



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων και Μελέτη Αβεβαιότητας για τη  
Δημιουργία Οδικού Χάρτη με εφαρμογή στα Οικιακά Δίκτυα  
Επόμενης Γενιάς**

**Γεωργία Γ. Δέδε**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΙΟΥΛΙΟΣ 2015**





**NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS**

**SCHOOL OF SCIENCES  
DEPARTMENT OF INFORMATICS AND TELECOMMUNICATIONS**

**PROGRAM OF POSTGRADUATE STUDIES**

**PhD THESIS**

**Decision Making Methods and Uncertainty Modeling for the  
Development of a Roadmap for Future Home Networks**

**Georgia G. Dede**

**ATHENS**

**JULY 2015**



## **ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Μέθοδοι Λήψης Αποφάσεων και Μελέτη Αβεβαιότητας για τη Δημιουργία Οδικού Χάρτη  
με εφαρμογή στα Οικιακά Δίκτυα Επόμενης Γενιάς

**Γεωργία Γ. Δέδε**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Θωμάς Σφηκόπουλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ**

### **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:**

**Θωμάς Σφηκόπουλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**Αγγελική Αραπογιάννη, Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**

**Δημήτριος Βαρουτάς, Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ**

### **ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**Θωμάς Σφηκόπουλος,  
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**Αγγελική Αραπογιάννη,  
Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**

**Λάζαρος Μεράκος,  
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**Εμμανουήλ Γιακουμάκης,  
Καθηγητής ΟΠΑ**

**Ελένη Τσιπούρη,  
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**

**Δημήτριος Βαρουτάς,  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**Θωμάς Καμαλάκης,  
Επίκουρος Καθηγητής ΧΠΑ**

**Ημερομηνία εξέτασης 22/07/2015**



## **PhD THESIS**

Decision Making Methods and Uncertainty Modeling for the Development of a Roadmap  
for Future Home Networks

**Georgia G. Dede**

**SUPERVISOR: Thomas Sphicopoulos, Professor UoA**

### **THREE-MEMBER ADVISORY COMMITTEE:**

**Thomas Sphicopoulos, Professor UoA**

**Aggeliki Arapoyianni, Professor UoA**

**Dimitrios Varoutas, Assistant professor UoA**

### **SEVEN-MEMBER EXAMINATION COMMITTEE**

**Thomas Sphicopoulos,  
Professor UoA**

**Aggeliki Arapoyianni,  
Professor UoA**

**Lazaros Merakos,  
Professor UoA**

**Emmanouil Giakoumakis,  
Professor AUEB**

**Eleni Tsipouri,  
Associate Professor UoA**

**Dimitrios Varoutas,  
Assistant Professor UoA**

**Thomas Kamalakis,  
Assistant Professor HUA**

**Examination Date 22/07/2015**





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί μια επιτακτική ανάγκη για την υποστήριξη ευρυζωνικών υπηρεσιών τόσο στον οικιακό όσο και στον εργασιακό χώρο. Προς αυτήν την κατεύθυνση, έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος σε τεχνολογίες που προσφέρουν ένα υψηλό εύρος ζώνης, γεγονός που έχει προκαλέσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην εξέλιξη των δικτύων μέσα στο σπίτι και πολλά πρότυπα έχουν αναπτυχθεί για τη διασύνδεση των αντίστοιχων συσκευών. Δεδομένης της ολοένα αυξανόμενης εξέλιξης των τεχνολογιών τίθεται το θέμα διερεύνησης των τεχνολογικών λύσεων, καθώς και του τρόπου με τον οποίο εκείνες θα διασυνδεθούν, έτσι ώστε να επιτευχθούν υψηλές ταχύτητες. Προς αυτήν την κατεύθυνση η παρούσα διδακτορική διατριβή έρχεται να διερευνήσει τη δημιουργία ενός οδικού χάρτη (roadmapping) που θα αποτελέσει το κλειδί για τη διασφάλιση της ομαλής ανάπτυξης μελλοντικών οικιακών δικτύων, θα προδιαγράψει την πορεία τους και θα καθορίσει τις καταλληλότερες τεχνολογικές λύσεις για την ανάπτυξη των αντίστοιχων συστημάτων. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις τεχνολογικές δυσκολίες, ο σχεδιαστής του δικτύου πρέπει να λάβει υπόψη του ποικίλα οικονομικά και κοινωνικά θέματα που επηρεάζουν την υιοθέτηση των οικιακών δικτυακών συστημάτων από το ευρύ κοινό. Εν όψει αυτών των δυσκολιών, η ανάγκη για ένα χάρτη οικιακών δικτυακών συστημάτων, για την αντιμετώπιση όλων αυτών των θεμάτων, είναι προφανής, προκειμένου να επιτευχθεί η συναίνεση σχετικά με το σύνολο των αναγκών και των τεχνολογιών που απαιτούνται.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η διερεύνηση των σημαντικών ζητημάτων που επηρεάζουν την ανάπτυξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων, καθώς και τον καθορισμό ενός αποτελεσματικού οδικού χάρτη για την εξέλιξή τους βασίζεται στις πολυκριτηριακές μεθόδους λήψης απόφασης. Άλλωστε στη σύγχρονη εποχή που διανύουμε, η λήψη ορθών αποφάσεων με τη χρήση αποτελεσματικών και προηγμένων μεθόδων είναι υψίστης σημασίας. Παρότι η πλειοψηφία των διευθυντικών στελεχών λαμβάνει αποφάσεις με βάση το ένστικτο, μία τέτοια προσέγγιση δεν είναι αποτελεσματική για τη λήψη σημαντικών αποφάσεων, και μάλιστα, σε ένα απαιτητικό επιχειρηματικό περιβάλλον, όπως αυτό στο οποίο βρισκόμαστε. Συνεπώς, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική και η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων αυτών κάτω από διαφορετικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή της αβεβαιότητας, που μπορεί να ελλοχεύει σε αυτές τις διαδικασίες, στο τελικό αποτέλεσμα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει ως απώτερο σκοπό αφενός τη δημιουργία ενός οδικού χάρτη με εφαρμογή στα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς, με τη βοήθεια των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης απόφασης και αφετέρου την μελέτη κρίσιμων θεμάτων αβεβαιότητας που ελλοχεύουν στις διαδικασίες λήψης απόφασης και ενδέχεται να επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Η μελέτη και ανάπτυξη των ανωτέρω βασίζεται στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP – Analytic Hierarchy Process), σε κάποιες παραλλαγές της και ιδιαίτερα στη μέθοδο συγκρίσεων ανά ζεύγη, η οποία χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερο και αναπόσπαστο κομμάτι πολλών διαδικασιών λήψης απόφασης ακόμα και πέραν της AHP.

Η διατριβή έχει την εξής διάρθρωση:

Στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται ποικίλες τεχνολογικές λύσεις που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην εξέλιξη και περαιτέρω ανάπτυξη των οικιακών δικτύων επόμενης γενιάς, έχοντας ως γνώμονα την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων. Σε αυτό το κεφάλαιο προδιαγράφεται επίσης η αναγκαιότητα για τη δημιουργία ενός οδικού χάρτη που θα διασφαλίσει την ομαλή ανάπτυξή τους.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι μεθοδολογίες λήψης απόφασης δίνοντας έμφαση στις πολυκριτηριακές μεθόδους και ιδιαίτερα στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη του οδικού χάρτη, στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 3 μελετώνται ποικίλα κρίσιμα τεχνολογικά και κοινωνικοοικονομικά θέματα, προκειμένου να διευρευνηθεί η επιρροή που εξασκούν στην ανάπτυξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται και αναλύονται οι διαδικασίες δημιουργίας ενός οδικού χάρτη, που σχετίζεται με το σύστημα οικιακής δικτύωσης, και συγκεκριμένα με τη λειτουργικότητα της επέκτασης του δικτύου.

Το Κεφάλαιο 5 εστιάζει στην αξιολόγηση των εν δυνάμει οπτικών ασύρματων τεχνολογιών για την ανάπτυξη του οικιακού δικτύου, έχοντας ως όραμα ένα μελλοντικό σπίτι ή γραφείο βασιζόμενο εξ'ολοκλήρου σε οπτικά συστήματα.

Κατόπιν, στο πλαίσιο διευρέυσης των επιπτώσεων της αβεβαιότητας, που ενδέχεται να ελλοχεύει στις μεθόδους λήψης απόφασης, τα Κεφάλαια 6 και 7 εστιάζουν στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων της αβεβαιότητας, που εισάγεται όταν οι εμπειρογνώμονες συμπληρώνουν τους πίνακες των συγκρίσεων ανά ζεύγη, στο πλαίσιο των διαδικασιών πολυκριτηριακής λήψης απόφασης.

Πιο συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 6 προτείνεται ένα μοντέλο αβεβαιότητας για την αντιμετώπιση δύο σημαντικών ζητημάτων που αφορούν την πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης στις συγκρίσεις ανά ζεύγη. Το πρώτο θέμα αφορά στο πώς αυτή η πιθανότητα μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των εμπειρογνομώνων που συμμετέχουν στις έρευνες. Το δεύτερο θέμα, αφορά στο πώς η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης μπορεί να εκτιμηθεί στην πράξη, από τα στοιχεία των πινάκων συγκρίσεων κατά ζεύγη μίας ομάδας εμπειρογνομώνων.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 7, προτείνεται ένα θεωρητικό μοντέλο, που βασίζεται στην αθροιστική συνάρτηση κανονικής κατανομής πολλών μεταβλητών (MVNCDF - multivariate normal cumulative distribution function), για τον θεωρητικό υπολογισμό της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης και την επίδραση της αβεβαιότητας στο τελικό αποτέλεσμα της μεθόδου συγκρίσεων ανά ζεύγη.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8, συνοψίζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διατριβή και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** π.χ. Στρατηγικές Λήψης Απόφασης στις Τεχνολογίες

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** π.χ. οικιακά δίκτυα, χαρτογράφηση , πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης απόφασης, αναλυτική ιεραρχική διαδικασία, συγκρίσεις ανά ζεύγη

## ABSTRACT

In recent years there is a need for supporting broadband services in both home and office networks. Towards this end, there has been great progress in technologies that offer high bandwidth, which resulted to an interest for the evolution of home networks and many standards have been developed for the interconnection of the devices. Given the increasing technological development, it would be interesting to investigate the technical solutions and the possibility to achieve high bit rate connectivity. Towards this end, this thesis aims to investigate the development of a roadmap which will be the key for ensuring the smooth development of future home networks and determine the most appropriate technological solutions for the development of such systems. However, apart from technical difficulties, the network designer should take into consideration the different economic and social issues affecting the adoption of home network systems. In view of such difficulties, the need for a roadmap of home network systems arises in order to address all these issues.

This thesis investigates the major aspects affecting the development of future home networks, and creates an effective roadmap for their development based on multi-criteria decision making methods. Although most decision makers rely on decisions based partly on intuition, such an approach is not effective for making important decisions especially in a demanding business environment. It is therefore particularly important to investigate the effectiveness of these methods under different conditions, taking into account the influence of uncertainty that may undermine these processes.

According to the above, this thesis aims both to contribute to a roadmap implementation in next-generation home networks, based on multi-criteria decision making methods and also study critical issues of uncertainty lurking in decision making processes and may affect the final result. The study and the development of the above lies on the Analytical Hierarchy Process (AHP), and especially in pairwise comparison method, integral part of many decision making processes.

The thesis is structured as follows:

Chapter 1 introduces a variety of technological solutions that could contribute to the development and further growth of next-generation home networks, in order to achieve high speed connectivity. This chapter also specifies the need for a roadmap that will ensure their smooth development.

Chapter 2 presents the decision making methodologies focusing on multi-criteria methods and especially on the Analytical Hierarchy Process, to be used for the development of the roadmap, in the context of this thesis.

Chapter 3 explains various critical technological and socio-economic issues in order to investigate their influence on the development of future home networks.

In Chapter 4, we present and analyze the creation processes for a roadmap, associated with home networking systems, and specifically to the functionality of the network extension.

Chapter 5 focuses on the evaluation of the potential optical wireless technologies in the development of home network, towards the vision of a future home or office network based entirely on optical systems.

In the context of investigating the impact of uncertainty that may undermine the decision making methods, Chapters 6 and 7 focus on addressing the impact of uncertainty

introduced when the experts complete the pairwise comparison methods in multicriteria decision making methods.

More specifically, in Chapter 6 we propose an uncertainty model to address two major issues concerning the probability of rank reversal in pairwise comparisons. The first issue highlights the relations between the probability of rank reversal and the group size of experts participating in surveys. The second issue investigates how the probability of rank reversal can be assessed in practice from actual user data.

In Chapter 7, a theoretical model is proposed, based on multivariate normal cumulative distribution function (MVNCDF), in order to estimate the probability of rank reversal and investigate the impact of uncertainty in the final outcomes of pairwise comparisons.

Finally, Chapter 8 summarizes the main conclusions of this thesis. Some recommendations for further research are also included.

**SUBJECT AREA:** π.χ. Decision Making Strategies for Technologies

**KEYWORDS:** π.χ. home networks, roadmapping, multicriteria decision making methods, analytic hierarchy process, pairwise comparison method

*Αφιερωμένο με πολύ αγάπη στους γονείς μου,*

*Γιώργο και Σοφία<sup>2</sup>.*



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν καθ'όλη τη διάρκεια αυτής της επίπονης διαδικασίας.

Αρχικά να θα ήθελα ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή μου κ. Θωμά Σφηκόπουλο. Εκτιμώντας τον βαθιά ως προπτυχιακή και μεταπτυχιακή φοιτήτρια, τον ευχαριστώ ολόψυχα που μου έδωσε την ευκαιρία να εκπονήσω τη διδακτορική μου διατριβή έχοντας ως επιβλέποντα εκείνον. Τον ευχαριστώ για την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς και για την υλικότεχνική υποστήριξη που μου προσέφερε χωρίς την οποία δε θα είχαν προκύψει τα αποτελέσματα της διδακτορικής μου διατριβής.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Βαρουτά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την παρότρυνσή καθώς και για τη στήριξη που μου προσέφερε όποτε τον χρειαζόμουν. Επίσης, ευχαριστώ την Καθηγήτρια κ.Αγγελική Αραπογιάννη για τη συμπαράσταση και την άμεση ανταπόκρισή της στις περιπτώσεις που χρειαζόμουν τη βοήθειά της.

Σημαντικός σταθμός και στυλοβάτης σε όλη αυτή την προσπάθεια υπήρξε ο Επίκουρος Καθηγητής κ. Θωμάς Καμαλάκης, χωρίς την βοήθεια και τις συμβουλές του οποίου δεν θα είχα φτάσει ως εδώ. Θα ήθελα να του απευθύνω ενά βαθύ και ολόψυχο ευχαριστώ για την καθοδήγησή του, την ηθική παρότρυνση και τη στήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής μου. Πάντα πρόθυμος να με διδάξει με όρεξη και να με στηρίξει στις δυσάρεστες αλλά και στις ευχάριστες στιγμές αυτής της προσπάθειας. Τον ευχαριστώ για όσα μου δίδαξε αλλά και για τον τρόπο που μου έμαθε να σκέφτομαι και να αντιμετωπίζω τις καταστάσεις γενικότερα. Οι συμβουλές του αποτέλεσαν σταθμό τόσο για την ολοκλήρωση της διατριβής μου όσο και για τη μετέπειτα πορεία μου.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Καθηγήτρια κα. Μάρα Νικολαΐδου για την αμέριστη στήριξή της και τις πολύτιμες συμβουλές που απλόχερα μου προσέφερε στις δύσκολες αλλά και στις εύκολες καταστάσεις αυτής της πορείας. Την ευχαριστώ βαθιά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή χωρίς να με γνωρίζει και ελπίζω όλα αυτά τα χρόνια να στάθηκα αντάξιά της.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χρήστο Μιχαλακέλη, χωρίς την παρότρυνση του οποίου δε θα είχα σκεφτεί ότι θα μπορούσα ποτέ να φτάσω στο τέλος αυτής της πορείας. Αποτέλεσε σταθμό στην εξέλιξή μου μέχρι τώρα, καθώς πάντα με στήριζε και μου προσέφερε πολύτιμες συμβουλές που με ενέπνευσαν όχι μόνο στην εκπόνηση της διατριβής αλλά και στη ζωή μου γενικότερα.

Σε όλη αυτήν την προσπάθεια θα ήθελα να ευχαριστώ από καρδιάς τους συνεργάτες και συνοδοιπόρους μου σε αυτήν τη πορεία προς την ολοκλήρωση της διατριβής μου. Τον Αργύρη για τις ατέλειωτες ώρες που δουλεύαμε μαζί, για την υποστήριξη και τις συμβουλές που μου προσέφερε, για τις αγωνίες που μοιραστήκαμε. Τη Ράνια και τον Αλέξανδρο γιατί ήταν πάντα εκεί όταν χρειαζόμουν τη βοήθειά τους. Τον Παναγιώτη για τις ανησυχίες που μοιραστήκαμε, τις χρήσιμες συμβουλές και την ηθική υποστήριξη που μου προσέφερε ιδιαίτερα στον τελικό δρόμο προς την ολοκλήρωση της διατριβής μου. Την Ελένη και τη Φωτεινή για την πολύτιμη συμπαράστασή τους και την ευχάριστη διάθεσή τους κάθε φορά που με έβλεπαν να βυθίζομαι. Ευχαριστώ θερμά τη Γεωργία Ντόγαρη καθώς και τη Βάγια για τη στήριξή τους σε φιλικό και επαγγελματικό επίπεδο

και την ηθική παρότρυνση που μου προσέφεραν σε αυτήν τη δύσκολη πορεία. Ευχαριστώ πολύ την Κέλλυ για τη συμπαράστασή της καθώς και για την τεχνική υποστήριξη που μου προσέφερε.

Ευχαριστώ από καρδιάς τις παιδικές μου φίλες Βαγγελίτσα και Αφροδίτη, για τις ανησυχίες, τα άγχη που περάσαμε και την πάντα ευχάριστη παρέα τους σε περιόδους που το είχα ανάγκη.

Τέλος, ένα βαθύ και ουσιαστικό ευχαριστώ οφείλω στους δικούς μου ανθρώπους, στην οικογένειά μου, στους γονείς μου Γιώργο και Σοφία, που χωρίς την υποστήριξή τους, την αμέριστη αγάπη τους και συμπαράσταση τίποτα από όλα όσα είχα ονειρευτεί δε θα γίνονταν πραγματικότητα. Θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Τάσο για την πολύτιμη στηριξή του όλα αυτά τα χρόνια στις δύστροπες και χαρούμενες στιγμές που περάσαμε καθώς προσπαθούσα να φτάσω στο τέλος αυτού του ταξιδιού. Ευχαριστώ την οικογένειά μου που πάντα ήταν δίπλα μου εκφράζοντας ο καθένας με το δικό του τρόπο, αλλά έχοντας ως γνώμονα την αγάπη, την συμπαράστασή του σε αυτή την δύσκολη πορεία, τον Γιάννη, τη Λένα, τη Σοφία μου, τις αγαπημένες μου Γεωργία και Χρυσούλα, την Κατερίνα, τον Φάνη, τη Μαρίσα και τη Μελίνα. Κλείνοντας ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Σπύρο για τις πολύτιμες συμβουλές του στη μέχρι τώρα πορεία μου.

Και τώρα που έφτασα στο τέλος...δε ξέρω τι είχε εν τέλει σημασία το ταξίδι ή ο προορισμός; Μπορεί ο προορισμός να ήταν το προσδοκόμενο αλλά το ταξίδι ήταν εκείνο που με έπλασε, που με έκανε να αποκομίσω καινούργιες εμπειρίες, να απογοητευτώ, να γελάσω μα πάνω από όλα να διδαχθώ το πώς θα πρέπει να αντιμετωπίζω τις καταστάσεις σε οποιαδήποτε στιγμή της ζωής μου.



## ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

Αναφορές σε διεθνή συνέδρια/περιοδικά στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής:

### Περιοδικά:

1. "Theoretical Estimation of the Probability of Rank Reversal in Pairwise Comparisons", G. Dede, Th. Kamalakis, Th. Sphicopoulos, ELSEVIER European Journal of Operational Research, under review.
2. "Convergence Properties and Practical Estimation of the Probability of Rank Reversal in Pairwise Comparisons", G. Dede, Th. Kamalakis, Th. Sphicopoulos, ELSEVIER European Journal of Operational Research, vol. 241, no. 2, pp. 458-468, 2014.
3. "Prospects of Optical Wireless Technologies for Home Networking", G. Dede, Th. Kamalakis, D. Varoutas, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 3, no. 11, pp. 850-859, 2011.
4. "Towards a Roadmap for Future Home Networking Systems: An Analytical Hierarchy Process Approach", G. Dede, Th. Kamalakis, D. Varoutas, IEEE Systems Journal, Volume 5, Issue 3, Pages 374-384, September 2011.
5. "Evaluation of Technological and Socio-Economic Issues Affecting the Deployment of Home Networks: Evidence from the ICT-OMEGA project", G. Dede, D. Varoutas, Th. Kamalakis, R. G. Fuentetaja, J.P. Javaudin, Netnomics: Economic Research and Electronic Networking (Springer), Volume 11, Number 2, Pages 181-200, 2010.

### Συνέδρια:

1. "An Approach of Pairwise Comparison Matrices Including the Certainty of Experts and an Application of a Theoretical Model for Estimating the Probability of Rank Reversal", G. Dede, Th. Kamalakis, Th. Sphicopoulos, accepted in the 23<sup>rd</sup> International Conference on Multicriteria Decision Making Methods, MCDM 2015, Hamburg.
2. "Photonic Technologies for Next Generation Home and Office Networks", Th. Kamalakis, G. Dede, K. Margariti, P. Kanakis, D. Alexandropoulos, N. Vainos, PCI 2014, Athens.
3. "Criteria and Factors affecting home networks deployment: Evidence from the ICT-OMEGA project", G. Dede, D. Varoutas, Th. Kamalakis, G. Goni, J.P. Javaudin, ICT - Mobile Summit 2009, Santander, Spain.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ.....</b>	<b>37</b>
<b>1.1</b>	<b>Ανάγκη και Προοπτικές Οικιακών Δικτύων .....</b>	<b>37</b>
1.1.1	Οικιακές Τεχνολογίες που Απαιτούν Εγκατάσταση Νέας Καλωδίωσης .....	43
1.1.1.1	Ethernet.....	43
1.1.1.2	USB.....	46
1.1.1.3	IEEE 1394 ή FireWire .....	48
1.1.2	Οικιακές Τεχνολογίες με τη Χρήση Υπάρχουσας Καλωδίωσης .....	51
1.1.2.1	HomePNA .....	51
1.1.2.2	PowerLine Communications (PLC).....	53
1.1.3	Οικιακές Τεχνολογίες Διασύνδεσης με Ασύρματη Δικτύωση .....	56
1.1.3.1	Bluetooth .....	56
1.1.3.2	Wifi ή IEEE 802.11.....	58
1.1.3.3	Ultra Wide Band .....	61
1.1.3.4	Radio 60GHz .....	64
1.1.3.5	HiperLAN.....	66
1.1.3.6	HomeRF .....	67
1.1.4	Οπτικές Τεχνολογίες .....	68
1.1.4.1	Οπτική Ίνα στο Σπίτι .....	68
1.1.4.2	Οπτικά Ασύρματα Συστήματα.....	69
A.	IrDA .....	70
B.	Άλλα Οπτικά Υπέρυθρα Συστήματα.....	72
	Συστήματα Χωρίς Οπτική Επαφή.....	73
	Συστήματα Απευθείας Οπτικής Επαφής.....	74
Γ.	Επικοινωνίες Ορατού Φωτός .....	75
<b>1.2</b>	<b>Ανάγκη Ανάπτυξης Οδικού Χάρτη για την Πορεία των Μελλοντικών Οικιακών Δικτύων.....</b>	<b>76</b>
1.2.1.1	Λειτουργικότητα Επέκτασης στα Οικιακά Δίκτυα .....	78
1.2.1.2	Προοπτική Οπτικού Οικιακού Δικτύου.....	79
<b>2</b>	<b>ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ.....</b>	<b>81</b>
<b>2.1</b>	<b>Ιστορική Αναδρομή.....</b>	<b>81</b>
<b>2.2</b>	<b>Χρησιμότητα και Κατηγοριοποίηση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Λήψης Αποφάσεων .....</b>	<b>82</b>
<b>2.3</b>	<b>Μέθοδοι Πολυκριτηριακής Θεωρίας Χρησιμότητας .....</b>	<b>88</b>
2.3.1	Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (ΑΗΡ) .....	88

2.3.1.1	Ιεραρχική Ανάλυση του Προβλήματος.....	90
2.3.1.2	Μεθοδολογία Συγκρίσεων Ανά Ζεύγη .....	91
	Α. Αποτύπωση Προτιμήσεων Στοιχείων Απόφασης .....	91
	Β. Εκτίμηση Σχετικών Προτεραιοτήτων – Βαρών Στοιχείων Απόφασης .....	94
	Η μέθοδος του γεωμετρικού μέσου(GMM) .....	98
	Η μέθοδος των ελαχιστών τετραγώνων(LSM).....	98
	Η μέθοδος των λογαριθμικών ελαχιστών τετραγώνων(LLSM) .....	99
2.3.1.3	Σύνθεση Επιμέρους Βαρών σε Τελικές Προτεραιότητες .....	99
2.3.2	Θεωρία Πολυκριτηριακής Χρησιμότητας (MAUT) .....	100
2.3.3	Πολυκριτηριακή Τεχνική Απλής Κατάταξης (SMART) .....	101
2.3.4	Μέτρηση της Προτίμησης με Τεχνική Κατηγορηματικής Αξιολόγησης (MACBETH).....	102
<b>2.4</b>	<b>Παραλλαγές Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας.....</b>	<b>103</b>
<b>2.5</b>	<b>Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Fuzzy AHP).....</b>	<b>104</b>
<b>2.6</b>	<b>Ιεραρχικό Πλαίσιο για την Ανάπτυξη της Τεχνολογίας (TDE) .....</b>	<b>106</b>
2.6.1	Εκτίμηση Βάρους Κριτηρίων και Παραγόντων .....	106
2.6.2	Πρόβλεψη Μετρικών της Τεχνολογίας.....	107
2.6.3	Καμπύλες Συναρτήσεων Επιθυμίας .....	108
2.6.4	Υπολογισμός της Αξίας της Τεχνολογίας .....	110
<b>2.7</b>	<b>Μέθοδοι Σχέσεων Υπεροχής .....</b>	<b>111</b>
2.7.1	Αποβολή και Επιλογή Εκφράζοντας την Πραγματικότητα (ELECTRE) .....	111
2.7.2	Προτίμηση Κατάταξης για τον Εμπλουτισμό των Αξιολογήσεων (PROMETHEE).....	113
<b>2.8</b>	<b>Μέθοδοι Προγραμματισμού Στόχων - TOPSIS.....</b>	<b>115</b>
<b>2.9</b>	<b>Μέθοδοι Ανάλυσης Προτιμήσεων.....</b>	<b>116</b>
2.9.1	Αθροιστικές Χρησιμότητες (UTA) .....	116
2.9.2	Ιεραρχικής Διάκρισης Πολλαπλών Ομάδων (MHDIS) .....	118
<b>2.10</b>	<b>Θεωρία Ακατέργαστου Συνόλου .....</b>	<b>118</b>
<b>2.11</b>	<b>Επιλογή της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας .....</b>	<b>119</b>
<b>2.12</b>	<b>Διαδικτυακή Πλατφόρμα Υποστήριξης της AHP .....</b>	<b>120</b>
<b>3</b>	<b>ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΘΕΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ .....</b>	<b>124</b>
<b>3.1</b>	<b>Σχεδιασμός Ερευνών .....</b>	<b>124</b>

3.1.1	Στόχοι των Ερευνών .....	125
<b>3.2</b>	<b>Κριτήρια και Παράγοντες για τα Οικιακά Δίκτυα .....</b>	<b>126</b>
<b>3.3</b>	<b>Ευρήματα Εφαρμογής της Μεθοδολογίας.....</b>	<b>132</b>
3.3.1	Οικιακό Δίκτυο και Συσκευή Επέκτασης.....	132
3.3.2	HDTV και VoIP.....	137
<b>3.4</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>139</b>
<b>4</b>	<b>ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΔΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ.....</b>	<b>140</b>
<b>4.1</b>	<b>Σχεδιασμός Ερευνών .....</b>	<b>140</b>
<b>4.2</b>	<b>Αποτελέσματα Εφαρμογής της Μεθοδολογίας TDE .....</b>	<b>141</b>
4.2.1	Πρόβλεψη Μετρικών της Τεχνολογίας .....	141
4.2.2	Συναρτήσεις Επιθυμίας .....	144
4.2.3	Εκτίμηση της Αξίας της Τεχνολογίας .....	145
4.2.4	Εκτίμηση Αξίας της Τεχνολογίας για Κάθε Κριτήριο και Παράγοντα .....	147
4.2.5	Ανάλυση Ευαισθησίας .....	150
4.2.6	Παραμετροποίηση Ενός Στοιχείου .....	150
4.2.7	Παράλληλη Παραμετροποίηση των Βαρών Κριτηρίων και Παραγόντων .....	153
4.2.8	Παραμετροποίηση Μίας Μετρικής της Τεχνολογίας .....	154
4.2.9	Παράλληλες Παραμετροποιήσεις των Παραγόντων Απόδοσης και των Μετρικών της Τεχνολογίας ..	155
<b>4.3</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>156</b>
<b>5</b>	<b>ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΟΙΚΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ .....</b>	<b>157</b>
<b>5.1</b>	<b>Περιγραφή Εναλλακτικών Σεναρίων .....</b>	<b>157</b>
<b>5.2</b>	<b>Έρευνες και Συμμετέχοντες.....</b>	<b>158</b>
<b>5.3</b>	<b>Εκτίμηση Βαρών Κριτηρίων και Παραγόντων.....</b>	<b>159</b>
<b>5.4</b>	<b>Βαθμολόγηση Εναλλακτικών Σεναρίων.....</b>	<b>164</b>
<b>5.5</b>	<b>Ανάλυση Ευαισθησίας.....</b>	<b>167</b>
5.5.1	Παραμετροποίηση Ενός Βάρους Κριτηρίου ή Παράγοντα .....	167

5.5.2	Παράλληλη Παραμετροποίηση Βαρών και Σχετικών Προτεραιοτήτων .....	168
5.5.3	Αβεβαιότητα στις ανά Ζεύγη Συγκρίσεις.....	171
<b>5.6</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>172</b>
<b>6</b>	<b>ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΓΚΡΙΣΕΩΝ ΑΝΑ ΖΕΥΓΗ.....</b>	<b>174</b>
<b>6.1</b>	<b>Αποτύπωση του Προβλήματος.....</b>	<b>174</b>
<b>6.2</b>	<b>Μοντελοποίηση Αβεβαιότητας στην PWC .....</b>	<b>177</b>
6.2.1	Πρώτη Προσέγγιση Ανάλυσης Διαταραχών .....	177
6.2.2	Περιγραφή του Μοντέλου της Αβεβαιότητας.....	178
6.2.3	Υπολογισμός του $P_{RR}$ Μέσω Προσομοιώσεων Monte Carlo .....	180
<b>6.3</b>	<b>Αριθμητική Ανάλυση και Αποτελέσματα .....</b>	<b>180</b>
6.3.1	Επαλήθευση της Πρώτης Προσέγγισης Ανάλυσης των Διαταραχών .....	181
6.3.2	Ιδιότητες Σύγκλισης της Πιθανότητας Αναστροφής Κατάταξης.....	182
6.3.2.1	Εφαρμογή Μοντέλου Αβεβαιότητας $P_{RR}$ .....	182
6.3.2.2	Εναλλακτικές Κλίμακες Προτίμησης .....	186
6.3.2.3	Εναλλακτικές Μέθοδοι Υπολογισμού των Βαρών .....	187
6.3.2.4	Η περίπτωση των ασαφών κρίσεων.....	187
<b>6.4</b>	<b>Υπολογισμός της <math>P_{RR}</math> από Πραγματικά Δεδομένα των Ειδικών.....</b>	<b>188</b>
6.4.1	Αριθμητική Εκτίμηση της $P_{RR}$ .....	189
6.4.2	Αποτελέσματα και Επιβεβαίωση.....	190
6.4.3	Επίδραση των Ασαφών Κρίσεων .....	193
<b>6.5</b>	<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>194</b>
<b>7</b>	<b>ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ.....</b>	<b>195</b>
<b>7.1</b>	<b>Αποτύπωση του Προβλήματος.....</b>	<b>195</b>
<b>7.2</b>	<b>Περιγραφή του Μοντέλου .....</b>	<b>196</b>
7.2.1	Μοντελοποίηση της Αβεβαιότητας στις Κρίσεις των Ειδικών .....	197
7.2.2	Θεωρητική Ανάλυση.....	199
7.2.3	Αριθμητική Εκτίμηση της $P_{RR}$ .....	201
7.2.4	Θεωρητική Εκτίμηση της $P_{RR}$ .....	204
<b>7.3</b>	<b>Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....</b>	<b>207</b>

7.3.1	Μέθοδοι Συμπλήρωσης του Πίνακα Συγκρίσεων ανά Ζεύγη .....	207
7.3.2	Σύγκριση του Θεωρητικού και Αριθμητικού Μοντέλου .....	208
7.3.3	Επίδραση του Επιπέδου Αβεβαιότητας.....	210
7.3.4	Επίδραση των Στατιστικών Χαρακτηριστικών των Διαταραχών .....	211
7.3.5	Ομοιογένεια των Κριτηρίων .....	214
7.3.6	Επιρροή του Αριθμού των Κριτηρίων .....	215
7.3.7	Επίδραση της Μεθόδου Υπολογισμού των Βαρών .....	216
7.3.8	Μη Γραμμική Κατανομή Ιδανικών Βαρών .....	218
7.3.9	Ομαδοποίηση Ειδικών .....	218
7.3.10	Ταχύτητα Σύγκλισης.....	220
<b>7.4</b>	<b>Πρακτική Εφαρμογή του Θεωρητικού Μοντέλου .....</b>	<b>221</b>
<b>7.5</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>223</b>
<b>8</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>225</b>
<b>8.1</b>	<b>Επισκόπηση - Συμπεράσματα .....</b>	<b>225</b>
<b>8.2</b>	<b>Προτάσεις για Μελλοντική έρευνα.....</b>	<b>229</b>
<b>9</b>	<b>ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ.....</b>	<b>231</b>
	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ .....</b>	<b>233</b>
	<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ .....</b>	<b>249</b>
	<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>255</b>





## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Οικιακό Δίκτυο στο σπίτι και στο γραφείο .....	37
Εικόνα 2: Διείσδυση και Πλήθος Ευρυζωνικών συνδέσεων στην Ελλάδα (Πηγή: Παρατηρητήριο Κοινωνία της Πληροφορίας) .....	38
Εικόνα 3: Ευρυζωνική Σύγκλιση της Ελλάδας με τη Δυτική Ευρώπη (Πηγή: Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών).....	39
Εικόνα 4: Νέες Τηλεπικοινωνιακές Ανάγκες (Πηγή: Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών) .....	40
Εικόνα 5: Χώρες με την υψηλότερη διείσδυση του FTTH (Πηγή: Fiber to the Home Councils).....	41
Εικόνα 6: Ethernet καλώδιο σύνδεσης.....	44
Εικόνα 7: Οικιακό Δίκτυο Ethernet.....	45
Εικόνα 8: USB συμβολισμός.....	47
Εικόνα 9: USB 2.0 ακροδέκτες .....	47
Εικόνα 10: Σειριακός δίαυλος Firewire.....	49
Εικόνα 11: Firewire 800 καλώδια.....	50
Εικόνα 12: Firewire υποδοχές συσκευών .....	50
Εικόνα 13: HomePNA εφαρμογή.....	51
Εικόνα 14: Δικτύωση με HomePNA δρομολογητή.....	52
Εικόνα 15: PLC στα οικιακά δίκτυα.....	54
Εικόνα 16: Συνδεσιμότητα Bluetooth με άλλες συσκευές.....	57
Εικόνα 17: Δικτύωση συσκευών ασύρματα μέσω Wifi δρομολογητή.....	60
Εικόνα 18: Ισχύς εκπομπής για τα NB, WB και UWB .....	62
Εικόνα 19:UWB στο ψηφιακό σπίτι.....	63
Εικόνα 20: Ένα σενάριο διαμοιρασμού περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας με συνδέσεις 60GHz .....	65
Εικόνα 21:HomeRF τύποι δικτυακών συσκευών .....	68
Εικόνα 22: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	70

Εικόνα 23: Σύστημα Διάχυσης .....	74
Εικόνα 24: (α) Σύστημα WLOS, (β) Σύστημα NLOS .....	74
Εικόνα 25: Σύστημα VLC με τη χρήση λευκών LEDs σε εσωτερικό χώρο .....	76
Εικόνα 26: Το μελλοντικό Οικιακό Δίκτυο .....	78
Εικόνα 27: Εναλλακτικές Λύσεις για το μελλοντικό Οπτικό Οικιακό Δίκτυο .....	80
Εικόνα 28: Φάσεις Λήψης Απόφασης .....	81
Εικόνα 29: Στάδια Λήψης Απόφασης Πολυκριτηριακής Ανάλυσης .....	85
Εικόνα 30: Κατηγοριοποίηση Πολυκριτηριακών Μεθόδων .....	88
Εικόνα 31: Επίπεδα Ιεραρχικής Δομής .....	90
Εικόνα 32: Συνάρτηση Ιδιότητας Μέλους .....	104
Εικόνα 33: AHP Ιεραρχικό Μοντέλο με την Ενσωμάτωση του TDE .....	107
Εικόνα 34: Παράδειγμα Πρόβλεψης Μετρικών της Τεχνολογίας .....	108
Εικόνα 35: Παράδειγμα Ανάθεσης Τιμών για τη Συνάρτηση Επιθυμίας .....	109
Εικόνα 36: Ενδεικτική Συνάρτηση Επιθυμίας $V_{jk}$ .....	110
Εικόνα 37: Γράφος Τιμών Υπεροχής .....	114
Εικόνα 38: Κανονικοποιημένη συνάρτηση χρησιμότητας για το κριτήριο $g_j$ .....	117
Εικόνα 39: Αρχική σελίδα διαδικτυακής πλατφόρμας. ....	121
Εικόνα 40: Πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη για τα κριτήρια του δικτύου OMEGA .....	121
Εικόνα 41: Πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη για τους παράγοντες του κριτηρίου απόδοσης του δικτύου. ....	122
Εικόνα 42: Πρόβλεψη τεχνολογικών μέτρων για τους παράγοντες του κριτηρίου της απόδοσης του δικτύου. ....	122
Εικόνα 43: Ανάθεση τιμών επιθυμίας για τους παράγοντες του κριτηρίου που σχετίζεται με τα οικονομικά θέματα του δικτύου. ....	122
Εικόνα 44: Οικιακό Δίκτυο .....	127
Εικόνα 45: Βάρη των κριτηρίων για το οικιακό δίκτυο .....	133
Εικόνα 46: Βάρη των κριτηρίων για τη συσκευή επέκτασης .....	133

Εικόνα 47: Σχετική σημασία των κριτηρίων στην περίπτωση HDTV .....	137
Εικόνα 48: Σχετική σημασία των κριτηρίων στην περίπτωση VoIP .....	138
Εικόνα 49: Πρόβλεψη διαφόρων μετρικών της τεχνολογίας .....	142
Εικόνα 50: Παραδείγματα καμπυλών συναρτήσεων επιθυμίας .....	145
Εικόνα 51: TV για τις εναλλακτικές τεχνολογίες της επέκτασης του δικτύου .....	147
Εικόνα 52: Τεχνολογικές αξίες των κριτηρίων (α) Y1 (β) Y5 .....	148
Εικόνα 53: Μέσες τεχνολογικές αξίες (α)IEEE 802.11n (b)Radio 60GHz (c) PLC .....	150
Εικόνα 54: Ανάλυση Ευαισθησίας για τις αλλαγές στο κριτήριο της απόδοσης από -70% έως 70% για το (α) Y1 (β) Y5.....	151
Εικόνα 55: Ανάλυση Ευαισθησίας για τις αλλαγές στο κριτήριο της αξιοπιστίας/εμπιστοσύνης από -70% έως 70% για το (α) Y1 (β) Y5.....	152
Εικόνα 56: Ανάλυση Ευαισθησίας για τις αλλαγές στο downstream bit rate από -70% έως 70% για το (α) Y1 (β) Y5.....	152
Εικόνα 57: Ανάλυση Ευαισθησίας για τις αλλαγές στα θέματα υγείας από -70% έως 70% για το (α) Y1 (β) Y5.....	153
Εικόνα 58: Ευαισθησία του TV ιστογράμματος το Y5 για (α)IEEE802.11n (β)PLC.....	154
Εικόνα 59: Πιθανότητα αναστοφής της κατάταξης συναρτήσεως της έντασης των διαταραχών s.....	154
Εικόνα 60: Ευαισθησία των εναλλακτικών για τις μεταβολές ενός μόνο τεχνολογικού μέτρου μεταξύ -50% έως 50% για (α) ρυθμός δεδομένων κάτω καναλιού (β) εμβέλεια. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις αρχικές τιμές. ....	155
Εικόνα 61: Ευαισθησία του ιστογράμματος TV για (α) IEEE 802.11n (β) PLC .....	156
Εικόνα 62: Εναλλακτικές λύσεις για το μελλοντικό Οπτικό Οικιακό Δίκτυο.....	158
Εικόνα 63: (α) Προτεραιότητες εναλλακτικών λύσεων για τα σενάρια στο σπίτι και στο γραφείο, (β) Αθροιστικές προτεραιότητες για PLC και POF.....	166
Εικόνα 64: Ευαισθησία στους παράγοντες (α) κόστος εξοπλισμού, (β) ρυθμαπόδοση κάτω καναλιού (δίκτυο κορμού), (γ) ρυθμαπόδοση κάτω καναλιού (δίκτυο ετνός δωματίων) και στο κριτήριο (δ) κοινωνική αποδοχή .....	168

Εικόνα 65: PDFs των προτεραιοτήτων έπειτα από μεταβολές στα βάρη των κριτηρίων .....	169
Εικόνα 66: PDFs των προτεραιοτήτων έπειτα από μεταβολές στα βάρη των κριτηρίων και παραγόντων καθώς και στις σχετικές προτεραιότητες των τεχνολογιών .....	169
Εικόνα 67: PDFs των $T_{PLC}$ και $T_{POF}$ έπειτα από μεταβολές στα βάρη των κριτηρίων και παραγόντων καθώς και στις σχετικές προτεραιότητες των τεχνολογιών .....	169
Εικόνα 68: (α)Συνδυαστικές PDFs των $T_1$ και $T_2$ (β) Το γινόμενο των μεμονομένων PDFs των $T_1$ και $T_2$ .....	171
Εικόνα 69: Πιθανότητα αναστροφής κατάταξης $P(T_1>T_2)$ ως συνάρτηση της έντασης των διαταραχών $s$ .....	171
Εικόνα 70: $L$ ως συνάρτηση της έντασης των διαταραχών $s$ .....	179
Εικόνα 71: PDF ενός τυπικού βάρους $w_k$ που προέκυψε υπολογίζοντας το μέσο όρο των $w_k^{(m)}$ , τα οποία εκτιμώνται μέσω προσομοιώσεων. Απεικονίζεται επίσης η πλησιέστερη Gaussian κατανομή, που υπολογίζεται μέσω ελαχιστοποίησης ελαχίστων τετραγώνων. Το επίπεδο αβεβαιότητας είναι $L=3$ , ο αριθμός των ειδικών $M=10$ και ο αριθμός των κριτηρίων (α) $N=4$ , (β) $N=6$ .....	181
Εικόνα 72: PDF ενός τυπικού βάρους $w_k$ στην περίπτωση που $M=40$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι οι ίδιες με την Εικόνα 71 .....	182
Εικόνα 73: (α) $P_{RR}$ και (β) $\Delta P_{RR}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για $N=3$ .....	183
Εικόνα 74: Η PDF των τιμών $P_{RR}$ που υπολογίζονται από πολλές προσομοιώσεις θεωρώντας ότι $N=3$ , $M=10$ και $L=7$ . Απεικονίζεται και η πλησιέστερη Gaussian κατανομή.....	183
Εικόνα 75: (α) $P_{RR}$ και (β) $\Delta P_{RR}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για $N=6$ .....	184
Εικόνα 76: $P_{RR}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για $L=3$ .....	185
Εικόνα 77:(α) $P_{RR}$ και (β) $\Delta P_{RR}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για με διαφορετικά επίπεδα αβεβαιότητας για κάθε ειδικό .....	185
Εικόνα 78: $\Delta P_{RR}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για διαφορετικά $L$ για την (α) αντιστρόφως γραμμική και τη (β) λογαριθμική κλίμακα.....	186

Εικόνα 79: (α) $P_{RR}$ και (β) $\Delta P_{RR}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για διαφορετικά $L$ και $N=6$ , στην περίπτωση της GMM.....	187
Εικόνα 80: $\Delta P_{RR}$ για ασαφείς κρίσεις ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για διαφορετικά $L$ για (α) $N=3$ (β) $N=6$ .....	188
Εικόνα 81: Αποτύπωση των προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται στην 6.4. Το πλαίσιο με τις διακεκομμένες γραμμές περιέχει την προτεινόμενη μέθοδο για την εκτίμηση της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης από ένα περιορισμένο σύνολο πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη. Το υπόλοιπο του σχήματος εξηγεί πώς η αξιοπιστία του προτεινόμενου συστήματος εκτίμησης μπορεί να επαληθευτεί με περαιτέρω αριθμητικές προσομοιώσεις.....	190
Εικόνα 82: $P_{RR}$ και $e^{(u)}$ ως συνάρτησή του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για $L=5$ και (α) $N=3$ , (β) $N=6$ .....	191
Εικόνα 83: $P_{RR}$ και $e^{(u)}$ ως συνάρτησή του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για $L=7$ και (α) $N=3$ , (β) $N=6$ .....	192
Εικόνα 84: (α) $P_{RR}$ και (β) $e^{(std)}$ ως συνάρτησή του επιπέδου αβεβαιότητας για $M=15$ . 192	
Εικόνα 85: $P_{RR}$ and $e^{(u)}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για $L=5$ και $N=3$ , για τη GMM .....	193
Εικόνα 86: $P_{RR}$ and $e^{(u)}$ ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών στην περίπτωση των ασαφών κρίσεων.....	194
Εικόνα 87: Διάφορες γραμμικές και μη γραμμικές κατανομές των αρχικών βαρών, συμπεριλαμβανομένης της κανονικής ( $L=1$ ) και της μη κανονικής γραμμικής διάταξης ( $L \neq 1$ ) καθώς και των Beta-κατανομημένων $W_i$ .....	198
Εικόνα 88: PDFs ενός αντιπροσωπευτικού βάρους $w_k$ που λαμβάνεται από την προσομοίωση σύμφωνα με το κύριο ιδιοδιάνυσμα $x_1^{(m)}$ του διαταραγμένου πίνακα $P^{(m)}=P+\Delta P^{(m)}$ . Παράλληλα, απεικονίζεται η πλησιέστερη Gaussian κατανομή στην πρώτη περίπτωση με βάση τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η ένταση των διαταραχών είναι $s=1.5$ και ο αριθμός των κριτηρίων είναι (a) $N=4$ , (b) $N=6$ .....	200
Εικόνα 89: PDFs ενός αντιπροσωπευτικού λογαριθμισμένου βάρους $\ln w_k$ που λαμβάνεται από την προσομοίωση σύμφωνα με τα πραγματικά βάρη $\ln w_k^{(m)}$ του διαταραγμένου πίνακα $P^{(m)}=P+\Delta P^{(m)}$ . Παράλληλα, απεικονίζεται η πλησιέστερη Gaussian κατανομή στην πρώτη περίπτωση με βάση τη μέθοδο ελαχίστων	

τετραγώνων. Η ένταση των διαταραχών είναι $s=1.5$ και ο αριθμός των κριτηρίων είναι (α) $N=4$ , (β) $N=6$ .....	201
Εικόνα 90: Διάγραμμα δραστηριοτήτων περιγραφής αριθμητικής διαδικασίας .....	202
Εικόνα 91: Τα βάρη $w_i$ που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας την EV για $N=6$ , $M=10^3$ και (α) $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0$ (β) $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0.4$ . .....	203
Εικόνα 92: Τα βάρη $w_i$ που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας την GM για $N=6$ , $M=10^3$ και (α) $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0$ (β) $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0.4$ . .....	203
Εικόνα 93: $P_{RR}$ ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για τις μεθόδους «Α» και «Β», υποθέτοντας ότι $N=4$ και $L=2$ .....	208
Εικόνα 94: $P_{RR}$ ως συνάρτηση των $s$ and $s_w$ για $N=4$ κριτήρια και $M=4$ ειδικούς, όπως προκύπτει από (α) την MVNCDF για EV και (β) προσομοιώσεις Monte Carlo για EV, (γ) την MVNCDF για GM και (δ) προσομοιώσεις Monte Carlo για GM .....	209
Εικόνα 95: $P_{RR}$ ως συνάρτηση των $s$ and $s_w$ για $N=4$ κριτήρια και $M=16$ ειδικούς, όπως προκύπτει από (α) την MVNCDF για EV και (β) προσομοιώσεις Monte Carlo για EV, (γ) την MVNCDF για GM και (δ) προσομοιώσεις Monte Carlo για GM .....	210
Εικόνα 96: $P_{RR}$ ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για $N=4$ , $L=2$ , (α) $s_w=0.5$ , (β) $s=0.5$ .....	211
Εικόνα 97: PDF $f(X)$ των βήτα κατανεμημένων τυχαίων μεταβλητών που προκύπτουν για $a=b=1/2$ (U-shaped), $a=b=1$ (ομοιόμορφη), $a=b=2$ (Bell-shaped).....	212
Εικόνα 98: $P_{RR}$ ως συνάρτηση των $s$ και $s_w$ για $N=4$ κριτήρια και $M=4$ ειδικούς, όπως προκύπτουν από (α) την MVNCDF και (b) τις Monte-Carlo προσομοιώσεις υποθέτοντας βήτα κατανεμημένες διαταραχές $a=2$ , $b=2$ .....	213
Εικόνα 99: $P_{RR}$ ως συνάρτηση των $s$ και $s_w$ για $N=4$ κριτήρια και $M=16$ ειδικούς όπως προκύπτουν από (a) την MVNCDF και (b) τις Monte-Carlo προσομοιώσεις υποθέτοντας βήτα κατανεμημένες διαταραχές $a=2$ , $b=2$ .....	214
Εικόνα 100: $P_{RR}$ στην περίπτωση ασύμμετρων βήτα κατανομών με $a=b=1/2$ ή $2$ , για τα $\Delta w_{ij}^{(m)}$ και $\Delta w_{ij}^{(m)}$ . .....	214
Εικόνα 101: $P_{RR}$ ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για $N=4$ κριτήρια και διάφορες τιμές του $L$ , για $s=1$ , $s_w=1$ , στην περίπτωση των μεθόδων (α) EV (β) GM'. .....	215

Εικόνα 102: $P_{RR}$ ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για $L=2$ και για διάφορες τιμές του $N$ , για $s=1$ , $s_w=1$ , στην περίπτωση των μεθόδων (α) EV (β) GM.....	215
Εικόνα 103: $P_{RR}$ ως συνάρτηση των $s$ και $s_w$ για $N=4$ κριτήρια και $M=16$ ειδικούς, όπως προκύπτει από (α) την MVNCDF και (β) τις προσομοιώσεις Monte-Carlo στην περίπτωση της LSM. ....	217
Εικόνα 104: $P_{RR}$ ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για $N=4$ κριτήρια. ....	217
Εικόνα 105: $P_{RR}$ ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για μη γραμμικά ιδανικά βάρη $W_i$ στην περίπτωση όπου $s=s_w=1.2$ , $a=2$ , $b=5$ . ....	218
Εικόνα 106: $P_{RR}$ ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για διαφορετικές τιμές του $s_w^{(m)}$ για $N=4$ , $L=2$ . ....	219
Εικόνα 107: $P_{RR}$ ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για διαφορετικές ομάδες των ειδικών (διαφορετικά $L$ ) για $N=4$ , όπου (α) $s_w=0.5$ and (β) $s=0.5$ .....	220
Εικόνα 108: $\Delta P_{RR}$ ως μια συνδυαστική συνάρτηση του αριθμού των ειδικών $M$ και των διαφορετικών τιμών για τις δυνάμεις διαταραχής $s$ , $s_w$ , όταν $N=4$ .....	220
Εικόνα 109: PDFs των εκτιμήσεων $\tilde{s}$ , $\tilde{s}_w$ για $M=15$ , $N=4$ , $L=2$ , $s=s_w=1$ .....	222
Εικόνα 110: PDF της $\tilde{P}_{RR}$ στην περίπτωση όπου $M=15$ για (α) $N=4$ , (α) $N=6$ . ....	223
Εικόνα 111: $P_{log}$ ως συνάρτηση της ομάδας των ειδικών στην περίπτωση όπου $s=s_w=1$ , $L=2$ για (a) $N=4$ , (b) $N=6$ ,.....	223





## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εκδόσεις Ethernet.....	44
Πίνακας 2: Πρότυπα Ethernet.....	45
Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ethernet.....	46
Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του USB.....	48
Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα IEEE 1394 .....	49
Πίνακας 6: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα HomePNA 3.1.....	53
Πίνακας 7: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα PLC .....	56
Πίνακας 8: Πρότυπα Bluetooth .....	58
Πίνακας 9: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Bluetooth .....	58
Πίνακας 10: Πρωτόκολλα IEEE 802.11 .....	59
Πίνακας 11: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα IEEE 802.11 .....	60
Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά UWB, NB, WB.....	62
Πίνακας 13: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα UWB .....	63
Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά 60GHz σε σχέση με UWB, 802.11n .....	64
Πίνακας 15: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα 60 GHz radio. ....	65
Πίνακας 16: Εκδόσεις πρωτοκόλλου HiperLAN.....	66
Πίνακας 17: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα HiperLAN.....	66
Πίνακας 18: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Οπτικών Ινών. ....	68
Πίνακας 19: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα IrDA .....	71
Πίνακας 20: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Οπτικών Υπέρυθρων Συστημάτων. ....	72
Πίνακας 21: Κλίμακα Αξιολόγησης Συγκρίσεων ανά Ζεύγη (Nine Level Scale) .....	92
Πίνακας 22: Εναλλακτικές Κλίμακες Προτίμησης.....	93
Πίνακας 23: Τιμές Δείκτη Τυχαίου Λόγου Ασυνέπειας RI .....	97
Πίνακας 24: Κλίμακα Αξιολόγησης Ασαφών Συγκρίσεων ανά Ζεύγη (Fuzzy Nine Level Scale) .....	105
Πίνακας 25: Κριτήρια και Παράγοντες για το Οικιακό Δίκτυο .....	127

Πίνακας 26: Κριτήρια και παράγοντες για τη συσκευή επέκτασης .....	128
Πίνακας 27: Κριτήρια και παράγοντες για την HDTV .....	130
Πίνακας 28: Κριτήρια και παράγοντες για την VoIP .....	131
Πίνακας 29: Περιγραφή Ερευνών .....	141
Πίνακας 30: Κριτήρια και Παράγοντες για το οπτικό σπίτι/γραφείο .....	159
Πίνακας 31: Σχετικές προτεραιότητες των εναλλακτικών για κάθε παράγοντα .....	165

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Οπτικών Επικοινωνιών του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Θωμά Σφηκόπουλου.

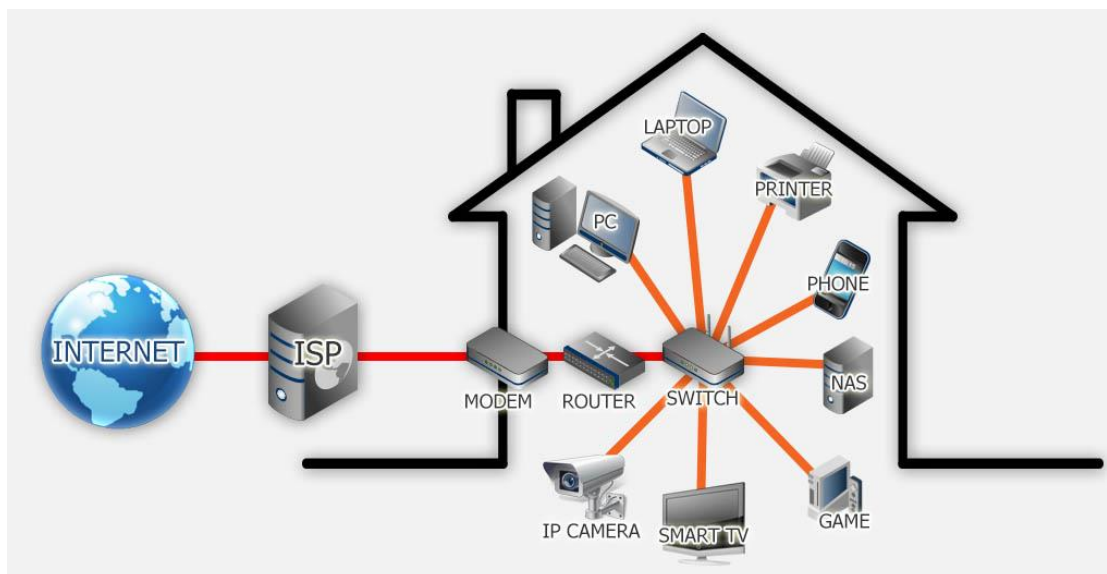


# 1 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

## 1.1 Ανάγκη και Προοπτικές Οικιακών Δικτύων

Τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί μια επιτακτική ανάγκη για την υποστήριξη ευρυζωνικών υπηρεσιών τόσο στον οικιακό όσο και στον εργασιακό χώρο. Προς αυτήν την κατεύθυνση, έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος σε τεχνολογίες που προσφέρουν ένα υψηλό εύρος ζώνης. Αυτό έχει προκαλέσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην εξέλιξη των δικτύων μέσα στο σπίτι και πολλά πρότυπα έχουν αναπτυχθεί για τη διασύνδεση των αντίστοιχων συσκευών. Ο αριθμός των σπιτιών που διαθέτουν πολλαπλούς ηλεκτρονικούς υπολογιστές αλλά και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές έχει αυξηθεί σημαντικά, ενώ παράλληλα μεγάλη αύξηση παρουσιάζει και ο αριθμός των υπαλλήλων που δουλεύουν από το σπίτι χωρίς να χρειάζεται να μεταβούν σε άλλους χώρους εργασίας. Η συγκεκριμένη κατάσταση έχει σαν επακόλουθο την ανάγκη για αξιόπιστα και αποτελεσματικά δίκτυα στον οικιακό χώρο. Είναι πράγματι γεγονός ότι η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας έχει κατορθώσει να εισβάλλει σε κάθε πτυχή της ζωής του σύγχρονου ανθρώπου. Παράλληλα με την εξέλιξη των υπολογιστών, έχουν εξελιχθεί και οι διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές, παρέχοντας εντυπωσιακές δυνατότητες, όπως η σύνδεσή τους με άλλες συσκευές για την εξυπηρέτηση διαφόρων σκοπών. Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται σχεδόν καθημερινά από τους καταναλωτές και κάνουν συχνά έντονη την παρουσία τους στο οικιακό περιβάλλον. Σήμερα έχουν ήδη αναπτυχθεί δίκτυα για τη διασύνδεση των συσκευών, που βρίσκονται μέσα σε ένα σπίτι ή σε ένα γραφείο, προσφέροντας την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων και λειτουργικότητων τους. Αυτού του είδους τα δίκτυα ονομάζονται οικιακά δίκτυα ή αλλιώς Home Networks (HN) που αποτελούν μικρά δίκτυα τα οποία αναπτύσσονται σε μια ιδιωτική κατοικία ή σε ένα γραφείο [1], [2].

Η οικιακή δικτύωση αποτελεί ουσιαστικά τη σύνδεση εκείνων των δικτυακών στοιχείων που επεξεργάζονται, διαχειρίζονται, μεταφέρουν και αποθηκεύουν πληροφορίες με στόχο την διασύνδεση και επικοινωνία των διαφόρων ηλεκτρονικών οικιακών συσκευών είτε μέσα στο σπίτι είτε στο χώρο εργασίας. Στην Εικόνα 1, που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα τυπικό οικιακό δίκτυο, όπου ποικίλες συσκευές συνδέονται μέσω ενός κεντρικού δρομολογητή.

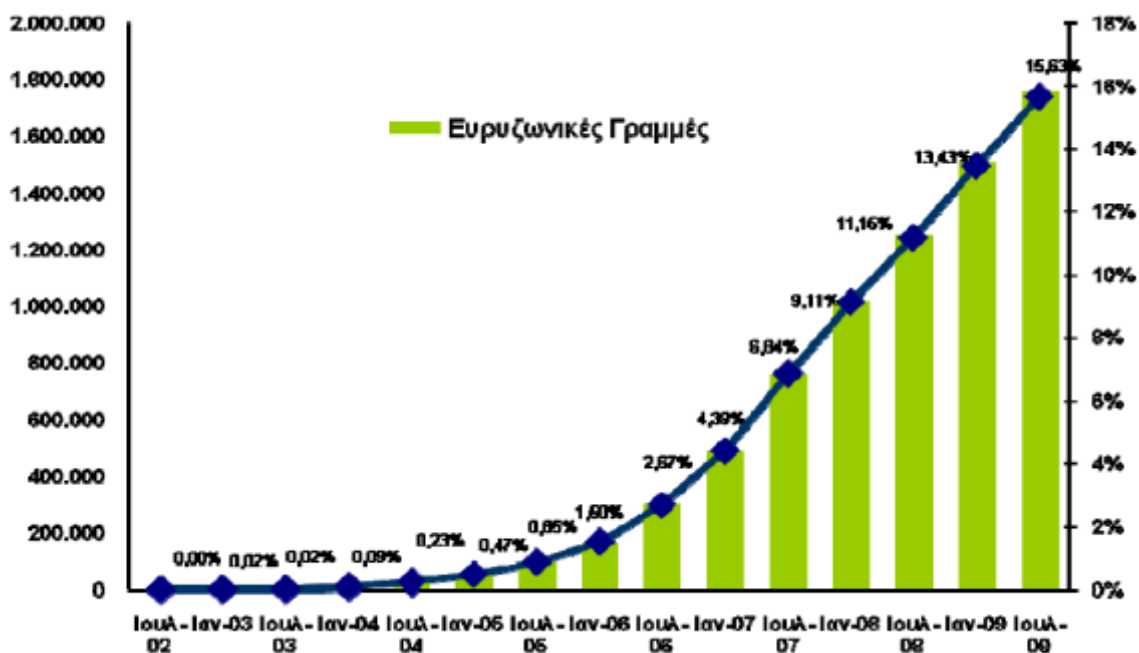


Εικόνα 1: Οικιακό Δίκτυο στο σπίτι και στο γραφείο

Πράγματι οι ταχύτητες πρόσβασης ολοένα και αυξάνονται, οι τεχνολογίες ασύρματης

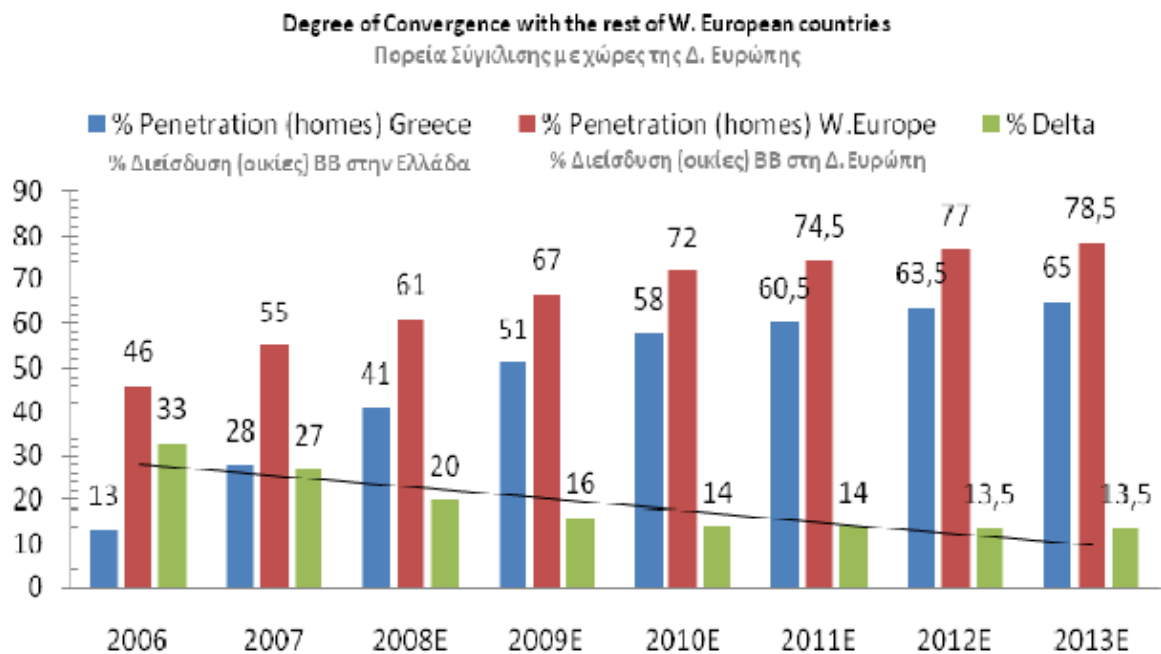
αλλά και ενσύρματης δικτύωσης βελτιώνονται και οι περισσότεροι καταναλωτές διαθέτουν παραπάνω από ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή, σταθερό ή φορητό στον οικιακό τους χώρο. Μεγάλες εταιρείες διαπίστωσαν αυτές τις τεχνολογικές εξελίξεις και θέλησαν να πρωτοπορήσουν ανακοινώνοντας την πρόθεσή τους για τη δημιουργία ενός ψηφιακού σπιτιού. Διαπίστωσαν ότι οι επιθυμίες του καταναλωτή που διαθέτει περισσότερους από έναν ηλεκτρονικούς υπολογιστές, θα στραφούν στην δημιουργία ενός τρόπου επικοινωνίας μεταξύ τους, δηλαδή, στην δημιουργία ενός γρήγορου και αξιόπιστου δικτύου. Η Microsoft αλλά και η Apple στις αρχές του 2001 δημοσίευσαν τα σχέδια τους για τη δημιουργία ενός ψηφιακού τρόπου ζωής. Σκοπός τους ήταν η δημιουργία ενός οικιακού δικτύου που θα αποτελούσε κομμάτι της καθημερινότητας των καταναλωτών. Η δημιουργία όμως ενός τέτοιου δικτύου δεν είναι εύκολη υπόθεση και ο καταναλωτής έχει πλέον πολλές απαιτήσεις. Ο Gardner [3] υποστηρίζει ότι παρόλο που τα οικιακά δίκτυα ενδέχεται να διαφέρουν σε απαιτήσεις από τα δίκτυα στους χώρους εργασίας, παρ’όλα αυτά αναγνωρίζεται ότι όπως και στον εργασιακό χώρο, έτσι και στο οικιακό δίκτυο, ο χρήστης θέλει να μεταφέρει αρχεία μεταξύ συσκευών, να μοιραστεί συνδέσεις στο Διαδίκτυο (Internet) καθώς και στις περιφερειακές συσκευές. Ενώ, όμως, είναι εύκολο να συνδεθεί ένας οικιακός δρομολογητής (router) σε έναν υπολογιστή, είναι πολύ πιο πολύπλοκο να μοιραστούν πολλοί υπολογιστές τον ίδιο δρομολογητή, ιδιαίτερα όταν οι υπολογιστές βρίσκονται σε διαφορετικούς ορόφους [4]

Όσον αφορά την κατάσταση στην Ελλάδα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2, με την πάροδο των χρόνων η χρήση των οικιακών ευρυζωνικών υπηρεσιών έχει σημειώσει σημαντική άνοδο. Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια ο ρυθμός εισχώρησης της ευρυζωνικότητας στην καθημερινή ζωή του Έλληνα καταναλωτή έχει αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με τα πρώτα χρόνια υιοθέτησής τους.



Εικόνα 2: Διείσδυση και Πλήθος Ευρυζωνικών συνδέσεων στην Ελλάδα (Πηγή: Παρατηρητήριο Κοινωνία της Πληροφορίας)

Συγκριτικά με τις υπόλοιπες χώρες της Δυτικής Ευρώπης, αξίζει να σημειωθεί ότι μειώνεται σημαντικά η διαφορά του βαθμού διείσδυσης της ευρυζωνικότητας στην Ελλάδα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.

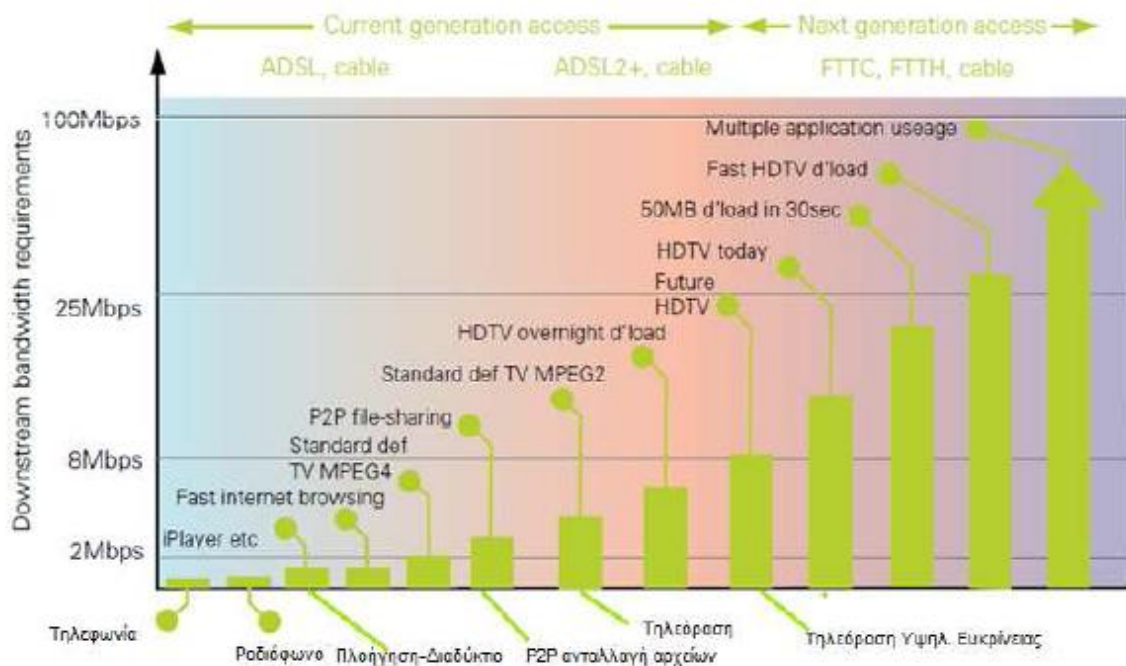


**Εικόνα 3: Ευρωζωνική Σύγκλιση της Ελλάδας με τη Δυτική Ευρώπη (Πηγή: Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών)**

Δεδομένης της ολοένα και αυξανόμενης ανάγκης για παροχή ευρωζωνικών υπηρεσιών και υποστήριξη της δικτύωσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών στο σπίτι, εκτός από την μεταφορά απλών δεδομένων, θα πρέπει να παρέχεται η δυνατότητα μεταφοράς μουσικής, εικόνας και βίντεο υψηλής ευκρίνειας (HD - High Definition). Τα σύγχρονα σπίτια έχουν εξοπλισθεί με ψηφιακές συσκευές ψυχαγωγίας όπως ψηφιακές βιντεοκάμερες, συσκευές παραγωγής MP3, DVD players κ.α. Ο Teger [4] τονίζει ότι το οικιακό δίκτυο θα πρέπει να υποστηρίζει πέντε ειδών εφαρμογές: δεδομένων, τηλεφωνίας, ήχου, βίντεο και τηλεμετρία. Το οικιακό δίκτυο που θα εγκατασταθεί πρέπει, παράλληλα, να υποστηρίζει την αποτελεσματική επικοινωνία και μεταφορά δεδομένων όλων αυτών των κατηγοριών μεταξύ όλων των συσκευών και των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Επιπλέον, το οικιακό δίκτυο πρέπει να παρέχει την δυνατότητα να μοιράζεται το Internet υψηλών ταχυτήτων σε όλους τους δικτυωμένους υπολογιστές καθώς και να παρέχεται η δυνατότητα αποθήκευσης και δημιουργίας αντιγράφων ασφαλείας σε δίσκους που θα είναι διαθέσιμοι σε όλους τους δικτυωμένους υπολογιστές μέσα στο σπίτι.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, η εισαγωγή νέων δικτυακών υπηρεσιών, όπως το τρισδιάστατο βίντεο κατά απαίτηση, (3D VoD - 3D Video on Demand) [5], η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV - High Definition Television) [6], το βίντεο υψηλής ευκρίνειας, η τηλεπαρουσία (Telepresence) [7], τα τρισδιάστατα παιχνίδια (3D Gaming) [8], οι εφαρμογές εικονικής πραγματικότητας (Virtual Reality) [9] και ηλεκτρονικής Υγείας (e-Health) [1] έχουν αυξήσει τις απαιτήσεις για όλο και μεγαλύτερο εύρος ζώνης καθώς και μεγαλύτερες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Παράλληλα, η έλευση του 4K βίντεο, ανάλυσης δηλαδή 4000 pixels, δε θα μπορεί να υποστηριχτεί, εκτός και εάν ταχύτητες της τάξης των Gigabit είναι διαθέσιμες στο δίκτυο πρόσβασης. Η τάση αντικατάστασης της δικτυακής υποδομής οικιακής πρόσβασης, που βασίζεται στο χαλκό, από την πολλά υποσχόμενη τεχνολογία ίνα στο σπίτι (FTTH - Fiber-to-the-home), με ρυθμούς στο δίκτυο πρόσβασης  $\geq 1\text{Gb/s}$ , είναι έντονα εμφανής τα τελευταία χρόνια. Η κατανομή τέτοιων υψηλών ρυθμών δεδομένων αποτελεί τεχνολογική πρόκληση. Δεδομένων των υψηλών επιδόσεων των οπτικών επικοινωνιακών συστημάτων στα δίκτυα μεγάλων

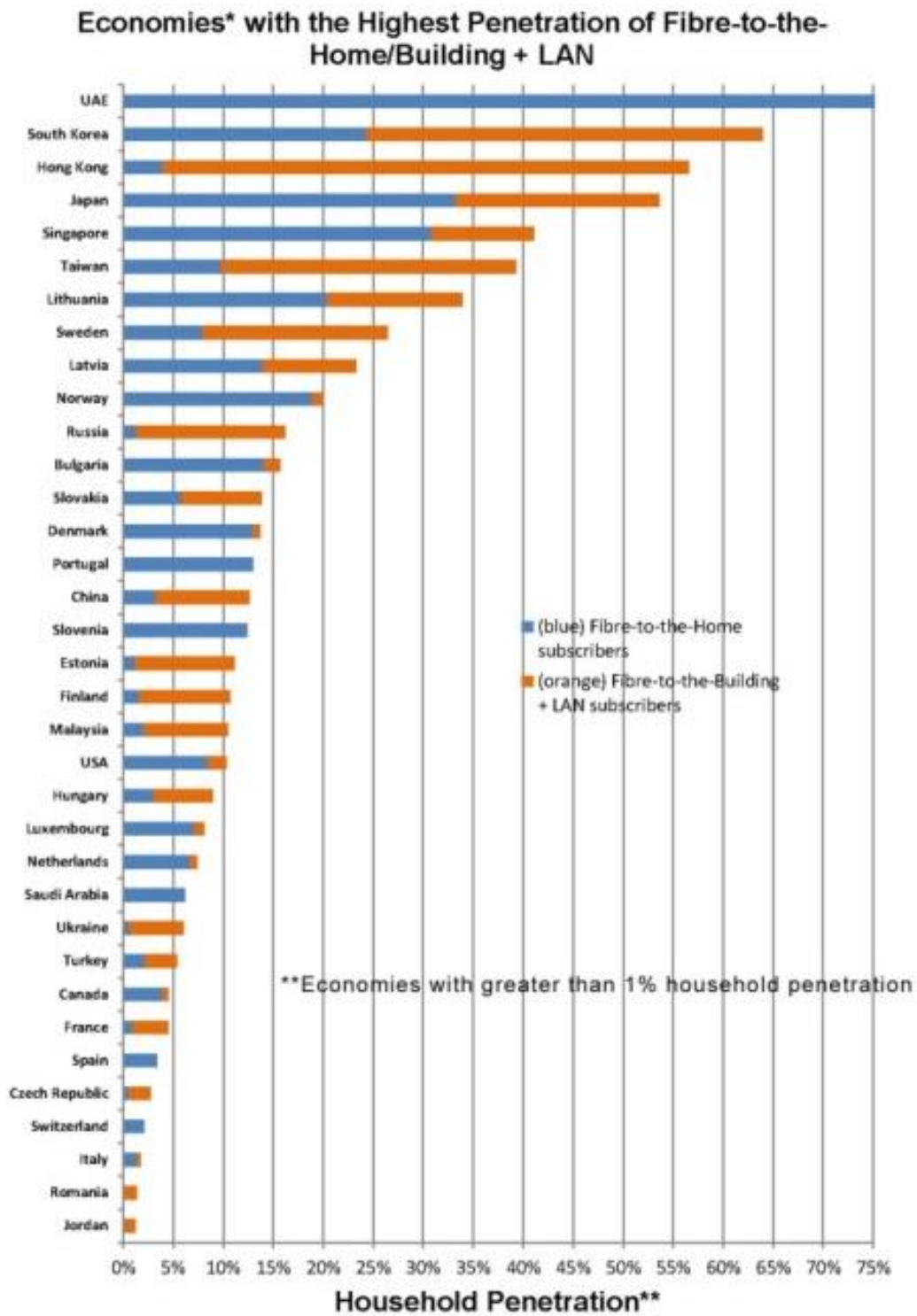
αποστάσεων και στα δίκτυα μητροπολιτικής περιοχής, οι οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα οικιακά δίκτυα [1]. Τα συστήματα οπτικής ίνας, είτε κλασικής είτε πλαστικής (POF – Plastic Optical Fiber) [10], χαμηλού εύρους ζώνης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σπίτι ή στο γραφείο για να διασφαλίσουν την αποφυγή των συμφορήσεων στις οικιακές υπηρεσίες από σημείο σε σημείο (end-to-end). Παραδοσιακά, στην εγκατάσταση δικτύων, για παράδειγμα, σε εταιρικά ή ακαδημαϊκά περιβάλλοντα, παρουσιάζεται ανάγκη για δέκα φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από εκείνη των σημείων πρόσβασης στο υπόλοιπο της τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Δεδομένου ότι η τεχνολογία FTTH [11] υπόσχεται συμμετρική πρόσβαση δεδομένων της τάξης τουλάχιστον των 100 Mbit/s ανά νοικοκυριό, τα συστήματα οικιακών δικτύων πρέπει να υποστηρίξουν μεταφορά δεδομένων της τάξης των gigabit/δευτερόλεπτο.



**Εικόνα 4: Νέες Τηλεπικοινωνιακές Ανάγκες (Πηγή: Υπουργείο Μεταφορών και Επικοινωνιών)**

Στην εικόνα που ακολουθεί παρατίθενται οι χώρες με τη μεγαλύτερη διείσδυση του FTTH καθώς και της οπτικής ίνας στο κτίριο (FTTB - Fiber-to-the-building) [12] στα εκάστοτε νοικοκυριά, για το 2013. Παρατηρείται ότι οι Ασιατικές χώρες είναι εκείνες με τα υψηλότερα ποσοστά διείσδυσης του FTTB, ενώ στην περίπτωση του FTTH, πέραν από την εμφανή επικράτηση στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (UAE), ακολουθούν η Ιαπωνία, η Νότια Κορέα και η Σιγκαπούρη καθώς και η Νορβηγία με τη Λιθουανία.





December 2013 Ranking  
 Source: Fibre to the Home Councils  
 February 2014

\*Economies with at least  
 200,000 households

Εικόνα 5: Χώρες με την υψηλότερη διείσδυση του FTTH (Πηγή: Fiber to the Home Councils)

Ωστόσο, ενώ οι ρυθμοί στο δίκτυο πρόσβασης ενδέχεται να αυξηθούν εξαιτίας του

FTTH μέχρι και 1Gb/s ο διαμοιρασμός αυτής της πληροφορίας είναι πολύ δύσκολος μέσα στο σπίτι [11], [12]. Αποτελεί, λοιπόν, επιτακτική ανάγκη η διοχέτευση τέτοιων υψηλών ταχυτήτων από το δίκτυο πρόσβασης στο εσωτερικό οικιακό δίκτυο.

Πλήθος διαφορετικών προσεγγίσεων έχουν αναπτυχθεί, ενώ οι αυξανόμενες απαιτήσεις των καταναλωτών δημιουργούν καθημερινά καινούργια δεδομένα και προδιαγραφές. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες οικιακής δικτύωσης παρέχοντας τις ακόλουθες τεχνολογίες διασύνδεσης:

- με εγκατάσταση νέας καλωδίωσης
- με χρήση της υπάρχουσας καλωδίωσης
- με ασύρματη δικτύωση

Όσον αφορά στην εγκατάσταση νέας καλωδίωσης, τέτοιου είδους τεχνολογίες είναι Ethernet, IEEE 1394 ή FireWire και ενιαίος σειριακός δίαυλος (USB - Universal Serial Bus).

