας σημειώσουμε, ότι όλα τα χαρακτηριστικά των δικτύων και σε αυτήν την υλοποίηση προέρχονται από τον ίδιο πίνακα που παρατίθεται στο Παράρτημα V. Η μόνη διαφορά έγκειται στο χαρακτηριστικό του κόστους, όπου το πολλαπλασιάζουμε με έναν παράγοντα 2, ώστε να γίνεται περισσότερο ευδιάκριτη η διαφορά του. Στη συνέχεια κατασκευάζουμε τις σχέσεις καθενός από τα ορίσματα του αθροίσματος της συνάρτησης, δίδοντας μεγάλη προσοχή στο γεγονός ότι οι τιμές τους θα πρέπει να είναι κανονικοποιημένες<sup>168</sup>:

Αρχικά, για το όρισμα του εύρους ζώνης η απαίτηση να διαθέτει μεγαλύτερο όρισμα (δηλαδή 1) το δίκτυο με το καλύτερο προσφερόμενο εύρος ζώνης, μας οδηγεί στην παρακάτω σχέση:

$$B_n = \text{Min}(b_n, B) / B.$$

όπου  $b_n$  είναι η τιμή εύρους ζώνης για κάθε  $n$  δίκτυο και  $B$  η μέγιστη τιμή εύρους ζώνης μεταξύ όλων των δικτύων και η οποία χρησιμοποιείται στην ανωτέρω σχέση ως σταθερά. Συγκεκριμένα λαμβάνει την τιμή  $B=11.000$  που προέρχεται από το τρίτο δίκτυο 802.11.

<sup>168</sup> Υποθέθηκε η παραδοχή της διακύμανσης των τιμών των ορισμάτων στο διάστημα (0,1]. Το δίκτυο με την καλύτερη απόδοση σε ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό θα λαμβάνει την τιμή 1 και τα υπόλοιπα τιμές τόσο μικρότερες όσο η σχετική διαφορά από το καλύτερης απόδοσης δίκτυο.



Αναφορικά, με το κόστος χρήστης ακολουθούμε την ίδια λογική, όμως απαιτούμε ακριβώς το αντίθετο, ως αποτέλεσμα: την μέγιστη τιμή θα πρέπει να λαμβάνουν τα δίκτυα με την χαμηλότερη χρέωση. Χρησιμοποιούμε, λοιπόν, ως σταθερά την χαμηλότερη από τις διαθέσιμες τιμές κόστους. Επειδή, όμως, αυτή είναι μηδενική, όπως φαίνεται από τον σχετικό πίνακα του παραρτήματος V, εισάγουμε -αυθαίρετα- την τιμή 0,1 και την αντικαθιστούμε στην τιμή 0. Επιπλέον, πολλαπλασιάζουμε τις υπόλοιπες (μη μηδενικές τιμές) με τον παράγοντα 2, ώστε να φαίνεται η διαφορά τους. Έτσι, η διαφοροποιημένη σχέση γίνεται:

$$C_n = C / \text{Max}(c_n, C)$$

όπου  $C_n$  είναι η τιμή κόστους για κάθε  $n$  δίκτυο και  $C$  η ελάχιστη τιμή κόστους μεταξύ όλων των δικτύων και η οποία χρησιμοποιείται στην ανωτέρω σχέση ως σταθερά. Συγκεκριμένα λαμβάνει την τιμή  $C=0,1$  που προέρχεται από όλα τα δίκτυα 802.11 και 802.16.

Ακολουθεί η σχέση του ορίσματος της καθυστέρησης, όπου τεχνική είναι ίδια με αυτήν του κόστους, χωρίς ωστόσο να “πειραχτούν” οι τιμές του πίνακα των χαρακτηριστικών:

$$D_n = D / \text{Max}(d_n, D)$$

όπου  $D_n$  είναι η τιμή καθυστέρησης για κάθε  $n$  δίκτυο και  $D$  η ελάχιστη τιμή καθυστέρησης μεταξύ όλων των δικτύων και η οποία χρησιμοποιείται στην ανωτέρω σχέση ως σταθερά. Συγκεκριμένα λαμβάνει την τιμή  $D=50$  που προέρχεται από το πρώτο δίκτυο 802.11.

Στην συνέχεια σειρά έχει το όρισμα της κατανάλωσης ενέργειας, όπως παραπάνω καταλήγουμε στην εξής σχέση:

$$E_n = E / \text{Max}(e_n, E)$$

όπου  $e_n$  είναι η τιμή ενέργειας για κάθε  $n$  δίκτυο και  $E$  η ελάχιστη τιμή ενέργειας μεταξύ όλων των δικτύων και η οποία χρησιμοποιείται στην ανωτέρω σχέση ως σταθερά. Συγκεκριμένα λαμβάνει την τιμή  $E=0.8$  που προέρχεται από το δεύτερο δίκτυο UMTS.

Τέλος, όσον αφορά το επίπεδο ασφάλειας, εδώ χρησιμοποιούμε ακριβώς την ίδια λογική που με το εύρος ζώνης:

$$S_n = \text{Min}(s_n, S) / S$$

όπου  $s_n$  είναι η τιμή του επιπέδου ασφάλειας για κάθε  $n$  δίκτυο και  $S$  η μέγιστη τιμή προσφερόμενου επιπέδου ασφάλειας μεταξύ όλων των δικτύων και η οποία χρησιμοποιείται στην ανωτέρω σχέση ως σταθερά. Συγκεκριμένα λαμβάνει την τιμή  $S=8$  που προέρχεται από το τρίτο δίκτυο UMTS.

Επειδή η φύση των κριτηρίων δεν είναι ίδια και θα πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος να μετρηθεί τόσο το κόστος όσο και η κατανάλωση ενέργειας ανάλογα με την χρήση, αποφασίστηκε η εισαγωγή ενός παράγοντα  $h$  ο οποίος αντικατοπτρίζει την διάρκεια της χρήσης σε λεπτά. Πολλαπλασιάζουμε, λοιπόν, τα ορίσματα του κόστους και της ενέργειας με την ποσότητα  $H$ , όπου:  $H = h / 60$ . Επιλέχθηκε αυτή η μορφή του πολλαπλασιαστικού παράγοντα, ώστε η μία ώρα να αντιστοιχεί με τιμή  $H$  ίση με την μονάδα, ώστε να είναι ευθέως συγκρίσιμα τα αποτελέσματα αυτής της υλοποίησης με την υλοποίηση που προηγήθηκε. Η συνάρτηση απαιτεί

την χρήση παραγόντων σε κάθε όρισμα που θα συμβολίζουν την σημαντικότητα του κάθε ενός κριτηρίου έναντι του άλλου. Ακριβώς σε αυτό το σημείο συνδυάζουμε την τεχνική της AHP με την μεθοδολογία των συναρτήσεων απόφασης. Οι πίνακες τύπου Δ που βρίσκονται στο παράρτημα XII χρησιμοποιούνται ως πολλαπλασιαστικοί παράγοντες στα ορίσματα που καθορίσαμε προηγουμένως. Ας ξαναθυμηθούμε ότι οι πίνακες τύπου Δ που προκύπτουν από την τεχνική AHP παρουσιάζουν τα βάρη κάθε ενός από τα οκτώ κριτήρια για κάθε μία από τις τρεις υπηρεσίες σε κάθε μία από τις τέσσερις καταστάσεις (προφίλ) του χρήστη. Έτσι, λοιπόν, έχουμε τέσσερις 5x3 πίνακες τύπου Δ, από τους οποίους προέρχονται οι παράγοντες  $W_B$ ,  $W_C$ ,  $W_D$ ,  $W_E$  και  $W_S$  για τα ορίσματα του εύρους ζώνης, του κόστους, της καθυστέρησης, της κατανάλωσης ενέργειας και του προσφερόμενου επιπέδου ασφάλειας αντίστοιχα. Από όλα τα παραπάνω μπορούμε να καταλήξουμε, εύκολα, πλέον, στην κατάστρωση της συνάρτησης απόφασης  $f_n$ , της οποίας η μαθηματική μορφή είναι η εξής:

$$f_n = (W_B \cdot B_n) + (H \cdot W_C \cdot C_n) + (W_D \cdot D_n) + (H \cdot W_E \cdot E_n) + (W_S \cdot S_n)$$

από την συνάρτηση αυτή ζητούμε να βρεθεί για κάθε κατάσταση - προφίλ του χρήστη (“home”, “pedestrian”, “low-speed”, “high-speed”) και κάθε υπηρεσία (“voice”, “video”, “secure browsing”) το αποτέλεσμα (σκορ) του αθροίσματος. Το δίκτυο με την μεγαλύτερη τιμή αποτελέσματος αποτελεί το βέλτιστο από όλα τα υποψήφια εναλλακτικά δίκτυα και επιλέγεται για την εκτέλεση της μεταπομπής. Για την υλοποίηση αυτή κατασκευάστηκε ένα πρόγραμμα υπολογιστή χρησιμοποιώντας την γλώσσα προγραμματισμού c++, αλλά χρησιμοποιώντας σε αυτό μόνο την δομή που προσφέρει η γλώσσα c. Δεν χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή κλάσεις. Η επιλογή της c++ και όχι από την αρχή της c έγινε με σκοπό στις μελλοντικές επεκτάσεις να χρησιμοποιηθούν όλα εκείνα τα πλεονεκτήματα του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού. Τα αποτελέσματα του προγράμματος για χρήση μιας ώρας ( $h=60 \Rightarrow H=1$ ) για κάθε κατάσταση χρήστη φαίνονται στους τέσσερις πίνακες που παρατίθενται ακριβώς παρακάτω (Πίνακες 10α & 10β).

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (home) |                |                |                 |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| HOME            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1          | <b>89,2106</b> | <b>88,1786</b> | 76,1328         |
| Wifi 2          | 87,9976        | 88,0034        | <b>79,7729</b>  |
| Wifi 3          | 84,221         | 85,4536        | 74,7832         |
| WiMAX 1         | 57,5894        | 46,6156        | 45,5804         |
| WiMAX 2         | 58,2277        | 46,9577        | 42,8369         |
| UMTS 1          | 20,9825        | 20,2078        | 24,9564         |
| UMTS 2          | 23,2189        | 22,5472        | 31,5624         |
| UMTS 3          | 23,5024        | 22,9901        | 34,2434         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (pedestrian) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| PEDESTRIAN            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | <b>77,8149</b> | 69,8711        | 52,2843         |
| Wifi 2                | 76,6192        | <b>69,8927</b> | 56,9852         |
| Wifi 3                | 73,8705        | 68,3485        | 50,3655         |
| WiMAX 1               | 52,5706        | 42,4776        | 39,898          |
| WiMAX 2               | 52,7897        | 41,899         | 35,1987         |
| UMTS 1                | 30,9547        | 35,9308        | 45,1613         |
| UMTS 2                | 35,8457        | 42,7376        | 58,29           |
| UMTS 3                | 33,9971        | 40,1338        | <b>59,1946</b>  |

Πίνακες 10α. Τελικές κατατάξεις συνάρτησης απόφασης (home & pedestrian)

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (low speed) |                |                |                 | ΚΑΤΑΤΑΞΗ (high speed) |                |                |                 |
|----------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| LOW SPEED            | voice          | video          | secure browsing | HIFH SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1               | <b>69,0038</b> | 64,4158        | 47,6766         | Wifi 1                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 2               | 68,3043        | <b>64,5954</b> | 52,7904         | Wifi 2                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 3               | 66,1581        | 63,4324        | 45,3606         | Wifi 3                | 0              | 0              | 0               |
| WiMAX 1              | 48,9333        | 39,9584        | 37,8572         | WiMAX 1               | <b>57,9642</b> | 50,2133        | 41,6989         |
| WiMAX 2              | 48,5245        | 39,0831        | 32,6316         | WiMAX 2               | 57,8623        | <b>50,5878</b> | <b>46,2081</b>  |
| UMTS 1               | 37,8519        | 40,5073        | 48,891          | UMTS 1                | 56,4985        | 49,8222        | 40,6447         |
| UMTS 2               | 44,9312        | 48,6395        | 63,3892         | UMTS 2                | 44,3227        | 37,4567        | 35,8415         |
| UMTS 3               | 41,87          | 45,1803        | <b>64,3988</b>  | UMTS 3                | 43,1449        | 35,7889        | 30,8699         |

Πίνακες 10β. Τελικές κατατάξεις συνάρτησης απόφασης (low &amp; high speed)

Παραθέτουμε μόνο τα αποτελέσματα για χρήση συνολικής διάρκειας μιας ώρας. Για 60 λεπτά χρήσης ο παράγοντας H είναι μονάδα και άρα μπορεί ευκολότερα να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά της προηγούμενης υλοποίησης. Όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται σε πίνακες στα παραρτήματα XIV έως XIX. Ο παρατηρητικός αναγνώστης αμέσως θα αντιληφθεί τις μηδενικές τιμές των δικτύων 802.11 στην κατάσταση “high - speed”. Η εμφάνιση μηδενικών τιμών οφείλεται στην εισαγωγή πολιτικής: <<όταν ο χρήστης βρίσκεται στην κατάσταση “high - speed” μη θεωρείς ως εναλλακτικές και υποψήφιες επιλογές τα δίκτυα 802.11>>. Ο λόγος που εισαγάγουμε την πολιτική αυτή έγκειται στο γεγονός ότι τα δίκτυα αυτά έχουν μικρή γεωγραφική κάλυψη. Έτσι, στις υψηλές ταχύτητες κίνησης του τερματικού σταθμού θα χρειάζεται συνεχώς αυτός να μεταπηδά από δίκτυο σε δίκτυο, αφού αναμένεται σε μερικά λεπτά της ώρας να έχει ήδη απομακρυνθεί από την κάλυψη του 802.11 δικτύου. Ο συνδυασμός δηλαδή της μικρής γεωγραφικής κάλυψης των δικτύων αυτών, με τις υψηλές ταχύτητες κίνησης του χρήστη καθιστούν απαγορευτική την μεταπομπή. Σε αντίθετη περίπτωση θα εισερχόμασταν σε έναν αριθμό άχρηστων μεταπομπών, γεγονός που αποφεύγεται με την χρήση της πολιτικής αυτής.

Με την τελευταία παρατήρηση ολοκληρώσαμε την σύνθεση τριών τεχνικών από τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες. Η αρχική επιλογή μας είναι η κατάσταση μιας συνάρτησης. Έπειτα, για τον καθορισμό των βαρών των κριτηρίων χρησιμοποιούμε την τεχνική AHP της μεθοδολογίας MCDM και επιπλέον εισάγουμε πολιτική για τον εξ' αρχής αποκλεισμό ορισμένων δικτύων από τον υπολογισμό τους, όταν ισχύουν ορισμένες συνθήκες.

### 5.3 σύγκριση & συμπεράσματα

Το πρόβλημα που προσπαθήσαμε να λύσουμε σε γενικές γραμμές αποτελεί ένα κομμάτι του προβλήματος που πρέπει να εισαχθεί στην καρδιά της ABC προοπτικής. Συγκεκριμένα, αποτελεί μέρος του ANS μηχανισμού και μάλιστα της δεύτερης φάσης του. Φυσικά, όπως τονίσαμε και παραπάνω, χρειάζεται να επεκταθεί και να βελτιωθεί, ώστε να αυξηθεί η απόδοσή του. Όμως, η στρατηγική μας, όπως αυτή έχει ήδη καταστρωθεί παραμένει η ίδια. Επιπλέον, δεν πρέπει να μας

διαφεύγει το γεγονός ότι αν και απλές, οι υλοποιήσεις μας αποτελούνται όχι μόνο από διαφορετικής τεχνολογίας δίκτυα, αλλά από ένα σύνολο υποψήφιων δικτύων στο οποίο περιέχονται τόσο διαφορετικής τεχνολογίας δίκτυα (πχ 802.11 και 802.16) όσο και ίδιας ραδιοτεχνολογίας πρόσβασης αλλά διαφορετικών προσφερόμενων χαρακτηριστικών. Έτσι καταλήγουμε σε οκτώ υποψήφια δίκτυα, αριθμός εξαιρετικά σημαντικός, γεγονός που δεν απαντάται σε δημοσιευμένες έρευνες και υλοποιήσεις. Επιπρόσθετα, λαμβάνονται υπόψη τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις στις οποίες ενδέχεται να βρεθεί ο χρήστης και σε συνδυασμό με τον αριθμό των κριτηρίων (πέντε) και των τριών διαφορετικών υπηρεσιών, καταλήγουμε σε ένα καθόλου ευκαταφρόνητο σύνολο παραγόντων το οποίο συνθέτει ένα αξιολογότατο και μη τετριμμένο πρόβλημα.