Τη χρήση της υπάρχουσας καλωδίωσης, χρησιμοποιούν οι τεχνολογίες ένωσης επικοινωνιών μέσω τηλεφωνικής γραμμής οικιακής δικτύωσης (HomePNA - Home Phoneline Networking Alliance) και επικοινωνίας μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος (PowerLine).

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες κατηγορίες, ασύρματη δικτύωση απαιτούν οι τεχνολογίες "κυανόδους" (Bluetooth), ασύρματη αξιοπιστία (WiFi - wireless fidelity), οικιακή ραδιοσυχνότητα (HomeRF - Home Radiofrequency), τοπικό ραδιοδίκτυο υψηλής απόδοσης (HIPERLAN - High Performance Radio Local Area Network), δίκτυα εξαιρετικά ευρείας ζώνης (UWB - Ultra Wide Band), ασύρματες επικοινωνίες με φέρον στα 60 GHz (60GHz-radio).

Είναι, λοιπόν, γεγονός ότι τα συστήματα οικιακής δικτύωσης πρόκειται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών από άκρο σε άκρο (peer to peer), δίνοντας ώθηση στη διεύθυνση του μελλοντικού Διαδικτύου. Η ζήτηση για τα οικιακά δίκτυα με ταχύτητες της τάξης των gigabit οδηγείται από τις αναδυόμενες υπηρεσίες του μελλοντικού Διαδικτύου στα δίκτυα πρόσβασης υψηλών ταχυτήτων και από τον ταχέως αυξανόμενο αριθμό των συσκευών που επικοινωνούν μέσα στο σπίτι. Τα τρέχοντα οικιακά δίκτυα υποφέρουν από το γεγονός ότι πολλές συσκευές περιορίζονται σε ρυθμούς μετάδοσης στην περίπτωση των ασύρματων συνδέσεων ή απαιτούν την εγκατάσταση επιπλέον καλωδίωσης για την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών. Έτσι για τα υφιστάμενα οικιακά δίκτυα εμφανίζεται ο κίνδυνος της συμφόρησης όταν τροφοδοτούνται με υψηλής ταχύτητας οπτικά δίκτυα πρόσβασης, τα οποία προσφέρουν 100 megabit ανά δευτερόλεπτο ή περισσότερο συμμετρική πρόσβαση. Το μελλοντικό Διαδίκτυο φαίνεται, λοιπόν, ότι θα προσφέρει εξαιρετικά υψηλό εύρος ζώνης στα δίκτυα κορμού και πρόσβασης. Τα οικιακά δίκτυα διαδραματίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση των πλεονεκτημάτων αυτού του υψηλού εύρους ζώνης παρέχοντας παράλληλα στους χρήστες κρίσιμη πρόσβαση στην υποδομή της τερματικής συσκευής μέσα στο σπίτι ή στο γραφείο. Η επέκταση της πρόσβασης στον οικιακό ή εργασιακό χώρο και σε μεμονωμένες συσκευές είναι ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αποτελεσματικά το μελλοντικό οικιακό δίκτυο. Τα μελλοντικά οικιακά δίκτυα πρέπει να εμπλουτίσουν τις ζωές των χρηστών με νέα δεδομένα και πρωτόγνωρες εμπειρίες, όπως για παράδειγμα μέσω των διαδραστικών τρόπων ψυχαγωγίας. Επιπλέον, τα οικιακά δίκτυα θα πρέπει επίσης να στηρίξουν τους πολίτες στη διατήρηση της ανεξαρτησίας τους, ακόμα και στις μεγαλύτερες ηλικίες, για παράδειγμα προσφέροντας απομακρυσμένη ιατρική υποστήριξη και επιτρέποντάς τους να επικοινωνούν με την οικογένειά τους για να μειώσουν οποιαδήποτε αίσθηση

απομόνωσης που μπορεί να έχουν. Εν ολίγοις, οι χρήστες πρέπει να έχουν την ικανότητα να ελέγχουν το εικονικό, καθώς και το φυσικό τους περιβάλλον μέσω των οικιακών δικτύων. Είναι βεβαίως κατανοητό ότι οι χρήστες θα απαιτήσουν τέτοια δίκτυα να είναι εύκολα στην εγκατάσταση, χωρίς καλώδια, και αρκετά εύκολα στη χρήση, έτσι ώστε να αποτελέσουν μια επιπλέον βασική χρηστική ανάγκη, όπως το ηλεκτρικό ρεύμα και το νερό.

Δεδομένων των πολλών απαιτήσεων και λειτουργιών που πρέπει να υποστηρίζονται από τα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς, το ενδιαφέρον πέραν από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες στρέφεται και στις οπτικές τεχνολογίες. Συγκεκριμένα, οι οπτικές ίνες και οι οπτικές ασύρματες τεχνολογίες προβλέπεται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Τέτοιου είδους τεχνολογίες είναι οι επικοινωνίες ορατού φωτός (VLC - Visible Light Communications), το IrDA (Infrared Data Association) που χρησιμοποιεί την υπέρυθη ακτινοβολία για μετάδοση, καθώς και το υπέρυθρο (IR - Infrared). Στο εσωτερικό των καινούργιων κτιρίων, τα συστήματα που βασίζονται σε οπτική ίνα (είτε κλασική είτε πλαστική) ενδέχεται να παρέχουν την απόλυτη λύση όσον αφορά το εύρος ζώνης και την εμβέλεια [10]. Ωστόσο, κάποιος πρέπει επίσης να λάβει υπόψη ότι οι οπτικές τεχνολογίες έρχονται αντιμέτωπες με ένα διαφορετικό σύνολο απαιτήσεων όταν αναπτύσσονται στο εσωτερικό των κτιρίων των ενδεχομένων πελατών. Για παράδειγμα, σε υφιστάμενα κτίρια, οι κάτοικοι θα είναι πρόθυμοι να αποφύγουν εγκαταστάσεις νέων καλωδίων, που συνοδεύονται από αυξημένο κόστος και πρόσθετες εργασίες.

Στη συνέχεια θα περιγραφούν αναλυτικά οι προαναφερθείσες τεχνολογίες που είτε έχουν ήδη εγκατασταθεί στο οικιακό δίκτυο, είτε αποτελούν πραγματική πρόκληση για την μετέπειτα εγκατάστασή τους, δεδομένων των αναγκών των μελλοντικών οικιακών δικτύων.

### **1.1.1 Οικιακές Τεχνολογίες που Απαιτούν Εγκατάσταση Νέας Καλωδίωσης**

#### **1.1.1.1 Ethernet**

Το Ethernet είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο ενσύρματης τοπικής δικτύωσης υπολογιστών [13]. Αναπτύχθηκε από την εταιρεία Xerox κατά τη δεκαετία του 1970 και έγινε δημοφιλές αφότου η Digital Equipment Corporation και η Intel, από κοινού με τη Xerox, προχώρησαν στην προτυποποίησή του το 1980. Το 1985 το Ethernet έγινε αποδεκτό επίσημα από τον οργανισμό του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers) ως το πρότυπο 802.3 για ενσύρματα τοπικά δίκτυα (LAN - Local Area Networks) [14].

Σημαντικό ρόλο στην οικιακή δικτύωση παρουσιάζει η δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της Ethernet καλωδίωσης εκτός από τη μετάδοση δεδομένων (POE - power over ethernet). Στην Εικόνα 6, που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα τυπικό Ethernet καλώδιο σύνδεσης.



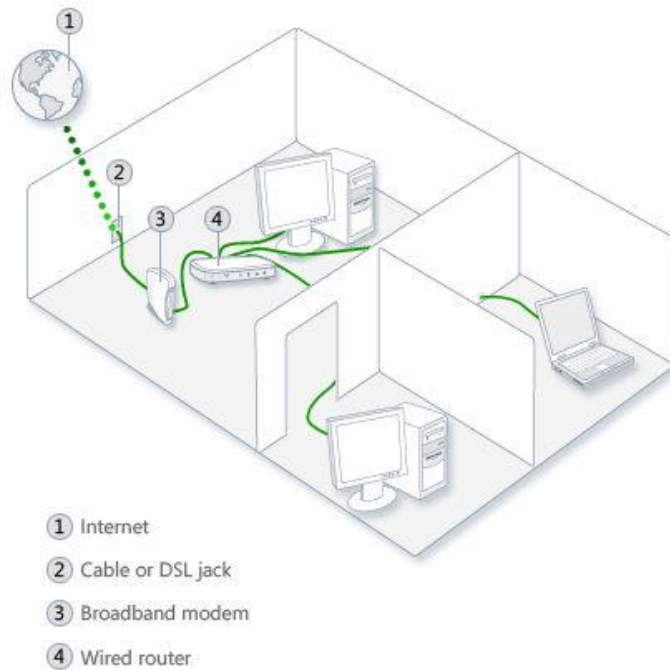
### Εικόνα 6: Ethernet καλώδιο σύνδεσης

Η αρχική έκδοση του Ethernet υποστηρίζει ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων 10Mbps, η επόμενη έκδοση η 100Base-T μέχρι 100Mbps και η νεότερη έκδοση, η Gigabit Ethernet φτάνει σε ταχύτητες τα 100 Gbps. Πιο συγκεκριμένα, οι διάφορες εκδόσεις Ethernet περιγράφονται στον πίνακα που ακολουθεί:

**Πίνακας 1: Εκδόσεις Ethernet**

Έκδοση	Περιγραφή
Ethernet (10Mbps)	Τα 10Mbps είναι επαρκή για το μίσθωμα μιας DSL σύνδεσης και την μεταφορά πολυμεσικών αρχείων με ελάχιστη καθυστέρηση. Μέγιστη απόσταση 100m.
Fast Ethernet (100 Mbps)	Προσφέρει δυνατότητες γρήγορης επεξεργασίας απαιτητικών εφαρμογών. Με το Fast Ethernet μπορούν να καλυφθούν αποστάσεις μέχρι και 40km ανάλογα με τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται.
Gigabit Ethernet-GbE (1 Gbps)	Τα 1000Mbps υπόσχονται υψηλές ταχύτητες ανεβάζοντας όμως λίγο το κόστος. Για τις συνδέσεις με χαλκό έχει επικρατήσει το πρότυπο 1000BASE-T. Το αντίστοιχο πρότυπο για τις οπτικές ίνες είναι τα 1000BASE-FX. Με το 1GbE μπορούν να καλυφθούν αποστάσεις μέχρι και 70km ανάλογα με τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται.
10 Gigabit Ethernet (10 Gbps)	Το 10GbE αναφέρεται σε διάφορες τεχνολογίες για τη μετάδοση των πλαισίων Ethernet με ταχύτητα 10 gigabits ανά δευτερόλεπτο, το πρώτο που ορίζεται από το πρότυπο IEEE 802.3ae -2002. Σε αντίθεση με τα προηγούμενα πρότυπα Ethernet, το 10 gigabit Ethernet ορίζει μόνο full duplex συνδέσεις (μετάδοση δεδομένων σε δύο κατευθύνσεις ταυτόχρονα) σημείο σε σημείο οι οποίες συνήθως συνδέονται με τους δρομολογητές του δικτύου. Με το 10GbE μπορούν να καλυφθούν αποστάσεις μέχρι και 80km ανάλογα με τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται.
40-100 Gigabit Ethernet (40-100 Gbps)	Αυτά τα πρότυπα Ethernet αναπτύχθηκαν από την ομάδα IEEE P802.3ba Ethernet Task Force, το Νοέμβριο του 2007. Σκοπός του παρόντος έργου είναι να επεκταθεί το 802.3 πρωτόκολλο λειτουργίας σε ταχύτητες 40 Gbps και 100 Gbps, ώστε να παρέχουν μια σημαντική αύξηση του εύρους ζώνης, διατηρώντας παράλληλα τη μέγιστη συμβατότητα με το πρωτόκολλο 802.3. Είναι η πρώτη φορά που η IEEE προσφέρει δύο ταχύτητες κάτω από μία καθορισμένη ετικέτα. Ο λόγος για αυτό είναι η κάλυψη ευρέος φάσματος αναγκών, όπως οι ανάγκες των μικρότερων τοπικών εξυπηρετητών (40GbE) καθώς και των εξαιρετικά μεγάλου μεγέθους διακομιστών Διαδικτύου (100GbE).[hh10] Με το 40-100GbE μπορούν να καλυφθούν αποστάσεις μέχρι και 40km ανάλογα με τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται.

Στην Εικόνα 7, που ακολουθεί απεικονίζεται ένα τυπικό οικιακό δίκτυο βασισμένο σε Ethernet δικτύωση.



**Εικόνα 7: Οικιακό Δίκτυο Ethernet**

Ο Πίνακας 2 δίνει μια σύντομη περιγραφή για κάθε ένα από τα διάφορα ενδεικτικά πρότυπα [15].

**Πίνακας 2: Πρότυπα Ethernet**

Πρότυπο	Περιγραφή
10GBASE-SR <sup>1</sup>	Υποστηρίζει μετάδοση των 10 Gigabit Ethernet πάνω από μία πολύτροπη ίνα
40GBASE-SR4	Υποστηρίζει μετάδοση των 40 Gigabit Ethernet πάνω από ένα παράλληλο Gigabit μέσο ανά δευτερόλεπτο που αποτελείται από 4 παράλληλες πολύτροπες ίνες σε κάθε κατεύθυνση
100GBASE-SR10	Υποστηρίζει τη μετάδοση των 100 Gigabit Ethernet πάνω από ένα παράλληλο Gigabit μέσο ανά δευτερόλεπτο που αποτελείται από 10 παράλληλες πολύτροπες ίνες σε κάθε κατεύθυνση
10GBASE-LR <sup>2</sup>	Υποστηρίζει μετάδοση των 10 Gigabit Ethernet πάνω από μία μονότροπη ίνα
40GBASE-LR4	Υποστηρίζει μετάδοση των 40 Gigabit Ethernet πάνω από 4 μήκη κύματος για κάθε μονότροπη ίνα προς κάθε κατεύθυνση
100GBASE-LR4	Υποστηρίζει διαβίβαση των 100 Gigabit Ethernet πάνω από 4 μήκη

<sup>1</sup> SR: short range (μικρή εμβέλεια)

<sup>2</sup> LR: long range (μεγάλη εμβέλεια)

	κύματος, σε κάθε μονότροπη ίνα προς κάθε κατεύθυνση
100GBASE-ER4	Υποστηρίζει μετάδοση των 100 Gigabit Ethernet πάνω από 4 μίλη κύματος, σε κάθε μονότροπη ίνα σε κάθε κατεύθυνση. Για την κάλυψη των 40 χιλιομέτρων, αναμένεται ότι θα περιλαμβάνει εφαρμογές ημιαγωγών και οπτικό ενισχυτή (SOA)

Τέλος, τα διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εν λόγω τεχνολογίας ενσύρματης δικτύωσης παρουσιάζονται στον ακόλουθο συγκεντρωτικό πίνακα.

**Πίνακας 3: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ethernet**

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Αποτελεί ένα από τα πλέον οικονομικά μέσα δικτύωσης.
2. Εξαιρετικά εύκολο ως προς την εγκατάσταση και τη χρήση.
3. Μεγάλη ταχύτητα.
4. Πολύ καλη απόδοση κάτω από μέτριες συνθήκες φόρτου δικτύου.
5. Τα σχεδιαστικά πρότυπα είναι κατάλληλα για την δικτύωση μιας οικίας αφού το επιτρεπόμενο όριο συνδεδεμένων κόμβων είναι 1.024
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Απαραίτητη καλωδίωση μεταξύ των υπολογιστών και των διάφορων συσκευών.
2. Υπάρχουν φυσικοί περιορισμοί στα δίκτυα Ethernet που συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση της τελικής απόδοσης του προτύπου.
3. Το μέγιστο επιτρεπόμενο μήκος καλωδίου χαλκού για το πρότυπο 802.3 είναι τα 500 μέτρα. Για την επιτυχημένη επέκταση του δικτύου σε μεγαλύτερες αποστάσεις, χρησιμοποιούνται πολλά καλώδια συνδεδεμένα μεταξύ τους με επαναλήπτες που όμως αυξάνουν την πολυπλοκότητα και το κόστος.

### 1.1.1.2 USB

Το πρότυπο USB αποτελεί την απλούστερη και σχετικά ευκολότερη επιλογή για την σύνδεση διαφορετικών ηλεκτρικών συσκευών, κυρίως ηλεκτρονικών υπολογιστών, με σκοπό τη δημιουργία ενός μικρού οικιακού δικτύου [16]. Έκανε την εμφάνισή του στην αγορά στα τέλη του 1996 με την έκδοση 1.0 ενώ στις 17 Νοέμβριου 2008 δημιουργήθηκε από την USB Implementers Forum (USB-IF) το USB 3.0 [17]. Το συγκεκριμένο πρότυπο έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει συνολικό όγκο έως και 5Gbps σε σχέση με τα 480Mbps του USB 2.0. και τα 12 Mbit/s του USB 1.0 Πέρα από την ταχύτητα, προσφέρει παράλληλα και ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών όπως πολυμέσα, ροή δεδομένων (streaming), ψηφιακές μηχανές, τηλεοράσεις κλπ. Τα πρώτα πιστοποιημένα USB 3.0 καταναλωτικά προϊόντα που έχουν ανακοινωθεί ήταν τον Ιανουάριο του 2010 από την Έκθεση ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης του Las Vegas (CES - Consumer Electronics Show). Ο τυπικός συμβολισμός της USB εσύρματης δικτύωσης παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.



**Εικόνα 8: USB συμβολισμός**

Παράλληλα με τη μεταφορά δεδομένων, η τεχνολογία USB υποστηρίζει και ηλεκτρική παροχή μεταξύ των υπολογιστών και των συσκευών (power supply). Μια συσκευή μπορεί να αντλήσει έως 900 mA ηλεκτρικό ρεύμα (κατά 80% αύξηση σε σχέση με USB 2.0). Ο ρυθμός σύνδεσης είναι παρόμοιος με του Δίαυλου περιφερειακής ένωσης στοιχείων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (PCI Express 2.0 - Peripheral Component Interconnect Express) στα 5 Gbit/s. Χρησιμοποιεί 8B/10B κωδικοποίηση, καταχωρητή ολίσθησης γραμμικής ανατροφοδότησης (LFSR - Linear Feedback Shift Register), κρυπτογράφηση για τα δεδομένα και διάχυση φάσματος.

Οι αλλαγές από USB 1.0 σε USB 2.0, USB 3.0 φέρνουν αλλαγές και στους ακροδέκτες του. Το βύσμα τύπου A (που πηγαίνει στον υπολογιστή) και το βύσμα τύπου B (που εισχωρεί στη συσκευή USB) μοιάζουν τα ίδια, αλλά εσωτερικά έχουν ένα επιπλέον σετ σύνδεσης και η άκρη είναι χρώματος μπλε για να δείξει ότι είναι USB 3.0. Υπάρχει επίσης ένα νέο βύσμα τύπου B που έχει όλα τα βύσματα του οριζόντια. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί να χωρέσει ένα USB 3.0 καλώδιο σε μια συσκευή USB 2.0. Ωστόσο, μπορούμε να συνδέουμε USB 3.0 συσκευές και καλώδια στον τρέχοντα υπολογιστή απλά δεν υπάρχει το πλεονέκτημα της ταχύτητας. Για να αξιοποιήσουμε στο έπακρο το USB 3.0, το καλώδιο πρέπει να είναι μικρότερο σε μήκος από περίπου 9 μέτρα. Το USB 3.0 καλώδιο περιέχει εννέα σύρματα (τέσσερα παραπάνω από ένα καλώδιο USB 2.0). Με εννέα σύρματα διαθέσιμα, το USB 3.0 έχει δύο επιπλέον λωρίδες κυκλοφορίας σε κάθε κατεύθυνση για την εξομάλυνση της ροής μεταξύ του υπολογιστή και της συσκευής. Ενδεικτικοί ακροδέκτες USB 2.0 εμφανίζονται στην Εικόνα 9.



**Εικόνα 9: USB 2.0 ακροδέκτες**

Τα προγράμματα οδήγησης (drivers) είναι διαθέσιμα για τα Windows 7 και 8 μέσω Internet. Το λειτουργικό σύστημα Linux υποστηρίζει το USB 3.0 από την έκδοση 2.6.31, η οποία κυκλοφόρησε το Σεπτέμβριο του 2009.

Όσον αφορά τις αποστάσεις που μπορούν να καλυφθούν με τη χρήση USB δικτύωσης, σημειώνεται ότι τα USB 1.0 και USB 2.0 έχουν τον περιορισμό των 5 μέτρων. Σε αντίθεση το USB 3.0 δεν προσδιορίζει άμεσα ένα μέγιστο μήκος καλωδίου, αλλά προϋποθέτει όλα τα καλώδια να συμβαδίζουν με την ακόλουθη προδιαγραφή: για καλωδίωση χαλκού με 26 σύρματα το μέγιστο πρακτικό μήκος να είναι 3 μέτρα.

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται κάποια βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της εν λόγω τεχνολογίας.

**Πίνακας 4: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα του USB.**

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Γρήγορη μεταφορά δεδομένων .
2. Εύκολη εγκατάσταση και χρήση.
3. Συμβατότητα των περιφερειακών συσκευών με τους υπολογιστές.
4. Φορητότητα συσκευών αποθήκευσης τύπου USB.
5. Ασφαλής σύνδεση-αποσύνδεση συσκευών σε λειτουργία.
6. Χαμηλό κόστος.
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Περιορισμός στην ταχύτητα.
2. Περιορισμός στην απόσταση.
3. Τα περιφερειακά δεν μπορούν να επικοινωνούν απευθείας το ένα με το άλλο αλλά μόνο μέσω του υπολογιστή που συνδέονται.

### 1.1.1.3 IEEE 1394 ή FireWire

Ο σειριακός δίαυλος Firewire ή αλλιώς IEEE 1394 (Εικόνα 10) πρωτοαναπτύχθηκε στα μέσα του 1980 από την Apple με σκοπό να προσφέρει μία λύση στη μετάδοση ψηφιακού σήματος υψηλής ταχύτητας μεταξύ των υπολογιστών και των περιφερειακών συσκευών [18]. Εγκρίθηκε το 1995 ως επίσημο βιομηχανικό πρότυπο. Αποτελεί λύση για τη μεταφορά ψηφιακών δεδομένων, σε επαγγελματικά ηλεκτρονικά προϊόντα, επικοινωνίες και ηλεκτρονικούς υπολογιστές και έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί σε βιντεοκάμερες, εξωτερικούς σκληρούς δίσκους, εξωτερικές συσκευές εγγραφής DVD και άλλες εφαρμογές.





**Εικόνα 10: Σειριακός δίαυλος Firewire**

Το καλώδιο Firewire αποτελείται από έξι χάλκινα σύρματα: τα δύο χρησιμοποιούνται για την παροχή ρεύματος στις συνδεδεμένες συσκευές, ενώ τα υπόλοιπα συνθέτουν δύο ζεύγη συνεστραμμένων καλωδίων για την μεταφορά των δεδομένων. Το κάθε ζεύγος είναι θωρακισμένο ξεχωριστά, όπως κι εξ' ολοκλήρου όλο το καλώδιο. Στις άκρες του τοποθετούνται οι connectors του για την σύνδεση μεταξύ των συσκευών.

Ο Πίνακας 5, που παρουσιάζεται στη συνέχεια, περιλαμβάνει τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του IEEE 1394.

**Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα IEEE 1394**

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Παρέχει απόλυτα ψηφιακή διασύνδεση, δηλαδή δεν υπάρχει η ανάγκη μετατροπής των ψηφιακών δεδομένων σε αναλογικά, με όσα αυτό συνεπάγεται για την ακεραιότητα των δεδομένων.
2. Μικρό μέγεθος σειριακού διαύλου.
3. Σχετικά χαμηλό κόστος καλωδίωσης και υλοποίησης, που υποστηρίζει τη μεταφορά κάθε είδους ψηφιακών δεδομένων.
4. Υψηλή ταχύτητα. Υποστηρίζει 100 Mbps για μεταφορά συμπιεσμένου video, ενώ με 200Mbps έως 400 Mbps, μπορεί να χειριστεί ακόμα και πολυμέσα.
5. Συσκευές εύκολα ανταλλάξιμες, άμεσης σύνδεσης και λειτουργίας (“plug and play”, δυνατότητα άμεσης εγκατάστασης χωρίς παραμετροποίηση [ ]). Αξίζει να σημειωθεί ότι μία συσκευή που είναι συνδεδεμένη στο δίαυλο του IEEE 1394 μπορεί να στείλει δεδομένα κατευθείαν σε άλλες συσκευές του διαύλου χωρίς τη διαμεσολάβηση του υπολογιστή.
6. Ικανότητα σύνδεσης μέχρι και 64 συσκευών παράλληλα.
7. Παροχή ρεύματος μέσω καλωδίων με σταθερούς συνδετήρες.
8. Δυνατότητα τόσο ετερογχρονισμένης (χρήση εκτυπωτή και router) όσο και real-time (σε πραγματικό χρόνο) μεταφοράς δεδομένων ( εφαρμογές πολυμέσων).
9. Εύκολη χρήση. Έχει εύχρηστα καλώδια σύνδεσης (cable connectors), επιτρέποντας στους χρήστες να εγκαθιστούν και να απεγκαθιστούν εύκολα συσκευές.
<b>Μειονεκτήματα</b>

- |                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Μικρή απόσταση μεταξύ των κόμβων ( $\leq 4,5$ μέτρα). Μεγαλύτερες αποστάσεις μπορούν να επιτευχθούν με την χρήση επαναληπτών για επέκταση μέχρι τα 25 μέτρα. |
| 2. Μη δυνατότητα πλήρους οικιακής δικτύωσης όλων των συσκευών.                                                                                                  |
| 3. Σχετικά ακριβότερο από άλλες τεχνολογίες οικιακής δικτύωσης, π.χ. Ethernet και USB.                                                                          |

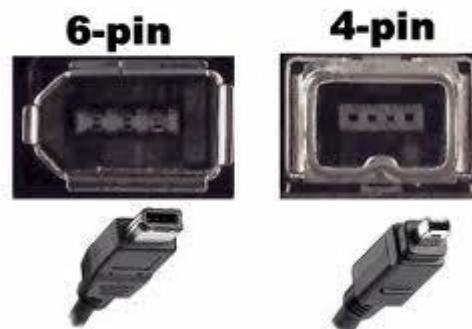
Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι το FireWire 800 (1394b FireWire) είναι η επόμενη έκδοση του δημοφιλούς FireWire που διπλασιάζει την απόδοση του αρχικού προτύπου IEEE-1394a FireWire από 400Mbps σε 800Mbps ξεπερνώντας μάλιστα και τις ταχύτητες που προσφέρει το πρωτόκολλο SCSI. Η πρόοδος από 400 Mbps έως 800 Mbps κάνει το Firewire 1394b μια ανταγωνιστική προσφορά που συγκρίνεται με το Gigabit Ethernet.

Το FireWire 800 δεν είναι μόνο δύο φορές πιο γρήγορο από πριν, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Το FireWire 800 (IEEE 1394b) επιτρέπει τη χρήση των διαφόρων τύπων καλωδίων, προσφέροντας διαφορετική ταχύτητα και ικανότητες. Ένα FireWire 800 καλώδιο (Εικόνα 11) συνδέει συσκευές έως και 32 μέτρα μακριά, ενώ ένας FireWire 800 οπτικός αναμεταδότης συνδέει συσκευές μέχρι και 1000 μέτρα.



Εικόνα 11: Firewire 800 καλώδια

### **IEEE 1394(AKA Firewire, I-Link)**



Εικόνα 12: Firewire υποδοχές συσκευών

Οι FireWire 400 συσκευές χρησιμοποιούν μια 6-pin και 4-pin υποδοχή, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 12, ενώ οι FireWire 800 συσκευές χρησιμοποιούν μια 9-pin

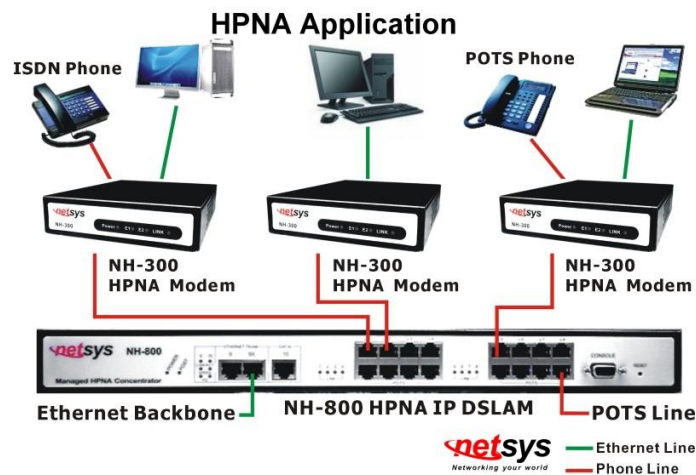
υποδοχή. Όμως οι FireWire 800 συσκευές μπορούν να επιτύχουν ταχύτητες FireWire 800 μόνο όταν υπάρχει σύνδεση σε μία θύρα FireWire 800.

Παράλληλα, είναι εξαιρετικά σημαντικό να σημειωθεί ότι έχουν ανακοινωθεί και τα πρότυπα FireWireS1600 και FireWire S3200, που έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν δεδομένα με ταχύτητες της τάξης των 1.600 και 3.200 Mbps, αντίστοιχα.

## 1.1.2 Οικιακές Τεχνολογίες με τη Χρήση Υπάρχουσας Καλωδίωσης

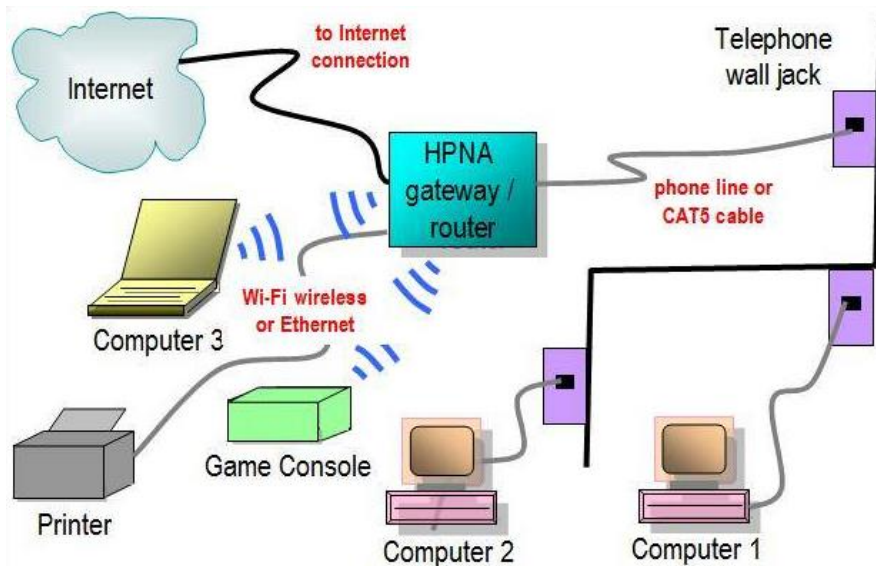
### 1.1.2.1 HomePNA

Η Ένωση HomePNA (πρώην Home Phoneline Networking Alliance, γνωστή επίσης ως HPNA) είναι μια βιομηχανική ένωση επιχειρήσεων, που αναπτύσσει και τυποποιεί την τεχνολογία οικιακής δικτύωσης πάνω από το υπάρχον καλώδιο, π.χ. ομοαξονικό, και το ενσύρματο τηλεφωνικό καλώδιο μέσα στο σπίτι [19]. Μια τυπική εφαρμογή HomePNA, καθώς και μια ενδεικτική δικτύωση με έναν HomePNA δρομολογητή παρουσιάζονται στις εικόνες Εικόνα 13 και Εικόνα 14 αντίστοιχα.



Εικόνα 13: HomePNA εφαρμογή

Οι εταιρείες που την απαρτιζουν είναι οι AT & T, 2WIRE, CopperGate, Motorola, Cisco (Scientific-Atlanta), Sunrise Telecom, K-Micro. Η HomePNA δημιουργεί προδιαγραφές που στη συνέχεια τυποποιεί το πλαίσιο της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU - International Telecommunication Union), ο κορυφαίος παγκόσμιος οργανισμός τυποποίησης. Η HomePNA προωθεί επίσης την τεχνολογία, τις δοκιμές και πιστοποιεί προϊόντα μελών. Τον Μάρτιο του 2009, HomePNA ανακοίνωσε ότι έχει υπογράψει συμφωνία σύνδεσης με την HomeGrid forum για την προώθηση του νέου ITU-T G.hn παγκόσμιου προτύπου ενσύρματης δικτύωσης στο σπίτι.



Εικόνα 14: Δικτύωση με HomePNA δρομολογητή

Η βασική τεχνολογία που εγκρίθηκε από την HomePNA αναπτύχθηκε από διάφορες εταιρείες.

- Η αρχική HomePNA 1.0 τεχνολογία αναπτύχθηκε από την Tut Systems με ρυθμό μετάδοσης 1Mbps το 1998.
- Η HomePNA 2.0 αναπτύχθηκε από Eprigram και εγκρίθηκε από την ITU ως παγκόσμιο πρότυπο με συστάσεις G.9951, G.9952 και G.9953 παρέχοντας ταχύτητες μέχρι 10Mbps και πλήρη λειτουργικότητα της ποιότητας των υπηρεσιών της το 1999.
- Η HomePNA 3.0 αναπτύχθηκε από τις Broadcom και Coppergate Communications και εγκρίθηκε από την ITU ως παγκόσμιο πρότυπο Σύσταση G.9954 (02/05), προσφέροντας ρυθμό μετάδοσης μέχρι 128Mbps, ο οποίος με προαιρετικές προεκτάσεις μπορεί να αγγίξει και τα 240Mbps το Φεβρουάριο του 2005.
- HomePNA 3.1 αναπτύχθηκε από Coppergate Communications και εγκρίθηκε από την ITU ως παγκόσμιο πρότυπο Σύσταση G.9954(01/07) τον Ιανουάριο του 2007. Η HomePNA 3.1 είναι η πρώτη από μια νέα γενιά προτύπων οικιακής δικτύωσης που αναπτύχθηκαν για νέες εφαρμογές ψυχαγωγίας, όπως η τηλεόραση με πρωτόκολλο Διαδικτύου (IPTV - Internet Protocol Television) [20]. Αυτό το είδος της τεχνολογίας, το οποίο παρέχει προηγμένες λειτουργίες, όπως εγγυημένη ποιότητα παρεχομένων υπηρεσιών (Quality of Service, QoS), χρησιμοποιείται σήμερα από σημαντικούς φορείς παροχής υπηρεσιών για την εμπορική «triple play» (ενιαία ευρυζωνική σύνδεση για βίντεο, φωνή και δεδομένα) προσφορά υπηρεσιών. Η HomePNA 3.1 χρησιμοποιεί συχνότητες υψηλότερες από αυτές που χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή συνδρομητική γραμμή (DSL - Digital Subscriber Line), και τις ολοκληρωμένες υπηρεσίες για ψηφιακό δίκτυο (ISDN - Integrated Services for Digital Network), καθώς και κλήσεις φωνής πέρα από τα καλώδια τηλεφώνου και από αυτά που χρησιμοποιούνται για τη ραδιοφωνική μετάδοση και την απευθείας δορυφορική μετάδοση (DBS - Direct broadcast satellite) τηλεόρασης μέσω ομοαξονικού καλωδίου. Η HomePNA 3.1 αναπτύχθηκε για να προσθέσει τη λειτουργία πάνω από ομοαξονικά καλώδια και να αυξήσει τις δυνατότητες δικτύωσης [21].

Οι απαιτήσεις για HomePNA 3.1 είναι οι εξής:

- Τηλεφωνικό καλώδιο (τυπική γραμμή μετάδοσης που αποτελείται από δύο αγωγούς του ίδιου τύπου) ή ομοαξονικό καλώδιο (το ίδιο ομοαξονικό καλώδιο που χρησιμοποιείται για την τηλεόραση).
- Εξοπλισμός (hardware) πιστοποιημένος από την HomePNA

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της HomePNA 3.1.

**Πίνακας 6: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα HomePNA 3.1**

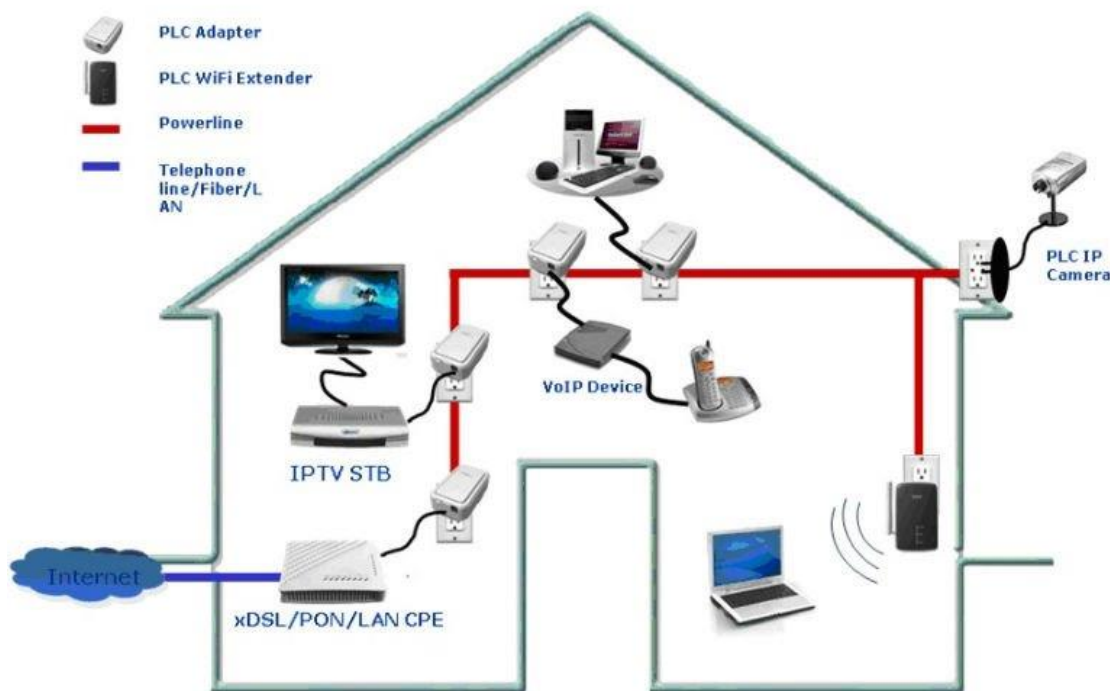
<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Δεν είναι απαραίτητο να υπάρχει ειδική ή νέα καλωδίωση στο σπίτι.
2. Οι υφιστάμενες υπηρεσίες τηλεφώνου, fax, DSL, δορυφορική ή ασύρματη συμβατική (off-the-air) τηλεόραση δεν επηρεάζονται, γιατί η HomePNA λειτουργεί σε διαφορετικές συχνότητες για το ίδιο ομοαξονικό ή το τηλεφωνικό καλώδιο.
3. Τα νεότερα προϊόντα προσφέρουν ταχύτητες δεδομένων έως και 320Mbit/s, επαρκής για την υποστήριξη τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας), τηλεόρασης τυπικής ευκρίνειας (SDTV - Standard Definition TV) καθώς και ροής δεδομένων βίντεο (video streams).
4. Εγγυημένη QoS που εξαλείφει τις συγκρούσεις στο δίκτυο που συμβαίνουν με το Ethernet. Δίνει τη δυνατότητα επιδόσεων πραγματικού χρόνου (real time) στις ροές δεδομένων, όπως η IPTV που πρέπει να παραδοθεί χωρίς διακοπή.
5. Μπορούν να συνδεθούν μέχρι 64 συσκευές.
6. Οι συσκευές μπορεί να έχουν απόσταση μέχρι τα 300 μ. για τα καλώδια τηλεφώνου και πολλές χιλιάδες μέτρα για το ομοαξονικό καλώδιο, κάτι που το καθιστά περισσότερο από επαρκές για τα σπίτια.
7. Χρησιμοποιεί τυπικούς οδηγούς Ethernet κάνοντας εύκολο να προσθέσουμε προϊόν με μια θύρα Ethernet.
8. Το απαιτούμενο hardware δεν είναι ακριβό.
9. Μπορούμε να προσθέσουμε άλλες τεχνολογίες, όπως 802,11 Wi-Fi ώστε να δημιουργήσουμε ένα υβριδικό ενσύρματο / ασύρματο οικιακό δίκτυο.
10. Η τεχνολογία λειτουργεί σε πολυκατοικίες ή συγκροτήματα πολλών κατοικιών (MDU - Multi-Dwelling Units)
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Δεν συνυπάρχουν με το πρότυπο διεπαφής υπηρεσίας για μεταφορά δεδομένων πάνω από καλώδια (DOCIS - Data Over Cable Service Interface Specification,) [22]

### 1.1.2.2 PowerLine Communications (PLC)

Το σημαντικότερο όφελος της επικοινωνίας μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος (PLC - Power Line Communications) είναι ότι οι χρήστες μπορούν εύκολα να δημιουργήσουν ένα δίκτυο χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα ηλεκτρική καλωδίωση ενός σπιτιού ως μέσο επικοινωνίας με δυνατότητα για ρυθμούς μετάδοσης εκατοντάδων Mb/s [23]. Δεν υπάρχει καμία ανάγκη για τη διάνοιξη οπών σε τοίχους ή στην οροφή παρα μόνο να αγοράσουν έναν ειδικό προσαρμογέα. Ως εκ τούτου, η εγκατάσταση είναι γρήγορη,

εύκολη και σχετικά ανέξοδη. Ο προσαρμογέας powerline τοποθετείται σε μια πρίζα και στη συνέχεια συνδέεται μέσω συστρεμμένου ζεύγους καλωδίων κατηγορίας 5 (CAT5 - category 5 cable) με τον δρομολογητή του σπιτιού. Στη συνέχεια, επιπρόσθετοι προσαρμογείς μπορούν να συνδεθούν σε οποιαδήποτε μπρίζα ηλεκτρικού ρεύματος για να δώσουν άμεση δικτύωση και πρόσβαση στο Internet σε μια συσκευή με έξοδο/είσοδο Ethernet. Ωστόσο, οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει το κανάλι της γραμμής του ηλεκτρικού ρεύματος εμποδίζουν την επίτευξη ταχυτήτων της τάξης των Gb/s [24]. Πιο συγκεκριμένα, το γεγονός ότι το οικιακό ηλεκτρικό δίκτυο έχει σχεδιασθεί για μετάδοση σε συχνότητες 50-60Hz περιορίζει το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού PLC στην περιοχή των 2-30MHz, όπου η ισχύς του θορύβου διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Σε αυτές τις συχνότητες τα καλώδια ηλεκτρικής ισχύος παρουσιάζουν «διαρροές», που σημαίνει ότι ένα μέρος της ισχύος του σήματος υψηλής συχνότητας χάνεται υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Επιπλέον, η παρεμβολή από συσκευές που λειτουργούν στην ίδια περιοχή συχνοτήτων, ο θόρυβος από συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς και η συχνοτική εξάρτηση του καναλιού υποβαθμίζουν σημαντικά την ποιότητα της επικοινωνίας. Το 2009 αναφέρθηκε ένα PLC σύστημα με εύρος ζώνης που φθάνει τα 100MHz με χρήση καταλλήλων τεχνικών πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO – Multiple Input Multiple Output) [25].

Μια τυπική περίπτωση ενσωμάτωσης PLC στα οικιακά δίκτυα παρουσιάζεται στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15: PLC στα οικιακά δίκτυα

Τα δύο επικρατέστερα πρότυπα για τα συστήματα PLC είναι το HomePlug AV και το IEEE P1901, τα οποία σήμερα έχουν ενσωματωθεί στο IEEE P1905 CHDN (Converged Digital Home Networking) [26]. Το HomePlug AV [23] ορίστηκε από την HomePlug Powerline Alliance και υποστηρίζει ρυθμούς έως 200Mbps, ενώ το IEEE P1901 παρέχει ταχύτητες μετάδοσης 450Mbps [27]. Στόχος του IEEE P1905 είναι η ανάπτυξη ενός οικιακού δικτύου εσωτερικού χώρου, στο οποίο να συνυπάρχουν διάφορες τεχνολογίες δικτύωσης, όπως το P1901, το IEEE 802.11 και το Ethernet (IEE 802.3) [28].

Η HomePlug Powerline Alliance ιδρύθηκε το 2000, ο στόχος της ήταν να δημιουργήσει



ένα πρότυπο που θα επιτρέπουν στα προϊόντα να χρησιμοποιούν την υφιστάμενη ηλεκτρική καλωδίωση για να επικοινωνούν μεταξύ τους και να συνδεθούν στο Internet. Προς αυτόν τον σκοπό, αξιολόγησε αρκετές τεχνολογίες και προτάσεις και στη συνέχεια ανέπτυξε το HomePlug 1.0 με 14 Mbit/s, το οποίο εγκρίθηκε και δημοσιεύθηκε τον Ιούνιο του 2001. Το 2005 δημοσίευσε το HomePlug AV [23], το οποίο αύξησε τους ρυθμούς δεδομένων από 14 έως 200 Mbits. Το Συμβούλιο ενέκρινε και δημοσίευσε το HomePlug Access BPL το 2007 και το HomePlug Green PHY τον Ιούνιο του 2010. Οι τρεις μεγαλύτερες προδιαγραφές που δημοσιεύει η HomePlug (HomePlug AV, HomePlug Green PHY και AV2 στα 600Mbps) είναι συμβατές με το IEEE 1901 και η HomePlug Powerline Alliance θα είναι ο οργανισμός πιστοποίησης για τα προϊόντα IEEE 1901.

Η UPA (Universal Powerline Association), είναι μια εμπορική ένωση που καλύπτει όλες τις αγορές και όλες τις εφαρμογές επικοινωνίας με γραμμές ρεύματος. Η UPA αποσκοπεί στην προώθηση της ανάπτυξης της τεχνολογίας αυτής με τα πιστοποιημένα προϊόντα που συμμορφώνονται με τα συμφωνηθέντα χαρακτηριστικά.

“G.hn” είναι η κοινή ονομασία για ένα οικιακό δίκτυο που αναπτύσσεται στο πλαίσιο της ITU-T και προωθείται από το HomeGrid forum, καθώς και διάφορους άλλους οργανισμούς. Υποστηρίζει τη δικτύωση μέσω του ηλεκτρικού δικτύου με τηλεφωνικές γραμμές και ομοαξονικά καλώδια με ταχύτητες δεδομένων έως και 1 Gbit/s. Η σύσταση ITU G.9960, η οποία έλαβε έγκριση στις 9 Οκτώβρη 2009, καθορίζει το φυσικό επίπεδο και την αρχιτεκτονική της G.hn. Το επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων (data link layer) (σύσταση G.9961) εγκρίθηκε στις 11 Ιουνίου του 2010. Η εργασία έγινε στον ITU-T Τομέα Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών, όπου πάνω από 20 εταιρείες συμμετείχαν τακτικά, καθώς και μερικές από τις κορυφαίες εταιρείες τεχνολογίας οικιακής δικτύωσης.

Μπορεί τα ηλεκτρικά καλώδια να είναι ένα σύνθετο μέσο μετάδοσης [22], αλλά υπάρχουν δύο χαρακτηριστικά των γραμμών ηλεκτροδότησης που είναι ιδιαίτερα ελκυστικά:

- Δεν υπάρχει ανάγκη υλικού για την μετατροπή RF (radiofrequency, ραδιοσυχνότητα) όπως χρειάζεται στα ασύρματα δίκτυα, είναι δηλαδή βασικής ζώνης (baseband).
- Η πληθώρα πριζών βασικής ζώνης για την χρήση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα σε ένα σπίτι κάνει την χρήση ενός τέτοιου οικιακού δικτύου δυνατή από οποιοδήποτε σημείο του σπιτιού θελήσει ο χρήστης.

Η πρόοδος στην τεχνολογία διαμόρφωσης και στην επεξεργασία ψηφιακού σήματος καθώς και στον έλεγχο των λαθών ελαχιστοποίησε τους περιορισμούς που παρουσίαζαν τα κανάλια και η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης ψηφιακού σήματος μέσω των γραμμών ηλεκτροδότησης είναι πλέον δυνατή με τη χρήση γεφυρών ή προσαρμογέων HomePlug. Έτσι τα πρωτοκόλλα που αναπτύχθηκαν, υποστηρίζουν πλέον επικοινωνία μέσω των καλωδιώσεων του ηλεκτρικού ρεύματος, σε ταχύτητες μετάδοσης συγκρίσιμες με αυτές ενός δικτύου Ethernet ή ασύρματου δικτύου, προδιαγραφών 802.11b.

Η τεχνολογία HomePlug περιλαμβάνει αξιόπιστες και ασφαλείς μεθόδους για να προσαρμόζεται η μετάδοση μέσω των ηλεκτρικών γραμμών, έτσι ώστε σε τυπικά κανάλια μετάδοσης να επιτυγχάνεται υψηλός ρυθμός μετάδοσης ενώ σε δύσκολες περιπτώσεις να αντιστέκεται σε παρεμβολές. Τα δεδομένα μπορεί να είναι απλά, δεδομένα ήχου και βίντεο, ακόμα και των προγραμμάτων τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας και να μεταφέρονται σε όλους τους χώρους του σπιτιού.

Κατά τη μετάδοση δεδομένων, το πρότυπο συνδυάζει τεχνικές όπως ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων (FEC - Forward Error Correction), δημιουργία διάφορων επιπέδων δεδομένων και αυτόματη επανεκπομπή τους (ARQ - Automatic Repeat Request,) όταν απαιτηθεί από τις ισχύουσες συνθήκες.


Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος.

**Πίνακας 7: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα PLC**

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Μηδαμινό κόστος εγκατάστασης. Κύριο χαρακτηριστικό της τεχνολογίας αυτής είναι ότι δεν απαιτεί νέες καλωδιώσεις μιας και χρησιμοποιεί το ήδη υπάρχον δίκτυο ηλεκτρισμού. Επίσης έχει χαμηλές απαιτήσεις σε εξοπλισμό.
2. Δεν εξαρτάται από τρίτους. Αυτό σημαίνει ότι ο διαχειριστής έχει άμεση και αποκλειστική ευθύνη του δικτύου επικοινωνίας PLC, δίνοντας έτσι πλήρη έλεγχο στα ενδιαφερόμενα μέρη.
3. Υψηλή ταχύτητα μετάδοσης. Η τεχνολογία PLC εγγυάται υψηλό ρυθμό δεδομένων (data rate), με μικρούς χρόνους καθυστέρησης. Επιπρόσθετα, είναι ίση η ταχύτητα άνω και κάτω καναλιού (downstream/upstream).
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Εξασθένιση του σήματος. Στο δίκτυο συνδέονται πολλών ειδών φορτία (π.χ. ωμικά) και διαφορετικοί παραγωγοί (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, σύγχρονες γεννήτριες γενικά). Τα φορτία και οι παραγωγοί συνεπάγονται έγχυση αρμονικών στο δίκτυο και έτσι αποτελούν σημαντικές πηγές θορύβου. Ο θόρυβος με τη σειρά του αλλοιώνει τα σήματα PLC με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σφάλματα και άρα αναξιοπιστία στη μεταφορά δεδομένων.
2. Ανακλάσεις σήματος. Συχνά οι γραμμές τερματίζουν απροσδόκητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ανακλάσεων και στάσιμων κυμάτων που μπορεί να εξασθενίσουν ή να ενισχύσουν ανεπιθύμητα το σήμα PLC, σε κάθε περίπτωση όμως το αλλοιώνουν.
3. Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές (EMC). Η γραμμή δέχεται παρεμβολές από ραδιοφωνικές και άλλες συχνότητες στη μπάνα που χρησιμοποιούν τα PLC στις υψηλές συχνότητες. Μερικές περιοχές συχνότητων είναι ήδη κατειλημμένες από άλλες προγενέστερες εφαρμογές. Αυτό συνεπάγεται υψηλό θόρυβο στο σήμα και σφάλματα στη μετάδοση της πληροφορίας.

### 1.1.3 Οικιακές Τεχνολογίες Διασύνδεσης με Ασύρματη Δικτύωση

#### 1.1.3.1 Bluetooth

Το Bluetooth  (“κυανόδους”) [29] είναι ένα βιομηχανικό πρότυπο για ασύρματα προσωπικά δίκτυα υπολογιστών (WPAN - Wireless Personal Area Networks). Αναπτύχθηκε το 1994 από τους Jaap Haartsen και Sven Mattisson, οι οποίοι εργάζονταν για την Ericsson στο Lund της Σουηδίας. Οι προδιαγραφές αυτές επισημοποιήθηκαν με την ομάδα Bluetooth SIG (Bluetooth Special Interest Group). Η SIG ανακοινώθηκε επίσημα στις 20 Μαΐου, 1998. Ιδρύθηκε από την Ericsson, IBM, Intel, Toshiba, η Motorola και η Nokia και σήμερα έχει μια πληθώρα από επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο.

Πρόκειται για μια ασύρματη τηλεπικοινωνιακή τεχνολογία μικρών αποστάσεων, η οποία μπορεί να μεταδώσει σήματα μέσω μικροκυμάτων σε ψηφιακές συσκευές. Επομένως,



το Bluetooth είναι ένα πρωτόκολλο το οποίο παρέχει προτυποποιημένη, ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα σε προσωπικούς ψηφιακούς οδηγούς (PDA - Personal Digital Assistant), κινητά τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, προσωπικούς υπολογιστές, εκτυπωτές, καθώς και ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές ή ψηφιακές κάμερες, μέσω μιας ασφαλούς, φθηνής και παγκοσμίως διαθέσιμης, χωρίς ειδική άδεια, ραδιοσυχνότητας μικρής εμβέλειας. Από τεχνικής άποψης το Bluetooth είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης σε φυσικό επίπεδο, υποεπίπεδο ελέγχου πρόσβασης του μέσου (MAC - Media Access Control) και προαιρετικά, υποεπίπεδο ελέγχου επικοινωνίας δεδομένων (LLC - Logical Link Control). Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται παραδείγματα συνδεσιμότητας Bluetooth με άλλες συσκευές.



Εικόνα 16: Συνδεσιμότητα Bluetooth με άλλες συσκευές

Το Bluetooth λειτουργεί στο ελεύθερο, χωρίς αδειοδότηση φάσμα συχνοτήτων των 2,4 GHz, ώστε οι συσκευές που το ενσωματώνουν να μπορούν να λειτουργήσουν απροβλημάτιστα σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη. Για να περιοριστούν στο ελάχιστο οι παρεμβολές από παρεμφερείς συσκευές, το Bluetooth εκμεταλλεύεται την αμφίδρομη επικοινωνία και τη μέθοδο μετάδοσης με μεταπήδηση συχνότητας (frequency hopping). Από φυσική άποψη επίσης το Bluetooth προδιαγράφει τρία επίπεδα ισχύος της εκπομπής από τα οποία εξαρτάται και η εμβέλεια επικοινωνίας (πάντα μικρότερη των 10 μέτρων σε δίκτυα προσωπικού χώρου (PAN-Personal Area Network), ενώ η τακτική αλλαγή της συχνότητας εκπομπής λόγω της αξιοποίησης της διαμόρφωσης με μεταπήδηση συχνότητας (FHSS - Frequency Hopping Spread Spectrum,) καθορίζεται ψευδοτυχαία από έναν κεντρικό κόμβο.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα διάφορα πρότυπα Bluetooth που έχουν εγκριθεί μέχρι τώρα. Το Bluetooth χαμηλής ενέργειας είναι μια εναλλακτική λύση με το πρότυπο Bluetooth που εισήχθη το Bluetooth v4.0 και απευθύνεται σε εφαρμογές πολύ χαμηλής ισχύος.

**Πίνακας 8: Πρότυπα Bluetooth**


Πρότυπα	Ημερ/νία
Bluetooth v1.0 and v1.0B	1998
Bluetooth v1.1 Ratified ( IEEE Standard 802.15.1)	2002
Bluetooth v1.2 Ratified (στα 1 Mbit/s)( IEEE Standard 802.15.1)	2005
Bluetooth v2.0 + EDR (στα 3,1 Mbit/s )	2007
Bluetooth v3.0 + HS (στα 24,1 Mbit/s )	2009
Bluetooth v4.0. Περιέχει τα πρωτόκολλα Classic Bluetooth, Bluetooth high speed και Bluetooth low energy protocols. Το high speed βασίζεται σε Wi-Fi, ενώ το Classic Bluetooth βασίζεται σε υφιστάμενα Bluetooth protocols.	2010

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας Bluetooth.

**Πίνακας 9: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Bluetooth**

Πλεονεκτήματα
1. Δυνατότητα δημιουργίας πολλών Bluetooth δικτύων στον ίδιο χώρο
2. Αποφυγή παρεμβολών
3. Χαμηλό κόστος
4. Χαμηλή κατανάλωση ρεύματος
Μειονεκτήματα
1. Σχετικά χαμηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων
2. Όχι ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο ασφάλειας
3. Περιορισμένη απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη (από 10cm εως 10m)
4. Περιορισμός 8 συσκευών στο ίδιο δίκτυο

**1.1.3.2 Wifi ή IEEE 802.11**

Το πρότυπο 802.11  [30] είναι μια οικογένεια προτύπων της IEEE για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN - Wireless Local Area Network, WLAN) που είχαν ως σκοπό να επεκτείνουν το ενσύρματο 802.3 (Ethernet). Η Wi-Fi Alliance είναι ένας οργανισμός ανεξάρτητος από τον IEEE και παρέχει την πιστοποίηση για τα προϊόντα που υπακούν τις προδιαγραφές του 802.11.

Ο όρος WiFi (Wireless Fidelity), κατά την ορολογία HiFi (High Fidelity), η οποία αφορά την αναπαραγωγή ήχου, χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τις συσκευές που βασίζονται στην προδιαγραφή IEEE 802.11 b/g/n και εκπέμπουν σε συχνότητες 2,4GHz. Ωστόσο το WiFi (ασύρματη πιστότητα) έχει επικρατήσει και ως

όρος αναφερόμενος συνολικά στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Συνήθεις εφαρμογές του είναι η παροχή ασύρματων δυνατοτήτων πρόσβασης στο Internet, τηλεφωνίας μέσω Διαδικτύου (VoIP – Voice over IP) και διασύνδεσης μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών όπως τηλεοράσεις, ψηφιακές κάμερες, DVD Player και ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές το 802.11 βρίσκει εφαρμογές ασύρματης μετάδοσης, όπως π.χ. στη μεταφορά φωτογραφιών από ψηφιακές κάμερες σε υπολογιστές για περαιτέρω επεξεργασία και εκτύπωση, αν και σε αυτόν τον τομέα έχει υποσκελιστεί από το πρωτόκολλο Bluetooth για τα πολύ μικρότερης εμβέλειας ασύρματα προσωπικά δίκτυα.

Τα πρωτόκολλα IEEE 802.11 που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί:

**Πίνακας 10: Πρωτόκολλα IEEE 802.11**

Έκδοση	Ημ/νία	Ζώνη συχνοτήτων	Επιτρεπόμενες MIMO ροές δεδομένων	Ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης	Μέθοδοι μετάδοσης	Εμβέλεια εσωτερικών χώρων
802.11	1997	2.4 GHz	1	2 Mbit/s	IR / FHSS / DSSS <sup>3</sup>	~20 m
802.11b	1999	2.4 GHz	1	11 Mbit/s	DSSS	~38 m
802.11a	1999	5 GHz	1	54 Mbit/s	OFDM <sup>4</sup>	~35 m
802.11g	2003	2.4 GHz	1	54 Mbit/s	OFDM /DSSS	~38 m
802.11n	2009	2.4and/or5 GHz	4	135 Mbit/s	OFDM	~70 m
802.11ad	2012	60 GHz	1	6,75Gb/s	Single Carrier, OFDM, Low-Power Single Carrier	

Το 802.11n είναι μια επαναστατική τεχνολογία που δίνει τη δυνατότητα στα Wi-Fi δίκτυα να κάνουν περισσότερα, πιο γρήγορα, σε μια ευρύτερη περιοχή. Είναι ένα πρότυπο ασύρματης δικτύωσης που χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές για να αυξήσει τον ρυθμό των δεδομένων. Πρόκειται για μια τροποποίηση του προτύπου ασύρματης δικτύωσης IEEE 802.11-2007. Σκοπός του είναι η βελτίωση της απόδοσης του δικτύου πάνω από τα δύο προηγούμενα πρότυπα 802.11a και 802.11g, με σημαντική αύξηση του μέγιστου ρυθμού των δεδομένων από 54 Mbit/s σε 600 Mbit/s σε πλάτος καναλιού 40 MHz. Μπορεί να λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων είτε των 5 GHz, είτε των 2,4 GHz, αν είναι

<sup>3</sup> Direct-sequence spread spectrum, Διαμόρφωση με διασπορά φάσματος άμεσης ακολουθίας

<sup>4</sup> Orthogonal frequency-division multiplexing , Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας

γνωστό ότι δεν θα παρεμβάλλεται με οποιοδήποτε άλλο 802.11 ή μη (όπως το Bluetooth) σύστημα που χρησιμοποιεί τις ίδιες συχνότητες.

Το IEEE 802.11ad είναι ένα δημοσιευμένο πρότυπο που έχει ήδη μια σημαντική ώθηση από τους κατασκευαστές hardware. Τον Ιούλιο του 2012 οι Marvell και Wilocity ανακοίνωσαν μια νέα εταιρική σχέση, για να φέρουν μια νέα tri-band λύση Wi-Fi στην αγορά.

**Πίνακας 11: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα IEEE 802.11**

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Χαμηλό κόστος χρήσης.
2. Ευκολία εγκατάστασης.
3. Σχετικά αξιόπιστη σύνδεση.
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Αποτυχία σύνδεσης όταν συμβεί κάποιο πρόβλημα στη λειτουργία του router ή όταν πολλοί χρήστες δοκιμάσουν ταυτόχρονα να κατεβάσουν βαριές εφαρμογές από το δίκτυο.
2. Επικείμενες παραμβολές ενδέχεται να προκαλέσουν πτώση της σύνδεσης.
3. Η ασφάλεια. Μη σωστά εγκατεστημένα δίκτυα ή δίκτυα με χαμηλή ασφάλεια μπορούν να παραβιαστούν από άτομα ειδικευμένα στις παραβιάσεις (hackers).

Μέχρι σήμερα, η Wi-Fi Alliance έχει πιστοποιήσει εκατομμύρια Wi-Fi-ενεργοποιημένους φορητούς υπολογιστές, εκτυπωτές, δρομολογητές, φωτογραφικές μηχανές, κινητά τηλέφωνα και πολλά άλλα. Μια τυπική περίπτωση δικτύωσης συσκευών ασύρματα μέσω ενός Wifi δρομολογητή παρουσιάζεται στην Εικόνα 17.



**Εικόνα 17: Δικτύωση συσκευών ασύρματα μέσω Wifi δρομολογητή**

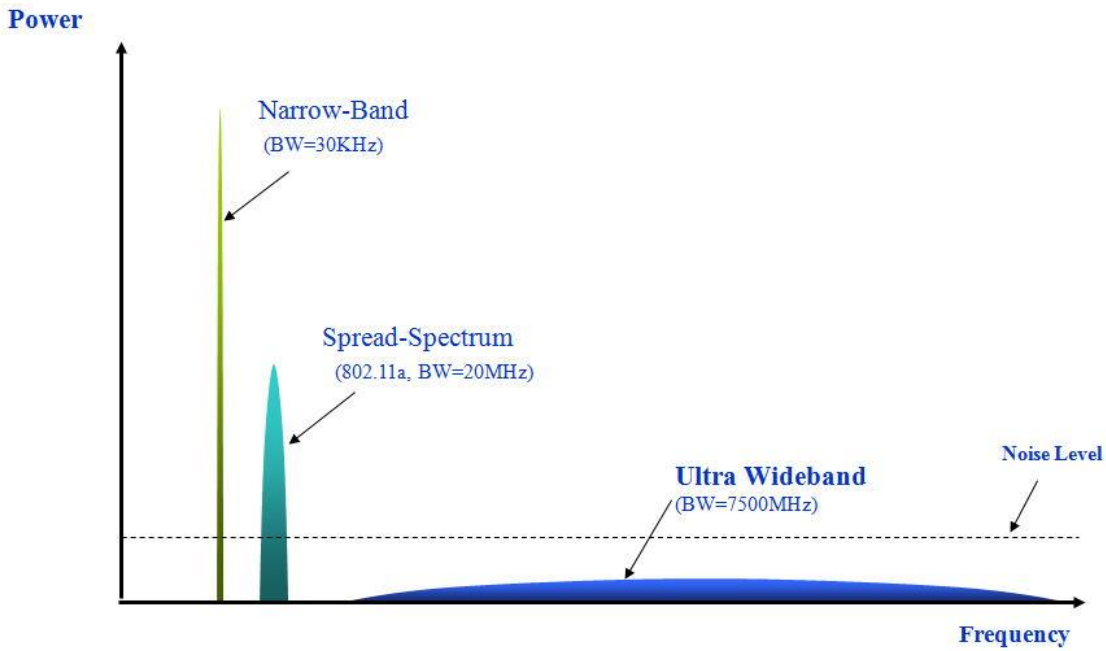
### 1.1.3.3 Ultra Wide Band

Το Ultra-wideband είναι μια τεχνολογία για τη μετάδοση πληροφοριών σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης μετάδοσης (>500MHz) που θα πρέπει υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις να έχει τη δυνατότητα διαμοιρασμού του φάσματος από κοινού με άλλους χρήστες [31]. Η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης φέρνει την ευκολία και την ευκινησία των ασύρματων επικοινωνιών στις συνδέσεις συσκευών υψηλής ταχύτητας. Τα ραδιοκύματα υπερευρείας ζώνης προβλέπεται να διαδραματίσουν έναν επαναστατικό ρόλο στο μέλλον των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Το μεγάλο ενδιαφέρον για τις UWB επικοινωνίες πυροδοτήθηκε από τους κυβερνώντες της Ομοσπονδιακής Επιτροπής Επικοινωνιών (FCC - Federal Communications Commission), το Φεβρουάριο του 2002, όταν ενέκριναν την ελεύθερη εμπορική εκμετάλλευση της UWB τεχνολογίας υπό έναν αυστηρό έλεγχο της ισχύος σε φάσμα 7500 MHz, που καταλαμβάνει τη ζώνη συχνοτήτων από 3,1GHz ως 10,6GHz [32].

Σχεδιασμένα για χαμηλής ισχύος και μικρής εμβέλειας ασύρματα δίκτυα WPANs, η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης είναι η κύρια τεχνολογία για την απελευθέρωση των ηλεκτρονικών συσκευών από τα καλώδια, επιτρέποντας παράλληλα την ασύρματη σύνδεση πολλών συσκευών για μετάδοση βίντεο, ήχου και άλλων δεδομένων υψηλού εύρους ζώνης.

Η μικρής εμβέλειας τεχνολογία UWB συμπληρώνει άλλες τεχνολογίες μεγαλύτερης εμβέλειας, όπως WiFi, Wimax, και των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών ευρείας ζώνης. Ο συνδυασμός ευρύτερου φάσματος και χαμηλότερης ισχύος βελτιώνει την ταχύτητα και μειώνει τις παρεμβολές με άλλα ασύρματα φάσματα. Χρησιμοποιείται για την αναμετάδοση δεδομένων από μια συσκευή υποδοχής σε άλλες συσκευές σε κοντινή περιοχή ως 10 μέτρων. Οι ασύρματες μεταδόσεις υπερευρείας ζώνης μπορούν και πρέπει να λειτουργήσουν στην περιοχή συχνοτήτων από 3,1GHz ως και 10,6GHz, με την περιορισμένη ισχύ εκπομπής των -41dBm/MHz. Η FCC και η ITU-R ορίζουν ως UWB τη μετάδοση από μια κεραία σήματος με εύρος ζώνης μεγαλύτερο από 500 MHz ή 20% της κεντρικής συχνότητας [33].

Τα περισσότερα συστήματα στενής ζώνης καταλαμβάνουν λιγότερο εύρος ζώνης μικρότερο από το 10% της κεντρικής συχνότητας λειτουργίας και εκπέμπουν σε πολύ υψηλότερα επίπεδα ενέργειας. Τα συστήματα υπερευρείας ζώνης διαφέρουν σημαντικά από τα συμβατικά συστήματα στενής ζώνης συχνοτήτων (RF) και τις τεχνολογίες εξαπλωμένου φάσματος (Spread Spectrum), όπως το Bluetooth και το 802.11a/b/g. Ο πομπός υπερευρείας ζώνης λειτουργεί στέλνοντας δισεκατομμύρια παλμών σε ένα πολύ ευρύ φάσμα συχνοτήτων αρκετών GHz. Ο αντίστοιχος δέκτης μεταφράζει τους παλμούς σε δεδομένα χρησιμοποιώντας μια γνωστή παλμοσειρά που εκπέμπεται από τον πομπό. Τα συστήματα υπερευρείας ζώνης εκπέμπουν παλμούς πολύ μικρής διάρκειας συμπιεσμένους στο χρόνο, αντί για ημιτονοειδείς κυματομορφές συμπιεσμένες στη συχνότητα. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα της ισχύος εκπομπής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τα διάφορα είδη τεχνολογιών στενού εύρους ζώνης (NB - narrowband), μεγάλου εύρους ζώνης (WB - wideband) και UWB [34]. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα είναι εμφανής η διαφορά ανάμεσα σε ένα σήμα στενής ζώνης και ένα υπερευρείας ζώνης. Το εύρος ζώνης του σήματος UWB είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του σήματος στενής ζώνης, με αποτέλεσμα το σήμα UWB να μπορεί να λειτουργήσει σε ευρύτερες συχνότητες.



**Εικόνα 18: Ισχύς εκπομπής για τα NB, WB και UWB**

Επιπρόσθετα, ο Πίνακας 12, που ακολουθεί, παρουσιάζει ειδικότερα χαρακτηριστικά για την εκάστοτε τεχνολογία, δεδομένης της κατηγορίας στην οποία εντάσσεται. Τόσο από το διάγραμμα όσο και από τον πίνακα, είναι εμφανές ότι το UWB καταλαμβάνει το μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες με αντίστοιχη χαμηλότερη ισχύ εκπομπής.

**Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά UWB, NB, WB**

Σύστημα	Ισχύς Μετάδοσης[W]	Εύρος Ζώνης [Hz]	Φασματική Πυκνότητα Ισχύος [W/Hz]	Κατηγοριοποίηση
Radio (Ραδιόφωνο)	50 KW	75 kHz	666600	Narrowband
TV	100 KW	6 MHz	161700	Narrowband
GSM-900	320 W	200 kHz	1600	Narrowband
GSM-1800	20 W	200 kHz	100	Narrowband
WCDMA	20 W	5 MHz	4	Wideband
WLAN	1 W	20 MHz	0,05	Wideband
UWB	1 mW	7,5 GHz	0,013	Ultrawideband



**Εικόνα 19:UWB στο ψηφιακό σπίτι**

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνολογία UWB δίνει τη δυνατότητα εύκολης συνδεσιμότητας τόσο μεταξύ των συσκευών όσο και ανάμεσα σε ομάδες συσκευών (clusters) όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα 19.

Στη συνέχεια, ο Πίνακας 13 παρουσιάζει τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της τεχνολογίας UWB.

**Πίνακας 13: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα UWB**

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Δυνατότητα από κοινού χρήσης του φάσματος συχνοτήτων.
2. Μεγάλη χωρητικότητα καναλιού
3. Μικρή πιθανότητα παρεμπόδισης και ανίχνευσης.
4. Αντίσταση σε παρεμβολές.
5. Πολύ καλή λειτουργία σε κανάλια πολλαπλών οδεύσεων (multipath).
6. Άριστες ιδιότητες διεισδυτικότητας.
7. Απλή αρχιτεκτονική του πομποδέκτη.
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Παραμόρφωση του σχήματος των παλμών
2. Ανάγκη για εκτίμηση καναλιού (Channel Estimation)
3. Ανάγκη για συγχρονισμό σε υψηλή συχνότητα

4. Παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (Multiple-Access Interference)
-----------------------------------------------------------------

5. Χαμηλή ενεργός ισχύς εκπομπής
----------------------------------

Σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν παραπάνω, είναι γεγονός ότι η τεχνολογία υπερευρείας ζώνης προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη λύση στο πρόβλημα του ανεπαρκούς ραδιοφάσματος επιτρέποντας σε νέες υπηρεσίες να συμβιώνουν με τα ήδη υπάρχοντα ραδιοσυστήματα με ελάχιστη ή καθόλου μεταξύ τους παρεμβολή. Αυτή η συνύπαρξη έχει το πλεονέκτημα να αποφεύγονται τα ακριβά αντίτιμα που πρέπει να καταβάλλουν οι πάροχοι των άλλων υπηρεσιών, για να εξασφαλίσουν την άδεια εκπομπής στο ραδιοφάσμα.

#### 1.1.3.4 Radio 60GHz

Στο πλαίσιο της μεγαλύτερης ευελιξίας στην κατανομή του φάσματος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μία από τις ευκαιρίες που προσέφερε η FCC είναι και η εκμετάλλευση του μη αδειοδοτημένου φάσματος των 7GHz σε συχνότητες περίπου 60 GHz (57-64 GHz) [35]. Το γεγονός αυτό εισάγει νέες ευκαιρίες για την ασύρματη συνδεσιμότητα και ενεργοποιεί υψηλούς ρυθμούς δεδομένων σε εφαρμογές, όπως η πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Ωστόσο, η υπερβολικά υψηλή απώλεια ισχύος στα 60 GHz, που παρατηρείται λόγω της απορρόφησης οξυγόνου, εμποδίζει τις επικοινωνίες σε αποστάσεις μεγαλύτερες από μερικά χιλιόμετρα. Το γεγονός αυτό βέβαια, μπορεί να παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια στα μικρής εμβέλειας δίκτυα WPANs. Επιπλέον, λόγω της απορρόφησης οξυγόνου, οι κανονισμοί της FCC επιτρέπουν ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ (EIRP - Equivalent Isotropically Radiated Power), μέχρι 40 dBm, σημαντικά υψηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές των WLAN/WPAN προτύπων. Παράλληλα, το διευρυμένο εύρος ζώνης και η υψηλή επιτρεπτή ισχύ εκπομπής στα 60 GHz επιτρέπει ασύρματη μετάδοση πολλαπλών Gigabit ανά δευτερόλεπτο για εσωτερικές αποστάσεις ~10m.

Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά 60GHz σε σχέση με UWB, 802.11n

	Εύρος Ζώνης	Ενεργός Ισχύς Εκπομπής	Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης
UWB	520 MHz	0,4mW	80 Mbps
802.11n	40 MHz	60mW	1100 Mbps
60GHz	2.500 MHz	8.000mW	25000 Mbps

Σύμφωνα με τον νόμο του Shannon [36], που δίνεται από την εξίσωση (1.1), ο μέγιστος δυνατός ρυθμός δεδομένων  $C$  αυξάνεται με την αύξηση του εύρους ζώνης του καναλιού  $B$  και της ενεργούς ισχύος εκπομπής.

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.1)$$

Όπου  $S/N$  ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Όπως φαίνεται λοιπόν στον παραπάνω πίνακα η τεχνολογία 60 GHz είναι σε θέση να επιτύχει 80 φορές το μέγιστο δυνατό ρυθμό δεδομένων του 802.11n και 200 φορές μεγαλύτερο από το UWB. Ένα άλλο πλεονέκτημα που προκύπτει από την ιδιότητα αυτή είναι το γεγονός ότι τα 60 GHz ραδιοκύματα απαιτούν λιγότερο περίπλοκη διαμόρφωση για τα συστήματα με



σχεδιασμό χαμηλού κόστους. Για παράδειγμα, στα 60 GHz η απαιτούμενη φασματική απόδοση για την επίτευξη 1 Gigabit ανά δευτερόλεπτο είναι μόνο 0,4 bits/Hz, ενώ το 802.11n θα κληθεί να υποστηρίξει 25 bits/Hz. Παράλληλα με την αύξηση της απαιτούμενης φασματικής απόδοσης αυξάνονται και η δυσκολία καθώς και το κόστος σχεδιασμού του αντίστοιχου συστήματος. Επίσης, παρατηρείται εξαιρετικά μεγάλη ενεργός ισχύς εκπομπής στα 60 GHz σε σχέση με τα UWB και το IEEE802.11n. Αυτό εξηγείται λόγω της απορρόφησης οξυγόνου που συμβαίνει σε αυτές τις συχνότητες. Για αυτό το λόγο, σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο επιτρέπεται ενεργός ιστροπική ισχύς εκπομπής δεκάδων και εκατοντάδων Watts για ασύρματες επικοινωνίες σε αυτή τη ζώνη. Το εκτεταμένο εύρος ζώνης και η υψηλή ενεργός ισχύς εκπομπής επιτρέπουν ασύρματες επικοινωνίες πολλών Gigabit.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα σενάριο χρήσης και διαμοιρασμού περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας σε τερματικές συσκευές, όπως η συσκευή αποθήκευσης, η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, οι υπολογιστές καθώς και οι συσκευές ηχείων και ακουστικών. Εξαιτίας των 60 GHz, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να μεταφέρει στη συσκευή αποθήκευσης, για παράδειγμα, το περιεχόμενο υψηλής ευκρίνειας από ένα ποδοσφαιρικό αγώνα που κατέβασε στη συσκευή ακουστικών αμέσως μετά τη λήξη του αγώνα, μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα. Ενώ το περιεχόμενο εμφανίζεται στην HDTV μέσω της σύνδεσης 60 GHz, ο ήχος διανέμεται στα ακουστικά μέσω 60 GHz ή χαμηλότερης ραδιοσυχνότητας. Την ίδια χρονική στιγμή, ένας άλλος χρήστης μπορεί να κατεβάσει αυτό το περιεχόμενο στον υπολογιστή του μόνο σε λίγα δευτερόλεπτα[37].



**Εικόνα 20:** Ένα σενάριο διαμοιρασμού περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας με συνδέσεις 60GHz

Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ασύρματων επικοινωνιών με φέρον στα 60 GHz.

**Πίνακας 15:** Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα 60 GHz radio.

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Η μεγάλη και παγκόσμια διαθεσιμότητα του εύρους ζώνης.
2. Οι υψηλές τιμές της EIRP.

3. Εξαιρετικά ασφαλής λειτουργία, που προκύπτει από τις μικρές αποστάσεις μετάδοσης, λόγω απορρόφησης οξυγόνου, και το στενό εύρος δέσμης της κεραίας.
4. Επιτρέπεται η κατασκευή συστοιχιών κεραιών σε πολύ μικρή επιφάνεια.
5. Ανεκτικότητα σε παρεμβολές, που προκύπτει από τις μικρές αποστάσεις μετάδοσης, λόγω της απορρόφησης οξυγόνου, το στενό εύρος δέσμης της κεραίας και την περιορισμένη χρήση του φάσματος 60 GHz.
6. Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας.
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Η υψηλή πιθανότητα απώλεια διαδρομής περιορίζει τη ζεύξη, ακόμα κι όταν η μέγιστη επιτρεπόμενη EIRP είναι υψηλή.
2. Οι μη ιδανικότητες του RF front-end έχουν πολύ μεγαλύτερη επίδραση στις χαμηλότερες συχνότητες.
3. Τα κυκλώματα είναι πιο δύσκολο να σχεδιαστούν και χρησιμοποιηθούν, σε σύγκριση με τις ζώνες χαμηλής συχνότητας.

### 1.1.3.5 HiperLAN

Το πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης HiperLAN, είναι μια εναλλακτική Ευρωπαϊκή πρόταση του 802.11 [38]. Δημιουργήθηκε από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών (ETSI - European Telecommunications Standards Institut) σε δύο εκδόσεις, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 16: Εκδόσεις πρωτοκόλλου HiperLAN**

Έκδοση	Ημερ/νία	Ρυθμός Μετάδοσης	Συχνότητα
HiperLAN1	1996	υποστηρίζει ταχύτητες μέχρι 24Mbps	5GHz
HiperLAN2	2000	υποστηρίζει ταχύτητες μέχρι 54 Mbps	5GHz

Η συχνότητα των 5GHz στην Αμερική και στην Ιαπωνία είναι ελεύθερη, ενώ στην Ευρώπη έχει επισήμως παραχωρηθεί για χρήση από τα ασύρματα δίκτυα. Έτσι οι συσκευές HiperLAN μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου χωρίς τροποποιήσεις και επιπλέον δεν δημιουργούνται προβλήματα με τα δίκτυα που τρέχουν στα 2,4GHz ή με ηλεκτρικές συσκευές όπως ο φούρνος μικροκυμάτων.

Βασικά χαρακτηριστικά του HiperLAN είναι:

- εύρος 50 m.
- υποστηρίζει και σύγχρονη και ασύγχρονη κυκλοφορία.

**Πίνακας 17: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα HiperLAN**

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Υψηλές επιδόσεις
2. Μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης( το HiperLAN2 54 Mbps)
3. Παροχή ποιότητας υπηρεσίας (QoS)
4. Αυτόματη κατανομή συχνοτήτων
5. Ad hoc roaming (περιαγωγή χωρίς την απαίτησης προϋπάρχουσα υποδομής)
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Χρησιμοποιείται σχεδόν μόνο στην Ευρώπη
2. Δεν παρέχει πραγματικές υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο
3. Σχετικά ακριβό για λειτουργία και συντήρηση
4. Είναι δύσκολο να ανταγωνιστεί τα ήδη καθιερωμένα πρότυπα

Εξαιτίας του ανταγωνισμού από το IEEE 802.11, το οποίο ήταν απλούστερο στην εφαρμογή, το HIPERLAN δεν προχώρησε αρκετά στην αγορά. Ωστόσο, μεγάλο μέρος του έργου για το HIPERLAN2 έχει ενσωματωθεί στην προδιαγραφή του φυσικού επιπέδου PHY του πρότυπου IEEE 802.11a.