Πριν κλείσουμε το κεφάλαιο αυτό, ας συγκρίνουμε εν τάχη τις δύο υλοποιήσεις που είδαμε<sup>169</sup>. Αρχικά, λαμβάνουμε υπόψη τον πίνακα (Πίνακας 11.) που παρατίθεται παρακάτω και εμφανίζει τις βέλτιστες λύσεις για όλες τις καταστάσεις. Ως πρώτη παρατήρηση μπορούμε να διατυπώσουμε την πρωτοκαθεδρία των δικτύων 802.11: τα δίκτυα αυτά εμφανίζονται ως η

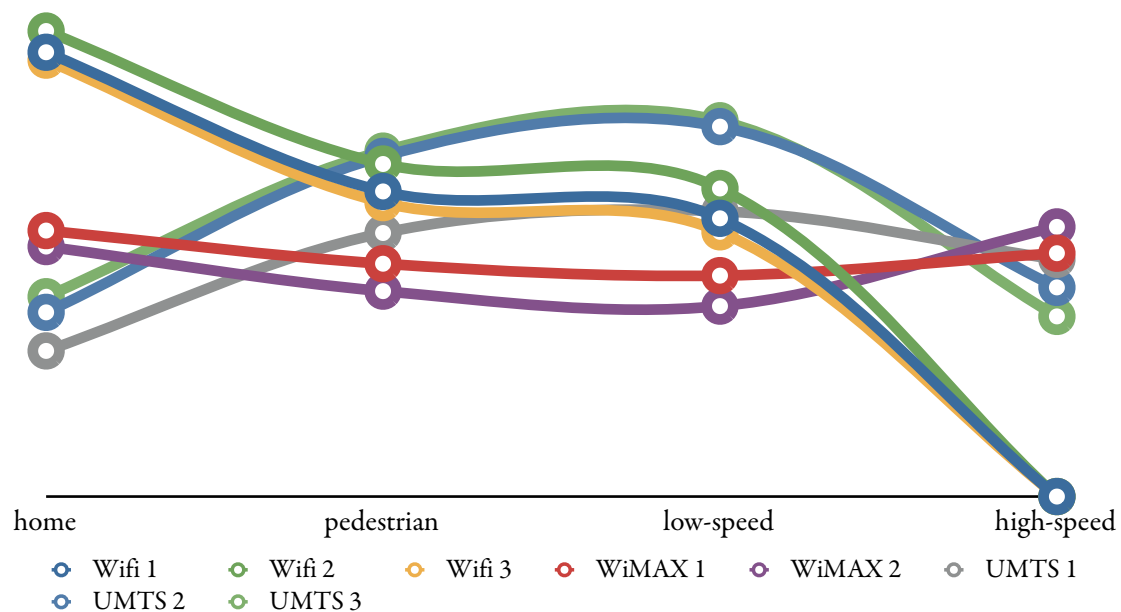
| User Profile | AHP / DF | voice   | video   | secure browsing |
|--------------|----------|---------|---------|-----------------|
| HOME         | AHP      | Wifi_1  | Wifi_3  | Wifi_3          |
|              | DF       | Wifi_1  | Wifi_1  | Wifi_2          |
| PEDESTRIAN   | AHP      | Wifi_1  | Wifi_3  | UMTS_3          |
|              | DF       | Wifi_1  | Wifi_2  | UMTS_3          |
| LOW_SPEED    | AHP      | Wifi_1  | Wifi_3  | UMTS_3          |
|              | DF       | Wifi_1  | Wifi_2  | UMTS_3          |
| HIGH_SPEED   | AHP      | UMTS_3  | UMTS_3  | UMTS_3          |
|              | DF       | WiMAX_1 | WiMAX_2 | WiMAX_2         |

Πίνακας 11. Συνολική Βέλτιστη Επιλογή

βέλτιστη επιλογή ανεξάρτητα υλοποίησης, τουλάχιστο στις υπηρεσίες “voice” και “video” και την σχετική υπερίσχυση των UMTS όταν οι χρήστες απαιτούν υψηλότερα προσφερόμενα επίπεδα ασφάλειας, όπως στις υπηρεσίες “secure browsing”. Επίσης, δεν φαίνονται για τις καταστάσεις “home”, “pedestrian” και “low - speed” ιδιαίτερες διαφορές στις δύο υλοποιήσεις. Η διαφοροποίηση των δύο υλοποιήσεων εδράζεται κυρίως στην κατάσταση “high - speed”. Σε αυτήν την κατάσταση, μάλιστα, και οι τρεις υπηρεσίες εμφανίζουν διαφορετικής τεχνολογίας δίκτυο, ως το βέλτιστο για μεταπομπή σε κάθε υλοποίηση. Έτσι, ενώ στην υλοποίηση AHP εμφανίζεται το UMTS\_3 ως το καταλληλότερο για επιλογή δίκτυο, στην υλοποίηση που βασίζεται σε συνάρτηση απόφασης, τα βέλτιστα δίκτυα είναι τα 802.16: το WiMAX\_1 για την υπηρεσία voice και το WiMAX\_2 για τις υπηρεσίες video και secure browsing.

Ας επικεντρωθούμε όμως, για λίγο, στην δεύτερη υλοποίηση, η οποία συνδυάζει στην συνάρτηση απόφασης, την τεχνική AHP και μία πολιτική. Από τους πίνακες που παρατίθενται στα παραρτήματα προέρχεται το διάγραμμα (Σχήμα 13.) της επόμενης σελίδας, στο οποίο φαίνονται τα αποτελέσματα (σκορ) για κάθε υποψήφιο δίκτυο σε κάθε κατάσταση για την υπηρεσία “secure browsing”: Είναι καταφανέστατη η επίδραση της πολιτικής στα δίκτυα 802.11

<sup>169</sup> Από τους πίνακες που παρατίθενται στα παραρτήματα ο αναγνώστης έχει την δυνατότητα να προβεί σε πλήθος συγκρίσεων. Καθώς σε μελλοντικές επεκτάσεις και βελτιώσεις του μηχανισμού που προτείνεται στην παρούσα εργασία, ενδεχομένως να οδηγημάστε σε διαφορετικές βέλτιστες λύσεις, δεν θεωρήθηκε σκόπιμο να δοθεί μία ενδελεχής σύγκριση εδώ.

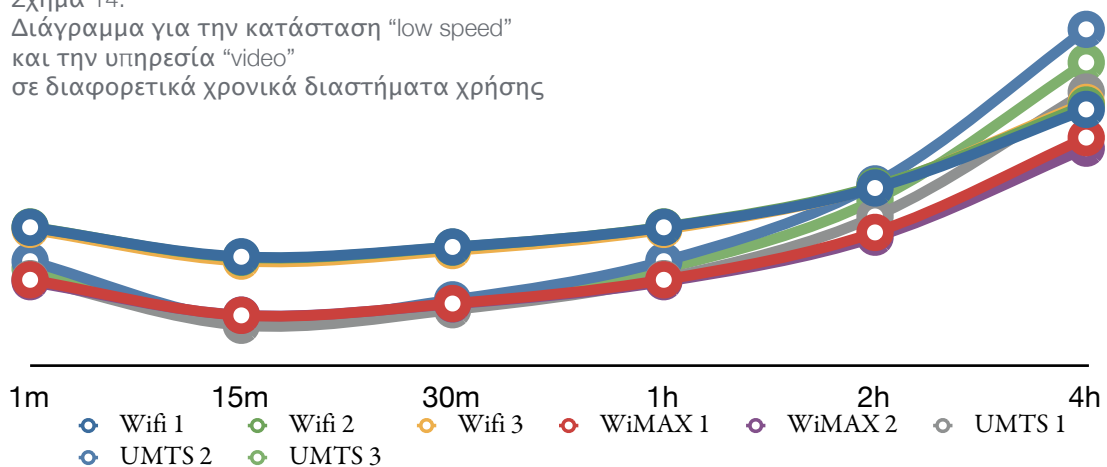


Σχήμα 13. Διάγραμμα για την υπηρεσία “secure browsing” της 2ης υλοποίησης

για την κατάσταση “high - speed”, αφού τα ανωτέρω δίκτυα λαμβάνουν μηδενική τιμή στην κατάσταση αυτή. Επίσης, φαίνεται παραστατικά η μείωση του σκορ των δικτύων αυτών καθώς από την κατάσταση “home” μεταφερόμαστε προς καταστάσεις ολοένα και αυξανόμενης κινητικότητας του τερματικού σταθμού. Μία αξιοσημείωτη σταθερότητα παρουσιάζουν τα δίκτυα 802.16, αφού οι τιμές που λαμβάνουν σε κάθε κατάσταση κυμαίνονται σε ένα σταθερό μικρό διάστημα. Τέλος, αναφορικά με τα δίκτυα UMTS φαίνεται να κυριαρχούν στις καταστάσεις “pedestrian” και “low-speed”, όπου και λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους.

Στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 14.) φαίνεται η απόδοση των υποψήφιων δικτύων στην

Σχήμα 14.  
Διάγραμμα για την κατάσταση “low speed” και την υπηρεσία “video” σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα χρήσης



κατάσταση “low - speed” για την υπηρεσία “video” για διαφορετικούς χρόνους χρήσης. Βλέπουμε ότι όσο αυξάνει ο χρόνος χρήσης, τόσο πιο “ανταγωνιστικά” γίνονται τα δίκτυα 802.16 και UMTS. Ωστόσο, τα πρώτα δεν καταφέρνουν να ξεπεράσουν τα δεύτερα στο σκορ. Μία

πιθανή εξήγηση είναι ότι η κατανάλωση ενέργειας προφανώς καταφέρνει να υπερκεράσει το κόστος των UMTS. Όσον αφορά τα δίκτυα 802.11 αποτελούν και σε αυτήν την περίπτωση τα βέλτιστα δίκτυα προς επιλογή όταν η χρήση δεν ξεπερνά την μία ώρα. Για χρήση μεγαλύτερης της μιας ώρας, φαίνεται ότι ο παράγοντας κατανάλωσης ενέργειας τα υποβιβάζει κάτω από τα δίκτυα UMTS.

Τέλος, στον πίνακα της σελίδας 115 (Πίνακας 11.) βλέπουμε ότι για καθεμία από τις δύο υλοποιήσεις η βέλτιστη λύση είναι διαφορετική για πολλές από τις ίδιες καταστάσεις και υπηρεσίες. Συγκεκριμένα, για την υπηρεσία “voice” στην κατάσταση “high - speed”, για όλες τις καταστάσεις στην υπηρεσία “video” και τέλος για τις καταστάσεις “home” και “high - speed” στην υπηρεσία “secure - browsing”. Ο αναγνώστης μπορεί να αναρωτηθεί πως είναι δυνατόν να καταλήγουν σε διαφορετικές προτάσεις βέλτιστου δικτύου δύο διαφορετικές τεχνικές, λαμβάνοντας τα ίδια δεδομένα. Πέρα από την προφανή απάντηση, ότι η δεύτερη υλοποίηση συνδυάζει και άλλες τεχνικές πέραν της ΑΗΡ, υπάρχει μία γενική παραδοξότητα στις τεχνικές και τις μεθοδολογίες που προσπαθούν να λύσουν αποφάσεις πολυκριτηριακών επιλογών. Το παράδοξο έγκειται ακριβώς στο γεγονός ότι κάθε μια από τις μεθόδους αυτές, συνήθως, καταλήγει σε διαφορετικές επιλογές. Το φαινόμενο αυτό ταυτοποιήθηκε το 1989 από τους E. Triantaphyllou και S.H. Mann<sup>170</sup> και θεωρείται ως ένα ενδογενές φαινόμενο των προβλημάτων αυτής της κατηγορίας. Σύμφωνα, λοιπόν, με τους ερευνητές δεν είναι ασύνηθες οι μέθοδοι να καταλήγουν σε διαφορετικές προτάσεις ακόμη και αν λαμβάνουν υπόψιν τους ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους και τα ίδια κριτήρια και χαρακτηριστικά.

---

<sup>170</sup> E. Triantaphyllou, S. H. Mann “An Examination of the Effectiveness of Multi-Dimensional Decision-Making Methods: A Decision-Making Paradox”, *International Journal of Decision Support Systems* 1989, vol. (5), pp. 303-312.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

# προκλήσεις & μελλοντικές βελτιώσεις

---

*Στο κεφάλαιο αυτό συζητούμε θέματα που σχετίζονται με μελλοντικά σχέδια βελτίωσης, επέκτασης και εισαγωγής νέων σύγχρονων χαρακτηριστικών στην υλοποίηση της στρατηγικής μας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η στρατηγική, έτσι όπως καταστρώθηκε και αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο παραμένει η ίδια. Επί αυτής της στρατηγικής μελετούνται τρόποι βελτίωσης της υλοποίησής της, αναφέρονται μία σειρά από θέματα σχετικά με την επέκτασή της και τέλος καθορίζονται οι προδιαγραφές ενός καινοτόμου περιβάλλοντος προσομοίωσης, το οποίο σχεδιάζουμε να χρησιμοποιηθεί ως βάση επάνω στην οποία θα “τρέχουν” όλες οι υλοποιήσεις ώστε να υπάρχει ένα σταθερό σημείο σύγκρισης.*

## 6.1 μελλοντικές βελτιώσεις

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να δούμε ορισμένες βελτιώσεις που είναι δυνατόν να γίνουν στην δεύτερη υλοποίηση που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αρχικά, θα ήταν φρόνιμο να επικαιροποιήσουμε τα χαρακτηριστικά των δικτύων που λαμβάνουμε υπόψη. Αναφερόμαστε στον πίνακα του Παραρτήματος V. Οι τεχνολογίες των δικτύων που λαμβάνονται υπόψη συνεχώς εξελίσσονται με αποτέλεσμα την αλλαγή των χαρακτηριστικών τους. Πέρα όμως από αυτήν την ενημέρωση, ώστε οι τιμές της απόδοσης των δικτύων να αντανακλούν τις τελευταίες εξελίξεις στα δίκτυα αυτά, είναι συνετό να επαναπροσδιορίζουμε το κόστος και τα επίπεδα ασφάλειας. Αναφορικά με το κόστος, μία μελλοντική βελτίωση θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη δύο παράγοντες. Αρχικά το σταθερό κόστος από την συνδρομή σε καθένα από τα δίκτυα και έπειτα το κόστος χρήσης μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας ή εφαρμογής. Ο πρώτος παράγοντας είναι ανεξάρτητος της χρονικής διάρκειας χρήσης και συνήθως αποτελεί ένα πάγιο έξοδο περιοδικότητας μηνός, ενώ ο δεύτερος παράγοντας είναι ισχυρά εξαρτημένος από την διάρκεια χρήσης, μετρούμενης συνήθως σε λεπτά ή σε όγκο δεδομένων. Ένα, λοιπόν, νέο όρισμα στην συνάρτηση απόφασης που κατασκευάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο πρέπει να αντικαταστήσει το υπάρχον όρισμα που αναφέρεται στο κόστος. Σχετικά με το επίπεδο ασφάλειας που προσφέρεται από κάθε υποψήφιο για μεταπομπή δίκτυο, μία βελτίωση θα στοχεύει στον εξορθολογισμό των επιπέδων, ίσως με την εισαγωγή κλίμακας με περισσότερα από οκτώ επίπεδα. Στην υπάρχουσα υλοποίηση, αν ανατρέξουμε στον πίνακα χαρακτηριστικών των δικτύων του Παραρτήματος V, θα δούμε ότι για τα επίπεδα ασφάλειας έχει υιοθετηθεί μία κλίμακα οκτώ επιπέδων. Απαιτείται, λοιπόν, μία αρχική μελέτη της προσφερόμενης ασφάλειας για κάθε τεχνολογία. Από την μελέτη αυτήν θα πηγάζει η ταξινόμηση (ίσως σε κλίμακα περισσότερων επιπέδων) των δικτύων και η τοποθέτησή τους σε συγκεκριμένα επίπεδα.

Ένα άλλο σχετικό με την βελτίωση θέμα είναι το πρόβλημα της κανονικοποίησης. Στην υλοποίησή μας έχουμε προβεί στην κανονικοποίηση των ορισμάτων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του καλύτερου (ή χειρότερου) δικτύου. Η κανονικοποίηση αυτή αφορά αποκλειστικά το εσωτερικό κάθε ορισματος. Για κάθε κριτήριο που λαμβάνεται υπόψη και άρα για κάθε διαφορετικό όρισμα καταστρώθηκαν οι μαθηματικές σχέσεις που μας επιτρέπουν την αντιπροσωπευτική συμμετοχή κάθε δικτύου για κάθε όρισμα. Ανακύπτει, όμως, ένα επιπλέον πρόβλημα: η κανονικοποίηση μεταξύ των ορισμάτων. Το θέμα αυτό αναδύεται από την φύση και τις τιμές του κάθε κριτηρίου. Για παράδειγμα οι αριθμητικές τιμές του εύρους ζώνης κυμαίνονται από 900 έως 11000, το κόστος (στη δεύτερη υλοποίηση) από 0,1 έως 2,4 και η καθυστέρηση από 50 έως 200. Με μία γρήγορη ματιά φαίνεται η διαφορά τάξης μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής για κάθε χαρακτηριστικό: 12,22 στο εύρος ζώνης, 24 στο κόστος και μόλις 4 στην καθυστέρηση. Το εύρημα αυτό μας οδηγεί στην ανάγκη να προβούμε σε μία επιπλέον κανονικοποίηση: αυτήν μεταξύ των ορισμάτων. Για να γίνει πλήρως κατανοητή η αναγκαιότητα αυτή, ας δούμε ένα αριθμητικό παράδειγμα: Το χειρότερο δίκτυο σε εύρος ζώνης λαμβάνει τιμή 0,08182, το χειρότερο σε καθυστέρηση 0,25, σε κόστος 0,04167, σε ασφάλεια 0,125 και τέλος 0,16 για την ενέργεια. Ενώ, αντίστοιχα λαμβάνουν την τιμή της μονάδας τα δίκτυα με την καλύτερη απόδοση σε κάθε χαρακτηριστικό. Η διαφορά από μαθηματικής πλευράς είναι εμφανής και πιστεύουμε πλήρως κατανοητή από τον αναγνώστη η αναγκαιότητα μιας διαδικασίας κανονικοποίησης μεταξύ των ορισμάτων. Η διαδικασία αυτή είναι διαφορετική από εκείνη που χρησιμοποιήσαμε για την κανονικοποίηση στο εσωτερικό κάθε ορισματος και απαιτεί χρήση στατιστικής ανάλυσης, ανάλυσης με αυτήν που χρησιμοποιείται κατά την αρχική φάση της τεχνικής TOPSIS.

Τέλος, στα θέματα άμεσης μελλοντικής βελτίωσης της υλοποίησής μας, συμπεριλαμβάνεται η διερεύνηση της πολυπλοκότητάς της. Μας ενδιαφέρει όχι μόνο μία βέλτιστη λύση, αλλά και η πολυπλοκότητα του μηχανισμού που θα την λαμβάνει. Θεωρούμε εξαιρετικά σημαντικό, ο αλγόριθμος και περαιτέρω η υλοποίησή του να απαιτούν το δυνατόν λιγότερους πόρους και χρόνο κατά τη διαδικασία



εκτέλεσής τους. Έτσι, θα πρέπει να σχεδιαστούν προγραμματιστικά με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο ώστε η πολυπλοκότητα να είναι η κατά το δυνατόν μικρότερη.

## 6.2 μελλοντικές επεκτάσεις

Πέρα από τις άμεσες βελτιώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, παραμένει ισχυρή πεποίθησή μας για την περαιτέρω ανάπτυξη του αλγορίθμου μας, ώστε να αποτελεί έναν συνολικό μηχανισμό, τουλάχιστο των δύο πρώτων φάσεων της ABC προοπτικής. Έναν μηχανισμό που θα ανταποκρίνεται στις πραγματικές ανάγκες του χρήστη και θα αντανακλά το υπάρχον περιβάλλον με τον καλύτερο και ρεαλιστικότερο δυνατό τρόπο. Για να καταλήξουμε σε αυτόν τον στόχο και έχοντας κατά νου πάντα την ήδη υπάρχουσα στρατηγική που έχει επιλεγεί, οφείλουμε να σχεδιάσουμε και να υλοποιήσουμε μία σειρά από επεκτάσεις.

Αρχικά, οφείλουμε να συμπεριλάβουμε περισσότερα κριτήρια στην υλοποίησή μας, ώστε να μπορούμε για κάθε μια από τις υπηρεσίες να προβαίνουμε σε ρεαλιστικότερες επιλογές. Τα κριτήρια αυτά θα πρέπει στην μεγάλη τους πλειοψηφία να σχετίζονται με την παράμετρο της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας ανά εφαρμογή. Κάθε μία από τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές που επιθυμεί ο χρήστης να του προσφέρεται, απαιτεί διαφορετικό συνολικό επίπεδο ποιότητας. Λαμβάνοντας υπόψη μας περισσότερα, σχετικά με το QoS, κριτήρια θα οδηγηθούμε σε αποδοτικότερες βέλτιστες για τον χρήστη επιλογές. Πέρα από αυτήν την απαίτηση, κάποια κριτήρια που σχετίζονται με πληροφορίες περιεχομένου θα ήταν χρήσιμο να εισαχθούν, ώστε να χρησιμοποιηθούν τόσο στην αρχική φάση του μηχανισμού, όσο και κατά την διαδικασία επιλογής βέλτιστου δικτύου. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι εκτός από την ταχύτητα του χρήστη, που στην υλοποίησή μας λαμβάνεται υπόψη μέσω των καταστάσεων, η γεωγραφία της περιοχής και η προσφερόμενη κάλυψη του δικτύου. Αναφορικά, ωστόσο, με την ταχύτητα του χρήστη, αυτή μπορεί να αποτελέσει, επιπλέον της ήδη περιορισμένης και συγκεκριμένης χρήσης της, έναν αυτόνομο παράγοντα σχετικό με πληροφορίες περιεχομένου, ώστε να λαμβάνεται υπόψη στο σύνολο του μηχανισμού και όχι αποκλειστικά στις καταστάσεις του χρήστη. Κλείνοντας την επέκταση σχετικά με τα κριτήρια, κρίνεται απαραίτητο να σημειωθεί ότι ο μεγάλος αριθμός κριτηρίων και παραγόντων θα πρέπει να ισορροπεί με την πολυπλοκότητα του μηχανισμού μας. Και από το γεγονός αυτό πηγάζει η απαίτηση προσεκτικής επιλογής από το σύνολο των κριτηρίων και όχι άκριτης χρήσης τους.

Το γεγονός της χρησιμοποίησης περισσότερων κριτηρίων μας δίνει το πλεονέκτημα της εκμετάλλευσής τους, λαμβάνοντας υπόψη περισσότερες υπηρεσίες και εφαρμογές: Από την στιγμή που ο μηχανισμός θα έχει την δυνατότητα να προβαίνει σε αξιολογήσεις και επιλογές με περισσότερα κριτήρια, αναμένεται να είναι ικανός να διαχειρίζεται αποτελεσματικά περισσότερες υπηρεσίες. Αν για παράδειγμα χρησιμοποιούμε μόνον δύο - τρία κριτήρια, τότε δύσκολα θα καταλήξουμε σε ρεαλιστική κατάταξη των απαιτήσεων των εφαρμογών και των υπηρεσιών ανά κριτήριο. Από την στιγμή που ο μηχανισμός εμπλουτίζεται, η κατάταξη αυτή μπορεί να γίνεται με τρόπο που προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα. Έτσι, λοιπόν, είναι ευχερέστερη η εισαγωγή περισσότερων υπηρεσιών (πχ FTP) ή η περαιτέρω κατηγοριοποίηση των ήδη χρησιμοποιούμενων (πχ. “video conference” και “video streaming” αντί του γενικού “video”).

Επιπρόσθετα, η αύξηση του αριθμού των κριτηρίων και των εφαρμογών μας οδηγεί στην ανάγκη ευρύτερης χρήσης της μεθοδολογίας των πολιτικών. Πολλά από τα κριτήρια θα ενσωματώνονται σε κατάλληλες πολιτικές, κάποιες από τις οποίες είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν ήδη στην αρχική φάση του ANS. Στην αρχική, απλή, υλοποίηση που είδαμε εδώ, σκόπιμα δεν καταστρώθηκε η αρχική φάση του μηχανισμού. Η αρχική φάση, της οποίας η σημαντικότητα αναλύθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, κρίνεται απαραίτητο να σχεδιαστεί αφού πρώτα καταλήξουμε ακριβώς σε ποια κριτήρια και ποιες εφαρμογές θα χρησιμοποιηθούν. Είναι, δηλαδή, προτιμότερο να εισάγεται η φάση αυτή, έπειτα από την καταγραφή των

προδιαγραφών, ώστε να είμαστε σε θέση να επιλέξουμε τα κριτήρια που θα χρησιμοποιηθούν αποκλειστικά σε αυτήν την φάση, μέσω πολιτικών.

Τέλος, ένα επιπλέον ζήτημα που ανακύπτει κατά τον σχεδιασμό των πολιτικών επί της αρχικής φάσης, αφορά την συλλογή των δεδομένων από τις υπόλοιπες οντότητες στις οποίες ανατίθεται ένας βοηθητικός ρόλος. (Μιλούμε για τις δικτυακές οντότητες, καθόσον η στρατηγική μας κατέληξε σε έναν MCHO/NAHO μηχανισμό). Από την στιγμή που τα θέματα ενέργειας θα πρέπει να διατρέχουν όλη την σχεδιάσή μας και όχι αποκλειστικά την χρήση ενός απλού κριτηρίου σε συνδυασμό με το γεγονός του ποσού ενέργειας που καταναλώνεται κατά την διαδικασία ακρόασης και συλλογής των δεδομένων από τις δικτυακές οντότητες, καταλήγουμε στην αναγκαιότητα σχεδίασης μίας επιπλέον πολιτικής. Η πολιτική αυτή θα σχετίζεται και θα απαντά στο εξής ερώτημα: <<Πότε είναι αναγκαίο και για πόσο χρονικό διάστημα θα διαρκεί η ακρόαση των δικτυακών οντοτήτων και η συλλογή πληροφοριών από αυτά;>>. Ο λόγος εισαγωγής μιας τέτοιας επέκτασης είναι κρίσιμος αναφορικά με την ενεργειακή συμπεριφορά του μηχανισμού, καθώς η συνεχής ακρόαση και συλλογή δεδομένων καταναλώνει ένα καθόλα σημαντικό ποσό ενέργειας.

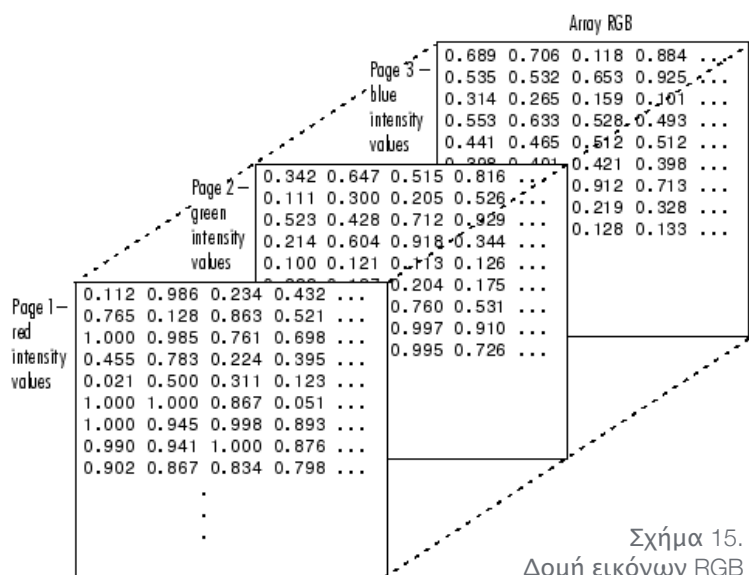
### 6.3 μια σύγχρονη απαίτηση

Έως τώρα είδαμε τις σημαντικότερες από τις βελτιώσεις και κάποιες από τις επεκτάσεις που σχεδιάζουμε μελλοντικά να ενσωματώσουμε στην υλοποίησή μας. Μία ξεχωριστή απαίτηση που θα προσδώσει στην πρότασή μας πραγματικά ρεαλιστική συμπεριφορά, εδράζεται στο γεγονός της δυναμικής φύσης του περιβάλλοντος. Ένα από τα χαρακτηριστικά του ασύρματου τεταρτογενούς δικτυακού περιβάλλοντος είναι ακριβώς η δυναμική του φύση: εκτός από την ύπαρξη πολλών ραδιοτεχνολογιών πρόσβασης, ένα τέτοιο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από την δυναμική και συνεχής μεταβολή των δικτύων πρόσβασης. Όχι μόνο, λοιπόν, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη πολλών ετερογενών δικτύων, αλλά επιπλέον δεν θα πρέπει να θεωρείται σταθερή και δεδομένη η ύπαρξή τους. Στην κίνησή του ο χρήστης ενδέχεται να εισέρχεται και να εξέρχεται στην εμβέλεια πολλών διαφορετικών δικτύων. Έως τώρα όλες οι υλοποιήσεις και οι σχετικές με το θέμα βιβλιογραφικές αναφορές προτείνουν λύσεις που θεωρούν εξ' αρχής ένα -μικρό ή μεγάλο, περισσότερο ή λιγότερο πολύπλοκο- δεδομένο δικτυακό περιβάλλον. Ποια όμως η συμπεριφορά του μηχανισμού όταν το βέλτιστο δίκτυο δεν είναι πλέον διαθέσιμο; Πότε θα πρέπει να ενεργοποιηθεί η αρχική φάση της διαδικασίας μεταπομπής, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα αιφνιδιασμού σε περίπτωση που ο χρήστης αναμένεται να βρεθεί εκτός εμβέλειας του βέλτιστου, κατά τα άλλα, δικτύου πρόσβασης; Πως θα αντιδράσει ο μηχανισμός επιλογής σε ανάλογες περιπτώσεις και ποιες μέριμνες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του, ώστε να είναι ικανός να ανταπεξέρχεται σε τέτοιας δυναμικής φύσεως περιβάλλοντα, όπως τα πραγματικά; Ποια θα είναι τότε η επιλογή στην οποία θα καταλήγει και ποια η απόδοση του συνόλου της στρατηγικής μας;

Για να απαντηθούν τέτοιας φύσεως ερωτήματα, επιλέχθηκε η δημιουργία ενός εικονικού τεχνικού περιβάλλοντος πάνω στο οποίο θα μπορέσουμε να ελέγξουμε την συμπεριφορά των υλοποιήσεων της στρατηγικής μας. Ένα τέτοιο περιβάλλον θα πρέπει να περιέχει μια σειρά από δίκτυα τόσο διαφορετικής τεχνολογίας πρόσβασης, όσο και διαφορετικών χαρακτηριστικών. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να υπάρχουν περιοχές όπου θα βρίσκονται διαθέσιμα όλα τα δίκτυα και περιοχές όπου θα υπάρχουν μόνο συγκεκριμένα, παίρνοντας υπόψη μας όλους τους συνδυασμούς αλληλοκάλυψης. Τέλος, θα ήταν θεμιτό να υπάρχουν περιοχές όπου εξυπηρετούνται μόνο από ένα δίκτυο και περαιτέρω κάποιες άλλες όπου δεν θα υπάρχει παρουσία ασύρματης δικτυακής πρόσβασης. Ο σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη την διαφορετικής τάξεως μεγέθους των διαστάσεων κάλυψης των δικτύων (από μερικές εκατοντάδες μέτρα των 802.11, σε αρκετά χιλιόμετρα των 802.16) καθώς και την απόσταση από την κεραία κάθε δικτύου.

Τέλος, ένα τέτοιο περιβάλλον είναι απαραίτητο να υποστηρίζει την κινητικότητα του χρήστη και να επιδέχεται με σχετικά εύκολο και απλό τρόπο επιπλέον επεκτάσεις, βελτιώσεις και προσθήκες.

Αν και στην παρούσα εργασία ένα τέτοιο περιβάλλον δεν παρουσιάζεται, εν τούτοις, έχει ήδη σχεδιαστεί με την χρήση της MATLAB. Η δομή που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι οι πίνακες πολλών διαστάσεων. Έχουμε καταλήξει σε έναν πίνακα 5000x5000 όπου κάθε κελί αντιπροσωπεύει μία απόσταση 20 μέτρων. Έτσι, λοιπόν, το συνολικό περιβάλλον προσομοιώνει μία περιοχή έκτασης μεγαλύτερης της περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας! Η αναφορά σε λεπτομέρειες του πως σχεδιάστηκε μιας τέτοιας τάξεως περιβάλλον δεν είναι σκοπός της εργασίας αυτής, όμως είναι σημαντικό να αναφερθεί στο σημείο αυτό, ότι το μεγαλύτερο μέρος του έχει σχεδιαστεί με τον αναλογικό χειροκίνητο τρόπο: επειδή δεν είναι δυνατόν να συμπληρωθεί ο πίνακας με τυχαίες τιμές και είναι εξαιρετικά πολύπλοκη η κατασκευή ενός τρόπου συμπλήρωσης που θα κάλυπτε τις ανάγκες μας, επιλέχθηκε εξ' αρχής η χειροκίνητη μη αυτοματοποιημένη συμπλήρωση του πίνακα κελί - κελί! Αυτό επιτεύχθηκε με την βοήθεια κλίμακας και ταξινόμησης των μεγεθών. Καταλήξαμε, λοιπόν, σε έναν συνολικό πίνακα όπου κάθε κελί διαθέτει τρεις τιμές, μία για κάθε από τις τρεις διαφορετικές τεχνολογίες δικτύων που χρησιμοποιούμε στην στρατηγική μας (802.11, 802.16 και UMTS). Κάθε τιμή συμβολίζει την ύπαρξη ή την ανυπαρξία δικτύων της τεχνολογίας στην οποία απευθύνεται η τιμή αυτή. Ως παράδειγμα της δομής αυτής, ας αναφέρουμε την δομή των



Σχήμα 15. Δομή εικόνων RGB

εικόνων RGB (Σχήμα 15.) στην οποία ομοιάζει η δομή του δικού μας περιβάλλοντος. Πρόθεσή μας είναι η χρήση του περιβάλλοντος αυτού, αφού προηγουμένως εισαχθούν όλες οι βελτιώσεις και οι επεκτάσεις στην υλοποίηση που καταστρώθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος, ένα τέτοιο περιβάλλον θέτει στο σχεδιαστή των υλοποιήσεων ορισμένα κρίσιμα ζητήματα: Ο τρόπος συλλογής των δεδομένων και γενικά ο τρόπος ανάκτησης πληροφοριών περιεχομένου, η μελέτη και εισαγωγή τεχνικών που προσδίδουν χαρακτηριστικά μάθησης εξ' εμπειρίας, οι τεχνικές διαπραγμάτευσης μεταξύ των οντοτήτων (εδώ: μεταξύ υλοποίησης και περιβάλλοντος), αλλά και περαιτέρω, η αξιοποίηση των δυνατοτήτων που παρέχουν τα γνωστικά δίκτυα ("Cognitive Radios"), θεωρούνται εξόχως ενδιαφέροντα αντικείμενα και προβλήματα που αναμένουν τις αποδοτικότερες, κατά το δυνατόν, λύσεις.

## αντί επιλόγου

Στην εργασία αυτή καταβλήθηκε προσπάθεια να μελετηθεί κατά το δυνατόν διεξοδικότερα η προοπτική του “συνεχώς συνδεδεμένος στο βέλτιστο δίκτυο” (“Always Best Connected vision”). Συζητήθηκαν θέματα που αφορούν την φύση της προοπτικής αυτής και της σημαντικότητάς της στα δίκτυα τέταρτης γενιάς. Αναφέρθηκαν οι κατηγορίες και οι φάσεις των μεταπομπών και δόθηκε μία πλήρης διατύπωση του προβλήματος επιλογής καταλληλότερου δικτύου πρόσβασης (“Access Network Selection”). Εν συνεχεία η εργασία αυτή εισήλθε με αρκετή λεπτομέρεια στις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την λύση του ANS προβλήματος και παρατέθηκαν ορισμένες από τις αντιπροσωπευτικότερες υλοποιήσεις που προτείνονται στην σχετική βιβλιογραφία.

Η συνεισφορά της διπλωματικής αυτής εργασίας στο θέμα που διαπραγματεύεται εδράζεται, πιστεύουμε, στην νέα προτεινόμενη κατηγοριοποίηση των υλοποιήσεων που αναφέρθηκαν και η οποία βοήθησε στην κατάστρωση της δικής μας στρατηγικής. Επιπλέον, οι υλοποιήσεις που σχεδιάστηκαν και παρουσιάστηκαν, όσο απλές και αν κρίνονται, περιέχουν έναν σημαντικό αριθμό παραγόντων που λαμβάνονται υπόψη (κριτήρια, καταστάσεις και υπηρεσίες), ενώ ο αριθμός των υποψήφιων για μεταπομπή δικτύων είναι ο μεγαλύτερος από όλες τις έως τώρα προτεινόμενες υλοποιήσεις.

Η εργασία αυτή δεν μπορεί παρά να θεωρηθεί ως ένα πρώτο βήμα πλήρους εμβάθυνσης και κατανόησης της ABC προοπτικής. Η προσπάθεια βελτίωσης, επέκτασης και ανάπτυξης της στρατηγικής που καταστρώθηκε στις παραπάνω σελίδες, αποτελεί το επόμενο βήμα, ώστε να παρουσιαστεί μελλοντικά μία περισσότερο ρεαλιστική και αποδοτική υλοποίηση. Ένας επιπλέον στόχος είναι η δημιουργία ενός τεχνικού περιβάλλοντος το οποίο θα αποτελέσει την πλατφόρμα επί της οποίας θα ερευνάνται η συμπεριφορά, η απόδοση και ο τρόπος λειτουργίας διάφορων υλοποιήσεων που προτείνονται στο σύνολο της βιβλιογραφίας.