### 1.1.3.6 HomeRF

Η τεχνολογία HomeRF αναπτύχθηκε εξ αρχής για να προσφέρει στον τελικό χρήστη ασύρματη δικτύωση χρησιμοποιώντας συσκευές ραδιοσυχνοτήτων [39]. Ένα τυπικό δίκτυο HomeRF για υπηρεσίες ευρυζωνικού Διαδικτύου στο σπίτι αποτελείται από διαφορετικούς τύπους συσκευών, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Το HomeRF χρησιμοποιεί FHSS στη ζώνη συχνοτήτων 2,4 GHz και θα μπορούσε να επιτύχει μέχρι 10 Mbit/s. Παράλληλα, επιτρέπει εμβέλεια σε ακτίνα 50 μέτρων από ένα σημείο πρόσβασης, ενώ εξακολουθούν να παραμένουν συνδεδεμένες οι συσκευές με το προσωπικό δίκτυο (PAN - Personal Area Network).



### Εικόνα 21: HomeRF τύποι δικτυακών συσκευών

Το HomeRF αναπτύχθηκε το 1998 από την αντίστοιχη ομάδα εργασίας που περιλάμβανε τις εταιρίες Siemens, Motorola, Philips και άλλες 100 ακόμη εταιρείες. Στόχος τους ήταν να δημιουργήσουν ένα εύκολο στη χρήση και φτηνό πρότυπο για οικιακή δικτύωση.

Η πρώτη έκδοση του πρωτοκόλλου για την ασύρματη δικτύωση φωνής και δεδομένων στο σπίτι (SWAP 1.0 - Shared Wireless Application Protocol), το οποίο αργότερα μετονομάστηκε σε HomeRF μετέδιδε δεδομένα με ταχύτητα 1Mbps στην συχνότητα των 2,4GHz.

Η δεύτερη έκδοση (2002) παρουσιάστηκε το HomeRF2.0 που υποστηρίζει ασύρματη μετάδοση δεδομένων και φωνής. Κράτησε την ίδια συχνότητα αλλά αύξησε την ταχύτητα στα 10 Mbps και χρησιμοποίησε τεχνολογία FSSS. Η εμβέλεια του μπορεί να φτάσει τα 50 μέτρα ενώ υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης μέχρι και 127 διαφορετικών οικιακών συσκευών στο δίκτυο.

Η ομάδα διαλύθηκε τον Ιανουάριο του 2003 με αποτέλεσμα αν και έχει ακόμη εφαρμογές, να μην αναπτύσσεται άλλο.

#### 1.1.4 Οπτικές Τεχνολογίες

##### 1.1.4.1 Οπτική Ίνα στο Σπίτι

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, στο 1.1, η αρχιτεκτονική FTTH αποτελεί σημαντική πρόκληση προσφέροντας ρυθμούς της τάξης των Gigabit στο δίκτυο πρόσβασης. Ωστόσο, διερευνώντας την προοπτική διαμοιρασμού αυτών των ταχυτήτων στο εσωτερικό των οικιακών ή εργασιακών χώρων, οι οπτικές ίνες φαίνεται να αποτελούν μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική τεχνολογία και για την οικιακή δικτύωση [40].

Οι οπτικές ίνες, είτε συμβατικές είτε πλαστικές είναι δυνατό να προσφέρουν στον μελλοντικό χρήστη ένα εύρωστο ευρυζωνικό δίκτυο που θα ικανοποιεί ποικίλες ανάγκες και υπηρεσίες πολυμέσων παρέχοντας υψηλές ταχύτητες. Τέτοιες υπηρεσίες περιλαμβάνουν αλληλεπιδραστικές υπηρεσίες βίντεο, Διαδίκτυο υψηλής ταχύτητας, δορυφορική τηλεόραση κ.α. Οι υπηρεσίες βίντεο εξασφαλίζονται μέσα στο σύστημα οπτικής δικτύωσης από τη σύνδεση με την καλωδιακή τηλεόραση ή με μια δορυφορική σύνδεση. Στο σπίτι, το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό χρησιμοποιώντας έναν οπτικοηλεκτρονικό μετατροπέα (OEC - optical electrical converter). Ο μετατροπέας κατόπιν διαχωρίζει το σήμα σε υπηρεσίες που χρειάζεται ο χρήστης.

Τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι οπτικές ίνες είναι τα εξής:

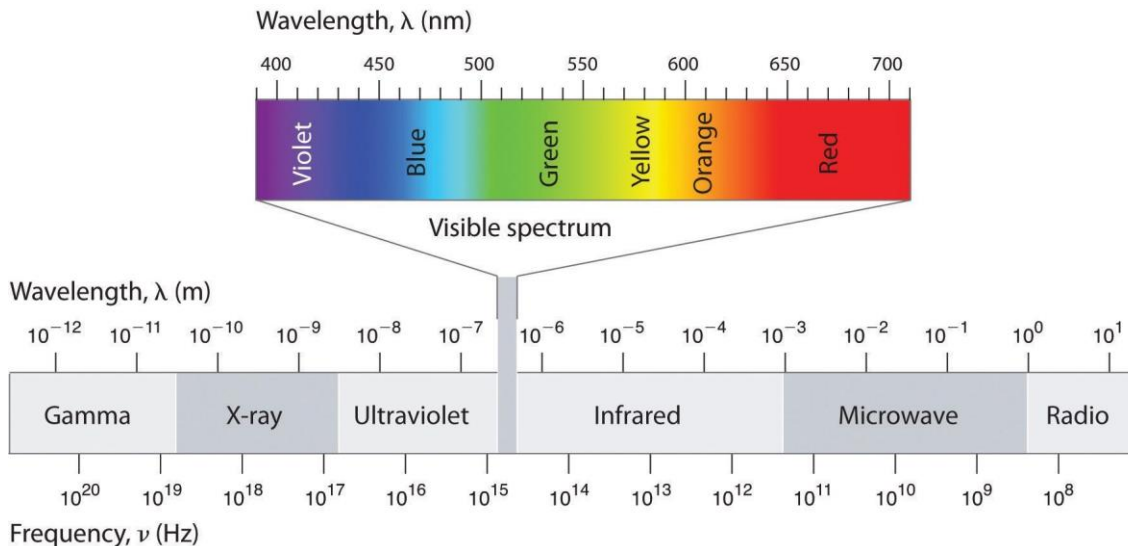
**Πίνακας 18: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Οπτικών Ινών.**

Πλεονεκτήματα
1. Ανεπηρέαστες από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
2. Οι προσφερόμενες υπηρεσίες περιλαμβάνουν μετάδοση φωνής, μεταφορά δεδομένων με υψηλές ταχύτητες, αναλογική ή ψηφιακή τηλεόραση.

3. Η κατανάλωση ρεύματος είναι χαμηλή
4. Αξιοπιστία και ασφάλεια.
5. Υψηλό εύρος ζώνης.
6. Καλύπτους μεγάλες αποστάσεις.
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Δυσκολίες αλλαγής και προσθήκης οπτικής ίνας.
2. Η εγκατάσταση των πλαστικών οπτικών ινών απαιτεί καλά εκπαιδευμένους επαγγελματίες..
3. Ειδικός και ακριβός εξοπλισμός εγκατάστασης.

#### 1.1.4.2 Οπτικά Ασύρματα Συστήματα

Η οπτική ασύρματη τεχνολογία (OW - Optical Wireless) παρέχει ποικίλες δυνατότητες μετάδοσης, επιτρέποντας στα οπτικά σήματα να διαδίδονται απευθείας στον ελεύθερο χώρο και έτσι να αποφευχθούν οι περιορισμοί που προκύπτουν από τη χρήση καλωδίων [41]. Τα ασύρματα οπτικά συστήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας της οπτικής πηγής που χρησιμοποιούν: στα υπέρυθρα [42] και στα συστήματα ορατού φωτός [43]. Η τελευταία προαναφερθείσα τεχνολογία, γνωστή και ως επικοινωνίες ορατού φωτός (VLC) βασίζεται στις διόδους εκπομπής λευκού φωτός (LEDs - light emitting diodes,), οι οποίες χρησιμοποιούνται για να παρέχουν φωτισμό και επικοινωνία ταυτόχρονα. Οι οπτικές πηγές των συστημάτων IR εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία, ενώ των VLC ορατή, δηλαδή ακτινοβολία αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Τέτοιου είδους συστήματα ήδη εφαρμόζονται ευρέως σε εξωτερικές ζεύξεις σημείου σε σημείο στα δίκτυα πρόσβασης [44]. Ωστόσο, εκτός από τις επικοινωνίες στον εξωτερικό χώρο, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον στις εφαρμογές εσωτερικού χώρου τόσο στο υπέρυθρο όσο και στο ορατό μέρος του φάσματος. Η ορατή (375-780nm) και η υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (780nm-300μm) παρουσιάζονται στην Εικόνα 22 που ακολουθεί.



**Εικόνα 22: Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**

Ανάμεσα στα πλεονεκτήματα των ασύρματων οπτικών τεχνολογιών περιλαμβάνεται το σχεδόν απεριόριστο διαθέσιμο εύρος ζώνης σε συνδυασμό με την ασφάλεια που παρέχει (εφόσον το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε αυτές τις συχνότητες δεν μπορεί να διαπεράσει μέσα από τους τοίχους), καθώς και η περιορισμένη παρέμβαση στις οικιακές συσκευές και τα συμβατικά συστήματα ραδιοεπικοινωνίας. Επιπλέον, υπό την προϋπόθεση ότι πληρούνται ορισμένοι κανονισμοί ασφαλείας οφθαλμών, σχετικά με την ισχύ εκπομπής, για τους οπτικούς πομποδέκτες, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε αυτά τα μήκη κύματος είναι ασφαλής, δεδομένου ότι η ανθρωπότητα έχει εκτεθεί σε αυτήν για αιώνες, λόγω του ήλιου. Πομποδέκτες πολλών Gigabits έχουν ήδη αναπτυχθεί και διατίθενται στο εμπόριο για τα συστήματα οπτικών ινών. Ωστόσο, δεδομένου ότι το θέμα του κόστους είναι υψίστης σημασίας για τις προσδοκίες του πελάτη, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός με χαμηλό κόστος.

### A. IrDA

Η ίδρυση της IrDA, το 1993, είχε ως σκοπό τον σχεδιασμό ενός προτύπου διαλειτουργικότητας και επικοινωνίας μεταξύ δύο ασύρματων σταθμών με υπέρυθρη ακτίνα [45]. Σήμερα υπάρχει η δυνατότητα μετάδοσης και δεδομένων σε μία σχετικά μικρή απόσταση με περιορισμένες όμως δυνατότητες. Επειδή αυτή η τεχνολογία είναι φθηνή, έχει εφαρμοστεί σε όλα τα είδη των προσωπικών συσκευών, όπως τα ρολόγια, PDAs, τηλέφωνα, φορητούς υπολογιστές, ακόμα και ασύρματα ποντίκια και πληκτρολόγια. Ωστόσο, έχει εκτοπιστεί από τις ασύρματες τεχνολογίες όπως WiFi και Bluetooth, μιας και δεν χρειάζονται άμεση οπτική επαφή.

Σήμερα χρησιμοποιούνται μήκη κύματος στην περιοχή των 900nm, ενώ εξελίσσονται προϊόντα με μήκη κύματος 1550nm. Ενσωματώνονται σε φορητές κυρίως συσκευές με σκοπό να προσφέρουν δυνατότητες δικτύωσης μικρής εμβέλειας και ταχύτητας μετάδοσης. Επιπλέον, έχουν εφαρμογή για αξιόπιστη σύνδεση περιορισμένου αριθμού κόμβων (2 έως 4) και σε καμία περίπτωση δεν αποτελούν σοβαρή λύση στην δημιουργία ενός ολοκληρωμένου και πλήρως δικτυωμένου σπιτιού.

Υπάρχουν τέσσερις τύποι υπέρυθρης επικοινωνίας σύμφωνα με το πρότυπο IrDA:

- Serial Infrared (SIR)
- Medium Infrared (MIR)
- Fast Infrared (FIR)

- Very Fast Infrared (VFIR)

Το SIR είναι το πρώτο πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε και έχει ρυθμό μετάδοσης 115Kbps, το MIR 1,1 Mbps, ενώ τα άλλα δύο βελτιώνουν κατά πολύ την ταχύτητα με την οποία μεταδίδονται τα δεδομένα (4Mbps το FIR και 16Mbps το VFIR). Το γνωστότερο όλων είναι το FIR, που ενσωματώνεται και ως πρότυπο στα λειτουργικά συστήματα της Microsoft από τα Windows 98 κι έπειτα. Το Μάρτιο του 2009 εκδόθηκε το Giga-IR, το οποίο υιοθετώντας την τεχνική μεταγωγής κλειδώματος πλάτους (ASK – Amplitude Shift Keying), υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης 512Mb/s και 1Gb/s. Τα συστήματα αυτά προορίζονται για εφαρμογές, όπου απαιτείται πολύ υψηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων, όπως η πρόσβαση σε υπηρεσίες HDTV, 3D Gaming κ.α.

Ο οργανισμός IrDA καθορίζει τρία πρότυπα:

- IrDA-Data
- IrDA-Control
- Air

Στα παραπάνω πρότυπα περιλαμβάνονται τα πρωτόκολλα προδιαγραφής φυσικού επιπέδου για μετάδοση με υπέρυθρη ακτινοβολία (IrPHY - Infrared Physical Layer Specification), πρόσβασης για μετάδοση με υπέρυθρη ακτινοβολία (IrLAP - Infrared Link Access Protocol), τοπικού δικτύου που χρησιμοποιεί υπέρυθρη ακτινοβολία (IrLAN - Infrared Local Area Network), διαχείρισης της σύνδεσης για μετάδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IrLMP - Infrared Link Management Protocol), μετάδοσης με υπέρυθρη ακτινοβολία (IrCOMM - Infrared Communications Protocol), μεταφοράς (Tiny TP - Tiny Transport Protocol), επικοινωνίας με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας για την ανταλλαγή δυαδικών αντικειμένων μεταξύ των συσκευών (IrOBEX - Infrared Object Exchange), μετάδοσης υψηλής ταχύτητας με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IrSimple - Infrared Simple) και γρήγορης μετάδοσης ψηφιακών εικόνων σε τηλεοράσεις και εκτυπωτές με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας (IrSimpleShot - Infrared SimpleShot), καθένα από τα οποία έχει τα δικά του χαρακτηριστικά.

Το IrSimple είναι το πρωτόκολλο το οποίο έχει επιτύχει πολύ υψηλές ταχύτητες στα συστήματα IrDA, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, για παράδειγμα, στην ασύρματη μετάδοση εικόνας σε μια τηλεόραση από ένα κινητό τηλέφωνο ή μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, καθώς και σε ασύρματη μετάδοση δεδομένων μεταξύ κινητών τηλεφώνων σε υψηλή ταχύτητα. Το IrSimple αναδεικνύεται ως ένα δημοφιλές πρωτόκολλο ασύρματης εκτύπωσης για τον εκτυπωτή, κινητό τηλέφωνο, φωτογραφική μηχανή.

Το τελευταίο πρωτόκολλο IrSimpleShot έχει ως στόχο να επιτρέψει στα εκατομμύρια των IrDA τηλεφώνων, με φωτογραφική μηχανή, την ασύρματη μεταφορά εικόνων σε εκτυπωτές και τηλεόραση με επίπεδο πάνελ.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της IrDA.

#### Πίνακας 19: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα IrDA

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Χαμηλό κόστος εξοπλισμού.
2. Ευκολία στη χρήση.
3. Ασφάλεια.
4. Ελεύθερη εκπομπή χωρίς ανάγκη αδειοδότησης.
5. Υψηλή ταχύτητα μετάδοσης.
6. Χαμηλές απαιτήσεις κατανάλωσης ενέργειας.
7. Συμβατότητα με παλαιότερες εκδόσεις μεταξύ των διαδοχικών προτύπων.
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Περιορισμένο εύρος κάλυψης.
2. Ενδεχόμενος οφθαλμικός κίνδυνος.
3. Ευαισθησία παρεμβολής.

### ***B. Άλλα Οπτικά Υπέρυθρα Συστήματα***

Οποιοδήποτε οπτικό ασύρματο σύστημα περιλαμβάνει έναν πομπό, ο οποίος εκπέμπει διαμορφωμένη οπτική ακτινοβολία. Το φως διαδίδεται στη συνέχεια μέσω του καναλιού και ένας οπτικός δέκτης ανιχνεύει τη διαμορφωμένη ακτινοβολία και ανακτά τα αρχικά δεδομένα. Τα υπέρυθρα IR [42] οπτικά ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούν έναν αριθμό διαφορετικών τοπολογιών, και η διαθέσιμη απόδοση εξαρτάται από τον πολλαπλασιασμό που χρησιμοποιείται και τον τύπο του συστήματος. Βασική διαφορά τους με το IrDa είναι η εμβέλεια που παρέχουν, δεδομένου ότι το IrDA αποτελεί οπτική ασύρματη τεχνολογία μικρής εμβέλειας (short reach). Οι βασικοί τύποι ενός IR συστήματος εμπίπτουν στα συστήματα απευθείας οπτικής επαφής (LOS - Line of Sight) και στα συστήματα που δεν απαιτούν την ύπαρξη απευθείας οπτικής επαφής (Non LOS - Line of Sight) μεταξύ πομπού και δέκτη.

Ο Πίνακας 20 συνοψίζει τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα καθώς και μειονεκτήματα των οπτικών υπέρυθρων συστημάτων.

**Πίνακας 20: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Οπτικών Υπέρυθρων Συστημάτων.**

<b>Πλεονεκτήματα</b>
1. Ασφάλεια εφόσον το σήμα μεταδίδεται εντός ενός δωματίου.
8. Ελεύθερη εκπομπή χωρίς ανάγκη αδειοδότησης.
2. Δεν υπάρχουν χρονικά μεταβαλλόμενες διαλείψεις στη μετάδοση του σήματος λόγω της ποικιλομορφίας των δεκτών.



3. Ανεκτικότητα σε εξωτερικές παρεμβολές.
4. Μεγαλύτερη εμβέλεια από το IrDA.
5. Υψηλές ταχύτητες.
<b>Μειονεκτήματα</b>
1. Περιορίζονται στο εσωτερικό ενός δωματίου.
2. Παρεμβολής εντός ζώνης. Το φως του χώρου, είτε φυσικό είτε τεχνητό, πολλές φορές αποτελεί πηγή θορύβου.
3. Περιορισμένο εύρος ιδιαίτερα όταν δεν είναι διαθέσιμη απευθείας οπτική επαφή.

### Συστήματα Χωρίς Οπτική Επαφή

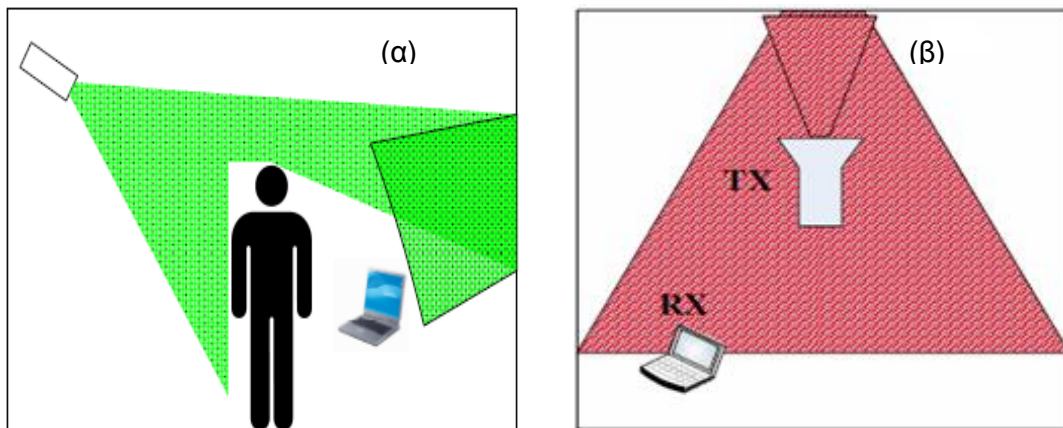
Τα συστήματα Non LOS δεν απαιτούν την ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Ο πομπός κατά κανόνα βρίσκεται τοποθετημένος σε κάποιο ύψος από το δάπεδο και στέλνει μια οπτική δέσμη με κατεύθυνση συνήθως στην οροφή του χώρου, όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα, αλλά και σε άλλες κατευθύνσεις στο χώρο. Ο δέκτης είναι και αυτός προσανατολισμένος προς τα πάνω. Το οπτικό σήμα που εκπέμπει ο πομπός ανακλάται είτε στην οροφή είτε στους περιβάλλοντες τοίχους και επιφάνειες, διαχέεται ομοιόμορφα στο χώρο και τελικά προσπίπτει στην επιφάνεια του δέκτη εξασθενημένο, αφού έχει υποστεί ανακλάσεις σε τοίχους και σε άλλα εμπόδια που παρεμβάλλονται στο χώρο. Συνεπώς, δεν απαιτείται προσεκτική τοποθέτηση και ακριβής προσανατολισμός πομπού και δέκτη. Τα συστήματα αυτά διαφοροποιούνται ανάλογα με το εύρος της δέσμης εκπομπής και της γωνίας θέασης του δέκτη.

Η πιο διαδεδομένη διάταξη Non LOS είναι η τοπολογία διάχυσης (Diffuse), στην οποία ο πομπός εκπέμπει μια ευρεία οπτική δέσμη και το δέκτης διαθέτει ευρεία γωνία θέασης. Τα συστήματα διάχυσης προσφέρουν στους χρήστες δυνατότητα, αλλά παρουσιάζουν αυξημένες απώλειες διάδοσης. Σύμφωνα με τα συστήματα που λειτουργούν σε τοπολογία διάχυσης, μια πηγή εκπέμπει με σχετικά ευρεία γωνία θέασης και η ακτινοβολία σκεδάζεται από τις εσωτερικές επιφάνειες του χώρου, όπως άλλωστε και το φως από τις λάμπες. Αυτό δημιουργεί ένα μεγάλο αριθμό διαδρομών από την πηγή στο δέκτη, το οποίο καθιστά το σύστημα λειτουργικό ακόμα και εάν μία από αυτές εμποδιστεί. Ωστόσο, οι απώλειες διαδρομής είναι υψηλές και οι πολλαπλές διαδρομές δημιουργούν παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων (ISI - intersymbol interference). Στα συστήματα ραδιοσυχνότητας είναι δυνατόν να ξεπεραστούν οι παρεμβολές ISI χρησιμοποιώντας τεχνικές πολλών φερόντων και επεξεργασίας σήματος, αλλά η πολύ υψηλή απώλεια διάδοσης στα αμιγώς διάχυτα κανάλια, καθιστά μάλλον δύσκολο ότι οι ρυθμοί δεδομένων των 1Gbit/s θα μπορέσουν να επιτευχθούν στο εγγύς μέλλον.

Το πρώτο ασύρματο οπτικό σύστημα, που προτάθηκε από τους Gfeller και Bapst [66], ήταν ένα υπέρυθρο σύστημα διάχυσης που λειτουργούσε στα 950nm και παρείχε ρυθμό μετάδοσης ίσο με 1Mb/s. Το ταχύτερο υπέρυθρο σύστημα διάχυσης παρείχε ρυθμό 50Mb/s και προτάθηκε από τους Marsh και Kahn [46].

Η εικόνα που ακολουθεί αντικατοπτρίζει δύο περιπτώσεις ενός τυπικού συστήματος διάχυσης μέσα στο οικιακό δίκτυο. Στην (α) περίπτωση ο πομπός τοποθετείται στο ταβάνι και το σήμα ανακλάται στους γύρω τοίχους και επιφάνειες, ενώ στην περίπτωση

(β) ο πομπός τοποθετείται σε ένα ύψος από το πάτωμα και το σήμα ανακλάται στην οροφή.

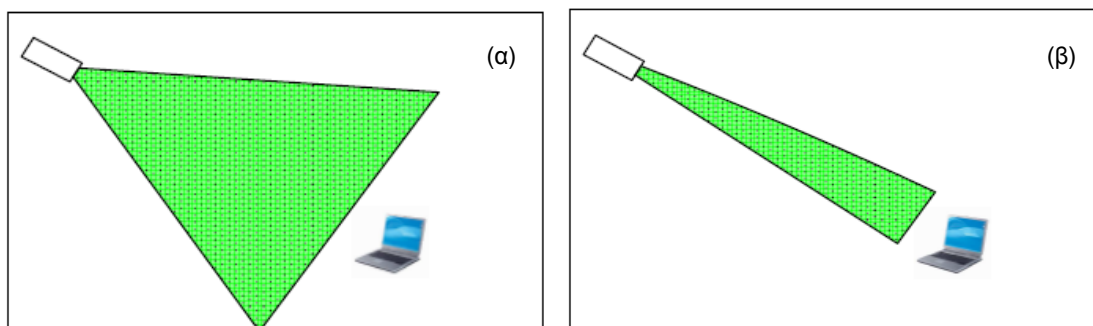


Εικόνα 23: Σύστημα Διάχυσης

### Συστήματα Απευθείας Οπτικής Επαφής

Από την άλλη, τα συστήματα απευθείας οπτικής επαφής (LOS) δεν επηρεάζονται από παράγοντες του καναλιού μετάδοσης, εκτός από γεωμετρικές απώλειες. Παράλληλα, σε αυτά τα συστήματα παρατηρείται περιορισμένη ISI. Αυτό συμβαίνει γιατί λαμβάνεται υπόψη μόνο το σήμα που εκπέμπει η πηγή και φτάνει απευθείας στο δέκτη χωρίς να έχει υποστεί ανακλάσεις. Οι γεωμετρικές απώλειες και η γωνία θέασης του πομπού και του δέκτη καθορίζουν τον ισολογισμό ισχύος, τον διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, και σε γενικές γραμμές όσο πιο στενό είναι το οπτικό πεδίο τόσο υψηλότερος ρυθμός δεδομένων επιτυγχάνεται. Ο πομπός κατά κανόνα είναι τοποθετημένος στην οροφή του χώρου, όπου είναι εγκατεστημένο το σύστημα και εκπέμπει μια δέσμη ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να στοχεύει είτε προς το δέκτη είτε γενικά προς τα κάτω. Ο δέκτης βρίσκεται συνήθως σε κάποιο ύψος από το δάπεδο και στοχεύει είτε προς τον πομπό είτε προς τα πάνω. Σε περίπτωση που παρεμβάλλεται κάποιο εμπόδιο η σύνδεση δεν είναι εφικτή.

Τα LOS συστήματα χωρίζονται σε ευρείας (WLOS - Wide LOS) και στενής δέσμης (NLOS - Narrow LOS), τα οποία παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 24: (α) Σύστημα WLOS, (β) Σύστημα NLOS

Σε ένα σύστημα NLOS, ο πομπός εκπέμπει μια πολύ στενή οπτική δέσμη προσανατολισμένη στο δέκτη. Το εύρος των γωνιών μέσα στο οποίο ο δέκτης λαμβάνει ακτινοβολία είναι επίσης πολύ στενό με αποτέλεσμα να απαιτείται ακριβής προσανατολισμός μεταξύ του πομπού και του δέκτη, αλλά και να ελαχιστοποιείται ο λαμβανόμενος περιβαλλοντικός θόρυβος ενισχύοντας την ευαισθησία του δέκτη. Μια τέτοια διάταξη δεν ικανοποιεί την απαίτηση για κινητικότητα και για αυτό δεν ενδείκνυται

για ασύρματες εφαρμογές, εκτός εάν χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με κατάλληλο μηχανισμό ανίχνευσης ή στην περίπτωση κυψελωτών δικτύων για τη δημιουργία περιοχών κάλυψης μέσα σε ένα χώρο. Αντίθετα, στα WLOS συστήματα οι απαιτήσεις για την ακριβή τοποθέτηση του πομπού και του δέκτη είναι περισσότερο ανεκτικές, εφόσον η οπτική δέσμη είναι αρκετά ευρεία, γεγονός που επεκτείνει την περιοχή κάλυψης και υποστηρίζει κινητικότητα στους χρήστες.

### **Γ. Επικοινωνίες Ορατού Φωτός**

Οι επικοινωνίες ορατού φωτός (VLC) χρησιμοποιούν λαμπτήρες φωτισμού για τη μετάδοση πληροφοριών [47]. Στη θέση του πομπού μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε πηγή φωτός, η οποία πρέπει να μπορεί να «αναβοσβήνει» πολύ γρήγορα, ώστε να επιτυγχάνεται η υψίρρυθμη μετάδοση δεδομένων. Για το σκοπό αυτό, οι περισσότερες προσεγγίσεις χρησιμοποιούν λευκές LEDs υψηλής ισχύος αν και υπάρχουν κάποιες προσπάθειες με λάμπες φθορισμού [48]. Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως είναι ακατάλληλοι για τα συστήματα VLC, λόγω της αδυναμίας τους να «αναβοσβήνουν» με πολύ υψηλή συχνότητα.

Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στην κατασκευή διόδων εκπομπής φωτός διαφορετικών χρωμάτων εκπομπής και μεγαλύτερης αποδοτικότητας. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν προσελκύσει στην ερευνητική κοινότητα οι λευκές LEDs, δηλαδή οι LEDs που εκπέμπουν στην ορατή περιοχή του οπτικού φάσματος. Οι λευκές LEDs έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μικρότερο μέγεθος από τις συμβατικές τεχνητές πηγές φωτός, όπως οι λαμπτήρες φθορισμού και πυρακτώσεως, τις οποίες τείνουν να αντικαταστήσουν [49]. Επιπρόσθετα, δύναται να διαμορφωθούν κατάλληλα, ώστε να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα και για τη μετάδοση πληροφορίας. Η πρωτοποριακή ιδέα για τη χρήση των λευκών LEDs, εκτός από πηγές φωτισμού, και ως πομπούς ασύρματων οπτικών συστημάτων ανήκει στην ερευνητική ομάδα του Nakagawa [50].

Το 2003 ιδρύθηκε η κοινοπραξία VLCC (Visible Light Communications Consortium) [51] στην Ιαπωνία, με σκοπό την εισαγωγή προτύπων για οπτικές ασύρματες επικοινωνίες ορατού φωτός. Συμμετείχαν οι εταιρείες Sony, Samsung, Toshiba, Sharp, Nitto Denko και Tamura. Το 2007 οι δραστηριότητες της VLCC οδήγησαν στην έκδοση των προτύπων JEITA CP-1221 και JEITA CP-1222 από την JEITA (Japan Electronics & Information Technology Industries Association).

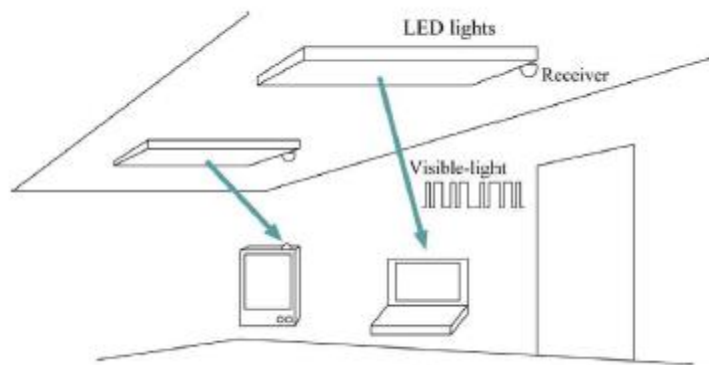
Αξίζει να σημειωθεί ότι η εργασία της Ιαπωνικής κοινοπραξίας VLC έχει δημιουργήσει εκτεταμένο ενδιαφέρον στην ερευνητική κοινότητα, οδηγώντας στο σχηματισμό μιας ομάδας μελέτης IEEE για την προτυποποίηση των VLC [52]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση του VLC έγκειται στο γεγονός ότι οι πηγές μπορούν να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα τόσο για φωτισμό όσο και για μετάδοση δεδομένων. Τα VLC συστήματα μπορούν να παρέχουν μετάδοση πληροφοριών σε (ημι-) κοινόχρηστους χώρους (γραφεία, αεροδρόμια, τρένα, σιδηροδρομικούς σταθμούς, συνέδρια κ.α.), ή μεταδόσεις κάτω καναλιού υψηλής ταχύτητας σε κινητές συσκευές (PDA, τηλέφωνο, κ.α), καθώς και σε άλλες συσκευές. Η χρήση των LEDs για σήματα κυκλοφορίας και λαμπτήρες αυτοκινήτων προσφέρει τη δυνατότητα χρήσης των VLC στον τομέα των ευφυών συστημάτων κυκλοφορίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πηγές LED μπορούν να διαμορφωθούν σε υψηλή ταχύτητα, σε σύγκριση με τις πηγές φωτισμού, και προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν ευρέως σε εφαρμογές γενικού φωτισμού. Ωστόσο, το τυπικό εύρος ζώνης διαμόρφωσης των συσκευών αυτών είναι λίγα MHz. Το εύρος ζώνης της λευκής συνιστώσας των LED

φωσφορισμού (~ 2 MHz) είναι πολύ μικρότερο από το εύρος ζώνης της μπλε συνιστώσας (~15–20 MHz, ανάλογα με τον τύπο LED) [53], [54].

Η μετάδοση σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, πάνω από ένα διαθέσιμο στενό εύρος ζώνης διαμόρφωσης, αποτελεί πραγματική πρόκληση στο πλαίσιο των επικοινωνιών ορατού φωτός. Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για τη βελτίωση του εύρους ζώνης, συμπεριλαμβανομένης της προεξίσωσης της LED [53], την εκ των υστέρων εξισορρόπηση στο δέκτη [55], ή το συνδυασμό αυτών των τεχνικών. Μια άλλη προσέγγιση για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων πάνω από ένα περιορισμένο εύρος ζώνης είναι να χρησιμοποιούνται περισσότερο περίπλοκα σχήματα διαμόρφωσης, όπου πολλαπλά bits μπορούν να μεταφέρονται από κάθε μεταδιδόμενο σύμβολο. Στο [56] έχει αναφερθεί υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, έως και 231 Mb/s, πάνω από το εύρος ζώνης της μπλε περιοχής του ορατού φάσματος (blue channel bandwidth).

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα σύστημα VLC με τη χρήση LED λευκού φωτός για τις ανάγκες του οικιακού δικτύου.



Εικόνα 25: Σύστημα VLC με τη χρήση λευκών LEDs σε εσωτερικό χώρο

## 1.2 Ανάγκη Ανάπτυξης Οδικού Χάρτη για την Πορεία των Μελλοντικών Οικιακών Δικτύων

Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, υπάρχουν ποικίλες τεχνολογικές λύσεις που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην εξέλιξη και περαιτέρω ανάπτυξη των οικιακών δικτύων επόμενης γενιάς. Δεδομένου ότι κάθε τεχνολογική λύση έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, φαίνεται ότι τα μελλοντικά οικιακά δίκτυα θα αποτελούνται πιθανότατα από υβριδικά συστήματα και η δημιουργία ενός οδικού χάρτη θα αποτελέσει το κλειδί για τη διασφάλιση της ομαλής ανάπτυξής τους. Ο οδικός χάρτης ή αλλιώς roadmapping πρόκειται να προδιαγράψει την πορεία τους και να καθορίσει τις καταλληλότερες τεχνολογικές λύσεις για την ανάπτυξη των συστημάτων των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις τεχνολογικές δυσκολίες, ο σχεδιαστής του δικτύου πρέπει να λάβει υπόψη του ποικίλα οικονομικά και κοινωνικά θέματα που επηρεάζουν την υιοθέτηση των οικιακών δικτυακών συστημάτων από το ευρύ κοινό. Για παράδειγμα, το κόστος του συστήματος καθίσταται υψηλής σημασίας καθώς κινούμαστε πιο κοντά στις προσδοκίες των χρηστών. Είναι κατανοητό ότι οι προοπτικές των οικιακών δικτύων επηρεάζονται από ένα συνδυασμό ζητημάτων απόδοσης, κόστους, υγείας και ασφάλειας. Εν όψει αυτών των δυσκολιών, η ανάγκη για ένα χάρτη οικιακών δικτυακών συστημάτων, για την αντιμετώπιση όλων αυτών των θεμάτων, είναι προφανής, προκειμένου να επιτευχθεί η συναίνεση σχετικά με το σύνολο των αναγκών και των τεχνολογιών που απαιτούνται

Τα βασικά ζητήματα των οικιακών δικτύων επόμενης γενιάς, που διερευνώνται στην παρούσα διδακτορική διατριβή σχετίζονται και με την επέκταση του δικτύου (network extension) καθώς και με την προοπτική του οικιακού δικτύου που θα βασίζεται

πλήρως σε οπτικά συστήματα. Όπως άλλωστε, προαναφέρθηκε, οι οπτικές τεχνολογίες αποτελούν μια πρόκληση για το μέλλον, παρέχοντας μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης. Ιδιαίτερα μάλιστα οι ασύρματες οπτικές τεχνολογίες έχουν τη δυνατότητα επίτευξης μεγάλων ταχυτήτων διευκολύνοντας τους ιδιοκτήτες των οικιακών ή εργασιακών χώρων, εφόσον δεν απαιτείται η εγκατάσταση καινούργιων καλωδίων στον εκάστοτε χώρο.

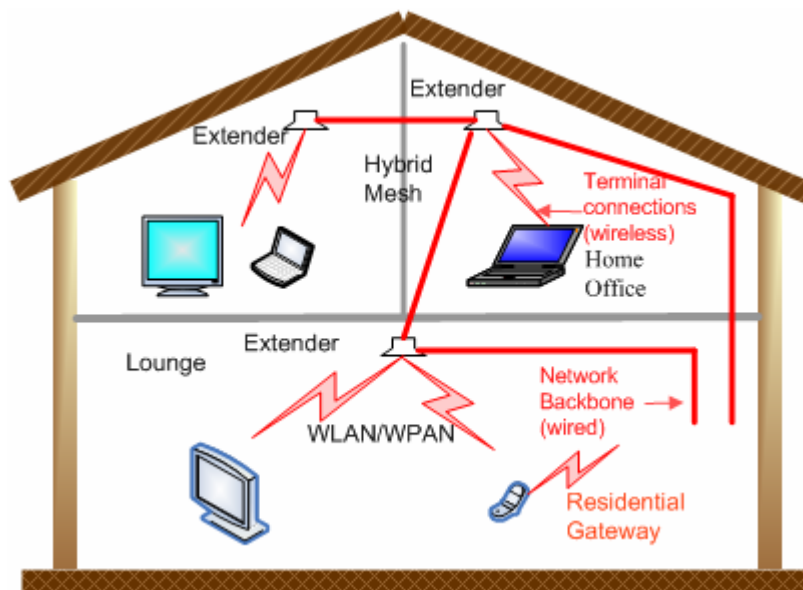
Στο πλαίσιο της ανάπτυξης και μελλοντικής επέκτασης των οικιακών δικτύων, οι διαδικασίες δημιουργίας ενός οδικού χάρτη πραγματοποιήθηκαν, για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, σε συνδυασμό με τις προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ICT-OMEGA [57]. Το εν λόγω έργο είχε σαν απώτερο στόχο την ανάπτυξη ενός φιλικού προς το χρήστη οικιακού δικτύου, ικανού να παρέχει υπηρεσίες και περιεχόμενο υψηλού εύρους ζώνης, σε μια ταχύτητα μετάδοσης τουλάχιστον ένα Gigabit το δευτερόλεπτο [58]. Παράλληλα, στόχευε στην ενσωμάτωση τριών διαφορετικών τεχνολογιών που δεν απαιτούν την εγκατάσταση νέων καλωδίων σε ένα ενδιάμεσο πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης του μέσου (inter-MAC). Τέτοιου είδους τεχνολογίες είναι τα optical wireless [59], radio 60GHz [60]-[62], και PLC [23]. Το inter-MAC βρίσκεται μεταξύ του δεύτερου και του τρίτου επιπέδου του OSI, παρέχοντας κοινές λειτουργικότητες σε ετερογενή δικτυακά συστήματα επικοινωνίας. Το inter-MAC είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία ενός ελαστικού, αξιόπιστου και εύκολου οικιακού δικτύου με ρυθμούς της τάξης των Gigabit, το οποίο εγγυάται την ποιότητα και αδιάκοπτη λειτουργία των υπηρεσιών σε ένα οικιακό περιβάλλον [58]. Το δίκτυο αποτελείται από ποικίλα σημεία διασύνδεσης, όπως οι συσκευές επέκτασης (extenders), που διαμοιράζονται στο σπίτι, υποστηρίζοντας την υβριδοποίηση των τριών προαναφερθεισών τεχνολογιών. Η λειτουργία επέκτασης είναι ένα θεμελιώδες κομμάτι του οικιακού δικτύου [63] που σκοπεύει να επεκτείνει την κάλυψή του και να επιτρέπει την επικοινωνία ανάμεσα σε συσκευές που έχουν διαφορετικές διεπαφές φυσικού επιπέδου (PHY - Physical Layer). Η επέκταση του δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε ένα ασύρματο σταθμό βάσης στην οροφή του δωματίου ή ακόμα και σε τερματικές συσκευές. Θεωρητικά, κάθε συσκευή ενδέχεται να επεκτείνει το δίκτυο, υπό την έννοια ότι είναι σε θέση να επεξεργάζεται (λαμβάνει και προωθεί) την κίνηση για την οποία δεν είναι το τερματικό σημείο. Η συσκευή επέκτασης ενδέχεται να δρα ως δρομολογητής προωθώντας τα δεδομένα για τους δικτυακούς κόμβους, καθώς επίσης μπορεί να δημιουργεί και να λαμβάνει πακέτα από μόνη της υποστηρίζοντας τις λειτουργικότητες των αυτό-οργανωμένων δικτύων (ad hoc).

Όσον αφορά τις συμβατικές συσκευές (legacy devices) θα συνδέονται με το οικιακό δίκτυο μέσω ενός προσαρμογέα (legacy device adapter), που θα είναι ικανός να μετατρέπει την κίνηση εκτός δικτύου σε κίνηση εντός και το αντίστροφο. Αυτή η υβριδική μορφή δικτύου παρουσιάζεται στην Εικόνα 26, δίνοντας έμφαση στη διασύνδεση ποικίλων τερματικών, όπως ένα δίκτυο πλέγματος (mesh network) [64], εξασφαλίζοντας την κάλυψη ολόκληρου του οικιακού χώρου. Αυτά τα τερματικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε πολλές κατηγορίες ή ομάδες, που δεν είναι εντελώς ασύνδετες, όπως τα τερματικά επικοινωνίας δεδομένων (υπολογιστές, PDAs, φορητοί υπολογιστές-notebooks, κ.α.), τα τερματικά επικοινωνίας φωνής και βίντεο (αναλογικά/ψηφιακά τηλέφωνα, βιντεοτηλέφωνα, κινητά τηλέφωνα, κ.α.), τα τερματικά ψυχαγωγίας μέσω φωνής/βίντεο, όπως π.χ. συσκευή μετατροπής του σήματος σε μορφή περιεχομένου που μπορεί να εμφανιστεί στην τηλεόραση ή σε άλλη συσκευή προβολής (STB - Set Top Box), τηλεόραση, αναπαραγωγέας πολυμέσων, HiFi, καθώς και τα τερματικά που εντάσσονται στον οικιακό εξοπλισμό (π.χ. ψυγείο, αισθητήρες κ.α.).

Παράλληλα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εναλλακτικές τεχνολογίες που δεν

απαιτούν την εγκατάσταση νέων καλωδίων, τα συμβατικά και 60GHz συστήματα ραδιοεπικοινωνίας, τα ασύρματα οπτικά, τα υπερευρυζωνικά και οι ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς. Το έργο πέτυχε υπέρυθρη μετάδοση δεδομένων (IR) σε ρυθμό 1,25Gb/s [65] και μετάδοση ορατού φωτός (VLC) στα 100Mb/s [66]. Αυτές οι λύσεις δεν είναι διαθέσιμες στο εμπόριο ακόμα, αλλά αποτελούν μία πειραματική πλατφόρμα. Ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνολογιών σε ένα και μόνο edιάμεσο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης του μέσου, που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του OMEGA [67], φαίνεται να ανοίγει ενδιαφέρουσες δυνατότητες για μελλοντική δικτύωση στο σπίτι.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα τυπικό οικιακό δίκτυο, όπως έχει σχεδιαστεί στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Ποικίλες συσκευές για τους χρήστες συνδέονται μέσω του οικιακού δικτύου. Τα δεδομένα διανέμονται μέσα στο οικιακό δίκτυο μέσω των σημείων πρόσβασης τα οποία δρουν ως στοιχεία επέκτασης του δικτύου.



Εικόνα 26: Το μελλοντικό Οικιακό Δίκτυο

### 1.2.1.1 Λειτουργικότητα Επέκτασης στα Οικιακά Δίκτυα

Είναι πλέον φανερό ότι υπάρχουν διάφορες τεχνολογικές λύσεις που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην επέκταση του οικιακού δικτύου, η καθεμία με τα δικά της ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, τα ραδιοσυστήματα, όπως το WiFi είναι ήδη εμπορεύσιμα και το 802.11n υπόσχεται μέχρι 600Mb/s ρυθμούς δεδομένων χρησιμοποιώντας τις τεχνικές MIMO [60]. Ωστόσο, ο ακριβής ρυθμός απόδοσης (throughput) είναι χαμηλότερος. Τα συστήματα που λειτουργούν χωρίς άδεια στη συχνότητα των 60GHz [61], καθώς και τα μεγάλου εύρους (UWB) μπορούν να παρέχουν μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων. Η ασύρματη μετάδοση της τάξης των Gigabit ανά δευτερόλεπτο είναι εφικτή στα 60GHz, αλλά τέτοια συστήματα δεν είναι ακόμα τεχνολογικά ώριμα. Από την άλλη, βέβαια, τα PLC παρέχουν ενσύρματη καλωδίωση με εκατοντάδες Megabit ανά δευτερόλεπτο, χρησιμοποιώντας τα ήδη εγκατεστημένα καλώδια του οικιακού χώρου ή του γραφείου. Ωστόσο, η επέκτασή τους στο καθεστώς των Gigabit είναι μια πρόκληση εξαιτίας των ιδιοτεροτήτων του καναλιού ηλεκτρικού ρεύματος. Επιπρόσθετα, τα οπτικά ασύρματα συστήματα μπορούν και εκείνα να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς δεδομένων πιθανότα αγγίζοντας τα 10Gb/s μελλοντικά είτε στην υπέρυθρη είτε στην ορατή περιοχή του φάσματος. Εντούτοις, υπάρχουν ακόμα τεχνικοί περιορισμοί στην εφαρμογή τους. Ιδιαίτερα στις ασύρματες

οπτικές τεχνολογίες απευθείας οπτικής επαφής, η παρεμπόδιση της δέσμης εξαιτίας εμποδίων (blocking) είναι ένα σημαντικό θέμα. Από την άλλη, στις τεχνολογίες διάχυσης, όπου δεν υπάρχει ανάγκη για μονοπάτι απευθείας οπτικής επαφής, ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι χαμηλότερος.

Σύμφωνα με τις προαναφερθείσες τεχνολογίες, η παρούσα διατριβή έχει εστιάσει στις ακόλουθες τρεις, IEEE 802.11n, Radio 60GHz και PLC, με σκοπό την αξιολόγηση των εναλλακτικών τεχνολογιών για την επέκταση των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Η τεχνολογία UWB δεν λήφθηκε υπόψη στη δημιουργία του οδικού χάρτη, εφόσον παρά το γεγονός ότι μπορεί να παρέχει συνδέσεις περιορισμένου φάσματος σε υψηλό εύρος ζώνης σε μικρές αποστάσεις, ωστόσο σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 μέτρων ο ρυθμός απόδοσης είναι συγκρίσιμος με τον αντίστοιχο του 802.11g [68].

### 1.2.1.2 Προοπτική Οπτικού Οικιακού Δικτύου

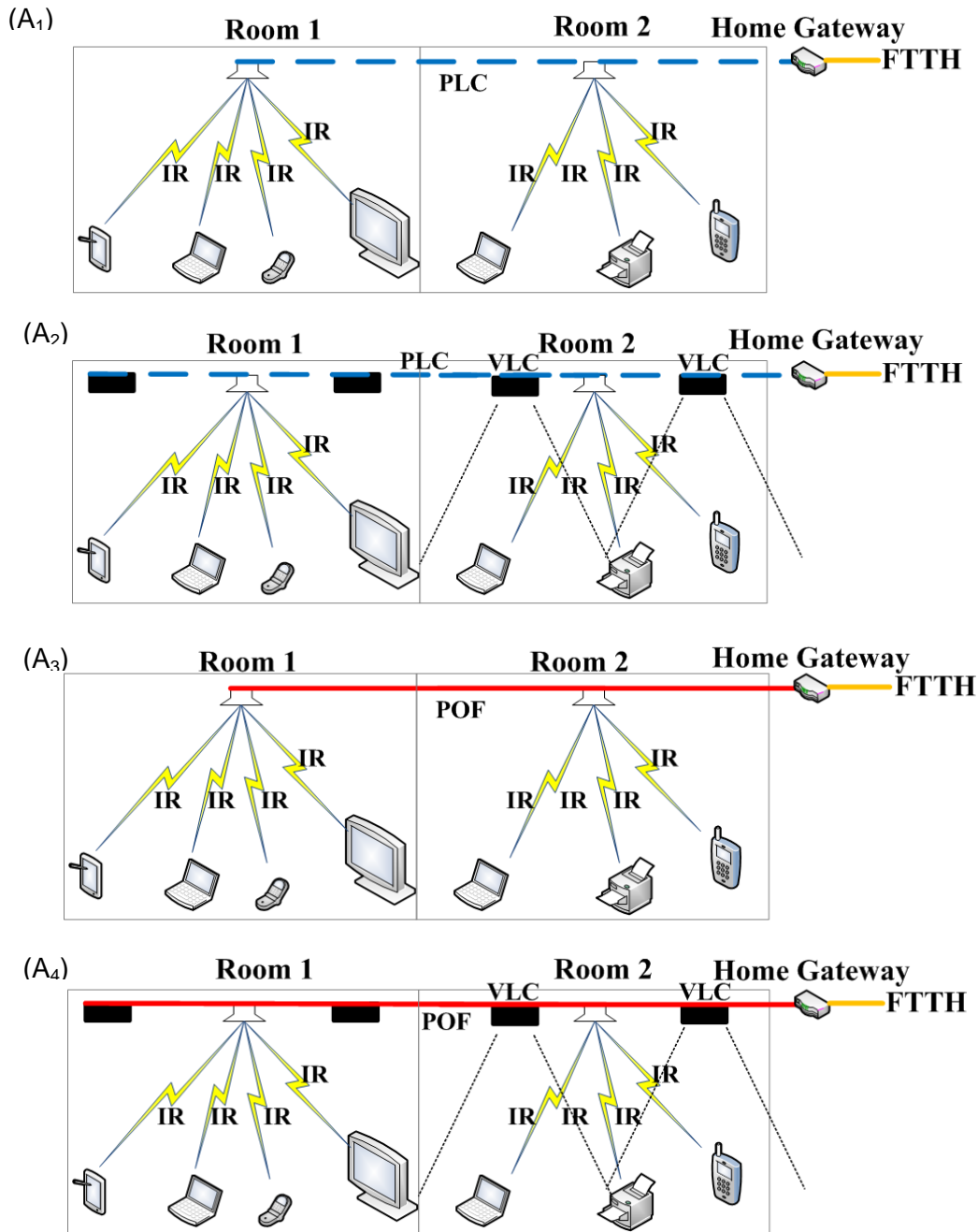
Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, φαίνεται ότι οι οπτικές ασύρματες τεχνολογίες δύναται να αποτελέσουν μια βιώσιμη επιλογή για τη διευκόλυνση της παροχής πολλών ευρυζωνικών υπηρεσιών, όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας και οι Web 2.0 εφαρμογές [69], συμπεριλαμβανομένης της ανταλλαγής περιεχομένου, online gaming κλπ, στα μελλοντικά οικιακά δίκτυα. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα ασύρματης ραδιοεπικοινωνίας, υπάρχουν διάφορα ζητήματα που αφορούν την ανάπτυξη των οπτικών ασύρματων τεχνολογιών και παραμένουν ασαφή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η επιλογή του οικιακού δικτύου κορμού, δηλαδή του τμήματος του δικτύου που συνδέει τους οπτικούς σταθμούς βάσης στον οικιακό δρομολογητή (gateway). Το δίκτυο κορμού θα πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει συνδεσιμότητα της τάξης των Gb/s, διαφορετικά οι ρυθμοί δεδομένων που παρέχονται από τους οπτικούς σταθμούς βάσης (hotspots) δε θα χρησιμοποιηθούν με αποτελεσματικό τρόπο. Η τεχνολογία PLC μπορεί να προσφέρει μια ενδιαφέρουσα λύση [70]. Εναλλακτικά, η οπτική ίνα, είτε κλασική είτε πλαστικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διασύνδεση των σταθμών βάσεων. Ένα άλλο ζήτημα που πρέπει να επιλυθεί είναι ποια τεχνολογία θα χρησιμοποιηθεί στο ίδιο το σύστημα για ασύρματες συνδέσεις. Θα πρέπει να στηριζόμαστε σε IR ή VLC ή και τα δύο;

Τα παραπάνω ζητήματα περιπλέκονται από το γεγονός ότι η διείσδυση της τεχνολογίας εξαρτάται από ένα συνδυασμό οικονομικών, κοινωνικών και σχετιζόμενων με την απόδοση κριτηρίων. Η παρούσα διατριβή θα προσπαθήσει να εξερευνήσει αυτό το σύνθετο πρόβλημα, με την ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού οδικού χάρτη βασιζόμενου στις πολυκριτηριακές διαδικασίες λήψης απόφασης, που πρόκειται να αναλυθούν στο κεφάλαιο που ακολουθεί. Για το σκοπό αυτό πρόκειται να αξιολογηθούν τέσσερα εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης οπτικών τεχνολογιών στο πλαίσιο της δικτύωσης στο μελλοντικό οικιακό δίκτυο.

Το πρώτο ( $A_1$ ) βασίζεται σε αμφίδρομες IR, LOS συνδέσεις με ένα δίκτυο κορμού PLC. Το δεύτερο σενάριο ( $A_2$ ) είναι παρόμοιο με το  $A_1$  με την εξαίρεση ότι οι VLC λαμπτήρες παρέχουν συνδεσιμότητα κάτω καναλιού, ενισχύοντας την κάλυψη του συνολικού συστήματος. Τα VLC και IR υποσυστήματα μπορούν να συνδυαστούν σε ένα υψηλότερο επίπεδο δικτύου, όπως το στρώμα MAC [67], δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτό το σενάριο, το VLC χρησιμοποιείται μόνο για δεδομένα κάτω καναλιού. Οι άλλες δύο αρχιτεκτονικές  $A_3$  και  $A_4$  είναι παρόμοιες με τις  $A_1$  και  $A_2$  αντίστοιχα, εκτός από το ότι η πλαστική οπτική ίνα (POF) χρησιμοποιείται στο δίκτυο κορμού αντί του PLC. Οι αρχιτεκτονικές  $A_1$  και  $A_2$  έχουν το πλεονέκτημα της συμβατότητας με τις προσεγγίσεις που δεν απαιτούν την εγκατάσταση νέων καλωδίων. Τόσο τα PLC και όσο και τα POF αναμένεται να επιτύχουν συνδέσεις



της τάξης των Gb/s στο εγγύς μέλλον. Ωστόσο, οι παραπάνω ενσύρματες εναλλακτικές λύσεις δεν είναι ακόμη εμπορικά διαθέσιμες, αλλά έχουν επιτυχώς επιδειχθεί στο εργαστήριο. Η πέμπτη εναλλακτική λύση (A<sub>5</sub>), είναι να επεκτείνει τις POF συνδέσεις μέχρι τα τερματικά των χρηστών [71]. Σε αυτό το σενάριο δεν προβλέπονται ασύρματες συνδέσεις. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα εναλλακτικά σενάρια A<sub>1</sub>-A<sub>4</sub> για την προοπτική του οπτικού οικιακού δικτύου.



Εικόνα 27: Εναλλακτικές Λύσεις για το μελλοντικό Οπτικό Οικιακό Δίκτυο



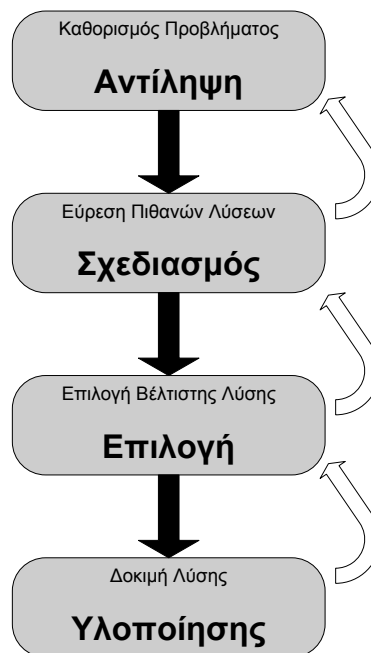
## 2 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

### 2.1 Ιστορική Αναδρομή

Η θεωρία λήψης αποφάσεων είναι μία επιστημονική περιοχή που έχει ως αντικείμενο τη μελέτη του τρόπου με τον οποίο άτομα ή ομάδες ατόμων λαμβάνουν αποφάσεις. Αποτελεί αντικείμενο μελέτης στο πλαίσιο πολλών επιστημών, όπως τα μαθηματικά, οι οικονομικές και κοινωνικές επιστήμες [72].

Η λήψη απόφασης συχνά ανάγεται στη διαδικασία επιλογής μεταξύ δύο ή περισσότερων εναλλακτικών δράσεων, για την επίτευξη του στόχου ή των στόχων για το εκάστοτε πρόβλημα που εξετάζεται [73]. Η διαδικασία λήψης μιας απόφασης αποτελείται από πολλά στάδια ή αλλιώς φάσεις. Πιο συγκεκριμένα, ο Simon [74] την περιέγραψε ως μία διαδικασία τεσσάρων διαφορετικών φάσεων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28: αντίληψη (intelligence), σχεδιασμός (design), επιλογή (choice) και υλοποίηση (implementation).

Όσον αφορά στην πρώτη φάση, η αντίληψη περιλαμβάνει τον εντοπισμό και την κατανόηση του προβλήματος λήψης απόφασης. Από την άλλη, ο σχεδιασμός αναφέρεται στη διερεύνηση και την ανάπτυξη πιθανών εναλλακτικών λύσεων για το πρόβλημα, ενώ η φάση της επιλογής συνίσταται στον εντοπισμό της καλύτερης δυνατής από τις διαθέσιμες εναλλακτικές λύσεις. Τέλος, η τέταρτη φάση της υλοποίησης αναφέρεται στην εφαρμογή της λύσης που έχει επιλεγεί και την παρακολούθηση της απόδοσής της. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τέσσερις φάσεις της λήψης μιας απόφασης καθώς και η δυνατότητα επιστροφής και επανάληψης του προηγούμενου σταδίου, αν η επιλεγμένη λύση δεν κριθεί αποτελεσματική [75].



Εικόνα 28: Φάσεις Λήψης Απόφασης

Παρ' όλα αυτά, υπάρχουν προβλήματα τα οποία ονομάζονται αδόμητα (unstructured) γιατί η λύση τους δεν είναι δυνατόν να δομηθεί μέσα από τις τέσσερις προαναφερθείσες φάσεις και απαιτούν ιδιαίτερη αντιμετώπιση. Ένα τέτοιο πρόβλημα μπορεί να είναι για παράδειγμα η ανάπτυξη μιας τεχνολογίας. Από την άλλη, υπάρχουν και τα δομημένα (structured) προβλήματα, τα οποία είναι καλά καθορισμένα και οι φάσεις της λήψης απόφασης είναι δομημένες. Σε αυτά τα προβλήματα, η διαδικασία για την εύρεση λύσης

είναι δεδομένη, ενώ μπορεί να περιγραφούν με μοντέλα μεγιστοποίησης κέρδους ή ελαχιστοποίησης κόστους. Η επιλογή της καλύτερης δυνατής επένδυσης αποτελεί ένα παράδειγμα δομημένης απόφασης. Μεταξύ των δύο κατηγοριών βρίσκονται τα ημιδομημένα (semistructured) προβλήματα, τα οποία αποτελούνται τόσο από δομημένα όσο και από αδόμητα στοιχεία. Ένα τέτοιο ενδεικτικό παράδειγμα είναι η απόφαση για ανταλλαγή ομολόγων [73].

Οι αποφάσεις λαμβάνονται κάτω από διαφορετικές συνθήκες κάθε φορά, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τη φύση του προβλήματος για το οποίο απαιτείται η λήψη απόφασης. Υπάρχουν αποφάσεις που λαμβάνονται υπό συνθήκες βεβαιότητας, όπου δηλαδή κάθε ενέργεια έχει ένα γνωστό εκ των προτέρων αποτέλεσμα. Αυτές οι περιπτώσεις είναι εύκολο να μοντελοποιηθούν με τη χρήση του μαθηματικού προγραμματισμού, που αποτελεί μία ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδο λήψης αποφάσεων. Ένα τέτοιο υπόδειγμα αποτελείται από μία αντικειμενική συνάρτηση-στόχο, η οποία θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί, και από μια σειρά συναρτήσεων που εκφράζουν τους περιορισμούς που υπάρχουν στο σύστημα [76].

Συχνά οι πραγματικές συνθήκες είναι πιο πολύπλοκες και δεν επιτρέπουν την επίλυση του προβλήματος με τη βελτιστοποίηση μίας και μόνο συνάρτησης-στόχου. Αυτό συμβαίνει όταν τα κριτήρια για τη λήψη της απόφασης είναι πολλά και κάποιες φορές αντικρουόμενα και συνεπώς η βελτιστοποίηση του ενός δε συνεπάγεται και τη βελτιστοποίηση των υπολοίπων.

Σε αυτό το σημείο εισάγεται η μεθοδολογία πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων (MCDM - Multi Criteria Decision Making), η οποία στοχεύει στην εξεύρεση της βέλτιστης λύσης από ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων, λαμβάνοντας υπ' όψη τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιηθούν [77]. Στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί θα αναλυθούν περαιτέρω οι πολυκριτηριακές μέθοδοι λήψης απόφασης.

Στις προαναφερθείσες περιπτώσεις, η αβεβαιότητα εκτιμάται με την πραγματοποίηση της ανάλυσης ευαισθησίας. Αυτή πραγματοποιείται με αλλαγές στα δεδομένα εισόδου του μοντέλου, έτσι ώστε να μπορούν να προβλεφθούν εναλλακτικά αποτελέσματα σε περίπτωση αλλαγής των συνθηκών. Όταν όμως κάθε πιθανή ενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε πολλά διαφορετικά αποτελέσματα τα οποία δεν είναι γνωστά από την αρχή, τότε η απόφαση λαμβάνεται υπό καθεστώς αβεβαιότητας. Από τις πιο γνωστές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις είναι τα δέντρα αποφάσεων. Τα δέντρα αποφάσεων χρησιμοποιούνται για τη λύση προβλημάτων όπου υπάρχει αβεβαιότητα και πληθώρα εναλλακτικών που επιλέγονται διαδοχικά. Η τεχνική βασίζεται σε μια δενδροειδή αναπαράσταση του προβλήματος, όπου κάθε κλαδί αντιστοιχεί σε μία εναλλακτική απόφαση ή ένα εναλλακτικό αποτέλεσμα.

## **2.2 Χρησιμότητα και Κατηγοριοποίηση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Λήψης Αποφάσεων**

Η διαπίστωση ότι η επίλυση πολύπλοκων και σημαντικών προβλημάτων λήψης αποφάσεων δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μίας μονόπλευρης ανάλυσης, οδήγησε στην ανάπτυξη και διάδοση της πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων. Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων έχει ως βασικό αντικείμενο την αντιμετώπιση ενός προβλήματος που παρουσιάζεται κατά την προσπάθεια εξέτασης όλων των παραμέτρων ενός προβλήματος και των κριτηρίων που επηρεάζουν τη λήψη της κατάλληλης απόφασης [78]. Το πρόβλημα αυτό αφορά τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνει η σύνθεση όλων των παραμέτρων, ώστε να επιτευχθεί η λήψη ορθολογικών αποφάσεων. Βασικό χαρακτηριστικό και σημαντική διαφορά της πολυκριτηριακής ανάλυσης από άλλες εναλλακτικές προσεγγίσεις είναι ότι η αναγκαία σύνθεση

πραγματοποιείται υπό το πρίσμα της πολιτικής λήψης των αποφάσεων και του συστήματος προτιμήσεων και αξιών, το οποίο χρησιμοποιείται συνειδητά ή ασυνείδητα από αυτόν που αποφασίζει. Έτσι, η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων ενσωματώνει τους ειδικούς στη λήψη μιας απόφασης και τις προτιμήσεις τους στη διαδικασία επιλογής της κατάλληλης λύσης, χωρίς να τους προσδίδει απλά έναν παθητικό ρόλο, που τους περιορίζει στην παρακολούθηση και εφαρμογή των αποτελεσμάτων των μαθηματικών αλγορίθμων. Βασικός στόχος της ανάλυσης είναι η παροχή των αναγκαίων πληροφοριών για την υποστήριξη της διαδικασίας λήψης των αποφάσεων, συμβάλλοντας στον εντοπισμό των βασικών χαρακτηριστικών του εξεταζόμενου προβλήματος και των ιδιαιτεροτήτων των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων [79].

Η πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, κυρίως ως μέθοδος της επιχειρησιακής έρευνας για τη λήψη βέλτιστων αποφάσεων. Η πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων MCDM αποτελεί ένα σημαντικό κλάδο της επιστήμης λήψης αποφάσεων και είναι μια από τις πιο αναπτυσσόμενες περιοχές έρευνας κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών.

Η MCDM ορίζεται από τη Διεθνή Κοινότητα των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης απόφασης (International Society on Multiple Criteria Decision Making) [80] ως η μελέτη των μεθόδων και των διαδικασιών με τις οποίες το ενδιαφέρον για πολλαπλά αλληλοσυγκρουόμενα κριτήρια μπορεί επισήμως να ενσωματωθεί στη διαδικασία στρατηγικού σχεδιασμού. Η MCDM είναι επίσης γνωστή με τις ορολογίες Πολυκριτηριακή Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA - Multi-Criteria Decision Analysis), Πολυδιάστατη Λήψη Αποφάσεων (MDDM - Multi-Dimensions Decision Making) και Λήψη Αποφάσεων Πολλαπλών Ιδιοτήτων (MADM - Multi-Attributes Decision Making) [81].

Στον επιχειρηματικό χώρο η λήψη των αποφάσεων έχει αλλάξει σημαντικά τον τελευταίο αιώνα. Το περιβάλλον της απόφασης από εκείνο που περιλάμβανε ένα άτομο που λάμβανε την απόφαση κεντρικά με λίγα ή ακόμα και ένα κριτήριο/παράγοντα, όπως για παράδειγμα το κέρδος, εξελίχθηκε σε ένα περιβάλλον πολλαπλών ληπτών απόφασης και κριτηρίων, συχνά αντικρουόμενων. Ποικίλες θεωρητικές προσεγγίσεις προτάθηκαν και αναπτύχθηκαν ξεκινώντας από τις δεκαετίες του '50 και του '60 έως σήμερα, προσφέροντας λύσεις στο πρόβλημα της πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων με διαφορετικούς τρόπους.

Σύμφωνα με κάποιους μελετητές [72], [82], [83], οι πολυκριτηριακές μέθοδοι ανάλυσης αποφάσεων μπορούν να διακριθούν σε δύο ευρείες ομάδες, στη λήψη αποφάσεων πολλαπλών στόχων (MODM - Multi Objective Decision Making) και στη λήψη αποφάσεων πολλαπλών ιδιοτήτων (MADM). Η μεθοδολογία της MODM επικεντρώνεται σε προβλήματα όπου ο χώρος απόφασης είναι συνεχής, δηλαδή δεν υπάρχει εξαρχής προκαθορισμένο σύνολο εναλλακτικών λύσεων αλλά μία εναλλακτική λύση μπορεί να εντοπιστεί με την επίλυση ενός μαθηματικού μοντέλου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου τύπου είναι τα προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού με πολλαπλές συναρτήσεις-στόχους. Από την άλλη πλευρά, η MADM έχει ως αντικείμενο προβλήματα με διακριτό χώρο απόφασης, όπου δηλαδή το σύνολο των εναλλακτικών λύσεων είναι εξαρχής προκαθορισμένο [77]. Οι μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών ιδιοτήτων είναι σχεδιασμένες για την επιλογή διακεκριμένων/διακριτών εναλλακτικών λύσεων, ενώ οι μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων αντιμετωπίζουν ικανοποιητικά προβλήματα σχεδιασμού με πολλούς αντικειμενικούς σκοπούς, με θεωρητικά άπειρες σε αριθμό συνεχείς εναλλακτικές λύσεις και ένα σύνολο περιορισμών για το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης [83]. Οι μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων χρησιμοποιούν μαθηματικές μεθόδους προγραμματισμού με πολύ καλά ορισμένο

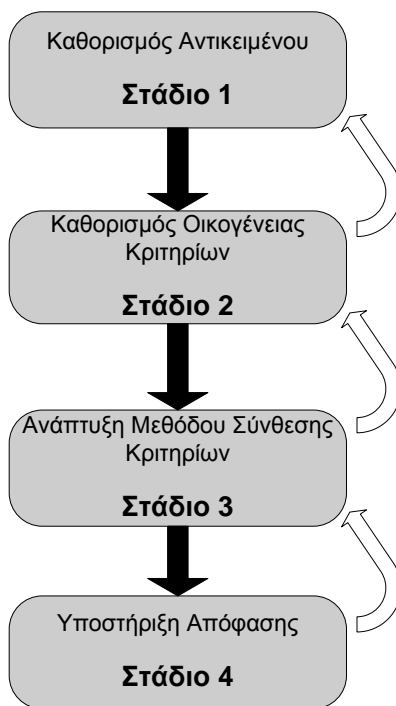
θεωρητικό πλαίσιο, ώστε το πρόβλημα βελτιστοποίησης (optimisation) να δύναται να μελετηθεί μέσω διαφορετικών υποθέσεων για μεταβλητές και συναρτήσεις, που καθορίζουν το μοντέλο και τους περιορισμούς [84]. Ωστόσο, οι εν λόγω μέθοδοι οδηγούν ορισμένες φορές σε ανέφικτη εναλλακτική λύση ή εφαρμόζονται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων για υποθετικές καταστάσεις [85].

Παρά τις διαφορές που παρουσιάζουν μεταξύ τους οι διαφορετικές πολυκριτηριακές μεθοδολογίες, τα κοινά στοιχεία στα πολυκριτηριακά προβλήματα λήψης απόφασης αποτελούν οι εναλλακτικές και τα κριτήρια επιλογής/στόχοι [86]. Οι εναλλακτικές είναι οι πιθανές λύσεις/ενέργειες που είτε έχει στη διάθεσή του ο λήπτης απόφασης εξ'αρχής (MADM) είτε απαιτείται η λύση ενός μαθηματικού μοντέλου για να καθοριστούν (MODM), οι οποίες μπορεί να είναι λίγες ή περισσότερες ανάλογα με τη φύση του προβλήματος. Οι ιδιότητες του προβλήματος (κριτήρια ή στόχοι) είναι πολλαπλές και αποτελούν το μέσο αξιολόγησης των εναλλακτικών.

Τα κριτήρια επιλογής είναι πολλές φορές αντικρουόμενα, όπως για παράδειγμα συμβαίνει συνήθως με το κόστος και την ποιότητα. Επίσης, πολλές φορές μετριούνται με διαφορετικές μονάδες μέτρησης, γεγονός που δυσχεραίνει την ανάλυση. Όταν τα κριτήρια επιλογής είναι πολλά, οι μεθοδολογίες συνήθως τα ομαδοποιούν και τα ιεραρχούν, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ειδικότερες ομάδες κριτηρίων, τα λεγόμενα υποκριτήρια. Τα υποκριτήρια συχνά αναφέρονται και ως παράγοντες. Οι περισσότερες μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης χρησιμοποιούν τον καθορισμό βαρών για τα κριτήρια επιλογής, ορίζοντας έτσι το βαθμό σημαντικότητας για τη λήψη της τελικής απόφασης [77].

Με βάση αυτά τα δεδομένα, οι πολυκριτηριακές μεθοδολογίες λήψης απόφασης αξιολογούν τις εναλλακτικές με βάση τα κριτήρια επιλογής, συνδυάζουν τις επιδόσεις τους και ταξινομούν τις πιθανές λύσεις ώστε να αναδειχθεί τελικά η καλύτερη επιλογή.

Σύμφωνα με τον Bernard Roy [87], στο μεθοδολογικό πλαίσιο της πολυκριτηριακής ανάλυσης, η επίλυση του προβλήματος περνάει από τέσσερα διαδοχικά στάδια, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, δηλαδή υπάρχει η δυνατότητα ανατροφοδότησης όταν ο λήπτης απόφασης σε κάποιο στάδιο κρίνει ότι υπάρχει έλλειψη πληροφόρησης ή πιθανά λάθη που μπορεί να διορθωθούν σε προηγούμενα βήματα. Στην Εικόνα 29 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα στάδια αυτής της διαδικασίας.



**Εικόνα 29: Στάδια Λήψης Απόφασης Πολυκριτηριακής Ανάλυσης**

Το πρώτο στάδιο αφορά τον καθορισμό του συνόλου των επιλογών του προβλήματος, δηλαδή του συνόλου αποφάσεων, λύσεων ή εναλλακτικών δράσεων που θα πρέπει να κριθούν και τελικά από τα στοιχεία του συνόλου να επιλεγεί η προτιμότερη λύση ή να καταταγούν με σειρά προτίμησης. Το στάδιο αυτό εμπίπτει στη φάση της αντίληψης στην Εικόνα 28. Το σύνολο των επιλογών μπορεί να καθοριστεί είτε έμμεσα μέσω παράθεσης ρητών περιορισμών, οπότε το πρόβλημα λύνεται με μαθηματικό προγραμματισμό πολλαπλών στόχων, είτε άμεσα ως ένα σύνολο διακριτών αποφάσεων.

Στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας, που σχετίζεται με τη φάση του σχεδιασμού (Εικόνα 28), ορίζεται το σύνολο των ιδιοτήτων ή κριτηρίων που θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων. Τα κριτήρια που θα επιλεγούν μπορεί να είναι είτε αριθμητικά, τα οποία είναι μετρήσιμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπολογισμούς, είτε ποιοτικά, οπότε παίρνουν διακριτές ποιοτικές τιμές (π.χ. κακό, μέτριο, καλό, πολύ καλό, άριστο).

Το τρίτο στάδιο της διαδικασίας λήψης απόφασης συνίσταται στην ανάπτυξη του υποδείγματος σύνθεσης των κριτηρίων, δηλαδή μιας μεθοδολογίας που θα αποδώσει τιμές για το σύνολο των χαρακτηριστικών που έχουν οριστεί στο στάδιο 2 και τελικά οι εναλλακτικές του πρώτου σταδίου θα συγκριθούν με βάση τις επιδόσεις τους σε κάθε κριτήριο. Το συγκεκριμένο στάδιο αντιστοιχεί στη φάση της επιλογής στην Εικόνα 28.

Στο τέταρτο και τελευταίο στάδιο της διαδικασίας, περιλαμβάνονται οι δραστηριότητες που θα ελέγξουν και θα επικυρώσουν το αποτέλεσμα που έχει εξαχθεί στο στάδιο 3. Ενέργειες όπως η ανάλυση ευαισθησίας είναι σε θέση να βοηθήσουν τον αποφασίζοντα να κατανοήσει τα αποτελέσματα και τον τρόπο με τον οποίο αυτά έχουν εξαχθεί [88]. Το εν λόγω στάδιο της πολυκριτηριακής λήψης απόφασης αντιστοιχεί στη φάση της υλοποίησης, στο γενικότερο διάγραμμα αποτύπωσης των φάσεων των διαδικασιών λήψης απόφασης (Εικόνα 28).

Πέραν της βασικής κατηγοριοποίησης σε MADM και MODM, υπάρχουν πολλοί τρόποι, για να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω οι μέθοδοι πολυκριτηριακής ανάλυσης αποφάσεων, που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τώρα [89]- [92]. Ένας τρόπος βασίζεται στον αριθμό των ειδικών της λήψης απόφασης που εμπλέκονται στη διαδικασία. Για αυτό το λόγο υπάρχουν μέθοδοι πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων για έναν ειδικό και μέθοδοι για ομάδα περισσότερων του ενός ειδικών (όπως Brainstorming, Delphi). Ένας άλλος τρόπος αφορά τη φύση των δεδομένων, που χρησιμοποιούν, και γι' αυτό υπάρχουν ντετερμινιστικές, στοχαστικές και ασαφείς (fuzzy) πολυκριτηριακές μέθοδοι ανάλυσης αποφάσεων [92], [93]. Οι ντετερμινιστικές μέθοδοι θεωρούν ότι το πρόβλημα λήψης απόφασης (εναλλακτικές λύσεις, κριτήρια κλπ) περιγράφεται σαφώς και πλήρως πριν από την εφαρμογή της μεθόδου. Οι στοχαστικές ή πιθανοθεωρητικές μέθοδοι λαμβάνουν υπόψη τους τις τιμές των κριτηρίων ως τυχαίες μεταβλητές. Επιπλέον, στις ασαφείς μεθόδους το πρόβλημα λήψης απόφασης και η διαδικασία γενικότερα αποτυπώνονται μέσω της ασαφούς λογικής (fuzzy logic) [93].

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μία πολύ αναλυτική κατηγοριοποίηση των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης απόφασης προτείνεται από τους Zoumprounidi Ntounro [94] σύμφωνα με την οποία οι μέθοδοι διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες, όπως φαίνονται στην Εικόνα 30. Η εν λόγω κατηγοριοποίηση βασίστηκε στην κατάταξη που προτάθηκε από τους Belton και Stewart [95], η οποία αντικατοπτρίζει περισσότερο το φάσμα των εφαρμογών των πολυκριτηριακών μεθόδων ανάλυσης αποφάσεων. Σύμφωνα με τα παραπάνω οι κατηγορίες διάκρισης των μεθόδων πολυκριτηριακής λήψης απόφασης είναι οι ακόλουθες [84], [96], [97], [98], [94]:

- Μέθοδοι πολυκριτηριακής θεωρίας χρησιμότητας (multiattribute utility theory methods). Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας καταλήγουν σε αριθμητικά αποτελέσματα, τα οποία στοχεύουν στην ανάδειξη της εναλλακτικής πρότασης έναντι μιας άλλης μέσω της βαθμολόγησης των επιδόσεων της. Αρχικά η κάθε εναλλακτική πρόταση βαθμολογείται για την επίδοση της σε ένα μόνο κριτήριο. Ο συνολικός βαθμός προκύπτει είτε από το άθροισμα των βαθμών για την επίδοση της κάθε εναλλακτικής πρότασης σε όλα τα κριτήρια, είτε από το μέσο όρο της, είτε από το σταθμισμένο μέσο της. Αναλυτικότερα, οι βαθμοί δημιουργούν διάταξη προτίμησης των εναλλακτικών λύσεων, ώστε η εναλλακτική λύση  $\alpha$  να προτιμάται έναντι της εναλλακτικής λύσης  $\beta$ , εάν και μόνο αν  $V(\alpha) > V(\beta)$ , όπου  $V(\alpha)$  είναι ο συνολικός βαθμός της  $\alpha$  και  $V(\beta)$  είναι ο συνολικός βαθμός της  $\beta$ . Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και η αναλυτική διαδικασία ιεράρχησης (AHP - Analytic hierarchy process), η θεωρία πολυκριτηριακής τιμής (MAVT - Multi-Attribute Value Theory), η θεωρία πολυκριτηριακής χρησιμότητας (MAUT - Multi-Attribute Utility Theory), η πολυκριτηριακή τεχνική απλής κατάταξης (SMART - Simple Multi-Attribute Rating Technique) και η μέτρηση της ελκυστικότητας από μία τεχνική βασισμένη στην κατηγοριοποιημένη αξιολόγηση (MACBETH - Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique).
- Μέθοδοι σχέσεων υπεροχής (Outranking methods). Στις μεθόδους αυτής της κατηγορίας οι εναλλακτικές προτάσεις συγκρίνονται ανά ζεύγη, αρχικά για κάθε κριτήριο, με στόχο να αναγνωρισθεί η έκταση στην οποία η μία εναλλακτική πρόταση υπερισχύει έναντι της άλλης. Μία σχέση υπεροχής είναι μία δυαδική σχέση (binary relation), που επιτρέπει στον λήπτη απόφασης να εκτιμήσει πόσο υπερέχει η μία εναλλακτική λύση  $\alpha$  ως προς μία άλλη  $\beta$ . Επιπλέον, οι σχέσεις υπεροχής λειτουργούν σε δύο φάσεις. Η πρώτη αφορά στην ανάπτυξη της σχέσης υπεροχής ανάμεσα στις εκτιμώμενες εναλλακτικές λύσεις. Η δεύτερη αφορά στην αξιοποίηση της αναπτυγμένης σχέσης υπεροχής για την επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής λύσης, την ταξινόμηση της σε ομογενείς ομάδες ή την κατάταξη της από τις περισσότερες στις λιγότερο προτιμητέες

εναλλακτικές λύσεις. Εδώ ανήκουν, η οικογένεια μεθόδων αποβολής και επιλογής εκφράζοντας την πραγματικότητα (ELECTRE - Elimination and Choice Expressing Reality), η οικογένεια μεθόδων προτίμησης κατάταξης για τον εμπλουτισμό των αξιολογήσεων (PROMETHEE - Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations), οι μέθοδοι ερευνητικού χειρισμού (ORESTE - Operations Research method) και οι μέθοδοι ανάλυσης καθεστώτος (Regime Analysis).