Κλείνοντας την εργασία αυτή, θεωρείται σκόπιμο και σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω για την ανεκτίμητη βοήθεια, τις συμβουλές και την καθοδήγησή της, την επίκουρο καθηγήτρια του Τμήματος Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, δρ. Μαλαματή Λούτα. Μα, περισσότερο, την ευχαριστώ διότι αποτελεί τον άνθρωπο που με οδήγησε στην εξερεύνηση ενός πολύ ενδιαφέροντος επιστημονικού πεδίου, την ύπαρξη του οποίου θα αγνοούσα χωρίς την βοήθειά της.

---

ΠΙΝΑΚΕΣ & ΣΧΗΜΑΤΑ

---

## ΠΙΝΑΚΕΣ

|              |         |  |
|--------------|---------|--|
| Πίνακας 1.   | σελ.21  | Χαρακτηριστικά ετερογενών ασύρματων συστημάτων             |
| Πίνακας 2.   | σελ.44  | Χαρακτηριστικά κρίσιμων τεχνολογιών                        |
| Πίνακας 3.   | σελ.46  | Κατανάλωση ενέργειας                                       |
| Πίνακας 4.   | σελ.52  | Κρίσιμα ζητήματα σχεδιασμού                                |
| Πίνακας 5.   | σελ.56  | Δημοφιλείς τεχνικές MCDM                                   |
| Πίνακας 6.   | σελ.70  | Η κλίμακα εννέα επιπέδων της κατά ζεύγη σύγκρισης στην AHP |
| Πίνακας 7.   | σελ.72  | Τιμές τυχαίας ασυνέπειας                                   |
| Πίνακας 8.   | σελ.103 | Στρατηγικές επιλογές υλοποιήσεων                           |
| Πίνακας 9.   | σελ.111 | Τελικές κατατάξεις AHP                                     |
| Πίνακας 10α. | σελ.114 | Τελικές κατατάξεις συνάρτησης απόφασης (home & pedestrian) |
| Πίνακας 10β. | σελ.115 | Τελικές κατατάξεις συνάρτησης απόφασης (low & high speed)  |
| Πίνακας 11.  | σελ.116 | Συνολική Βέλτιστη Επιλογή                                  |

## ΣΧΗΜΑΤΑ

|                   |   |
|-------------------|---|
| Σχήμα 1. σελ. 29  | Τυπικό περιβάλλον μεταπομπής  |
| Σχήμα 2. σελ. 37  | Φάσεις μεταπομπής   |
| Σχήμα 3. σελ. 59  | Ευκλείδεια απόσταση σε χώρους 2-διαστάσεων  |
| Σχήμα 4. σελ. 68  | Η διαδικασία απόφασης με χρήση πολιτικών  |
| Σχήμα 5. σελ. 69  | Ιεραρχική δομή προβλήματος  |
| Σχήμα 6. σελ. 83  | Ιεραρχία κριτηρίων για επιλογή του βέλτιστου δικτύου  |
| Σχήμα 7. σελ. 85  | Δομή τεχνικής AHP με στόχο τον καθορισμό των σχετικών με το QoS κριτηρίων                                 |
| Σχήμα 8. σελ. 96  | Συναρτήσεις ασαφών συνόλων για το RSS και την ταχύτητα  |
| Σχήμα 9. σελ. 96  | Δομή AHP  |
| Σχήμα 10. σελ.108 | Επιλογές κατά την διαδικασία κατάστρωσης στρατηγικής  |
| Σχήμα 11. σελ.110 | Δομή & ιεραρχία AHP στην δική μας υλοποίηση   |
| Σχήμα 12. σελ.110 | Κλίμακα σύγκρισης εννέα βαθμίδων  |
| Σχήμα 13. σελ.117 | Διάγραμμα για την κατάσταση "secure browsing" της 2ης υλοποίησης  |
| Σχήμα 14. σελ.117 | Διάγραμμα για την κατάσταση "low speed" και την υπηρεσία "video" σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα χρήσης |
| Σχήμα 15. σελ.123 | Δομή εικόνων RGB  |

---

# ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

---



|        |   |
|--------|---|
| 2/3/4G | Second/Third/Fourth Generation                      |
| AAAC   | Authentication, Authorization, Accounting, Charging |
| ABC    | Always Best Connected                               |
| AHP    | Analytic Hierarchy Process                          |
| ANS    | Access Network Selection                            |
| AP     | Access Point  |
| APCV   | Access Point Candidacy Value                        |
| B3G    | Beyond Third Generation                             |
| BER    | Bit Error Rate                                      |
| CDMA   | Code Division Multiple Access                       |
| CI     | Consistency Index                                   |
| CIR    | Carrier to Interferences Ratio                      |
| CoA    | Care of Address                                     |
| ConR   | Consistency Ratio                                   |
| CoR    | Consistency Ratio                                   |
| CR     | Cognitive Radios                                    |
| EFQM   | European Foundation for Quality Management          |
| ERA    | Evidential Reasoning Approach                       |
| FFD    | First Fit Decreasing                                |
| FL     | Fuzzy Logic   |
| FSR    | Fuzzy Set Representation                            |
| FST    | Finite State Transducers                            |
| GAP    | Generalized Assignment Problem                      |
| GPRS   | General Packet Radio Services                       |
| GRA    | Grey Relational Analysis                            |
| GRC    | Grey Relational Coefficient                         |
| GSM    | Global System for Mobile Communications             |
| GUI    | Graphical User Interface                            |
| IP     | Internet Protocol                                   |
| ITS    | Intelligent Transportation Systems                  |
| MADM   | Multiple Attribute Decision Making                  |
| MCDAS  | Multi-constraint dynamic access selection           |
| MCDM   | Multiple Criteria Decision Making                   |

|           |  |
|-----------|--|
| MCHO      | Mobile-Controlled HandOver                                     |
| MDP       | Markov Decision Process  |
| MIP/MIPv6 | Mobile IP / MIP version 6                                      |
| MMKP      | Multiple choice Multiple dimension Knapsack Problems           |
| MODM      | Multiple Objective Decision Making                             |
| mSCTP     | mobile Stream Control Transmission Protocol                    |
| NCHO      | Network-Controlled HandOver                                    |
| PANs      | Personal Area Networks   |
| PDP       | Policy Decision Point  |
| PEP       | Policy Enforcement Point                                       |
| PMA       | Population Migration Algorithm                                 |
| QoS       | Quality of Service   |
| RAT       | Radio Access Technologies                                      |
| RI        | RI (Random Consistency Index)                                  |
| RSS       | Received Signal Strength                                       |
| RSSI      | Received Signal Strength Indicator                             |
| SA        | Security Association   |
| SAW       | Simple Additive Weighting                                      |
| SDR       | Software Define Radio  |
| SGSN      | Serving GPRS Support Node                                      |
| SINR      | Signal to Interference and Noise Ratio                         |
| SIP       | Session Initiation Protocol                                    |
| SIR       | Signal to Interferences Ratio                                  |
| SMT       | Smart Mobile Terminals   |
| SMTP      | Simple Mail Transfer Protocol                                  |
| SNR       | Signal to Noise Ratio  |
| TOPSIS    | Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution |
| UML       | Unified Modelling Language                                     |
| UMTS      | Universal Mobile Telephone System                              |
| WANs      | Wide Area Networks   |
| WCDMA     | Wideband CDMA  |
| WEP       | Wired Equivalent Privacy                                       |
| WLANs     | Wireless Local Area Networks                                   |

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

1. G. Fodor, A. Eriksson, A. Tuoriniemi, Ericsson Research "Providing Quality of Service in Always Best Connected Networks", IEEE Communications Magazine, 2003, pp. 154-163
2. M. Louta, P. Zournatzis, S. Kraounakis, P. Sarigiannidis, I. Dimitropoulos "Towards realisation of the ABC vision: a comparative survey of access network selection" 2011 IEEE Symposium on Computers & Communications (ISCC), pp. 472-477
3. E. Gustafsson, A. Jonsson, "Always Best Connected", IEEE Wireless Communications, vol.10, 2003, pp. 49-55
4. P. Vidales, J. Baliosian, J. Serrat, G. Mapp, F. Stajano, A. Hopper "Autonomic System for Mobility Support in 4G Networks" IEEE Journal on selected areas in Communications, vol. 23, pp. 2288-2304
5. G. Nyberg, "Seamless Mobility - SEMO: a policy-based prototype for handovers in heterogeneous networks", Master Thesis in Computing Science 20p, 2006, Umea University, dep. of. Computing Science, Umea, Sweden.
6. M. O'Droma, I. Ganchev, G. Morabito, R. Narcisi, N. Passas, S. Paskalis, V. Friderikos, A.S. Jahan, E. Tsontsis, C.F. Bader, J. Rotrou, H. Chaouchi "Always Best Connected Enabled 4G Wireless World", in IST Mobile and Wireless Communications Summit, 2003.
7. F. Siddiqui, S. Zeadally, "Mobility management across hybrid wireless networks: Trends and challenges", Computer Communications vol. 29, 2006, pp. 1363-1385
8. A. Murtaza, M. Ahmed, "Decision algorithm and procedure for fast handover between 3G and WLAN" Technical report, IDE1039, 2010, School of information science, computer and electrical engineering, Halmstas University.
9. J. McNair, F. Zhu "Vertical Handoffs in Fourth-Generation Multinetwork Environments", IEEE Wireless Communications, 2004, pp. 8-15.
10. M. Kassar, B. Kervella, G. Pujolle "An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks", Computer Communications 31, 2008, pp. 2607-2620
11. E. Stevens-Navarro, U. Pineda-Rico, J. Acosta-Elias "Vertical Handover in beyond Third Generation (B3G) Wireless Networks", International Journal of Future Generation Communication and Networking, vol. 1, no. 1, 2008, pp. 51-58.
12. D. Nishth, "Handoff in Cellular systems" IEEE Personal Communications, 1998
13. W. Zhang, J. Jaehnert, K. Dolzer "Design and Evaluation of a Handover Decision Strategy for 4th Generation Mobile Networks", in Proc. of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003 (VTC 2003 - Spring), vol. 3, pp. 1969 - 1973.
14. R. Pries, D. Staehle, D. Hock, M. Hirth "A Policy - Based Vertical Handover System", Report No 471, University of Wuerzburg, Germany, 2010.
15. Α. Κανατάς, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Παντός "Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών", εκδ. Παπασωτηρίου, 2008, Αθήνα.
16. D. Cavalcanti, N. Nandiraju, D. Nandiraju, D. P. Agrawal, A. Kumar "Connectivity opportunity selection in heterogeneous wireless multi - hop networks", Pervasive and Mobile Computing, Elsevier, 2008, pp. 1574-1192.
17. T. S. Rappaport "Wireless Communications, Principles and Practice", 2nd Edition, Prentice - Hall, 2002.
18. H. Holma, A. Toskala, "WCDMA for UMTS, Radio Access for 3G Mobile Communications", Wiley, 2004, England.

19. S. Nanda, "Teletraffic models for urban and suburban microcells: Cell sizes and handoff rates", *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 42, 1993, pp. 673-682.
20. N. Passas, S. Paskalis, A. Kaloxylou, F. Bader, R. Narcisi, E. Tsontsis, A. S. Jahan, H. Aghvami "Enabling technologies for the 'always best connected' concept", *Wireless Communications and Mobile Computing 2005*, pp. 175-191.
21. E. Bircher, T. Braun "An Agent-based Architecture for Service Discovery and Negotiation in Wireless Networks" *Wired/Wireless Internet Communications, 2nd International Conference, Springer, 2004*, pp. 295-313.
22. C.E. Perkins, "Mobile networking through mobile IP", *IEEE Internet Computing*, vol. 2, 1998, pp. 58-69.
23. B. Sousa, K. Pentikousis, M. Curado "A Multiple Care of Addresses Model", *2011 IEEE Symposium on Computers & Telecommunications, ISCC 2011*, pp. 485-490.
24. T. Choi, S. Seo, J. Song "ABC2: A New Approach to Seamless Mobility Using Cellular Networks and WLANs" *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008*, pp. 2675-2680.
25. N. Montavont, T. Noel "Handover management for mobile nodes in IPv6 networks", *IEEE Communications Magazine* vol. 40 (8), 2002, pp. 38-43.
26. M. Yliantilla, M. Makela, J&P Pahlavan, "Analysis of handover in a location-aware vertical multi-access network", *Computer Networks* 47 (2), 2005, pp. 185-201.
27. L. J. Chen, T. Sun, B. Chen, V. Rajendran, M. Gerla "A smart decision model for vertical handoff", in *proc. 4th ANWIRE International Workshop on Wireless Internet and Reconfigurability, Athens, Greece, 2004*.
28. X. Haibo, T. Hui, Z. Ping "A novel terminal - controlled handover scheme in heterogeneous wireless networks", *Elsevier, Computers and Electrical Engineering* vol. 36, 2010, pp. 269 - 279.
29. W. McCann, W. Grotting, A. Pandolfi, E. Hepworth "Next Generation Multimode Terminals" in *proc. on 5th IEEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies (3G 2004) The Premier Technical Conference for 3G and Beyond (CP503), London, UK, 2004*.
30. M. Dimitris, "Seamless Mobility", ACR Group, Motorola, [http://www.motorola.com/mot/doc/1/1874\\_MotDoc.pdf](http://www.motorola.com/mot/doc/1/1874_MotDoc.pdf)
31. SDR Forum, <http://www.sdrforum.org>
32. J. Hoffmeyer "Radio software download for commercial wireless reconfigurable devices", *IEEE Communications Magazine* vol. 42 (3), 2004. pp. 526-532.
33. C. Ceken, S. Yarkan, H. Arslan "Interference aware vertical handoff decision algorithm for quality of service support in wireless heterogeneous networks", *Elsevier, Computer Networks*, vol. 54 (5), 2010, pp. 726-740.
34. P. Demestichas, V. Stavroulaki, A. Boscovic, A. Lee, J. Strassner "m@ANGEL: Autonomic Management Platform for Seamless Cognitive Connectivity to the Mobile Internet", *IEEE Communications Magazine*, vol. 6, 2006, pp. 118-127.
35. P. Demestichas, G. Dimitrakopoulos, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki "Introducing Cognitive Systems to the B3G Wireless World", *Cognitive Wireless Networks, Springer, 2007*, pp. 253-269.
36. D. Fan, L. Ni, A. Esfahanian "HOPOVER: a new handoff protocol for overlay networks", in *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*, 5, 2002, pp. 3234-3239.

37. N. Banerjee, W. Ku, K. Basu, S. Das "Analysis of SIP-based mobility management in 4G wireless networks", Elsevier, Computer Communications, vol. 27 (8), 2004, pp. 697-707.
38. M. Li, Y. Fei, V. Leung, T. Randhawa "A new method to support UMTS/WLAN vertical handover using SCTP", IEEE Wireless Communications vol. 11 (4), 2004, pp. 44-51.
39. A. Stamou, E. Stavrou "Energy Consumption Evaluation on the MAC layer of PRCSMA" master thesis in Science in Telecommunication Engineering & Management, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2008.
40. C. Wen-Tsuen, L. Jen-Chu, H. Hsieh-Kuan, "An adaptive scheme for vertical handoffs in wireless overlay networks" in Proc. of the 1st Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2004, pp. 111-112
41. K. Yang, I. Gondal, B. Qiu, L. S. Dooley "Combined SINR Based Vertical Algorithm for Next Generation Heterogeneous Wireless Networks", IEEE, in Proc. of Global Telecommunications Conference, GLOBECOM 2007, pp. 4483-4487.
42. M. A. Latif, A. A. Khan, "Quality of Service during Vertical Handover in 3G/4G Wireless Networks", master thesis in Science in Electrical Engineering with Emphasis on Telecommunications, Blekinge Institute of Technology, 2009.
43. Gregory P. Pollioni, "Trends in Handover Design", IEEE Communications Magazine, vol. 34, 1996, pp. 82-90.
44. P. Marichamy, S. Chakrabati and S. L. Maskara, "Overview of handoff schemes in cellular mobile networks and their comparative performance evaluation", IEEE, VTC'99, vol. 3, 1999, pp. 1486-1490.
45. H. J. Wang, R. H. Katz, J. Giese, "Policy - Enabled Handoffs Across Heterogeneous Wireless Networks", in WMCSA, New Orleans, LA, USA, 1999.
46. O. Ormond, P. Perry, J. Murphy, "Network Selection Decision in Wireless Heterogeneous Networks" in Proc. of IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2005.
47. F. Zhu, J. McNair "Multiservice Vertical Handoff Decision Algorithms", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2006, pp. 1-13.
48. S. Zhang, W. Zhou, F. Ma, J. Song, "Novel Network/Terminal Cooperative Selection Mechanism for Modern Service Industry", on 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009, pp. 1-5.
49. M. Zeleny, "Multiple Criteria Decision Making", McGraw - Hill, 1982.
50. J. Malczewski "GIS and Multicriteria Decision Analysis", John Wiley and Sons, 1999.
51. K.S. Babu, N.V. S. Raju, M. S. Reddy, D.N. Rao "The Material Selection for typical wind turbine blades using a MADM approach & analysis of blades", in Proc of MCDM2006, Chania, Greece, 2006.
52. X. Ciao, "Delta Utility Models in Decision - based Design", a dissertation pres. to the Faculty of The Graduate College of the Univ. of Nebraska, Lincoln, Nebraska, 2006.
53. L. Xu, J.B. Yang, "Introduction to Multi-Criteria Decision Making and the Evidential Reasoning Approach", working paper 0106, Manchester School of Management, Univ. of Manchester, Institute of Science and Technology, 2001.
54. E. Triantaphyllou, "Multi criteria decision making method: a comparative study", Kluwer academic publishers, Applied optimization series, vol. 44, 2002.