- Μέθοδοι λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων ή προγραμματισμός στόχων (Multi-Objective/Goal Programming). Στα μοντέλα αυτά προσδιορίζονται συγκεκριμένα επίπεδα επιθυμίας ή ικανοποίησης ως προς την επίτευξη του στόχου για κάθε ένα κριτήριο. Στόχος είναι ο προσδιορισμός των επιλογών, οι οποίες είναι πλησιέστερες στην επίτευξη του στόχου. Ο προγραμματισμός στόχων χρησιμοποιείται ως το αρχικό στάδιο μιας πολυκριτηριακής διαδικασίας, όταν δεν υπάρχουν προκαθορισμένες εναλλακτικές λύσεις. Σε μια τέτοια περίπτωση ο προγραμματισμός στόχων φιλτράρει εκτός της διαδικασίας τις περισσότερο ακατάλληλες εναλλακτικές λύσεις με ικανοποιητικό τρόπο. Οι μέθοδοι αυτής της κατηγορίας έχουν ως βασική ιδέα την επίλυση των ανισοτήτων  $z_i + \delta_i \geq g_i$ , όπου  $z_i$  είναι οι τιμές των κριτηρίων (attributes),  $\delta_i$  είναι οι μη αρνητικές μεταβλητές απόκλισης (deviational variables) και  $g_i$  είναι οι συγκεκριμένοι στόχοι (το επιθυμητό επίπεδο επίδοσης) για κάθε κριτήριο  $i$ . Ο στόχος είναι να βρεθεί μια εφικτή λύση  $(\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_k)$ , η οποία να ελαχιστοποιεί τις μεταβλητές απόκλισης  $\delta = [\delta_i]$ . Σε περίπτωση που είναι δυνατόν να βρεθεί λύση, όπου  $\delta_i = 0$  για όλα τα κριτήρια, τότε αυτή θα είναι η προτεινόμενη λύση. Σε κάθε περίπτωση, η απλούστερη μέθοδος για αυτό το σκοπό είναι η ελαχιστοποίηση του σταθμισμένου αθροίσματος των αποκλίσεων:

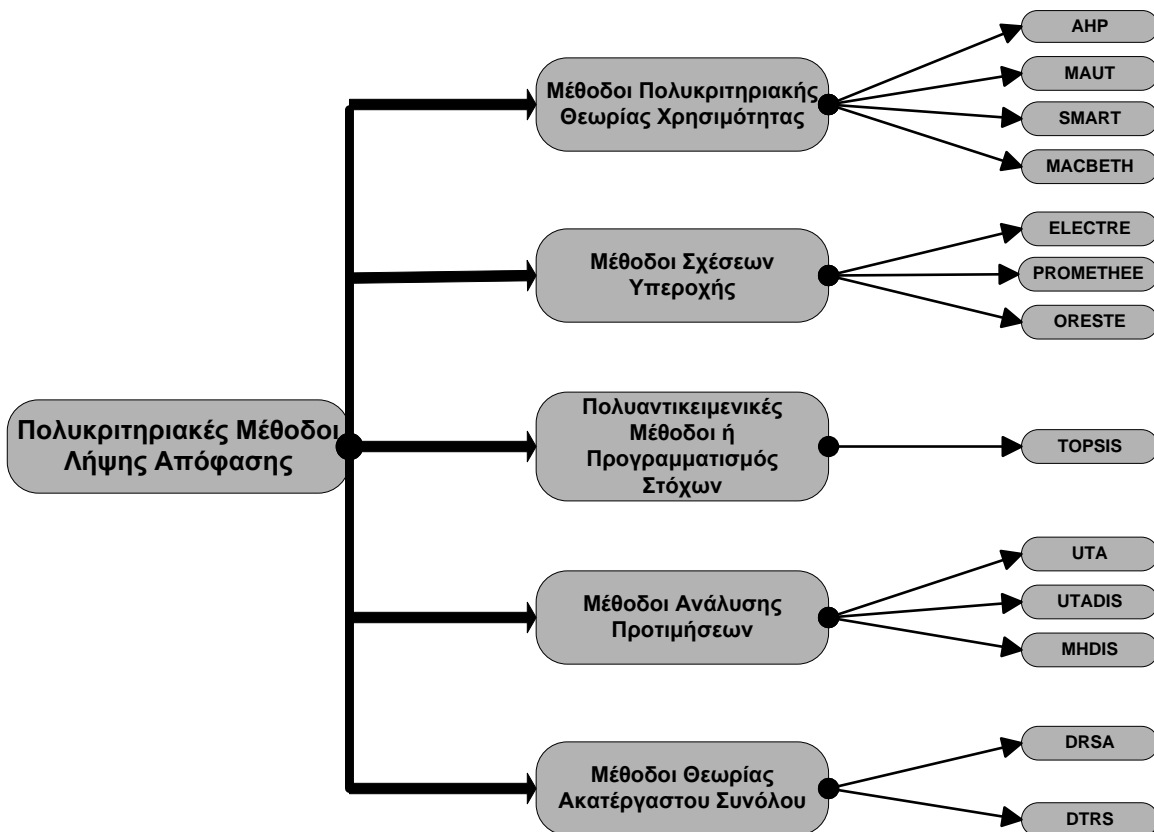
$$\sum_{i=1}^m w_i \delta_i = 0 \quad (2.1)$$

όπου  $w_i$  είναι ο συντελεστής βαρύτητας και  $\delta_i$  η απόκλιση του κριτηρίου  $i$ .

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι μέθοδοι: για τη σειρά προτίμησης με βάση την ομοιότητα στην ιδανική λύση (TOPSIS - Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), VIKOR κ.α.

- Μέθοδοι ανάλυσης προτιμήσεων (preference disaggregation). Η προσέγγιση ανάλυσης προτιμήσεων αναφέρεται στην ανάλυση των γενικότερων προτιμήσεων του λήπτη απόφασης με σκοπό να υπολογιστεί η σχετική σημασία των κριτηρίων αξιολόγησης, χρησιμοποιώντας τεχνικές παλινδρόμησης (ordinal regression techniques) που βασίζονται κυρίως στο γραμμικό προγραμματισμό. Η μέθοδος αξιολογεί τις συναρτήσεις ολικής και μερικής ικανοποίησης των ειδικών. Η ανάλυση προτιμήσεων βασίζεται στην απλή διαπίστωση ότι σε γενικές γραμμές, σε καταστάσεις πραγματικού κόσμου, οι λήπτες απόφασης είτε δε μπορούν είτε είναι απρόθυμοι να παρέχουν άμεσες τιμές στις προτιμήσεις τους και στα αντίστοιχα βάρη. Ακόμη και αν αυτό είναι δυνατόν, η διαδικασία που θα χρησιμοποιηθεί για να αποτυπώσει τις εν λόγω τιμές από τον λήπτη της απόφασης είναι χρονοβόρα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν μέθοδοι όπως οι αθροιστικές χρησιμότητες (UTA - Utilities Additives), οι διακρινουσες αθροιστικές χρησιμότητες (UTADIS - Utilities Additives Discriminants) και η ιεραρχική διάκριση πολλαπλής ομάδας (MHDIS - Multi-group Hierarchical DIScrimination).

- Μέθοδοι θεωρίας «ακατέργαστου συνόλου» (Rough set theory), όπως η μέθοδος ακατέργαστου συνόλου βασισμένη στην κυριαρχία (DRSA - Dominance-based rough set approach) και η μέθοδος ακατέργαστου συνόλου θεωρητικής απόφασης (DTRS - Decision-theoretic rough sets) [94]. Σύμφωνα με τις συγκεκριμένες μεθόδους ένα γενικότερο σύνολο εναλλακτικών προτάσεων αναλύεται σε δύο επιμέρους υποσύνολα. Το ένα υποσύνολο περιλαμβάνει τις εναλλακτικές προτάσεις που σίγουρα θα αποτελούν αντικείμενα ενδιαφέροντος για το εκάστοτε πρόβλημα, ενώ το άλλο υποσύνολο περιλαμβάνει τις εναλλακτικές προτάσεις που μπορεί ενδεχομένως να αποτελέσουν μέρος του συνόλου ενδιαφέροντος.



Εικόνα 30: Κατηγοριοποίηση Πολυκριτηριακών Μεθόδων

Στη συνέχεια, ακολουθεί περιγραφή των κυριότερων πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης απόφασης με βάση τις κατηγορίες της τελευταίας κατηγοριοποίησης.

## 2.3 Μέθοδοι Πολυκριτηριακής Θεωρίας Χρησιμότητας

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα περιγραφούν αναλυτικά οι μεθοδολογίες που ανήκουν στην κατηγορία των μεθόδων πολυκριτηριακής θεωρίας χρησιμότητας, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση που πραγματοποιήθηκε παραπάνω. Αναλυτικότερα θα παρουσιαστούν οι μεθοδολογίες AHP, MAUT, SMART και MACBETH.

### 2.3.1 Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP)

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία ή Αναλυτική Διαδικασία Ιεράρχησης είναι μια μεθοδολογία η οποία αναπτύχθηκε από τον Thomas Saaty, τη δεκαετία του '70 [99]. Η



ανάπτυξη της εν λόγω μεθόδου ήταν προϊόν προβληματισμού σχετικά με την έλλειψη μιας πρακτικής και εύκολα εφαρμόσιμης μεθόδου για τον καθορισμό προτεραιοτήτων και συνεπώς τη λήψη αποφάσεων. Πρόκειται για μια τεχνική αντιμετώπισης περίπλοκων προβλημάτων απόφασης, βασισμένη στα μαθηματικά αλλά και στην ανθρώπινη ψυχολογία και είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να συνδυάζει τη λογική αλλά και τη διαίσθηση σε ένα αποτελεσματικό πλαίσιο επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων. Η μεθοδολογία της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας βασίζεται σε μια ομάδα αξιωμάτων τα οποία οριοθετούν με σαφήνεια το πεδίο του προβλήματος, αναπαριστούν τη δομή του, ποσοτικοποιούν τις πληροφορίες του, συσχετίζουν τα επιμέρους στοιχεία του προβλήματος με απώτερους στόχους και αξιολογούν τις εκάστοτε εναλλακτικές λύσεις. Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία δεν απαιτεί οι κρίσεις του λήπτη απόφασης να είναι συνεπείς. Ο βαθμός της συνέπειας γνωστοποιείται στον λήπτη απόφασης και είναι αυτός ο οποίος θα αποφασίσει κατά πόσο η βαθμολογία των εναλλακτικών λύσεων είναι αξιόπιστη.

Η μέθοδος της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας, αν και έχει υποστεί αρκετή κριτική από μεθοδολογική άποψη, έχει καθιερωθεί σήμερα ως μια από τις πλέον εφαρμοσμένες τεχνικές ανάλυσης αποφάσεων, ενώ η διάδοσή της οφείλεται στην απλότητα, στη σαφήνεια αλλά και στην ευκολία υλοποίησής της. Η μέθοδος αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ανάθεσης των βαρών (weights) σε ένα σύνολο από δραστηριότητες, σύμφωνα με το βαθμό σημαντικότητάς τους. Για αυτό το σκοπό πραγματοποιούνται συγκρίσεις ανά ζεύγη και αναπτύσσεται μια κλίμακα προτίμησης μεταξύ των δραστηριοτήτων με βάση τις εκτιμήσεις των ειδικών στη λήψη της απόφασης. Αυτή η διαδικασία καταλήγει στον υπολογισμό των βαρών και των εκτιμήσεων για κάθε κριτήριο ή παράγοντα που ορίζεται στην ιεραρχία του προβλήματος. Το αρχικό πρόβλημα διασπάται σε επιμέρους τμήματα ή κριτήρια/παράγοντες, τα οποία ταξινομούνται ιεραρχικά δίνοντας αριθμητικές τιμές στις εκτιμήσεις της σχετικής σημασίας και τέλος, γίνεται η σύνθεση των εκτιμήσεων προκειμένου να προσδιοριστεί ποια μεταβλητή έχει τη μεγαλύτερη προτεραιότητα και συνεπώς επιρροή στο αποτέλεσμα. Ο καλύτερος τρόπος για να περιγράψει κανείς τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η περιγραφή των τεσσάρων βασικών λειτουργιών της που θα αναλυθούν στα επόμενα υποκεφάλαια λεπτομερώς:

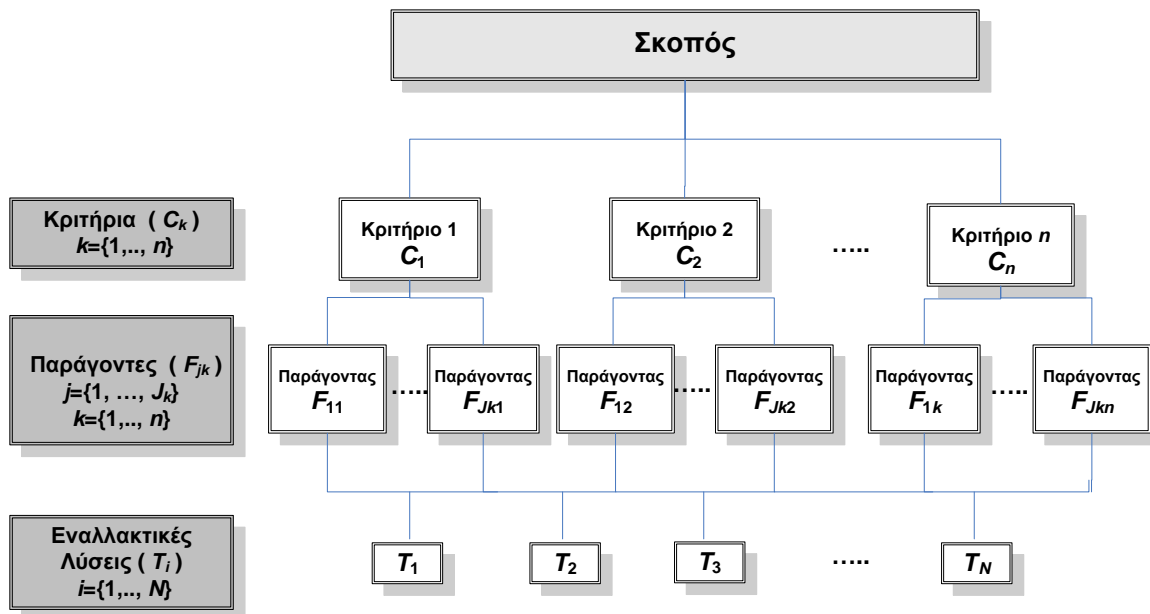
- την ιεραρχική ανάλυση του προβλήματος απόφασης σε στοιχεία απόφασης.
- τη συλλογή προτιμήσεων από τους ειδικούς που εμπλέκονται στη διαδικασία της απόφασης σχετικά με τα στοιχεία απόφασης, που αποτελεί το πρώτο μέρος της μεθοδολογίας συγκρίσεων ανά ζεύγη που θα αναλυθεί στη συνέχεια.
- τον υπολογισμό επιμέρους βαρών/προτεραιοτήτων για τα στοιχεία απόφασης, που αποτελεί το δεύτερο μέρος της μεθοδολογίας συγκρίσεων ανά ζεύγη.
- τη σύνθεση των επιμέρους βαρών σε γενικές προτεραιότητες/βάρη των εναλλακτικών λύσεων για την τελική κατάταξή τους.

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία έχει μελετηθεί αναλυτικά και έχει εφαρμοστεί σε πολλά προβλήματα της πολυκριτηριακής διαδικασίας λήψης απόφασης τα τελευταία σχεδόν 30 χρόνια. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ΑHP δεν έχει βρει εφαρμογή μόνο στον οικονομικό τομέα (επιχειρήσεις [100], βιομηχανία [101] κ.α.), αλλά παρουσιάζει πληθώρα ερευνητικών εργασιών και σε άλλους τομείς με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιείται στον κυβερνητικό τομέα [102] στον υγειονομικό κλάδο [103], στον τεχνολογικό τομέα [104], στην πολιτική, τη διοίκηση, το περιβάλλον, τον κοινωνικό τομέα, την εκπαίδευση [105], τις τηλεπικοινωνίες [106] καθώς και στον αθλητισμό [107]. Η ευρεία υιοθέτηση και

εφαρμογή της ΑHP οφείλεται στην απλότητα της μεθόδου, στην ευκολία χρήσης της καθώς και στο γεγονός ότι είναι εύκολα προσαρμόσιμη στο εκάστοτε υπό μελέτη πρόβλημα.

### 2.3.1.1 Ιεραρχική Ανάλυση του Προβλήματος

Το πρώτο στάδιο της μεθόδου, επιτρέπει στους λήπτες απόφασης να μοντελοποιήσουν ένα πολύπλοκο πρόβλημα σε μια ιεραρχική δομή, η οποία δείχνει τις συσχετίσεις ανάμεσα στον απώτερο στόχο του προβλήματος, τα αντικείμενα του προβλήματος (κριτήρια και υποκριτήρια/παράγοντες) αλλά και τις εναλλακτικές λύσεις (Εικόνα 31). Η λειτουργία αυτή είναι πολύ σημαντική αφού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα των αποτελεσμάτων της μεθόδου στη συνέχεια.



Εικόνα 31: Επίπεδα Ιεραρχικής Δομής

Μια τέτοια ιεραρχική δομή έχει τουλάχιστον τέσσερα επίπεδα:

1<sup>ο</sup> Επίπεδο: Στην κορυφή της ιεραρχίας τοποθετείται ο γενικότερος επιδιωκόμενος στόχος του προβλήματος απόφασης (π.χ. η εύρεση βέλτιστου συστήματος ψύξης σε κεντρικό διακομιστή).

2<sup>ο</sup> Επίπεδο: Σε ένα πρόβλημα απόφασης οι εναλλακτικές λύσεις, είναι αδύνατο να συγκριθούν απευθείας ως ένα γενικό στόχο (ως στόχος ορίζεται το αντικείμενο του υπό μελέτη προβλήματος) και για αυτό το λόγο στο δεύτερο επίπεδο ο επιδιωκόμενος στόχος αναλύεται σε επιμέρους υποστόχους οι οποίοι ονομάζονται κριτήρια απόφασης. Κριτήριο μπορεί να είναι και ένα ποιοτικό (μη μετρήσιμο) χαρακτηριστικό του υπό μελέτη προβλήματος. Συμβολίζουμε τα κριτήρια ως C<sub>k</sub>, όπου k είναι ακέραιος 1 ≤ k ≤ n και n είναι ο συνολικός αριθμός των κριτηρίων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του προβλήματος εύρεσης του βέλτιστου συστήματος ψύξης, η απόδοση, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η αξιοπιστία, τα οικονομικά ζητήματα, η ευελιξία καθώς και η συντήρηση θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντιπροσωπευτικά κριτήρια.

3<sup>ο</sup> Επίπεδο: Καθένα από τα κριτήρια C<sub>k</sub> του παραπάνω επιπέδου, αναλύεται ακόμα περισσότερο σε υποκριτήρια στα πρότυπα μιας ιεραρχικής δομής στο τρίτο επίπεδο. Με αυτό τον τρόπο ο γενικός στόχος αναλύεται σε έναν αριθμό περισσότερο

συγκεκριμένων υποστόχων, κατά τρόπο ώστε η ικανοποίηση των επιμέρους στόχων να έχει ως αποτέλεσμα την εξυπηρέτηση τελικά του γενικότερου αντικειμενικού σκοπού. Υποκριτήριο ή αλλιώς παράγοντας μπορεί να είναι ένα εξειδικευμένο χαρακτηριστικό που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και χαρακτηρίζει ένα κριτήριο. Οι παράγοντες του κριτηρίου  $C_k$  ονομάζονται ως  $F_{jk}$ , όπου  $j$  είναι ακέραιος  $1 \leq j \leq J_k$  και  $J_k$  είναι ο αριθμός των παραγόντων κάτω από το κριτήριο  $C_k$ . Για παράδειγμα, υπό το πρίσμα του κριτηρίου των οικονομικών θεμάτων, το κόστος κατασκευής καθώς και η κατανάλωση ενέργειας θα μπορούσαν να αποτελέσουν σημαντικούς παράγοντες, ενώ ο χρόνος θέρμανσης και εκκίνησης θα μπορούσε να αποτελεί παράγοντα του κριτηρίου της αξιοπιστίας.

4<sup>ο</sup> Επίπεδο: Αφού τα κριτήρια και τα υποκριτήρια απόφασης του δεύτερου και τρίτου επιπέδου έχουν αναλυθεί ή καλύτερα έχουν εξειδικευτεί τόσο ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τη σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων  $T_i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) του προβλήματος απόφασης, αυτές τοποθετούνται στο τελευταίο επίπεδο της ιεραρχίας.

Η δομή, το μέγεθος και γενικότερα ο βαθμός λεπτομέρειας της ιεραρχίας εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του προβλήματος και το βαθμό ανάλυσης που επιθυμεί να προσδώσει ο λήπτης των εκάστοτε αποφάσεων. Στην Εικόνα 31 αποτυπώνεται μια τυπική ιεραρχική δομή τεσσάρων επιπέδων σύμφωνα με τις ανάγκες της μεθόδου ΑHP. Ο απώτερος σκοπός (Goal) αναλύεται σε υποστόχους, τα κριτήρια (criteria) απόφασης  $C_k$ . Κάθε ένα από τα κριτήρια αυτά αναλύεται σε έναν αριθμό από ακόμη λεπτομερέστερα στοιχεία απόφασης (υποκριτήρια/παράγοντες, factors)  $F_{jk}$ . Στο τελευταίο επίπεδο της ιεραρχίας βρίσκονται οι εναλλακτικές (alternatives) λύσεις  $T_i$ .

### 2.3.1.2 Μεθοδολογία Συγκρίσεων Ανά Ζεύγη

Στην παρούσα υποπαράγραφο πρόκειται να αναλυθεί η διαδικασία συγκρίσεων ανά ζεύγη (PWC - pairwise comparison), που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της μεθόδου Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας. Σύμφωνα με την εν λόγω μεθοδολογία, ένα πλήθος ειδικών καλούνται να συμπληρώσουν τους πίνακες ανά ζεύγη συγκρίσεων των κριτηρίων και των παραγόντων υπό το πρίσμα του εκάστοτε κριτηρίου, καθώς επίσης και των εναλλακτικών λύσεων υπό το πρίσμα ενός συγκεκριμένου παράγοντα κάθε φορά. Στη συνέχεια, μέσω μια μαθηματικής διαδικασίας, που πρόκειται να αναλυθεί παρακάτω, υπολογίζονται τα αντίστοιχα βάρη των κριτηρίων, παραγόντων και οι σχετικές προτεραιότητες των εναλλακτικών, δεδομένα που θα συνδεθούν μετέπειτα για τον υπολογισμό των τελικών προτεραιοτήτων των εναλλακτικών λύσεων στο πλαίσιο της ΑHP. Αναλυτικότερα η μεθοδολογία συγκρίσεων ανά ζεύγη χωρίζεται σε δύο στάδια: στην αποτύπωση των προτιμήσεων των στοιχείων απόφασης από τους ειδικούς και στην εκτίμηση των αντίστοιχων σχετικών προτεραιοτήτων-βαρών.

#### A. Αποτύπωση Προτιμήσεων Στοιχείων Απόφασης

Στη δεύτερη λειτουργία της μεθόδου ΑHP συγκρίνονται κατά ζεύγη ως προς το βαθμό προτίμησης, τα στοιχεία κάθε επιπέδου της ιεραρχικής δομής σε σχέση με το στοιχείο του αμέσως ανώτερου επιπέδου. Οι συγκρίσεις αυτές πραγματοποιούνται από ένα πλήθος ειδικών που σχετίζονται με το εκάστοτε πρόβλημα και λαμβάνουν μέρος στη λήψη της απόφασης. Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτη φάση τα κριτήρια  $C_k$  συγκρίνονται μεταξύ τους ανά ζεύγη έχοντας ως πρίσμα τη σημαντικότητά τους ως προς τον γενικότερο στόχο. Στη συνέχεια, τα υποκριτήρια/παράγοντες  $F_{jk}$  συγκρίνονται αντίστοιχα με βάση τη συνεισφορά τους στο κάθε κριτήριο στο οποίο ανήκουν. Τέλος, οι εναλλακτικές λύσεις  $T_i$  συγκρίνονται μεταξύ τους κάτω από το πρίσμα του εκάστοτε

παράγοντα, αξιολογώντας την απόδοσή τους στον αντίστοιχο παράγοντα. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάζονται πίνακες, οι λεγόμενοι πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη (pairwise comparison matrices). Κάθε ειδικός, που συμμετέχει στην προσπάθεια, πρέπει να εισάγει τα δεδομένα του προβλήματος εκφράζοντας τις προτιμήσεις του μέσω συγκρίσεων ανά ζεύγη όλων των στοιχείων του επιπέδου της ιεραρχίας (κριτήρια, υποκριτήρια/παράγοντες, εναλλακτικές), που καθορίστηκαν στη λειτουργία της ιεραρχικής ανάλυσης του προβλήματος, για την εκτίμηση της σπουδαιότητας (ή της προτεραιότητας), που έχει το ένα έναντι του άλλου για την επίτευξη του αντικειμενικού σκοπού. Συγκεκριμένα, ο εκάστοτε ειδικός για τη λήψη της απόφασης, συγκρίνει ανά δύο όλα τα στοιχεία του επιπέδου μεταξύ τους υπό το πρίσμα κάθε φορά του στοιχείου του προηγούμενου επιπέδου της ιεραρχίας.

Η διαδικασία αυτή τερματίζεται με τις συγκρίσεις όλων των εναλλακτικών λύσεων του τελευταίου επιπέδου της ιεραρχίας, σε σχέση με τα στοιχεία του αμέσως προηγούμενου επιπέδου υπό το πρίσμα του ίδιου παράγοντα που ανήκει στο εκάστοτε κριτήριο κάθε φορά. Για την έκφραση των προτιμήσεων κατά τη διεξαγωγή των συγκρίσεων, ο Saaty [108] πρότεινε να χρησιμοποιείται μια αριθμητική κλίμακα, μέσω του συστήματος διακριτών αξιών, από το 1 έως το 9, η οποία εκφράζει την ισοδυναμία των προτιμήσεων, την ασθενή προτίμηση, την ισχυρή προτίμηση, την απόλυτη προτίμηση καθώς και ενδιάμεσες καταστάσεις, όπως παρουσιάζει παρακάτω ο Πίνακας 21. Τα σύμβολα  $A_{ij}$  αντιστοιχούν στις τιμές των συγκρίσεων ανά ζεύγη, στην περίπτωση των κριτηρίων  $C_k$  ή των παραγόντων  $F_{jk}$  ή των εναλλακτικών  $T_i$ , ανάλογα με το επίπεδο της ιεραρχίας, στο οποίο πραγματοποιούνται οι συγκρίσεις κάθε φορά, λαμβάνοντας υπόψη ότι το  $i$  συγκρίνεται με το  $j$ .

Πίνακας 21: Κλίμακα Αξιολόγησης Συγκρίσεων ανά Ζεύγη (Nine Level Scale)

$A_{ij}$	Ορισμός
1	Το $i$ είναι ίσης σημασίας με το $j$
3	Το $i$ είναι λίγο πιο σημαντικό από το $j$
5	Το $i$ είναι πολύ πιο σημαντικό από το $j$
7	Το $i$ είναι πάρα πολύ πιο σημαντικό από το $j$
9	Το $i$ είναι αποδεδειγμένα εξαιρετικά πιο σημαντικό από το $j$
2, 4, 6, 8	Ενδιάμεσες τιμές
Αντίστροφες τιμές	Τα αντίστροφα των παραπάνω χρησιμοποιούνται με ανάλογο τρόπο όταν το $j$ είναι πιο σημαντικό ή ίσο με το $i$

Ένας τέτοιος πίνακας που περιέχει συγκρίσεις ανά ζεύγη ανάμεσα στα στοιχεία του ίδιου επιπέδου πρέπει να έχει την παρακάτω μορφή:

$$A=[A_{ij}] = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

όπου  $A_{ij}$  είναι η σύγκριση του ζεύγους των στοιχείων (κριτηρίων, παραγόντων ή

εναλλακτικών)  $i$  και  $j$  του επιπέδου της ιεραρχίας υπό το πρίσμα του προηγούμενου επιπέδου.

Το σύνολο των δυνατών αριθμητικών διαβαθμίσεων  $R$  των προτιμήσεων με βάση την κλίμακα του Saaty είναι:

$$R = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9\}$$

Ο εκάστοτε ειδικός αποτυπώνει τις προτιμήσεις του στον πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη, που έχει τη μορφή του πίνακα  $A$ . Πιο συγκεκριμένα, συμπληρώνει το άνω τριγωνικό μέρος του πίνακα συγκρίνοντας κάθε φορά το κριτήριο/υποκριτήριο/εναλλακτική  $i$  σε σχέση με το  $j$  και συμπληρώνοντας την τιμή από την κλίμακα των εννέα επιπέδων του Saaty ανάλογα με τον αν το  $i$  υπερτερεί του  $j$  και το αντίθετο.

Για να υπολογιστούν τα σχετικά βάρη των  $n$  στοιχείων, είναι απαραίτητο να γίνουν οι συγκρίσεις μόνο για τα μισά στοιχεία του πίνακα, εξαιρουμένων και των στοιχείων της διαγωνίου. Οι συγκρίσεις δηλαδή αφορούν, όπως προαναφέρθηκε, το άνω τριγωνικό μέρος του πίνακα. Με την εκτέλεση του πλήρους συνόλου κατά ζεύγη συγκρίσεων συλλέγονται περισσότερες πληροφορίες από τις απαραίτητες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να λαμβάνεται μια καλύτερη αξιολόγηση, και εάν μια ή περισσότερες απαντήσεις είναι ανακριβείς, οι άλλες απαντήσεις θα αντισταθμίσουν την ανακρίβεια. Ο αριθμός των συγκρίσεων,  $J$ , που πρέπει να γίνουν σε ένα πίνακα διαστάσεων  $n \times n$  δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$J = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2.3)$$

Ένα από τα δυνατά σημεία της AHP είναι η δυνατότητα να αξιολογήσει τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά τα κριτήρια και τις εναλλακτικές λύσεις στην ίδια κλίμακα προτίμησης όσον αφορά τις συγκρίσεις ανά ζεύγη. Η χρήση της λεκτικής των απαντήσεων, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 21, είναι διαισθητικά ελκυστική και πιο κοινή στην καθημερινή ζωή σε σχέση με την απλή αποτύπωση των αριθμών. Προκειμένου να υπολογιστούν αριθμητικά οι προτεραιότητες των κριτηρίων/παραγόντων/εναλλακτικών έπρεπε οι λεκτικοί χαρακτηρισμοί στις συγκρίσεις να αποτυπωθούν σε αριθμητικές τιμές, όπως έγινε στην κλίμακα του Saaty (Πίνακας 21), όπου μετατρέπονται σε ακέραιους αριθμούς από το ένα ως το εννιά. Η γραμμική κλίμακα προτίμησης που αποτελείται από ακέραιους από το ένα έως το εννέα και αντιστρόφων τους χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές της μεθόδου συγκρίσεων ανά ζεύγη. Παρ' όλα αυτά, έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς στη βιβλιογραφία εναλλακτικές κλίμακες προτίμησης που συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 22: Εναλλακτικές Κλίμακες Προτίμησης**

Τύπος Κλίμακας	Ορισμός	Παράμετροι
Γραμμική [108]	$c = a \cdot x$	$a > 0; x = \{1, 2, \dots, 9\}$
Δυναμική [109]	$c = x^a$	$a > 1; x = \{1, 2, \dots, 9\}$

Γεωμετρική [110]	$c = a^{x-1}$	$a > 1; x = \{1, 2, \dots, 9\}$
Λογαριθμική [111]	$c = \log_a(x + (a - 1))$	$a > 1; x = \{1, 2, \dots, 9\}$
Τετραγωνικής Ρίζας [109]	$c = \sqrt[x]{x}$	$a > 1; x = \{1, 2, \dots, 9\}$
Ασυμπτωτική [112]	$c = \tanh^{-1}\left(\frac{\sqrt{3}(x-1)}{14}\right)$	$x = \{1, 2, \dots, 9\}$
Αντιστρόφως Γραμμική [113]	$c = \frac{9}{10 - x}$	$x = \{1, 2, \dots, 9\}$
Ισοροπημένη [114]	$c = \frac{\omega}{1 - \omega}$	$\omega = \{0.5, 0.55, 0.6, \dots, 0.9\}$
Ποσοστιαία [104]	$c = \frac{x}{100 - x}$	$x = \{0.1, \dots, 100\}$

Σύμφωνα με τις κλίμακες που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα, εάν υποθέσουμε δύο κριτήρια  $C_1$  και  $C_2$ , τότε εάν  $c=1$  αυτό υποδεικνύει ότι το  $C_1$  είναι ίσης προτίμησης με το  $C_2$ . Εάν  $c>1$  τότε το  $C_1$  προτιμάται από το  $C_2$ , ενώ εάν  $c<1$  τότε το  $C_2$  είναι προτιμότερο από το  $C_1$ . Στις ανωτέρω κλίμακες χρησιμοποιούνται και οι αντίστροφες τιμές  $1/c$ , που υπάρχουν αντίστοιχα και στην κλίμακα του Saaty.

### **B. Εκτίμηση Σχετικών Προτεραιοτήτων – Βαρών Στοιχείων Απόφασης**

Σε αυτό το στάδιο γνωρίζοντας τις προτιμήσεις του εκάστοτε ειδικού στη λήψη της απόφασης, όπως αυτές εκφράστηκαν μέσω των συγκρίσεων που έγιναν στο προηγούμενο βήμα, η μέθοδος υπολογίζει τα σχετικά βάρη των στοιχείων του επιπέδου, σε σχέση με τα στοιχεία του αμέσως προηγούμενου επιπέδου, βάσει των οποίων έγιναν οι συγκρίσεις. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων  $w_k$  και των υποκριτηρίων/παραγόντων  $f_{jk}$ , που υπάγονται στο εκάστοτε κριτήριο  $k$ . Τέλος οι εναλλακτικές λύσεις συγκρίνονται ανά ζεύγη υπό το πρίσμα του εκάστοτε παράγοντα και για κάθε εναλλακτική  $T_i$  υπολογίζονται οι σχετικές προτεραιότητες  $S_{ijk}$  κάτω από κάθε παράγοντα  $F_{jk}$ .

Εκτός από τα βάρη, σε αυτή τη φάση της μεθόδου, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η συνέπεια. Στην περίπτωση του πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη λαμβάνεται υπόψη η συνέπεια, που βασίζεται στη μεταβατική ιδιότητα. Δηλαδή αν το στοιχείο A είναι πιο σημαντικό από το B και το A σημαντικότερο από το Γ, τότε θα πρέπει και το B να είναι πιο σημαντικό από το Γ. Διαφορετικά ο πίνακας δεν είναι συνεπής. Η μέθοδος AHP αφήνει περιθώρια ασυνέπειας στις προτιμήσεις του αποφασίζοντος, αλλά ταυτόχρονα παρέχει δείκτες μέτρησης της ασυνέπειας. Ο Saaty [115] έδειξε ότι για να κρατηθεί το επίπεδο της ασυνέπειας σε χαμηλά επίπεδα, ο αριθμός των συγκρινόμενων στοιχείων πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος με 7. Μερικοί λόγοι οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν σε ασυνέπεια παρουσιάζονται παρακάτω :

- Έλλειψη πληροφοριών. Εάν οι πληροφορίες που έχει συλλέξει ο ειδικός, σχετικά με το αντικείμενο για το οποίο καλείται να λάβει απόφαση, δεν είναι πλήρεις τότε οι αποφάσεις στις οποίες θα καταλήξει θα είναι τυχαίες και θα χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ασυνέπειας.

- Έλλειψη συγκέντρωσης. Η έλλειψη συγκέντρωσης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας λήψης απόφασης, μπορεί να συμβεί εάν ο αποφασίζων είναι κουρασμένος ή δεν ενδιαφέρεται πραγματικά για την απόφαση.
- Ανεπάρκεια στο σχεδιασμό της δομής του προβλήματος. Ο σωστός σχεδιασμός της ιεραρχικής δομής του προβλήματος είναι πολύ σημαντικός για τη σωστή λήψη μιας απόφασης. Όλα τα στοιχεία απόφασης του επιπέδου πρέπει να είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα υπόλοιπα στοιχεία απόφασης του ίδιου επιπέδου.

Η συνέπεια των κρίσεων και των αποφάσεων κατά την εφαρμογή της AHP σχετίζεται άμεσα με την συνέπεια του πίνακα ανά ζεύγη συγκρίσεων. Σε γενικές γραμμές με τον όρο συνέπεια ενός πίνακα (consistency of a matrix) εννοούμε ότι όταν γνωρίζουμε ένα βασικό ποσοστό των στοιχείων μιας σειράς του πίνακα, τότε τα υπόλοιπα στοιχεία μπορούν να εξαχθούν λογικά από αυτό.

Ο τρόπος υπολογισμού των βαρών από τον πίνακα συγκρίσεων στηρίζεται στην ακόλουθη λογική. Αν ο ειδικός ήταν σε θέση να γνωρίζει τα πραγματικά βάρη των στοιχείων απόφασης, τότε ο πίνακας των κατά ζεύγη συγκρίσεων, έστω  $\mathbf{A}'$ , θα είχε την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{A}' = [A'_{ij}] = \begin{bmatrix} \frac{w'_i}{w'_j} \\ \frac{w'_i}{w'_j} \\ \vdots \\ \frac{w'_i}{w'_j} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{w'_1}{w'_1} & \frac{w'_1}{w'_2} & \dots & \frac{w'_1}{w'_n} \\ \frac{w'_2}{w'_1} & \frac{w'_2}{w'_2} & \dots & \frac{w'_2}{w'_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{w'_n}{w'_1} & \frac{w'_n}{w'_2} & \dots & \frac{w'_n}{w'_n} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Στην περίπτωση αυτή τα βάρη προκύπτουν από τις γραμμές ή τις στήλες του πίνακα. Για ένα τέτοιο πίνακα ισχύει το εξής ιδιοπρόβλημα:

$$\mathbf{A}'\mathbf{w}' = n\mathbf{w}' \quad (2.5)$$

,όπου  $\mathbf{w}' = (w'_1, \dots, w'_n)$  είναι το διάνυσμα των πραγματικών βαρών και  $n$  είναι το πλήθος των συγκρινόμενων στοιχείων. Σύμφωνα με την ορολογία της γραμμικής άλγεβρας, τα  $n$  και  $\mathbf{w}'$  είναι αντίστοιχα η μέγιστη ιδιοτιμή και το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα του πίνακα  $\mathbf{A}'$ . Εάν το  $A'_{ij}$  αντιστοιχεί στην σημαντικότητα του κριτηρίου  $i$  έναντι του κριτηρίου  $j$  και το  $A'_{jk}$  αντιστοιχεί στην σημαντικότητα του κριτηρίου  $j$  έναντι του κριτηρίου  $k$ , τότε η σημαντικότητα του  $i$  έναντι του  $k$  θα πρέπει να είναι ίση με  $A'_{ij}A'_{jk}$  ή να ισχύει  $A'_{ij}A'_{jk} = A'_{ik} \quad \forall i, j, k$ , προκειμένου ο πίνακας  $\mathbf{A}'$  να είναι συνεπής (consistent). Ο παραπάνω πίνακας, που στηρίζεται στην υπόθεση ότι τα βάρη είναι γνωστά, έχει αυτή την ιδιότητα, δηλαδή είναι συνεπής εφόσον:

$$A'_{ij}A'_{jk} = \frac{w'_i}{w'_j} \frac{w'_j}{w'_k} = \frac{w'_i}{w'_k} = A'_{ik} \quad (2.6)$$

Και λόγω αντιστροφής των στοιχείων του πίνακα:

$$A'_{ji} = \frac{w'_j}{w'_i} = \frac{1}{w'_i w'_j} = \frac{1}{A'_{ij}} \quad (2.7)$$

Στην πραγματικότητα όμως ο ειδικός δε γνωρίζει τα πραγματικά βάρη  $w'$  και κατά συνέπεια δεν είναι σε θέση να προσδιορίσει με ακρίβεια τα στοιχεία του πίνακα  $A'$ , δηλαδή τα πηλικά των βαρών που εκφράζουν την σχετική προτίμηση του ενός στοιχείου έναντι του άλλου. Έτσι είναι φυσικό, ο πίνακας συγκρίσεων, όπως δίδεται από τον εκάστοτε εμπειρογνώμονα, να περιέχει ανακολουθίες/ασυνέπειες.

Σε αυτήν την περίπτωση, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι εάν τα  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  ικανοποιούν τη σχέση  $A'x = \lambda x$ , τότε τα  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  αποτελούν ιδιοτιμές του πίνακα

$A'$  και εάν  $A'_{ii} = 1$  τότε:  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = n$ . Συνεπώς, εάν ισχύει η σχέση (2.5), τότε όλες οι ιδιοτιμές είναι μηδενικές εκτός από μια που ισούται με  $n$ . Έτσι στην περίπτωση όπου ο πίνακας  $A'$  είναι συνεπής, η μεγαλύτερη ιδιοτιμή ισούται με  $n$ .

Εάν οι τιμές  $A'_{ij}$  του πίνακα  $A'$ , ο οποίος είναι ένας θετικός αντιστρέψιμος πίνακας υποστούν κάποια μικρή αλλαγή, τότε και οι ιδιοτιμές θα υποστούν μια μικρή μεταβολή αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, εάν η διαγώνιος του πίνακα  $A'$  είναι ίση με τη μονάδα ( $A'_{ii} = 1$ ) και ο πίνακας είναι συνεπής, τότε ακόμη και με μικρές μεταβολές στις τιμές των  $A'_{ij}$ , η μεγαλύτερη ιδιοτιμή  $\lambda_{\max}$  θα παραμένει κοντά στο  $n$  και οι υπόλοιπες ιδιοτιμές κοντά στο μηδέν. Θεωρούμε ότι με αυτές τις μικρές διαταραχές του πίνακα  $A'$  μπορεί να προκύψει ο πίνακας  $A=[A_{ij}]$ , ο οποίος είναι σχεδόν συνεπής (nearly consistent) και αντιστοιχεί στις πραγματικές κρίσεις των ειδικών στη λήψη απόφασης. Στην ουσία αντί ο εκάστοτε ειδικός να αναθέσει στον πίνακα  $A$  το λόγο δύο αριθμών  $w_i$  και  $w_j$ , αναθέτει έναν αριθμό σύμφωνα με την κλίμακα του Saaty (Πίνακας 21), ο οποίος αντιστοιχεί στην πλησιέστερη τιμή στο λόγο  $w_i/w_j$  [115]. Η καινούργια κλίμακα θα καθορίσει ποια είναι τα  $w_i$  και  $w_j$  για τα αντίστοιχα κριτήρια. Συνεπώς, το πρόβλημα συνοψίζεται ως εξής: Εάν  $A$  είναι ο πίνακας που περιέχει τις τιμές των δυαδικών συγκρίσεων, για να βρεθεί το διάνυσμα των βαρών, πρέπει να βρεθεί διάνυσμα  $w$ , τέτοιο ώστε  $Aw = \lambda_{\max} w$ , όπου  $A, \lambda_{\max}, w$  είναι αντίστοιχα ο πίνακας των ανά ζεύγη συγκρίσεων, η μέγιστη ιδιοτιμή του πίνακα και το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα. Το εκτιμώμενο διάνυσμα  $w$  αποτελεί προσέγγιση του διανύσματος των πραγματικών σχετικών βαρών. Η ιδιοτιμή  $\lambda_{\max}$  μπορεί να θεωρηθεί ως μια εκτίμηση του  $n$ , δηλαδή του πλήθους των συγκρινόμενων στοιχείων (διάσταση του πίνακα  $A$ ).

Δεδομένου του ορισμού ενός συνεπή πίνακα, στην προκειμένη περίπτωση όπου  $n$  στοιχεία αντιπροσωπεύονται μέσω  $n-1$  δυαδικών συγκρίσεων, η τιμή της πρωτεύουσας ιδιοτιμής είναι το βασικό εργαλείο για τον έλεγχο της συνέπειας. Από αυτήν προκύπτει το πρωτεύον ιδιοδιάνυσμα το οποίο όταν κανονικοποιείται γίνεται το διάνυσμα των βαρών. Έχει αποδειχθεί ότι ένας πίνακας είναι συνεπής μόνο εάν  $\lambda_{\max}=n$ . Στην περίπτωση που ο πίνακας είναι ασυνεπής τότε  $\lambda_{\max} > n$  [116]. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι μικρές αλλαγές στις τιμές των στοιχείων του πίνακα οδηγούν σε μικρές αλλαγές στην πρωτεύουσα ιδιοτιμή  $\lambda_{\max}$ . Έτσι, η σχέση  $\lambda_{\max} - n$  αποτελεί το μέτρο για την συνέπεια. Μάλιστα, όσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά  $\lambda_{\max} - n$  τόσο μεγαλύτερες είναι οι ασυνέπειες μεταξύ των τιμών του πίνακα  $A$ . Στην ιδιότητα αυτή στηρίζεται ο δείκτης συνέπειας (CI - Consistency Index), ο οποίος χαρακτηρίζει την απόκλιση της συνέπειας, και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση [117], δεδομένης της κανονικοποίησης του  $\lambda_{\max} - n$  σύμφωνα με το μέγεθος του πίνακα:



$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2.8)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται και ο λόγος συνέπειας (CR - Consistency Ratio) με στόχο να εξεταστεί κατά πόσο οι συγκρίσεις που έγιναν μέχρι τώρα και οι προτιμήσεις που εκφράστηκαν είναι συνεπείς. Ο λόγος CR υπολογίζεται συγκρίνοντας τον CI με τον κατάλληλο τυχαίο δείκτη συνέπειας (RI - Random Index). Ο RI είναι ένας τυχαίος δείκτης ο οποίος έχει υπολογιστεί με την χρήση ενός μεγάλου δείγματος από πίνακες αυξανόμενης τάξης  $n$ , που έχουν παραχθεί τυχαία. Οι τιμές του τυχαίου δείκτη δίνονται από έναν πίνακα τον οποίο έχει καταρτίσει ο Saaty, χρησιμοποιώντας μεγάλο δείγμα πινάκων με αριθμό τάξης έως  $15^{\text{η}}$ , υπολογίζοντας κατά μέσο όρο τον δείκτη συνέπειας για κάθε τάξη. Ο παρακάτω (Πίνακας 23) δίνει το μέγεθος του πίνακα και τον αντίστοιχο μέσο RI

**Πίνακας 23: Τιμές Δείκτη Τυχαίου Λόγου Ασυνέπειας RI**

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Δηλαδή ο CR είναι ο λόγος του CI προς τον αντίστοιχο RI:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.9)$$

Ο δείκτης, λοιπόν, που κρίνει τελικώς την συνέπεια των αποτελεσμάτων και ολοκληρώνει έτσι και τον έλεγχο συνέπειας, είναι ο CR. Όπως φαίνεται και από την (2.9) ο CR είναι αντιστρόφως ανάλογος με την συνέπεια των κρίσεων. Ο Saaty έχει θέσει ως όριο την τιμή 0,1 [118] για την αποδοχή των αποτελεσμάτων. Εάν ο CR είναι μεγαλύτερος από την τιμή αυτή θεωρείται ασυνεπής και τότε οι συγκρίσεις θα πρέπει να ξαναγίνουν, αφού μάλλον έγιναν τυχαία. Υπάρχει μάλιστα η δυνατότητα, σύμφωνα με τη θεωρία, να γίνει ένας ελάχιστος αριθμός συγκρίσεων και οι υπόλοιπες να υπολογιστούν έτσι ώστε να καταλήξουμε σε μία μη ρεαλιστική, τέλεια συνέπεια. Οι πίνακες λοιπόν με  $CR \leq 0,1$  θεωρούνται σχεδόν συνεπείς και γίνονται αποδεκτοί.

Οι τρεις αυτοί δείκτες ολοκληρώνουν και τον έλεγχο συνέπειας της μεθόδου. Η γνώση της ασυνέπειας επιτρέπει ακολούθως και την αναγνώριση των κρίσεων οι οποίες απαιτούν αναθεώρηση [118]. Το γεγονός ότι από την ίδια την μέθοδο προβλέπονται τρόποι για μέτρηση της συνέπειας των κρίσεων, την διαχωρίζει ριζικά από τις περισσότερες αναλυτικές μεθόδους αποφάσεων οι οποίες δεν έχουν κανέναν επίσημο τρόπο ελέγχου της συνέπειας, και την καθιστά ως μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους.

Για τον υπολογισμό των βαρών έχουν προταθεί αρκετές μέθοδοι μεταξύ των οποίων ξεχωρίζουν η μέθοδος του ιδιοδιανύσματος (EM - Eigenvector Method), οι μέθοδοι του γεωμετρικού μέσου (GMM - Geometric Mean Method), των ελαχίστων τετραγώνων (LSM - Least Square Method) καθώς και των λογαριθμικών ελαχίστων τετραγώνων (LLSM - Logarithmic Least Square Method). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η μέθοδος του ιδιοδιανύσματος είναι εκείνη που χρησιμοποιείται κατά κόρον τόσο στις διάφορες εφαρμογές όσο και στις ερευνητικές εργασίες που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο της AHP [117].

Η μέθοδος του ιδιοδιανύσματος, που αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία για τον

υπολογισμό των σχετικών βαρών των στοιχείων του εκάστοτε επιπέδου, βασίζεται στην επίλυση του προαναφερθέντος ιδιοπροβλήματος  $\mathbf{A}\mathbf{w} = \lambda_{\max} \mathbf{w}$ .

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ίδια διαδικασία ακολουθείται για κάθε ειδικό  $m$ , από ένα σύνολο  $M$  εμπειρογνωμόνων, που λαμβάνει μέρος στη διαδικασία λήψης απόφασης, το ιδιοπρόβλημα ανάγεται ως εξής:  $\mathbf{A}^{(m)}\mathbf{w}^{(m)} = \lambda_{\max}^{(m)}\mathbf{w}^{(m)}$ . Θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί το ιδιοδιάνυσμα  $\mathbf{x}^{(m)} = [x_k^{(m)}]$  του πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη, που αντιστοιχεί στην μέγιστη ιδιοτιμή  $\lambda_{\max}^{(m)}$ . Στη συνέχεια, τα βάρη για τον εκάστοτε ειδικό στη λήψη απόφασης  $m$  από ένα σύνολο  $M$  ειδικών, υπολογίζονται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$w_k^{(m)} = x_k^{(m)} \left[ \sum_{l=1}^n x_l^{(m)} \right]^{-1} \quad (2.10)$$

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για τον υπολογισμό των βαρών των υποκριτηρίων  $f_{jk}^{(m)}$  και των σχετικών προτεραιοτήτων των εναλλακτικών ως προς τους παράγοντες  $S_{ijk}^{(m)}$ .

Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι υπόλοιπες μέθοδοι που προαναφέρθηκαν.

### Η μέθοδος του γεωμετρικού μέσου(GMM)

Η μέθοδος του γεωμετρικού μέσου [119] δίνει κατά προσέγγιση στις περισσότερες περιπτώσεις σωστά αποτελέσματα. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο πρέπει πρώτα να πολλαπλασιαστούν τα  $n$  στοιχεία κάθε γραμμής του πίνακα συγκρίσεων, στη συνέχεια υπολογίζεται η  $n$ -οστή ρίζα και τα αποτελέσματα των υπολογισμών εισάγονται σε μια νέα στήλη, η οποία στη συνέχεια κανονικοποιείται διαιρώντας κάθε ένα στοιχείο με το άθροισμα των στοιχείων της στήλης.

Τα βάρη των  $n$  κριτηρίων  $w_k^{(m)}$  όπου  $1 \leq k \leq n$  υπολογίζονται μέσω των ακόλουθων εξισώσεων:

$$GM_i^{(m)} = \left\{ \prod_{j=1}^n A_{ij}^{(m)} \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (2.11)$$

$$w_k^{(m)} = \frac{GM_k^{(m)}}{\sum_{k=1}^n GM_k^{(m)}} \quad (2.12)$$

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται και οι σχετικές προτεραιότητες ή αλλιώς τα βάρη των υποκριτηρίων  $f_{jk}^{(m)}$  και των εναλλακτικών υπό το πρίσμα των παραγόντων  $S_{ijk}^{(m)}$ .

### Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων(LSM)

Εναλλακτικά των παραπάνω μεθόδων για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων/παραγόντων καθώς και των εναλλακτικών λύσεων, χρησιμοποιείται και η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων [118]. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο γίνεται προσπάθεια να συγκλίνει ο πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη  $\mathbf{A}^{(m)}$  σε έναν τέλεια συνεπή πίνακα (του οποίου τα στοιχεία είναι της μορφής  $w_i^{(m)}/w_j^{(m)}$ ). Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων βρίσκει το διάνυσμα βαρών  $\mathbf{w}^{(m)}$  ελαχιστοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$Q_{\text{LSM}} = \sum_{i,j=1}^n \left( A_{ij}^{(m)} - \frac{w_i^{(m)}}{w_j^{(m)}} \right)^2 \quad (2.13)$$

Αντίστοιχα υπολογίζονται τα βάρη των υποκριτηρίων  $f_{jk}^{(m)}$  και των εναλλακτικών υπό το πρίσμα των παραγόντων  $R_{ijk}^{(m)}$ .

### Η μέθοδος των λογαριθμικών ελαχίστων τετραγώνων(LLSM)

Παράλληλα, σε πολλές περιπτώσεις συγκρίσεων ανά ζεύγη έχει εφαρμοστεί και η μέθοδος λογαριθμικών ελαχίστων τετραγώνων [120]. Ο τρόπος υλοποίησης και εφαρμογής της εν λόγω μεθόδου ακολουθεί τον τρόπο των ελαχίστων τετραγώνων, που παρουσιάζεται παραπάνω. Η μόνη διαφορά έγγυται στο γεγονός ότι τα βάρη  $w^{(m)}$  υπολογίζονται ελαχιστοποιώντας την ακόλουθη λογαριθμική σχέση:

$$Q_{\text{LLSM}} = \sum_{i,j=1}^n \left( \log A_{ij}^{(m)} - \log \frac{w_i^{(m)}}{w_j^{(m)}} \right)^2 \quad (2.14)$$

Έχει αποδειχτεί ότι η μέθοδος των λογαριθμικών ελαχίστων τετραγώνων είναι ισοδύναμη με τη μέθοδο του γεωμετρικού μέσου που αναλύθηκε ανωτέρω [121].

#### 2.3.1.3 Σύνθεση Επιμέρους Βαρών σε Τελικές Προτεραιότητες

Σε αυτό το στάδιο της μεθόδου, γίνεται η σύνθεση των τοπικών βαρών των στοιχείων, όπως αυτά προκύπτουν από τους επιμέρους πίνακες συγκρίσεων, σε γενικές προτεραιότητες των φύλλων της δενδροειδούς δομής, δηλαδή των εναλλακτικών λύσεων, ως προς τον απώτερο στόχο δηλαδή τη ρίζα. Η πράξη σύνθεσης των βαρών είναι στην ουσία πράξεις πολλαπλασιασμού μεταξύ πινάκων βαρών από κάτω προς τα πάνω (bottom-up), δηλαδή από το κατώτερο προς το ανώτερο ιεραρχικό επίπεδο. Αρχικά θα πρέπει να υπολογιστούν οι μέσες τιμές των βαρών κριτηρίων και παραγόντων καθώς και των σχετικών προτεραιοτήτων των εναλλακτικών ανάμεσα στους ειδικούς που συμμετέχουν στη διαδικασία λήψης απόφασης. Εάν υποθέσουμε  $M$  ειδικούς που συμμετέχουν στη διαδικασία λήψης απόφασης και οι εκτιμήσεις του εκάστοτε ειδικού ( $m$ ) αντίστοιχουν στα  $S_{ijk}^{(m)}$ ,  $f_{jk}^{(m)}$ ,  $w_k^{(m)}$ , που υπολογίζονται σύμφωνα με τη (2.10), τότε οι μέσες τιμές υπολογίζονται ως εξής:

$$S_{ijk} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M S_{ijk}^{(m)} \quad (2.15)$$

$$f_{jk} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M f_{jk}^{(m)} \quad (2.16)$$

$$w_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_k^{(m)} \quad (2.17)$$

Οι τελικές προτεραιότητες  $T_i$  ( $1 \leq i \leq N$ ), όπου  $N$  το πλήθος των εναλλακτικών, κάθε εναλλακτικής υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας τις μέσες σχετικές προτεραιότητες  $S_{ijk}$  με το μέσο συνολικό βάρος  $f_{jk} w_k$  του αντίστοιχου παράγοντα ως εξής:

$$T_i = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^{J_k} S_{ijk} f_{jk} w_k \quad (2.18)$$

Η εναλλακτική πρόταση που συγκεντρώνει τη μεγαλύτερη τιμή προτεραιότητας είναι και εκείνη που έχει το προβάδισμα και κρίνεται ως η πλέον κατάλληλη λύση για το εκάστοτε υπό μελέτη πρόβλημα λήψης απόφασης.

### 2.3.2 Θεωρία Πολυκριτηριακής Χρησιμότητας (MAUT)

Η θεωρία πολυκριτηριακής χρησιμότητας είναι μία από τις περισσότερο δημοφιλείς μεθόδους πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων και οι αρχές της τέθηκαν από τους Churchman, Ackoff και Arnoff το 1957. Η MAUT μετρά την προτίμηση (χρησιμότητα) μιας εναλλακτικής πρότασης. Οι ειδικοί που λαμβάνουν μέρος στη λήψη απόφασης προσδιορίζουν ποια εναλλακτική πρόταση  $T_i$  ( $1 \leq i \leq N$ ), του συνόλου  $T$  των  $N$  εναλλακτικών προτάσεων, είναι εκείνη με την καλύτερη συνολική επίδοση ως προς όλα τα  $n$  κριτήρια και άρα έχει τη μεγαλύτερη προτίμηση. Για αυτό, το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η συνολική συνάρτηση χρησιμότητας (ή πολυκριτηριακή συνάρτηση χρησιμότητας), που θα χρησιμοποιηθεί, για να μετρήσει τη συνολική επίδοση κάθε εναλλακτικής πρότασης.

Η συνολική συνάρτηση χρησιμότητας για μία εναλλακτική πρόταση  $T_i$  ως προς την επίδοση της για ένα σύνολο  $n$  κριτηρίων με τιμές  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  δύναται να προσδιορισθεί με τους εξής τρόπους [122], [123]:

- Με απευθείας εκτίμηση από τον εκάστοτε ειδικό. Εδώ η συνάρτηση χρησιμότητας  $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$  είναι συνδυασμός όλων των επιδόσεων για τα  $n$  κριτήρια.
- Με εκτίμηση μιας ξεχωριστής συνάρτησης χρησιμότητας  $u_i(x_i)$  για κάθε ένα από τα  $n$  κριτήρια και υπολογισμό της συνάρτησης χρησιμότητας  $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , που θα είναι συνδυασμός όλων των  $u_i(x_i)$  των  $n$  κριτηρίων.

Οποιοσδήποτε τρόπος προσδιορισμού των πολυκριτηριακών συναρτήσεων συνολικής χρησιμότητας οφείλει να αντανακλά [124], [125]:

- Τις αλληλεπιδράσεις, εάν υπάρχουν, μεταξύ των κριτηρίων
- Τη σχετική σημασία, που έχει ένα συγκεκριμένο κριτήριο
- Τη σχετική σημασία της επίδοσης μιας εναλλακτικής για το εκάστοτε κριτήριο.

Οι συνολικές συναρτήσεις χρησιμότητας προσδιορίζονται με βάση τις απαντήσεις των ειδικών στη λήψη απόφασης σε μία σειρά από ερωτήσεις που εκτιμούν τις προτιμήσεις τους ή μη απέναντι στο κριτήριο [122] [126].

Η συνολική χρησιμότητα για κάθε μία εναλλακτική πρόταση συνήθως προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(x_i) \quad (2.19)$$

όπου  $w_j$  είναι οι συντελεστές βαρύτητας των  $n$  κριτηρίων που καθορίζονται από τους ειδικούς. Για τους συντελεστές βαρύτητας ισχύει:  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . Οι συναρτήσεις

χρησιμότητας  $u_i(x_i)$  των κριτηρίων μετατρέπουν διαφορετικής φύσεως επιδόσεις σε μία κοινή πολυκριτηριακή χρησιμότητα (multi-attribute utility), χωρίς μονάδες μέτρησης, με τιμές από 0 μέχρι 1. Πιο συγκεκριμένα, οι ειδικοί καλούνται να αναθέσουν τιμές

μεταξύ του 0 και του 1 στα  $u_i(x_i)$ , ανάλογα με το πόσο καλή θεωρούν την τιμή  $x_i$  που λαμβάνει το εκάστοτε κριτήριο. Θεωρείται ότι το 0 αντιστοιχεί στη χειρότερη τιμή, ενώ το 1 στην καλύτερη.

Η προτιμώμενη εναλλακτική πρόταση θα έχει τον υψηλότερο συνολικό βαθμό χρησιμότητας.

Η μέθοδος MAUT είναι κατάλληλη για πολύπλοκες αποφάσεις με πολλαπλά κριτήρια και πολλές εναλλακτικές προτάσεις [127]. Επιπλέον, εναλλακτικές προτάσεις δύνανται να προστεθούν σε μία ανάλυση MAUT, εφόσον υπάρχουν δεδομένα για τον προσδιορισμό της συνάρτησης χρησιμότητας. Από τη στιγμή, που έχουν προσδιορισθεί οι συναρτήσεις χρησιμότητας, οποιοσδήποτε αριθμός εναλλακτικών προτάσεων δύνανται να βαθμολογηθεί απ' αυτές.

Η MAVT αποτελεί μια παραλλαγή της MAUT, που βασίζεται στις συναρτήσεις τιμής, για να εκφράσει τη χρησιμότητα των εναλλακτικών προτάσεων. Η αξιωματική βάση, που υποστηρίζει τη χρήση συνάρτησης τιμής, είναι παρόμοια με της MAUT[122].

### 2.3.3 Πολυκριτηριακή Τεχνική Απλής Κατάταξης (SMART)

Η πολυκριτηριακή τεχνική απλής κατάταξης αναπτύχθηκε από τον Edwards το 1977 για ένα κυβερνητικό ερευνητικό πρόγραμμα και αποτελεί χρήσιμη παραλλαγή της MAUT [128]. Η μέθοδος χρησιμοποιεί απλές συναρτήσεις χρησιμότητας. Η βασική ιδέα της μεθόδου είναι η πραγματοποίηση απευθείας βαθμολόγησης, δηλαδή η απευθείας απόδοση τιμών από τους ειδικούς για τους συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων ή των επιδόσεων των εναλλακτικών προτάσεων ως προς τα κριτήρια. Οι τιμές αυτές εκφράζουν τη σημασία των κριτηρίων ή το μέγεθος των επιδόσεων αντίστοιχα.

Στη SMART ο προσδιορισμός των συντελεστών βαρύτητας πραγματοποιείται ακολουθώντας δύο κυρίως βήματα:

- Κατάταξη των κριτηρίων από το λιγότερο ως το περισσότερο σημαντικό.
- Εκτιμήσεις για τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου ως προς εκείνο, που τοποθετήθηκε τελευταίο.
- Εκτιμήσεις για την επίδοση της κάθε εναλλακτικής στο εκάστοτε κριτήριο.

Συνήθως στο δεύτερο βήμα, ο εκάστοτε ειδικός στη λήψη απόφασης ξεκινά αποδίδοντας την τιμή 10 στο λιγότερο σημαντικό κριτήριο [128]. Για τα υπόλοιπα κριτήρια ο ειδικός δίνει τιμή μεγαλύτερη ή ίση με 10 ως προς το λιγότερο σημαντικό. Πολλές φορές βέβαια θεωρείται ότι ο ευκολότερος τρόπος είναι αρχικά ο προσδιορισμός του κορυφαίου κριτηρίου, στο οποίο αποδίδεται η αριθμητική τιμή 100. Στη συνέχεια κάθε άλλο κριτήριο με τη σειρά του βαθμολογείται με μια αριθμητική τιμή εντός της περιοχής 10-100, η οποία παριστάνει τη σημασία του ως προς το κορυφαίο κριτήριο. Στη συνέχεια, οι εκτιμήσεις κανονικοποιούνται έτσι ώστε:

$$w_i = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (2.20)$$

όπου  $p_i \in [10 \ 100]$  αντιστοιχεί στην εκτίμηση, που δόθηκε για το κριτήριο  $i$  από τον εκάστοτε ειδικό και  $n$  είναι ο συνολικός αριθμός των κριτηρίων.

Αντίστοιχα οι επιλεγμένες εναλλακτικές προτάσεις αξιολογούνται από τον εκάστοτε

ειδικό ως προς την επίδοσή τους για κάθε κριτήριο. Στην απευθείας βαθμολόγηση της επίδοσης της εναλλακτικής λύσης, επιλέγεται η κατάλληλη τιμή μεταξύ μιας προκαθορισμένης χαμηλότερης τιμής για την χειρότερη εναλλακτική πρόταση και μιας προκαθορισμένης ανώτερης για την καλύτερη εναλλακτική πρόταση. Εφαρμόζοντας τις ίδιες αρχές για τις τιμές, που λαμβάνουν οι εναλλακτικές προτάσεις σε σχέση με τα κριτήρια, η καλύτερη εναλλακτική πρόταση θα λάβει την τιμή 100 και οι άλλες προτάσεις τιμές μεταξύ 10 και 100, παριστάνοντας τη θέση τους στην κατάταξη [129]. Ορίζουμε ως  $s_{ij}$  την επίδοση της  $j$  εναλλακτικής για το  $i$  κριτήριο. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε δύο εναλλακτικές τεχνολογίες για ασύρματη μετάδοση και ως κριτήριο την κάλυψη εντός ενός δωματίου. Η τεχνολογία που προσφέρει καλύτερη κάλυψη θα είναι εκείνη που θα βαθμολογηθεί με την μεγαλύτερη τιμή από το 10 έως το 100.

Η τελική κατάταξη των εναλλακτικών προτάσεων δύναται να πραγματοποιηθεί με βάση τις συναρτήσεις χρησιμότητας. Συνήθως επιλέγεται γραμμική συνάρτηση χρησιμότητας, γιατί είναι απλούστερη και ικανοποιητική στα αποτελέσματα της. Στο πλαίσιο της SMART υπάρχουν και άλλες διαφορετικές προσεγγίσεις απόδοσης βαθμών με συνάρτηση τιμής που βασίζονται σε διαφορετικές αριθμητικές κλίμακες [130]. Η βασική μορφή της πολυκριτηριακής συνάρτησης χρησιμότητας της SMART είναι συνήθως προσθετική, αλλά έχουν μελετηθεί και χρησιμοποιηθεί και μη προσθετικές προσεγγίσεις. Η απλούστερη μορφή μίας τέτοιας συνάρτησης αποτυπώνεται μέσω ενός απλού γραμμικού μοντέλου:

$$u_j = \sum_{i=1}^n w'_i s'_{ij} \quad (2.21)$$

όπου για κάθε εναλλακτική  $j$  η τιμή χρησιμότητας  $u_j$ ,  $s'_{ij}$  η μέση τιμή των  $s_{ij}$  που συμπληρώνουν οι ειδικοί για την εναλλακτική  $j$  σε κάθε ένα από τα  $i$  κριτήρια και  $w'_i$  οι μέσες εκτιμήσεις αντίστοιχα των κριτηρίων  $w_i$ . Με βάση την τιμή του  $u_j$  πραγματοποιείται η τελική κατάταξη των εναλλακτικών για το υπό μελέτη πρόβλημα. Όσο μεγαλύτερη η τιμή  $u_j$  τόσο προτιμότερη και η αντίστοιχη εναλλακτική  $j$ .

Διάφορες μέθοδοι βασισμένες στην απευθείας αξιολόγηση εντάσσονται στην οικογένεια των μεθόδων SMART από τις οποίες διάφοροι ερευνητές έχουν αναπτύξει νέες εκδοχές. Περισσότερο πρόσφατες παραλλαγές της SMART είναι δύο προσεγγιστικές μέθοδοι για τη μέτρηση της πολυκριτηριακής χρησιμότητας, η SMARTS και η SMARTER [129].

### 2.3.4 Μέτρηση της Προτίμησης με Τεχνική Κατηγορηματικής Αξιολόγησης (MACBETH)

Η MACBETH αναπτύχθηκε από τους Bana e Costa και Vansnick, το 1994 [131]. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται σε ποιοτικές εκτιμήσεις με στόχο να παράγει αριθμητικά αποτελέσματα για την επίδοση των εναλλακτικών προτάσεων ως προς ένα κριτήριο και για τη σημασία των κριτηρίων μεταξύ τους.

Στόχος της MACBETH είναι η μέτρηση της αξίας των υπό εξέταση εναλλακτικών, μέσω μιας διαδικασίας υποβολής ερωτημάτων προς τον εκάστοτε ειδικό που συμμετέχει στη λήψη απόφασης. Αυτό πραγματοποιείται μέσω ποιοτικών συγκρίσεων ανά ζεύγη των εναλλακτικών με μία κλίμακα που εκφράζει τη διαφορά της επίδοσης ανάμεσα στις εναλλακτικές ως προς το υπό μελέτη κριτήριο. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε κριτήριο  $C_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ), πραγματοποιούνται συγκρίσεις ανά ζεύγη μεταξύ των  $N$  εναλλακτικών προτάσεων  $T_i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) σχετικά με την επίδοσή τους ως προς το κριτήριο  $C_j$ .

Έστω δύο υπό σύγκριση εναλλακτικές  $T_i$  και  $T_k$ , τότε με  $\delta_j(T_i, T_k)$  συμβολίζεται η διαφορά μεταξύ των επιδόσεων των δύο συγκρινόμενων εναλλακτικών προτάσεων ως προς το κριτήριο  $C_j$ . Η διαφορά μεταξύ τους, θα εκτιμηθεί ως ίση με μία από τις επτά ακόλουθες τιμές, ανάλογα με το πώς αυτή χαρακτηρίζεται:

- 0, εάν δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ τους
- 1, εάν η διαφορά μεταξύ τους χαρακτηρίζεται μεταξύ μηδενικής και ασθενούς
- 2, εάν η διαφορά μεταξύ τους είναι ασθενής
- 3, εάν η διαφορά μεταξύ τους είναι μεταξύ ασθενούς και ισχυρής
- 4, εάν η διαφορά μεταξύ τους είναι ισχυρή
- 5, εάν η διαφορά μεταξύ τους είναι μεταξύ ισχυρής και ακραίας
- 6, εάν η διαφορά μεταξύ τους είναι ακραία

Στη συνέχεια εφόσον έχουν πραγματοποιηθεί οι συγκρίσεις ανά ζεύγη μέσω της ανάθεσης τιμών στις διαφορές επίδοσης μεταξύ των εναλλακτικών, τότε υπολογίζεται η τιμή της επίδοσης της εκάστοτε εναλλακτικής πρότασης  $T_i$  ως προς κάθε κριτήριο  $C_j$ . Η τιμή της επίδοσης  $v_{ij}$  υπολογίζεται μέσω ενός μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού [131].

Με παρόμοιο τρόπο προσδιορίζονται και οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων  $w_j$ . Η τελική αξία κάθε εναλλακτικής πρότασης υπολογίζεται μέσω της ακόλουθης συνάρτησης, αφού πρώτα έχουν υπολογιστεί οι μέσες τιμές  $w'_j$  και  $v'_{ij}$ , από όλες τις τιμές των  $w_j$  και  $v_{ij}$  των ειδικών που συμμετέχουν στη διαδικασία λήψης απόφασης:

$$u(T_i) = \sum_{j=1}^n w'_j v'_{ij} \quad (2.22)$$

## 2.4 Παραλλαγές Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί στο 2.3.1, η μέθοδος της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας χρησιμοποιείται ευρέως σε ποικίλους ερευνητικούς τομείς και εφαρμογές. Παράλληλα, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη τόσο εφαρμογών όσο και ερευνητικών μεθοδολογικών θεμάτων που βασίζονται στην AHP αλλά και σε διάφορες παραλλαγές της. Κάποιες από τις παραλλαγές της μεθόδου, που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα, είναι οι ακόλουθες:

- Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (FAHP - Fuzzy Analytic Hierarchy Process) [133].
- Ιεραχικό πλαίσιο για την ανάπτυξη μιας Τεχνολογίας (TDE - Technology Development Envelope) [134].
- Dempster-Shafer/Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (DS/AHP - Dempster-Shafer/Analytic Hierarchy Process) [135], η οποία βασίζεται στη θεωρία ενδείξεων (theory evidence) των Dempster, Shafer και στην Αναλυτική Διαδικασία Ιεράρχησης.
- Αναλυτική Δικτυακή Διαδικασία (ANP - Analytic Network Process) [136].
- Δελφική διαδικασία ιεράρχησης (DHP - Delphic hierarchy process) [137], που

αποτελεί συνδυασμό της μεθόδου Delphi και της Αναλυτικής Διαδικασίας Ιεράρχησης.

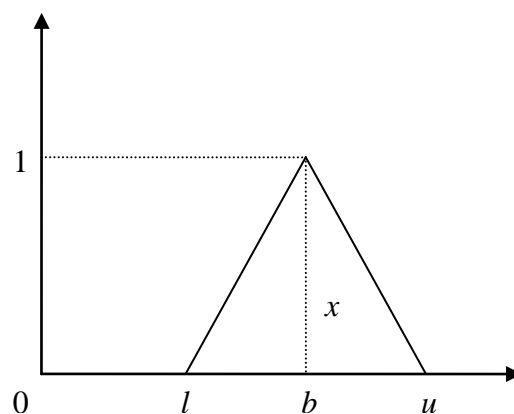
- Α' WOT, συνδυασμός της ανάλυσης Πλεονεκτημάτων, Αδυναμιών, Ευκαιριών, Απειλών (SWOT - Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats) και της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας [129].

Παράλληλα ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο συνδυασμός της AHP με άλλες τεχνικές και μεθόδους, όπως ο μαθηματικός προγραμματισμός, TOPSIS, ELECTRE, η ανάλυση οφελών, κόστους, ευκαιριών και ρίσκων (BOCR - Benefits, Opportunities, Costs, and Risks) [138], η περιβάλλουσα ανάλυση δεδομένων (DEA - Data Envelopment Analysis) καθώς και με μεθόδους που σχετίζονται είτε με τη λήψη απόφασης είτε με τον υπό μελέτη τομέα.

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής το ενδιαφέρον στράφηκε ιδιαίτερα στις δύο πρώτες παραλλαγές της AHP. Αφενός η θεωρία της ασαφούς μεθόδου, που αναλύεται στο 2.5, παρουσιάζει ιδιαίτερη ερευνητική πρόκληση στον τομέα των μεθόδων λήψης απόφασης και αφετέρου η TDE, που περιγράφεται στο 2.6, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον δεδομένου ότι η παρούσα διατριβή διερευνά την εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου λήψης απόφασης στα μελλοντικά οικιακά δίκτυα. Η TDE ειδικεύεται στη χρήση της για τη δημιουργία ενός οδικού χάρτη λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των παραγόντων των εναλλακτικών τεχνολογιών σε μελλοντικά έτη σύμφωνα με την άποψη εξειδικευμένων ειδικών που λαμβάνουν μέρος στη λήψη απόφασης για την εκάστοτε τεχνολογία.

## 2.5 Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Fuzzy AHP)

Η μέθοδος της Ασαφούς Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας εστιάζει στην περίπτωση κατά την οποία οι ειδικοί στη λήψη απόφασης πραγματοποιούν συγκρίσεις με ασαφή τρόπο [140], δηλαδή με την ανάθεση ασαφών αριθμών στα στοιχεία του πίνακα σύγκρισης κατά ζεύγη [141]. Στη βιβλιογραφία, έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα που αποτυπώνουν την ασαφή λογική στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία. Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στη χρήση μιας σχετικά πρόσφατης μεθόδου που βασίζεται στην μέθοδο των λογαριθμικών ελαχίστων τετραγώνων [142].



Εικόνα 32: Συνάρτηση Ιδιότητας Μέλους

Ένας ασαφής αριθμός  $\tilde{b}$  δεν αναφέρεται σε μία μόνο τιμή, αλλά μάλλον σε ένα σύνολο δυνατών τιμών  $x$  με επίκεντρο το  $b$ , η κάθε μια με το δικό της βάρος  $u_b(x)$  μεταξύ 0 και 1. Αυτή η κατανομή βάρους ονομάζεται συνάρτηση μέλους (membership function). Στην ειδική περίπτωση, όπου η συνάρτηση μέλους είναι τριγωνική, τότε ισχύει:



$$u_b(x) = \begin{cases} (x-l)/(b-l) & , l \leq x \leq b \\ (u-x)/(u-b) & , b \leq x \leq u \\ 0 & , \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.23)$$

όπου  $[l, u]$  είναι το εύρος των τιμών του  $x$ , στο οποίο το βάρος  $u_b(x)$  είναι μη μηδενικό. Η τριγωνική συνάρτηση μέλους (Εικόνα 32) στην παραπάνω εξίσωση καθορίζεται από την τριπλέτα  $(l, b, u)$ , η οποία κατά συνέπεια καθορίζει πλήρως τον ασαφή αριθμό.

Για τη δημιουργία ασαφών πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη, θα πρέπει να οριστεί μία ασαφής κλίμακα προτίμησης, όπου οι ασαφείς αριθμοί θα χρησιμοποιούνται αντί των ακριβών αριθμών, σε μία συμβατική κλίμακα προτίμησης. Επομένως, τα στοιχεία της σύγκρισης ανά ζεύγη θα αποτελούνται από ασαφείς και όχι ακριβείς αριθμούς. Η νέα κλίμακα μπορεί να είναι μια συγκεχυμένη επέκταση μιας συμβατικής κλίμακας, όπως εκείνης που παρουσιάζει ο Πίνακας 21. Η ασαφής κλίμακα που υιοθετείται στην παρούσα διδακτορική εργασία αποτελείται από τους ασαφείς αριθμούς  $\tilde{b}$  όπως εμφανίζει ο Πίνακας 24 που ακολουθεί [141]. Ο ορισμός σημαντικότητας της εκάστοτε κρίσης ορίζεται σύμφωνα με τους αντίστοιχους λεκτικούς ορισμούς, όπως απεικονίζει ο Πίνακας 21.

**Πίνακας 24: Κλίμακα Αξιολόγησης Ασαφών Συγκρίσεων ανά Ζεύγη (Fuzzy Nine Level Scale)**

$\tilde{b} = \tilde{A}_{ij}$	Συνάρτηση Ιδιότητας Μέλους
$\tilde{1}$	$\tilde{1} = (1,1,1)$
$\tilde{2} \leq \tilde{b} \leq \tilde{8}$	$\tilde{b} = (b-1, b, b+1)$
$\tilde{9}$	$\tilde{9} = (9,9,9)$
Αντίστροφες Τιμές	
$\frac{\tilde{1}}{\tilde{8}} \leq \frac{\tilde{1}}{\tilde{b}} \leq \frac{\tilde{1}}{\tilde{2}}$	$\frac{\tilde{1}}{\tilde{b}} = \left( \frac{1}{b+1}, \frac{1}{b}, \frac{1}{b-1} \right)$
$\frac{\tilde{1}}{\tilde{9}}$	$\frac{\tilde{1}}{\tilde{9}} = \left( \frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{8} \right)$

Η διαδικασία για την εκτίμηση των ασαφών βαρών βασίζεται στη θεωρία αρχής της επέκτασης (extension principle theory) [143]. Η αρχή της επέκτασης είναι μία μαθηματική μέθοδος που επιτρέπει την επέκταση των εννοιών και των ιδιοτήτων των κλασικών μαθηματικών στο πλαίσιο των ασαφών αριθμών. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της αρχής της επέκτασης χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα αξιώματα που διέπουν τις σχέσεις μεταξύ των ασαφών αριθμών. Έστω δύο ασαφείς αριθμοί  $(l_1, b_1, u_1)$  και  $(l_2, b_2, u_2)$  τότε ορίζονται οι παρακάτω πράξεις:

- Πρόσθεση-Αφαίρεση:  $(l_1, b_1, u_1) \pm (l_2, b_2, u_2) = (l_1 \pm l_2, b_1 \pm b_2, u_1 \pm u_2)$
- Πολλαπλασιασμός:  $(l_1, b_1, u_1) \cdot (l_2, b_2, u_2) = (l_1 \cdot l_2, b_1 \cdot b_2, u_1 \cdot u_2)$

- Διαίρεση:  $(l_1, b_1, u_1) / (l_2, b_2, u_2) = (l_1/l_2, b_1/b_2, u_1/u_2)$
- Αντιστοφής:  $(l_1, b_1, u_1)^{-1} = (u_1^{-1}, b_1^{-1}, l_1^{-1})$

Όταν προσδιορίζονται τα στοιχεία των συγκρίσεων κατά ζεύγη για κάθε ειδικό  $m$ , που συμμετέχει στη διαδικασία λήψης απόφασης,  $(l_{ij}^{(m)}, b_{ij}^{(m)}, u_{ij}^{(m)})$ , εφαρμόζουμε μια περιορισμένη διαδικασία ελαχιστοποίησης για την εκτίμηση των ασαφών βαρών  $(r_i^{(m)}, w_i^{(m)}, e_i^{(m)})$  για κάθε εμπειρογνώμονα. Η συνάρτηση που ελαχιστοποιείται είναι η εξής:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \left\{ \left[ \ln \frac{r_i^{(m)}}{l_{ij}^{(m)} e_j^{(m)}} \right]^2 + \left[ \ln \frac{w_i^{(m)}}{w_j^{(m)} b_{ij}^{(m)}} \right]^2 + \left[ \ln \frac{e_i^{(m)}}{u_{ij}^{(m)} r_j^{(m)}} \right]^2 \right\} \quad (2.24)$$

Για τον υπολογισμό του μέσου όρου των ασαφών βαρών  $\tilde{w}_i = (r_i, w_i, e_i)$ , υπολογίζονται απλά οι μέσοι όροι των σημείων των ατομικών συναρτήσεων ιδιότητας μέλους, δηλαδή  $r = M^{-1} \sum_m r_i^{(m)}$ ,  $w = M^{-1} \sum_m w_i^{(m)}$  and  $e = M^{-1} \sum_m e_i^{(m)}$ , όπου  $M$  ο αριθμός των εμπλεκόμενων ειδικών στη λήψη απόφασης.

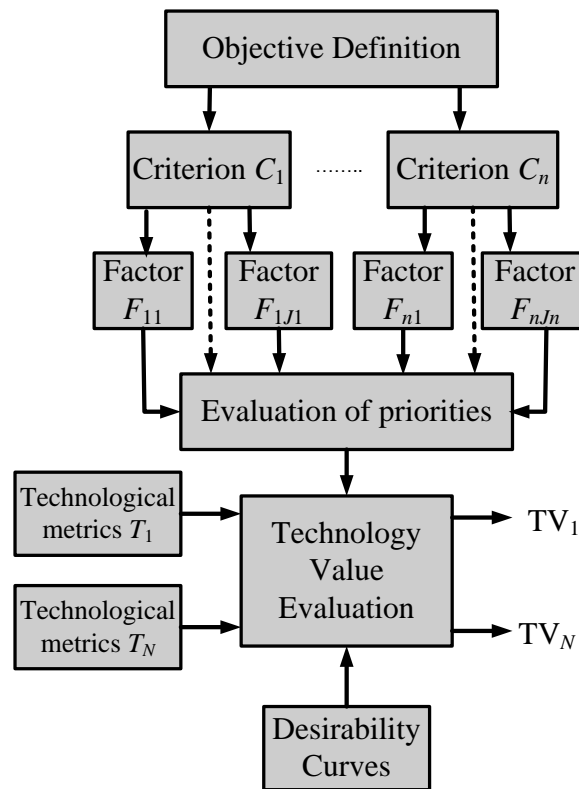
Δεδομένων των παραπάνω θεωρήσεων στο πλαίσιο των ασαφών αριθμών, η διαδικασία που ακολουθεί για τον υπολογισμό των προτεραιοτήτων των εναλλακτικών στο πλαίσιο της Fuzzy AHP ακολουθεί την ίδια διαδικασία με την AHP, με τη διαφορά της ασαφούς κλίμακας και του ασαφούς τρόπου υπολογισμού των βαρών κριτηρίων/υποκριτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζονται με τον ασαφή τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω τα μέσα βάρη των κριτηρίων και παραγόντων καθώς και οι σχετικές προτεραιότητες και στη συνέχεια υπολογίζονται οι τελικές προτεραιότητες για κάθε εναλλακτική λύση  $T_i$  μέσω της σχέσης (2.18).

## 2.6 Ιεραρχικό Πλαίσιο για την Ανάπτυξη της Τεχνολογίας (TDE)

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της δημιουργίας του οδικού χάρτη για τις τεχνολογίες. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας η TDE δύναται να προβλέψει την πορεία εναλλακτικών τεχνολογιών, όσον αφορά την εφαρμογή τους ή τη χρήση τους στο πλαίσιο του εκάστοτε υπό μελέτη προβλήματος. Η μεθοδολογία TDE μπορεί να εφαρμοστεί είτε για το τρέχον έτος στο οποίο εξετάζεται το πρόβλημα είτε και σε επόμενα έτη δημιουργώντας έναν αποδοτικό οδικό χάρτη για την πορεία των εναλλακτικών τεχνολογικών λύσεων. Τα στάδια του εν λόγω Ιεραρχικού Πλαισίου TDE αναλύονται ως εξής [134]:

### 2.6.1 Εκτίμηση Βάρους Κριτηρίων και Παραγόντων

Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται στην ιεραρχία της AHP σύμφωνα με την Εικόνα 33. Σύμφωνα με την ίδια λογική ορίζονται τα κριτήρια  $C_k$  ( $1 \leq k \leq n$ ) και οι παράγοντες  $F_{jk}$  κάτω από κάθε κριτήριο ( $1 \leq j \leq J_k$ ). Τέλος, καθορίζονται οι εναλλακτικές τεχνολογίες για την μελέτη του εκάστοτε προβλήματος ή γενικότερου σκοπού  $T_i$  ( $1 \leq i \leq N$ ). Για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων και των παραγόντων ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω στο πλαίσιο της Αναλυτικής Ιεράρχησης και υπολογίζονται τα αντίστοιχα βάρη  $C_k$  για τα κριτήρια και  $f_{jk}$  για τους παράγοντες που ορίζονται για το εκάστοτε κριτήριο.



Εικόνα 33: AHP Ιεραρχικό Μοντέλο με την Ενσωμάτωση του TDE

### 2.6.2 Πρόβλεψη Μετρικών της Τεχνολογίας

Σύμφωνα με την Εικόνα 33, εκτός από την εκτίμηση των βαρών των κριτηρίων και παραγόντων, η αξιολόγηση μιας τεχνολογίας βασίζεται και στις τιμές των μετρικών της τεχνολογίας (technological metrics)  $t_{ijk}$  που αντιπροσωπεύουν την πραγματική τιμή του παράγοντα  $F_{jk}$  για την ισοτή ( $i$ ) εναλλακτική τεχνολογία  $T_i$ . Οι παρούσες και μελλοντικές τιμές, για το τρέχον καθώς και τα μελλοντικά έτη αντίστοιχα, των μετρικών της τεχνολογίας καθορίζονται από τους ειδικούς στη λήψη απόφασης μέσα από μια σειρά ερευνών. Πιο συγκεκριμένα, για τις μελλοντικές τιμές των  $t_{ijk}$  οι εμπειρογνώμονες πρέπει να κάνουν αντίστοιχη πρόβλεψη με βάση την εμπειρία τους. Για παράδειγμα, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αποτελεί έναν χαρακτηριστικό παράγοντα του κριτηρίου απόδοσης στο πλαίσιο των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Για αυτό το σκοπό οι ειδικοί μπορούν να κληθούν, για παράδειγμα, να εκχωρήσουν τις τιμές του ρυθμού δεδομένων που καλύπτει η εκάστοτε εναλλακτική τεχνολογία. Αυτές οι τιμές θα αποτελούν και οι τεχνολογικές μετρικές του συγκεκριμένου παράγοντα για την εκάστοτε εναλλακτική υπό το πρίσμα του αντίστοιχου κριτηρίου. Στην Εικόνα 34, που ακολουθεί, ενδεικτικά ένας ειδικός καλείται να συμπληρώσει και να προβλέψει τις τιμές των μετρικών της τεχνολογίας για τους παράγοντες του κριτηρίου που σχετίζεται με την απόδοση. Οι τιμές συμπληρώνονται για κάθε έτος και σύμφωνα με τις μονάδες μέτρησης που αντιστοιχούν στον εκάστοτε παράγοντα.

Online Survey Tool

Current open Surveys:

Technology Metrics for IEEE 802.11n

Current User: Γιούλη Δέδε  
View instructions on how to fill in the survey questions here

**Criterion 1: System Performance**

	2009	2010	2011	2012	2013
1.1. Coverage <sup>ⓘ</sup> m	50	70	100	300	300
1.2. Upstream Bit Rate <sup>ⓘ</sup> Mbps	100	200	500	1000	1000
1.3. Downstream Bit Rate <sup>ⓘ</sup> Mbps	200	400	1000	1000	1000

Submit values for Criterion 1: System Performance

Next Topic : Criterion 2: Simplicity & Use

Εικόνα 34: Παράδειγμα Πρόβλεψης Μετρικών της Τεχνολογίας

Στο πλαίσιο της δημιουργίας του οδικού χάρτη για την πρόβλεψη της πορείας των εναλλακτικών τεχνολογιών κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα μερικών επόμενων ετών, οι ειδικοί καλούνται να συμπληρώσουν τις αντίστοιχες μετρικές της τεχνολογίας όχι μόνο για το παρόν χρονικό έτος αλλά και τα επόμενα έτη που έχουν προκαθοριστεί για το εκάστοτε υπό μελέτη πρόβλημα. Για αυτό το σκοπό, σε αυτή και σε κάθε πολυκριτηριακή μεθοδολογία που απαιτεί την κρίση των εμπειρογνομόνων, θα πρέπει οι ίδιοι να επιλέγονται στοχευμένα και πολύ προσεκτικά έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η σχετικότητα τους με το εκάστοτε αντικείμενο στο οποίο ειδικεύονται.

### 2.6.3 Καμπύλες Συναρτήσεων Επιθυμίας

Στη συνέχεια, για κάθε τιμή του  $t_{ijk}$  οι ειδικοί καλούνται να εκχωρήσουν μια επιθυμητή τιμή (desirability value), καθορίζοντας τη συνάρτηση επιθυμίας  $V_{jk}$ . Αυτή η συνάρτηση αντιστοιχεί τις τιμές των  $t_{ijk}$  σε πραγματικούς αριθμούς μεταξύ 0 και 100 και καθορίζεται σύμφωνα με τη γνώμη των εμπειρογνομόνων. Πιο συγκεκριμένα, το πεδίο τιμών των παραγόντων χωρίζεται σε μια σειρά από επιμέρους υποδιαστήματα και οι εμπειρογνώμονες καλούνται να παρέχουν μια τιμή επιθυμίας από το 0 (η χειρότερη τιμή επιθυμίας) έως το 100 (η καλύτερη τιμή) για τα μέσα σημεία του κάθε υποδιαστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα απόδοσης τιμών για τη συνάρτηση επιθυμίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 35, που ακολουθεί. Αναλυτικότερα, οι ειδικοί καλούνται να αναθέσουν τιμές επιθυμίας στους αντίστοιχους παράγοντες του κριτηρίου που σχετίζεται με θέματα σχεδιασμού. Στο εν λόγω παράδειγμα, υπάρχουν παράγοντες όχι μόνο ποσοτικοί αλλά και ποιοτικοί. Παρατηρούμε ότι ο ειδικός, οι κρίσεις του οποίου παρουσιάζονται ενδεικτικά στην εικόνα, έχει αναθέσει την επιθυμητή τιμή 100 στην

περίπτωση μηδενικού βάρους (0 kg) της συσκευής του extender, δηλώνοντας ότι ιδανικά το να μη ζυγίζει καθόλου η συγκεκριμένη συσκευή θα κάλυπτε το 100% της επιθυμίας του. Σε αντίθεση, τα 2kg αντιστοιχούν σε μία τιμή επιθυμίας 5, αποτυπώνοντας ότι το συγκεκριμένο βάρος είναι ελάχιστα επιθυμητό από τον ειδικό στο ποσοστό του 5%.

Value Scale for Extender Factors

Current User: Γιούλη Δέδε  
[View instructions on how to fill in the survey questions here](#)

**Criterion 3: Design**

	Poor	Average	Good	Excellent
3.1. DESIGN INTEGRATION TO HOME ENVIRONMENT	10	40	70	100

	0	100	200	350	500 (cm <sup>2</sup> )
3.2. EXTENDER TECHNOLOGY AREA	100	90	60	30	5

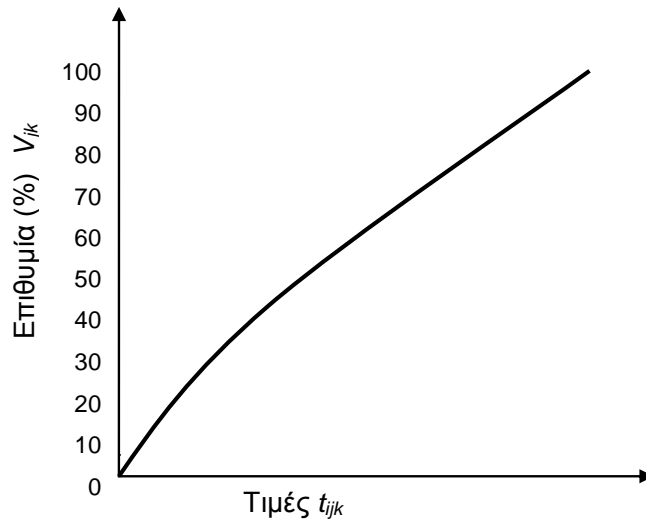
	0	0.25	0.75	1	1.5	2 (kg)
3.3. WEIGHT OF EXTENDER	100	80	70	60	35	5

Submit values for Criterion 3: Design

Εικόνα 35: Παράδειγμα Ανάθεσης Τιμών για τη Συνάρτηση Επιθυμίας

Η συνάρτηση επιθυμίας υπολογίζεται από το μέσο όρο των τιμών που παρέχονται από τους ειδικούς. Οι τιμές της συνάρτησης σε όλα τα υπόλοιπα ενδιάμεσα σημεία μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή [144].

Μια ενδεικτική συνάρτηση επιθυμίας  $V_{jk}$  παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι μια συνάρτηση επιθυμίας μπορεί να είναι είτε ευθεία είτε καμπύλη. Παράλληλα, μπορεί να είναι είτε αύξουσα είτε φθίνουσα ανάλογα με τις εκτιμήσεις των ειδικών για τις τιμές του εκάστοτε παράγοντα.



Εικόνα 36: Ενδεικτική Συνάρτηση Επιθυμίας  $V_{jk}$

#### 2.6.4 Υπολογισμός της Αξίας της Τεχνολογίας

Μετά τον υπολογισμό των  $V_{jk}^{(m)}$  και  $t_{ijk}^{(m)}$ , για κάθε ειδικό  $m$ , στη συνέχεια τα  $V_{jk}^{(m)}(t_{ijk}^{(m)})$  καθορίζουν το επίπεδο επιθυμίας του παράγοντα  $F_{jk}$  για την  $i$ -οστή εναλλακτική τεχνολογία, σύμφωνα με τη γνώμη του  $m$  ειδικού.

Ωστόσο, για τον προσδιορισμό της συνολικής επιθυμίας επί των τεχνολογιών πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η σχετική σημασία (βάρος) του κάθε παράγοντα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Το μέσο βάρος  $f_{jk}$  καθορίζει τη σημαντικότητα του παράγοντα  $F_{jk}$  σε σχέση με τους υπόλοιπους παράγοντες του κριτηρίου  $C_k$ . Δεδομένου ότι το μέσο βάρος του  $C_k$  είναι  $w_k$ , συνεπάγεται ότι το μέσο βάρος του  $F_{jk}$  παράγοντα σε σχέση με όλους τους άλλους παράγοντες είναι  $w_k f_{jk}$ .

Συνεπώς, για την εκτίμηση της συνολικής επιθυμίας επί της κάθε τεχνολογίας, δηλαδή την αξία της τεχνολογίας (technology value), θα πρέπει να υπολογιστεί το σταθμισμένο άθροισμα των μέσων  $V_{jk}(t_{ijk})$  σε σχέση με το  $w_k f_{jk}$  ως εξής:

$$TV_i = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{J_k} w_k f_{jk} V_{jk}(t_{ijk}) \quad (2.25)$$

Στην παραπάνω σχέση, η  $TV_i$  είναι η αξία τεχνολογίας (TV) της  $i$ -οστής τεχνολογίας και κυμαίνεται μεταξύ 0 και 100, ποσοτικοποιώντας την καταλληλότητα μιας τεχνολογικής λύσης στην πάροδο του χρόνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με την εξίσωση η αξία της τεχνολογίας για την  $i$ -οστή τεχνολογική εναλλακτική λύση μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα των τεχνολογικών αξιών των παραγόντων  $TV_{ijk} = w_k f_{jk} V_{jk}(t_{ijk})$  για την εν λόγω εναλλακτική. Επιπλέον, θα μπορούσε να καθοριστεί η τεχνολογική αξία του κριτηρίου  $C_k$  για τη  $i$ -οστή τεχνολογική εναλλακτική λύση, με το άθροισμα των τεχνολογικών τιμών των παραγόντων του:

$$TV_{ik} = \sum_{j=1}^{J_k} TV_{ijk} \quad (2.26)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο πλαίσιο της χρήσης της εν λόγω μεθοδολογίας για την δημιουργία του οδικού χάρτη που θα προβλέπει την πορεία μιας τεχνολογίας σε μελλοντικά έτη, θα πρέπει η αξία της τεχνολογίας να υπολογιστεί όχι μόνο για το τρέχον έτος αλλά και για όλα τα υπόλοιπα έτη, δεδομένου ότι οι μετρικές της τεχνολογίας  $t_{ijk}$  είναι εκείνες που μεταβάλλονται ανάλογα με το έτος που εξετάζεται κάθε φορά.

## 2.7 Μέθοδοι Σχέσεων Υπεροχής

Η θεμελίωση της θεωρίας των σχέσεων υπεροχής αναπτύχθηκε από τον Bernard Roy κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960 [145] μέσω της ανάπτυξης των μεθόδων της οικογένειας ELECTRE. Από τότε έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από τους ερευνητές. Ωστόσο, δεν είναι τόσο διαδεδομένες όσο οι μέθοδοι της προηγούμενης ομάδας [146]. Δύο οικογένειες πολυκριτηριακών μεθόδων με σχέσεις υπεροχής έχουν αναπτυχθεί περισσότερο, οι μέθοδοι των οικογενειών ELECTRE και PROMETHEE.

Η βασική ιδέα αυτών των μεθόδων είναι η εφαρμογή συγκρίσεων ανά ζεύγη από τους ειδικούς μεταξύ των εναλλακτικών προτάσεων ως προς κάθε ένα κριτήριο χωριστά. Οι συγκρίσεις εκτελούνται με τη χρήση τεσσάρων βασικών σχέσεων προτίμησης ή όπως έχει καθιερωθεί να ονομάζονται σχέσεων υπεροχής. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Κατάσταση ισχυρής προτίμησης:  $a P b$  ( $g(a) - g(b) > p$ ), «η εναλλακτική πρόταση  $a$  προτιμάται αυστηρά από την εναλλακτική πρόταση  $b$ » ως προς το κριτήριο  $g$ . Όπου  $g(x)$ ,  $x=\{a,b\}$ , είναι η επίδοση της  $x$  εναλλακτικής πρότασης για το  $g$  κριτήριο.
- Κατάσταση αδιαφορίας:  $a I b$  ( $|g(a) - g(b)| \leq q$ ), «η εναλλακτική πρόταση  $a$  δεν είναι διαφορετική από την εναλλακτική πρόταση  $b$ », όπου  $q$  το κατώφλι αδιαφορίας.
- Κατάσταση ασθενούς προτίμησης:  $a Q b$  ( $q < g(a) - g(b) < p$ ), «δεν είναι σίγουρο ότι  $a P b$ », όπου  $q, p$  τα κατώφλια αδιαφορίας και προτίμησης, αντίστοιχα.
- Κατάσταση μη συγκρισιμότητας (incomparability):  $a R b$ , «η εναλλακτική πρόταση  $a$  και η εναλλακτική πρόταση  $b$  δεν είναι συγκρίσιμες».

και  $g(a)$ ,  $g(b)$  οι επιδόσεις των εναλλακτικών προτάσεων  $a$  και  $b$  σε ένα κριτήριο  $g$ .

Ο εκάστοτε ειδικός στη λήψη απόφασης καταλήγει σε κατάσταση ισχυρής προτίμησης, όταν υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι το ένα από τα δύο συγκρινόμενα αντικείμενα (εναλλακτικές προτάσεις ή λύσεις) επικρατεί έναντι του άλλου [147]. Ο ειδικός καταλήγει σε κατάσταση ασθενούς προτίμησης, όταν υπάρχει έλλειψη πεποίθησης ότι το ένα από τα δύο συγκρινόμενα αντικείμενα επικρατεί έναντι του άλλου. Από την άλλη, ο ειδικός καταλήγει σε κατάσταση αδιαφορίας, όταν τα δύο συγκρινόμενα αντικείμενα είναι ισοδύναμα και δεν έχει σημασία ποιο από τα δύο θα επιλέξει, ενώ καταλήγει σε κατάσταση μη συγκρισιμότητας, όταν εκτιμήσει ότι τα δύο συγκρινόμενα αντικείμενα δε μπορούν να συγκριθούν.

### 2.7.1 Αποβολή και Επιλογή Εκφράζοντας την Πραγματικότητα (ELECTRE)

Η οικογένεια των μεθόδων ELECTRE προτάθηκε αρχικά από τον Roy μέσω της ανάπτυξης της μεθόδου ELECTRE, την πρώτη μέθοδο, που χρησιμοποιούσε την ιδέα των σχέσεων υπεροχής. Από τότε διάφορες μορφές έχουν αναπτυχθεί όπως ELECTRE

I, II [148], III [149], IV [150], IS [151] και TRI [152], οι οποίες απευθύνονται σε διαφορετικούς τύπους προβλημάτων και σε διαφορετική μορφή δεδομένων που δέχονται [153].

Οι μέθοδοι αυτής της οικογένειας διαχειρίζονται κριτήρια ποιοτικής και ποσοτικής φύσεως. Το πρόβλημα θα πρέπει να είναι τόσο καλά διατυπωμένο, ώστε η μέθοδος να επιλέγει εναλλακτικές προτάσεις, οι οποίες να έχουν την μεγαλύτερη επίδοση στα περισσότερα κριτήρια [81].

Δοθέντος του συνόλου εναλλακτικών προτάσεων  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$  οποιαδήποτε από τις μεθόδους ELECTRE δύνανται να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με τον αντικειμενικό σκοπό της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Παρά τις διαφορές τους οι μέθοδοι ELECTRE βασίζονται στην αναγνώριση της σημασίας των καταφατικών δηλώσεων της μορφής  $Q$ , όπου το  $Q$  συμβολίζει την καταφατική δήλωση «η εναλλακτική πρόταση  $T_i$  είναι το ίδιο καλή με την εναλλακτική πρόταση  $T_k$ ». Ο προσδιορισμός της σημασίας αυτής της δήλωσης απαιτεί τη θεώρηση όλων των επιχειρημάτων, που υποστηρίζουν την κατάφαση  $Q$ , όπως και τη θεώρηση όλων των επιχειρημάτων, που είναι ενάντια σ' αυτή. Η σημασία αυτών των επιχειρημάτων, που υποστηρίζουν την  $Q$  αναλύεται μέσα από έναν έλεγχο συμφωνίας. Η μονάδα μέτρησης για την εκτίμηση αυτής της σημασίας είναι ο παγκόσμιος δείκτης συμφωνίας  $C(T_i, T_k) \in [0, 1]$ . Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι ο  $C$ , τόσο υψηλότερη είναι η σημασία των επιχειρημάτων, που υποστηρίζουν την κατάφαση  $Q$ . Ο παγκόσμιος δείκτης συμφωνίας υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος των επιμέρους δεικτών συμφωνίας, που ορίζονται για κάθε κριτήριο ως:

$$C(T_i, T_k) = \sum_{j=1}^n w_j C_j(g_{ij} - g_{kj}) \quad (2.27)$$

όπου  $w_j$  είναι ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου  $g_j$  (με  $\sum w_j = 1$  και  $w_j \geq 0$ ). Τα βάρη υποδηλώνουν την ισχύ κάθε κριτηρίου σε μια διαδικασία κατάταξης κριτηρίων από το χειρότερο στο καλύτερο. Στο πλαίσιο της ELECTRE, ο εκάστοτε ειδικός καλείται να ορίσει μία τιμή για τα βάρη. Με  $C_j(g_{ij} - g_{kj})$  συμβολίζεται ο επιμέρους δείκτης συμφωνίας, που ορίζεται ως συνάρτηση της διαφοράς  $(g_{ij} - g_{kj})$  μεταξύ της επίδοσης των  $T_i$  και  $T_k$  για το κριτήριο  $g_j$ . Ο δείκτης μερικής συμφωνίας αφορά την κατάφαση  $Q'$  που υποδηλώνει ότι «η εναλλακτική πρόταση  $T_i$  είναι τουλάχιστον τόσο καλή όσο η εναλλακτική πρόταση  $T_k$  για το κριτήριο  $g_j$ ». Ο δείκτης μερικής συμφωνίας κανονικοποιείται στο διάστημα  $[0, 1]$ . Με τιμές κοντά στη μονάδα υποδεικνύει ότι  $Q'$  είναι αληθής και με τιμές κοντά στο μηδέν υποδεικνύει ότι  $Q'$  είναι ψευδής.

Εκτός από την εκτίμηση της σημασίας των επιχειρημάτων, που υποστηρίζουν την κατάφαση  $Q'$ , εκτιμάται και η σημασία των επιχειρημάτων εναντίον της  $Q'$ . Αυτό γίνεται με τον έλεγχο ασυμφωνίας, που οδηγεί στον υπολογισμό του δείκτη ασυμφωνίας  $D_i(g_{ij} - g_{kj})$  για κάθε κριτήριο  $g_j$ . Ο δείκτης ασυμφωνίας μετρά τη σημασία των ενδείξεων, που είναι ενάντια στην κατάφαση  $Q'$ . Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης ασυμφωνίας, τόσο πιο σημαντική είναι η αντίθεση μεταξύ των εναλλακτικών προτάσεων υπό το συγκεκριμένο κριτήριο για το κύρος της κατάφασης  $Q'$ . Εάν η σημασία αυτής της αντίθεσης για το κριτήριο  $g_j$  είναι μεγαλύτερη από την τιμή ενός προκαθορισμένου κρίσιμου επιπέδου αναφοράς, τότε το κριτήριο ακυρώνει τη σημασία της κατάφασης  $Q'$  ανεξάρτητα από την επίδοση του υπό αξιολόγηση ζεύγους των εναλλακτικών προτάσεων  $(T_i, T_k)$  ως προς τα άλλα κριτήρια.

Εφόσον πραγματοποιηθούν οι έλεγχοι συμφωνίας και ασυμφωνίας, τα αποτελέσματα τους (δείκτης συμφωνίας  $C$  και δείκτης ασυμφωνίας  $D_j$ ) συνδυάζονται, για να δώσουν την τελική σχέση υπεροχής (final outranking relation) της εναλλακτικής  $T_i$  από την  $T_k$ , εφόσον πρώτα έχουν υπολογιστεί οι αντίστοιχες μέσες τιμές των μεγεθών ανάμεσα



στους ειδικούς. Συγκεκριμένα, μία τέτοια σχέση είναι η ακόλουθη [150]:

$$S(T_i, T_k) = \begin{cases} C(T_i, T_k), & \text{εάν } D_j(T_i, T_k) \leq C(T_i, T_k) \\ C(T_i, T_k) \prod_{j \in J(T_i, T_k)} \frac{1 - D_j(T_i, T_k)}{1 - C(T_i, T_k)} \end{cases} \quad (2.28)$$

όπου  $J(T_i, T_k)$  το σύνολο των κριτηρίων για τα οποία  $D_j(T_i, T_k) \leq C(T_i, T_k)$

Η εξαγωγή της βέλτιστης λύσης από το σύνολο  $T$  βασίζεται σε συγκεκριμένο αλγόριθμο κατάταξης σε διάφορα στάδια [149]. Σε πρώτο στάδιο κατατάσσονται οι δράσεις που έχουν συγκριθεί ανά δύο μέσω μιας ασαφούς διμερούς σχέσης τύπου  $d(\alpha, b)$ . Η εκμετάλλευση της ασαφούς υπεροχής πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη, δημιουργούνται δύο πλήρεις κατατάξεις (προδιατάξεις), μια κατερχόμενη (από τις καλύτερες στις χειρότερες εναλλακτικές)  $Z_1$  και μια ανερχόμενη (από τις χειρότερες στις καλύτερες εναλλακτικές)  $Z_2$ . Στη δεύτερη φάση, δημιουργείται μια μερική προδιάταξη  $Z$  ως το προϊόν τομής των δύο προηγούμενων προδιατάξεων  $Z_1$  και  $Z_2$ .

Η τελική κατάταξη εξάγεται μέσω του συνδυασμού των δύο προδιατάξεων. Τα αποτελέσματα των προδιατάξεων αθροίζονται σε έναν πίνακα κατάταξης. Υπάρχουν 4 πιθανές περιπτώσεις:

- Η εναλλακτική  $a$  κατατάσσεται ψηλότερα από τη  $b$  και στις δύο προδιατάξεις ή η  $a$  είναι καλύτερη της  $b$  στη μία προδιάταξη και έχει την ίδια κατάταξη στην άλλη, τότε η  $a$  είναι καλύτερη της  $b$ :  $a P^+ b$ .
- Η εναλλακτική  $a$  κατατάσσεται ψηλότερα από τη  $b$  στη μία προδιάταξη, αλλά η  $b$  κατατάσσεται ψηλότερα από την  $a$  στην άλλη, τότε η  $a$  είναι μη συγκρίσιμη με τη  $b$ :  $a R b$ .
- Η εναλλακτική  $a$  έχει την ίδια θέση κατάταξης με τη  $b$  και στις δύο προδιατάξεις, τότε η  $a$  είναι αδιάφορη της  $b$ :  $a I b$ .
- Η εναλλακτική  $a$  κατατάσσεται χαμηλότερα από τη  $b$  και στις δύο προδιατάξεις ή η  $a$  κατατάσσεται χαμηλότερα από τη  $b$  στη μία προδιάταξη και έχει την ίδια κατάταξη στην άλλη, τότε η  $a$  είναι χειρότερη της  $b$ :  $a P^- b$ .

Η τελική κατάταξη υπολογίζεται προσθέτοντας το πλήθος των  $P^+$ . Στην περίπτωση ισοδυναμίας, η σύγκριση μεταξύ των δύο εναλλακτικών με το ίδιο σκορ παίζει ρόλο στην αδιαφορία ή τη μη συγκρισιμότητα.

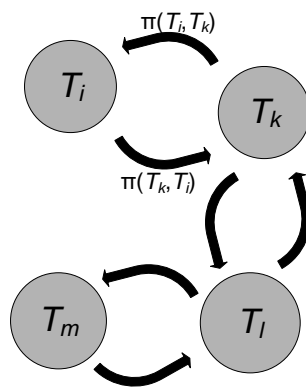
## 2.7.2 Προτίμηση Κατάταξης για τον Εμπλουτισμό των Αξιολογήσεων (PROMETHEE)

Η ανάπτυξη της οικογένειας των μεθόδων PROMETHEE ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1980 με την εργασία των Brans και Vincke [154] για τις μεθόδους PROMETHEE I και II. Οι μέθοδοι PROMETHEE I, II, III, IV, V, VI και TRI οδηγούν στην ανάπτυξη σχέσεων υπεροχής, που χρησιμοποιούνται για την επιλογή των καλύτερων εναλλακτικών προτάσεων ή για την ταξινόμηση από την περισσότερο προτιμητέα στη λιγότερο προτιμητέα εναλλακτική πρόταση [155]. Γενικά, οι μέθοδοι PROMETHEE απαιτούν τον καθορισμό μίας ορισμένης συνάρτησης υπεροχής για κάθε κριτήριο. Αυτή η συνάρτηση χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ο βαθμός προτίμησης που σχετίζεται με την καλύτερη εναλλακτική στην περίπτωση των ανά ζεύγων συγκρίσεων. Οι PROMETHEE υπολογίζουν θετικές και αρνητικές ροές προτίμησης για κάθε

εναλλακτική. Η θετική ροή εκφράζει το κατά πόσο μία εναλλακτική είναι η κυρίαρχη ως προς τις άλλες, και η αρνητική το κατά πόσο κυριαρχείται από τις υπόλοιπες. Η PROMETHEE I βασιζόμενη σε αυτές τις ροές μας οδηγεί σε μία μερική κατάταξη, ενώ η PROMETHEE II μας δίνει μία πλήρη κατάταξη που βασίζεται στην εξισορρόπηση των δύο ροών προτίμησης.

Η διαδικασία αξιολόγησης στην PROMETHEE δοθέντος ενός συνόλου  $T$  εναλλακτικών προτάσεων, ξεκινά με την ανά ζεύγη σύγκριση των εναλλακτικών προτάσεων  $(T_i, T_k)$  για τον προσδιορισμό του δείκτη προτίμησης  $\pi(T_i, T_k) \in [0,1]$ , οποίος μετρά το βαθμό προτίμησης της  $T_i$  ως προς την  $T_k$ . Ο δείκτης προτίμησης υπολογίζεται για κάθε ζευγάρι εναλλακτικών προτάσεων ως ο σταθμισμένος μέσος των αντίστοιχων συναρτήσεων προτίμησης της μίας εναλλακτικής πρότασης ως προς την άλλη και για όλα τα  $n$  κριτήρια. Ο δείκτης αυτός ορίζεται με παρόμοιο τρόπο με το δείκτη συμφωνίας στις μεθόδους ELECTRE (2.27) με τη διαφορά ότι στη θέση των δεικτών συμφωνίας  $C_j$  του κριτηρίου  $g_j$ , ορίζονται οι συναρτήσεις προτίμησης  $P_j$  για κάθε κριτήριο  $g_j$ . Όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης (με τιμή πλησιέστερη στη μονάδα), τόσο μεγαλύτερη είναι η προτίμηση για την εναλλακτική πρόταση  $T_i$  ως προς την  $T_k$ . Ο υπολογισμός του δείκτη προτίμησης εξαρτάται από τον προσδιορισμό των συντελεστών βαρύτητας  $w_j$  και των συναρτήσεων προτίμησης  $P_j$ . Οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων ανατίθενται από τον εκάστοτε ειδικό. Οι συναρτήσεις προτίμησης είναι συναρτήσεις της διαφοράς  $D_j = g_{ij} - g_{kj}$ , δηλαδή της διαφοράς μεταξύ των επιδόσεων των  $T_i$  και  $T_k$  για το κριτήριο  $g_j$  και κανονικοποιούνται μεταξύ των τιμών 0 και 1.

Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων για όλα τα ζεύγη των εναλλακτικών προτάσεων  $(T_i, T_k)$  είναι οργανωμένα σε γράφο, που ονομάζεται γράφος τιμών υπεροχής [81]. Οι κόμβοι του γράφου αντιπροσωπεύουν τις εναλλακτικές προτάσεις που αξιολογούνται, ενώ τα τόξα μεταξύ των κόμβων  $T_i$  και  $T_k$  αντιπροσωπεύουν την προτίμηση της εναλλακτικής πρότασης  $T_i$  ως προς την  $T_k$  (εάν η κατεύθυνση του τόξου είναι  $T_i \rightarrow T_k$ ) ή το ανάποδο (εάν η κατεύθυνση του τόξου είναι  $T_k \rightarrow T_i$ ).



Εικόνα 37: Γράφος Τιμών Υπεροχής

Κάθε τόξο συνδέεται με μία ροή, που αντιπροσωπεύει τον δείκτη προτίμησης  $\pi(T_i, T_k)$ , που είναι συνάρτηση  $D_j$  της διαφοράς μεταξύ των επιδόσεων δύο εναλλακτικών προτάσεων για οποιοδήποτε κριτήριο  $j$ , δηλαδή  $D_j = g_{ij} - g_{kj}$ . Τα κατώφλια αδιαφορίας και προτίμησης  $q$  και  $p$  ορίζονται ανάλογα με τον τύπο της συνάρτησης του κριτηρίου. Το άθροισμα όλων των ροών, που αφήνουν τον κόμβο  $T_i$  καλείται ροή απομάκρυνσης ή εξερχόμενη ροή  $\varphi^+(T_i)$ . Η ροή απομάκρυνσης εκφράζει το μέτρο του χαρακτήρα υπεροχής της εναλλακτικής πρότασης  $T_i$  ως προς τις άλλες εναλλακτικές προτάσεις του συνόλου  $T$ . Δείχνει δηλαδή το πόσο καλή είναι η συγκεκριμένη εναλλακτική πρόταση. Προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\varphi^+(T_i) = \sum_{\forall T_i, T_k \in T} \pi(T_i, T_k) \quad (2.29)$$

Με παρόμοιο τρόπο, το άθροισμα όλων των ροών, που εισέρχονται στον κόμβο  $T_i$  καλείται ροή εισόδου ή εισερχόμενη ροή  $\varphi^-(T_i)$ , ενώ ως καθαρή ροή ορίζεται το άθροισμα των ροών εξόδου και εισόδου. Η ροή εισόδου δείχνει την υπεροχή όλων των υπόλοιπων εναλλακτικών έναντι  $T_i$ . Η καθαρή ροή  $\varphi(T_i)$  είναι ένα συνολικό μέγεθος αξιολόγησης της εναλλακτικής  $T_i$  έναντι όλων των υπόλοιπων εναλλακτικών.

Στην PROMETHEE I οι παραπάνω ροές χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη δύο κατατάξεων, ενώ στην PROMETHEE II, υπάρχει μόνο μία κατάταξη για τις εναλλακτικές, η οποία γίνεται βάση των συνολικών τους ροών. Αυτή η κατάταξη ορίζεται ως εξής:

$$T_i P T_k \Leftrightarrow \varphi(T_i) > \varphi(T_k)$$

$$T_i I T_k \Leftrightarrow \varphi(T_i) = \varphi(T_k).$$

Η τελική κατάταξη πραγματοποιείται κατατάσσοντας τις εναλλακτικές με καλύτερη εκείνη που υπερέχει έναντι των περισσοτέρων λύσεων.

## 2.8 Μέθοδοι Προγραμματισμού Στόχων - TOPSIS

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο, πρόκειται να αναλυθεί η μέθοδος TOPSIS που χρησιμοποιείται κατά κόρον ως η δημοφιλέστερη μέθοδος προγραμματισμού των στόχων. Η μέθοδος TOPSIS αναπτύχθηκε από τους Hwang και Yoon [156] ως αντιπρόταση στις μεθόδους ELECTRE. Η βασική ιδέα της TOPSIS είναι ότι η τελικώς επιλεγείσα εναλλακτική πρόταση οφείλει να έχει την πιο μικρή απόσταση από μια ιδανική λύση.

Ως πρώτο βήμα, εάν θεωρήσουμε ότι έχουμε  $N$  εναλλακτικές και  $n$  κριτηρια, σχηματίζεται ο  $N \times n$  πίνακας απόφασης  $\mathbf{X} = [x_{ij}]$  με τις τιμές που λαμβάνουν οι εναλλακτικές για τα κριτήρια, σύμφωνα με τη γνώμη του εκάστοτε ειδικού, μέσα από μία δομημένη κλίμακα. Τα κριτήρια χωρίζονται σε δύο ομάδες, στην  $J_1$  που περιλαμβάνει τα κριτήρια που επιφέρουν κάποιος όφελος και στη  $J_2$  για τα κριτήρια που αντιστοιχούν σε κάποιο κόστος. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης  $\mathbf{R}$ , που βασίζεται στον πίνακα απόφασης  $\mathbf{X}$ . Τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{R}$  υπολογίζονται από τη σχέση:

$$R_{ij} = \frac{x_{ij}}{\left( \sum_{i=1}^n x_{ij}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.30)$$

όπου  $x_{ij}$  είναι η τιμή του  $j$ -οστού κριτηρίου για την  $i$ -οστή εναλλακτική πρόταση, από τον πίνακα απόφασης  $\mathbf{X}$ .

Παράλληλα, ο εκάστοτε ειδικός καλείται να αναθέσει τις τιμές των βαρών  $W_j$  για κάθε  $j$  κριτήριο. Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης σχηματίζεται χρησιμοποιώντας τον κανονικοποιημένο πίνακα απόφασης  $\mathbf{R}$  και τους συντελεστές βαρύτητας, που έχουν αποδοθεί στα κριτήρια. Συγκεκριμένα ο πίνακας αυτός υπολογίζεται από τη σχέση  $\mathbf{V} = [v_{ij}] = [w_j \cdot r_{ij}]$ , όπου  $w_j$  αναφέρεται στα μέσα κανονικοποιημένα βάρη του κριτηρίου  $j$  που δίνονται από τους ειδικούς και  $r_{ij}$  στα αντίστοιχα μέσα  $R_{ij}$ . Στη συνέχεια, προσδιορίζονται η ιδανική λύση  $T^+$  και η αρνητικά

ιδανική λύση  $T$ . Η  $T^+$  ορίζεται ως το σύνολο των μέγιστων  $v_{ij}$  για κάθε κριτήριο (αν το κριτήριο  $j$  ανήκει στην ομάδα  $J_1$ ) και των ελαχίστων  $v_{ij}$  (αν το κριτήριο  $j$  ανήκει στην ομάδα  $J_2$ ). Με παρόμοιο τρόπο ορίζεται η  $T^-$  ως το σύνολο των ελαχίστων  $v_{ij}$  για κάθε κριτήριο (αν το κριτήριο  $j$  ανήκει στην ομάδα  $J_1$ ) και των μέγιστων  $v_{ij}$  (αν το κριτήριο  $j$  ανήκει στην ομάδα  $J_2$ ). Πιο συγκεκριμένα:

$$\begin{aligned} T^+ &= \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+\} \\ T^- &= \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\} \end{aligned} \quad (2.31)$$

όπου  $v_j^+$  αντιστοιχεί στη μέγιστη ή ελάχιστη τιμή του  $v_{ij}$  για το κριτήριο  $j$ , εάν  $j \in J_1$  ή  $j \in J_2$  αντίστοιχα. Ενώ το  $v_j^-$  αντιστοιχεί στην ελάχιστη ή μέγιστη τιμή του  $v_{ij}$  για το κριτήριο  $j$ , εάν  $j \in J_1$  ή  $j \in J_2$  αντίστοιχα.

Κατά συνέπεια οι Ευκλείδειες αποστάσεις της κάθε μία εναλλακτικής πρότασης από την ιδανική και την αρνητικά ιδανική λύση προσδιορίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$S_i^+ = \left[ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

$$S_i^- = \left[ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

Τέλος, η εναλλακτική πρόταση με την πλησιέστερη θέση ως προς την ιδανική λύση προκύπτει από τον υπολογισμό του λόγου που ακολουθεί και η εναλλακτική πρόταση με την υψηλότερη τιμή  $C_i^+$  επιλέγεται ως η περισσότερο προτιμητέα (καλύτερη) εναλλακτική πρόταση [81]:

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{(S_i^+ + S_i^-)} \quad (2.34)$$

όπου  $0 < C_i^+ < 1$  για κάθε εναλλακτική  $i=1,2,\dots,n$ .

## 2.9 Μέθοδοι Ανάλυσης Προτιμήσεων

Στο πλαίσιο των μεθόδων ανάλυσης προτιμήσεων, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των μεθόδων πολυκριτηριακής λήψης απόφασης που παρουσιάστηκε παραπάνω, πρόκειται να αναλυθούν οι μέθοδοι UTA και MHDIS

### 2.9.1 Αθροιστικές Χρησιμότητες (UTA)

Η μέθοδος UTA χαρακτηρίζεται ως η μέθοδος τακτικής οπισθοδρόμησης (ordinal regression), που αναπτύχθηκε από τους Jacquet-Lagrange και Siskos, το 1982 [157].

Η μέθοδος βασίζεται στο γραμμικό προγραμματισμό [158] με αντικειμενικό σκοπό να αναπτυχθεί μία προσθετική συνάρτηση χρησιμότητας, που να είναι όσο το δυνατόν συνεπής με τον τρόπο, που αξιολογεί ο λήπτης απόφασης [157], [160]. Γι' αυτό και είναι η μόνη πολυκριτηριακή μέθοδος, η οποία για την εφαρμογή της χρειάζεται, εκτός από τις επιδόσεις των εναλλακτικών προτάσεων για κάθε ένα κριτήριο, τις προτιμήσεις του ειδικού στη λήψη απόφασης ως προς ένα υποσύνολο των εναλλακτικών προτάσεων. Δηλαδή χρειάζεται μία εκ των προτέρων κατάταξη [158]. Με αυτό τον τρόπο η μέθοδος εκτιμά τον τρόπο, που δομεί τις προτιμήσεις του ο εκάστοτε ειδικός, υποθέτοντας ότι είναι άγνωστος και τον παρουσιάζει μέσω των συναρτήσεων χρησιμότητας για κάθε κριτήριο, οι οποίες με τη σειρά τους προσδιορίζονται μέσω τεχνικών γραμμικού προγραμματισμού.

Ως πρώτο βήμα της UTA είναι ο προσδιορισμός του υποσυνόλου του συνόλου  $A$  των

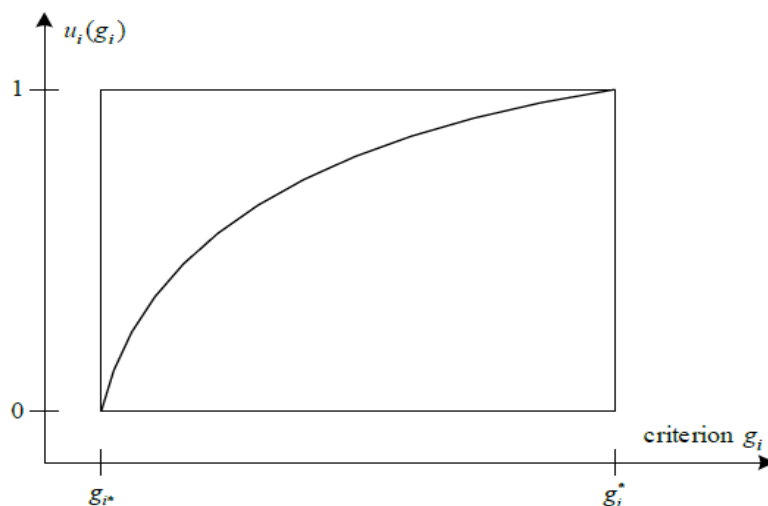
εναλλακτικών προτάσεων. Το υποσύνολο αυτό περιέχει τις εναλλακτικές προτάσεις αναφοράς τις οποίες ο εκάστοτε ειδικός γνωρίζει πολύ καλά, καθώς έχει εμπειρία με αυτές. Ο ειδικός προδιατάσσει τις  $N$  εναλλακτικές προτάσεις στο σύνολο αναφοράς ώστε  $T_1 > T_2 > T_3 > \dots > T_N$

Στη συνέχεια διατυπώνεται η γραμμική προσθετική συνάρτηση χρησιμότητας ως εξής:

$$U[g(T_i)] = \sum_{j=1}^n w_j u_j [g_j(T_i)], \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (2.35)$$

όπου  $g_j$  συμβολίζει την επίδοση της εναλλακτικής σε ένα κριτήριο  $j$ ,  $w_j$  οι συντελεστές βαρύτητας των κριτηρίων, που καθορίζονται από τους ειδικούς στη λήψη απόφασης. Επίσης,  $T_i$  είναι οι εναλλακτικές προτάσεις αναφοράς και  $u_j$  οι συναρτήσεις χρησιμότητας της επίδοσης της εναλλακτικής πρότασης  $T_i$  για το  $j$ -οστό κριτήριο. Για κάθε κριτήριο  $j = 1, 2, \dots, n$  εκτιμώνται οι οριακές συναρτήσεις χρησιμότητας  $u_j(g_j) \in [0, 1]$ . Συγκεκριμένα, ισχύουν:  $u_j\{g_j^*, g_j^*\} \rightarrow [0, 1]$ ,  $u_j(g_j^*) = 0$ ,  $u_j(g_j^*) = 1$ , όπου  $g_j^*$ ,  $g_j^*$  η χειρότερη και η καλύτερη τιμή αντίστοιχα για το  $j$ -οστό κριτήριο. Στη σχέση (2.35) τοποθετούνται οι μέσες τιμές των κρίσεων που πραγματοποιούνται από ένα πλήθος ειδικών.

Μια ενδεικτική συνάρτηση χρησιμότητας παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί, όπου  $g_j^*$ ,  $g_j^*$  αντιστοιχούν στη χαμηλότερη και υψηλότερη αντίστοιχα επίδοση για το κριτήριο  $g_j$ :



**Εικόνα 38: Κανονικοποιημένη συνάρτηση χρησιμότητας για το κριτήριο  $g_j$**

Η εφαρμογή της προσθετικής συνάρτησης χρησιμότητας (2.35) επιτρέπεται εφόσον ισχύει η θεμελιώδης υπόθεση ότι τα κριτήρια είναι αμοιβαία ανεξάρτητα βάση των προτιμήσεων του λήπτη απόφασης.

Κάθε προτίμηση ή αδιαφορία, που προσδιόρισε ο ειδικός στην προδιάταξη μεταφράζεται στους ακόλουθους περιορισμούς:

- $g(T_i) \sim g(T_k)$ , παρέχει την εξίσωση  $U(g(T_i)) - U(g(T_k)) = 0$
- $g(T_i) > g(T_k)$ , παρέχει την ανίσωση  $U(g(T_i)) - U(g(T_k)) > 0$

Η ανίσωση  $U(g(T_i)) - U(g(T_k)) > 0$  μετατρέπεται σε  $U(g(T_i)) - U(g(A_k)) \geq \epsilon$  όπου  $\epsilon$  πολύ μικρός θετικός αριθμός, που θα πρέπει να επιλεγεί ανάλογα με την αριθμητική ακρίβεια, που χρησιμοποιείται στον γραμμικό προγραμματισμό. Η μορφή της προσθετικής συνάρτησης χρησιμότητας, που θα προσδιορισθεί από αυτές τις σχέσεις, υποτίθεται ότι είναι συνεπής με τον τρόπο, που αξιολογεί ο λήπτης απόφασης, εφόσον αναπαράγει

τη δοσμένη προ-διάταξη των εναλλακτικών προτάσεων αναφοράς, δηλαδή  $U(T_1) > U(T_2) > \dots > U(T_m)$ .

Δύο τύποι πιθανών σφαλμάτων δύνανται να υπεισέλθουν μετά τον προσδιορισμό της προσθετικής συνάρτησης χρησιμότητας, το σφάλμα υποεκτίμησης  $\sigma^-$  και το σφάλμα υπερεκτίμησης  $\sigma^+$  της τιμής χρησιμότητας της εκάστοτε εναλλακτικής. Συνεπώς η τιμή της εναλλακτικής πρότασης αναφοράς  $T_i$  δύνανται να γραφεί μετά τον προσδιορισμό της προσθετικής συνάρτησης χρησιμότητας και τον υπολογισμό των σφαλμάτων ως  $U[g(T_i)] = U[g(T_i)] - \sigma_i^- + \sigma_i^+$ . Σύμφωνα με τα παραπάνω, η διαφορά τιμών μεταξύ δύο εναλλακτικών προτάσεων αναφοράς  $T_i$  και  $T_{i+1}$  ορίζεται ως  $\Delta(T_i, T_{i+1}) = U[g(T_i)] - \sigma_i^- + \sigma_i^+ - [U[g(T_{i+1})] - \sigma_{i+1}^- + \sigma_{i+1}^+]$ .

Ο έλεγχος της ύπαρξης λύσης στο σύστημα με τους γραμμικούς περιορισμούς γίνεται μέσω συνήθων τεχνικών του προγραμματισμού στόχων [160], με σκοπό την

ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των σφαλμάτων  $Z = \sum_{i=1}^N (\sigma_i^+ + \sigma_i^-)$ , υπό συγκεκριμένους περιορισμούς. Η βέλτιστη λύση αυτού του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού αντιστοιχούν στην εναλλακτική που είναι η πλέον κατάλληλη για το υπό μελέτη πρόβλημα.

### 2.9.2 Ιεραρχικής Διάκρισης Πολλαπλών Ομάδων (MHDIS)

Η μέθοδος MHDIS εφαρμόζεται για πολύπλοκα προβλήματα ταξινόμησης, που αφορούν πολλαπλές ομάδες εναλλακτικών προτάσεων [161]. Η μέθοδος εφαρμόζεται και για την περίπτωση δύο μόνο ομάδων και αφορά προβλήματα ταξινόμησης μέσω μιας διαδικασίας ιεράρχησης, κατά τη διάρκεια της οποίας οι ομάδες διαχωρίζονται, ξεκινώντας από το διαχωρισμό της ομάδας  $O_1$  (που περιέχει τις περισσότερες προτιμητέες εναλλακτικές προτάσεις) ως προς τις υπόλοιπες ομάδες. Σε κάθε βήμα αυτής της διαδικασίας δύο συναρτήσεις αθροιστικής χρησιμότητας αναπτύσσονται για την κατηγοριοποίηση των εναλλακτικών προτάσεων. Υποθέτοντας ότι η κατάταξη των εναλλακτικών προτάσεων πρέπει να γίνει με  $q$  διατεταγμένες ομάδες  $O_1 > O_2 > \dots > O_q$ .

Στη συνέχεια αναπτύσσονται  $2(q - 1)$  συναρτήσεις αθροιστικής χρησιμότητας (με πεδίο τιμών μεταξύ 0 και 1) με την ακόλουθη αθροιστική μορφή:

$$U_k(T_i) = \sum_{j=1}^n u_{kj}(g_{ij}) \quad (2.36)$$

$$U_{-k}(T_i) = \sum_{j=1}^n u_{-kj}(g_{ij}) \quad (2.37)$$

Η συνάρτηση  $U_k$  μετρά τη χρησιμότητα για τον λήπτη απόφασης για την απόφαση σχετικά με την εναλλακτική πρόταση στην ομάδα  $O_k$ , ενώ η δεύτερη συνάρτηση  $U_{-k}$  αντιστοιχεί στην ταξινόμηση μέσα στο σύνολο των ομάδων  $O_{-k} = \{O_{k+1}, O_{k+2}, \dots, O_q\}$ . Τα μεγέθη  $u_{kj}, g_{ij}$  ορίζονται αντίστοιχα με την προηγούμενη μέθοδο UTA.

Εκτός από το πλαίσιο ιεραρχικής ταξινόμησης, η μέθοδος έχει ένα ακόμη χαρακτηριστικό, που την ξεχωρίζει από τις προσεγγίσεις ταξινόμησης γραμμικού προγραμματισμού. Αυτό αφορά το πλαίσιο βελτιστοποίησης (optimization) το οποίο χρησιμοποιεί, για να αναπτυχθεί το βέλτιστο μοντέλο ταξινόμησης (optimal sorting model) με συναρτήσεις αθροιστικής χρησιμότητας.

### 2.10 Θεωρία Ακατέργαστου Συνόλου

Ο Pawlak το 1982 [162] εισήγαγε τη θεωρία ακατέργαστου συνόλου ως ένα εργαλείο, για να περιγράψει τις εξαρτήσεις μεταξύ των εναλλακτικών προτάσεων, να

αξιολογήσει τη σημασία των κριτηρίων και να διαχειρισθεί ασυνεπή δεδομένα.

Η θεωρία βασίζεται στην υπόθεση ότι κάθε εναλλακτική πρόταση συνδέεται με συγκεκριμένες πληροφορίες. Αυτές οι πληροφορίες υποστηρίζουν δύο τύπους κριτηρίων: τα κριτήρια συνθήκης και τα κριτήρια απόφασης. Τα κριτήρια συνθήκης χρησιμοποιούνται, για να περιγράψουν τα χαρακτηριστικά των εναλλακτικών προτάσεων, ενώ τα κριτήρια απόφασης για να καθορίσουν το διαχωρισμό των εναλλακτικών προτάσεων σε ομάδες. Εναλλακτικές προτάσεις, οι οποίες έχουν την ίδια περιγραφή χρησιμοποιώντας τους όρους των κριτηρίων συνθήκης θεωρούνται δυσδιάκριτες μεταξύ τους, δηλαδή δε μπορεί η μία να ξεχωρίσει από την άλλη. Αυτή η σχέση μεταξύ των εναλλακτικών προτάσεων αποτελεί την κύρια μαθηματική βάση της θεωρίας ακατέργαστου συνόλου. Οποιοδήποτε σύνολο περιέχει αυτές τις δυσδιάκριτες εναλλακτικές προτάσεις καλείται στοιχειώδες σύνολο.

Οποιοδήποτε σύνολο εναλλακτικών προτάσεων προκύπτει από την ένωση ορισμένων στοιχειωδών συνόλων αναφέρεται ως ακριβές σύνολο (*crisp or precise*), διαφορετικά ως ακατέργαστο σύνολο (*rough, imprecise or vague*). Ένα ακατέργαστο σύνολο προσεγγίζεται από ένα ζεύγος ακριβών συνόλων, που καλούνται κατώτερη και ανώτερη προσέγγιση. Η κατώτερη προσέγγιση περιέχει τις εναλλακτικές προτάσεις, που σίγουρα ανήκουν στο σύνολο, ενώ η ανώτερη εκείνες, που πιθανόν να ανήκουν στο σύνολο. Μ' αυτή τη διαδικασία η θεωρία ακατέργαστου συνόλου περιορίζει τη διαθέσιμη πληροφορία, ώστε να διατηρήσει μόνο εκείνη, που είναι απολύτως απαραίτητη για την περιγραφή και ταξινόμηση των εναλλακτικών προτάσεων.

## 2.11 Επιλογή της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, η μελέτη και ανάπτυξη ενός οδικού χάρτη με εφαρμογή στα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς βασίστηκε στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία καθώς επίσης και στις παραλλαγές της, όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υπόκεφαலைο.

Πρωτεύον πλεονέκτημα της AHP αποτελεί η δημιουργία δομημένης ιεραρχίας των κριτηρίων, υποκριτηρίων και εναλλακτικών λύσεων, η οποία διευκολύνει την κατανόηση του προβλήματος, την διατύπωση και υποστήριξη βέλτιστων λύσεων. Η δομή αυτή μιμείται τον τρόπο προσέγγισης πολύπλοκων καταστάσεων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία αποτελεί μία σχετικά απλή μεθοδολογία καθορισμού συντελεστών βαρύτητας για τα κριτήρια. Μέσω της AHP διευκολύνεται ο προσδιορισμός των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων ακόμη και σε πολύπλοκα προβλήματα επιλογής, ενώ ταυτόχρονα κρίνεται κατάλληλη για αποφάσεις με χρήση ποιοτικών και ποσοτικών κριτηρίων, σε αντίθεση με τις μεθόδους που δε διαθέτουν ξεκάθαρο τρόπο προσδιορισμού των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων. Παράλληλα, η AHP δεν υποθέτει την πλήρη μεταβατικότητα των προτιμήσεων των ληπτών απόφασης και βασίζεται σε μια δομημένη διαδικασία ιεράρχησης που δεν απαιτεί την απευθείας ταξινόμηση των εναλλακτικών από τους λήπτες απόφασης. Επιπρόσθετα, η μέθοδος παρέχει τρόπους υπολογισμού της συνέπειας των εκτιμήσεων του λήπτη απόφασης και επιτρέπει συγκεκριμένο επίπεδο ασυνέπειας (σε σχέση με τις μεθόδους που απαιτούν οι λήπτες απόφασης να είναι συνεπείς), το οποίο στα περισσότερα σενάρια αποφάσεων είναι ρεαλιστικό.

Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί ότι AHP βασίζεται σε μία πλέον αποδεκτή κλίμακα, η οποία μπορεί να γίνεται εύκολα κατανοητή από τον εκάστοτε ειδικό, που καλείται να λάβει μέρος στη λήψη απόφασης. Κατά συνέπεια, η μέθοδος είναι σχετικά εύκολη, για

να γίνει κατανοητή από τους λήπτες απόφασης. Επιπλέον, είναι ευκολότερος ο υπολογισμός λόγων (στην AHP) αντί συναρτήσεων χρησιμότητας με βάση πιθανολογικές εκτιμήσεις, όπως απαιτείται σε αυτές τις μεθόδους. Αντίθετα σε άλλες πολυκριτηριακές μεθόδους είναι δύσκολο ο λήπτης απόφασης να δικαιολογήσει τις τιμές, που επιλέχθηκαν για παραμέτρους που αφορούν τα κατώφλια συμφωνίας και ασυμφωνίας. Επιπρόσθετα, απαιτεί λιγότερα δεδομένα από τον ειδικό στη λήψη απόφασης συγκριτικά με τις μεθόδους που προϋποθέτουν για παράδειγμα τον υπολογισμό συνάρτησης προτίμησης για κάθε κριτήριο.

Δεδομένων των πλεονεκτημάτων της και της ευκολίας εφαρμογής της, είναι γεγονός ότι η AHP καθώς και οι παραλλαγές της χρησιμοποιούνται ευρέως ανά τον κόσμο σε πολλές εφαρμογές δίνοντας τη δυνατότητα εύρεσης της κατάλληλης λύσης ή συνδυασμού λύσεων μέσα από την ιεράρχιση και την επιμέρους ανάλυση του προβλήματος σε εξειδικευμένα χαρακτηριστικά. Στο πλαίσιο εξάλλου, των τεχνολογικών λύσεων, που μελετούνται στην παρούσα διατριβή, η υποανάλυση του προβλήματος σε επιμέρους κριτήρια και παράγοντες που αφορούν την εκάστοτε τεχνολογική λύση είναι υψίστης σημασίας, προκειμένου να μπορεί να εξασφαλιστεί η πλέον κατάλληλη και αποδοτική λήψη απόφασης με βάση τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Παράλληλα, οι εμπειρογνώμονες στους οποίους βασίστηκε η διαδικασία λήψης απόφασης είναι εξειδικευμένοι στην εκάστοτε υπό μελέτη τεχνολογία και με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ως πλέον αποδοτική η μέθοδος της AHP για τον υπολογισμό της κατάταξης των εναλλακτικών προτάσεων.

## 2.12 Διαδικτυακή Πλατφόρμα Υποστήριξης της AHP

Η παρούσα διδακτορική διατριβή συνέβαλε στην ανάπτυξη μιας διαδικτυακής πλατφόρμας για την υποστήριξη των ερευνών που πραγματοποιήθηκαν με βάση την AHP, για την μελέτη και ανάπτυξη ενός οδικού χάρτη με εφαρμογή στα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα αναπτύχθηκε από το Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών [163]. Πιο συγκεκριμένα, οι εκάστοτε ειδικοί που κλήθηκαν να συμμετέχουν στις αντίστοιχες έρευνες εισέρχονταν στο διαδικτυακό σύστημα με τον προσωπικό τους λογαριασμό και είχαν τη δυνατότητα να συμμετέχουν στην εκάστοτε έρευνα για την οποία είχαν την αντίστοιχη δικαιοδοσία. Ενδεικτικά, στην Εικόνα 39, παρουσιάζεται η αρχική σελίδα που εμφανίζεται στον εκάστοτε ειδικό, ο οποίος έχει το δικαίωμα συμμετοχής σε μία ή και περισσότερες έρευνες από εκείνες που εμφανίζονται στο προφίλ του.

The screenshot shows the 'Online Survey Tool' interface. At the top left is a logo with a line graph. To the right are links for 'Home page', 'Login', and '>>click here to register activate your account'. Below this is a navigation bar with tabs: '2. Omega Network Pairwise Survey', '3. Survey on HDTV', and '4. Survey on'. A section titled 'Current open Surveys' contains a table:

Survey ID	Survey Name	Instructions	Date
1.	User Profile Questions	<a href="#">instructions</a>	09/01/2009
2.	Omega Network Pairwise Survey	<a href="#">instructions</a>	08/02/2009
3.	Survey on HDTV	<a href="#">instructions</a>	08/02/2009
4.	Survey on VOIP	<a href="#">instructions</a>	08/02/2009

Below the table is a search bar labeled 'Search surveys' with a 'submit' button. At the bottom of the page is a footer with the logo of the National and Kapodistrian University of Athens and its name in Greek and English.



**Εικόνα 39: Αρχική σελίδα διαδικτυακής πλατφόρμας.**

Μέσω της συγκεκριμένης διαδικτυακής πλατφόρμας οι ειδικοί έχουν τη δυνατότητα συμμετοχής σε όλες τις διαδικασίες για τις οποίες απαιτείται η γνώμη τους στο πλαίσιο της ΑHP και των παραλλαγών της, σύμφωνα πάντα με τον τομέα ειδίκευσής του. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με το εκάστοτε υπό μελέτη πρόβλημα, όπως θα αναλυθεί σε επόμενα κεφάλαια, οι ειδικοί μπορούσαν να εισέλθουν στο σύστημα και να συμπληρώσουν τους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη, την πρόβλεψη των μετρικών της τεχνολογίας για τους παράγοντες της εκάστοτε τεχνολογίας, καθώς επίσης και την αποτύπωση των αντίστοιχων τιμών επιθυμίας. Στην Εικόνα 40 που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά ένας πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη για τα διάφορα κριτήρια στο πλαίσιο της έρευνας για το οικιακό δίκτυο, που θα αναλυθεί παρακάτω. Παράλληλα, στην Εικόνα 41 παρουσιάζεται ο πίνακας συγκρίσεων για τους παράγοντες που ανήκουν στο κριτήριο της απόδοσης του δικτύου.

The screenshot shows the 'Online Survey Tool' interface. At the top, there are navigation links: 'Home page', 'Management page', and 'Γιούλη Δέδε logout'. Below the navigation bar, the title '2. Omega Network Pairwise Survey' and 'Current User: DVaroutas' are displayed. The main content is a pairwise comparison table for five criteria:

	Criteria 2: Economic Business	Criteria 3: Operation Administration & Maintenance	Criteria 4: Social Acceptance	Criteria 5: Flexibility
<b>Criteria 1: System Performance</b>	- 60	30	50	50
<b>Criteria 2: Economic/Business</b>	- 30	50	30	
<b>Criteria 3: Operation Administration &amp; Maintenance</b>	- 60	50		
<b>Criteria 4: Social Acceptance</b>	- 30			

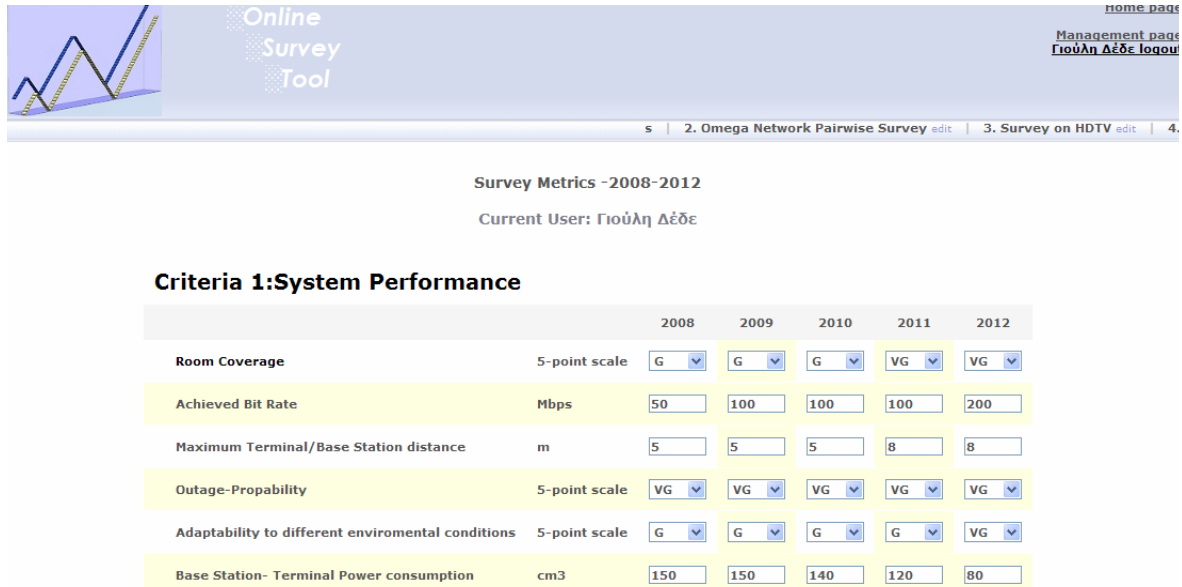
**Εικόνα 40: Πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη για τα κριτήρια του δικτύου OMEGA**

The screenshot shows the 'Online Survey Tool' interface for 'Factors of Criterion 1 (System Performance)'. At the top, there are navigation links: 'Home page', 'Management page', and 'Γιούλη Δέδε logout'. Below the navigation bar, the title '2. Omega Network Pairwise Survey' and 'Current User: DVaroutas' are displayed. The main content is a pairwise comparison table for four factors:

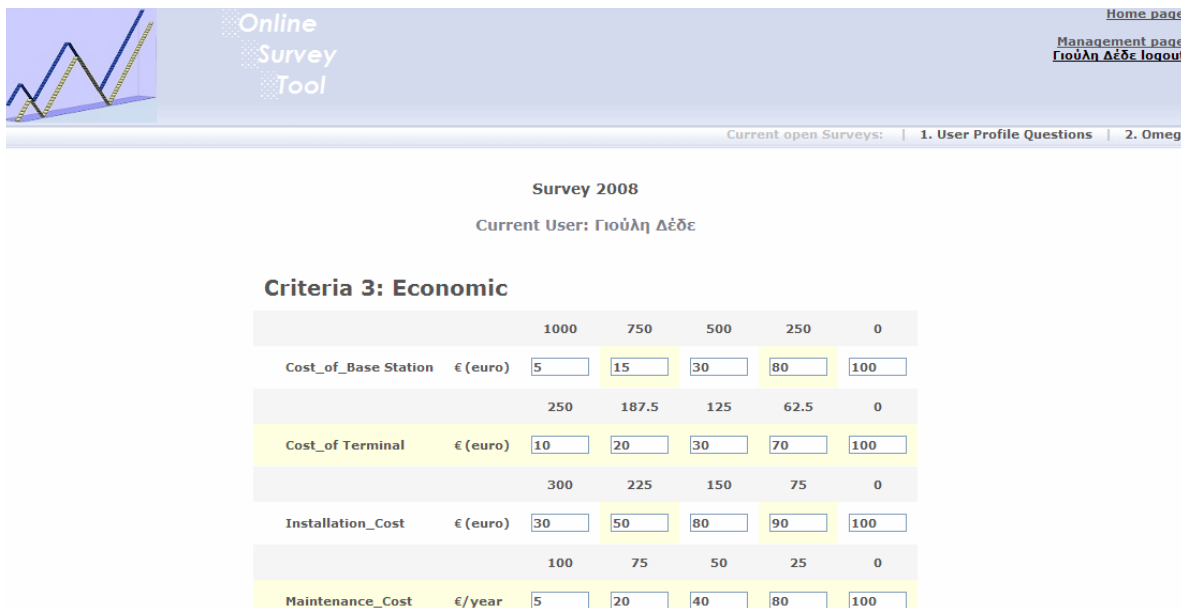
	1.2 Maximum Bit Rate	1.3 Ease of use	1.4 Network Congestion Propability
<b>1.1 Coverage</b>	- 50	30	30
<b>1.2 Maximum Bit Rate</b>	- 60	50	
<b>1.3 Ease of use</b>	- 20		

**Εικόνα 41: Πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη για τους παράγοντες του κριτηρίου απόδοσης του δικτύου.**

Στις Εικόνα 42, Εικόνα 43 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι διαδικασίες πρόβλεψης των μετρικών της τεχνολογίας καθώς και ανάθεσης των τιμών επιθυμίας για τους παράγοντες των κριτηρίων απόδοσης και οικονομικών θεμάτων αντίστοιχα.



**Εικόνα 42: Πρόβλεψη τεχνολογικών μέτρων για τους παράγοντες του κριτηρίου της απόδοσης του δικτύου.**



**Εικόνα 43: Ανάθεση τιμών επιθυμίας για τους παράγοντες του κριτηρίου που σχετίζεται με τα οικονομικά θέματα του δικτύου.**

Παράλληλα, με την συμπλήρωση των ερευνών, το σύστημα αναπτύχθηκε, έτσι ώστε να υποστηρίζει και τον αντίστοιχο αλγόριθμο που απαιτείται στο πλαίσιο της AHP και της TDE για τον υπολογισμό των τελικών προτεραιοτήτων των εναλλακτικών λύσεων. Συνεπώς, ύστερα από τη συμπλήρωση των ερευνών, πραγματοποιείται διασύνδεση του αντίστοιχου μαθηματικού αλγορίθμου με τα δεδομένα των ερευνών, τα οποία έχουν αποθηκευτεί στην κεντρική βάση του συστήματος. Στη συνέχεια, μέσω της

χρήσης του εκάστοτε αλγορίθμου υπολογίζονται τα βάρη, οι συναρτήσεις επιθυμίας και όλα τα δεδομένα γενικότερα που απαιτούνται με απώτερο σκοπό τον υπολογισμό των τελικών προτεραιοτήτων των εναλλακτικών λύσεων του υπό μελέτη προβλήματος.

### 3 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΘΕΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο και δεδομένης της προσπάθειας δημιουργίας ενός οδικού χάρτη για τα μελλοντικά οικιακά δίκτυα, είναι επιτακτική η ανάγκη της μελέτης ποικίλων κρίσιμων τεχνολογικών και κοινωνικοοικονομικών θεμάτων, προκειμένου να διευρευνηθεί η επιρροή που εξασκούν στην ανάπτυξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων.

Η εκτίμηση των προαναφερθέντων θεμάτων πραγματοποιήθηκε μέσω μιας ομάδας ερευνών που βασίζονται στις συγκρίσεις ανά ζεύγη, αναπόσπαστο μέρος της μεθόδου Αναλυτικής Διαδικασίας Ιεράρχησης, όπως παρουσιάστηκε στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο (2.3.1.2). Η εν λόγω μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την ποσοτικοποίηση της σημασίας κάθε τεχνολογικού και κοινωνικοοικονομικού παράγοντα που ενδέχεται να επηρεάσει τα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, ένα μέρος των ερευνών αφορούν τα γενικά χαρακτηριστικά των μελλοντικών οικιακών δικτύων, ενώ άλλες εστιάζουν σε θέματα που εξειδικεύονται περισσότερο σε θέματα που απασχόλησαν το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα OMEGA [57], όπως η συσκευή επέκτασης, η ανάπτυξη της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας (HDTV) καθώς και η μετάδοση φωνής μέσω Διαδικτυακού πρωτοκόλλου (VoIP).

Σύμφωνα με την AHP, εφόσον ο γενικότερος στόχος της ιεραρχίας έχει πρώτα οριστεί, θα πρέπει να καθοριστούν τα διάφορα κριτήρια καθώς και οι παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν την απόφαση. Ένα κριτήριο μπορεί να είναι ένα γενικό χαρακτηριστικό μιας τεχνολογίας. Για παράδειγμα, η απόδοση της υπηρεσίας μπορεί να είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την υιοθέτηση των υπηρεσιών VoIP και HDTV. Τα κριτήρια είναι συχνά γενικοί όροι και λαμβάνουν υπόψη πολλαπλές πτυχές που σχετίζονται με το εκάστοτε πρόβλημα. Η ποιότητα της υπηρεσίας, για παράδειγμα, περιλαμβάνει πολλά σχετικά θέματα, όπως το διαθέσιμο εύρος ζώνης, η κάλυψη κ.α. Η ομάδα των κριτηρίων ορίζεται στο δεύτερο επίπεδο της AHP ιεραρχίας, όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 31. Στο τρίτο επίπεδο τα κριτήρια αναλύονται περαιτέρω καθορίζοντας έναν αριθμό παραγόντων/υποκριτηρίων για κάθε κριτήριο. Ένας παράγοντας είναι ένα ειδικότερο χαρακτηριστικό που μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και χαρακτηρίζει το εκάστοτε κριτήριο. Για παράδειγμα, ο ρυθμός δεδομένων μπορεί να είναι ένας παράγοντας για την ποιότητα της υπηρεσίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παράγοντες μπορούν είτε να ποσοτικοποιηθούν με τη χρήση αριθμητικών τιμών (π.χ. στην περίπτωση του ρυθμού των bits σε Mb/s) είτε χρησιμοποιώντας μια ποιοτική κλίμακα (για παράδειγμα, μία κλίμακα 6 σημείων: Εξαιρετικό - Ε, Πολύ καλό -VG, Καλό - G, Μέσο - A, Ανεπαρκές - P, Απαραδέκτο - U) [104].

Στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου χρησιμοποιείται η μεθοδολογία των συγκρίσεων ανά ζεύγη στο δεύτερο και τρίτο επίπεδο της AHP ιεραρχίας, προκειμένου να αξιολογηθούν ποικίλα θέματα ιδιαίτερου ενδιαφέροντος που ενδέχεται να επηρεάσουν την ανάπτυξη των οικιακών δικτύων επόμενης γενιάς [164].

#### 3.1 Σχεδιασμός Ερευνών

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, οι συγκρίσεις ανά ζεύγη πραγματοποιήθηκαν μέσω της διαδικτυακής εφαρμογής που αναπτύχθηκε από το Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών [163] για τις ανάγκες των ερευνών και της δημιουργίας οδικών χαρτών (2.12). Οι ειδικοί που καλούνται να λάβουν μέρος στη συμπλήρωση των εκάστοτε συγκρίσεων ανά ζεύγη,

συνδέονται στη συγκεκριμένη πλατφόρμα και συμπληρώνουν τα αντίστοιχα ερωτηματολόγια. Στη συνέχεια, τα δεδομένα που συλλέγονται από τους χρήστες αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων και είναι εύκολα προσπελάσιμα, προκειμένου να επεξεργαστούν περαιτέρω με σκοπό τον υπολογισμό των βαρών που καθορίζουν τη σημαντικότητα των κριτηρίων και των παραγόντων σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.10), (2.16), (2.17), του 2.3.1.2.

### 3.1.1 Στόχοι των Ερευνών

Στο παρόν υποκεφάλαιο περιγράφονται οι στόχοι των τεσσάρων αρχικών ερευνών που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να καθοριστεί η σημαντικότητα των διαφόρων θεμάτων που σχετίζονται με την ανάπτυξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Οι συγκεκριμένες έρευνες σχεδιάστηκαν σε συνεργασία με τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και οριστικοποιήθηκαν σύμφωνα με τα σχόλια και τις παρατηρήσεις των υπολοίπων συνεργατών του ICT-OMEGA. Στη συνέχεια, παρατίθενται ο σκοπός και οι στόχοι για κάθε μία από τις προαναφερθείσες έρευνες:

- Έρευνα για το Οικιακό Δίκτυο (Network Survey): Η εν λόγω έρευνα αφορά την εκτίμηση της σημαντικότητας των ποικίλων θεμάτων που καθορίζουν την ανάπτυξη των πτυχών του οικιακού δικτύου (τεχνικά, κοινωνικοοικονομικά θέματα κ.α.). Μία ομάδα από εικοσιεπτά συμμετέχοντες συμπλήρωσαν τους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη. Οι εμπειρογνώμονες συμπλήρωσαν του πίνακες χωρίς να λάβουν υπόψη τους κάποια συγκεκριμένη υπηρεσία στο πλαίσιο του μελλοντικού οικιακού δικτύου.
- Έρευνα για το στοιχείο επέκτασης (Extender Device Survey): Η λειτουργικότητα του στοιχείου επέκτασης θεωρήθηκε ως μία από τις θεμελιώδεις πτυχές του οικιακού δικτύου, όπως αναλύθηκε στο 1.2, και για αυτό το λόγο αποφασίστηκε να υπάρχει μία έρευνα αποκλειστικά για τη συγκεκριμένη συσκευή. Εικοσιπέντε ειδικοί συμμετείχαν στη συμπλήρωση των αντίστοιχων πινάκων. Παρομοίως με την ανωτέρω έρευνα, οι ειδικοί δεν έλαβαν υπόψη τους καμία συγκεκριμένη υπηρεσία του μελλοντικού οικιακού δικτύου.
- Έρευνα για την υπηρεσία HDTV (HDTV Survey): Η HDTV αποτελεί μια σημαντική υπηρεσία που θα δώσει την ώθηση για τη διείσδυση του μελλοντικού οικιακού δικτύου. Για αυτό το λόγο, κρίθηκε σκόπιμο να διεξαχθεί λεπτομερή ανάλυση για την παρούσα υπηρεσία. Μία ομάδα από εικοσιέξι εμπειρογνώμονες συμμετείχαν σε αυτήν την έρευνα.
- Έρευνα για την υπηρεσία VoIP (VoIP Survey): Η υπηρεσία VoIP κρίθηκε και αυτή σημαντική για τη διείσδυση του μελλοντικού οικιακού δικτύου. Η συγκεκριμένη έρευνα είναι παρόμοια με εκείνη της HDTV, που περιγράφηκε παράπανω, με τη διαφορά ότι αφορά την υπηρεσία VoIP. Για άλλη μία φορά εικοσιέξι συμμετέχοντες συμμετείχαν στην έρευνα.

Ο σχεδιασμός των προαναφερθείσων ερευνών, περιλαμβάνοντας και τον καθορισμό των κριτηρίων και των αντίστοιχων παραγόντων, συζητήθηκε εκτενώς από του διάφορους φορείς. Η συνεισφορά των τηλεπικοινωνιακών παρόχων ήταν εξαιρετικά ενδιαφέρουσα και πολύ χρήσιμη για τον τελικό καθορισμό των ερευνών, καθώς εστίασαν στον καθορισμό των κριτηρίων και των παραγόντων, λαμβάνοντας υπόψη την οπτική γωνία του τελικού χρήστη σε θέματα είτε τεχνολογικά είτε κοινωνικοοικονομικά.

Οι ειδικοί που συμμετείχαν στις έρευνες είναι υπάλληλοι σε διάφορους οργανισμούς και εταιρείες και εξειδικεύονται κυρίως στον τομέα των τεχνολογιών των οικιακών δικτύων. Οι ειδικοί προέρχονταν από ένα ισορροπημένο συνδυασμό μεταξύ της βιομηχανίας και της ακαδημαϊκής κοινότητας από πολλά μέρη της Ευρώπης (Γαλλία, Ιταλία, Ηνωμένο Βασίλειο, Γερμανία, Ισπανία, Αυστρία, Σλοβενία και Ελλάδα) [165]. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις έρευνες συμμετείχαν παραπάνω από είκοσι εμπειρογνώμονες, ενημερωμένοι για τους εκάστοτε στόχους της έρευνας.