55. C. L. Hwang, K. Yoon, "Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications", Springer - Verlag, 1981.
56. MT. Chu, J. Shyu, GH. Tzeng, R. Khosla "Comparison among three analytical methods for knowledge communities group - decision analysis", Expert systems with applications, vol. 33 (4), 2007. pp. 1011-1024.
57. V. Podvezko, "The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS", Engineering Economics, vol 22 (2), 2011. pp. 134-146.
58. R. Ginevicius, V. Podvezko, "Some problems of evaluating multicriteria decision methods", International Journal of Management and Decision Making, vol. 8 (5/6), 2007. pp. 527-539.
59. E. H. Forman, S. I. Gass, "The Analytic Hierarchy Process: An Exposition", Operations Research, vol. 49(4), 2001, pp. 469-486.
60. T.L. Saaty and L.G. Vargas. Models, Methods, Concepts and Applications of the Analytic Hierarchy Process. Kluwer Academic Publishing, Dordrecht, the Netherlands, 2001.
61. J. M. Alexander, T. L. Saaty "Conflict Resolution - The Analytic Hierarchy Process", Praeger, New York, 1989.
62. D. Charilas, O. Markaki, D. Nikitopoulos, M. Theologou, "Packet-switched network selection with the highest QoS in 4G networks", Elsevier, Computer Networks, vol. 52, 2008. pp.248-258.
63. J. L. Deng "Introduction to grey system theory" The Journal of Grey System, vol. 1 (1), 1989, pp. 1-24.
64. Ng K. W. David "Grey system and grey relational model" ACM SIGIGE Bulletin, vol. 20(2), 1994. pp.2-9.
65. Q. Song, A. Jamalipour, "An adaptive quality-of-service network selection mechanism for heterogeneous mobile networks", Wireless Communications and Mobile Computing, 2005 vol. 5, Wiley, pp. 697-708.
66. S. Khanmohammadi, R. Almeida Ribeiro, J. Jassbi, "Multi Criteria Decision Making Using Dynamics of criteria", in Proc. of the 11th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED03).
67. J. B. Yang, "Rule and utility based evidential reasoning approach for multiple attribute decision analysis under uncertainty", European Journal of Operational Research, vol. 131 (1), 2001. pp.31-61.
68. G. B. Mathews "On the partition of numbers", Proceedings of the London Mathematical Society vol. 28, 1897. pp. 486-490.
69. C. Lee, J. Lehoczky, R. Rajkumar, D. Siewiorek, "On QoS optimization with discrete QoS options", IEEE, Real Time Technology and Applications Symposium, 1999.
70. D. Pisinger, "Algorithms for Knapsack problems", Ph.D. dissertation Dept. of Computer Science, University of Copenhagen, Denmark, 1995.
71. E. Coffman, M. Garey, D. Johnson, "Approximation algorithms for bin packing: A survey", Approximation Algorithms for NP-Hard Problems, 1996. pp. 46-93.
72. E. Coffman, J. Csirik, D. Woeginger, "Approximate solutions to bin packing problems", Technical Report Woe-29, Institut fr Mathematik B, TU Graz, Austria, 1999.
73. X. Gu, G. Chen, "Performance analysis and improvement for some linear on-line bin-packing algorithms", Journal of Combinatorial Optimization, vol.4 (6), 2002.

74. B. Xing, N. Venkatasubramanian, "Multi-Constraint Dynamic Access Selection in Always Best Connected Networks", The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2005.
75. X. Wang, H. Cheng, P. Qin, M. Huang, L. Guo, "ABC Supported Handoff Decision Scheme Based on Population Migration", *Evo Applications*, part II, LNCS 6025, Springer - Verlag, Berlin, 2010. pp.111-120.
76. R. Bellman, "A Markovian Decision Process", *Journal of Mathematics and Mechanics*, 1957. vol. 6(4), pp. 679-684.
77. M. Puterman, "Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming", John Wiley and Sons, 1994.
78. E. Altman, "Constrained Markov Decision Processes", Chapman & Hall/CRC, 1999.
79. C. Carlsson, R. Fuller, "Fuzzy multiple criteria decision making: Recent developments", *Fuzzy Sets and Systems*, vol.78, 1996. pp. 136-153.
80. L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Information and Control*, vol.8, pp 338-353, 1965.
81. L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Outline of a new approach to the analysis of complex systems*", *IEEE Trans. Systems, Man, Cybern.*, vol. 3, 1973.
82. Chen C. H., "Fuzzy logic and neural network handbook", McGraw-Hill, 1996.
83. D. E. Thomas, B. Armstrong - Helouvyry, "Fuzzy logic control - A taxonomy of demonstrated benefits", in *Proc. of IEEE GLOBE-COM'90 San Diego, California, USA, 1990*. vol. 1, pp. 7-11.
84. S. J. Russell, P. Norvig, "Artificial Intelligence: a modern approach", 2nd ed., Prentice Hall, 2003.
85. L. X. Wang, "Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis", Prentice-Hall, NJ. USA, 1994.
86. F. Herreraa, E. Lopez, M.A. Rodriguez, "A linguistic decision model for promotion mix management solved with genetic algorithms", *Elsevier, Fuzzy Sets & Systems*. 2002, vol. 131, pp. 47-61.
87. C. Elkan "The paradoxical success of fuzzy logic", in *Proc. of 11th National Conference on Artificial Intelligent (AAAI-93)*, 1993, AAAI Press, pp.698-703.
88. D. C. Verma, "Policy Based Networking, Architecture and Algorithms", New Riders Publishing, 2000.
89. N. Damianou, N. Dulay, E. Lupu, M. Sloman, "The Ponder Policy Specification Language", in *Proc. of the 2nd IEEE International Workshop on Policies for Distributed Systems (POLICY 2001)*. 2001. pp. 18-39.
90. T.L. Saaty, "The Analytic Hierarchy Process", McGraw - Hill, New York, 1980.
91. T. L. Saaty, "How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process" *Interfaces*, 1994. vol. 24 (6), pp.19-43.
92. T.L. Saaty, "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process", *European Journal of Operational Research*, 1990, vol. 48, pp. 9-26.
93. I. Chamodrakas, I. Lefteriotis, D. Martakos, "In-depth analysis and simulation study of an innovative fuzzy approach for ranking alternatives in multiple attribute decision making problems based on TOPSIS", *Elsevier, Applied Soft Computing* vol.11, 2011, pp. 900-907.
94. H.J. Zimmermann, P. Zysno, "Quantifying vagueness in decision models", *European Journal of Operational Research*, 1985, vol.22. pp. 148-158.



95. R.R. Yager, "On a general class of fuzzy connectives", *Fuzzy Sets and Systems* 1980, vol.4. pp. 235-242.
96. I. Chamodrakas, D. Martakos, "A utility-based fuzzy TOPSIS method for energy efficient network selection in heterogeneous wireless networks", *Elsevier, Applied Soft Computing*, 2011, vol. 11(4). pp. 3734-3743.
97. J. Noonan, P. Perry, J. Murphy "Client Controlled Network Selection", on *Proc. of 5th IEE International Conference 3G2004*, 2004, pp. 543-547.
98. Q.T. Nguyen-Vuong, N. Agoulmine, Y. Ghamri-Doudane, "Terminal-Controlled Mobility Management in Heterogeneous Wireless Networks", *IEEE Communications Magazine*, 2007. vol. 45(4). pp. 122-129.
99. F. Zhu, J. McNair "Multiservice Vertical Handoff Decision Algorithms", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2006. Vol.2006, pp. 1-13.
100. C. Yiping, Y. Yuhang, "A New 4G Architecture Providing Multimode Terminals Always Best Connected Services", *IEEE Wireless Communications*, vol. 14, 2007, pp. 36-41.
101. R. Trestian, O. Ormond, G.M. Muntean, "Power-friendly access network selection strategy for heterogeneous wireless multimedia networks" on *Proc. of Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2010 *IEEE International Symposium*, pp. 1-5.
102. L. Huang, K. A. Chew, R. Tafazolli, "Network Selection for One-to-Many Services in 3G-Broadcasting Cooperative Networks", in *Proc. of IEEE International Conference on Vehicular Technology*, vol. 5, 2005, pp. 2999-3003.
103. O. Ormond, J. Murphy, G.-M. Muntcan, "Utility-based Intelligent Network Selection in Beyond 3G Systems" in *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*, vol. 4, 2006, pp. 1831-1836.
104. Q.T. Nguyen-Vuong, N. Agoulmine, Y. Ghamri-Doudane "A user-centric and context-aware solution to interface management and access network selection in heterogeneous wireless environments", *Elsevier, Computer Networks* 2008. vol. 52, pp. 3358-3372.
105. F. Bari, V. C.M. Leung, "Automated Network Selection in a Heterogeneous Wireless Network Environment", *IEEE Network*, vol.21, 2007, pp. 34-40.
106. I. Lassoued, J. M. Bonnin, Z. B. Hamouda, A. Belgith, "A methodology for evaluating vertical handoff decision mechanisms", in *Proc. of the 7th International Conference on Networking, Mexico*, 2008. pp. 377-384.
107. S. Dhar, A. Ray, R. Bera, "Design and Simulation of Vertical Handover Algorithm for Vehicular Communication", *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2 (10), 2010. pp. 5509 - 5525.
108. J. L. Adler, V. J. Blue, "Toward the design of intelligent traveler information systems", *Elsevier, Transportation Research part C: Emerging Technologies*, vol. 6 (3), pp. 157-172.
109. Q. Song, A. Jamalipour, "A Network Selection Mechanism for Next Generation Networks", *IEEE*, in *Proc. of 2005 IEEE International Conference on Communications*, 2005. *ICC 2005*. vol. 2 pp. 1418 -1422.
110. E. Stevens-Navarro, V. Wong, "Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks", in *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Spring)*, 2006. vol. 2, pp. 947-951.
111. L. Wang, D. Binet, "Mobility-based Network Selection Scheme in Heterogeneous Wireless Networks", *IEEE*, in *Proc. of 69th Vehicular Technology Conference*, 2009. *VTC Spring 2009*, pp. 1-5.

112. V. Gazis, N. Alonistioti, L. Merakos, "Toward a Generic "Always Best Connected" Capability in Integrated WLAN/UMTS Cellular Mobile Networks (and Beyond)", *IEEE Wireless Communications*, vol. 12, 2005, pp. 20-29.
113. V. Gazis, N. Houssos, N. Alonistioti, L. Merakos. "On the Complexity of 'Always Best Connected' in 4G Mobile Networks", *IEEE*, in Proc. of 58th Vehicular Technology Conference, 2003. VTC Fall 2003. vol. 4, pp. 2312-2316.
114. E. S. Navvaro, V. W.S. Wong, Y. Lin, "A Vertical Handoff Decision Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks", *IEEE*, in Proc. of Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2007, pp. 3199-3204.
115. K. Murray, D. Pesch, R. Mathur, "Policy Based Mobility Management in Heterogeneous Wireless Networks for Smart Space Environment", in Proc. of CSSN IT&T Conference, Oct. 2003.
116. K. Murray, R. Mathur, D. Pesch, "Intelligent access and mobility management in heterogeneous wireless networks using policy", in Proc of the 1st International symposium of Information and Communication Technologies, ISICT'03, 2003. pp. 181-186.
117. P. Vidales, R. Chakravorty, "PROTON: A Policy-based Solution for Future 4G devices", in Proc. of 5th IEEE International Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks, POLICY04. 2004.
118. Q. Song, A. Jamalipour, "A quality of service negotiation-based vertical handoff decision scheme in heterogeneous wireless systems", *European Journal of Operational Research*, vol. 191, 2008, pp. 1059- 1074.
119. M. Kassar, B. Kervella, G. Pujolle, "An Intelligent Handover Management System for Future Generation Wireless Networks", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking - Intelligent Systems for Future Generation Wireless Networks*, vol. 2008, art. No 6, 2008.
120. E. Triantaphyllou, S. H. Mann "An Examination of the Effectiveness of Multi-Dimensional Decision-Making Methods: A Decision-Making Paradox", *International Journal of Decision Support Systems* 1989. vol. (5), pp. 303-312.
121. Y. Zhao, M. Shiwen, J.O. Neel, J.H. Reed, "Performance Evaluation of Cognitive Radios: Metrics, Utility Functions, and Methodology", in Proc. of the IEEE, 2009. vol. 97, (4). pp. 642-659.
122. E. H. Ong, J.Y. Khan, "Dynamic Access Network Selection with QoS Parameters Estimation: A Step Closer to ABC", *Vehicular Technology Conference*, 2008. VTC Spring 2008. IEEE, pp. 2671-2676.
123. S.Y. Hui, K.H. Yeung, "Challenges in the migration to 4G mobile systems", *Communications Magazine*, IEEE. 2003. vol. 41(3), pp. 54-59.
124. X. Gao, G. Wu, T. Miki, "End-to-end QoS provisioning in mobile heterogeneous networks", *Wireless Communications*, IEEE. 2004. vol.11(3), pp. 24-34.
125. S. Ashley, "Νοήμων Ραδιοτεχνολογία", *Scientific American*, ελληνική έκδοση, τεύχος Μάιος 2006.
126. P. Roshan, J. Leary, "802.11 Wireless LAN Fundamentals", Cisco Press, 2004.
127. W. Watthayu, "Loopy Belief Propagation: Bayesian Networks for Multi-Criteria Decision Making", *International Journal of Hybrid Information Technology*. 2009, Vol.2(2), pp.141-152.
128. G. Kaur, M.L. Singh, "A Survey of Recent Advances in Fuzzy Logic in Communication Systems" *International Journal of Applied Engineering Research*, 2009 . Research India Publications. 2009.

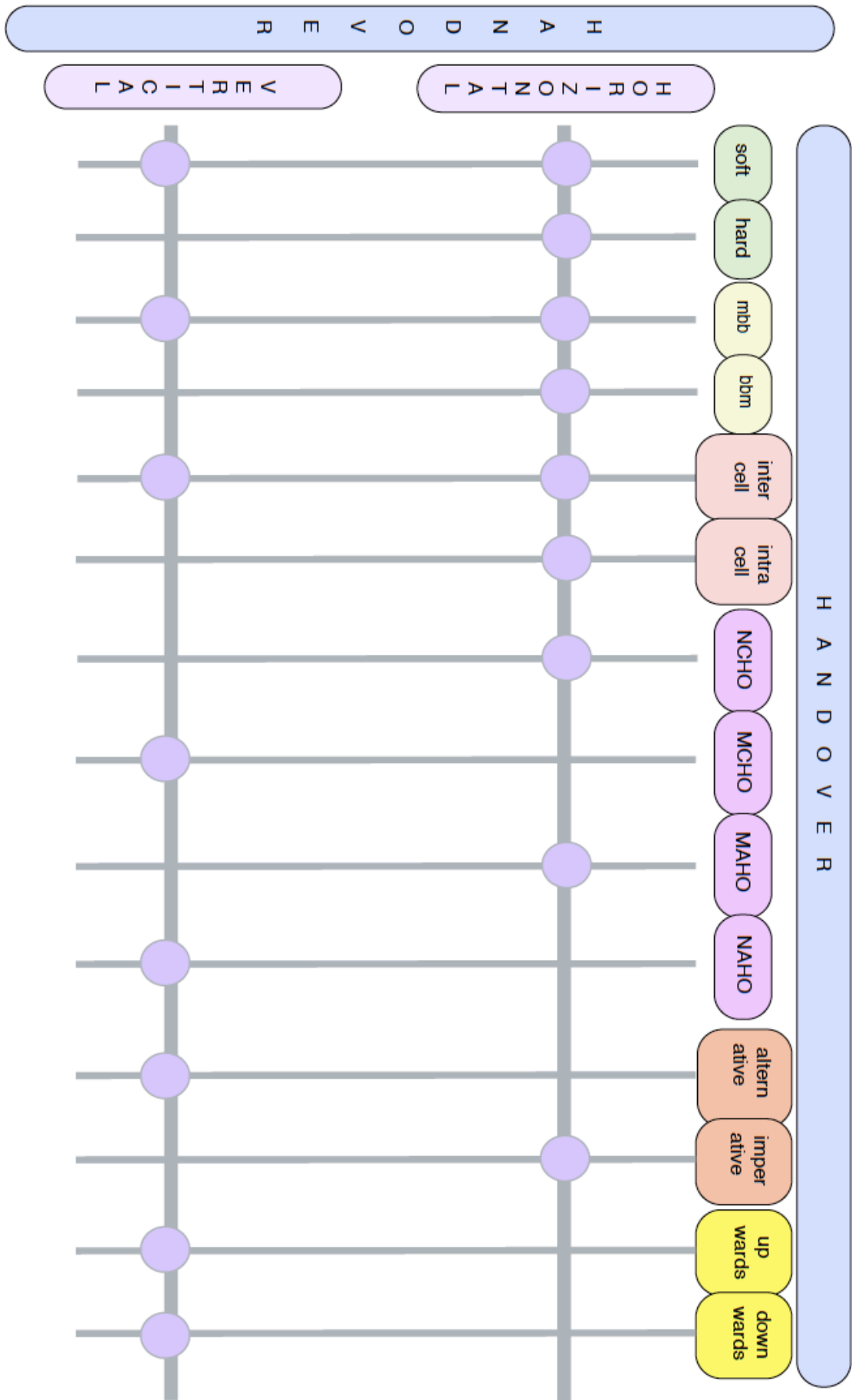
129. K. Radhika, A.V. Reddy, "AHP and Group Decision Making for Access Network Selection in Multi-Homed Mobile Terminals", *International Journal on Computers Science and Engineering (IJCSE)*, 2011. vol. 3(10), pp. 3412-3421.
130. C. Yiping, D. Chen, Y. Yuhang, "Access Discovery in Always Best Connected Networks", on *Knowledge Acquisition and Modelling Workshop*, 2008. KAM Workshop 2008. *IEEE International Symposium*, 2008. pp. 794-797.
131. Ong. E.H., J.Y. Khan, "On optimal network selection in a dynamic multi-RAT environment", *Communications Letters, IEEE*.2010. vol. 14(3). pp. 217-219.
132. M. Kassar, B. Kervella, G. Pujolle, "Architecture of an Intelligent Inter-system Handover Management Scheme", *Future Generation Communication and Networking (FGCN 2007)*. 2007. pp. 332-337.
133. Erkam Hossain (editor), "Heterogeneous Wireless Access Networks: Architectures and Protocols", Springer, 2008.
134. Law A.M., Kelton D.W., "Simulation Modeling and Analysis", McGraw-Hill Higher Education, 3rd international ed. 2000.