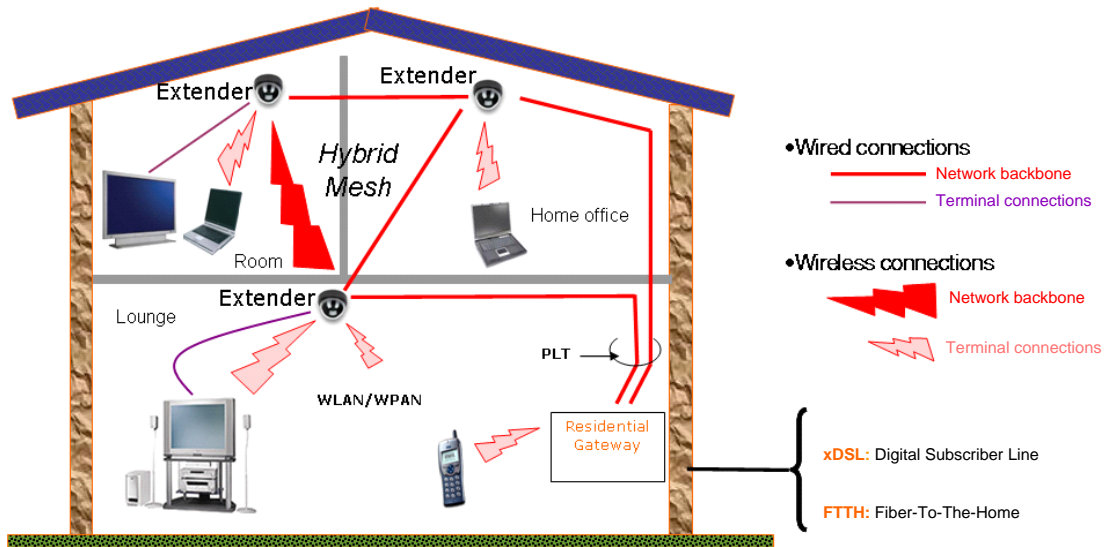
### 3.2 Κριτήρια και Παράγοντες για τα Οικιακά Δίκτυα

Οι πίνακες που ακολουθούν (Πίνακες 25-28) παρουσιάζουν τα κριτήρια και τους παράγοντες που καθορίστηκαν για τις τέσσερις προαναφερθείσες έρευνες. Επιπλέον, οι πίνακες εμπεριέχουν μια περιγραφή των παραγόντων. Τα αντίστοιχα βάρη των παραγόντων που υπολογίστηκαν μέσω της διαδικασίας συγκρίσεων ανά ζεύγη παρατίθενται στην τελευταία στήλη του εκάστοτε πίνακα. Όσον αφορά τα βάρη των κριτηρίων, θα παρουσιαστούν στη συνέχεια με τη μορφή γραφημάτων.

Σχετικά με την πρώτη έρευνα, που αφορά το οικιακό δίκτυο (Εικόνα 44), πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια να καθοριστούν οι παράγοντες της απόδοσης του συστήματος όσο το δυνατόν πιο απλοί, παρέχοντας ταυτόχρονα χρήσιμη πληροφορία, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 25. Αξίζει να σημειωθεί, ότι παρατηρήθηκε ευρεία συναίνεση, έτσι ώστε η απόδοση του συστήματος να αφορά κυρίως την κάλυψη που παρέχεται από το δίκτυο μέσα στο οικιακό ή εργασιακό περιβάλλον, καθώς επίσης και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Το εύρος ζώνης ήταν πιο εύκολο να ποσοτικοποιηθεί στο φυσικό επίπεδο χρησιμοποιώντας όρους, όπως ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων που μπορεί να υποστηριχθεί. Ο ρυθμός σύνδεσης από το τερματικό στο σταθμό βάσης θεωρήθηκε δευτερευούσης σημασίας σε σχέση με το ρυθμό του κάτω καναλιού, δηλαδή την ταχύτητα με την οποία μπορεί κάποιος να κατεβάσει δεδομένα από το Διαδίκτυο (downstream), ιδιαίτερα για τους οικιακούς χρήστες. Από την άλλη μεριά, η κάλυψη θεωρήθηκε ως το ποσοστό των πιθανών θέσεων μέσα σε ένα δωμάτιο, όπου μπορεί να επιτευχθεί ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κάλυψη αφορά τόσο τις ασύρματες όσο και τις ενσύρματες τεχνολογίες. Ζήτημα ιδιαίτερης προσοχής αποτελεί η μέγιστη απόσταση στην οποία φτάνει μια σύνδεση τόσο στα PLC όσο και στα συστήματα πλαστικής οπτικής ίνας. Οι παράγοντες απόδοσης για το στοιχείο επέκτασης είναι παρόμοιοι με τη διαφορά ότι περιλαμβάνεται και ο ρυθμός δεδομένων του άνω καναλιού, δηλαδή η ταχύτητα με την οποία ανέβάζει κάποιος δεδομένα στο Διαδίκτυο (upstream), εφόσον η συσκευή επέκτασης πρέπει να είναι σε θέση να προωθεί την κίνηση δεδομένων σε άλλες συσκευές μέσα στο οικιακό δίκτυο.

Τα οικονομικά θέματα σχετίζονται με την επίδραση του κόστους των διαφόρων δομικών στοιχείων [166] στην ανάπτυξη του δικτύου και δεν περιλαμβάνουν μόνο το κόστος των ίδιων αλλά και τα κόστη εγκατάστασης και συντήρησής τους. Τεχνολογίες όπως το IEEE802.11 παρουσιάζουν πολύ χαμηλό κόστος συντήρησης και εγκατάστασης αλλά από την άλλη μεριά, τα οπτικά ασύρματα συστήματα μπορεί να απαιτήσουν την εγκατάσταση πολλαπλών σταθμών βάσης στην οροφή των εκάστοτε δωματίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τις συσκευές επέκτασης και οικιακού δρομολογητή, που αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία για όλες τις τεχνολογίες, έχει διεξαχθεί μια πρόβλεψη κόστους/τιμής παρέχοντας ένα δομημένο τεχνοοικονομικό μοντέλο που σχετίζεται με τις μελλοντικές τιμές τους στην αγορά [166]. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου μοντέλου περιλαμβάνουν επίσης και μια λεπτομερή ανάλυση όλων των επενδύσεων, όπως τα κόστη εγκατάστασης, συντήρησης, τα κόστη συνδρομής καθώς και όλα τα κόστη του παρόχου, τα λειτουργικά του έξοδα, τα έσοδα του και η οικονομική αποδοχή

όπως εκφράζεται από του οικονομικούς δείκτες.



Εικόνα 44: Οικιακό Δίκτυο

Πίνακας 25: Κριτήρια και Παράγοντες για το Οικιακό Δίκτυο

Κριτήρια-Παράγοντες	Περιγραφή	Βάρος
<b>C<sub>1</sub>: Απόδοση Συστήματος (System Performance) w<sub>1</sub>=25.15%</b>		
F <sub>11</sub>	Κάλυψη (Coverage) Το ποσοστό των πιθανών θέσεων των τερματικών, όπου επιτυγχάνεται ο μέγιστος ρυθμός των bits.	56.13 %
F <sub>12</sub>	Μέγιστος ρυθμός bit (Maximum bit rate) Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων του κάτω καναλιού, που μπορεί να πετύχει ένα τερματικό.	43.88 %
<b>C<sub>2</sub>: Οικονομικές Πτυχές (Economic) w<sub>2</sub>=25.10%</b>		
F <sub>21</sub>	Κόστος πρώτης εγκατάστασης (Installation First Cost) Το κόστος εγκατάστασης του συστήματος την πρώτη φορά.	54.36 %
F <sub>22</sub>	Κόστος συντήρησης (Maintenance cost) Το κόστος συντήρησης του συστήματος ανά έτος.	22.20 %
F <sub>23</sub>	Κόστος των συσκευών (Cost of devices) Το κόστος των συσκευών όπως multi-technology extenders, Gateway, End Connectivity components.	23.44 %
<b>C<sub>3</sub>: Ευελιξία (Flexibility) w<sub>3</sub>=22.48%</b>		
F <sub>31</sub>	Ευκολία εγκατάστασης/συντήρησης (Ease of installation/maintenance) Περιγράφει την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης.	24.69 %

$F_{32}$	Δυνατότητα αντικατάστασης δομικών στοιχείων (Interchangeability)	Καθορίζει κατά πόσο τα δομικά στοιχεία αντικαθίστανται εύκολα με τα ίδια ή παρόμοια στοιχεία που είναι διαθέσιμα στα ηλεκτρονικά καταστήματα.	21.16%
$F_{33}$	Δυνατότητα αναβάθμισης (Upgradeability)	Γίνεται εύκολα η αναβάθμιση του εξοπλισμού και του λογισμικού;	23.90 %
$F_{34}$	Συμβατότητα με τις υφιστάμενες συσκευές (Compatibility with legacy systems)	Είναι το οικιακό δίκτυο συμβατό με τα υπάρχοντα δίκτυα και τις οικιακές εφαρμογές;	30.25 %

---

**C<sub>4</sub>: Κοινωνική Αποδοχή (Social Acceptance)  $w_4=27.26\%$**

---

$F_{41}$	Ασφάλεια/ Ιδιωτικότητα (Security/Privacy)	Είναι σημαντικά τα θέματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας;	14.80 %
$F_{42}$	Θέματα υγείας (Health Issues)	Είναι σημαντικά τα θέματα υγείας; (έκθεση ακτινοβολίας, προστασία ματιών, προστασία δέρματος κ.α.)	33.08 %
$F_{43}$	Υλοποίηση χωρίς καλώδια (Home integration with no new wires)	Είναι αποδεκτή η εγκατάσταση νέων καλωδίων στο σπίτι;	15.84 %
$F_{44}$	Ευχρηστία (Usability)	Πόσο δύσκολο είναι ο μέσος χρήστης να στήσει και να διαχειριστεί ένα δίκτυο;	20.23 %
$F_{45}$	Αισθητικός Σχεδιασμός (Design)	Πόσο καλά ταιριάζουν οι συσκευές με την υπόλοιπη διακόσμηση του σπιτιού;	16.05 %

---

Τα υπόλοιπα κριτήρια αφορούν σε διάφορα άλλα θέματα σχετικά με το μελλοντικό οικιακό δίκτυο. Η ευελιξία αναφέρεται στη συνολική ευχρηστία των δομικών στοιχείων του δικτύου στο οικιακό περιβάλλον, ενώ το κριτήριο της κοινωνικής αποδοχής αντικατοπτρίζει ποικίλα θέματα που ενδιαφέρουν το χρήστη (υγεία, ιδιωτικότητα κ.α.). Όσον αφορά το στοιχείο επέκτασης, η ολοκλήρωσή του στον οικιακό χώρο αποτελεί ένα πολύ σημαντικό ζήτημα και ορίζεται ως ξεχωριστό κριτήριο, δεδομένου ότι οι μέσοι χρήστες δεν θα είναι αρκετά πρόθυμοι να εγκαταστήσουν ογκώδεις σταθμούς βάσης στην οροφή των δωματίων τους, ακόμα και αν πρόκειται για ταχύτητες της τάξης των Gigabit/δευτερόλεπτο.

**Πίνακας 26: Κριτήρια και παράγοντες για τη συσκευή επέκτασης**

Κριτήρια-Παράγοντες	Περιγραφή	Βάρος
<b>C<sub>1</sub>: Απόδοση Συστήματος (System Performance) <math>w_1=20.38\%</math></b>		

---



$F_{11}$	Κάλυψη (Range)	Για ασύρματα είναι η απόσταση που μπορεί να καλυφθεί σε απευθείας οπτική επαφή. Για τα PLC είναι το μέγιστο μήκος καλωδίου.	41.37 %
$F_{12}$	Ρυθμός δεδομένων άνω καναλιού (Upstream Bit Rate)	Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων του άνω καναλιού, που μπορεί ένα τερματικό να πετύχει όταν συνδέεται με τον extender.	23.54 %
$F_{13}$	Ρυθμός δεδομένων κάτω καναλιού (Downstream Bit Rate)	Ο μέγιστος ρυθμός δεδομένων, του κάτω καναλιού, που μπορεί ένα τερματικό να πετύχει όταν συνδέεται με τον extender.	35.09 %

$C_2$ : Ευκολία στη χρήση (Simplicity and Use)  $w_2=19.18\%$

$F_{21}$	Δυνατότητα άμεσης εγκατάστασης χωρίς παραμετροποίηση (Plug and Play)	Εφόσον εγκατασταθεί μία φορά ο extender, είναι plug and play;	54.52 %
$F_{22}$	Συμβατότητα με τις υφιστάμενες συσκευές (Compatibility with legacy devices)	Το ίδιο με τον αντίστοιχο παράγοντα του Οικιακού Δικτύου (Πίνακας 25).	45.48 %

$C_3$ : Σχεδιασμός (Design)  $w_3=13.36\%$

$F_{31}$	Σχεδιασμός-ολοκλήρωση στο οικιακό περιβάλλον (Design-Integration to home environment)	Το ίδιο με τον αντίστοιχο παράγοντα του Οικιακού Δικτύου.	37.41 %
$F_{32}$	Όγκος (Volume of Extender)	Ο όγκος της συσκευής επέκτασης σε κυβικά εκτατοστόμετρα (cm <sup>3</sup> ).	33.66 %
$F_{33}$	Βάρος (Weight of Extender)	Το βάρος της συσκευής επέκτασης σε κιλά (kg).	28.94 %

$C_4$ : Οικονομικές Πτυχές (Economic)  $w_4=22.67\%$

$F_{41}$	Κόστος (Cost of Extender)	Το κόστος αγοράς της συσκευής επέκτασης.	39.48 %
$F_{42}$	Ετήσιο κόστος επισκευής (Annual Cost of repair)	Το ετήσιο κόστος αποκατάστασης του extender σε περίπτωση καταστροφής ή βλάβης.	22.44 %
$F_{43}$	Ετήσιο κόστος λειτουργίας (Annual operation cost)	Το ετήσιο κόστος λειτουργίας του extender. Κυρίως περιλαμβάνει την επιρροή της κατανάλωσης ισχύος στο κόστος λειτουργίας.	38.08 %

C<sub>5</sub>: Εμπιστοσύνη/Αξιοπιστία Συστήματος (System Trustworthiness/Confidence)w<sub>5</sub>=24.38%

F <sub>51</sub>	Ασφάλεια/Ιδιωτικότητα (Security/Privacy)	Το ίδιο με τον αντίστοιχο παράγοντα του Οικιακού Δικτύου.	17.64 %
F <sub>52</sub>	Θέματα υγείας (Health issues)	Το ίδιο με τον αντίστοιχο παράγοντα του Οικιακού Δικτύου (Πίνακας 25).	48.19 %
F <sub>53</sub>	Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών στο στοιχείο επέκτασης (Mean Time between failure of extender)	Μέσος χρόνος που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο συνεχόμενες βλάβες της συσκευής επέκτασης (Πίνακας 25).	34.17 %

Ο επόμενος πίνακας συνοψίζει τα κριτήρια και τους παράγοντες για τις έρευνες HDTV και VoIP. Στο πλαίσιο αυτών των υπηρεσιών από άκρο σε άκρο, η ευχρηστία λήφθηκε υπόψη κυρίως από την πλευρά του χρήστη, σε όρους όπως η κινητικότητα. Όσον αφορά την HDTV, η ποικιλομορφία του περιεχομένου και η απήχισή του θεωρήθηκαν επίσης ως σημαντικές πτυχές που επηρεάζουν τη διείσδυση της υπηρεσίας. Επιπλέον, το κριτήριο που αφορά τα οικονομικά θέματα, αποτελεί ακόμα ένα σημαντικό ζήτημα τόσο της HDTV όσο και της VoIP, που καθορίζεται κυρίως από το κόστος της συνδρομής και το κόστος του εξοπλισμού της τηλεόρασης ή του τηλεφώνου αντίστοιχα. Η απόδοση της υπηρεσίας χαρακτηρίζεται με παρόμοια χαρακτηριστικά και για τις δύο υπηρεσίες, που ορίστηκαν κυρίως λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο εμπειρίας του χρήστη. Τέλος, η πιθανότητα διακοπής της υπηρεσίας θεωρείται ως ένας σημαντικός παράγοντας τόσο για HDTV όσο και για VoIP.

Πίνακας 27: Κριτήρια και παράγοντες για την HDTV

Παράγοντες	Περιγραφή	Βάρος	
HDTV			
C <sub>1</sub> : Ευχρηστία (Usability)			
F <sub>11</sub>	Κινητικότητα (Mobility)	Κινητικότητα της διαρκούς σύνδεσης ανάμεσα στον εξοπλισμό της τηλεόρασης και σε έναν άλλο	20.89%
F <sub>12</sub>	Διαθεσιμότητα υπηρεσιών διαφορετικών κατηγοριών (Availability of different classes of services)	Διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών θα είναι διαθέσιμες σύμφωνα με τη συνδρομή του χρήστη	27.81%
F <sub>13</sub>	Περιεχόμενο (Content)	Δημοτικότητα περιεχομένου σχετικά με το περιεχόμενο που προσφέρει η υπηρεσία, π.χ. ο αριθμός των διαφορετικών καναλιών και το περιεχόμενο που προσφέρει	51.30%
C <sub>2</sub> : Απόδοση (Performance)			

$F_{21}$	Υποβάθμιση ποιότητας εικόνας (Quality degradation of picture)	«πάγωμα ή πιξελοποίηση» εικόνας (image freeze/pixellisation)	41.89%
$F_{22}$	Υποβάθμιση ποιότητας ήχου (Quality degradation of sound)	Η πιθανότητα υποβάθμισης της ποιότητας του ήχου	14.99%
$F_{23}$	Διακοπή υπηρεσίας (Service interruption)	Η πιθανότητα μιας αναπάντεχης διακοπής της υπηρεσίας	43.12%

C3: Οικονομικές Πτυχές (Economic)

$F_{31}$	Συνδρομή (Service subscription rate)	Το μηνιαίο κόστος της συνδρομής στην υπηρεσία.	51.57%
$F_{32}$	Κόστος εξοπλισμού τηλεόρασης (Cost of television set)	Το κόστος της τηλεόρασης και του εξοπλισμού.	48.43%

**Πίνακας 28: Κριτήρια και παράγοντες για την VoIP**

Παράγοντες VoIP	Περιγραφή	Βάρος	
<b>C<sub>1</sub>: Ευχρηστία (Usability)</b>			
$F_{11}$	Κινητικότητα (Mobility)	Κινητικότητα μέσα στο σπίτι ή ακόμα και μέσα στο δίκτυο ευρείας περιοχής (Wide Area Network)	58.75%
$F_{12}$	Διαθεσιμότητα υπηρεσιών διαφορετικών κατηγοριών (Availability of different classes of services)	Διαφορετικές κατηγορίες υπηρεσιών θα είναι διαθέσιμες σύμφωνα με τη συνδρομή του χρήστη	41.25%
<b>C<sub>2</sub>: Απόδοση (Performance)</b>			
$F_{21}$	Υποβάθμιση ποιότητας φωνής (Quality degradation of voice)	Η πιθανότητα υποβάθμισης της ποιότητας της φωνής κατά τη διάρκεια μιας σύνδεσης VoIP	44.05%

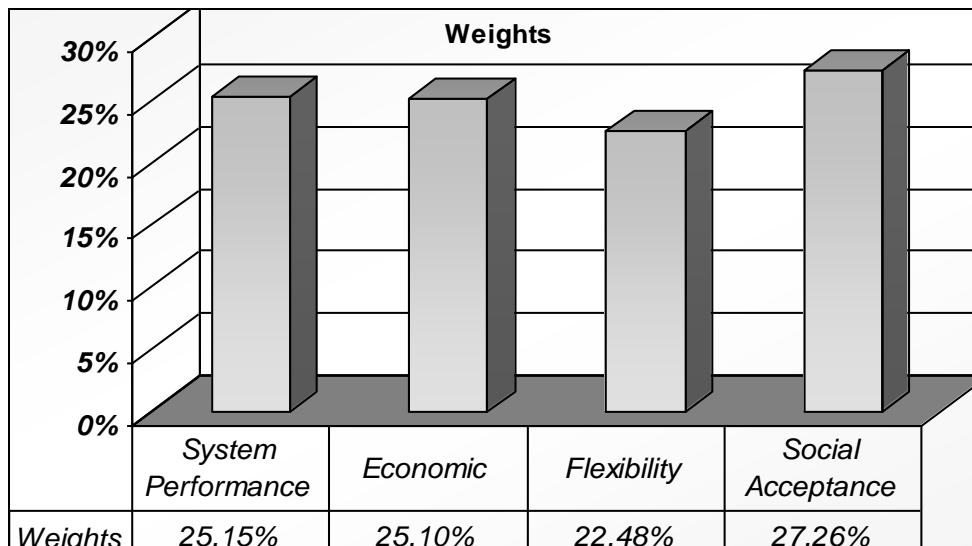
$F_{22}$	Εκτιμώμενη καθυστέρηση (Perceived Delay)	«κλικ/μείωση» ήχου (Clicks/cut of sound)	18.22%
$F_{23}$	Διακοπή υπηρεσίας (Service interruption)	Η πιθανότητα μιας αναπάντεχης διακοπής της υπηρεσίας	37.73%
<b>C3: Οικονομικές Πτυχές (Economic)</b>			
$F_{31}$	Συνδρομή (Service subscription rate)	Το μηνιαίο κόστος της συνδρομής στην υπηρεσία.	54.30%
$F_{32}$	Κόστος εξοπλισμού τηλεφώνου (Cost of telephone set)	Το κόστος του τηλεφώνου και του λοιπού εξοπλισμού	45.70%

### 3.3 Ευρήματα Εφαρμογής της Μεθοδολογίας

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο, αναλύονται τα αποτελέσματα για την ιεράρχιση και ταξινόμηση των κριτηρίων και των παραγόντων σύμφωνα με την μέθοδο συγκρίσεων ανά ζεύγη. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις κρίσεις που συμπληρώθηκαν στους πίνακες από τους ειδικούς, ο λόγος συνέπειας C.I. ήταν μικρότερος από 0.1, όπως απαιτείται σύμφωνα με το 2.3.1.2, πράγμα που σημαίνει ότι όλοι οι εμπειρογνώμονες παρέιχαν συνεπή δεδομένα στις συγκρίσεις που κλήθηκαν να πραγματοποιήσουν.

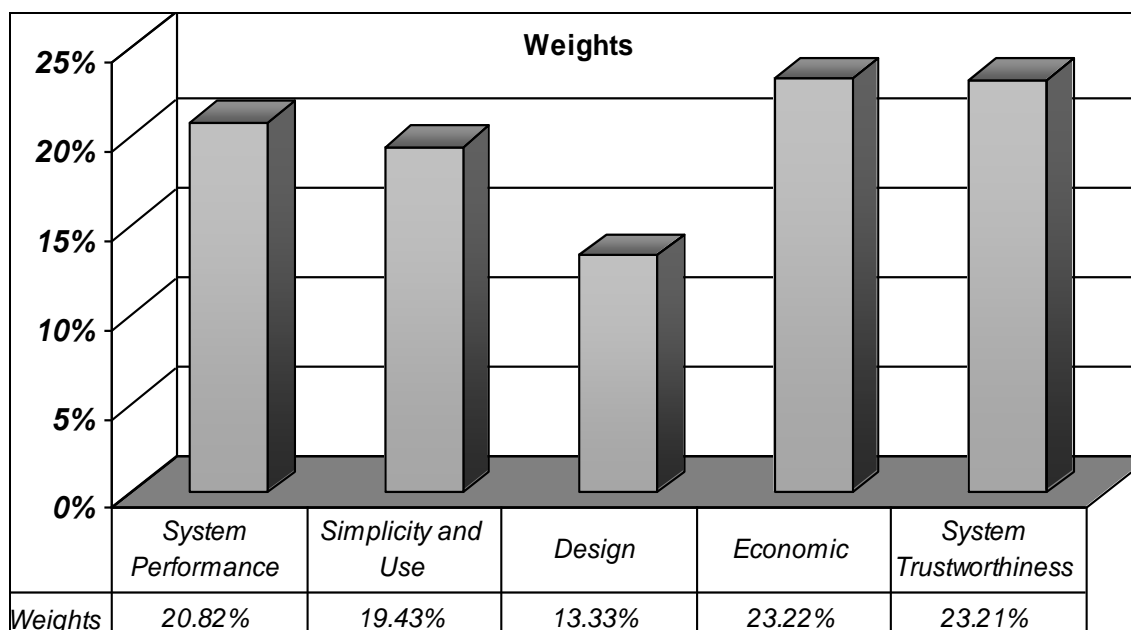
#### 3.3.1 Οικιακό Δίκτυο και Συσκευή Επέκτασης

Τα αποτελέσματα που αφορούν τα βάρη των κριτηρίων, που ενδέχεται να επηρεάσουν την ανάπτυξη του οικιακού δικτύου (1<sup>η</sup> έρευνα), παρουσιάζονται στην Εικόνα 45. Με ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρατηρείται ότι σύμφωνα με τη γνώμη των ειδικών, όλα τα κριτήρια έχουν λίγο ή πολύ το ίδιο περίπου βάρος (~25%), γεγονός που υποδεικνύει ότι κατά μέσο όρο οι εμπειρογνώμονες πιστεύουν ότι τα εν λόγω κριτήρια παρουσιάζουν τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας στην ανάπτυξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων ενισχύεται από το γεγονός ότι οι ειδικοί δεν προέρχονται όλοι από ένα και μόνο οργανισμό. Η εικόνα δείχνει ότι τα οικιακά δίκτυα θα πρέπει να σχεδιαστούν, έτσι ώστε να εκπληρώσουν μια σειρά από διαφορετικά και ενδεχομένως αντιφατικά μεταξύ τους κριτήρια.



**Εικόνα 45: Βάρη των κριτηρίων για το οικιακό δίκτυο**

Τα αποτελέσματα για τη συσκευή επέκτασης είναι λίγο διαφορετικά, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 46. Τα ζητήματα αισθητικού σχεδιασμού θεωρούνται δευτερεύουσας σημασίας από τους ειδικούς, πιθανώς επειδή εξακολουθούν να υπάρχουν ακόμα πολλά τεχνολογικά θέματα που πρέπει να επιλυθούν, προκειμένου να παρέχεται αξιόπιστη και οικονομικά αποτελεσματική λειτουργικότητα επέκτασης του δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη την τεχνολογία OW, για παράδειγμα, είναι κάπως δύσκολο κάποιος να υλοποιήσει αυτήν την επέκταση του δικτύου σε ένα τερματικό στην περίπτωση της απευθείας οπτικής επαφής. Αυτό συμβαίνει λόγω των περιορισμών στο πεδίο λήψης του δέκτη, δεδομένου ότι απαιτείται η άμεση οπτική επαφή πομπού και δέκτη. Τα οπτικά ασύρματα θα μπορούσαν να παρέχουν κάποια μορφή επέκτασης του δικτύου μέσα στο δωμάτιο, αλλά δεν μπορούν να επεκτείνουν το δίκτυο από δωμάτιο σε δωμάτιο, λόγω της ιδιότητας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας να μην διαπερνά τους τοίχους, στα αντίστοιχα μήκη κύματος. Ο περιορισμός αυτός, όμως, δεν ισχύει για τις τεχνολογίες PLC και IEEE802.11.



**Εικόνα 46: Βάρη των κριτηρίων για τη συσκευή επέκτασης**

Παρά το γεγονός ότι και στις δύο έρευνες, τα περισσότερα κριτήρια έχουν παρόμοια βάρη (εκτός από το κριτήριο σχεδιασμού στην έρευνα για τη συσκευή επέκτασης), η κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική όταν εξετάζει κανείς τα βάρη των παραγόντων κάτω από κάθε κριτήριο (Πίνακας 25, Πίνακας 26). Ξεκινώντας με το κριτήριο της κοινωνικής αποδοχής στην έρευνα του δικτύου (Πίνακας 25), είναι σαφές ότι τα θέματα υγείας αποτελούν την πιο σημαντική πτυχή που πρέπει να ληφθεί υπόψη και αυτό αντανakλά την αυξανόμενη ανησυχία των πολιτών για το θέμα αυτό [167]-[169]. Οι επιδράσεις της αλληλεπίδρασης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για τον ανθρώπινο ιστό δεν είναι ακόμη πλήρως κατανοητές ειδικά στο φάσμα των μικροκυμάτων. Η Διεθνής Επιτροπή Προστασίας από τη Μη-Ιονίζουσα Ακτινοβολία (ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) έχει θεσπίσει κατευθυντήριες γραμμές για τον περιορισμό της έκθεσης σε χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που θα παρέχουν προστασία έναντι γνωστών δυσμενών επιπτώσεων στην υγεία [170]. Επιπλέον, έχουν θεσπιστεί ορισμένα πρότυπα για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων στην υγεία, όπως το IEEE C95.1-2005, το οποίο παρέχει συστάσεις για την προστασία από τις επιβλαβείς επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, που εκτίθεται σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία στο φάσμα συχνοτήτων από 3 kHz έως 300 GHz. Από την άλλη πλευρά, τα VLC και οι υπέρυθρες OW τεχνολογίες θεωρούνται μάλλον ακίνδυνες, εφόσον συμμορφώνονται με τα πρότυπα ισχύος εκπομπής για την προστασία των ματιών. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το ανθρώπινο σώμα έχει εκτεθεί στην υπέρυθρη και ορατή ακτινοβολία φωτός λόγω του ήλιου για χιλιάδες χρόνια, αναμένεται ότι αυτές θα έχουν περιορισμένες βιολογικές επιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση, η αυξανόμενη ανησυχία του κοινού δικαιολογεί πρόσθετη έρευνα για τις επιπτώσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και ως εκ τούτου μπορεί να παρέχει πλεονέκτημα στις οπτικές ασύρματες λύσεις, ιδίως σε νοσοκομεία, γηροκομεία, κλπ. Τη σημασία των ζητημάτων υγείας επιβεβαιώνει περαιτέρω ο Πίνακας 25, όπου φαίνεται να λαμβάνουν το μεγαλύτερο βάρος σε σύγκριση με τα ζητήματα της εμπιστοσύνης/αξιοπιστίας του συστήματος. Προς μεγάλη έκπληξη, η ασφάλεια φαίνεται να μην αποτελεί ζήτημα μεγάλης σημασίας σε σχέση με τα άλλα ζητήματα, τόσο για τη συσκευή επέκτασης όσο και για το οικιακό δίκτυο γενικότερα. Αυτό είναι πιθανώς μια αντανάκλαση του γεγονότος ότι οι ειδικοί πιστεύουν πως τα συστήματα των οικιακών δικτύων θα είναι εγγενώς ασφαλή, ενσωματώνοντας μερικά από τα υπάρχοντα πρωτόκολλα ασφαλείας, όπως το WPA2 (Wi-Fi Protected Access II) για το IEEE802.11n [172], και πως η ασφάλεια είναι λιγότερο σημαντική από ό,τι στα εταιρικά δίκτυα. Όσον αφορά τις επικοινωνίες μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος PLC, υπάρχουν δύο εγγενή επίπεδα ασφαλείας στον αντίστοιχο εξοπλισμό: το πρότυπο κρυπτογράφησης δεδομένων (DES - Data Encryption Standard) και η δυνατότητα δημιουργίας διαφορετικών δικτύων στο ίδιο ηλεκτρικό κύκλωμα με δύο διαφορετικά κλειδιά κρυπτογράφησης που μπορούν να ρυθμιστούν με τη χρήση λογισμικού, το οποίο παρέχεται συνήθως μαζί με τον εξοπλισμό [171]. Παράλληλα, τα σήματα των 60GHz παραμένουν περιορισμένα σε ένα δωμάτιο προσφέροντας πλεονεκτήματα σε ζητήματα ασφαλείας και παρεμβολών. Μπορεί επίσης οι ειδικοί να συνειδητοποιούν ότι η ιδιωτικότητα και η ασφάλεια των συναλλαγών στο Διαδίκτυο, που ενδιαφέρουν σε μεγάλο βαθμό το μέσο οικιακό χρήστη, υλοποιείται σε μεγάλο βαθμό με πρωτόκολλα που αφορούν την επικοινωνία από άκρο σε άκρο.

Στην έρευνα του δικτύου, η ευχρηστία φαίνεται να είναι η δεύτερη πιο σημαντική κοινωνική πτυχή και αυτό δεν αποτελεί έκπληξη, δεδομένου ότι η ευρεία υιοθέτηση των μελλοντικών οικιακών δικτύων θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του καθημερινού χρήστη να εγκαταστήσει και να ελέγχει την υποδομή του δικτύου στο οικιακό περιβάλλον. Εάν εξετάσουμε χωριστά τους παράγοντες αισθητικού σχεδιασμού καθώς και υλοποίησης χωρίς την εγκατάσταση νέων καλωδίων, παρατηρείται ότι λαμβάνουν μια μέτρια βαρύτητα της τάξης του ~16%. Ωστόσο, εάν ληφθούν

υπόψη συνολικά ως ένας γενικότερος παράγοντας αισθητικής μέσα στο σπίτι, καταλαβαίνει κανείς ξεκάθαρα ότι τα μέλλοντικά συστήματα οικιακών δικτύων θα πρέπει να εισβάλλουν στο εγχώριο περιβάλλον με ομαλό τρόπο. Άλλωστε, σε αντίθεση με το περιβάλλον εργασίας, οι άνθρωποι είναι λιγότερο διατεθειμένοι να εγκαθιστούν νέα καλώδια στον οικιακό τους χώρο. Αυτό εγείρει ένα σημαντικό ερώτημα σχετικά με κατά πόσο η οπτική ίνα (πλαστική, πολύτροπη, ακόμη και μονότροπη) μπορεί τελικά να προσφέρει την τελική τεχνολογική λύση όσο αφορά το εύρος ζώνης και την κάλυψη σε νέα κτίρια. Οι ασύρματες και οι PLC λύσεις είναι πιο κατάλληλες σε μεγάλα σπίτια ή διαμερίσματα, όπου οι κάτοικοι δεν είναι διατεθειμένοι να διαταράξουν το περιβάλλον του σπιτιού τους και να εγκαταστήσουν επιπλέον καλώδια.

Όσον αφορά το κριτήριο της ευελιξίας του δικτύου όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 25, η συμβατότητα με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα φαίνεται να υπερισχύει έναντι των άλλων παραγόντων με βάρος 30%. Αυτό είναι μια ένδειξη ότι οι ειδικοί τείνουν να πιστεύουν πως η υιοθέτηση των μελλοντικών οικιακών δικτύων απαιτεί τη συμβατότητα με τα προηγούμενα συστήματα και τις άλλες οικιακές συσκευές, που έχουν ήδη εγκατασταθεί στο οικιακό περιβάλλον τους. Φαίνεται ότι οι μελλοντικοί καταναλωτές θα προτιμήσουν τα συστήματα που ενσωματώνουν τις λειτουργίες επέκτασης να τοποθετούνται εύκολα σε φορητούς υπολογιστές και άλλες συσκευές, όπως οι κάρτες WiFi και τα USB sticks. Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι τα μελλοντικά οικιακά δίκτυα δεν πρέπει να παρεμβάλλονται σε οποιοδήποτε συμβατικό δίκτυο ή άλλη συσκευή. Οι οπτικές ασύρματες τεχνολογίες έχουν ένα εγγενές πλεονέκτημα, εφόσον τέτοιου είδους σήματα παραμένουν περιορισμένα μέσα σε ένα δωμάτιο. Στην πραγματικότητα, με τη χρήση πολλαπλών πομποδεκτών σε διαφορετικό μήκος κύματος είναι δυνατό να υλοποιήσουμε πολλές ταυτόχρονες οπτικές ασύρματες τοπικές συνδέσεις δικτύου στο ίδιο δωμάτιο, θεωρητικά χωρίς καμία μείωση του εύρους ζώνης που οφείλεται σε φαινόμενα παρεμβολής. Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν την ανάγκη για μια συσκευή που να προσαρμόζει τον συμβατικό εξοπλισμό στην επόμενη γενιά. Όσον αφορά την έρευνα για τη συσκευή επέκτασης (Πίνακας 26), πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα προέκυψαν για τους παράγοντες του κριτηρίου σχεδιασμού. Οι ειδικοί πιστεύουν ότι ο σχεδιασμός/ολοκλήρωση στο περιβάλλον του σπιτιού φαίνεται να είναι η πιο σημαντική πτυχή, τονίζοντας την ανάγκη για κομψά προϊόντα. Επιπλέον, τόσο ο όγκος όσο και το βάρος της συσκευής επέκτασης αποτελούν σημαντικά ζητήματα: οι συσκευές δικτύου θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρές και ελαφριές για πρακτικούς και εμπορικούς λόγους. Όσον αφορά το οικονομικό κριτήριο, οι ειδικοί έδωσαν μεγάλη σημασία τόσο στο κόστος των δομικών στοιχείων του δικτύου όσο και στο ετήσιο κόστος λειτουργίας. Δεδομένου ότι το τελευταίο κατά κύριο λόγο σχετίζεται με την κατανάλωση ενέργειας, αυτό τονίζει την ανάγκη για ενεργειακά αποδοτικές συσκευές. Είναι επίσης ενδιαφέρον να σημειωθούν οι τιμές που λαμβάνονται για τα βάρη των παραγόντων στο πλαίσιο του κριτηρίου ευχρηστίας. Η δυνατότητα άμεσης εγκατάστασης χωρίς παραμετροποίηση θεωρείται πιο σημαντική από τη συμβατότητα με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα, ίσως επειδή αυτή η λειτουργία υποστηρίζεται ήδη στους δρομολογητές της ψηφιακής συνδρομητικής γραμμής (DSL), καθώς και στους ασύρματους δρομολογητές του IEEE802.11.

Τα αποτελέσματα για τα βάρη των οικονομικών παραγόντων για το οικιακό δίκτυο είναι επίσης ενδιαφέροντα. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι σαφώς το κόστος εγκατάστασης, με βάρος 54% όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 25. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη, καθώς ο εξοπλισμός της οικιακής δικτύωσης θα πρέπει ιδανικά να προϋποθέτει φθηνή εγκατάσταση. Αυτό φαίνεται επίσης να είναι σύμφωνο με το υψηλό βάρος της υλοποίησης χωρίς την εγκατάσταση νέων καλωδίων και του σχεδιασμού για το οικιακό περιβάλλον, στο πλαίσιο του κριτηρίου της κοινωνικής αποδοχής. Το κόστος

συντήρησης και το κόστος του εξοπλισμού φαίνεται να είναι δευτερεύοντα ζητήματα, ίσως γιατί οι ειδικοί πιστεύουν ότι το κόστος των δομικών στοιχείων του δικτύου θα πρέπει να είναι αρκετά μικρό, ειδάλλως δεν υπάρχει ελπίδα να ανταγωνιστεί με τις υπάρχουσες λύσεις, όπως το IEEE802.11. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο οικιακό δίκτυο, το κόστος των δομικών στοιχείων είναι πολύ πιο κρίσιμο από ό,τι στα μητροπολιτικά δίκτυα ή στα δίκτυα κορμού και ένα χαμηλό κόστος συντήρησης είναι σαφώς ένα κίνητρο προκειμένου οι χρήστες να υιοθετούν τις νέες τεχνολογίες οικιακών δικτύων. Όσον αφορά τη σημασία των οικονομικών παραγόντων για τη συσκευή επέκτασης, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 26, το κόστος της επισκευής βαθμολογείται ως ο λιγότερο σημαντικός οικονομικός παράγοντας (22%) σε σύγκριση με τους υπόλοιπους. Αυτή η χαμηλή βαθμολογία μπορεί πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το κόστος για την αγορά της συσκευής θα πρέπει να είναι αρκετά χαμηλό και στην περίπτωση που η συσκευή υποστεί κάποια βλάβη, ο χρήστης θα προτιμήσει να αγοράσει ένα καινούργιο, αντί της επισκευής του παλιού. Στο πλαίσιο της ευχρηστίας, τόσο η δυνατότητα άμεσης εγκατάστασης χωρίς παραμετροποίηση όσο και η συμβατότητα με παλαιότερες συσκευές είναι πολύ σημαντικά θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι ειδικοί έδωσαν ένα προβάδισμα 9% στο plug and play, το οποίο είναι λογικό αν λάβουμε υπόψη ότι οι μελλοντικοί καταναλωτές θα προτιμούσαν το στοιχείο επέκτασης να είναι εύκολο να τοποθετηθεί σε φορητούς υπολογιστές και σε άλλες συσκευές, όπως οι δρομολογητές WiFi ή οι USB συσκευές.

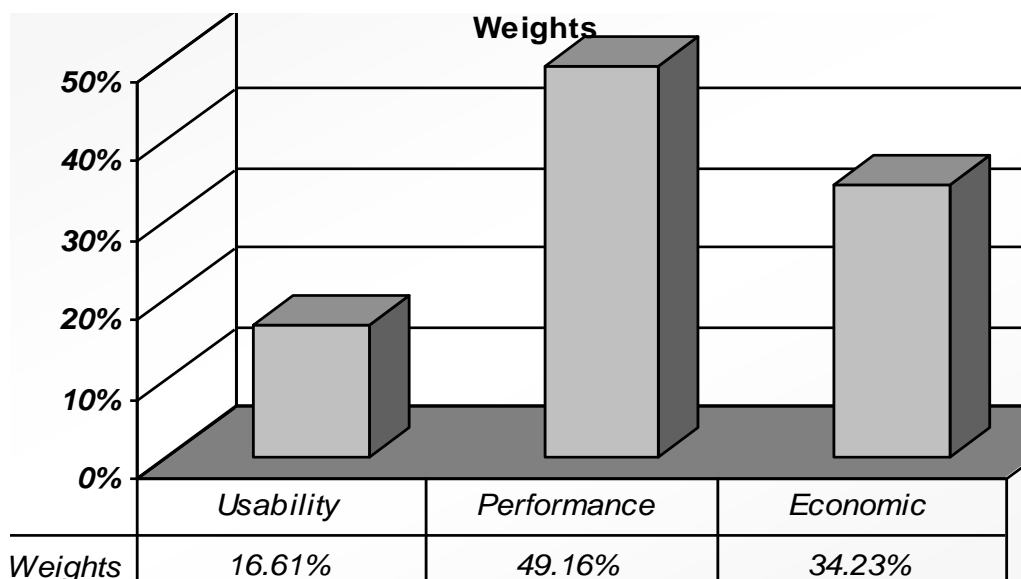
Σε ό,τι αφορά την απόδοση, οι ειδικοί φαίνεται να ανησυχούν περισσότερο για την κάλυψη παρά για το μέγιστο εφικτό ρυθμό bit του συστήματος. Αυτό δείχνει ότι τα οικιακά δίκτυα πρέπει να εξασφαλίσουν επαρκείς όρους κάλυψης, διαφορετικά οι υπηρεσίες που παρέχονται θα είναι πολύ εύκολο να διακοπούν αν μετακινηθούν τα τερματικά του χρήστη. Η κάλυψη δεν είναι ένα σοβαρό ζήτημα για τα PLC, δεδομένου ότι η απόσταση των υφιστάμενων δομικών στοιχείων μπορεί να ανέλθει σε 200 μέτρα στα 600Mb/s. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για ασύρματες τεχνολογίες, η ακτινοβολία των ραδιοσυχνοτήτων μπορεί να περάσει μέσα από τοίχους, ενώ τα συστήματα 60GHz και τα οπτικά ασύρματα περιορίζονται μέσα στο δωμάτιο. Στα οπτικά ασύρματα απευθείας οπτικής επαφής καλύτερη κάλυψη επιτυγχάνεται με τη χρήση LED πολλαπλών κοιλοτήτων συντονισμού (RCLED – resonant cavity LED) σε ένα μόνο chip [172]. Ο μέγιστος ρυθμός bit είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας που λαμβάνει βάρος 43%. Αυτό υποδεικνύει την ανάγκη για ευρυζωνικά οικιακά δίκτυα, που εκτείνονται στην ταχύτητα του Gigabit ανά δευτερόλεπτο. Ωστόσο, η μετάδοση δεδομένων της τάξης των Gigabit μέσα σε ένα γραφείο ή σε ένα οικιακό κτίριο δεν είναι ένα εύκολο έργο, ακόμη και για ενσύρματες εναλλακτικές λύσεις. Για παράδειγμα, οι προδιαγραφές φυσικού επιπέδου 1GbE (παράγραφος 1.1.1.1) υπαγορεύουν ότι το εύρος του συμβατικού συνεστραμμένου ζεύγους καλωδίων (1000BASE - T και 1000BASE -TX) περιορίζεται στα 100 μέτρα, στην καλύτερη περίπτωση. Καθώς οι τιμές των δεδομένων αυξάνονται, αυτό το εύρος μειώνεται περαιτέρω και φτάνει τα 15 μέτρα για το 10GbE πάνω σε χαλκό (10GBASE - CX4). Η οπτική ίνα είναι ένα πολύ πιο αξιόπιστο μέσο για την παροχή ρυθμών της τάξης των Gigabit ανά δευτερόλεπτο. Λόγω της υψηλής απόδοσης και της αξιοπιστίας της, η πολύτροπη οπτική ίνα γενικά χρησιμοποιείται για εφαρμογές δικτύου κορμού σε κτίρια, προσφέροντας εύρος περίπου 300 μέτρα για το 10GbE (παράγραφος 1.1.1.1). Παρά το γεγονός ότι τα οπτικά ασύρματα υπόσχονται ρυθμούς που ξεπερνούν το 1Gb/s, είναι ακόμα τεχνολογίες που δεν έχουν ωριμάσει αρκετά. Από την άλλη πλευρά, η τεχνολογία PLC θα μπορούσε να παρέχει εναλλακτικά ρυθμούς Gigabit αν χρησιμοποιηθεί ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDM) [173]. Οι ραδιο-ασύρματες τεχνολογίες είναι ακόμη πιο δύσκολο να επεκταθούν σε καθεστώς Gigabit. Το πρότυπο IEEE802.11n υπόσχεται συνδεσιμότητα 600Mb/s, χρησιμοποιώντας περισσότερο αποτελεσματική διόρθωση σφάλματος (FEC), μικρότερα χρονικά διαστήματα ασφαλείας, αύξηση του



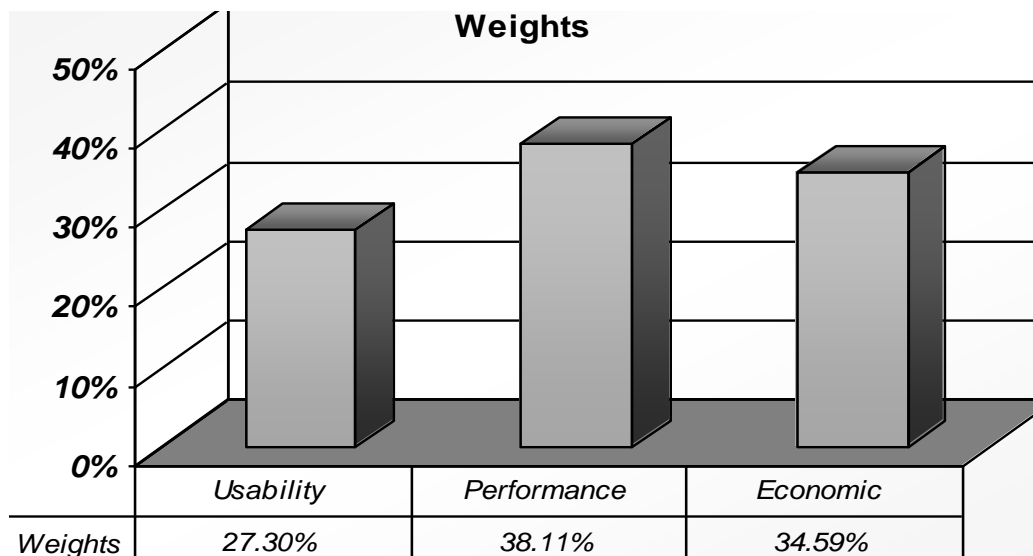
αριθμού των συχνοτήτων φέροντος και τέλος, MIMO τεχνικές. Στην έρευνα που αφορά το στοιχείο επέκτασης, οι εμπειρογνώμονες έχουν επίσης δώσει μεγάλη σημασία στους ρυθμούς bit του κάτω καναλιού (downstream), ενδεχομένως έχοντας κατά νου ότι σε πολλά είδη δημοφιλών υπηρεσιών οι απαιτήσεις εύρους ζώνης είναι ασύμμετρες. Παράλληλα, ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του άνω καναλιού (upstream) δεν είναι ασήμαντος (περίπου 24%), πιθανώς λόγω των πολλών αναδεδωμένων συμμετρικών υπηρεσιών, όπως online gaming, εφαρμογές από άκρο σε άκρο [175] , κ.λπ.

### 3.3.2 HDTV και VoIP

Το συγκεκριμένο υποκεφάλαιο διαπραγματεύεται τα αποτελέσματα των ερευνών HDTV και VoIP, ύστερα από την επεξεργασία τους μέσω της μεθόδου του ιδιοδιανύματος με σκοπό τον υπολογισμό των τελικών βαρών. Οι εικόνες που ακολουθούν απεικονίζουν τα βάρη των κριτηρίων, που λαμβάνονται με τις κατά ζεύγη συγκρίσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται από τους εμπειρογνώμονες τόσο για την τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας όσο και για το VoIP. Οι ειδικοί φαίνεται να πιστεύουν ότι η απόδοση είναι το πιο σημαντικό ζήτημα σε αμφότερες τις περιπτώσεις, ειδικά για την HDTV, όπου το αντίστοιχο βάρος είναι 49%. Αυτό δεν προκαλεί έκπληξη, δεδομένου ότι το κίνητρο πίσω από την υιοθέτηση της HDTV είναι η υψηλή της ευκρίνεια. Οι οικονομικές πτυχές ακολουθούν, καθώς οι πιθανοί αγοραστές θα ενδιαφερθούν πολύ για το κόστος των υπηρεσιών, ενώ τα ζητήματα ευχρηστίας φαίνεται να είναι δευτερεύοντα σε σχέση με τα υπόλοιπα κριτήρια, ιδιαίτερα στην HDTV.



Εικόνα 47: Σχετική σημασία των κριτηρίων στην περίπτωση HDTV



**Εικόνα 48: Σχετική σημασία των κριτηρίων στην περίπτωση VoIP**

Ο Πίνακας 27 παρουσιάζει τη σχετική σημασία των παραγόντων για HDTV και VoIP. Όσον αφορά το κριτήριο απόδοσης, η διακοπή της υπηρεσίας φαίνεται να κυριαρχεί σε σχέση με τους υπόλοιπους παράγοντες και ακολουθεί η υποβάθμιση της ποιότητας της εικόνας, στην περίπτωση της τηλεόρασης υψηλής ευκρίνειας. Αντίθετα, στην περίπτωση του VoIP η υποβάθμιση της ποιότητας της φωνής έχει την πιο υψηλή βαθμολογία και ακολουθείται από τον παράγοντα διακοπής της υπηρεσίας. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη δεδομένου ότι η πιθανότητα διακοπής της υπηρεσίας, καθώς και η υποβάθμιση της εικόνας (σε HDTV) ή φωνής (σε VoIP) προσδιορίζουν σε μεγάλο βαθμό το επίπεδο της ικανοποίησης των χρηστών. Οι ειδικοί φαίνεται να πιστεύουν ότι η υποβάθμιση της εικόνας είναι πολύ πιο σημαντικός παράγοντας από ό,τι η υποβάθμιση ήχου για την τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, πιθανώς επειδή η μετάδοση βίντεο υψηλής ευκρίνειας μπορεί να απαιτήσει αρκετά Mb/s (για παράδειγμα το πρότυπο συμπίεσης βίντεο H.264/MPEG-4 AVC). Αντίθετα, στην περίπτωση του ήχου οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης είναι συνήθως της τάξης των μερικών εκατοντάδων Kb/s στην καλύτερη περίπτωση, γεγονός που αντικατοπτρίζει και την άποψη των ειδικών ότι μάλλον ο ήχος είναι σχετικά δυσκολότερο να χαλάσει σε σχέση με την εικόνα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι οι ειδικοί φαίνεται να πιστεύουν πως το κόστος της συνδρομής στην υπηρεσία και το κόστος της τηλεόρασης είναι σχεδόν ίδιας σημασίας για την περίπτωση του HDTV. Στην περίπτωση του VoIP (Πίνακας 27), το κόστος εγγραφής στην υπηρεσία έχει μια υπεροχή του 10% υψηλότερο από το κόστος της τηλεφωνικής συσκευής, αλλά και πάλι το κόστος έχει αξιολογηθεί με ένα υψηλό βάρος της τάξης του 45%. Συνεπώς, δεν υπάρχει ένας ενιαίος οικονομικός δείκτης που να κυριαρχεί, αλλά πρόκειται για δύο σημαντικά κόστη που λαμβάνει υπόψη του ο εκάστοτε ενδεχόμενος καταναλωτής.

Όσον αφορά τους παράγοντες της ευχρηστίας, το περιεχόμενο της υπηρεσίας HDTV σταθμίζεται ως το πιο σημαντικό με μια μεγάλη προτεραιότητα 51%, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 27. Η διαθεσιμότητα των υπηρεσιών χαμηλότερου επιπέδου και η κινητικότητα ακολουθούν με επιμέρους βάρη 28% και 21% αντίστοιχα. Εκτός αυτού, η δημοτικότητα του περιεχομένου (π.χ. ο αριθμός των διαφορετικών καναλιών και το περιεχόμενο που προσφέρουν) είναι ένα σημαντικό κίνητρο προκειμένου κάποιος να υιοθετήσει τις υπηρεσίες HDTV. Στην περίπτωση του VoIP (Πίνακας 28), η κινητικότητα αποδεικνύεται ότι είναι ο κυρίαρχος παράγοντας με ποσοστό 59%, σε σχέση με τη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών χαμηλότερης κατηγορίας. Σημειώνεται

ότι η κινητικότητα στο εσωτερικό του σπιτιού, ακόμα και στο δίκτυο ευρείας περιοχής είναι μια σημαντική πτυχή της παροχής υπηρεσιών VoIP.

### 3.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε το πρώτο βήμα με σκοπό τη δημιουργία ενός οδικού χάρτη για τα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς. Με βάση τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, αξιολογήθηκαν μια πληθώρα τεχνικών, οικονομικών και κοινωνικών θεμάτων, που καθορίζουν τη διείσδυση των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Αποδείχθηκε ότι οι εμπειρογνώμονες βαθμολόγησαν την κοινωνική αποδοχή ως το κριτήριο πρωταρχικής σημασίας για την επιτυχή εμπορία των προϊόντων. Στο πλαίσιο του εν λόγω κριτηρίου, τα θέματα υγείας αντικατοπτρίζουν την κύρια ανησυχία, πιθανόν αντανακλώντας το δημόσιο ενδιαφέρον σχετικά με τις βιολογικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο περνάει ο καιρός, τα θέματα που σχετίζονται με τις βιολογικές επιδράσεις των οικιακών συστημάτων ενδέχεται να επηρεάσουν καθοριστικά τις στρατηγικές ανάπτυξης των οικιακών δικτύων. Όσον αφορά τα ζητήματα απόδοσης, η κάλυψη κρίθηκε ως το πιο σημαντικό μέτρο απόδοσης, ακολουθούμενη από ρυθμό μετάδοσης του κάτω καναλιού. Στην περίπτωση που η εγκατάσταση των οπτικών ινών δεν είναι μια επιθυμητή επιλογή, οι υπάρχουσες τεχνολογίες (ραδιοκύματα, PLC, οπτικά ασύρματα ή κάποια υβριδική εναλλακτική) μπορούν να παρέχουν μια ευρυζωνική εναλλακτική λύση κάθε μια με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά. Η συμβατότητα με τις υπάρχουσες λύσεις και οικιακές συσκευές βαθμολογούνται επίσης υψηλά. Από οικονομική άποψη, το κόστος εγκατάστασης αποδείχθηκε ότι είναι ο πιο κρίσιμος παράγοντας. Δεδομένου ότι οι ασύρματες λύσεις και ακόμη οι PLC δεν απαιτούν την εγκατάσταση νέων καλωδίων, θα μπορούσε επομένως μια υβριδική λύση να οδηγήσει σε μείωση του κόστους εγκατάστασης. Τέλος, λήφθηκαν υπόψη και αξιολογήθηκαν οι διαφορετικές απαιτήσεις για HDTV και VoIP, που προβλέπεται να αποτελέσουν τα κύρια σενάρια εφαρμογής των υπηρεσιών για τα μελλοντικά οικιακά δίκτυα.

## **4 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΟΔΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΜΕ ΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΙΕΡΑΡΧΗΣΗΣ**

Τα συστήματα οικιακών δικτύων διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην επίτευξη της διάθεσης ευρυζωνικών υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες και αναμένεται να εξελιχθούν σύντομα σε ένα αντικείμενο έντονου ανταγωνισμού για τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και τις εταιρείες. Το γεγονός αυτό επισημαίνει την ανάγκη για έναν τεχνολογικό οδικό χάρτη, προκειμένου να αντιμετωπίσει ορισμένα βασικά ζητήματα που σχετίζονται με την ομαλή διείσδυση των συστημάτων αυτών. Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει ορισμένα από τα αποτελέσματα μιας προσπάθειας για τη δημιουργία ενός οδικού χάρτη των μελλοντικών οικιακών δικτύων, με επίκεντρο μια χαρακτηριστική λειτουργία, και συγκεκριμένα την επέκταση του δικτύου [174]. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, κάθε μία από τις τεχνολογίες δικτύωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει τη λειτουργικότητα της επέκτασης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε εναλλακτική χαρακτηρίζεται από τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, φαίνεται ότι καμία μεμονωμένη τεχνολογία δε θα είναι σε θέση να ικανοποιήσει κάθε απαίτηση του χρήστη. Για αυτό το λόγο, το συγκεκριμένο κεφάλαιο έχει ως στόχο να διαλευκάνει αυτό το πρόβλημα, συμβάλλοντας στη δημιουργία ενός τεχνολογικού οδικού χάρτη για τα οικιακά δίκτυα γενικότερα, σύμφωνα με τα κίνητρα και τις προοπτικές που συζητήθηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 1.2.

Λαμβάνοντας υπόψη τους διάφορους κοινωνικούς, οικονομικούς και τεχνολογικούς παράγοντες, τρεις εναλλακτικές τεχνολογίες, δηλαδή το 802.11n, τα συστήματα 60GHz και τα συστήματα PLC αξιολογούνται, με τη χρήση της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας στο πλαίσιο της μεθοδολογίας TDE, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.6 [176]. Κύριος στόχος είναι η αξιολόγηση των προοπτικών των διαφόρων τεχνολογιών οικιακής δικτύωσης, τόσο από τεχνικής όσο και από κοινωνικοοικονομικής άποψης. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα που σχετίζονται με τα κριτήρια και τους παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των οικιακών δικτύων, όπως παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο (Πίνακας 26). Με βάση αυτά τα κριτήρια και τους παράγοντες, η AHP, στο πλαίσιο της TDE, εφαρμόζεται με σκοπό να ταξινομήσει τις διάφορες τεχνολογικές εναλλακτικές λύσεις. Με βάση μία σειρά ερευνών που πραγματοποιούνται από εμπειρογνώμονες, οι οποίοι εξειδικεύονται στην εκάστοτε τεχνολογία, υπολογίζεται η αξία της τεχνολογίας κάθε εναλλακτικής λύσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τεχνολογία PLC φαίνεται να κατέχει το προβάδισμα έναντι των άλλων δύο τεχνολογιών για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών στο οικιακό περιβάλλον, αλλά και επισημαίνουν την ανάγκη για υβριδικές λύσεις. Διάφορα θέματα που αφορούν την απόδοση της συσκευής και το κόστος των δομικών στοιχείων του δικτύου έρχονται στο φως και συζητείται η συνάφειά τους με τις τρέχουσες δραστηριότητες έρευνας και τυποποίησης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για την επικύρωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, η μεθοδολογία της AHP, στο πλαίσιο του υπολογισμού της αξίας της τεχνολογίας [104], επεκτείνεται με την ενσωμάτωση της ανάλυσης ευαισθησίας και την προσομοίωση με Monte Carlo [177]. Αυτό εξυπηρετεί ως ένα μέσο για να διερευνηθεί το πως η αβεβαιότητα επηρεάζει την τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων.

### **4.1 Σχεδιασμός Ερευνών**

Πέραν από την έρευνα για το οικιακό δίκτυο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και τα ευρήματα της οποίας αναλύθηκαν εκτενώς στο 3.3, τέσσερις επιπλέον έρευνες διεξήχθησαν. Απώτερος στόχος ήταν η αξιολόγηση των τεχνολογικών

μετρήσεων και συναρτήσεων επιθυμίας, που απαιτούνται για την εκτίμηση της αξίας της τεχνολογίας για τις διάφορες εναλλακτικές τεχνολογίες, όπως αναφέρεται στο 2.6. Ο Πίνακας 29, που ακολουθεί, περιγράφει συνοπτικά τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν.

**Πίνακας 29: Περιγραφή Ερευνών**

Περιγραφή	Αριθμός Ειδικών
1. Τεχνολογικά μέτρα για το IEEE 802.11n	11
2. Τεχνολογικά μέτρα για το 60GHz	12
3. Τεχνολογικά μέτρα για το PLC	10
4. Συναρτήσεις επιθυμίας	31

Ο σχεδιασμός των ερευνών συζητήθηκε εκτενώς μεταξύ των διαφόρων συνεργατών στο πλαίσιο του έργου OMEGA. Η απόκριση από τους τηλεπικοινωνιακούς παρόχους ήταν αρκετά ενδιαφέρουσα και πολύ χρήσιμη για τον τελικό σχεδιασμό των ερευνών, λαμβάνοντας υπόψη την οπτική γωνία των χρηστών τόσο στα θέματα που σχετίζονται με την απόδοση όσο και τα κοινωνικοοικονομικά ζητήματα. Οι εμπειρογνώμονες είναι ιδιαίτερα εκπαιδευμένοι με πολλά χρόνια εμπειρίας στους διάφορους οργανισμούς που λαμβάνουν μέρος στο ICT-OMEGA [165], το οποίο, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο 3.1.1, αποτελείται από ένα καλά ισορροπημένο μείγμα μεταξύ της βιομηχανίας και της ακαδημαϊκής κοινότητας από πολλά μέρη της Ευρώπης. Η τεχνογνωσία τους έγκειται κυρίως στον τομέα των τεχνολογιών που σχετίζονται με τα οικιακά δίκτυα. Οι προαναφερθείσες έρευνες πραγματοποιήθηκαν μέσω μιας δικτυακής πλατφόρμας που ενσωματώνει την μεθοδολογία AHP καθώς επίσης και τις παραλλαγές της, όπως προαναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο 2.12.

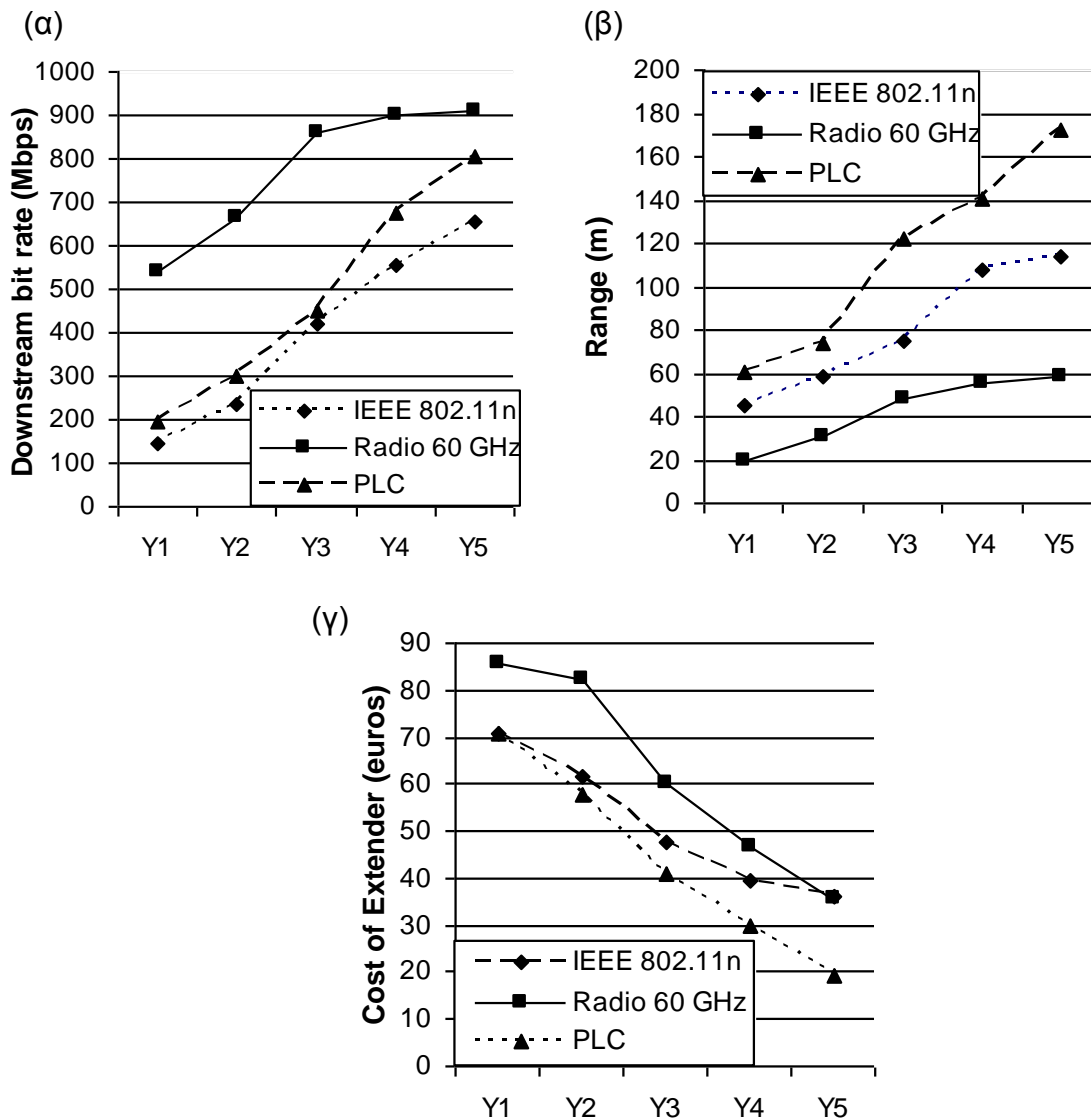
## 4.2 Αποτελέσματα Εφαρμογής της Μεθοδολογίας TDE

Στην ενότητα αυτή, τα αποτελέσματα των ερευνών, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο 4.1, αναλύονται και υπολογίζεται η αξία της τεχνολογίας της κάθε εναλλακτικής λύσης για ένα διάστημα πέντε ετών από την ενδεχόμενη μαζική είσοδο και χρήση της τεχνολογίας στην αγορά για τις ανάγκες του παρόντος δικτύου (Y1 έως Y5), σύμφωνα με το τεχνολογικό πλαίσιο TDE. Ως Y1 θεωρείται ο πρώτος χρόνος μαζικής εισόδου στην αγορά, λαμβάνοντας υπόψη της τεχνολογικές επιδόσεις του 2011.

### 4.2.1 Πρόβλεψη Μετρικών της Τεχνολογίας

Η Εικόνα 49 που ακολουθεί, απεικονίζει μερικά παραδείγματα των μετρικών της τεχνολογίας που υπολογίζονται από τον μέσο όρο των δεδομένων που παρέχονται από τις τρεις πρώτες έρευνες (Πίνακας 29). Όσον αφορά τον downstream ρυθμό δεδομένων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 49 (α), οι ειδικοί πιστεύουν ότι τα συστήματα 60GHz θα λάβουν πιθανότατα το προβάδισμα έναντι των άλλων τεχνολογιών. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του φάσματος χωρίς αδειοδότηση μεταξύ 57 και 64 GHz, το οποίο είναι διαθέσιμο για μετάδοση δεδομένων στη ζώνη αυτή [178]. Θα πρέπει να σημειωθεί

ότι τα συστήματα 60GHz μπορούν να υλοποιηθούν με τη χρήση κυκλωμάτων ημιαγωγών οξειδίου/μετάλλου με χρήση τρανζίστορ PN (CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor) [178]. Αυτές οι εξελίξεις, σε συνδυασμό με κάποια άλλα ελπιδοφόρα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 60GHz έχουν οδηγήσει σε ανάλογες δραστηριότητες τυποποίησης. Πράγματι, η IEEE έχει σχηματίσει την ομάδα μελέτης 802.15.3.c για την ανάπτυξη ενός εναλλακτικού φυσικού επιπέδου με μήκη κύματος της τάξης των χιλιοστών (μήκη κύματος μεταξύ 1-10 mm - millimeter wave) για τα ασύρματα δίκτυα WPAN [179]. Παρά την αφθονία εύρους ζώνης στη ζώνη των 60GHz οι εμπειρογνώμονες, κατά μέσο όρο, προβλέπουν ότι τα εμπορικά συστήματα θα παρέχουν λίγο λιγότερο από 1Gb/s το Υ5, πιθανότατα λόγω των ζητημάτων απόδοσης της τεχνολογίας που πρέπει να αντιμετωπιστούν.



**Εικόνα 49: Πρόβλεψη διαφόρων μετρικών της τεχνολογίας**

Τα συστήματα PLC κατατάσσονται δεύτερα, με προβλεπόμενες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων της τάξης των αρκετών εκατοντάδων Megabit ανά δευτερόλεπτο. Οι ενδεχόμενοι περιορισμοί στα συστήματα αυτά προέρχονται κυρίως λόγω των χαρακτηριστικών των καναλιών των γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος. Προηγμένα σχήματα διαμόρφωσης όπως το OFDM, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επιτύχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες [180]-[182]. Πολλοί οργανισμοί έχουν αναπτύξει πρότυπα για τα συστήματα PLC, συμπεριλαμβανομένης της HomePlug

Powerline Alliance, και της Universal Powerline Association. Η ITU-T ενέκρινε τη σύσταση G.hn/G.9960 ως πρότυπο για powerline υψηλής ταχύτητας, επικοινωνίες ομοαξονικού καλωδίου και τηλεφωνικές γραμμές (1.1.2.2). Το IEEE P1901 είναι μια ομάδα εργασίας της IEEE υπεύθυνη για την ανάπτυξη του παγκοσμίου προτύπου για επικοινωνίες μέσω powerline υψηλής ταχύτητας.

Το IEEE 802.11n έρχεται τρίτο σε χωρητικότητα κάτω καναλιού, επιτυγχάνοντας μέγιστη ταχύτητα δεδομένων (600Mb/s), κοντά στο τέλος της περιόδου μελέτης. Το 802.11n ενσωματώνει τεχνικές MIMO και OFDM ως μέσα για να αυξήσει το διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η πραγματική απόδοση για ασύρματα ραδιο-συστήματα μπορεί να είναι μικρότερη, λόγω των προβλημάτων που σχετίζονται με το MAC. Ωστόσο, στο 802.11n εξετάζονται αρκετές βελτιώσεις στο MAC προκειμένου να εξομαλύνουν το πρόβλημα αυτό [183]. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται από τις προβλέψεις του ρυθμού των bits για το άνω κανάλι.

Τα αποτελέσματα σχετικά με την εμβέλεια των τριών τεχνολογιών, φαίνονται στην Εικόνα 49 (β). Όπως ήταν αναμενόμενο, τα συστήματα 60GHz έχουν σημαντικά χαμηλότερη εμβέλεια λόγω των ιδιοτήτων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε αυτό το τμήμα του φάσματος, συγκριτικά με τις PLC και τις 802.11n λύσεις. Σε χαμηλότερες συχνότητες, δηλαδή στα συστήματα UWB, η κάλυψη μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη συχνότητα και υπάρχουν 5 ομάδες εύρους ζώνης που καλύπτουν ένα φάσμα συχνοτήτων από 3,1 GHz έως 10,6GHz, που αντιστοιχεί σε μία εμβέλεια κάλυψης μεταξύ 10m και 1,56m, αντίστοιχα [184]. Λόγω των σχετικά μικρών αλλαγών στη συχνότητα, η εμβέλεια κάλυψης είναι σχεδόν παρόμοια για τα 60GHz. Η τεχνολογία 60GHz γενικά παρουσιάζει ιδιότητες παρόμοιες με τα οπτικά ασύρματα συστήματα, δεδομένου ότι τα ισχυρότερα δομικά στοιχεία τείνουν να είναι απευθείας οπτικής επαφής. Σε αυτή τη ζώνη συχνοτήτων υπάρχει μια μεγάλη απώλεια διάδοσης ελεύθερου χώρου (περίπου 20 dB περισσότερο από ότι στη ζώνη των 5 GHz), που θα μπορούσε να ξεπεραστεί με τη χρήση των κατευθυντικών κεραιών υψηλής απολαβής, προκειμένου να βελτιωθεί η κάλυψη του σήματος [185]. Αυτό είναι εφικτό να εφαρμοστεί λόγω των σχετικά μικρών μηκών κύματος ( $\approx 5\text{mm}$ ). Τα μικρά μήκη κύματος στη ζώνη αυτή επιβάλλουν ορισμένες σοβαρές προκλήσεις, όπως η ευρύτερη διάχυση του σήματος και η πολλαπλότητα των ανακλάσεων λόγω των εμποδίων. Η μετάδοση των σημάτων 60GHz, όμως, επηρεάζεται έντονα από τα περιβάλλοντα εμπόδια και τους τοίχους, καθώς και τη σκίαση [186]. Οι άνθρωποι που κινούνται μέσα στο πεδίο της απευθείας οπτικής επαφής μπορεί να προκαλέσουν εξασθένηση του σήματος σχεδόν 15dB και αντικείμενα, όπως έπιπλα, τοίχοι, πόρτες και δάπεδα που βρίσκονται σε εσωτερικούς χώρους αποτελούν επίσης σημαντικά εμπόδια. Τα σήματα 60GHz δεν μπορούν να διαπεράσουν τους τοίχους του δωματίου, καθιστώντας κάθε δωμάτιο σε ένα ξεχωριστό κελί, όπου όλη η χωρητικότητα του συστήματος (capacity) είναι εφικτή [187]. Αυτό φυσικά απαιτεί την χρήση ενός μόνο σταθμού βάσης ανά δωμάτιο. Τα γεγονότα αυτά αντικατοπτρίζονται στην Εικόνα 49 (β), όπου οι ειδικοί φαίνεται να πιστεύουν ότι η εμβέλεια των 60GHz θα φτάσει μερικά δεκάδες μέτρα κατά τη διάρκεια της υπό μελέτη περιόδου.

Τα χαρακτηριστικά της σύνδεσης είναι πολύ διαφορετικά στην περίπτωση του IEEE 802.11n, όπου η απώλεια απορρόφησης (penetration loss), όταν το σήμα συναντά εμπόδια που δυσχαιρένουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, είναι μικρότερη, ενώ παράλληλα παρουσιάζεται έντονα το φαινόμενο της διάδοσης του σήματος μέσω πολλαπλών διαδρομών. Ως αποτέλεσμα, η εμβέλεια μπορεί να φτάσει μέχρι και εκατοντάδες μέτρα, γεγονός που βρίσκει σύμφωνους τους εμπειρογνώμονες, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 49 (β). Το 802.11n επεκτείνει τις αρχικές έννοιες του

802.11 και περιλαμβάνει πολλές νέες επιλογές για τη βελτίωση της ποιότητας της ασύρματης σύνδεσης και ως εκ τούτου για την αύξηση τόσο του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων όσο και της εμβέλειας. Το σύστημα κωδικοποίησης για το 802.11n είναι καλύτερο από τις προηγούμενες εκδόσεις του προτύπου, γεγονός που συνεπάγεται ότι περισσότερα bits δεδομένων μεταδίδονται σε κανάλι ίδιου μεγέθους [183]. Επιπλέον, το 802.11n επιτρέπει την μίξη δύο ή περισσότερων καναλιών (channel bonding) που θα διπλασιάσει ουσιαστικά το ρυθμό δεδομένων. Σε αντίθεση με άλλα πρότυπα WLAN, το 802.11n διατηρεί συνδέσεις υψηλής ταχύτητας σε απόσταση μεγαλύτερη των 90m. Στα δίκτυα 802.11, ένας ενιαίος ασύρματος δρομολογητής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη σύνδεσης σε πολλαπλά δωμάτια. Παρ'όλα αυτά, η περιοχή κάλυψης του IEEE 802.11n θα ποικίλει ανάλογα με το περιβάλλον, καθώς και την ικανότητα του χρήστη και του σημείου πρόσβασης.

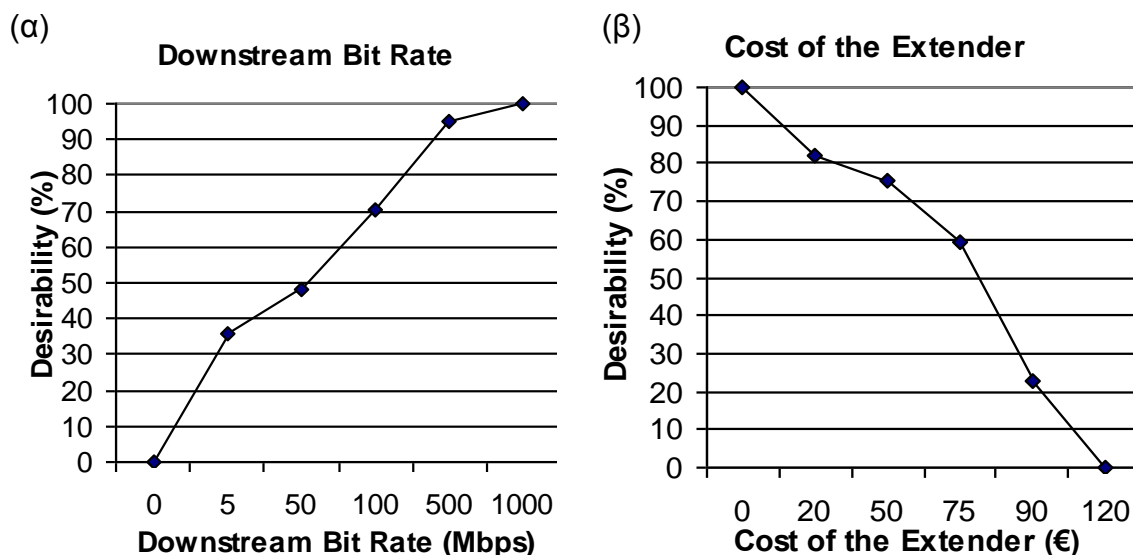
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 49 (β), η τεχνολογία PLC υπερέχει σε σύγκριση με τις άλλες εναλλακτικές τεχνολογικές λύσεις. Σύμφωνα με όσα παρουσιάζει ο Πίνακας 26, στην περίπτωση της PLC, η εμβέλεια σχετίζεται με το μήκος των συρμάτων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση του σήματος μέσα στο σπίτι. Συμπεραίνεται ότι το μέγιστο μήκος του καλωδίου θα φτάσει περίπου τα 170 μέτρα το Υ5. Στην πραγματικότητα, η εμβέλεια των συρμάτων PLC είναι ανεξάρτητη από τα όρια που αναφέρονται για τα IEEE 802.11n και 60 GHz. Οι μόνοι περιοριστικοί παράγοντες σχετικά με την PLC προέρχονται από το θόρυβο, την εξασθένηση καθώς και τη διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών [180].

Το τελευταίο παράδειγμα της πρόβλεψης των μετρικών της τεχνολογίας είναι το κόστος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 49 (γ). Οι ειδικοί προβλέπουν ότι το κόστος θα είναι υψηλότερο για τη λύση των 60GHz, ιδιαίτερα τα πρώτα έτη. Η σημερινή τεχνολογία 60GHz βασίζεται σε σχετικά ακριβούς πομποδέκτες γαλλίου αρσενικού (GaAs - Gallium Arsenide), αλλά όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, διάφορες ερευνητικές εργασίες δείχνουν ότι τα chips πυριτίου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολύ λιγότερη ενέργεια και σημαντικά λιγότερο κόστος. Η μείωση του κόστους σε όλες τις τρεις τεχνολογίες εξαρτάται από τον όγκο της παραγωγής και ως εκ τούτου, από τη ζήτηση για τον εξοπλισμό του μελλοντικού οικιακού δικτύου. Εάν οι χρήστες προσελκύονται από ευρυζωνικές υπηρεσίες, όπως η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, online gaming, κοινή χρήση και διανομή περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας μεταξύ των συσκευών τελικού χρήστη (όπως η συσκευή αποθήκευσης και τα τερματικά των χρηστών), τότε η αύξηση του όγκου παραγωγής θα δώσει νέα ώθηση για περαιτέρω μείωση του κόστους [188]. Για αυτό το σκοπό, η τυποποίηση είναι επίσης ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που μπορεί να μειώσει το κόστος των δομικών στοιχείων του δικτύου.

#### 4.2.2 Συναρτήσεις Επιθυμίας

Στην Εικόνα 50, που ακολουθεί, απεικονίζονται μερικά παραδείγματα των καμπυλών των συναρτήσεων επιθυμίας  $V_{kj}$  για τις περιπτώσεις α) downstream bit rate και β) κόστος για τα συστήματα επέκτασης. Φαίνεται ότι οι ειδικοί είναι περισσότερο αυστηροί όταν ασχολούνται με την downstream παρά με την upstream κίνηση δεδομένων. Για παράδειγμα, οι downstream ρυθμοί δεδομένων των 100Mb/s αντιστοιχούν στο 70% του επιπέδου ικανοποίησης, ενώ για upstream ρυθμό δεδομένων, το ποσοστό είναι πολύ υψηλότερο. Το γεγονός αυτό αντανάκλα την ασύμμετρη φύση πολλών ευρυζωνικών υπηρεσιών και ιδιαίτερα της HDTV, όπου οι υψηλές τιμές ρυθμών δεδομένων κάτω καναλιού είναι σημαντικές για την παροχή υπηρεσιών υψηλής ποιότητας.





Εικόνα 50: Παραδείγματα καμπυλών συναρτήσεων επιθυμίας

Η καμπύλη επιθυμίας για το κόστος είναι επίσης ενδιαφέρουσα δίνοντας έμφαση στην ανάγκη για λύσεις χαμηλού κόστους. Όπως συμβαίνει στα δίκτυα πρόσβασης, οι εμπορικές προοπτικές των οικιακών δικτύων είναι πολύ πιο ευαίσθητες σε θέματα κόστους που αφορούν τα δομικά στοιχεία σε σχέση με τα δίκτυα πυρήνα, δεδομένου ότι ο εξοπλισμός έχει εγκατασταθεί στο χώρο του τελικού χρήστη και όχι σε κάποιο απομακρυσμένο κεντρικό γραφείο που ανήκει σε έναν τηλεπικοινωνιακό φορέα. Τέλος, σύμφωνα με τους ειδικούς, τα συστήματα θα πρέπει να τιμολογούνται κάτω από 100 €, προκειμένου να είναι ελκυστικά από τον τελικό καταναλωτή.

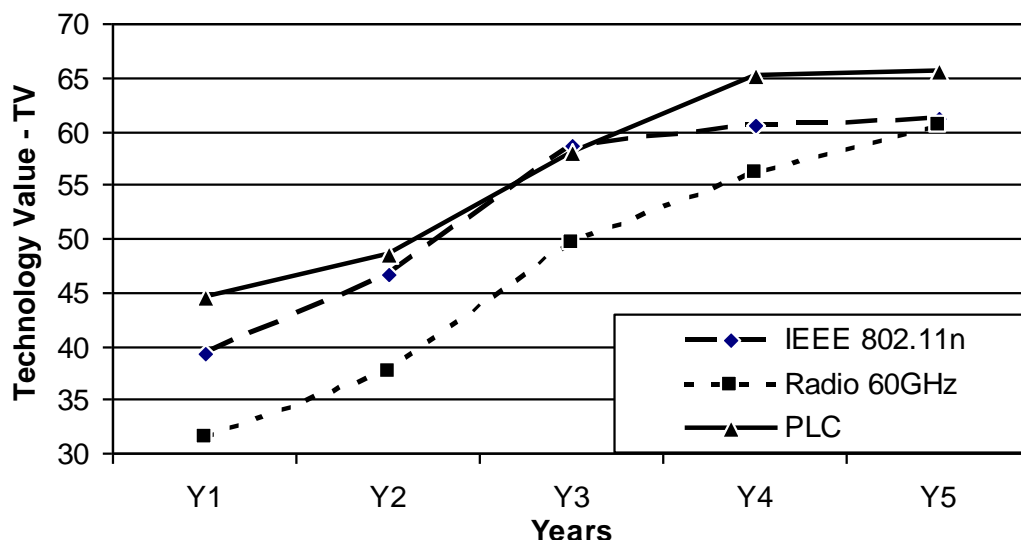
#### 4.2.3 Εκτίμηση της Αξίας της Τεχνολογίας

Η αξία της τεχνολογίας της κάθε εναλλακτικής λύσης αξιολογήθηκε μέσω της εξίσωσης (2.25) σε κάθε χρονική περίοδο, εφόσον πρώτα εκτιμήθηκαν οι συναρτήσεις επιθυμίας  $V_{jk}$  και καθορίστηκαν οι τεχνολογικές τιμές  $t_{ijk}$  από τις αντίστοιχες έρευνες των εμπειρογνομόνων, που περιγράφει ο Πίνακας 29. Όπως αναλύεται στην περιγραφή της μεθοδολογίας TDE (2.6), η αξία της τεχνολογίας για τη νιοστή τεχνολογική εναλλακτική λύση, μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα των τεχνολογικών τιμών των παραγόντων  $TV_{ijk}$ , σύμφωνα με την (2.26). Η Εικόνα 51 δείχνει τις τιμές της αξίας της τεχνολογίας που υπολογίζονται για κάθε μία από τις εναλλακτικές τεχνολογίες δικτύωσης που λαμβάνονται υπόψη. Τα αποτελέσματα είναι επίσης ενδεικτικά και για άλλες συσκευές του δικτύου (τερματικά, κλπ.). Τα αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 51, αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές αξίες των παραγόντων και των κριτηρίων, που καθορίζουν την τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων.

Σύμφωνα με την Εικόνα 51 η αξία της τεχνολογίας της κάθε τεχνολογίας βελτιώνεται κατά την πάροδο του χρόνου, ως άμεση συνέπεια της αυξημένης απόδοσης και της μείωσης του κόστους. Το γράφημα δείχνει ότι η τεχνολογία PLC φαίνεται να έχει το υψηλότερο βραχυπρόθεσμο προβάδισμα έναντι των άλλων τεχνολογιών. Και για τα δύο συστήματα PLC και 802.11n, η αξία της τεχνολογίας τελικά σταθεροποιείται μετά το Υ4, γεγονός που υποδηλώνει ότι αυτές οι τεχνολογίες θα ωριμάσουν μέσα στα επόμενα δύο έως τρία χρόνια. Η κατάσταση είναι διαφορετική για τα συστήματα 60GHz για τα οποία

η τεχνολογική αξία αυξάνεται, ακόμη και μετά το Υ4. Το ενδιαφέρον έγκυται στο ότι τα συστήματα 60GHz φαίνεται να επιτυγχάνουν την ίδια τιμή TV με τα 802.11n το Υ5, γεγονός που υποδηλώνει ότι, μακροπρόθεσμα, μπορεί να χρησιμεύσουν ως η επιλεγθείσα τεχνολογία για την ασύρματη πρόσβαση στο σπίτι. Είναι επίσης ενδιαφέρον να λάβει κανείς υπόψη του το γεγονός ότι οι τεχνολογίες PLC και 802.11n έχουν λίγο πολύ την ίδια αξία της τεχνολογίας για το Υ3.

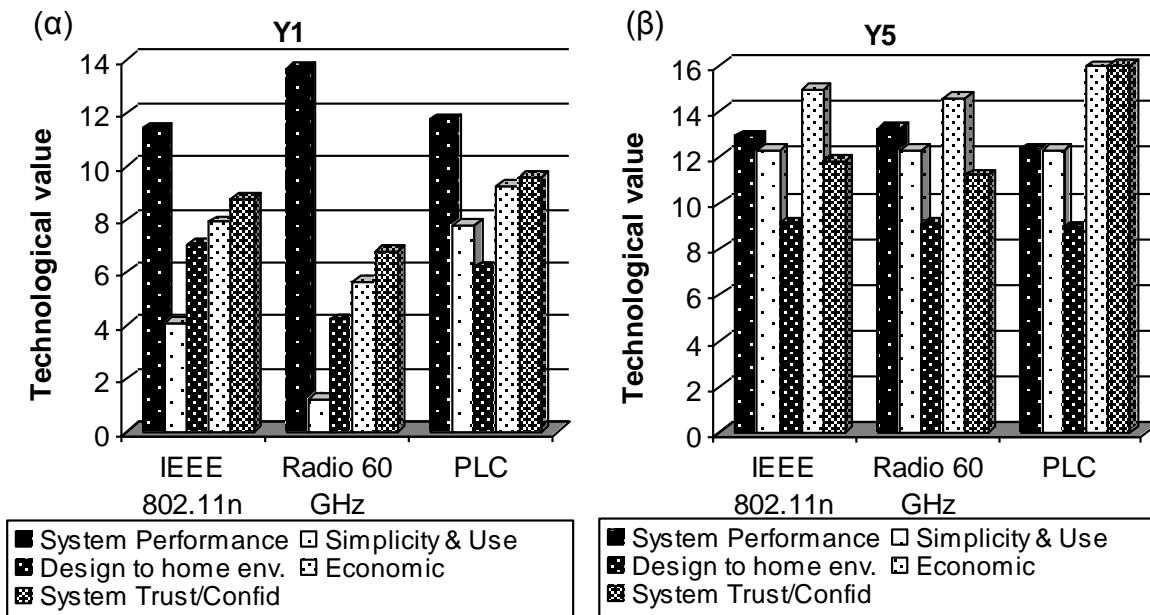
Τα υβριδικά συστήματα radio/PLC, που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο τεχνολογιών, θα μπορούσαν επίσης να παρέχουν μια εναλλακτική λύση για τα μελλοντικά οικιακά δίκτυα και συγκεκριμένα για τη λειτουργικότητα της επέκτασης. Άλλωστε, αξίζει να σημειωθεί ότι προϊόντα που συνδυάζουν δύο τεχνολογίες στο φυσικό επίπεδο έχουν ήδη εμπορευματοποιηθεί. Στο πλαίσιο του ICT-OMEGA, όπως ήδη έχει αναφερθεί, οι τρεις τεχνολογίες συνδυάζονται σε ένα inter-MAC επίπεδο. Το θέμα του υβριδισμού γίνεται πιο ενδιαφέρον, όταν τα PLC και τα συστήματα 60GHz συνδυάζονται μεταξύ τους: τα 60GHz μπορούν να παρέχουν υψηλού εύρους ζώνης ασύρματη σύνδεση στο εσωτερικό του χώρου, ενώ τα PLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επέκταση της συνδεσιμότητας σε πολλούς χώρους του σπιτιού. Ωστόσο, προκειμένου τα PLC να παρέχουν το μελλοντικό δίκτυο κορμού του οικιακού δικτύου, η χωρητικότητά τους πρέπει να επεκταθεί στο καθεστώς των Gigabit ανά δευτερόλεπτο. Σε μια πιο γενική έννοια, η χωρητικότητα του οικιακού δικτύου κορμού είναι ένα σημαντικό ζήτημα για τη μελλοντική ανάπτυξη των οικιακών δικτύων. Μακροπρόθεσμα, η οπτική ίνα είτε πολύτροπη είτε πλαστική θα παρέχει την καλύτερη λύση, ενδεχομένως προσφέροντας μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη χωρητικότητα από ό,τι η PLC, με το κόστος βέβαια της εγκατάστασης πρόσθετων καλωδίων μέσα στο σπίτι. Σε αυτό το πλαίσιο, οι τεχνικές ραδιοκυμάτων μέσω οπτικών ινών (RoF - Radio over Fiber) μπορούν να παρέχουν μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική [182]. Η έννοια RoF στηρίζεται στη διαμόρφωση μιας οπτικής πηγής από το μικροκυματικό σήμα (αντί της μορφής της βασικής ζώνης) και τη διανομή του μέσω οπτικής ίνας στους διάφορους σταθμούς βάσης. Με τον τρόπο αυτό, ο εξοπλισμός του σταθμού βάσης είναι πολύ απλούστερος, δεδομένου ότι δεν απαιτείται καμία μετατροπή συχνότητας στους διάφορους σταθμούς βάσεως. Στα 60GHz ωστόσο, είναι μάλλον δύσκολο να διαμορφωθεί η συσκευή εκπομπής φωτός μέσω μιας διαδικασίας οπτικής ενίσχυσης με βάση την εξαναγκασμένη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), χρησιμοποιώντας άμεση διαμόρφωση και ένας εξωτερικός διαμορφωτής θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί, γεγονός που αυξάνει το κόστος. Σε κάθε περίπτωση, η λύση που βασίζεται σε RoF δίκτυο κορμού με ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας παρουσιάζει αρκετές τεχνικές προκλήσεις και δεν θα είναι εύκολο να διατίθεται στο εμπόριο στο εγγύς μέλλον. Η Εικόνα 51 δείχνει ότι βραχυπρόθεσμα η επέκταση του δικτύου θα πρέπει να παρέχεται από PLC. Οι οπτικές ασύρματες τεχνολογίες σε συνδυασμό είτε με ίνα είτε με PLC θα μπορούσαν επίσης να παρέχουν μια πιο μακροπρόθεσμη εναλλακτική λύση για τη διανομή δεδομένων σε ταχύτητες gigabit μέσα στο σπίτι. Αξίζει, επίσης να σημειωθεί ότι ο συνδυασμός των VLC και PLC έχει ήδη προταθεί [189]. Σε αυτήν την προσέγγιση, οι λευκές LED λάμπες οροφής που χρησιμοποιούνται για το φωτισμό, διαμορφώνονται επίσης ώστε να παρέχουν ασύρματη κίνηση δεδομένων. Οι διάφορες λευκές λάμπες LED μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο PLC, παρέχοντας τόσο τροφοδοσία όσο και σύνδεση του δικτύου κορμού. Τέτοια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση δεδομένων, αλλά δεν παρέχουν συνδεσιμότητα άνω καναλιού (δηλαδή από το τερματικό προς το σταθμό βάσης).



Εικόνα 51: TV για τις εναλλακτικές τεχνολογίες της επέκτασης του δικτύου

#### 4.2.4 Εκτίμηση Αξίας της Τεχνολογίας για Κάθε Κριτήριο και Παράγοντα

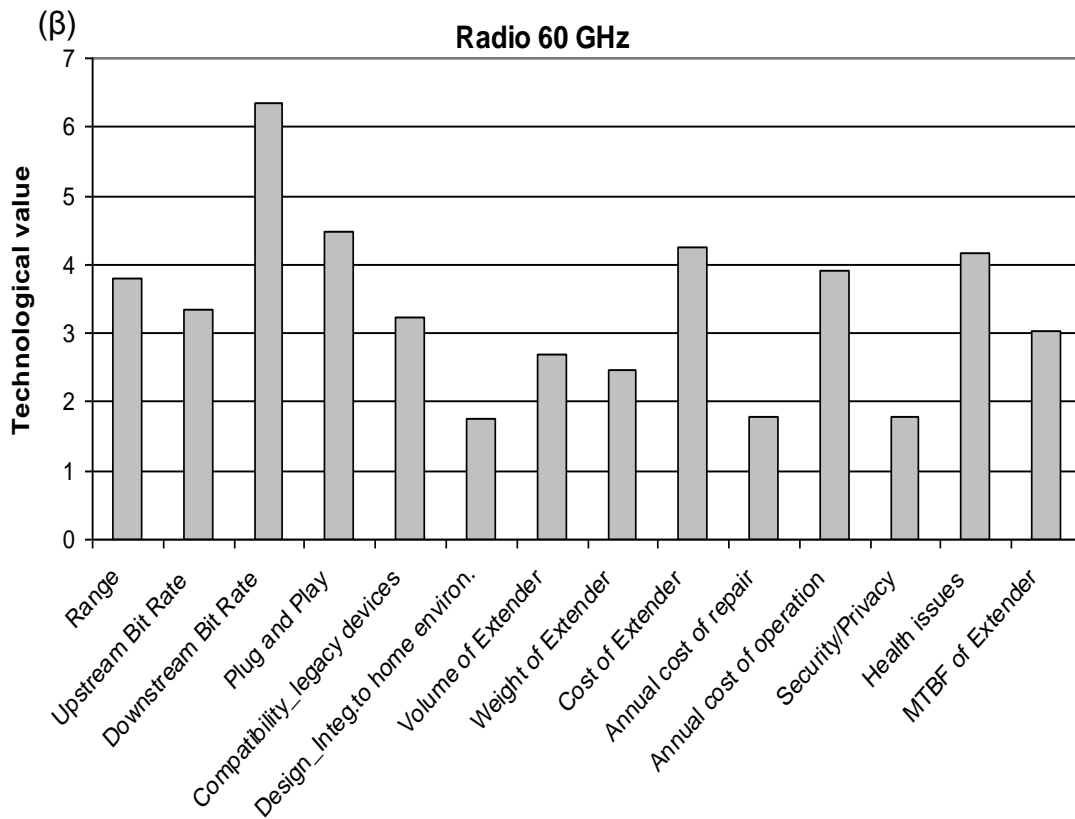
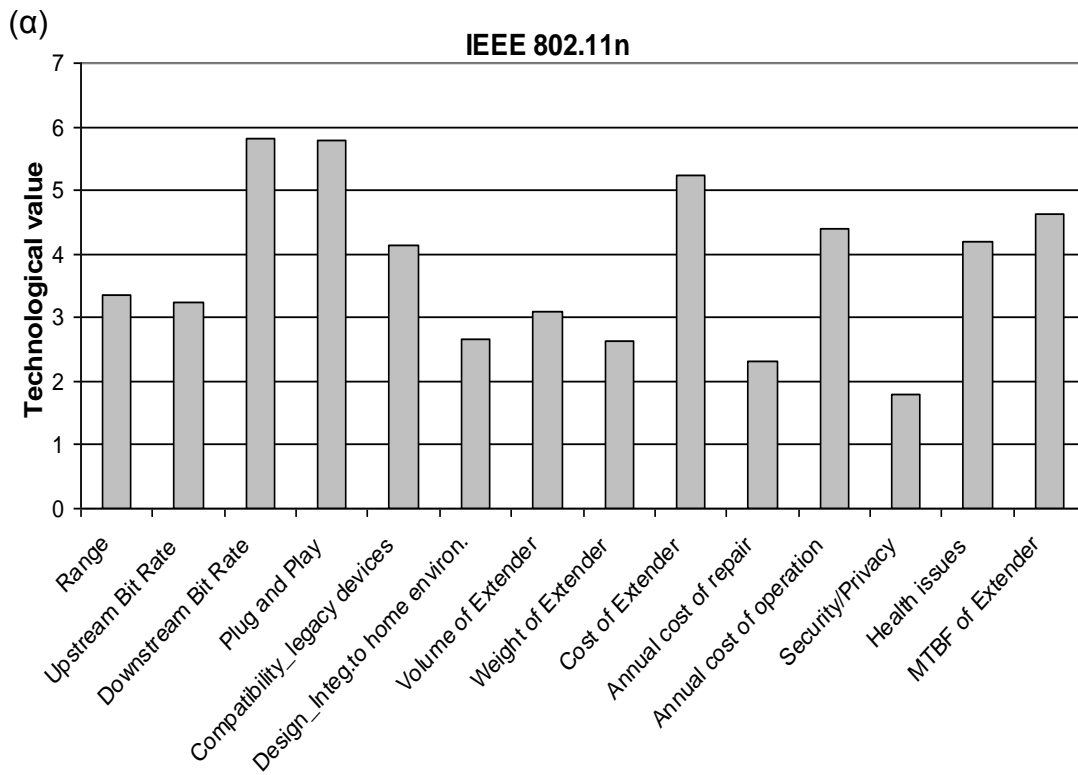
Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, ασχοληθήκαμε με τον υπολογισμό της συνολικής τεχνολογικής αξίας κάθε εναλλακτικής λύσης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 51. Ωστόσο, θα παρουσίαζε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η εξέταση των επιμέρους χαρακτηριστικών της εκάστοτε τεχνολογίας, δηλαδή η τεχνολογική αξία κάθε κριτηρίου και κάθε επιμέρους παράγοντα, όπως ορίζεται στο 2.6.4. Φαίνεται ότι η τεχνολογία PLC λαμβάνει τις υψηλότερες τιμές της τεχνολογικής αξίας στις περισσότερες περιπτώσεις. Η Εικόνα 52 (α) και η Εικόνα 52 (β), που ακολουθούν, απεικονίζουν τις τεχνολογικές αξίες των κριτηρίων για τα έτη Y1 και Y5, αντίστοιχα. Σύμφωνα με την Εικόνα 52 τα ποσοστά που λαμβάνει η PLC είναι καλύτερα τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος της περιόδου μελέτης από την άποψη της αξιοπιστίας του συστήματος και του οικονομικού κριτηρίου που ορίζονται στον Πίνακα 26. Η απλότητα και η ολοκλήρωση με το περιβάλλον του σπιτιού είναι γενικά ευνοϊκά για την PLC το Y1, αλλά τελικά φαίνεται να σταθεροποιείται για όλες τις τεχνολογίες το Y5. Το 802.11 βαθμολογείται επίσης υψηλά όσον αφορά την ολοκλήρωση με το περιβάλλον του οικιακού χώρου το Y1. Τα συστήματα 60GHz λαμβάνουν υψηλό ποσοστό όσον αφορά την απόδοση, αλλά δεν ανταποκρίνονται καλά με άλλα κριτήρια, ιδίως το πρώτο έτος Y1, γεγονός που δικαιολογεί το προβάδισμα των τεχνολογικών αξιών των άλλων εναλλακτικών λύσεων σε σύγκριση με τα 60GHz.

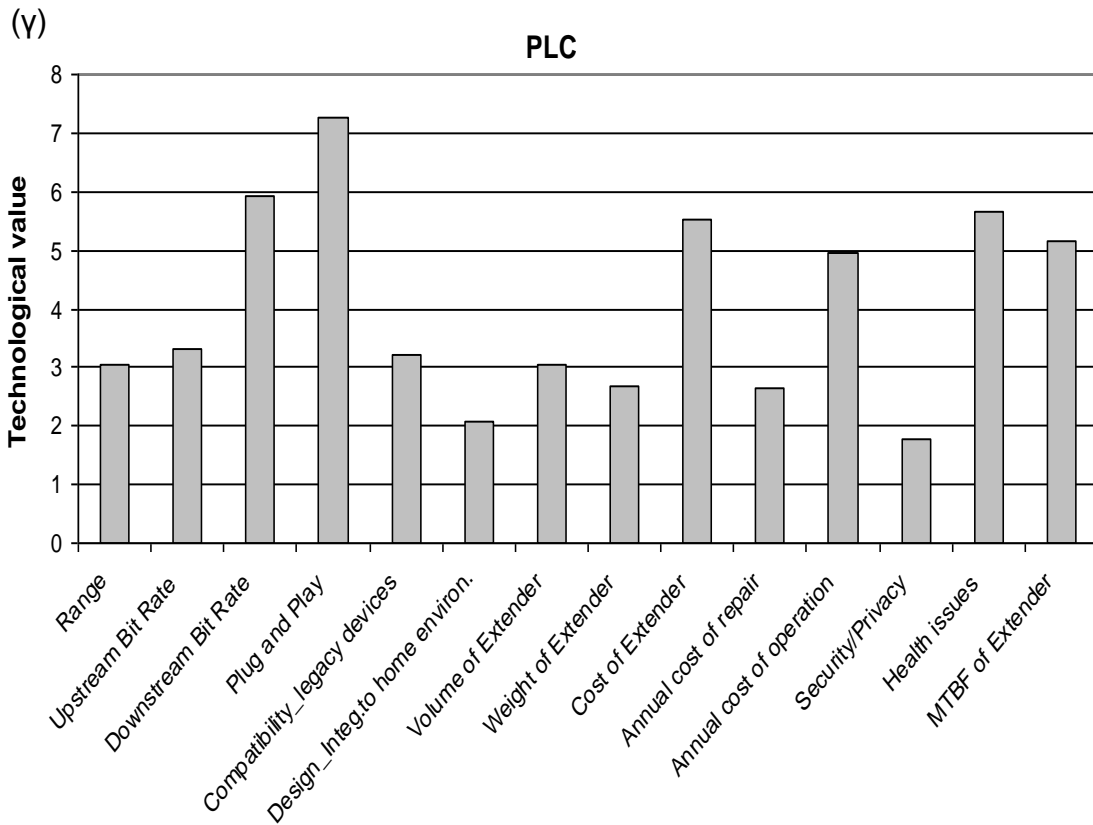


Εικόνα 52: Τεχνολογικές αξίες των κριτηρίων (α) Y1 (β) Y5

Η Εικόνα 53 απεικονίζει τις τεχνολογικές αξίες των παραγόντων για κάθε τεχνολογία, κατά μέσο όρο, σε όλη την περίοδο της μελέτης. Το συγκεκριμένο σχήμα παρέχει επίσης χρήσιμες πληροφορίες, χωρίς να αναιρεί τη συμβολή του κάθε παράγοντα στη συνολική αξία της τεχνολογίας της εκάστοτε λύσης. Το ενδιαφέρον είναι ότι και οι τρεις τεχνολογίες συγκεντρώνουν μεγαλύτερη τιμή τεχνολογικής αξίας, περισσότερο λόγω της επιδότησης του ρυθμού δεδομένων του κάτω καναλιού και όχι λόγω του αντίστοιχου ρυθμού στο άνω κανάλι ή λόγω της εμβέλειας. Ο ρυθμός δεδομένων κάτω καναλιού είναι στην πραγματικότητα το πιο σημαντικό στοιχείο για τα συστήματα 60GHz. Η δυνατότητα άμεσης εγκατάστασης χωρίς παραμετροποίηση είναι εξαιρετικά σημαντική για τα 802.11 και PLC, ίσως επειδή αυτές οι τεχνολογίες είναι ήδη διαθέσιμες στο εμπόριο. Το κόστος της συσκευής είναι επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα για τα 802.11 και PLC. Από την άλλη, τα θέματα υγείας αποτελούν μια σημαντική συνιστώσα της τεχνολογικής αξίας του PLC, ιδίως υπό το πρίσμα της δημόσιας ανησυχίας για τις επιπτώσεις της ραδιο-ακτινοβολίας στις ασύρματες τεχνολογίες.

Συγκρίνοντας τις τεχνολογικές αξίες των διαφόρων παραγόντων, συνάγεται ότι, μέχρι ενός σημείου, οι τεχνολογίες είναι συμπληρωματικές. Λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη ανάλυση, καθώς και το γεγονός ότι οι τιμές της τεχνολογίας στην Εικόνα 51 των PLC και 802.11n είναι πολύ κοντά, ιδιαίτερα όσο πλησιάζουμε στο Y3, φαίνεται ότι μια υβριδική λύση που ενσωματώνει και τα δύο θα παρουσιάσει ενδιαφέρουσες προοπτικές σε σύγκριση με τα οικιακά δίκτυα που ενσωματώνουν μία μόνο τεχνολογία.





Εικόνα 53: Μέσες τεχνολογικές αξίες (α)IEEE 802.11n (β)Radio 60GHz (γ) PLC

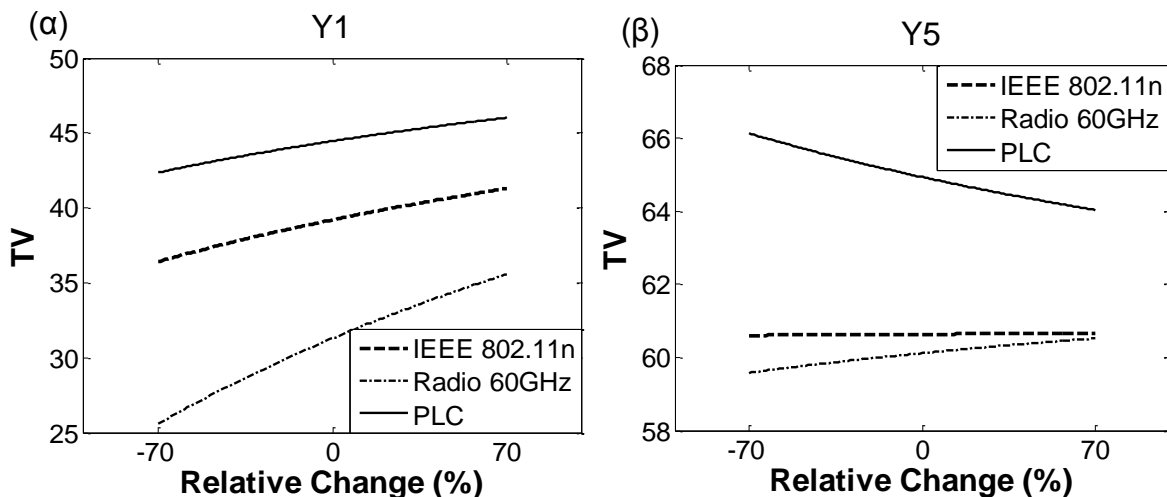
#### 4.2.5 Ανάλυση Ευαισθησίας

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην προηγούμενη ενότητα μπορεί ενδεχομένως να επηρεαστούν από την αβεβαιότητα που εμπλέκεται στην αξιολόγηση των προτεραιοτήτων και των προβλέψεων των τεχνολογικών μέτρων, τα οποία σύμφωνα με το 2.6.2 είναι απαραίτητα στοιχεία για την αξιολόγηση της αξίας της τεχνολογίας. Σε αυτή την ενότητα θα συζητήσουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων έναντι της αβεβαιότητας με την πραγματοποίηση της αντίστοιχης ανάλυσης ευαισθησίας. Καταρχάς, θα εξεταστεί ο αντίκτυπος της αλλαγής κυρίως της τιμής του βάρους ενός μόνο κριτηρίου ή παράγοντα, ενώ στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί Monte Carlo προσομοίωση για την εκτίμηση της επίδρασης της ταυτόχρονης εισαγωγής τυχαίων διαταραχών σε αυτά τα βάρη. Επίσης, θα εξεταστούν οι αλλαγές στην αξία της τεχνολογίας, στην περίπτωση που μεταβάλλεται μόνο μία μετρική της τεχνολογίας, ενώ στο τέλος πραγματοποιούνται προσομοιώσεις Monte Carlo για να μελετηθεί η επίδραση της αλλαγής πολλών μετρικών της τεχνολογίας ταυτόχρονα.

#### 4.2.6 Παραμετροποίηση Ενός Στοιχείου

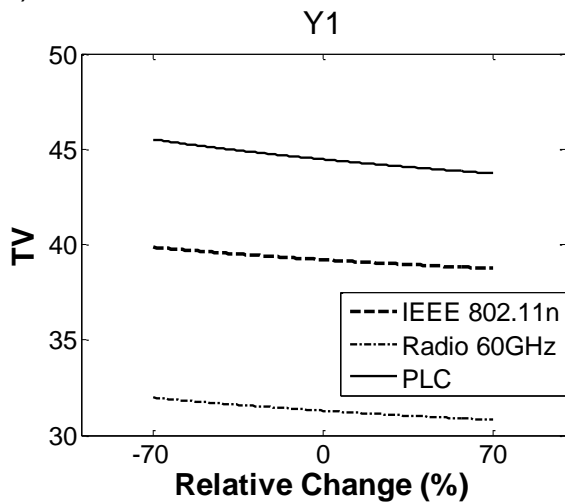
Στην Εικόνα 54 (α) και (β) απεικονίζεται η επιρροή των διαταραχών του βάρους του κριτηρίου της απόδοσης στην αξία της τεχνολογίας των εναλλακτικών λύσεων για το Y1 και Y5, αντίστοιχα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα βάρη πρέπει να κανονικοποιηθούν, έτσι ώστε  $\sum_k w_k = 1$ , και κατά συνέπεια η αλλαγή ενός μόνο βάρους θα συνεπάγεται αναγκαστικά αλλαγές στα βάρη των άλλων κριτηρίων, λόγω της επανακανονικοποίησης

που πραγματοποιείται. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 54 (α) υποδηλώνουν ότι η αλλαγή στο  $w_1$  επηρεάζει την τεχνολογική αξία των τριών τεχνολογιών. Πιο συγκεκριμένα, το  $Y_1$  η τεχνολογική αξία των συστημάτων 60GHz αλλάζει σημαντικά. Οι αλλαγές είναι λιγότερο σημαντικές το  $Y_5$ , επειδή όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 54 (α) και (β) η αξία της τεχνολογίας του κριτηρίου απόδοσης γίνεται λιγότερο σημαντική στο τέλος της υπό μελέτη περιόδου. Παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον το γεγονός ότι η κατάταξη μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων διατηρείται τόσο το  $Y_1$  όσο και το  $Y_5$ , ακόμη και για σχετικά υψηλές μεταβολές της τάξης του  $\pm 70\%$ . Παρόμοια συμπεράσματα ανάγονται, όταν η ανάλυση ευαισθησίας διεξάγεται για το βάρος του κριτηρίου αξιοπιστίας/εμπιστοσύνης, το οποίο έχει και τη μεγαλύτερη τιμή, όπως παρουσιάζει ο ανωτέρω Πίνακας 26. Στη συνέχεια, η Εικόνα 56 απεικονίζει την επίδραση της αλλαγής του βάρους του παράγοντα που αφορά το ρυθμό δεδομένων του κάτω καναλιού, ενώ η Εικόνα 57 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για το βάρος του παράγοντα που σχετίζεται με τα θέματα υγείας (ο πιο σημαντικός παράγοντας του κριτηρίου αξιοπιστίας/εμπιστοσύνης). Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, τα βάρη των παραγόντων κανονικοποιούνται ξανά, έτσι ώστε  $\sum_j f_{jk} = 1$ . Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η κατάταξη διατηρείται τόσο για το  $Y_1$  όσο και για το  $Y_5$ .

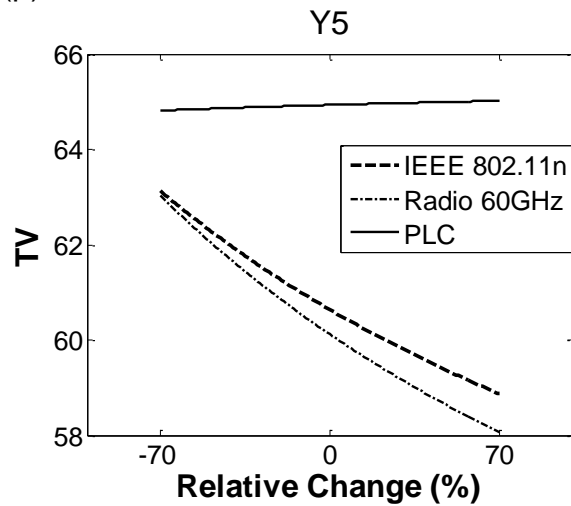


Εικόνα 54: Ανάλυση Ευαισθησίας για τις αλλαγές στο κριτήριο της απόδοσης από -70% έως 70% για το (α)  $Y_1$  (β)  $Y_5$

(α)

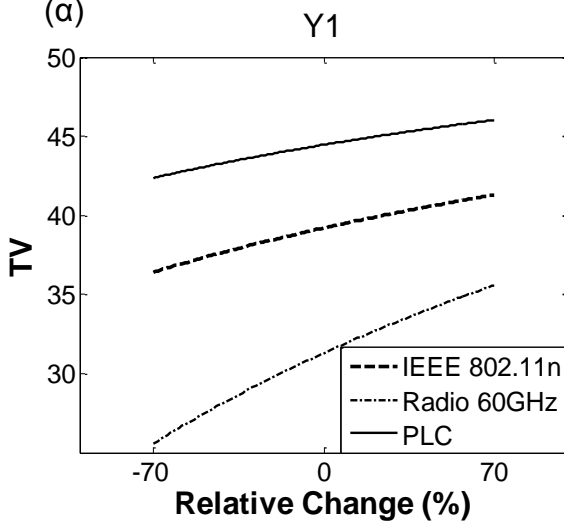


(β)

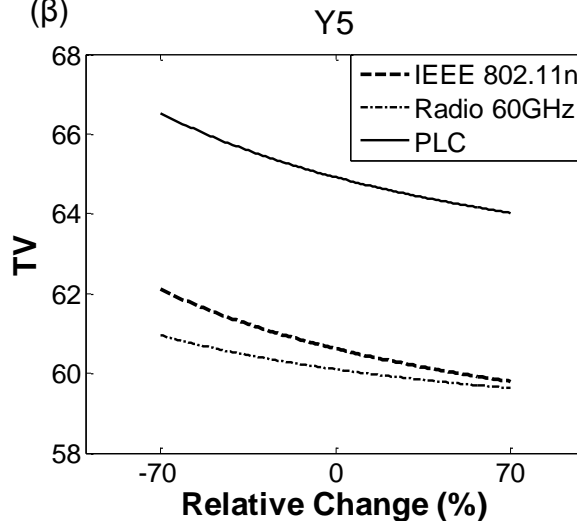


Εικόνα 55: Ανάλυση Ευαισθησίας για τις αλλαγές στο κριτήριο της αξιοπιστίας/εμπιστοσύνης από -70% έως 70% για το (α) Y1 (β) Y5

(α)

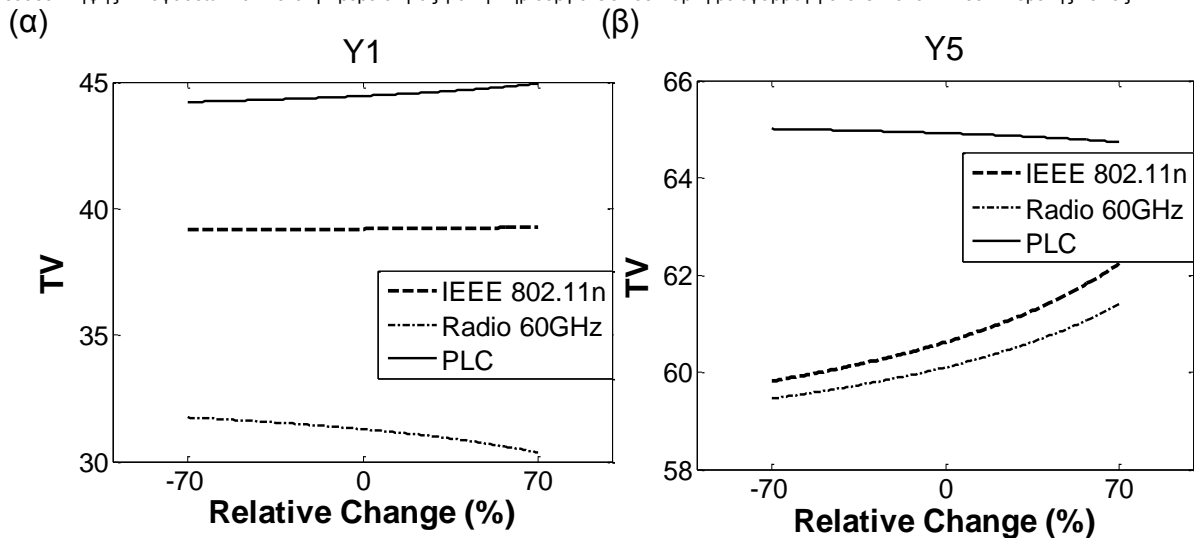


(β)



Εικόνα 56: Ανάλυση Ευαισθησίας για τις αλλαγές στο downstream bit rate από -70% έως 70% για το (α) Y1 (β) Y5

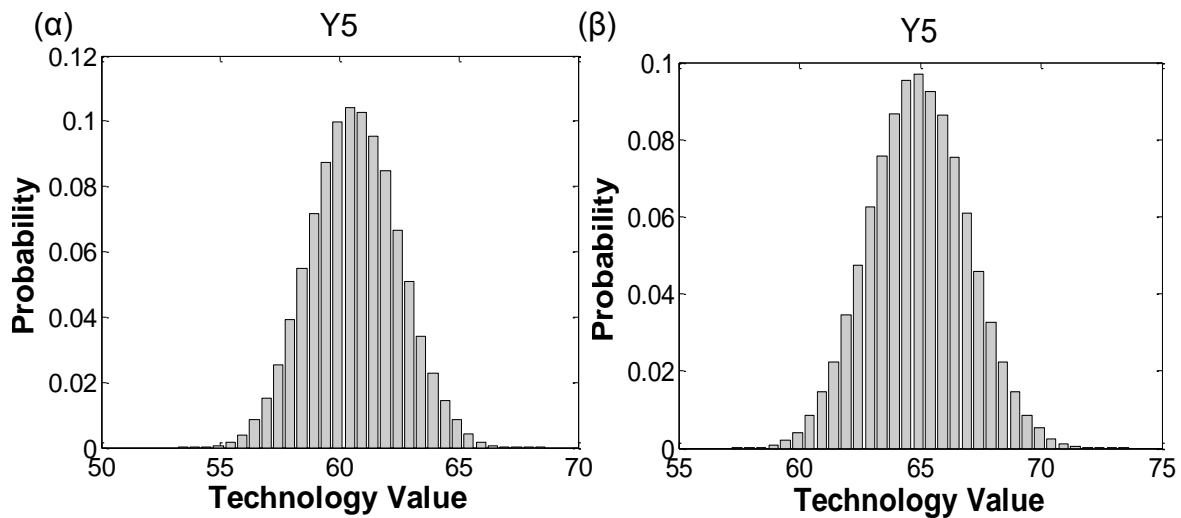




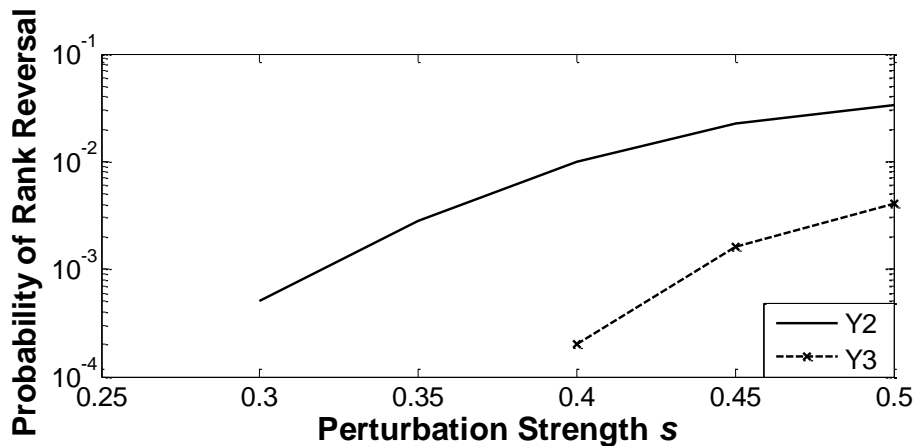
Εικόνα 57: Ανάλυση Ευαισθησίας για τις αλλαγές στα θέματα υγείας από -70% έως 70% για το (α) Y1 (β) Y5

#### 4.2.7 Παράλληλη Παραμετροποίηση των Βαρών Κριτηρίων και Παραγόντων

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επιρροή των ταυτόχρονων μεταβολών σε περισσότερα του ενός βάρη των κριτηρίων, χρησιμοποιούνται προσομοιώσεις Monte Carlo. Πιο συγκεκριμένα, διαταράσσονται τα βάρη όλων των κριτηρίων και παραγόντων από  $w_k$  και  $f_{jk}$  σε  $w_k(1+\Delta W_k)$  και  $f_{jk}(1+\Delta F_{jk})$  αντίστοιχα, όπου οι διαταραχές  $\Delta W_k$  και  $\Delta F_{jk}$  έχουν την ίδια στατιστική και είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές (identically distributed independent random variables) με μηδενικές μέσες τιμές. Αυτές οι τυχαίες διακυμάνσεις μπορεί να συμβαίνουν για παράδειγμα, λόγω του γεγονότος ότι οι εμπειρογνώμονες μπορεί να εκτελούν ασυνεπείς συγκρίσεις κατά ζεύγη [190]. Στην Εικόνα 58 (α) και (β), παρουσιάζεται το ιστόγραμμα των τιμών TV που λαμβάνονται για το 802.11n και το PLC το Y5, όταν τα  $\Delta W_k$  και  $\Delta F_{jk}$  επιλέγονται τυχαία από μια ομοιόμορφη κατανομή στο εσωτερικό του διαστήματος  $[-s, s]$ , όπου  $s$  είναι ίσο με 0,1 (που αντιστοιχεί σε μέγιστη διακύμανση  $\pm 10\%$  σε σχέση με την αρχική του τιμή). Εφόσον τα βάρη έχουν επιλεγεί τυχαία, πρέπει να επανακανονικοποιηθούν, έτσι ώστε  $\sum_k w_k = 1$  και  $\sum_j f_{jk} = 1$ . Οι τιμές της TV για τις τεχνολογίες 802.11n και PLC υπολογίστηκαν με τη χρήση  $10^5$  Monte Carlo επαναλήψεων. Το ενδιαφέρον φαίνεται να έγγυται στο γεγονός ότι η αξία της τεχνολογίας εμφανίζει παρόμοια ευαισθησία για αμφότερες τις τεχνολογίες και ότι οι τιμές των TVs το Y5 είναι κάπως πιο επιρρεπείς στην αβεβαιότητα, που προκαλείται από τις διαταραχές.



Εικόνα 58: Ευαισθησία του TV ιστογράμματος το Y5 για (α)IEEE802.11n (β)PLC



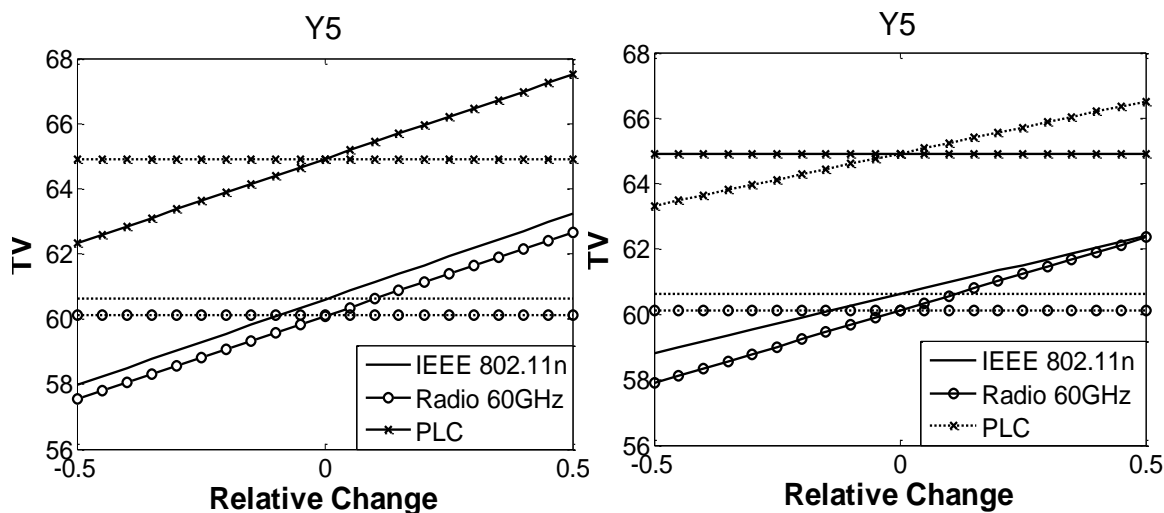
Εικόνα 59: Πιθανότητα αναστροφής της κατάταξης συναρτήσει της έντασης των διαταραχών  $s$ .

Επιπρόσθετα, η προσομοίωση Monte Carlo μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αξιολογηθεί η πιθανότητα αναστροφής της κατάταξης (probability of rank reversal  $P_{RR}$ ) [43]. Στην περίπτωση μας, μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα αντιστροφής της κατάταξης με τη μέτρηση του αριθμού των επαναλήψεων στα οποία η κατάταξη της εκάστοτε τεχνολογίας αποδεικνύεται ότι είναι διαφορετική από εκείνη που εμφανίζεται παραπάνω (Εικόνα 51). Η Εικόνα 59 δείχνει την πιθανότητα αντιστροφής της κατάταξης μεταξύ των δύο πιο σημαντικών τεχνολογιών (PLC και IEEE 802.11n) για το Y2 και το Y3. Η ένταση των διαταραχών (perturbation strength) κυμαίνεται μεταξύ 0,1 έως 0,5. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η πιθανότητα αναστροφής είναι μηδέν για μικρές διαταραχές. Το ενδιαφέρον είναι ότι η σειρά κατάταξης διατηρείται πάντα τα έτη Y1, Y4, Y5, όπου σύμφωνα με την Εικόνα 51, οι τιμές της TV, χωρίς διαταραχές, των PLC και IEEE802.11n διαφέρουν σημαντικά. Το Y2 καθώς και το Y3 η πιθανότητα αντιστροφής της κατάταξης είναι μάλλον υψηλή μόνο για τις ισχυρές διαταραχές ( $s > 0,3$ ).

#### 4.2.8 Παραμετροποίηση Μίας Μετρικής της Τεχνολογίας

Δεδομένου ότι οι μελλοντικές τιμές  $t_{ijk}$  των παραγόντων βασίζονται στην ικανότητα των ειδικών να προβλέπουν σύμφωνα με την εμπειρία τους, η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται επίσης και για τα  $t_{ijk}$ . Η Εικόνα 60 (α) και (β) απεικονίζει τη μεταβολή

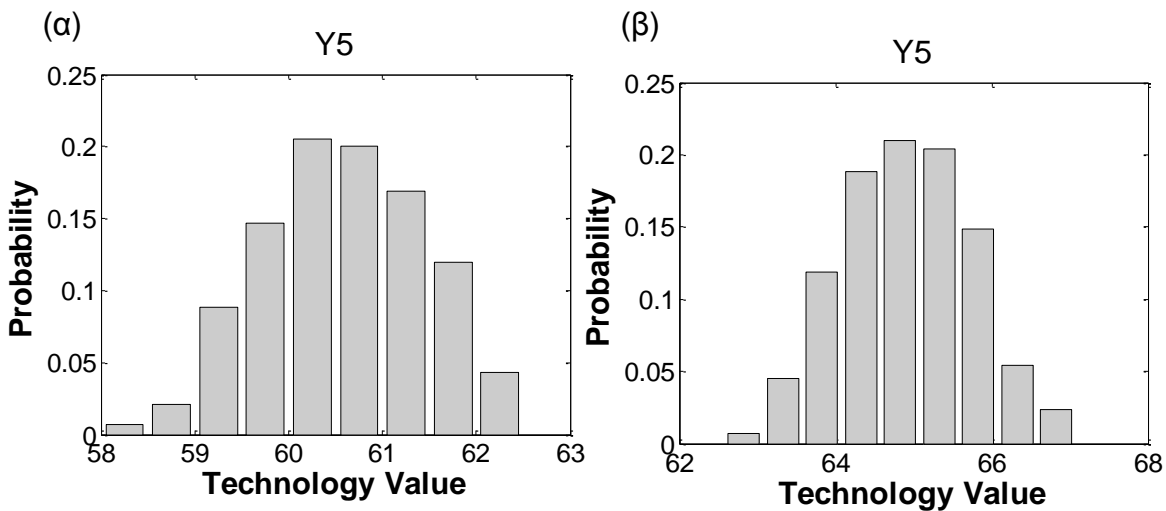
που προκαλείται στην TV μεταβάλλοντας τις τεχνολογικές μετρήσεις των παραγόντων ρυθμού δεδομένων κάτω καναλιού και εύρους από τις αρχικές τιμές τους  $t_{31}$ ,  $t_{11}$ , αντίστοιχα, το Υ5. Όπως φαίνεται στο συγκεκριμένο σχήμα, οι διακυμάνσεις συνεπάγονται αλλαγές στις τιμές TV των τριών τεχνολογιών σε σύγκριση σε σχέση με τις αρχικές τους τιμές (οι οποίες απεικονίζονται με τις διακεκομμένες γραμμές). Το ενδιαφέρον είναι ότι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 60 (α), η λύση PLC παραμένει στην πιο υψηλή θέση εκτός και αν  $t_{31}$  γίνει  $\cong 50\%$  μικρότερο για το PLC και  $\cong 50\%$  μεγαλύτερο για το 802.11n. Η Εικόνα 60 (β) δείχνει ότι η PLC είναι πάντα η τεχνολογική λύση με την υψηλότερη τιμή, ακόμη και αν οι προβλέψεις που αφορούν την εμβέλεια αλλάξουν δραματικά.



**Εικόνα 60:** Ευαισθησία των εναλλακτικών για τις μεταβολές ενός μόνο τεχνολογικού μέτρου μεταξύ -50% έως 50% για (α) ρυθμός δεδομένων κάτω καναλιού (β) εμβέλεια. Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στις αρχικές τιμές.

#### 4.2.9 Παράλληλες Παραμετροποιήσεις των Παραγόντων Απόδοσης και των Μετρικών της Τεχνολογίας

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιώντας Monte Carlo προσομοίωση, προκειμένου να εξετασθεί το πώς η προβλεπόμενη αβεβαιότητα επηρεάζει τις TVs των εναλλακτικών τεχνολογικών λύσεων. Οι τεχνολογικές μετρικές όλων των παραγόντων απόδοσης μεταβάλλονται ταυτόχρονα με έναν τρόπο παρόμοιο με τις προαναφερθείσες διαταραχές. Η Εικόνα 61 (α), (β) απεικονίζει την ευαισθησία του ιστογράμματος των TVs για τις πιο ελκυστικές εναλλακτικές λύσεις τεχνολογίας (IEEE802.11n και PLC, αντίστοιχα) το Υ5. Η ένταση της διαταραχής είναι  $s = 0,5$  και αντιστοιχεί σε μέγιστη απόκλιση 25% από τις αρχικές τιμές. Το σχήμα δείχνει ότι οι προβλεπόμενες αβεβαιότητες επηρεάζουν την αξία της τεχνολογίας, όχι όμως δραματικά. Τα αποτελέσματα της παρούσας ενότητας παρέχουν μια ένδειξη της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της AHP ενάντια στις αβεβαιότητες που παρουσιάζονται στις συγκρίσεις ανά ζεύγη και στις προβλέψεις που πραγματοποιούνται από τους εμπειρογνώμονες.



Εικόνα 61: Ευαισθησία του ιστογράμματος TV για (α) IEEE 802.11n (β) PLC

### 4.3 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζονται και αναλύονται οι διαδικασίες δημιουργίας ενός οδικού χάρτη, που σχετίζεται με το σύστημα οικιακής δικτύωσης, και συγκεκριμένα με τη λειτουργικότητα της επέκτασης του δικτύου, που αποτέλεσε αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στο πλαίσιο του έργου ICT OMEGA. Χρησιμοποιώντας την AHP, βασισμένη στην επέκταση TDE, πραγματοποιήθηκε η κατάταξη των διαφόρων τεχνολογικών εναλλακτικών λύσεων IEEE802.11, 60GHz και PLC. Τα αποτελέσματα μπορεί να επικεντρώθηκαν στην επέκταση του δικτύου, αλλά είναι επίσης ενδεικτικά και για τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία του οικιακού δικτύου. Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν με βάση την AHP υποδεικνύουν ότι η PLC λαμβάνει κάποιο προβάδισμα σε σχέση με τις ασύρματες εναλλακτικές λύσεις. Η 802.11 κατατάσσεται ως δεύτερη καλύτερη, ενώ το σύστημα 60GHz θεωρείται ως μια πιο μακροπρόθεσμη εναλλακτική λύση, η οποία θα μπορούσε να παρέχει συνδεσιμότητα της τάξης των Gigabit ανά δευτερόλεπτο. Παράλληλα, συζητήθηκαν τα πλεονεκτήματα των υβριδικών λύσεων αυτών των τεχνολογιών, είτε στο φυσικό επίπεδο είτε σε ένα υψηλότερο επίπεδο δικτύου. Πράγματι, το PLC θα είναι η πλέον επικρατούσα σύνδεση στο σπίτι, ενώ όλες οι συσκευές θα πρέπει να περιλαμβάνουν πρόσθετη διεπαφή για να υποστηρίξουν τα οφέλη της ευφυούς μεταγωγής, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ασύρματη επέκταση. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να εκτιμηθούν οι αβεβαιότητες και με ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποδείχτηκε ότι δεν επηρεάζουν δραματικά τα αποτελέσματα της κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων.

## 5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΟΙΚΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

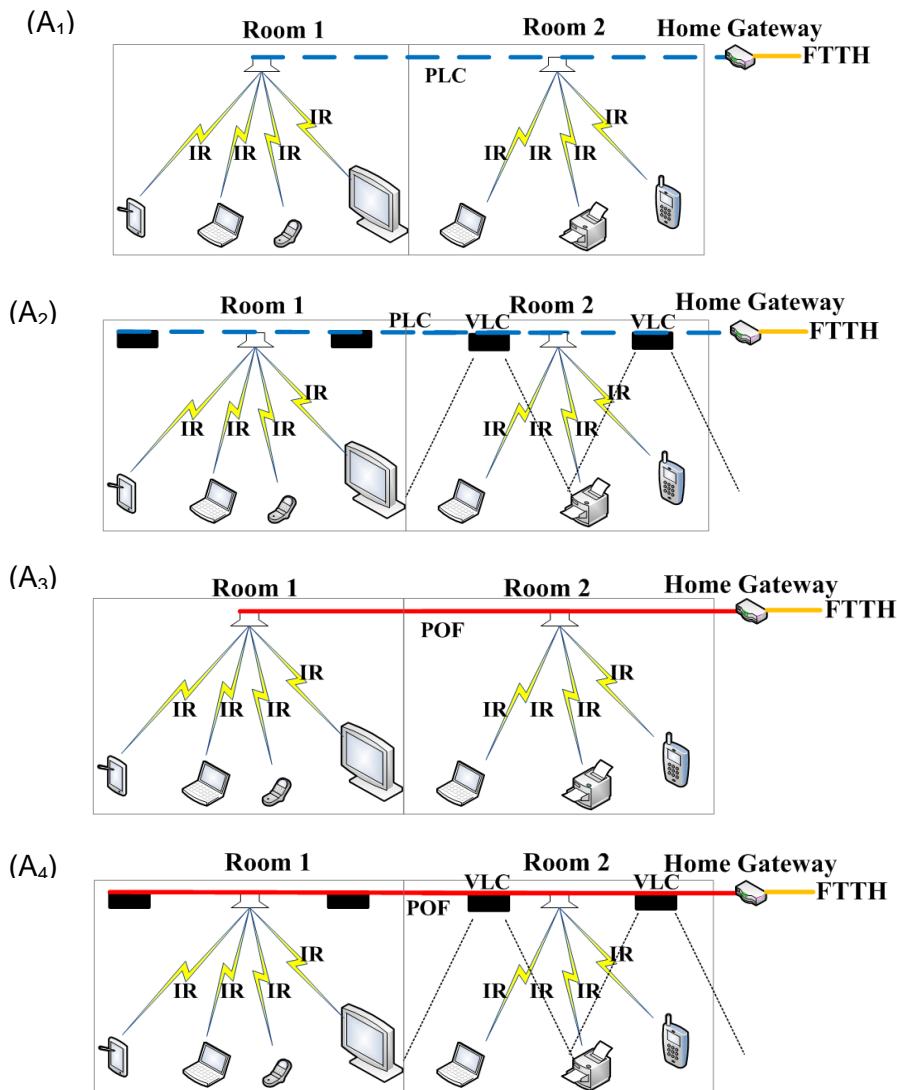
Στο πλαίσιο των οικιακών δικτύων, τα οποία πρόκειται να διαδραματίσουν αποφασιστικό ρόλο στην επίτευξη παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών και να επιτρέψουν την εξέλιξη του μελλοντικού Διαδικτύου, οι οπτικές ασύρματες τεχνολογίες αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογική λύση για την υλοποίηση αυτού του οράματος. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζει τα κύρια αποτελέσματα της προσπάθειας δημιουργίας ενός οδικού χάρτη, που σχετίζεται με τις δυνατότητες των οπτικών ασύρματων οικιακών δικτύων. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας, πέντε διαφορετικά σενάρια οπτικής οικιακής δικτύωσης προτείνονται και αξιολογούνται, όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή, με σκοπό την προοπτική ενός μελλοντικού οπτικού οικιακού δικτύου (1.2.1.2). Στο πλαίσιο αυτό, αξιολογείται επίσης η σημασία των διαφόρων οικονομικών, κοινωνικών κριτηρίων καθώς και των θεμάτων απόδοσης της εκάστοτε τεχνολογικής λύσης. Τα αποτελέσματα που εξάγονται αναλύονται λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές ιδιαιτερότητες της κάθε αρχιτεκτονικής. Τέλος, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

### 5.1 Περιγραφή Εναλλακτικών Σεναρίων

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην εισαγωγή για τις προοπτικές των μελλοντικών οικιακών δικτύων, φαίνεται ότι οι οπτικές ασύρματες τεχνολογίες δύναται να αποτελέσουν μια καλή επιλογή για τη διευκόλυνση της παροχής πολλών ευρυζωνικών υπηρεσιών στα μελλοντικά οικιακά δίκτυα (1.2.1.2). Ωστόσο, σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα ασύρματης ραδιοεπικοινωνίας, για τις οπτικές ασύρματες τεχνολογίες υπάρχουν διάφορα ζητήματα που αφορούν την ανάπτυξη τους και παραμένουν ασαφή. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η επιλογή του οικιακού δικτύου κορμού. Το δίκτυο κορμού θα πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει συνδεσιμότητα της τάξης των Gb/s, διαφορετικά οι ρυθμοί δεδομένων που παρέχονται από τους οπτικούς σταθμούς βάσης δε θα χρησιμοποιηθούν με αποτελεσματικό τρόπο. Η τεχνολογία PLC δύναται να προσφέρει μια ενδιαφέρουσα λύση προς αυτήν την κατεύθυνση. Εναλλακτικά, αν κάποιος είναι σύμφωνος με την εγκατάσταση νέων καλωδίων, η οπτική ίνα, είτε πολύτροπη είτε πλαστική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διασύνδεση των σταθμών βάσεων. Παράλληλα, θα πρέπει να καθοριστεί ποια τεχνολογία θα χρησιμοποιεί το ίδιο το σύστημα για τις ασύρματες συνδέσεις. Υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές και δεν είναι ακόμα ξεκάθαρο ποια είναι καλύτερη, το VLC, το IR ή και τα δύο; Η παρούσα διατριβή θα προσπαθήσει να εξερευνήσει αυτό το σύνθετο πρόβλημα, με την ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού οδικού χάρτη βασιζόμενου στις πολύκριτηριακές διαδικασίες λήψης απόφασης [191].

Για το σκοπό αυτό προτείνονται τέσσερα εναλλακτικά σενάρια, που πρόκειται να αξιολογηθούν στο πλαίσιο της προοπτικής του μελλοντικού οπτικού οικιακού δικτύου, τα οποία παρουσιάζονται ακολούθως, όπως αναλύθηκαν στο 1.2.1.2. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο σενάριο αρχιτεκτονικής ( $A_1$ ) βασίζεται στις αμφίδρομες IR και απευθείας οπτικής επαφής συνδέσεις σε ένα δίκτυο κορμού PLC. Το δεύτερο σενάριο ( $A_2$ ) είναι παρόμοιο με το  $A_1$  με την εξαίρεση ότι οι VLC λαμπτήρες παρέχουν συνδεσιμότητα κάτω καναλιού, ενισχύοντας έτσι την κάλυψη του συνολικού συστήματος. Τα VLC και IR υποσυστήματα μπορούν να συνδυαστούν σε ένα υψηλότερο επίπεδο δικτύου, όπως το στρώμα MAC, δημιουργώντας έτσι ένα υβριδικό σύστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε αυτό το σενάριο, το VLC χρησιμοποιείται μόνο για δεδομένα κάτω καναλιού. Οι άλλες

δύο αρχιτεκτονικές  $A_3$  και  $A_4$  είναι παρόμοιες με τις  $A_1$  και  $A_2$  αντίστοιχα, εκτός από το γεγονός ότι η πλαστική οπτική ίνα (POF) χρησιμοποιείται στο δίκτυο κορμού αντί του PLC. Οι αρχιτεκτονικές  $A_1$  και  $A_2$  έχουν το πλεονέκτημα της συμβατότητας με τις προσεγγίσεις που δεν απαιτούν την εγκατάσταση νέων καλωδίων. Τόσο τα PLC όσο και τα POF αναμένεται να επιτύχουν συνδέσεις της τάξης των Gb/s στο εγγύς μέλλον. Ωστόσο, οι παραπάνω ασύρματες εναλλακτικές λύσεις δεν είναι ακόμη εμπορικά διαθέσιμες λύσεις, αλλά έχουν επιτυχώς πραγματοποιηθεί στο εργαστηριακό πλαίσιο. Τέλος, η πέμπτη εναλλακτική λύση ( $A_5$ ), επεκτείνει τις POF συνδέσεις μέχρι τα τερματικά των χρηστών [192]. Σε αυτό το σενάριο δεν προβλέπονται ασύρματες συνδέσεις. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα εναλλακτικά σενάρια  $A_1$ - $A_4$  για την προοπτική του οπτικού οικιακού δικτύου.



Εικόνα 62: Εναλλακτικές Λύσεις για το μελλοντικό Οπτικό Οικιακό Δίκτυο

## 5.2 Έρευνες και Συμμετέχοντες

Στις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας συμμετείχαν έντεκα εμπειρογνώμονες, μέλη της κοινοπραξίας OMEGA. Το συγκεκριμένο μέγεθος ομάδας κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό για τη συμμετοχή σε

πολυκριτηριακή διαδικασία λήψης απόφασης, σύμφωνα με την πρότερη βιβλιογραφία [104], [193], [194], [204]. Οι εν λόγω εμπειρογνώμονες είναι υπάλληλοι των διαφόρων οργανισμών που εμπλέκονται στο έργο OMEGA, όπως έχει προαναφερθεί στο 3.1. Η τεχνογνωσία τους έγκειται κατά κύριο λόγο στον τομέα των οπτικών τεχνολογιών δικτύωσης. Οι έρευνες που πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής :

- Έρευνα  $S_1$ : Αξιολόγηση των κριτηρίων και παραγόντων.
- Έρευνα  $S_2$ : Αξιολόγηση Τεχνολογίας (εκτίμηση του  $S_{ijk}$  (2.15)) για το σενάριο στο σπίτι.
- Έρευνα  $S_3$ : Αξιολόγηση Τεχνολογίας (εκτίμηση του  $S_{ijk}$  (2.15)) για το σενάριο στο γραφείο.

Οι έρευνες που αφορούν την αξιολόγηση της εκάστοτε εναλλακτικής λύσης υπό το πρίσμα των διαφόρων παραγόντων, αποφασίστηκε να διεξαχθούν δύο φορές, κάνοντας διάκριση μεταξύ των σεναρίων εφαρμογής. Αναλυτικότερα, στις  $S_2$  και  $S_3$  οι εμπειρογνώμονες κλήθηκαν να διαφοροποιήσουν την κρίση τους στα σενάρια εφαρμογής στο σπίτι και στο γραφείο, αντίστοιχα. Όσον αφορά τα κριτήρια και τους παράγοντες, οι εμπειρογνώμονες επισήμαναν ότι θα έχουν την ίδια βαρύτητα τόσο για το σπίτι όσο και για το γραφείο. Σχετικά με τις έρευνες της τεχνολογικής αξιολόγησης, οι εμπειρογνώμονες κλήθηκαν να εξετάσουν μια βραχυπρόθεσμη χρονική περίοδο ξεκινώντας από το  $Y_1$ , που θεωρείται το έτος εισόδου της εκάστοτε τεχνολογίας στην αγορά, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές επιδόσεις του 2011, με σκοπό τη χρήση της στο οπτικό οικιακό δίκτυο έως το  $Y_5$ .

### 5.3 Εκτίμηση Βαρών Κριτηρίων και Παραγόντων

Σε αυτή την ενότητα θα συζητήσουμε τα αποτελέσματα της πρώτης έρευνας σχετικά με την αξιολόγηση της σημασίας των κριτηρίων και των παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη των οπτικών δικτύων στο σπίτι και στο γραφείο. Ο Πίνακας 30 συνοψίζει τα κριτήρια και τους παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στις προαναφερθείσες έρευνες με σκοπό τη μελέτη των κρίσιμων θεμάτων που σχετίζονται με την προοπτική ενός πλήρως οπτικού οικιακού ή εργασιακού χώρου. Άλλωστε, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι εναλλακτικές λύσεις θα πρέπει να κατατάσσονται λαμβανομένων υπόψη των κοινωνικών, οικονομικών θεμάτων καθώς και των ζητημάτων απόδοσης. Οι παράγοντες, που παρουσιάζει ο Πίνακας 30, είναι παρόμοιοι με εκείνους που εξετάζονται για τη δημιουργία οδικών χαρτών και για άλλες τεχνολογίες οικιακών δικτύων, όπως αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια 3, 4, και προσδιορίστηκαν έπειτα από διαβούλευση με τους εμπειρογνώμονες που συμμετείχαν στο ICT-OMEGA.

Πίνακας 30: Κριτήρια και Παράγοντες για το οπτικό σπίτι/γραφείο

Κριτήρια-Παράγοντες	Περιγραφή	Σχετική σημαντικότητα $f_{jk}$ (%)
---------------------	-----------	------------------------------------------

$C_1$ : Απόδοση Εντός των Δωματίων (Inter-room Performance)  $w_1= 23.90$  %

$F_{11}$	Εμβέλεια (Reach)	Η μέγιστη απόσταση πομπού / δέκτη που μπορεί να επιτρέψει τη μέγιστη ρυθμαπόδοση κάτω καναλιού	21.6
$F_{12}$	Κάλυψη (Coverage)	Το ποσοστό ενός τυπικού δωματίου (π.χ. FT εκθεσιακός χώρος που μπορεί να καλύπτεται από ένα μόνο σύστημα)	27.1
$F_{13}$	Ρυθμαπόδοση κάτω καναλιού (Downstream Throughput)	Η μέγιστη ρυθμαπόδοση δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί στη διεύθυνση του κάτω καναλιού	31.1
$F_{14}$	Ρυθμαπόδοση άνω καναλιού (Upstream Throughput)	Η μέγιστη ρυθμαπόδοση δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί στη διεύθυνση του άνω καναλιού	20.2
<b>C<sub>2</sub>: Απόδοση Δικτύου Κορμού (Backbone Performance) <math>w_2= 20.38\%</math></b>			
$F_{21}$	Εμβέλεια (Reach)	Το μέγιστο μήκος καλωδίου που μπορεί να επιτρέψει το μέγιστο ρυθμό δεδομένων κάτω καναλιού	36.2
$F_{22}$	Ρυθμαπόδοση κάτω καναλιού (Downstream Throughput)	Η μέγιστη ρυθμαπόδοση δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί στη διεύθυνση του κάτω καναλιού για συνδέσεις δικτύου κορμού	38.7
$F_{23}$	Ρυθμαπόδοση άνω καναλιού (Upstream Throughput)	Η μέγιστη ρυθμαπόδοση δεδομένων που μπορεί να επιτευχθεί στη διεύθυνση του άνω καναλιού για συνδέσεις δικτύου κορμού	25.1
<b>C<sub>3</sub>: Οικονομικά Θέματα (Economic) <math>w_3= 24.48\%</math></b>			
$F_{31}$	Κόστος εγκατάστασης (Cost of Installation)	Το κόστος εργασίας που απαιτείται για την εγκατάσταση του εξοπλισμού σε ένα τυπικό διαμέρισμα (2 υπνοδωμάτια και σαλόνι) συμπεριλαμβανομένου του δικτύου κορμού	27.8
$F_{32}$	Κόστος εξοπλισμού (Cost of Equipment)	Το συνολικό κόστος του εξοπλισμού που απαιτείται για την παροχή συνδέσεων μέσα σε ένα τυπικό διαμέρισμα (2 υπνοδωμάτια και σαλόνι).	39.9
$F_{33}$	Κόστος συντήρησης (Maintenance Cost)	Ετήσιο κόστος που απαιτείται για τη συντήρηση του εγκατεστημένου εξοπλισμού (συμπεριλαμβανομένου του εξοπλισμού για το δίκτυο κορμού και το λογαριασμό του ρεύματος)	32.3
<b>C<sub>4</sub>: Κοινωνική Αποδοχή (Social Acceptance) <math>w_4= 31.24\%</math></b>			



$F_{41}$	Θέματα υγείας (Health Issues)	Είναι σημαντικά τα θέματα υγείας; (έκθεση ακτινοβολίας, προστασία ματιών, προστασία δέρματος κ.α.)	24.3
$F_{42}$	Σχεδιασμός - ολοκλήρωση χωρίς καλώδια (Home Integration with no new wire/Design)	Είναι απαραίτητη η εγκατάσταση νέων καλωδίων στο σπίτι; Πόσο καλά οι συσκευές δικτύου ταιριάζουν με τη συνολική διακόσμηση του σπιτιού;	20.1
$F_{43}$	Ευχρηστία (Usability)	Πόσο δύσκολο είναι ο μέσος χρήστης να στήσει και να διαχειριστεί ένα δίκτυο;	25.9
$F_{44}$	Συμβατότητα με τα υφιστάμενα συστήματα (Compatibility with legacy systems)	Είναι το οπτικό οικιακό δίκτυο συμβατό με τα υφιστάμενα δίκτυα και τις οικιακές συσκευές;	29.7

Παράλληλα, ο Πίνακας 30 παρουσιάζει τα βάρη των κριτηρίων και των παραγόντων που υπολογίζονται στο πλαίσιο της έρευνας  $S_1$ . Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το κριτήριο της κοινωνικής αποδοχής είναι το πιο σημαντικό για να ληφθεί υπόψη, δεδομένου ότι το βάρος του αγγίζει το 31,3 %. Αυτό αποτελεί σαφή ένδειξη ότι θα πρέπει το ευρύ κοινό να γνωρίζει τα πλεονεκτήματα και οφέλη από τη χρήση των οπτικών τεχνολογιών στον προσωπικό οικιακό ή εργασιακό του χώρο. Παρά το γεγονός ότι οι οπτικές ίνες έχουν ευρέως εγκατασταθεί στα δίκτυα πυρήνα καθώς και στα μητροπολιτικά δίκτυα, για πολλούς ανθρώπους φαίνονται σαν κάτι εξωπραγματικό, πιθανώς επειδή η διείσδυσή τους στις εγκαταστάσεις του πελάτη είναι μάλλον περιορισμένη. Σε κτίρια γραφείων, βέβαια, οι άνθρωποι μπορεί να είναι λίγο πιο εξοικειωμένοι με τα οπτικά συστήματα, λόγω των διασυνδέσεων με τις οπτικές Ethernet διεπαφές, που συνήθως προτιμώνται για διασύνδεση υψηλής ταχύτητας μεταξύ των επιπέδων 2 και 3. Αυτό όμως δε συμβαίνει στο περιβάλλον του σπιτιού (με την πιθανή εξαίρεση της IrDA και του ασύρματου χειρισμού της τηλεόρασης φυσικά). Προκειμένου να ενισχυθεί το ενδιαφέρον του κοινού μία λύση θα μπορούσε να είναι η προώθηση των αναμενόμενων πλεονεκτημάτων των οπτικών συστημάτων, δηλαδή το εξαιρετικά υψηλό εύρος ζώνης, η συμφυής ασφάλεια και προστασία, κλπ.

Όσον αφορά το οικονομικό κριτήριο έχει το δεύτερο μεγαλύτερο βάρος, τονίζοντας την ανάγκη για ανεκτό και επιθυμητό κόστος, καθώς προχωράμε όλο και πιο κοντά στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Η μείωση του κόστους των τερματικών σταθμών και των σταθμών βάσης μπορεί ενδεχομένως να έχει μια βαθύτερη επίδραση στις επιχειρηματικές προοπτικές για το οπτικό σπίτι. Οι καταναλωτές έως τώρα έχουν συνηθίσει να πληρώνουν λιγότερο από 100 € για να αγοράσουν έναν δρομολογητή 802.11n με ~100 Mb/s ασύρματη συνδεσιμότητα και θα είναι απρόθυμοι να αντικαταστήσουν τα υπάρχοντα δίκτυά τους χωρίς να αντιλαμβάνονται τα πιθανά οφέλη. Άλλωστε, είναι γεγονός ότι το οικονομικό κριτήριο είναι πολύ σημαντικό σε κάθε διαδικασία λήψης απόφασης για τα τηλεπικοινωνιακά προϊόντα. Η παροχή τεχνολογιών πρόσβασης με ταχύτητες της τάξης των Gigabit δεν εγγυάται απαραίτητα και την άμεση ενεργοποίηση της αγοράς, δεδομένου ότι οι τόσο υψηλές ταχύτητες πρέπει να παρέχονται σε μια σωστή τιμή. Οι LEDs θα μπορούσαν να συμβάλουν σε μεγάλο βαθμό στη μείωση του κόστους του οπτικού πομπού εις βάρος, όμως, του μικρότερου

εύρους ζώνης διαμόρφωσης και της μειωμένης εκπεμπόμενης ισχύος.

Όσον αφορά το κριτήριο της απόδοσης, αυτό λαμβάνει το μικρότερο βάρος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση εντός των δωματίων φαίνεται να είναι πιο σημαντική από την απόδοση του δικτύου κορμού, πιθανώς επειδή στα τοπικά δίκτυα, ένα μεγάλο μέρος της κίνησης μπορεί να προορίζεται για κοντινές συνδέσεις, δηλαδή την αποστολή δεδομένων σε έναν εκτυπωτή, τη σύνδεση μιας κονσόλας παιχνιδιών με την τηλεόραση κλπ. Ωστόσο, ο ρόλος του δικτύου κορμού δε θα πρέπει να αγνοηθεί. Εν όψει του γεγονότος ότι τα οπτικά σήματα που παράγονται σε ένα σταθμό βάσης δεν μπορούν να εγκαταλείψουν τα στενά όρια ενός δωματίου, πρέπει κανείς να καταλήξει σε έναν τρόπο επέκτασης της εμβέλειας του δικτύου σε όλα τα δωμάτια. Εν τέλει, ο Πίνακας 30 δείχνει ότι με την εξαίρεση της κοινωνικής αποδοχής, όλα τα άλλα κριτήρια έχουν συγκρίσιμα βάρη. Αυτό υποδηλώνει ότι τα οπτικά οικιακά δίκτυα θα πρέπει να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να εκπληρώσουν μια σειρά από ποικίλα και ενδεχομένως αντιφατικά κριτήρια.

Είναι επίσης ενδιαφέρον να εξεταστούν τα βάρη των παραγόντων υπό το πρίσμα του εκάστοτε κριτηρίου. Όσον αφορά την απόδοση εντός των δωματίων, οι ειδικοί φαίνεται να ανησυχούν περισσότερο για τη ρυθμαπόδοση του κάτω καναλιού εν'όψει των πολλών δημοφιλών υπηρεσιών, όπου οι απαιτήσεις εύρους ζώνης είναι ασύμμετρες (π.χ. τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, web browsing, video-on-demand, κλπ). Από την άλλη, ο ρόλος της ρυθμαπόδοσης του άνω καναλιού δεν είναι αμελητέος λαμβάνοντας ένα βάρος της τάξης του ~20% της συνολικής σημασίας, αντανάκλαση του γεγονότος ότι πολλές αναδυόμενες εφαρμογές έχουν συμμετρικές απαιτήσεις εύρους ζώνης (Web 2.0, διανομή περιεχομένου, online gaming κλπ). Η κάλυψη φαίνεται να είναι το δεύτερο πιο σημαντικό θέμα απόδοσης και λαμβάνει βάρος ~27%. Αυτό είναι ένα καίριο ζήτημα για τις οπτικές ασύρματες τεχνολογίες, ιδίως για τα συστήματα απευθείας οπτικής επαφής, όπου η κάλυψη και η λαμβανόμενη ισχύς αποτελούν πράγματα αντικρουόμενα. Δηλαδή για να κερδίσει κάποιος σε κάλυψη θα πρέπει να χάσει σε ισχύ και το αντίστροφο. Λόγω των περιορισμών στην εκπεμπόμενη ισχύ (εξαιτίας των ζητημάτων ασφαλείας των ματιών και του κόστους), πρέπει κανείς να αναζητήσει τις προϋποθέσεις υπό τις οποίες θα ενισχυθεί περαιτέρω ο ισολογισμός της ισχύος και θα εξασφαλιστεί επαρκής λήψη σήματος σε όλες τις γωνιές του δωματίου. Η σύμφωνη ανίχνευση (coherent detection) [195] μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ευαισθησίας του δέκτη κατά πολλά dBs και θα πρέπει να διερευνηθεί σε μελλοντικά συστήματα. Οι τεχνικές πολλαπλής εισόδου πολλαπλής εξόδου (MIMO) [196], αν και δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές σε συστήματα απευθείας ανίχνευσης, θα μπορούσαν επίσης να προσφέρουν αυξημένη χωρητικότητα, δεδομένου ότι το σύμφωνο οπτικό κανάλι μοιάζει με τα ραδιο-κανάλια. Η χρήση πολλαπλών πομπών, ο καθένας στοχεύοντας σε διαφορετική θέση μέσα στο δωμάτιο, αποτελεί ένα πρώτο βήμα για τη βελτίωση της κάλυψης σε υπέρυθρα συστήματα. Τα συστήματα VLC από την άλλη πλευρά έχουν εγγενώς εξαιρετικά χαρακτηριστικά που αφορούν την κάλυψη, καθώς μπορεί να υποστηρίξουν την ύπαρξη πολλών λαμπτήρων LED στο ταβάνι ενός δωματίου. Δεδομένου ότι οι υπέρυθρες LEDs έχουν συνήθως ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης από τις αντίστοιχες του ορατού φωτός, θα μπορούσε κανείς να οραματιστεί ένα υβριδικό IR/VLC σύστημα, όπου κάθε chip του λαμπτήρα μπορεί να περιέχει τόσο υπέρυθρες όσο και LEDs ορατού φωτός. Οι ορατές LEDs παρέχουν φωτισμό και επικοινωνία, ενώ οι υπέρυθρες LEDs χρησιμοποιούνται για την περαιτέρω ενίσχυση του εύρους ζώνης του συστήματος.

Όσον αφορά τα βάρη των παραγόντων της απόδοσης για το δίκτυο κορμού, τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με την περίπτωση της απόδοσης εντός των δωματίων, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Σχετικά με την υποδομή για το δίκτυο κορμού, υπάρχει πάντα ένας συμβιβασμός μεταξύ της εμβέλειας και του διαθέσιμου

εύρους ζώνης και αυτό είναι ένας λόγος για τον οποίο σε πολλά εταιρικά ή ακαδημαϊκά περιβάλλοντα, η οπτική ίνα είναι το μέσο επιλογής για τη διασύνδεση των δρομολογητών κάθε ορόφου στον δρομολογητή του δικτύου πυρήνα. Το 10 Gigabit Ethernet απαιτεί τη χρήση των ινών ακόμα και για μικρές αποστάσεις σε αυτά τα σενάρια, αλλά η εγκατάσταση ινών σε κατοικίες είναι πολύ πιο περίπλοκη, διότι πρέπει κανείς να λάβει υπόψη τη σοβαρή ταλαιπωρία και το κόστος που είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τέτοιες προοπτικές.