---

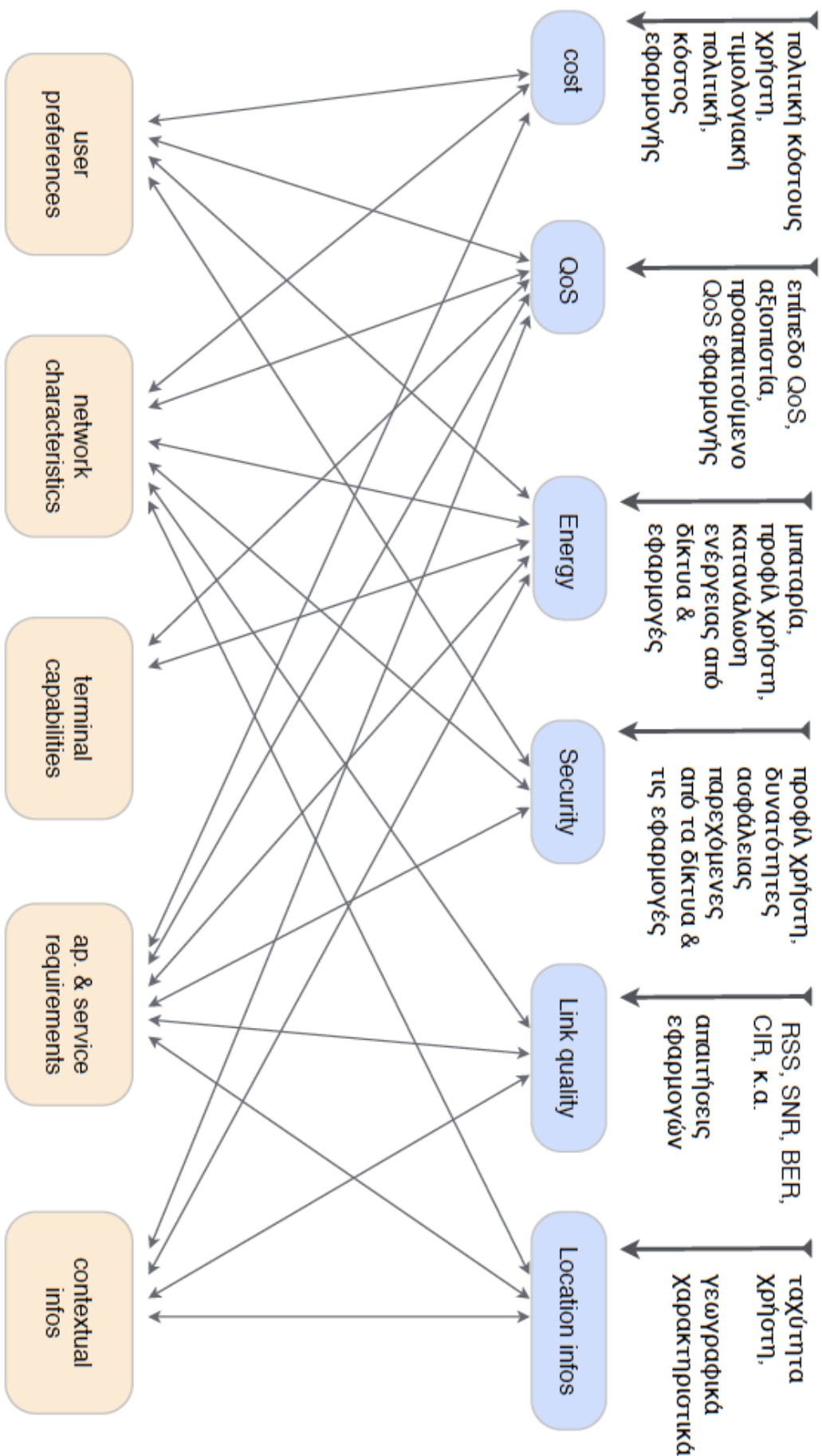
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

---

Παράρτημα Ι: κατηγορίες μεταπομπής

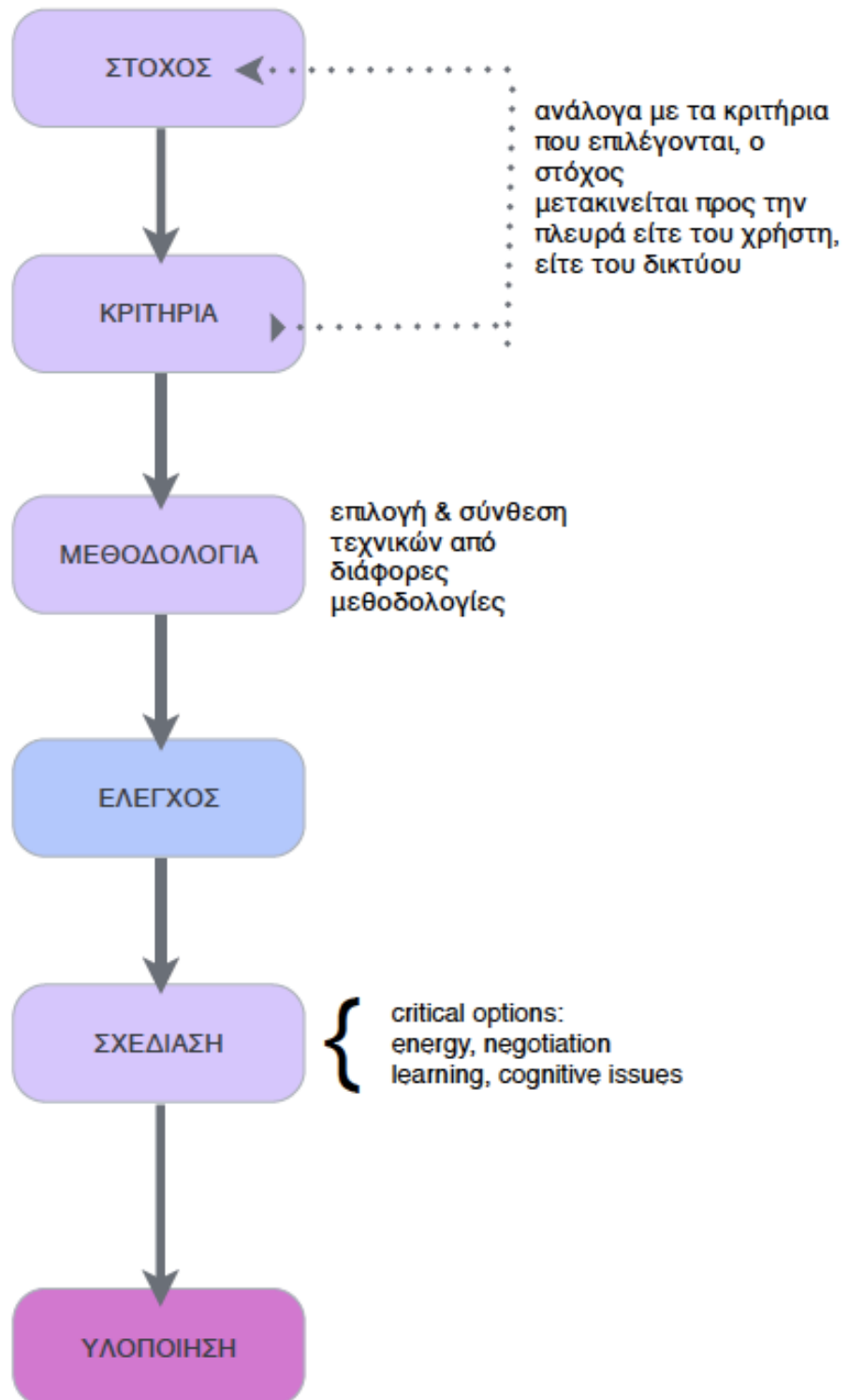


Παράρτημα ΙΙ: σχέσεις κριτηρίων



| ref. No [1] | Objectives / Control                         | Decision Criteria  | Methodology               | Power Efficiency | Negotiation          | Learning               |
|-------------|--|--|---------------------------|------------------|----------------------|------------------------|
| 4           | network centric / MCHO                       | Network characteristics<br>Terminal capabilities   | policies (PROTON)         | X                | X                    | X                      |
| 10          | user centric / MCHO                          | User preferences<br>Network characteristics  | MCDM (AHP) & Fuzzy Sets   | X                | X                    | X                      |
| 11 & 114    | network centric / ?                          | Network characteristics  | Optimization (MDP)        | X                | X                    | X                      |
| 13          | user centric / MCHO                          | Network characteristics<br>Application requirements  | Policies                  | X                | X                    | X                      |
| 14          | network centric / NCHO                       | network characteristics<br>Contextual Infos  | Policies                  | X                | X                    | X                      |
| 21          | both user & network centric /<br>MCHO - NAHO | User preferences<br>Network characteristics<br>Terminal capabilities                             | Policies                  | X                | ✓<br>(fully)         | X                      |
| 33          | network centric / MCHO                       | network characteristics<br>Contextual Infos  | Fuzzy Logic               | X                | X                    | ✓<br>(extra limited)   |
| 46 & 103    | user centric / MCHO                          | User preferences<br>Network characteristics  | DF (consumer surplus)     | X                | X                    | X                      |
| 62          | user centric / MCHO                          | Network characteristics<br>Application requirements  | MCDM (AHP/GRA)            | X                | X                    | X                      |
| 75          | both user & network centric / ?              | User preferences<br>Network characteristics<br>Terminal capabilities                             | Optimization (PMA)        | X                | ✓<br>(extra limited) | X                      |
| 96          | network centric / MCHO                       | Network characteristics  | MCDM (FSR TOPSIS)         | ✓                | X                    | X                      |
| 100         | user centric / MCHO                          | User preferences<br>Network characteristics<br>Application requirements                          | DF                        | ✓                | X                    | X                      |
| 101         | user centric / MCHO                          | User preferences<br>Network characteristics<br>Terminal capabilities                             | DF (utility functions)    | ✓                | X                    | X                      |
| 102         | network centric / NCHO                       | Network characteristics<br>Application requirements  | DF (system profit)        | X                | X                    | X                      |
| 104         | user centric / MCHO                          | User preferences<br>Network characteristics<br>Terminal capabilities                             | DF & Fuzzy Logic          | ✓                | X                    | X                      |
| 105         | user centric / MCHO - NAHO                   | Network characteristics<br>Terminal capabilities<br>User preferences                             | MCDM (TOPSIS)             | X                | X                    | X                      |
| 107         | user centric / MCHO - NAHO                   | User preferences<br>Network characteristics<br>Contextual Infos                                  | MCDM (AHP)                | X                | X                    | X                      |
| 112         | network centric / NCHO                       | User preferences<br>Network characteristics<br>Application requirements                          | Optimization (Knapsack)   | X                | X                    | X                      |
| 118         | network centric / NCHO                       | User preferences<br>Network characteristics<br>Application requirements<br>Terminal capabilities | optimization (semi - MDP) | X                | ✓<br>(limited)       | ✓<br>(operator's side) |

Παράρτημα IV: στάδια κατάστρωσης στρατηγικής





Παράρτημα V: χαρακτηριστικά δικτύων

| Διαθέσιμα Δίκτυα Πρόσβασης | ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ |      |            |            |                   |
|----------------------------|-------------------------------|------|------------|------------|-------------------|
|                            | Bandwidth (Kbps)              | Cost | Delay (ms) | Energy (W) | Security (levels) |
| WLAN 1                     | 10000                         | 0    | 50         | 5,0        | almost none (2)   |
| WLAN 2                     | 10500                         | 0    | 55         | 4,5        | very few (3)      |
| WLAN 3                     | 11000                         | 0    | 60         | 4,0        | none (1)          |
| WiMAX 1                    | 2000                          | 0    | 100        | 3,0        | very few (3)      |
| WiMAX 2                    | 1900                          | 0    | 90         | 3,5        | almost none (2)   |
| UMTS 1                     | 900                           | 1,0  | 180        | 1,0        | moderate (5)      |
| UMTS 2                     | 1000                          | 1,1  | 190        | 0,8        | good (7)          |
| UMTS 3                     | 1100                          | 1,2  | 200        | 0,9        | very good (8)     |

Παράρτημα VI: πίνακες τύπου A της ΑΗΡ

| CoR: 0.07276<br>CI: 0.102599<br>$\lambda_{\max}$ : 8.71819 | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ A (Bandwidth) |        |        |         |         |        |        |        |             |
|--|-----------------------------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|-------------|
|  | WLAN_1                      | WLAN_2 | WLAN_3 | WiMAX_1 | WiMAX_2 | UMTS_1 | UMTS_2 | UMTS_3 | Eigen Value |
| WLAN 1   | 1                           | 1/2    | 1/3    | 7       | 7       | 9      | 9      | 9      | 0,216437    |
| WLAN 2   |                             | 1      | 1/2    | 7       | 6       | 9      | 9      | 9      | 0,256786    |
| WLAN 3   |                             |        | 1      | 8       | 7       | 9      | 9      | 9      | 0,343495    |
| WiMAX 1  |                             |        |        | 1       | 2       | 4      | 3      | 3      | 0,0606673   |
| WiMAX 2  |                             |        |        |         | 1       | 4      | 3      | 3      | 0,0503007   |
| UMTS 1   |                             |        |        |         |         | 1      | 1/2    | 1/3    | 0,0181653   |
| UMTS 2   |                             |        |        |         |         |        | 1      | 1/3    | 0,0219909   |
| UMTS 3   |                             |        |        |         |         |        |        | 1      | 0,0321584   |

| CoR: 0.02425<br>CI: 0.0341954<br>$\lambda_{\max}$ : 8.23937 | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ A (Cost) |        |        |         |         |        |        |        |             |
|---|------------------------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|-------------|
|   | WLAN_1                 | WLAN_2 | WLAN_3 | WiMAX_1 | WiMAX_2 | UMTS_1 | UMTS_2 | UMTS_3 | Eigen Value |
| WLAN 1  | 1                      | 1      | 1      | 1       | 1       | 9      | 9      | 9      | 0,18657     |
| WLAN 2  |                        | 1      | 1      | 1       | 1       | 9      | 9      | 9      | 0,18657     |
| WLAN 3  |                        |        | 1      | 1       | 1       | 9      | 9      | 9      | 0,18657     |
| WiMAX 1   |                        |        |        | 1       | 1       | 9      | 9      | 9      | 0,18657     |
| WiMAX 2   |                        |        |        |         | 1       | 9      | 9      | 9      | 0,18657     |
| UMTS 1  |                        |        |        |         |         | 1      | 9      | 9      | 0,029387    |
| UMTS 2  |                        |        |        |         |         |        | 1      | 9      | 0,0209834   |
| UMTS 3  |                        |        |        |         |         |        |        | 1      | 0,0167816   |

| CoR: 0,07404<br>CI: 0.104441<br>$\lambda_{\max}$ : 8.73109 | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ A (Delay) |        |        |         |         |        |        |        |             |
|--|-------------------------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|-------------|
|  | WLAN_1                  | WLAN_2 | WLAN_3 | WiMAX_1 | WiMAX_2 | UMTS_1 | UMTS_2 | UMTS_3 | Eigen Value |
| WLAN 1   | 1                       | 2      | 3      | 5       | 5       | 6      | 7      | 7      | 0,31862     |
| WLAN 2   |                         | 1      | 2      | 5       | 4       | 6      | 6      | 7      | 0,238301    |
| WLAN 3   |                         |        | 1      | 4       | 4       | 5      | 6      | 7      | 0,18393     |
| WiMAX 1  |                         |        |        | 1       | 1/2     | 4      | 4      | 6      | 0,0781113   |
| WiMAX 2  |                         |        |        |         | 1       | 4      | 4      | 5      | 0,0912564   |
| UMTS 1   |                         |        |        |         |         | 1      | 2      | 4      | 0,0404145   |
| UMTS 2   |                         |        |        |         |         |        | 1      | 2      | 0,028483    |
| UMTS 3   |                         |        |        |         |         |        |        | 1      | 0,0208833   |

| CoR: 0,01470<br>CI: 0.0207294<br>$\lambda_{\max}$ : 8.14511 | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Α (Security) |        |        |         |         |        |        |        |             |
|---|----------------------------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|-------------|
|   | WLAN_1                     | WLAN_2 | WLAN_3 | WiMAX_1 | WiMAX_2 | UMTS_1 | UMTS_2 | UMTS_3 | Eigen Value |
| WLAN 1  | 1                          | 1/2    | 2      | 1/2     | 1       | 1/5    | 1/7    | 1/8    | 0,0367878   |
| WLAN 2  |                            | 1      | 3      | 1       | 2       | 1/3    | 1/5    | 1/6    | 0,0628413   |
| WLAN 3  |                            |        | 1      | 1/3     | 1/2     | 1/6    | 1/8    | 1/9    | 0,0248218   |
| WiMAX 1   |                            |        |        | 1       | 2       | 1/3    | 1/5    | 1/6    | 0,0628413   |
| WiMAX 2   |                            |        |        |         | 1       | 1/5    | 1/7    | 1/8    | 0,0367878   |
| UMTS 1  |                            |        |        |         |         | 1      | 1/2    | 1/3    | 0,159851    |
| UMTS 2  |                            |        |        |         |         |        | 1      | 1/2    | 0,257649    |
| UMTS 3  |                            |        |        |         |         |        |        | 1      | 0,35842     |

| CoR: 0,08836<br>CI: 0.124594<br>$\lambda_{\max}$ : 8.87216 | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Α (Energy) |        |        |         |         |        |        |        |             |
|--|--------------------------|--------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|-------------|
|  | WLAN_1                   | WLAN_2 | WLAN_3 | WiMAX_1 | WiMAX_2 | UMTS_1 | UMTS_2 | UMTS_3 | Eigen Value |
| WLAN 1   | 1                        | 1/2    | 1/3    | 1/5     | 1/4     | 1/8    | 1/8    | 1/8    | 0,019369    |
| WLAN 2   |                          | 1      | 1/2    | 1/4     | 1/3     | 1/6    | 1/7    | 1/7    | 0,0267187   |
| WLAN 3   |                          |        | 1      | 1/3     | 1/2     | 1/6    | 1/6    | 1/7    | 0,0363714   |
| WiMAX 1  |                          |        |        | 1       | 3       | 1/5    | 1/6    | 1/6    | 0,0770471   |
| WiMAX 2  |                          |        |        |         | 1       | 1/4    | 1/5    | 1/6    | 0,0521697   |
| UMTS 1   |                          |        |        |         |         | 1      | 1/4    | 1/3    | 0,173901    |
| UMTS 2   |                          |        |        |         |         |        | 1      | 1/4    | 0,26256     |
| UMTS 3   |                          |        |        |         |         |        |        | 1      | 0,351863    |

**ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ**  
(πίνακας τύπου Β)

| Διάδοση Δικτύου Πρόσβασης | Bandwidth | Cost  | Delay | Energy | Security |
|---------------------------|-----------|-------|-------|--------|----------|
| WLAN 1                    | 21,64     | 18,66 | 31,86 | 1,94   | 3,68     |
| WLAN 2                    | 25,68     | 18,66 | 23,83 | 2,67   | 6,28     |
| WLAN 3                    | 34,35     | 18,66 | 18,39 | 3,64   | 2,48     |
| WIMAX 1                   | 6,07      | 18,66 | 7,81  | 7,70   | 6,28     |
| WIMAX 2                   | 5,03      | 18,66 | 9,13  | 5,22   | 3,68     |
| UMTS 1                    | 1,82      | 2,94  | 4,04  | 17,39  | 15,99    |
| UMTS 2                    | 2,20      | 2,10  | 2,85  | 26,26  | 25,77    |
| UMTS 3                    | 3,22      | 1,68  | 2,09  | 35,19  | 35,84    |

Παράρτημα VIII: πίνακες τύπου Γ (home)

| CoR: 0.09321                               | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (voice) |      |       |        |          |             |
|--|-------------------------|------|-------|--------|----------|-------------|
| CI: 0.104404<br>λ <sub>max</sub> : 5.41762 | Bandwidth               | Cost | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth                                  | 1                       | 1/2  | 1/3   | 7      | 5        | 0,207664    |
| Cost                                       |                         | 1    | 1     | 7      | 5        | 0,319520    |
| Delay                                      |                         |      | 1     | 7      | 5        | 0,357852    |
| Energy                                     |                         |      |       | 1      | 1/6      | 0,0317595   |
| Security                                   |                         |      |       |        | 1        | 0,0832042   |

| CoR: 0.09625                              | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (video) |      |       |        |          |             |
|---|-------------------------|------|-------|--------|----------|-------------|
| CI: 0.107809<br>λ <sub>max</sub> : 5.4124 | Bandwidth               | Cost | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth                                 | 1                       | 2    | 2     | 7      | 5        | 0,371714    |
| Cost                                      |                         | 1    | 1/3   | 7      | 5        | 0,202975    |
| Delay                                     |                         |      | 1     | 7      | 5        | 0,316577    |
| Energy                                    |                         |      |       | 1      | 1/5      | 0,0321881   |
| Security                                  |                         |      |       |        | 1        | 0,076546    |

| CoR: 0.01353                               | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (secure browsing) |      |       |        |          |             |
|--|-----------------------------------|------|-------|--------|----------|-------------|
| CI: 0.015163<br>λ <sub>max</sub> : 5.06065 | Bandwidth                         | Cost | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth                                  | 1                                 | 2    | 3     | 8      | 2        | 0,382283    |
| Cost                                       |                                   | 1    | 2     | 8      | 1        | 0,228909    |
| Delay                                      |                                   |      | 1     | 4      | 1/2      | 0,12075     |
| Energy                                     |                                   |      |       | 1      | 1/9      | 0,032689    |
| Security                                   |                                   |      |       |        | 1        | 0,235369    |

Παράρτημα ΙΧ: πίνακες τύπου Γ (pedestrian)

| CoR: 0.03119                                | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (voice) |      |       |        |          |             |
|---|-------------------------|------|-------|--------|----------|-------------|
| CI: 0.0349426<br>λ <sub>max</sub> : 5.13977 | Bandwidth               | Cost | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth                                   | 1                       | 1/2  | 1/3   | 1      | 4        | 0,160044    |
| Cost  |                         | 1    | 1     | 1      | 4        | 0,258941    |
| Delay                                       |                         |      | 1     | 2      | 4        | 0,328189    |
| Energy                                      |                         |      |       | 1      | 4        | 0,195876    |
| Security                                    |                         |      |       |        | 1        | 0,0569506   |

| CoR: 0.05356                               | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (video) |      |       |        |          |             |
|--|-------------------------|------|-------|--------|----------|-------------|
| CI: 0.059994<br>λ <sub>max</sub> : 5.23998 | Bandwidth               | Cost | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth                                  | 1                       | 2    | 1     | 1      | 4        | 0,252246    |
| Cost                                       |                         | 1    | 1/3   | 1      | 4        | 0,15548     |
| Delay                                      |                         |      | 1     | 1/2    | 4        | 0,255026    |
| Energy                                     |                         |      |       | 1      | 5        | 0,281821    |
| Security                                   |                         |      |       |        | 1        | 0,0554269   |

| CoR: 0.05682                                | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (secure browsing) |      |       |        |          |             |
|---|-----------------------------------|------|-------|--------|----------|-------------|
| CI: 0.0636466<br>λ <sub>max</sub> : 5.25459 | Bandwidth                         | Cost | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth                                   | 1                                 | 2    | 3     | 1/2    | 1        | 0,216574    |
| Cost  |                                   | 1    | 2     | 1      | 1/4      | 0,138559    |
| Delay                                       |                                   |      | 1     | 1/4    | 1/4      | 0,0671954   |
| Energy                                      |                                   |      |       | 1      | 1        | 0,26989     |
| Security                                    |                                   |      |       |        | 1        | 0,307782    |

Παράρτημα X: πίνακες τύπου Γ (low-speed)

| ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (voice)                                     |           |      |       |        |          |             |
|---|-----------|------|-------|--------|----------|-------------|
| CoR: 0.03137<br>CI: 0,0351365<br>λ <sub>max</sub> : 5.14055 | Bandwidth | Cost | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth   | 1         | 1/2  | 1/3   | 1/2    | 4        | 0,138025    |
| Cost  |           | 1    | 1     | 1/2    | 4        | 0,222783    |
| Delay   |           |      | 1     | 1      | 4        | 0,279427    |
| Energy  |           |      |       | 1      | 5        | 0,306313    |
| Security  |           |      |       |        | 1        | 0,0534522   |

| ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (video)                                     |           |      |       |        |          |             |
|---|-----------|------|-------|--------|----------|-------------|
| CoR: 0.04630<br>CI: 0,0518666<br>λ <sub>max</sub> : 5.20747 | Bandwidth | Cost | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth   | 1         | 3    | 1     | 1/2    | 4        | 0,235059    |
| Cost  |           | 1    | 1/3   | 1/2    | 4        | 0,126348    |
| Delay   |           |      | 1     | 1/2    | 4        | 0,235059    |
| Energy  |           |      |       | 1      | 6        | 0,354068    |
| Security  |           |      |       |        | 1        | 0,0494663   |

| ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (secure browsing)                          |           |      |       |        |          |             |
|--|-----------|------|-------|--------|----------|-------------|
| CoR: 0.06334<br>CI: 0,0709496<br>λ <sub>max</sub> : 5.2838 | Bandwidth | Cost | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth  | 1         | 2    | 3     | 1/3    | 1        | 0,194997    |
| Cost   |           | 1    | 2     | 1/2    | 1/4      | 0,105944    |
| Delay  |           |      | 1     | 1/5    | 1/4      | 0,0612888   |
| Energy   |           |      |       | 1      | 1/2      | 0,297297    |
| Security   |           |      |       |        | 1        | 0,340474    |

Παράρτημα XI: πίνακες τύπου Γ (high-speed)

| CoR: 0.04543                   |           | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (voice) |       |        |          |             |
|--------------------------------|-----------|-------------------------|-------|--------|----------|-------------|
| CI: 0,0508832<br>λmax: 5.20353 | Bandwidth | Cost                    | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth                      | 1         | 1/2                     | 1/3   | 1/4    | 4        | 0,110402    |
| Cost                           |           | 1                       | 1     | 1/4    | 4        | 0,176698    |
| Delay                          |           |                         | 1     | 1/2    | 4        | 0,219332    |
| Energy                         |           |                         |       | 1      | 6        | 0,445774    |
| Security                       |           |                         |       |        | 1        | 0,047794    |

| CoR: 0.08100                  |           | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (video) |       |        |          |             |
|-------------------------------|-----------|-------------------------|-------|--------|----------|-------------|
| CI: 0,090723<br>λmax: 5.36289 | Bandwidth | Cost                    | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth                     | 1         | 2                       | 1/2   | 1/5    | 4        | 0,1309      |
| Cost                          |           | 1                       | 1/3   | 1/5    | 4        | 0,0950432   |
| Delay                         |           |                         | 1     | 1/5    | 4        | 0,190822    |
| Energy                        |           |                         |       | 1      | 6        | 0,538772    |
| Security                      |           |                         |       |        | 1        | 0,0444629   |

| CoR: 0.05857                   |           | ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Γ (secure browsing) |       |        |          |             |
|--------------------------------|-----------|-----------------------------------|-------|--------|----------|-------------|
| CI: 0,0656073<br>λmax: 5.26243 | Bandwidth | Cost                              | Delay | Energy | Security | Eigen Value |
| Bandwidth                      | 1         | 2                                 | 3     | 1/5    | 1        | 0,158964    |
| Cost                           |           | 1                                 | 3     | 1/5    | 1/4      | 0,0878813   |
| Delay                          |           |                                   | 1     | 1/7    | 1/5      | 0,0466767   |
| Energy                         |           |                                   |       | 1      | 1        | 0,430873    |
| Security                       |           |                                   |       |        | 1        | 0,275605    |



Παράρτημα ΧΙΙ: πίνακες τύπου Δ

| ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Δ |       |       |                 |
|-----------------|-------|-------|-----------------|
| HOME            | voice | video | secure browsing |
| Bandwidth       | 20,77 | 37,17 | 38,23           |
| Cost            | 31,95 | 20,30 | 22,89           |
| Delay           | 35,79 | 31,66 | 12,08           |
| Energy          | 3,18  | 3,22  | 3,27            |
| Security        | 8,32  | 7,65  | 23,54           |

| ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Δ |       |       |                 |
|-----------------|-------|-------|-----------------|
| LOW_SPEED       | voice | video | secure browsing |
| Bandwidth       | 13,80 | 23,51 | 19,50           |
| Cost            | 22,28 | 12,63 | 10,59           |
| Delay           | 27,94 | 23,51 | 6,13            |
| Energy          | 30,63 | 35,41 | 29,73           |
| Security        | 5,35  | 4,95  | 34,05           |

| ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Δ |       |       |                 |
|-----------------|-------|-------|-----------------|
| PEDESTRIAN      | voice | video | secure browsing |
| Bandwidth       | 16,00 | 25,22 | 21,66           |
| Cost            | 25,89 | 15,55 | 13,86           |
| Delay           | 32,82 | 25,50 | 6,72            |
| Energy          | 19,59 | 28,18 | 26,99           |
| Security        | 5,70  | 5,54  | 30,78           |

| ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΥΠΟΥ Δ |       |       |                 |
|-----------------|-------|-------|-----------------|
| HIGH_SPEED      | voice | video | secure browsing |
| Bandwidth       | 11,04 | 13,09 | 15,90           |
| Cost            | 17,67 | 9,5   | 8,79            |
| Delay           | 21,93 | 19,08 | 4,67            |
| Energy          | 44,58 | 53,88 | 43,09           |
| Security        | 4,78  | 4,45  | 27,56           |

Παράρτημα XIII: τελικές κατατάξεις για την 1η υλοποίηση

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (home) |              |              |                 |
|-----------------|--------------|--------------|-----------------|
| HOME            | voice        | video        | secure browsing |
| Wifi 1          | <b>22,22</b> | 22,26        | 17,32           |
| Wifi 2          | 20,42        | 21,45        | 18,54           |
| Wifi 3          | 20,00        | <b>22,69</b> | <b>20,32</b>    |
| WiMAX 1         | 10,78        | 9,25         | 9,26            |
| WiMAX 2         | 10,75        | 9,00         | 8,33            |
| UMTS 1          | 4,65         | 4,34         | 6,19            |
| UMTS 2          | 5,13         | 4,97         | 8,59            |
| UMTS 3          | 6,06         | 6,07         | 11,45           |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (low speed) |              |              |                 |
|----------------------|--------------|--------------|-----------------|
| LOW SPEED            | voice        | video        | secure browsing |
| Wifi 1               | <b>16,84</b> | 15,81        | 9,98            |
| Wifi 2               | 15,52        | 15,26        | 11,38           |
| Wifi 3               | 15,28        | <b>16,11</b> | 11,73           |
| WiMAX 1              | 9,88         | 8,7          | 8,07            |
| WiMAX 2              | 9,20         | 7,72         | 6,32            |
| UMTS 1               | 8,23         | 8,70         | 11,52           |
| UMTS 2               | 10,99        | 12,40        | 17,40           |
| UMTS 3               | 14,09        | 15,69        | <b>23,6</b>     |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (pedestrian) |              |              |                 |
|-----------------------|--------------|--------------|-----------------|
| PEDESTRIAN            | voice        | video        | secure browsing |
| Wifi 1                | <b>19,34</b> | 17,23        | 11,07           |
| Wifi 2                | 17,64        | 16,56        | 12,40           |
| Wifi 3                | 17,22        | <b>17,42</b> | 13,01           |
| WiMAX 1               | 10,23        | 8,94         | 8,43            |
| WiMAX 2               | 9,86         | 8,17         | 6,83            |
| UMTS 1                | 6,70         | 7,74         | 10,68           |
| UMTS 2                | 8,44         | 10,44        | 15,98           |
| UMTS 3                | 10,57        | 13,51        | <b>21,6</b>     |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (high speed) |              |              |                 |
|-----------------------|--------------|--------------|-----------------|
| HIFH SPEED            | voice        | video        | secure browsing |
| Wifi 1                | 13,70        | 11,89        | 8,42            |
| Wifi 2                | 12,85        | 11,40        | 9,71            |
| Wifi 3                | 12,86        | 11,85        | 10,21           |
| WiMAX 1               | 9,41         | 8,48         | 7,97            |
| WiMAX 2               | 8,36         | 7,14         | 6,17            |
| UMTS 1                | 10,12        | 11,37        | 12,64           |
| UMTS 2                | 14,18        | 16,33        | 19,08           |
| UMTS 3                | <b>18,52</b> | <b>21,53</b> | <b>25,8</b>     |

Παράρτημα XIV: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (1min)

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (home) |                |                |                 |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| HOME            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1          | <b>62,1616</b> | <b>70,8326</b> | 56,6217         |
| Wifi 2          | 60,9015        | 70,6097        | <b>60,2134</b>  |
| Wifi 3          | 57,066         | 68,0002        | 55,1631         |
| WiMAX 1         | 30,2577        | 28,9834        | 25,7787         |
| WiMAX 2         | 30,997         | 29,4277        | 23,139          |
| UMTS 1          | 17,5312        | 17,2153        | 21,8227         |
| UMTS 2          | 19,3587        | 19,0949        | 27,9703         |
| UMTS 3          | 20,0375        | 19,9           | 31,0264         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (low speed) |                |                |                 |
|----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| LOW SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1               | <b>46,3531</b> | <b>49,1695</b> | 34,9209         |
| Wifi 2               | 45,1998        | 48,8245        | 39,5943         |
| Wifi 3               | 42,4864        | 47,0057        | 31,6139         |
| WiMAX 1              | 23,56          | 21,5646        | 22,4589         |
| WiMAX 2              | 24,1235        | 21,8134        | 18,1771         |
| UMTS 1               | 16,5036        | 16,3744        | 28,6314         |
| UMTS 2               | 18,5622        | 18,6527        | 38,2145         |
| UMTS 3               | 18,4075        | 18,5121        | <b>42,0102</b>  |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (pedestrian) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| PEDESTRIAN            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | <b>53,6278</b> | <b>53,1554</b> | 37,1356         |
| Wifi 2                | 52,142         | 52,7596        | <b>41,4367</b>  |
| Wifi 3                | 49,0305        | 50,6935        | 34,3172         |
| WiMAX 1               | 26,6422        | 23,257         | 22,3502         |
| WiMAX 2               | 27,4832        | 23,573         | 18,5078         |
| UMTS 1                | 16,816         | 16,4962        | 26,5905         |
| UMTS 2                | 18,54          | 18,6652        | 35,2733         |
| UMTS 3                | 18,587         | 18,7198        | 38,7208         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (high speed) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| HIFH SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 2                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 3                | 0              | 0              | 0               |
| WiMAX 1               | <b>37,2951</b> | <b>35,1126</b> | 28,6286         |
| WiMAX 2               | 36,5329        | 34,689         | <b>32,4994</b>  |
| UMTS 1                | 34,3435        | 32,9256        | 26,138          |
| UMTS 2                | 19,6911        | 17,5667        | 18,941          |
| UMTS 3                | 19,9285        | 17,6094        | 15,3373         |

Παράρτημα XV: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (15 min)

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (home) |                |                |                 |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| HOME            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1          | <b>64,8665</b> | <b>72,5672</b> | 58,5728         |
| Wifi 2          | 63,6111        | 72,3491        | <b>62,1694</b>  |
| Wifi 3          | 59,7815        | 69,7456        | 57,1252         |
| WiMAX 1         | 32,9909        | 30,7466        | 27,7589         |
| WiMAX 2         | 33,7201        | 31,1807        | 25,1088         |
| UMTS 1          | 17,8764        | 17,5146        | 22,1361         |
| UMTS 2          | 19,7447        | 19,4401        | 28,3295         |
| UMTS 3          | 20,384         | 20,209         | 31,3481         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (low speed) |                |                |                 |
|----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| LOW SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1               | <b>48,6182</b> | <b>50,6941</b> | 36,1965         |
| Wifi 2               | 47,5103        | 50,4016        | 40,9139         |
| Wifi 3               | 44,8536        | 48,6484        | 32,9886         |
| WiMAX 1              | 26,0973        | 23,404         | 23,9987         |
| WiMAX 2              | 26,5637        | 23,5404        | 19,6226         |
| UMTS 1               | 18,6384        | 18,7877        | 30,6573         |
| UMTS 2               | 21,1991        | 21,6514        | 40,732          |
| UMTS 3               | 20,7538        | 21,179         | <b>44,2491</b>  |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (pedestrian) |                |               |                 |
|-----------------------|----------------|---------------|-----------------|
| PEDESTRIAN            | voice          | video         | secure browsing |
| Wifi 1                | <b>56,0466</b> | <b>54,827</b> | 38,6505         |
| Wifi 2                | 54,5897        | 54,4729       | <b>42,9916</b>  |
| Wifi 3                | 51,5145        | 52,459        | 35,922          |
| WiMAX 1               | 29,2351        | 25,1791       | 24,105          |
| WiMAX 2               | 30,0139        | 25,4056       | 20,1769         |
| UMTS 1                | 18,2299        | 18,4396       | 28,4476         |
| UMTS 2                | 20,2706        | 21,0725       | 37,575          |
| UMTS 3                | 20,128         | 20,8612       | 40,7682         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (high speed) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| HIFH SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 2                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 3                | 0              | 0              | 0               |
| WiMAX 1               | <b>39,3621</b> | <b>36,6227</b> | 29,9356         |
| WiMAX 2               | 38,6659        | 36,2789        | <b>33,8703</b>  |
| UMTS 1                | 36,559         | 34,6152        | 27,5887         |
| UMTS 2                | 22,1543        | 19,5557        | 20,6311         |
| UMTS 3                | 22,2502        | 19,4274        | 16,8906         |

Παράρτημα XVI: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (30min)

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (home) |                |               |                 |
|-----------------|----------------|---------------|-----------------|
| HOME            | voice          | video         | secure browsing |
| Wifi 1          | <b>72,9812</b> | <b>77,771</b> | 64,4261         |
| Wifi 2          | 71,7399        | 77,5672       | <b>68,0372</b>  |
| Wifi 3          | 67,928         | 74,9816       | 63,0112         |
| WiMAX 1         | 41,1904        | 36,0363       | 33,6994         |
| WiMAX 2         | 41,8893        | 36,4397       | 31,0182         |
| UMTS 1          | 18,9117        | 18,4123       | 23,0762         |
| UMTS 2          | 20,9027        | 20,4758       | 29,4071         |
| UMTS 3          | 21,4235        | 21,136        | 32,3132         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (low speed) |                |               |                 |
|----------------------|----------------|---------------|-----------------|
| LOW SPEED            | voice          | video         | secure browsing |
| Wifi 1               | 55,4134        | <b>55,268</b> | 40,0232         |
| Wifi 2               | <b>54,4416</b> | 55,1329       | 44,8728         |
| Wifi 3               | 51,9551        | 53,5764       | 37,1126         |
| WiMAX 1              | 33,7093        | 28,9221       | 28,6182         |
| WiMAX 2              | 33,8839        | 28,7213       | 23,9589         |
| UMTS 1               | 25,0429        | 26,0276       | 36,7352         |
| UMTS 2               | 29,1098        | 30,6474       | 48,2844         |
| UMTS 3               | 27,7925        | 29,1794       | <b>50,9656</b>  |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (pedestrian) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| PEDESTRIAN            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | <b>63,3027</b> | <b>59,8417</b> | 43,1951         |
| Wifi 2                | 61,9329        | 59,6128        | <b>47,6561</b>  |
| Wifi 3                | 58,9665        | 57,7555        | 40,7365         |
| WiMAX 1               | 37,0136        | 30,9453        | 29,3693         |
| WiMAX 2               | 37,6058        | 30,9034        | 25,1842         |
| UMTS 1                | 22,4715        | 24,27          | 34,0188         |
| UMTS 2                | 25,4623        | 28,2942        | 44,48           |
| UMTS 3                | 24,751         | 27,2854        | 46,9103         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (high speed) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| HIFH SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 2                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 3                | 0              | 0              | 0               |
| WiMAX 1               | <b>45,5628</b> | <b>41,1529</b> | 33,8567         |
| WiMAX 2               | 45,0647        | 41,0485        | <b>37,9829</b>  |
| UMTS 1                | 43,2055        | 39,6842        | 31,9407         |
| UMTS 2                | 29,5438        | 25,5227        | 25,7012         |
| UMTS 3                | 29,2151        | 24,8812        | 21,5504         |

Παράρτημα XVII: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (60min)

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (home) |                |                |                 |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| HOME            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1          | <b>89,2106</b> | <b>88,1786</b> | 76,1328         |
| Wifi 2          | 87,9976        | 88,0034        | <b>79,7729</b>  |
| Wifi 3          | 84,221         | 85,4536        | 74,7832         |
| WiMAX 1         | 57,5894        | 46,6156        | 45,5804         |
| WiMAX 2         | 58,2277        | 46,9577        | 42,8369         |
| UMTS 1          | 20,9825        | 20,2078        | 24,9564         |
| UMTS 2          | 23,2189        | 22,5472        | 31,5624         |
| UMTS 3          | 23,5024        | 22,9901        | 34,2434         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (low speed) |                |                |                 |
|----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| LOW SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1               | <b>69,0038</b> | 64,4158        | 47,6766         |
| Wifi 2               | 68,3043        | <b>64,5954</b> | 52,7904         |
| Wifi 3               | 66,1581        | 63,4324        | 45,3606         |
| WiMAX 1              | 48,9333        | 39,9584        | 37,8572         |
| WiMAX 2              | 48,5245        | 39,0831        | 32,6316         |
| UMTS 1               | 37,8519        | 40,5073        | 48,891          |
| UMTS 2               | 44,9312        | 48,6395        | 63,3892         |
| UMTS 3               | 41,87          | 45,1803        | <b>64,3988</b>  |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (pedestrian) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| PEDESTRIAN            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | <b>77,8149</b> | 69,8711        | 52,2843         |
| Wifi 2                | 76,6192        | <b>69,8927</b> | 56,9852         |
| Wifi 3                | 73,8705        | 68,3485        | 50,3655         |
| WiMAX 1               | 52,5706        | 42,4776        | 39,898          |
| WiMAX 2               | 52,7897        | 41,899         | 35,1987         |
| UMTS 1                | 30,9547        | 35,9308        | 45,1613         |
| UMTS 2                | 35,8457        | 42,7376        | 58,29           |
| UMTS 3                | 33,9971        | 40,1338        | <b>59,1946</b>  |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (high speed) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| HIFH SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 2                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 3                | 0              | 0              | 0               |
| WiMAX 1               | <b>57,9642</b> | 50,2133        | 41,6989         |
| WiMAX 2               | 57,8623        | <b>50,5878</b> | <b>46,2081</b>  |
| UMTS 1                | 56,4985        | 49,8222        | 40,6447         |
| UMTS 2                | 44,3227        | 37,4567        | 35,8415         |
| UMTS 3                | 43,1449        | 35,7889        | 30,8699         |

Παράρτημα XVIII: τελικές κατατάξεις για την  
2η υλοποίηση (120min)

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (home) |                |                |                 |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| HOME            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1          | <b>121,669</b> | <b>108,994</b> | 99,5459         |
| Wifi 2          | 120,513        | 108,876        | <b>103,244</b>  |
| Wifi 3          | 116,807        | 106,398        | 98,3272         |
| WiMAX 1         | 90,3874        | 67,7743        | 69,3424         |
| WiMAX 2         | 90,9046        | 67,9937        | 66,4743         |
| UMTS 1          | 25,124         | 23,7988        | 28,7169         |
| UMTS 2          | 27,8512        | 26,6899        | 35,8728         |
| UMTS 3          | 27,6604        | 26,6981        | 38,1039         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (low speed) |                |                |                 |
|----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| LOW SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1               | <b>96,1846</b> | 82,7114        | 62,9834         |
| Wifi 2               | 96,0296        | 83,5205        | 68,6257         |
| Wifi 3               | 94,5641        | 83,1444        | 61,8566         |
| WiMAX 1              | 79,3813        | 62,0311        | 56,3352         |
| WiMAX 2              | 77,8056        | 59,8068        | 49,9771         |
| UMTS 1               | 63,4699        | 69,4668        | 73,2025         |
| UMTS 2               | 76,5739        | <b>84,6236</b> | <b>93,5987</b>  |
| UMTS 3               | 70,025         | 77,1821        | 91,265          |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (pedestrian) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| PEDESTRIAN            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | <b>106,839</b> | 89,9299        | 70,4627         |
| Wifi 2                | 105,992        | <b>90,4525</b> | 75,6434         |
| Wifi 3                | 103,678        | 89,5345        | 69,6235         |
| WiMAX 1               | 83,6846        | 65,5422        | 60,9553         |
| WiMAX 2               | 83,1574        | 63,8901        | 55,2279         |
| UMTS 1                | 47,9212        | 59,2523        | 67,4463         |
| UMTS 2                | 56,6125        | 71,6244        | 85,91           |
| UMTS 3                | 52,4892        | 65,8306        | <b>83,7632</b>  |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (high speed) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| HIFH SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 2                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 3                | 0              | 0              | 0               |
| WiMAX 1               | 82,767         | 68,3341        | 57,3833         |
| WiMAX 2               | <b>83,4576</b> | 69,6665        | <b>62,6585</b>  |
| UMTS 1                | 83,0845        | <b>70,0982</b> | 58,0527         |
| UMTS 2                | 73,8807        | 61,3247        | 56,1222         |
| UMTS 3                | 71,0046        | 57,6043        | 49,5091         |

Παράρτημα XIX: τελικές κατατάξεις για την 2η υλοποίηση (240min)

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (home) |                |                |                 |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| HOME            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1          | <b>186,587</b> | <b>150,624</b> | 146,372         |
| Wifi 2          | 185,544        | 150,621        | <b>150,187</b>  |
| Wifi 3          | 181,979        | 148,286        | 145,415         |
| WiMAX 1         | 155,983        | 110,092        | 116,866         |
| WiMAX 2         | 156,258        | 110,066        | 113,749         |
| UMTS 1          | 33,407         | 30,9808        | 36,2379         |
| UMTS 2          | 37,1158        | 34,9754        | 44,4938         |
| UMTS 3          | 35,9762        | 34,1143        | 45,8247         |

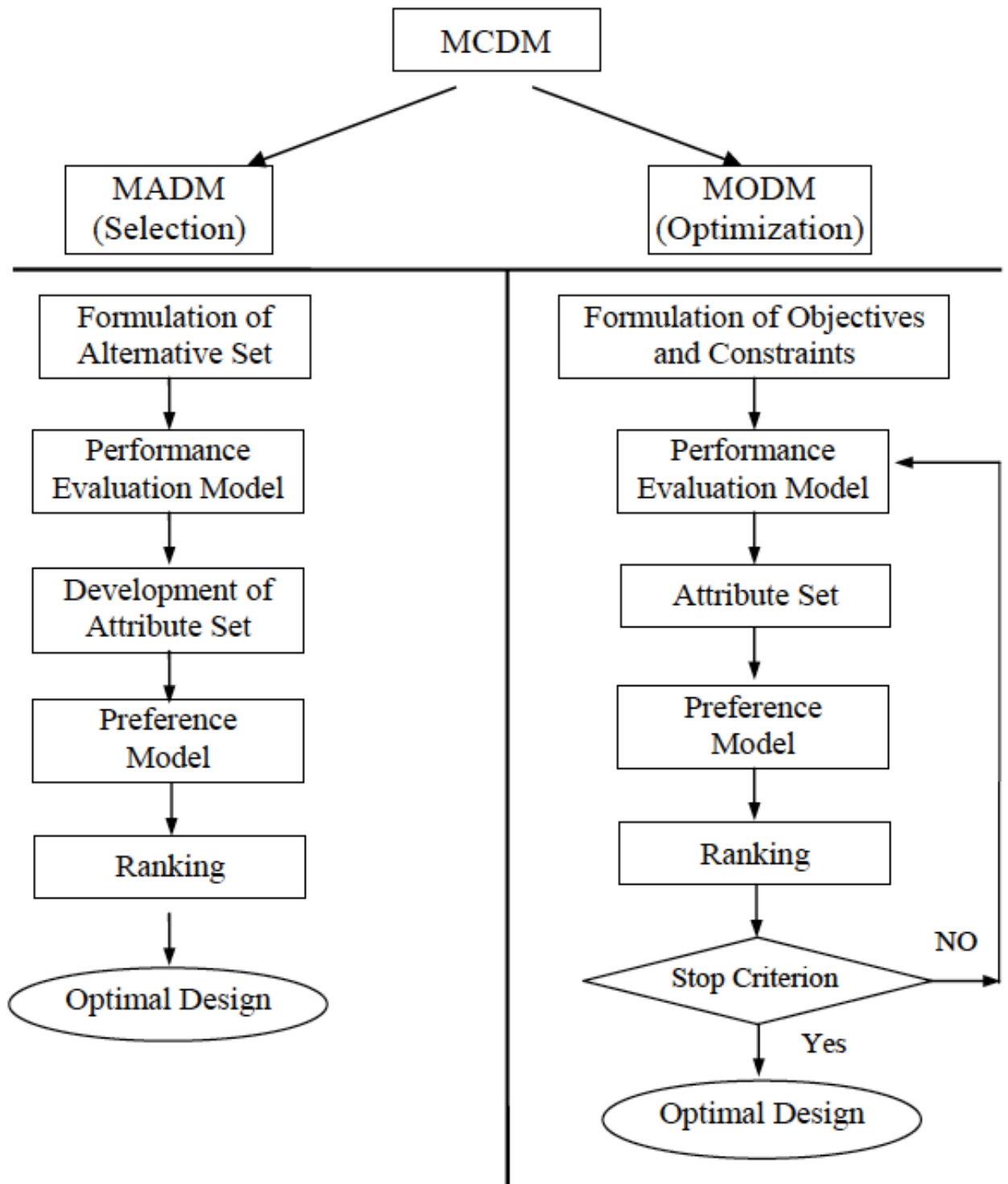
| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (low speed) |               |                |                 |
|----------------------|---------------|----------------|-----------------|
| LOW SPEED            | voice         | video          | secure browsing |
| Wifi 1               | 150,546       | 119,303        | 93,597          |
| Wifi 2               | <b>151,48</b> | 121,371        | 100,296         |
| Wifi 3               | 151,376       | 122,568        | 94,8486         |
| WiMAX 1              | 140,277       | 106,176        | 93,2911         |
| WiMAX 2              | 136,368       | 101,254        | 84,6679         |
| UMTS 1               | 114,706       | 127,386        | 121,825         |
| UMTS 2               | 139,859       | <b>156,592</b> | <b>154,018</b>  |
| UMTS 3               | 126,335       | 141,186        | 144,998         |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (pedestrian) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| PEDESTRIAN            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | <b>164,888</b> | 130,047        | 106,82          |
| Wifi 2                | 164,737        | 131,572        | 112,96          |
| Wifi 3                | 163,294        | <b>131,906</b> | 108,139         |
| WiMAX 1               | 145,913        | 111,672        | 103,07          |
| WiMAX 2               | 143,893        | 107,872        | 95,2861         |
| UMTS 1                | 81,8542        | 105,895        | 112,016         |
| UMTS 2                | 98,1462        | 129,398        | <b>141,15</b>   |
| UMTS 3                | 89,4734        | 117,224        | 132,9           |

| ΚΑΤΑΤΑΞΗ (high speed) |                |                |                 |
|-----------------------|----------------|----------------|-----------------|
| HIFH SPEED            | voice          | video          | secure browsing |
| Wifi 1                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 2                | 0              | 0              | 0               |
| Wifi 3                | 0              | 0              | 0               |
| WiMAX 1               | 132,373        | 104,576        | 88,7521         |
| WiMAX 2               | 134,648        | 107,824        | 95,5594         |
| UMTS 1                | <b>136,257</b> | 110,65         | 92,8687         |
| UMTS 2                | 132,997        | <b>109,061</b> | <b>96,6835</b>  |
| UMTS 3                | 126,724        | 101,235        | 86,7873         |



Παράρτημα XX: MADM vs. MODM



Το ανωτέρω διάγραμμα προέρχεται από το [52].



*“Ο αγαπημένος σας ραδιοσταθμός εκπέμπει σε μία συγκεκριμένη συχνότητα. Όταν βάζετε τον δέκτη σας στους τόσους κύκλους ανά δευτερόλεπτο, συντονίζετε το κύκλωμα της κεραίας, έτσι ώστε να τραβάει από τους αιθέρες την συχνότητα του εν λόγω σταθμού. Αν στην λήψη σας παρεμβάλλονται άλλοι πομποί, δεν διαθέτετε άλλη ρεαλιστική επιλογή, παρά να περιμένετε ώσπου να εκλείψει το πρόβλημα.*

*Στον καλύτερο απ’ όλους τους δυνατούς κόσμους, ο εξελεγμένος δέκτης σας θα αντιδρούσε μεταπηδώντας αμέσως σε ένα άλλο διαθέσιμο δίκτυο, στο οποίο θα συνεχίζατε να απολαμβάνετε την εκπομπή του σταθμού.*

*Μια τέτοια λύση υπερβαίνει τις δυνατότητες της σημερινής ασύρματης τεχνολογίας, πιθανώς δε, το συγκεκριμένο παράδειγμα κάνει το πρόβλημα να φαίνεται τετριμμένο.*

*Φανταστείτε, όμως, η παρεμβολή να διέκοπτε μια επείγουσα κλήση έκτακτης ανάγκης προς κάποιο κινητό τηλέφωνο.*

*Σε μια τέτοια περίπτωση, η ταχεία μεταφορά της κλήσης σε ένα καθαρό δίαυλο κυψέλης δεν θα απέβαινε απλώς βολική - πιθανόν να έσωζε κάποια ζωή.”*

Scientific American, ελληνική έκδοση, εκδόσεις Κάτοπτρο, Τεύχος Μάιος 2006.