Σχετικά με το οικονομικό κριτήριο, δίνεται μεγάλη σημασία στο κόστος του εξοπλισμού, τονίζοντας το ρόλο του ως κίνητρο για τους πιθανούς αγοραστές. Επιπλέον, η συντήρηση και το κόστος εγκατάστασης είναι επίσης σημαντικά ζητήματα που λαμβάνουν βάρος 28% και 32%, αντίστοιχα. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη, καθώς η εγκατάσταση και η συντήρηση των οικιακών δικτύων πρέπει ιδανικά να είναι οικονομικά προσιτή. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτά τα οικονομικά ζητήματα διαδραματίζουν έναν κρίσιμο ρόλο στον κόσμο των οπτικών επικοινωνιών, οι οποίες μπορεί ενδεχομένως να απαιτούν την εγκατάσταση πολλαπλών σταθμών βάσης στην οροφή των δωματίων. Από τεchnοοικονομική άποψη, το κόστος εξαρτάται άμεσα από τον όγκο της παραγωγής [188]. Αν η ζήτηση για τα οπτικά συστήματα είναι υψηλή, οι τιμές θα πέσουν τελικά ως συνέπεια της μαζικής παραγωγής.

Όσον αφορά τα βάρη των παραγόντων για το κριτήριο της κοινωνικής αποδοχής, η συμβατότητα με τα υφιστάμενα συστήματα φαίνεται να υπερισχύει έναντι των άλλων θεμάτων, με βάρος 30%. Αυτό είναι μια ένδειξη ότι οι ειδικοί τείνουν να πιστεύουν πως η υιοθέτηση των μελλοντικών οπτικών οικιακών δικτύων απαιτεί τη συμβατότητα με τα προηγούμενα υφιστάμενα συστήματα και άλλες οικιακές συσκευές, που έχουν ήδη εγκατασταθεί στο εσωτερικό περιβάλλον των σπιτιών τους. Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι τα μελλοντικά οπτικά οικιακά δίκτυα δεν πρέπει να παρεμβαίνουν σε οποιοδήποτε υφιστάμενο δίκτυο που έχει ήδη εγκατασταθεί. Στην πραγματικότητα, χρησιμοποιώντας πομποδέκτες που λειτουργούν σε διαφορετικά μήκη κύματος, είναι δυνατό να επιτευχθεί το όραμα πολλαπλών οπτικών ασύρματων τοπικών συνδέσεων δικτύου, που να υποστηρίζονται ταυτόχρονα μέσα στο ίδιο δωμάτιο, χωρίς καμία μείωση εύρους ζώνης λόγω των φαινομένων παρεμβολής. Επιπλέον, οι ειδικοί φαίνεται να δίνουν ιδιαίτερη προτεραιότητα στα θέματα υγείας, γεγονός που αντικατοπτρίζει τη μεγάλη ανησυχία του ευρέος κοινού για το θέμα αυτό. Οι PLC και POF ενσύρματες συνδέσεις δε θα πρέπει να θέσουν σε σημαντικό κίνδυνο την υγεία του ανθρώπινου οργανισμού. Είναι επίσης ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι οι υπέρυθρες οπτικές ασύρματες τεχνολογίες θεωρούνται μάλλον ακίνδυνες, εφόσον είναι σύμφωνες με τα πρότυπα ασφαλείας για τα μάτια. Η αυξανόμενη ανησυχία του κοινού μπορεί να παρέχει, ως εκ τούτου, πλεονέκτημα στις οπτικές ασύρματες λύσεις, ιδίως σε νοσοκομεία, γηροκομεία, κ.τ.λ. Επιπλέον, οι ειδικοί φαίνεται να ενδιαφέρονται πολύ για το θέμα της ευχρηστίας, προκειμένου οι συσκευές στα μελλοντικά οπτικά οικιακά δίκτυα να είναι σε μεγάλο βαθμό plug and play. Αυτό δεν αποτελεί έκπληξη, δεδομένου ότι η ευρεία υιοθέτηση των μελλοντικών οπτικών δικτύων θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα του μέσου χρήστη για την εγκατάσταση και τον έλεγχο της υποδομής του δικτύου στο οικιακό περιβάλλον. Η ολοκλήρωση χωρίς νέα καλώδια σε συνδυασμό με τον σχεδιασμό έχει την χαμηλότερη τιμή σημασίας πιθανώς επειδή εξακολουθούν να υπάρχουν πολλά σημαντικά τεχνολογικά θέματα που πρέπει να επιλυθούν, προκειμένου να παρέχονται αξιόπιστες και οικονομικά αποδοτικές λειτουργίες δικτύου. Υπό το πρίσμα αυτό, καταλαβαίνει κανείς ξεκάθαρα ότι τα μελλοντικά οπτικά δίκτυα θα πρέπει να εισχωρούν στο εσωτερικό περιβάλλον όσο το δυνατόν λιγότερο: σε αντίθεση με το περιβάλλον εργασίας, οι άνθρωποι είναι πολύ λιγότερο διατεθειμένοι να επιτρέψουν την εγκατάσταση νέων καλωδίων στα σπίτια τους. Αυτό εγείρει ένα

σημαντικό μέλημα, δεδομένου ότι αν η οπτική ίνα (πλαστική και πολυτροπη) προσφέρει την απόλυτη λύση, όσον αφορά το εύρος ζώνης και την κάλυψη σε νέα κτίρια, οι ασύρματες και οι PLC λύσεις είναι περισσότερο κατάλληλες σε μεγάλα κτίρια, όπου οι κάτοικοι δεν είναι διατεθειμένοι να διαταράξουν το περιβάλλον τους και να εγκαταστήσουν νέα καλώδια.

#### 5.4 Βαθμολόγηση Εναλλακτικών Σεναρίων

Στην ενότητα αυτή θα εξεταστούν τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας PWC για τις έρευνες  $S_2$ ,  $S_3$ , σχετικά με την αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων υπό το πρίσμα συγκεκριμένων παραγόντων, τόσο για το σενάριο εφαρμογής στο σπίτι όσο και στο γραφείο. Επιπλέον, οι τελικές προτεραιότητες για την κατάταξη των πέντε εναλλακτικών λύσεων, που υπολογίζονται μέσω της (2.18) παρουσιάζονται και αναλύονται περαιτέρω, με βάση τα βάρη των κριτηρίων και των παραγόντων που εκτιμήθηκαν προηγουμένως και τις συγκρίσεις κατά ζεύγη των ερευνών  $S_2$  και  $S_3$ .

Ο Πίνακας 31 παρουσιάζει τις σχετικές προτεραιότητες που υπολογίζονται για κάθε μια αρχιτεκτονική. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τον παράγοντα της υγείας, η αρχιτεκτονική all-POF λαμβάνει ένα μικρό προβάδισμα πιθανώς επειδή δεν υπάρχουν ασύρματες συνδέσεις, οι οποίες πρέπει να είναι σύμφωνες με τα πρότυπα ασφάλειας των ματιών και του δέρματος, ενώ οι απαιτήσεις σε οπτική ισχύ είναι χαμηλότερες, καθώς το σήμα μεταδίδεται μέσα στα όρια της ίνας. Σχετικά με τη χρησιμότητα και τη συμβατότητα, παράγοντες του κριτηρίου κοινωνικής αποδοχής, δεν υπάρχει κάποια ξεκάθαρη προτεραιότητα οποιασδήποτε μεμονωμένης αρχιτεκτονικής. Αυτές οι ομοιότητες δεν προκαλούν έκπληξη, δεδομένου ότι όλες οι αρχιτεκτονικές βασίζονται σε οπτοηλεκτρονικά σε κάποιο βαθμό. Αναφορικά με τον τέταρτο παράγοντα του εν λόγω κριτηρίου, δηλαδή με τον σχεδιάσμό-ολοκλήρωση με το περιβάλλον του σπιτιού, οι λύσεις βασισμένες σε PLC λαμβάνουν μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με τις POF, λόγω του γεγονότος ότι στην πρώτη περίπτωση, δεν απαιτείται να εγκατασταθούν νέα καλώδια. Η περίπτωση του PLC δικτύου κορμού βαθμολογείται υψηλότερα για το σενάριο του οικιακού χώρου σε σχέση με το σενάριο ενός μικρού γραφείου. Η λύση all-POF φαίνεται να βαθμολογείται αρκετά χαμηλά και στα δύο σενάρια εφαρμογής, δεδομένου ότι μπορεί να οδηγήσει σε περιπλοκή καλωδίων σε αντίθεση με τις ασύρματες εναλλακτικές λύσεις καθώς και σε περιορισμό στην κινητικότητα των τερματικών. Το ενδιαφέρον είναι ότι ο υβριδισμός του VLC και IR φαίνεται να περιπλέκει τα πράγματα σε σύγκριση με έναν αυτόνομο IR σταθμό βάσης ιδιαίτερα στο σενάριο του γραφείου. Όσον αφορά τις οικονομικές πτυχές των πέντε αρχιτεκτονικών, δεν υπάρχει μία μόνο λύση που να κατέχει το προβάδισμα σχετικά με το κόστος του εξοπλισμού, παρά το γεγονός ότι οι ειδικοί φαίνεται να πιστεύουν ότι το PLC, μαζί με ένα υβριδικό VLC και IR θα είναι η πιο αποδοτική από άποψη κόστους λύση. Αυτό συμβαίνει, πιθανώς επειδή πολύ απλοί πομποί IR χρειάζεται να τοποθετηθούν στην οροφή, δεδομένου ότι η κάλυψη κάτω καναλιού θα μπορούσε να επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό μέσω VLC λαμπτήρων, που περιέχουν φθηνούς LED πομπούς φωτισμού. Επιπλέον, η λύση all-POF βαθμολογείται υψηλότερα από όλες τις άλλες, όσον αφορά το κόστος εγκατάστασης, ενδεχομένως επειδή η εγκατάσταση του ασύρματου εξοπλισμού σταθμών βάσης ή των λαμπτήρων VLC μπορεί να οδηγήσει σε επιπρόσθετο απαιτούμενο ανθρώπινο δυναμικό. Παράλληλα, το σενάριο all-POF έχει υψηλά ποσοστά, από την άποψη του κόστους συντήρησης, πιθανώς επειδή οι άλλες αρχιτεκτονικές αποτελούνται από πολλαπλούς πομποδέκτες στις οροφές που περιέχουν πρόσθετο εξοπλισμό. Λαμβάνοντας υπόψη τα ζητήματα απόδοσης και πιο συγκεκριμένα τους παράγοντες της κάλυψης και της εμβέλειας, το σενάριο all-POF βαθμολογείται γενικά ελαφρώς καλύτερα από τις ασύρματες αντίστοιχες λύσεις σχετικά

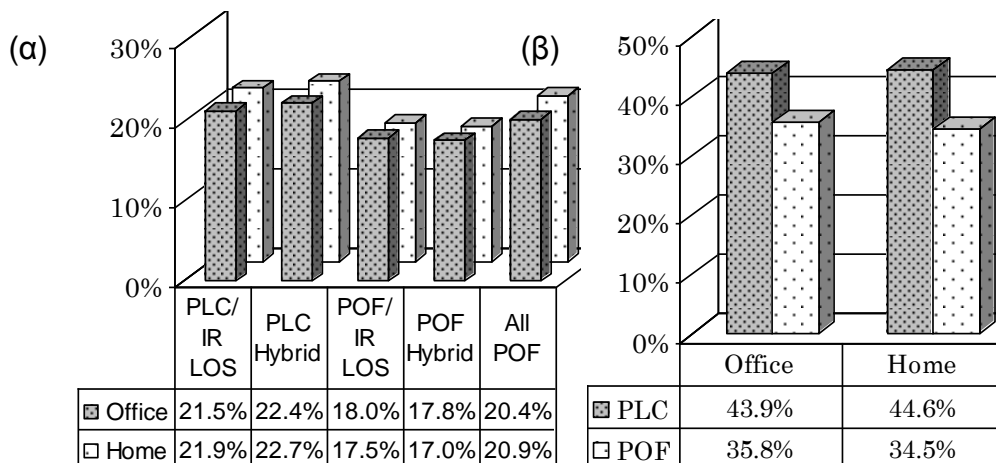
με το δίκτυο κορμού, γεγονός που αποτελεί ένδειξη του πραγματικού οφέλους της εγκατάστασης πλαστικών ινών για την επέκταση του δικτύου. Ωστόσο, μέσα στο δωμάτιο, το σενάριο all-POF βαθμολογείται σχετικά χαμηλά, ενώ τα σενάρια του υβριδικού IR / VLC φαίνεται να είναι ευνοϊκότερα. Τα πράγματα εξακολουθούν να είναι κάπως ασαφή όσον αφορά τη ρυθμαπόδοση δεδομένων των πέντε αρχιτεκτονικών, πιθανώς επειδή η προοπτική του gigabit ανά δευτερόλεπτο είναι εφικτή τόσο για το PLC όσο και για το POF δίκτυο κορμού.

**Πίνακας 31: Σχετικές προτεραιότητες των εναλλακτικών για κάθε παράγοντα**

Παράγοντες	PLC/IR		PLC		POF/IR		POF		All	
	LOS		Hybrid		LOS		Hybrid		POF	
	O <sup>1</sup>	H <sup>2</sup>	O	H	O	H	O	H	O	H
Σχετικές Προτεραιότητες $S_{ijk}$ (%)										
<b>C<sub>1</sub>: Απόδοση εντός των δωματίων (Inter-room Performance)</b>										
Εμβέλεια (Range)	<b>18</b>	25	<b>20</b>	19	<b>16</b>	17	<b>17</b>	17	<b>28</b>	23
Κάλυψη (Coverage)	<b>20</b>	23	<b>30</b>	27	<b>16</b>	16	<b>22</b>	21	<b>13</b>	13
Ρυθμαπόδοση κάτω καναλιού (Downstream Throughput)	<b>22</b>	27	<b>27</b>	24	<b>17</b>	18	<b>14</b>	14	<b>20</b>	16
Ρυθμαπόδοση άνω καναλιού (Upstream Throughput)	<b>24</b>	29	<b>22</b>	23	<b>18</b>	16	<b>16</b>	13	<b>21</b>	20
<b>C<sub>2</sub>: Απόδοση Δικτύου Κορμού (Backbone Performance)</b>										
Εμβέλεια (Range)	<b>18</b>	16	<b>21</b>	26	<b>19</b>	20	<b>19</b>	20	<b>23</b>	19
Ρυθμαπόδοση κάτω καναλιού (Downstream Troughput)	<b>21</b>	23	<b>21</b>	23	<b>17</b>	18	<b>18</b>	17	<b>22</b>	19
Ρυθμαπόδοση άνω καναλιού (Upstream Throughput)	<b>20</b>	20	<b>20</b>	24	<b>18</b>	19	<b>17</b>	18	<b>24</b>	19
<b>C<sub>3</sub>: Οικονομικά Θέματα (Economic)</b>										
Κόστος εγκατάστασης (Cost of Installation)	<b>17</b>	20	<b>20</b>	22	<b>15</b>	15	<b>19</b>	15	<b>28</b>	28
Κόστος εξοπλισμού (Cost of equipment)	<b>21</b>	20	<b>23</b>	29	<b>18</b>	14	<b>18</b>	14	<b>20</b>	23

Κόστος συντήρησης (Maintenance Cost)	19	20	24	18	17	16	18	15	23	31
C <sub>4</sub> : Κοινωνική Αποδοχή (Social Acceptance)										
Θέματα υγείας (Health Issues)	20	18	19	18	21	19	19	20	21	25
Ολοκλήρωση-Σχεδιασμός χωρίς νέα καλώδια (Design Integration with no new wires)	34	28	26	27	18	15	12	18	10	12
Ευχρηστία (Usability)	23	22	20	19	21	22	19	20	17	17
Συμβατότητα με τα υφιστάμενα συστήματα (Compatibility with legacy systems)	24	21	22	19	19	19	18	18	17	23

Στη συνέχεια, η Εικόνα 63 (α) δείχνει την ιεράρχηση των προτεραιοτήτων των πέντε εναλλακτικών λύσεων που υπολογίζονται με βάση τα βάρη των κριτηρίων και των παραγόντων, τα οποία εκτιμήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Το ενδιαφέρον έγκυται στο γεγονός ότι τα σενάρια τόσο στο γραφείο όσο και στο σπίτι είναι παρόμοια, με μικρές μόνο διαφορές στις προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων. Η αρχιτεκτονική με υβριδικά VLC/hotspots IR σε συνδυασμό με ένα PLC δίκτυο κορμού έρχεται πρώτη και ακολουθείται με μικρή διαφορά από την αρχιτεκτονική PLC/IR. Το σενάριο all-POF, όπου δεν χρησιμοποιούνται ασύρματες συνδέσεις, έρχεται τρίτο, απεικονίζοντας τις δυνατότητες των πλαστικών ινών στην ανάπτυξη των οικιακών δικτύων, ιδίως μακροπρόθεσμα. Τα υβριδικά POF και OW σχηματίζουν μία τρίτη κατηγορία εναλλακτικών λύσεων. Η Εικόνα 63 δείχνει ότι η προοπτική ενός οπτικού δικτύου δεν είναι ακόμη απολύτως σαφής και τα πλεονεκτήματα των OW αρχιτεκτονικών (χωρίς πρόσθετα καλώδια για τη σύνδεση των τερματικών σταθμών, κινητικότητα κλπ) έχουν κάπως επισκιαστεί από το επίπεδο της τεχνολογικής ωριμότητας για αυτές τις λύσεις.



**Εικόνα 63: (α) Προτεραιότητες εναλλακτικών λύσεων για τα σενάρια στο σπίτι και στο γραφείο, (β) Αθροιστικές προτεραιότητες για PLC και POF**

Τα αποτελέσματα είναι περισσότερο καθοριστικά για την τεχνολογία του δικτύου κορμού στην περίπτωση των ασύρματων συνδέσεων εντός των δωματίων. Κάποιος μπορεί να

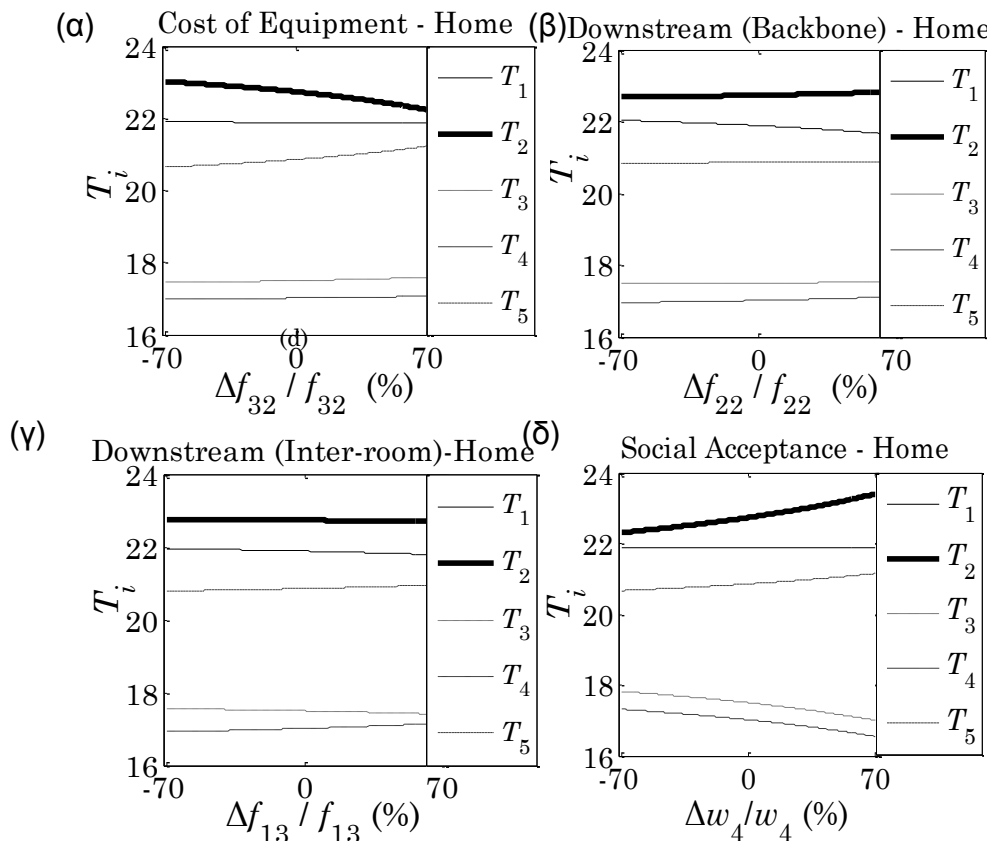
υπολογίσει την προτεραιότητα  $T_{PLC}$  της περίπτωσης του PLC δικτύου κορμού, ως το άθροισμα των προτεραιοτήτων των ασύρματων σεναρίων με PLC κορμό, δηλαδή  $T_{PLC}=T_1+T_2$ . Με έναν παρόμοιο τρόπο, μπορεί κανείς να υπολογίσει την προτεραιότητα  $T_{POF}$  του POF δικτύου κορμού για ασύρματες αρχιτεκτονικές, ως  $T_{POF}=T_3+T_4$ . Οι προτεραιότητες  $T_{PLC}$  και  $T_{POF}$  υπολογίζονται στην Εικόνα 63 (β) και οι PLC επικοινωνίες φαίνεται να αξιολογούνται καλύτερα από τις πλαστικές ίνες για τη διαχείριση της κίνησης στο δίκτυο κορμού. Άλλωστε, το PLC επιτρέπει την γρήγορη ανάπτυξη του δικτύου κορμού, με ρυθμούς δεδομένων που μπορεί να φτάσουν τελικά το 1 Gb/s. Αξίζει να αναφερθεί ότι το IEEE P1901 [197] είναι μια ομάδα εργασίας της IEEE με σκοπό την ανάπτυξη του παγκόσμιου προτύπου για PLC υψηλών ταχυτήτων. Η προδιαγραφή HomePlugAV2 που αποτελούσε την προοπτική της επόμενης γενιάς για τη γραμμή HomePlug έχει πλέον τεθεί σε λειτουργία περίπου στα 600 Mb/s. Η μετάδοση Gb/s πάνω σε PLC έχει επίσης προσεγγιστεί στο πλαίσιο του έργου OMEGA [198].

## 5.5 Ανάλυση Ευαισθησίας

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν προηγουμένως, μέσω της διεξαγωγής της ανάλυσης ευαισθησίας, λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που ενδέχεται να εμπλέκονται στη διαδικασία λήψης απόφασης. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη υποενότητα αναλύεται η επίδραση της αλλαγής της τιμής του βάρους μίας μόνο παραμέτρου (π.χ. το βάρος ενός κριτηρίου). Στην δεύτερη υποενότητα χρησιμοποιούμε Monte Carlo προσομοίωση για την εκτίμηση της επίδρασης των αλλαγών εισάγοντας τυχαίες διαταραχές σε όλες τις παραμέτρους της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Τέλος, στην τρίτη υποενότητα εξετάζεται η αβεβαιότητα στα στοιχεία των πινάκων των ανά ζεύγη συγκρίσεων που συμπληρώνονται από τους ειδικούς.

### 5.5.1 Παραμετροποίηση Ενός Βάρους Κριτηρίου ή Παράγοντα

Οι Εικόνα 64 (α), Εικόνα 64 (β), Εικόνα 64 (γ) και Εικόνα 64 (δ) απεικονίζουν την επίδραση των διαταραχών κατά  $\Delta f_{jk}$  του βάρους  $f_{jk}$  των πιο σημαντικών παραγόντων για το σενάριο εφαρμογής στο σπίτι. Τα διαταραγμένα βάρη επανακανονικοποιούνται, έτσι ώστε το άθροισμά τους είναι ίσο με τη μονάδα και κατά συνέπεια, η αλλαγή ενός βάρους θα επιφέρει αναγκαστικά αλλαγές στα βάρη των άλλων παραγόντων. Η Εικόνα 64 (α) υποδηλώνει ότι η αλλαγή στο βάρος του κόστους εξοπλισμού,  $f_{32}$ , επηρεάζει τις προτεραιότητες της τελικής κατάταξης των πέντε τεχνολογιών, αλλά όχι δραματικά. Η  $T_2$  προτεραιότητα της εναλλακτικής  $A_2$  (PLC και υβριδικά VLC/IR) προσεγγίζει σχεδόν την προτεραιότητα  $T_1$  της  $A_1$  (PLC/IR). Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η κατάταξη μεταξύ των διαφόρων εναλλακτικών λύσεων διατηρείται ακόμη και για σχετικές μεταβολές τόσο υψηλές όσο της τάξης του  $\pm 70\%$ . Η κατάσταση παραμένει λίγο πολύ η ίδια, αν λάβουμε υπόψη τα βάρη του παράγοντα της ρυθμιζόμενης του κάτω καναλιού, τόσο για το κριτήριο της απόδοσης του δικτύου κορμού όσο και για την απόδοση μεταξύ των δωματίων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 64 (β) και (γ) αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κατάταξη διατηρείται και πάλι. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται όταν μεταβληθεί το βάρος  $w_4$  του σημαντικότερου κριτηρίου της κοινωνικής αποδοχής κατά  $\Delta w_4$ , στην εκτίμηση των προτεραιοτήτων των εναλλακτικών λύσεων, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 64 (δ).



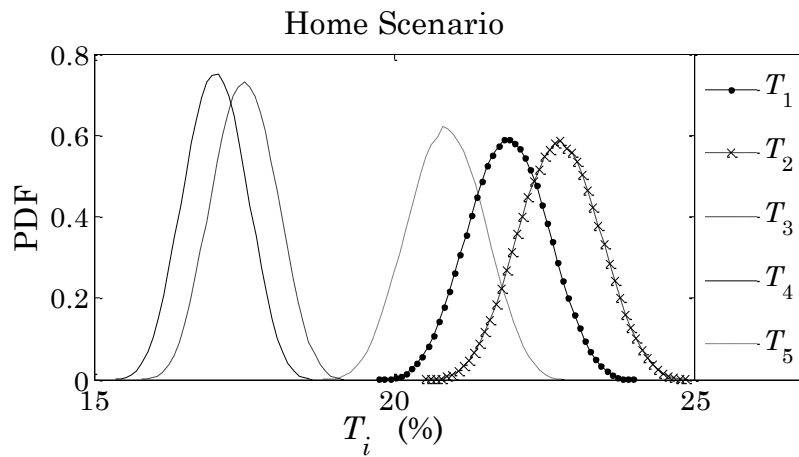
**Εικόνα 64:** Ευαισθησία στους παράγοντες (α) κόστος εξοπλισμού, (β) ρυθμαπόδοση κάτω καναλιού (δίκτυο κορμού), (γ) ρυθμαπόδοση κάτω καναλιού (δίκτυο ετνός δωματίων) και στο κριτήριο (δ) κοινωνική αποδοχή

### 5.5.2 Παράλληλη Παραμετροποίηση Βαρών και Σχετικών Προτεραιοτήτων

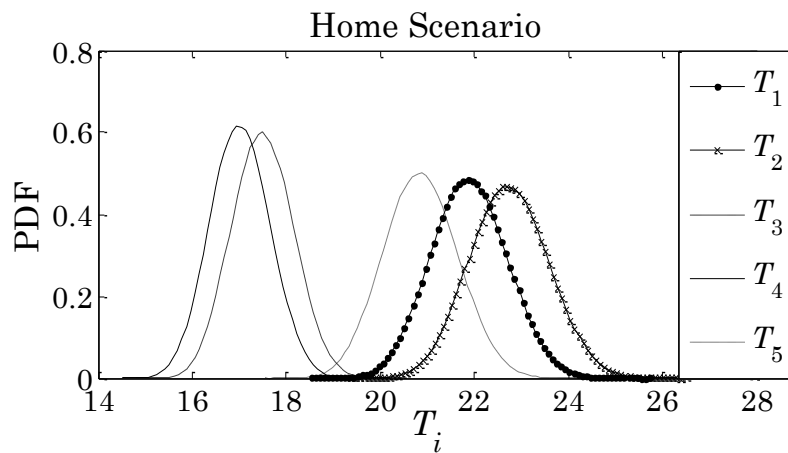
Προκειμένου να αξιολογηθεί περαιτέρω η αξιοπιστία της τελικής κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων, εκτελούνται προσομοιώσεις Monte Carlo με ταυτόχρονη αλλαγή στα βάρη περισσότερων από μίας παραμέτρων. Αναλυτικότερα, τα βάρη όλων των κριτηρίων μεταβάλλονται από  $w_k$  σε  $w_k(1+\Delta W_k)$ , όπου οι διαταραχές  $\Delta W_k$  έχουν μηδενική μέση τιμή και είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές, ταυτόσημα και ομοιόμορφα κατανομημένες μέσα στο διάστημα  $[-s, s]$ . Τέτοιου είδους τυχαία διαταραχή μπορεί να οφείλεται σε τυχόν ασυνέπειες στους πίνακες των κατά ζεύγη συγκρίσεων που συμπληρώνουν οι ειδικοί [118]. Στην Εικόνα 65, παρουσιάζεται η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF - Probability Density Function) των τελικών προτεραιοτήτων για το σενάριο στο σπίτι, υποθέτοντας ότι  $s=0.2$  (που αντιστοιχεί σε μία μέγιστη σχετική διακύμανση της τάξης του  $\pm 10\%$ ). Τα βάρη επανακανονικοποιούνται έτσι ώστε το άθροισμά τους είναι ίσο με 1. Οι προτεραιότητες των εναλλακτικών αρχιτεκτονικών υπολογίστηκαν με τη χρήση  $10^5$  Monte Carlo επαναλήψεων. Η Εικόνα 65 δείχνει ότι οι προτεραιότητες των τεχνολογιών έχουν παρόμοιο PDF σχήμα και οι προτεραιότητες για τις  $A_1$  και  $A_2$  (PLC/IR και PLC/υβριδικό) είναι πιο επιρρεπείς στην αβεβαιότητα που προκαλείται από τις διαταραχές (εφόσον οι PDFs τους είναι ευρύτερες από τις υπόλοιπες). Η εικόνα δείχνει επίσης ότι οι PDFs των προτεραιοτήτων των εναλλακτικών λύσεων επικεντρώνονται γύρω από την τιμή που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία AHP, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 63 (α), και εμφανίζουν Gaussian συμπεριφορά. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν όταν τα



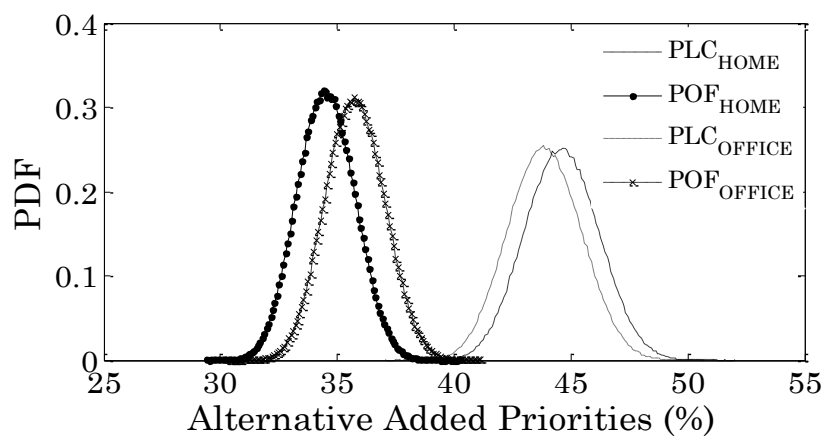
βάρη  $f_{jk}$  όλων των παραγόντων διαταράσσονται ακολουθώντας ομοιόμορφη κατανομή.



Εικόνα 65: PDFs των προτεραιοτήτων έπειτα από μεταβολές στα βάρη των κριτηρίων



Εικόνα 66: PDFs των προτεραιοτήτων έπειτα από μεταβολές στα βάρη των κριτηρίων και παραγόντων καθώς και στις σχετικές προτεραιότητες των τεχνολογιών

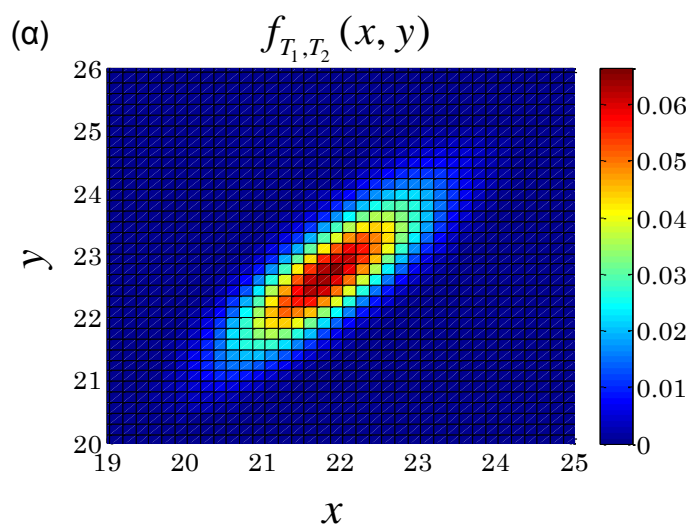


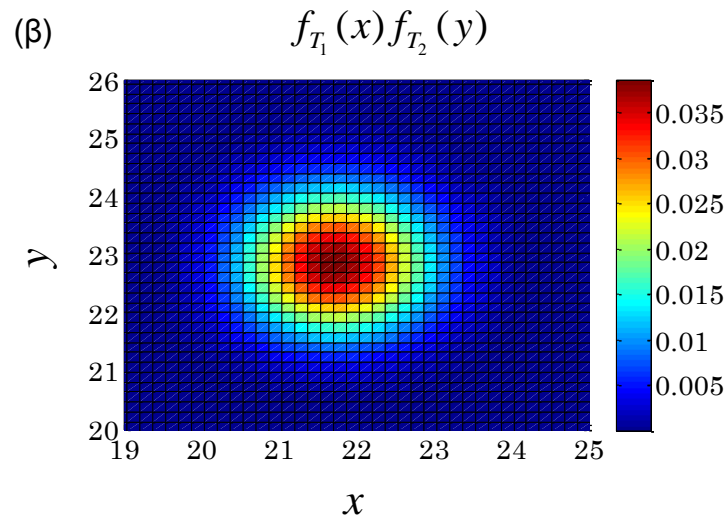
Εικόνα 67: PDFs των  $T_{PLC}$  και  $T_{POF}$  έπειτα από μεταβολές στα βάρη των κριτηρίων και παραγόντων καθώς και στις σχετικές προτεραιότητες των τεχνολογιών

Παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον ο υπολογισμός των συναρτήσεων πυκνότητας

πιθανότητας των προτεραιοτήτων, όταν κάποιος διαταράσσει όλες τις παραμέτρους (π.χ.  $w_k$ ,  $f_{jk}$  και  $S_{ijk}$ ). Η Εικόνα 66 απεικονίζει τις PDFs των προτεραιοτήτων των εναλλακτικών λύσεων, ενώ στην Εικόνα 67 παρουσιάζονται οι PDFs των προτεραιοτήτων  $T_{PLC}$  και  $T_{POF}$  του PLC και POF δικτύου κορμού, αντίστοιχα. Αυτές οι PDFs είναι και πάλι Gaussian κατανομές.

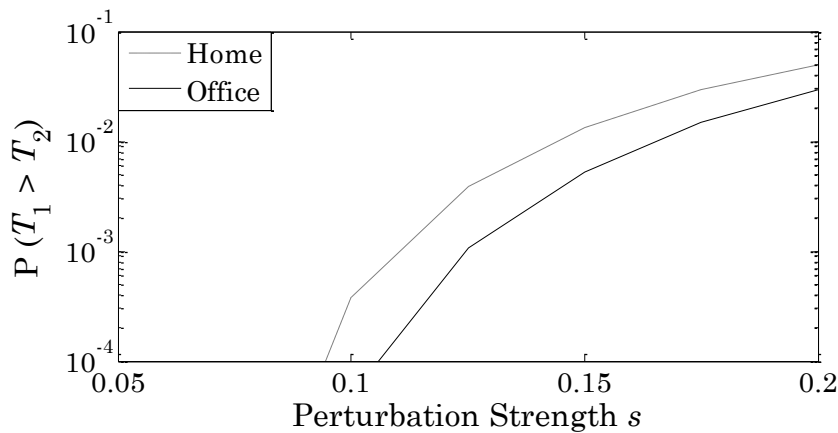
Στη συνέχεια, η Εικόνα 68 δείχνει ότι οι PDFs των διαφόρων προτεραιοτήτων επικαλύπτονται για  $s=0,2$ . Αυτό σημαίνει ότι η κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων μπορεί να αλλάξει (μια κατάσταση που αναφέρεται ως αντιστροφή κατάταξης ή αλλιώς rank reversal). Πρέπει ωστόσο να έχουμε κατά νου ότι η πιθανότητα αναστροφής της κατάταξης δύο προτεραιοτήτων, δηλαδή  $T_1$  και  $T_2$  δεν μπορεί να εκτιμηθεί από τις επιμέρους PDFs  $f_{T_1}(x)$  και  $f_{T_2}(y)$  μεμονωμένα, δεδομένου ότι οι  $T_1$  και  $T_2$  μπορούν να συσχετιστούν. Για να προσδιοριστεί ο βαθμός συσχέτισης, συγκρίνουμε τη συνδυαστική PDF  $f_{T_1, T_2}(x, y)$  των  $T_1$  και  $T_2$  με το γινόμενο των μεμονωμένων PDFs  $f_{T_1}(x)f_{T_2}(y)$ , όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 68 (α) και (β), αντίστοιχως. Η προσομοίωση Monte Carlo χρησιμοποιείται και πάλι για τον υπολογισμό των PDFs, υποθέτοντας ομοιόμορφες διαταραχές όλων των παραμέτρων με  $s=0,2$ . Η Εικόνα 68 υποδεικνύει ότι οι  $T_1$  και  $T_2$  είναι πράγματι συσχετισμένες μεταβλητές επειδή η  $f_{T_1, T_2}(x, y)$  είναι αρκετά διαφορετική από την  $f_{T_1}(x)f_{T_2}(y)$ . Πράγματι, σύμφωνα με την Εικόνα 68 (α) οι προτεραιότητες  $T_1$  και  $T_2$  κινούνται στην ίδια κατεύθυνση, δηλαδή όταν αυξάνεται η  $T_1$ , τότε είναι πιο πιθανό η  $T_2$  να αυξηθεί και το αντίστροφο. Λόγω αυτής της συσχετισμένης μετατόπισης αναμένεται η πιθανότητα αναστροφής της κατάταξης να είναι μικρότερη από εκείνη που συνεπάγεται η επικάλυψη των PDFs στην Εικόνα 66. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέχρι τώρα επικεντρώθηκε στο σενάριο εφαρμογής στο σπίτι, αλλά παρόμοια συμπεράσματα μπορεί να εξαχθούν και στην περίπτωση του αντίστοιχου σεναρίου σε ένα μικρό γραφείο.





**Εικόνα 68: (α) Συνδυαστικές PDFs των  $T_1$  και  $T_2$  (β) Το γινόμενο των μεμονομένων PDFs των  $T_1$  και  $T_2$**

Η Εικόνα 69 δείχνει την πιθανότητα αντιστροφής της κατάταξης  $P(T_1 > T_2)$  για τις προτεραιότητες  $T_1$  και  $T_2$  για διάφορες τιμές του  $s$ , όπως υπολογίζεται με την προσομοίωση Monte Carlo. Όπως φαίνεται, η  $P(T_1 > T_2)$  παραμένει αρκετά χαμηλή (λιγότερο από 5%) για  $s \leq 0,2$  (αντιστοιχεί σε διακυμάνσεις το μέγιστο 10% για όλες τις διαταραχές) τόσο στο γραφείο όσο και στο σενάριο εφαρμογής στο σπίτι. Παράλληλα, υπολογίστηκε η πιθανότητα αντιστροφής της κατάταξης στις προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων για το δίκτυο κορμού  $P(T_{POF} > T_{PLC})$ , η οποία τείνει να είναι αμελητέα (κάτω από  $10^{-3}$ ) για  $s \leq 0,2$ . Τα αποτελέσματα παρέχουν μια ένδειξη της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της AHP έναντι της αβεβαιότητας που ενδέχεται να εμπειριέχεται στις ανά ζεύγη συγκρίσεις που πραγματοποιούνται από τους εμπειρογνώμονες.



**Εικόνα 69: Πιθανότητα αναστροφής κατάταξης  $P(T_1 > T_2)$  ως συνάρτηση της έντασης των διαταραχών  $s$**

### 5.5.3 Αβεβαιότητα στις ανά Ζεύγη Συγκρίσεις

Σε μια προσπάθεια να εξακριβωθεί περαιτέρω η επίδραση των αβεβαιοτήτων,

πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις Monte Carlo μεταβάλλοντας τυχαία τα στοιχεία των πινάκων ανά ζεύγη συγκρίσεων, που χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση των βαρών των κριτηρίων και παραγόντων καθώς και των σχετικών προτεραιοτήτων των εναλλακτικών λύσεων. Υποθέτοντας ότι οι πίνακες  $\mathbf{A}^{(m)}$  των κριτηρίων συμπληρώνονται από τους εμπειρογνώμονες, υπολογίζονται τα διαστήματα  $Q_{ij}=[A_{ij}^{(min)} \ A_{ij}^{(max)}]$ , υπολογίζοντας τα  $A_{ij}^{(max)}=\max\{A_{ij}^{(m)}|1\leq m\leq M\}$  και  $A_{ij}^{(min)}=\min\{A_{ij}^{(m)}|1\leq m\leq M\}$ , όπου  $M=11$  είναι ο αριθμός των εμπειρογνώμονων που συμμετείχαν στις έρευνες. Σε κάθε επανάληψη Monte Carlo, δημιουργήθηκαν  $M$  τυχαίοι πίνακες  $\Delta\mathbf{A}^{(m)}=[\Delta A_{ij}^{(m)}]$ , επιλέγοντας τυχαία  $\Delta A_{ij}^{(m)}$  από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $Q_{ij}$ . Επίσης, δημιουργήθηκαν τυχαίοι πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη για τους πίνακες που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των  $f_{jk}$  και  $S_{ijk}$  και υπολογίστηκαν οι προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων.

Διεξάγοντας ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων ( $10^4$ ) υπολογίστηκε η πιθανότητα αντιστροφής της κατάταξης μεταξύ των δύο ισχυρότερων εναλλακτικών  $P(T_1>T_2)$ , η οποία φαίνεται να είναι ίση με 4% και 6% για το σπίτι και το γραφείο, αντίστοιχα. Τα εν λόγω αποτελέσματα, αποτελούν ακόμη μια ένδειξη του γεγονότος ότι οι εκτιμήσεις των προτεραιοτήτων δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις αποφάσεις των εμπειρογνώμονων.

## 5.6 Συμπεράσματα

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής εστίασε στην αξιολόγηση των εν δυνάμει οπτικών ασύρματων τεχνολογιών για την ανάπτυξη του δικτύου στο σπίτι και στο γραφείο. Μια σειρά από σημαντικά ευρήματα προέκυψαν, βασισμένα στη μέθοδο Αναλυτικής Ιεράρχησης, τα οποία πρέπει να αποτελούν μέρος οποιοδήποτε προσεκτικά σχεδιασμένου οδικού χάρτη για τις οπτικές τεχνολογίες της οικιακής δικτύωσης. Το πρώτο εύρημα αφορούσε την κατάρτιση και την ιεράρχηση των διαφόρων παραγόντων και κριτηρίων που καθορίζουν την ανάπτυξη των συστημάτων αυτών. Κατέστη σαφές ότι υπάρχουν πολλοί κοινωνικοί και οικονομικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, δεδομένου ότι τα συστήματα οικιακής δικτύωσης θα τοποθετηθούν στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Οι κοινωνικές πτυχές έδειξαν να είναι υψίστης σημασίας και τα θέματα υγείας μπορεί να προσφέρουν ένα σοβαρό κίνητρο για την εγκατάσταση IR και VLC σταθμών βάσης, που είναι εγγενώς ασφαλή. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις έρευνες αυτές δικαιολογούνται, λαμβάνοντας υπόψη τη φύση των οπτικών ασύρματων συστημάτων. Στη συνέχεια, εντόπιστηκαν και ταξινομήθηκαν πέντε εναλλακτικά σενάρια αρχιτεκτονικής, που αποτελούνται από ένα συνδυασμό IR, VLC, POF και PLC συστημάτων. Αυτές οι εναλλακτικές λύσεις αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία της AHP. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ένας συνδυασμός των VLC και IR σταθμών βάσης, μαζί με PLC δίκτυο κορμού παρέχει την πιο ευνοϊκή επιλογή, αλλά ακολουθείται στενά από την εναλλακτική λύση των IR σταθμών βάσης που συνδέονται με PLC δίκτυο κορμού. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα έδειξαν σαφώς τα πλεονεκτήματα του PLC δικτύου κορμού από την άποψη της ευκολίας της εγκατάστασης σε μεγάλα κτίρια. Παράλληλα, τα αποτελέσματα ταξινόμησης επεξεργάστηκαν περαιτέρω με τη χρήση ανάλυσης ευαισθησίας και προσομοίωσης Monte Carlo. Διαπιστώθηκε ότι υπό συνθήκες αβεβαιότητας οι προτεραιότητες των εναλλακτικών είναι μεταξύ τους συσχετισμένες και η συσχέτιση αυτή μειώνει την πιθανότητα αντιστροφής της τελικής κατάταξης. Τέλος, η υβριδική λύση VLC/IR με PLC δίκτυο κορμού διατηρεί το προβάδισμα έναντι της IR/PLC εναλλακτικής, ακόμη και αν όλες οι παράμετροι μεταβάλλονται τυχαία σε ποσοστό  $\pm 10\%$ .

Η ερευνητική προσπάθεια που πραγματοποιήθηκε στο παρόν κεφάλαιο παρέχει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τον εντοπισμό των παραγόντων που θα μπορούσαν να επιταχύνουν ή να εμποδίσουν την ανάπτυξη των τεχνολογιών οπτικών επικοινωνιών στο οικιακό δίκτυο. Το εν λόγω πλαίσιο αναμένεται να αποτελέσει το πρώτο βήμα για τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των σημαντικών ερευνητικών εργασιών που διεξάγονται σε αυτόν τον τομέα, καθώς και των κοινωνικο-οικονομικών απαιτήσεων, γεγονός που θα εγγυηθεί την επιχειρηματική προοπτική για την ευρεία εγκατάσταση αυτών των συστημάτων.

## 6 ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΥΓΚΡΙΣΕΩΝ ΑΝΑ ΖΕΥΓΗ

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής εστιάζει στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων της αβεβαιότητας, που εισάγεται όταν οι εμπειρογνώμονες συμπληρώνουν τους πίνακες των συγκρίσεων ανά ζεύγη (2.3.1.2), στο πλαίσιο των διαδικασιών πολυκριτηριακής λήψης απόφασης. Σε πρώτη φάση αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο η αβεβαιότητα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και να μοντελοποιηθεί και στη συνέχεια μελετάται το πώς η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης κλιμακώνεται με βάση τον αριθμό των εμπειρογνομώνων, που συμμετέχουν στη διαδικασία λήψης απόφασης. Προς αυτήν την κατεύθυνση, λαμβάνεται υπόψη ο αντίκτυπος των διαφόρων πτυχών που μπορούν να επηρεάσουν την εκτίμηση της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης, στο πλαίσιο των κατά ζεύγη συγκρίσεων, όπως το επίπεδο αβεβαιότητας, οι εναλλακτικές κλίμακες προτίμησης και οι διαφορετικές μέθοδοι εκτίμησης των βαρών. Συμπεριλαμβάνεται, επίσης, και η περίπτωση κατά την οποία οι συγκρίσεις πραγματοποιούνται με ασαφή τρόπο. Αποδεικνύεται ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, αυξάνοντας το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνομώνων πέραν των 15 μελών, εμφανίζεται μια μικρή, σχεδόν αμελητέα μεταβολή στην πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης. Παράλληλα, το εν λόγω κεφάλαιο εστιάζει στην αντιμετώπιση ενός σημαντικού ζητήματος που σχετίζεται με το πώς αυτή η πιθανότητα μπορεί να υπολογιστεί στην πράξη, με βάση τις πληροφορίες που συγκεντρώνονται από τους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη μίας ομάδας εμπειρογνομώνων. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προτείνεται ένα μοντέλο για την εκτίμηση της πιθανότητας αντιστροφής της κατάταξης και εξετάζεται η δυνατότητα εφαρμογής του κάτω από διάφορες συνθήκες. Το μεθοδολογικό πλαίσιο που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο, μπορεί να επιτρέψει στους ιθύνοντες να επιλέξουν σωστά τον αριθμό των εμπειρογνομώνων που θα συμμετέχουν στη διαδικασία συγκρίσεων κατά ζεύγη καθώς και να αποκτήσουν ένα τρόπο υπολογισμού της αξιοπιστίας του αποτελέσματος.

### 6.1 Αποτύπωση του Προβλήματος

Ένα βασικό πρόβλημα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων είναι να εκτιμηθούν οι προτεραιότητες σε ένα σύνολο εναλλακτικών λύσεων, ορίζοντας ένα βάρος σε κάθε μία από αυτές. Αυτό συνήθως εξαρτάται από διάφορα κριτήρια που δύναται να αξιολογηθούν στο πλαίσιο της διαδικασίας λήψης απόφασης, της οποίας κυρίαρχο συστατικό αποτελούν οι συγκρίσεις ανά ζεύγη (PWC) [99]. Στο πλαίσιο της MADM, η PWC επιτρέπει την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων, δίνοντας τη δυνατότητα στους ειδικούς να συγκρίνουν τα διάφορα κριτήρια ή τις εναλλακτικές λύσεις σε ζεύγη και όχι να αναθέτουν τις προτεραιότητές τους απευθείας σε ένα μόνο στάδιο [108]. Το γεγονός αυτό μειώνει την υποκειμενικότητα στις απόψεις, η οποία συνδέεται με την άμεση ανάθεση βαρών. Η PWC χρησιμοποιείται συνήθως στις μεθόδους MADM, όπως η AHP [199], η WPM [200], η PROMETHEE [201], η ANP [202] και άλλες, σύμφωνα με όσα περιγράφονται στο κεφάλαιο 2. Ένας από τους στόχους της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι να εξετάσει την επίδραση της αβεβαιότητας στην μέθοδο PWC καθώς και το πώς μπορεί να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της. Παρά το γεγονός ότι το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στην PWC και μόνο, τα αποτελέσματα ωστόσο έχουν κάποιες επιπτώσεις στις εφαρμογές του ευρύτερου πλαισίου MADM, ιδιαίτερα όσον αφορά στον αριθμό των εμπειρογνομώνων που απαιτούνται καθώς και στο πώς μπορεί να εξακριβωθεί η αξιοπιστία των αναπόσπαστων μερών της

μεθοδολογίας αυτού του πλαισίου.

Τα τελευταία χρόνια, η PWC έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως είτε ως αυτόνομη μέθοδος είτε ως μέρος των σύνθετων πλαισίων MADM σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της κυβέρνησης [102], των επιχειρήσεων [100], της βιομηχανίας [101], της υγειονομικής περίθαλψης [103], της τεχνολογίας [104], της εκπαίδευσης [203], των επικοινωνιών [204], της γεωργίας [205] και του ενεργειακού σχεδιασμού [206]. Η ίδια μέθοδος έχει επίσης αποτελέσει πολλές φορές το επίκεντρο της εκτεταμένης έρευνας που πραγματοποιείται στον τομέα των διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Πρόσφατες αλλά και παλαιότερες έρευνες έχουν ασχοληθεί με την αποτύπωση της αβέβαιης προτίμησης, με εναλλακτικές προσεγγίσεις εκτίμησης των βαρών, με την ασυνέπεια των πινάκων, με τις ασαφείς σχέσεις προτίμησης καθώς και άλλα θέματα που χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας [190], [207]- [214].

Η επίδραση της αβεβαιότητας λόγω των ατελών καθώς και των υποκειμενικών κρίσεων των εμπειρογνομόνων είναι υψίστης σημασίας, κατά την εξέταση της αξιοπιστίας του αποτελέσματος μιας διαδικασίας λήψης απόφασης. Αρκετές μελέτες έχουν προσπαθήσει να διαλευκάνουν αυτό το θέμα, στο πλαίσιο της PWC. Διάφορες έρευνες επικεντρώνονται στην διερεύνηση των διαφόρων ειδών αβεβαιότητας [215], στη μείωση της αβεβαιότητας στην τελική ταξινόμηση [216], [217], στη μελέτη των ελλιπών δεδομένων στον πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη [218] καθώς και στην ευρύτερη μελέτη ενός συστήματος υπό συνθήκες αβεβαιότητας [219]-[222]. Για παράδειγμα, στο [223], πραγματοποιήθηκαν Monte Carlo προσομοιώσεις για να μελετηθεί ο αλγόριθμος ελλιπών συγκρίσεων ανά ζεύγη (IPC - Incomplete Pairwise Comparisons) και να ερευνηθεί η επίδραση της έλλειψης πληροφοριών στις συγκρίσεις ανά ζεύγη. Επιπλέον, στο [224] έχει δειχθεί ότι δεδομένου ενός αρκετά μεγάλου μεγέθους της ομάδας των ειδικών, η συνέπεια του αθροιστικού πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη του συνολικού πίνακα σύγκρισης εξασφαλίζεται, ανεξάρτητα από τα μέτρα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της συνέπειας των επιμέρους πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη, εάν χρησιμοποιείται η μέθοδος γεωμετρικού μέσου για την εκτίμηση των βαρών. Επιπλέον, στο [225] παρέχεται μια στοχαστική προσέγγιση των κρίσεων στις ανά ζεύγη σύγκρισεις, ενώ παρουσιάζονται και στατιστικά μοντέλα για την εξαγωγή των βαρών των εναλλακτικών λύσεων, τα οποία χρησιμοποιούν Monte Carlo αλυσίδες Markov. Επιπλέον, στο [222] μελετήθηκαν θεωρητικά οι προϋποθέσεις για την αναστροφή κατάταξης στην περίπτωση διαταραχών στους πίνακες, ενώ στο [226] αναλύθηκε επίσης το πρόβλημα αντιστροφής της κατάταξης και αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος για την ανάλυση της ευαισθησίας των ιεραρχικών μοντέλων απόφασης. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε ένα μεθοδολογικό μοντέλο αξιολόγησης των επιπτώσεων της αβεβαιότητας στην μεθοδολογία PWC. Ένα πρώτο βήμα για το χαρακτηρισμό της επίδρασης της αβεβαιότητας στις συγκρίσεις ανά ζεύγη, είναι να εντοπιστεί ένα κατάλληλο μέτρο για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Ας υποθέσουμε, για παράδειγμα, ότι  $N$  διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις συγκρίνονται κατά ζεύγη από ένα πλήθος  $M$  εμπειρογνομόνων, ο καθένας εκ των οποίων να έχει ενδεχομένως μια διαφορετική άποψη σχετικά με την κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο 2.3.1.2, η PWC στοχεύει στην παροχή μιας μέσης κατάταξης, που θα περιλαμβάνει όλες αυτές τις διαφορετικές απόψεις των εμπειρογνομόνων. Είναι βέβαια φυσικό να αναμένει κανείς ότι η αξιοπιστία της όλης διαδικασίας θα πρέπει να αυξηθεί εάν αυξηθεί και το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνομόνων. Ως εκ τούτου, ένας πιθανός τρόπος μέτρησης της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων είναι να καθοριστεί η πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης ( $P_{RR}$ ) [118] ως εξής: Έστω  $W_1, \dots, W_N$  είναι τα βάρη που υπολογίζονται από την PWC, στην περίπτωση μιας πολύ μεγάλης ομάδας εμπειρογνομόνων ( $M \rightarrow \infty$ ). Στην πράξη όμως, όπου το

πλήθος  $M$  είναι πεπερασμένο, η αβεβαιότητα μπορεί να υπονομεύσει την PWC και τα βάρη  $w_k$ , που υπολογίζονται από την PWC, ενδεχομένως να είναι διαφορετικά από τα  $W_k$ . Η αβεβαιότητα μπορεί να οφείλεται στη διαφορά απόψεων μεταξύ των εμπειρογνομόνων ή σε ασυνεπείς συγκρίσεις ανά ζεύγη. Η πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης επισήμως ορίζεται ως εξής:

$$P_{RR} = P\{\text{η κατάταξη των } w_i, 1 \leq i \leq N, \text{ είναι διαφορετική από των } W_i\} \quad (6.1)$$

Ένα υψηλό  $P_{RR}$  σημαίνει ότι το αποτέλεσμα της PWC στις συγκρίσεις, δεν είναι αξιόπιστο και επομένως θα μπορούσε να οδηγήσει σε λανθασμένη λήψη αποφάσεων. Υπάρχουν δύο σημαντικά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν όσον αφορά το  $P_{RR}$ :

- Πώς το  $P_{RR}$  σχετίζεται με τον αριθμό των εμπειρογνομόνων  $M$ ; Ένας προφανής τρόπος για να μειωθεί η επίδραση της αβεβαιότητας είναι απλά να αυξηθεί το  $M$ , αλλά από πρακτική άποψη, αυτό δεν είναι τόσο εύκολο. Είναι συνήθως δύσκολο να εντοπιστούν πολλοί εμπειρογνώμονες, στο πλαίσιο ενός μόνο οργανισμού ή ακόμα και στο ευρύτερο κοινό, με επαρκή εμπειρία, που θα ήταν πρόθυμοι να συμμετάσχουν στις έρευνες που προϋποθέτει η PWC. Από την άλλη πλευρά, δεν υπάρχει σαφής απάντηση στο ερώτημα πόσοι περισσότεροι εμπειρογνώμονες πρέπει να συμμετέχουν, ώστε να μειωθεί σημαντικά η αβεβαιότητα του αποτελέσματος. Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα, ότι υπάρχουν ήδη  $M=10$  εμπειρογνώμονες που συμμετέχουν στην προσπάθεια αυτή. Πόσο θα μειωθεί η  $P_{RR}$  διπλασιάζοντας ή και τετραπλασιάζοντας το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνομόνων; Κάνοντας μια επισκόπηση στην προϋπάρχουσα βιβλιογραφία, δεν υπάρχει σαφής απάντηση για το πόσοι ειδικοί χρειάζονται, προκειμένου να μειωθεί σημαντικά η αβεβαιότητα που υπονομεύει τα συστήματα λήψης αποφάσεων. Στα περισσότερα συστήματα πολυκριτηριακής λήψης απόφασης, το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνομόνων τυπικά κυμαίνεται από 5 έως 15 ειδικούς (όπως συμβαίνει για παράδειγμα στα [104], [234], [235], [236], [237]).
- Πώς μπορεί το  $P_{RR}$  να εκτιμηθεί από τις πραγματικές κρίσεις των εμπειρογνομόνων στην πράξη; Κατά την εφαρμογή της PWC σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα λήψης αποφάσεων, έχουμε πρόσβαση στα στοιχεία ενός περιορισμένου αριθμού πινάκων συγκρίσεων κατά ζεύγη  $\mathbf{P}^{(m)}$  (όπου  $1 \leq m \leq M$ ). Έτσι, το ερώτημα που προκύπτει είναι αν κάποιος μπορεί να εξάγει οποιαδήποτε πληροφορία σχετικά με το  $P_{RR}$  και ως εκ τούτου για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων με βάση μόνο τα στοιχεία των πινάκων  $\mathbf{P}^{(m)}$ .

Το παρόν κεφάλαιο επιχειρεί να ασχοληθεί και με τα δύο παραπάνω κρίσιμα σημεία. Σε πρώτη φάση αναλύεται ένα μοντέλο για την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στην PWC και εξετάζεται ένα κατάλληλο μέτρο για την ποσοτικοποίηση του βαθμού αβεβαιότητας. Στη συνέχεια, εξετάζεται το πώς η  $P_{RR}$  ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος της ομάδας  $M$  και το επίπεδο της αβεβαιότητας και εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα προς αυτήν την κατεύθυνση. Παράλληλα, αποδεικνύεται ότι δεν υπάρχει μεγάλη πρακτική αξία στη χρήση περισσότερων από  $M=15$  εμπειρογνομόνων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, διότι ο ρυθμός της μείωσης του  $P_{RR}$  είναι αρκετά μικρό για  $M>15$ . Στη συνέχεια αντιμετωπίζεται το ζήτημα σχετικά με το πώς το  $P_{RR}$  μπορεί να εκτιμηθεί μόνο από τις τιμές ενός πεπερασμένου αριθμού πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη  $\mathbf{P}^{(m)}$ , που συμπληρώνονται από τους  $M$  εμπειρογνώμονες. Έχοντας αυτή την πληροφορία, θα παρουσιάσουμε μια αριθμητική μέθοδο για την εκτίμηση του  $P_{RR}$  χρησιμοποιώντας προσομοίωση Monte Carlo. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για μια σχετικά αρκετά μεγάλη ομάδα εμπειρογνομόνων, μπορεί κανείς να αποκτήσει μια λογική προσέγγιση για την πραγματική τιμή του  $P_{RR}$  [238].



Το υπόλοιπο του συγκεκριμένου κεφαλαίου οργανώνεται ως εξής: Στο 6.2 θα τεθούν τα θεωρητικά θεμέλια για την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στην PWC και θα παρουσιαστεί το μοντέλο που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις μας. Στο 6.3, εξετάζεται η σύγκλιση του  $P_{RR}$ , λαμβάνοντας υπόψη τον αντίκτυπο των διαφόρων πτυχών που μπορούν να επηρεάσουν την εκτίμηση της πιθανότητας αναστροφής κατατάξης, όπως το διαφορετικό επίπεδο αβεβαιότητας μεταξύ των εμπειρογνομόνων, οι εναλλακτικές κλίμακες προτιμήσεις και οι μέθοδοι εκτίμησης των βαρών. Θεωρούμε, επίσης, την περίπτωση όπου οι εκτιμήσεις καθορίζονται με τρόπο ασαφή. Στο 6.5 προτείνεται μια αριθμητική μέθοδος, προκειμένου να εκτιμηθεί η  $P_{RR}$  από τις πραγματικές αποφάσεις-κρίσεις των χρηστών. Τέλος, κάποιες τελικές παρατηρήσεις παρουσιάζονται στην υποενότητα 6.6.

## 6.2 Μοντελοποίηση Αβεβαιότητας στην PWC

### 6.2.1 Πρώτη Προσέγγιση Ανάλυσης Διαταραχών

Από θεωρητική άποψη, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η αβεβαιότητα λειτουργεί ως ένα είδος θορύβου που υπονομεύει τις συγκρίσεις κατά ζεύγη. Μπορούμε να θεωρήσουμε τον πίνακα  $\mathbf{P}^{(m)}$  ως τη διαταραγμένη έκδοση ενός αρχικού  $N \times N$  πίνακα  $\mathbf{A}$ , δηλαδή  $\mathbf{P}^{(m)} = \mathbf{A} + \Delta\mathbf{P}^{(m)}$  όπου  $\Delta\mathbf{P}^{(m)} = [\Delta P_{ij}^{(m)}]$  είναι ένας τυχαίος πίνακας διαταραχών οι στατιστικές ιδιότητες των οποίων σχετίζονται με το επίπεδο αβεβαιότητας. Τα βάρη  $w_k^{(m)}$  λαμβάνονται από το κύριο ιδιοδιάνυσμα  $\mathbf{x}_1^{(m)}$  του  $\mathbf{P}^{(m)}$  και επομένως είναι ενδιαφέρον να εξετάσουμε πώς το  $\mathbf{x}_1^{(m)}$  σχετίζεται με το κύριο ιδιοδιάνυσμα  $\mathbf{x}_1$  του αρχικού πίνακα  $\mathbf{A}$ . Σύμφωνα με την [227], η προσέγγιση πρώτης τάξης της μεταβολής  $\Delta\mathbf{x}_1^{(m)}$  του κύριου ιδιοδιανύσματος καθορίζεται από:

$$\Delta\mathbf{x}_1^{(m)} = \mathbf{x}_1^{(m)} - \mathbf{x}_1 = \sum_{j=2}^N \left( \frac{\mathbf{u}_j^T \Delta\mathbf{P}^{(m)} \mathbf{x}_1}{(\lambda_1 - \lambda_j) \mathbf{u}_j^T \mathbf{x}_j} \right) \mathbf{x}_j \quad (6.2)$$

όπου  $\mathbf{u}_j$  και  $\mathbf{x}_j$  είναι τα αριστερά και δεξιά ιδιοδιανύσματα του αρχικού πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη  $\mathbf{A}$ , αντίστοιχα, ενώ  $\lambda_j$  είναι οι αντίστοιχες ιδιοτιμές. Η (6.2), αποκαλύπτει ότι τα στοιχεία του διανύσματος διαταραχής  $\Delta\mathbf{x}_1^{(m)} = [\Delta x_{1p}^{(m)}]$  είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των στοιχείων διαταραχής  $\Delta P_{ij}^{(m)}$ . Το γεγονός αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις για τη στατιστική των διαταραγμένων βαρών: εάν υποθεθεί ένας επαρκής αριθμός των διαταραχών  $\Delta P_{ij}^{(m)}$ , είναι στατιστικά ανεξάρτητες, τότε σύμφωνα με το Θεώρημα Κεντρικού Ορίου (CLT - Central Limit Theorem) [228], το  $x_{1k}^{(m)}$  θα ακολουθήσει προσεγγιστικά μία κατανομή Gauss με την προϋπόθεση ότι το βέβαια ότι το  $N$  είναι αρκετά μεγάλο. Τα βάρη  $w_k^{(m)}$  είναι κανονικοποιημένες εκδόσεις του  $x_{1k}^{(m)}$  και επομένως αναμένουμε ότι θα ακολουθήσουν επίσης περίπου μία Gaussian κατανομή. Επιπλέον, τα βάρη  $w_k$ , όπως αναφέρεται στο 2.3.1.3, είναι το άθροισμα των  $w_k^{(m)}$  και το CLT πάλι επισημαίνει ότι τα  $w_k$  θα ακολουθούν επίσης κατανομή Gauss. Αυτό γίνεται εμφανές εξετάζοντας τη μεταβολή  $\delta w_k^{(m)}$  στα βάρη  $w_k^{(m)}$  που προκύπτει από τις διαταραχές  $\Delta x_{1p}^{(m)}$  στο κύριο ιδιοδιάνυσμα. Δεδομένου ότι ισχύει  $(\alpha + \Delta\alpha)/(\beta + \Delta\beta) \cong \alpha/\beta + \Delta\alpha/\beta - (\alpha/\beta^2)\Delta\beta$  για μικρά  $\Delta\alpha$  και  $\Delta\beta$ , μπορεί να προκύψει από τη σχέση εκτίμησης των βαρών (2.10) μία εκτίμηση για τη μεταβολή  $\delta w_k^{(m)} = w_k^{(m)} - W_k$  ως εξής:

$$\delta w_k^{(m)} \cong W_k \left\{ \frac{\Delta x_{1k}^{(m)}}{x_{1k}^{(m)}} - \frac{1}{C} \sum_{j=1}^N \Delta x_{1j}^{(m)} \right\} \quad (6.3)$$

όπου  $C = \sum_i x_{1i}$ . Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι εφόσον το  $\Delta x_{1p}^{(m)}$  αποτελεί γραμμικό συνδυασμό των στοιχείων διαταραχής  $\Delta P_{ij}^{(m)}$ , όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι διαταραχές  $\delta w_k^{(m)}$  θα ακολουθούν και εκείνες Gaussian κατανομή. Οι μέσες διαταραχές λαμβάνονται ως εξής:

$$\delta w_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \delta w_k^{(m)} = \frac{W_k}{M} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\Delta x_{1k}^{(m)}}{x_{1k}} - \frac{1}{C} \sum_{j=1}^N \Delta x_{1j}^{(m)} \right\} \quad (6.4)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα στατιστικά στοιχεία των διαταραχών αβεβαιότητας  $\Delta P_{ij}^{(m)}$  αναμένεται να επηρεάσουν κυρίως τη διακύμανση των Gaussian κατανομημένων βαρών  $w_k^{(m)}$  και να έχουν μικρότερο αντίκτυπο στην ουσιαστική στατική συμπεριφορά τους (π.χ. στην PDF τους). Επιπλέον, τα βάρη  $w_k$  (2.17) είναι το άθροισμα των βαρών  $w_k^{(m)}$ , όπου  $m$  ο εκάστοτε ειδικός, και σύμφωνα με το θεώρημα CLT επισημαίνεται για άλλη μια φορά ότι τα  $w_k$  θα ακολουθούν επίσης Gaussian κατανομή. Αυτή η παρατήρηση θα αποδειχθεί αριθμητικά στην παράγραφο 6.3.1.

## 6.2.2 Περιγραφή του Μοντέλου της Αβεβαιότητας

Μπορούμε να υποθέσουμε ότι το  $P_{ij}^{(m)}$  μεταβάλλεται τυχαία μέσα σε ένα διάστημα  $[D_{ij}, U_{ij}]$  [227]. Επιπλέον, εάν οι εμπειρογνώμονες πραγματοποιούν τις συγκρίσεις τους, όπως δείχνει ο Πίνακας 21, τότε οι επιτρεπόμενες τιμές για τα  $P_{ij}^{(m)}$  πρέπει να είναι διακριτές εντός του παραπάνω διαστήματος. Το μήκος  $U_{ij} - D_{ij}$  του διαστήματος  $[D_{ij}, U_{ij}]$  δεν αποτελεί κατάλληλο μέτρο για το επίπεδο της αβεβαιότητας. Για παράδειγμα, έστω τα διαστήματα  $I_1 = [1/9, 1]$  και  $I_2 = [1, 2]$  με μήκη  $1 - 1/9 = 8/9$  και  $2 - 1 = 1$  αντίστοιχα. Μολονότι το  $I_1$  έχει μικρότερο μήκος από το  $I_2$ , είναι εύκολο να δούμε ότι αντιστοιχεί στην πραγματικότητα σε υψηλότερο επίπεδο αβεβαιότητας από ό,τι το  $I_2$ , δεδομένου ότι υπάρχουν εννέα διακριτές τιμές, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 21, (δηλ.  $1/9, 2/9, \dots, 1$ ) που βρίσκονται μέσα στο  $I_1$ , ενώ υπάρχουν μόνο δύο τέτοιες τιμές για το  $I_2$  η 1 και η 2. Επομένως, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί το επίπεδο αβεβαιότητας είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται ο αριθμός  $n_{ij}$  των διακριτών τιμών κλιμάκων σύγκρισης που περιέχονται στο διάστημα παρά το μήκος του. Μάλιστα, δεδομένου ότι ένα διάστημα με  $D_{ij} = U_{ij}$  αντιστοιχεί σε μηδενική αβεβαιότητα, το πιο κατάλληλο μέτρο του βαθμού αβεβαιότητας είναι το  $n_{ij} - 1$ .

Με βάση την παραπάνω επισήμανση, θεωρούμε την ακόλουθη αντιστοίχιση των τιμών  $V$ , που αναφέρει ο Πίνακας 21, σε ένα σύνολο ακεραίων  $u = q(V)$  με  $-8 \leq u \leq 8$ , έτσι ώστε:

$$q(V) = \begin{cases} V - 1 & , V \geq 1 \\ 1 - 1/V & , V < 1 \end{cases} \quad (6.5)$$

Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι η διαφορά  $q(U_{ij}) - q(D_{ij})$  είναι ίση με  $n_{ij} - 1$ . Επίσης, για τα διαστήματα  $I_1$  και  $I_2$  που λήφθηκαν υπόψη στην προηγούμενη παράγραφο, η διαφορά αυτή είναι ίση με 9 και 1 αντίστοιχα, γεγονός που δείχνει ότι πράγματι το  $I_1$  αντιστοιχεί σε ένα πολύ μεγαλύτερο επίπεδο αβεβαιότητας από το  $I_2$ . Μπορούμε επίσης να ορίσουμε την αντίστροφη απεικόνιση  $q^{-1}$  του  $q$  τέτοια ώστε  $q^{-1}(q(V)) = V$ .

Ένα άλλο ενδιαφέρον ερώτημα είναι πώς καθορίζονται τα όρια  $D_{ij}$  και  $U_{ij}$ . Τα  $D_{ij}$  και  $U_{ij}$  μπορούν να θεωρηθούν ως τυχαίες μεταβλητές. Ένας τρόπος για την τυχαία επιλογή των  $D_{ij}$  και  $U_{ij}$  είναι να ξεκινήσει κάποιος με ένα αρχικό σχεδόν συνεπή πίνακα  $\mathbf{A} = [A_{ij}]$ , όπως εξηγείται στο 2.3.1.2, και να ορίσει:

$$u_{ij} = \begin{cases} q(A_{ij}) + |\Delta u_{ij}| & , \text{if } q(A_{ij}) + |\Delta u_{ij}| \leq 8 \\ 8 & , \text{σε οποιαδήποτε άλλα περίπτωση} \end{cases} \quad (6.6)$$

$$d_{ij} = \begin{cases} q(A_{ij}) - |\Delta d_{ij}| & , \text{if } q(A_{ij}) - |\Delta d_{ij}| \geq -8 \\ -8 & , \text{σε οποιαδήποτε άλλα περίπτωση} \end{cases} \quad (6.7)$$

όπου οι  $\Delta u_{ij}$  και  $\Delta d_{ij}$  είναι ανεξάρτητες, ομοιόμορφα κατανομημένες μεταβλητές μέσα στο διάστημα  $[-s/2 \ s/2]$ , όπου  $s$  η ένταση των διαταραχών, με διακύμανση  $\sigma^2$  που καθορίζεται από:

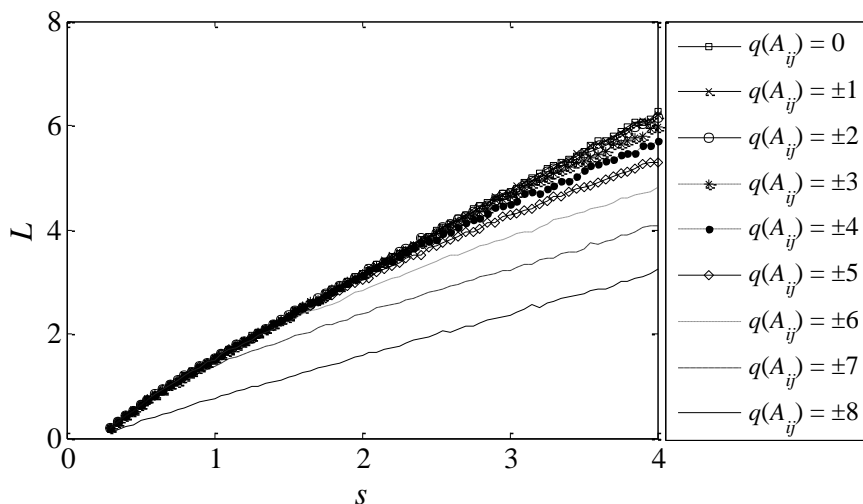
$$\sigma^2 = \frac{s^2}{12} = \langle \Delta u_{ij}^2 \rangle = \langle \Delta d_{ij}^2 \rangle \quad (6.8)$$

Οι εξισώσεις (6.6), (6.7) εξασφαλίζουν ότι οι ακέραιοι  $u_{ij}$  και  $d_{ij}$  παραμένουν εντός του διαστήματος  $[-8 \ 8]$  και ως εκ τούτου τα  $q^{-1}(u_{ij})$  και  $q^{-1}(d_{ij})$  αντιστοιχούν στις τιμές που περιέχει ο Πίνακας 21. Μπορούμε λοιπόν να επιλέξουμε τα όρια του διαστήματος αβεβαιότητας ως εξής:

$$D_{ij} = q^{-1}(d_{ij}) \quad (6.9)$$

$$U_{ij} = q^{-1}(u_{ij}) \quad (6.10)$$

Στην Εικόνα 70, που ακολουθεί, συσχετίζεται η ένταση των διαταραχών  $s$  με το αναμενόμενο επίπεδο αβεβαιότητας  $L = \langle q(U_{ij}) - q(D_{ij}) \rangle = \langle n_{ij} \rangle - 1$ . Σημειώνεται ότι η αντιστοίχιση στις (6.6), (6.7) αναγκάζει τα  $u_{ij}$  και  $d_{ij}$  να παραμείνουν οριοθετημένα στο εσωτερικό του διαστήματος  $[-8 \ 8]$ , ακόμη και αν το  $|\Delta u_{ij}|$  είναι μεγάλο. Αυτό συνεπάγεται ότι το  $L$  καθορίζεται από το  $s$  καθώς και από την τιμή του  $q(A_{ij})$ . Με δεδομένη την τιμή του  $s$ , η αντίστοιχη τιμή του  $L$  υπολογίζεται από τις προσομοιώσεις Monte Carlo. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην Εικόνα 70, η οποία παρέχει ένα μέσο για την απόδοση της τιμής του  $L$  στη ένταση των διαταραχών  $s$  και θα χρησιμοποιηθούν στην υλοποίηση του μοντέλου αβεβαιότητας που περιγράφεται παρακάτω.



Εικόνα 70:  $L$  ως συνάρτηση της έντασης των διαταραχών  $s$

### 6.2.3 Υπολογισμός του $P_{RR}$ Μέσω Προσομοιώσεων Monte Carlo

Λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη υποενότητα, μπορεί τώρα να καθοριστεί ο τρόπος με τον οποίο η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης  $P_{RR}$  σχετίζεται με το επίπεδο αβεβαιότητας  $L$  και το πλήθος των εμπειρογνομόνων  $M$ . Η προτεινόμενη προσέγγιση βασίζεται σε προσομοιώσεις Monte Carlo. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε επανάληψη  $k$  της μεθόδου, δημιουργείται ένας πίνακας  $\mathbf{A}^{(k)}$ , τα στοιχεία του οποίου έχουν επιλεγεί τυχαία από τις τιμές που δίνει ο Πίνακας 21. Αν ο  $\mathbf{A}^{(k)}$  δεν είναι συνεπής (δηλ.  $CR > 0,1$ ), τότε απορρίπτεται και υπολογίζεται εκ νέου ένας  $\mathbf{A}^{(k)}$  μέχρι να πληρωθεί το κριτήριο αυτό. Δεδομένης της τιμής του  $L$  και της τιμής του κάθε στοιχείου  $A_{ij}^{(k)}$  του  $\mathbf{A}^{(k)}$ , χρησιμοποιούνται οι (6.6), (6.7) για την εκτίμηση των  $u_{ij}^{(k)}$  και  $d_{ij}^{(k)}$  δημιουργώντας τυχαίες διαταραχές  $\Delta d_{ij}^{(k)}$  και  $\Delta u_{ij}^{(k)}$ , αντίστοιχα. Η ένταση των διαταραχών  $s$  επιλέγεται με βάση τις τιμές, που παρουσιάζει η Εικόνα 70. Εφόσον καθοριστούν τα  $D_{ij}^{(k)} = q(d_{ij}^{(k)})$  και  $U_{ij}^{(k)} = q(u_{ij}^{(k)})$ , δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός πινάκων PWC (τυπικά επιλέγουμε  $N_{matrix} \cong 10^4$ ) και κατανέμονται σε  $N_G = \lfloor N_{matrix}/M \rfloor$  ομάδες  $M$  πινάκων  $\mathbf{P}^{(v)}$  με  $1 \leq v \leq N_{matrix}$  και όπου το  $\lfloor x \rfloor$  συμβολίζει τον μεγαλύτερο ακέραιο που είναι μικρότερος από το  $x$ . Οι πίνακες  $\mathbf{P}^{(v)}$  μπορούν να θεωρηθούν ως διαταραγμένες εκδόσεις του  $\mathbf{A}^{(k)}$  και ο πίνακας διαταραχής είναι απλά  $\Delta \mathbf{P}^{(v)} = \mathbf{P}^{(v)} - \mathbf{A}^{(k)}$ . Για κάθε μία από αυτές τις ομάδες εμπειρογνομόνων  $N_G$  υπολογίζονται οι προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων, όπως αναφέρθηκε στην 2.3.1.2. Στη συνέχεια, εκτιμάται ο αριθμός  $F_G$  των ομάδων για τις οποίες η σειρά των προτεραιοτήτων που υπολογίζονται είναι διαφορετική από τη σειρά των προτεραιοτήτων  $W'_k$  που υπολογίζονται από το μέσο όρο των βαρών που λαμβάνονται από όλους τους πίνακες  $\mathbf{P}^{(v)}$ . Οι τελευταίες προτεραιότητες αντιστοιχούν στη σειρά που λαμβάνεται από μία πολύ μεγάλη ( $M = N_{matrix}$ ) ομάδα εμπειρογνομόνων και δεδομένου ότι το  $N_{matrix}$  είναι πολύ μεγάλο, αναμένει κανείς ότι τα  $W'_k$  είναι περίπου ίσα με τα ιδανικά βάρη  $W_k$  που αντιστοιχούν στο όριο ομάδας εμπειρογνομόνων άπειρου μεγέθους ( $M \rightarrow \infty$ ).

Στη συνέχεια, η πιθανότητα αντιστροφής της κατάταξης για την επανάληψη  $k$  υπολογίζεται προσεγγιστικά ως  $P_{RR}(\mathbf{A}^{(k)}) \cong F_G/N_G$ . Στην επόμενη επανάληψη  $k+1$  εκτιμάται ένας διαφορετικός αρχικός πίνακας  $\mathbf{A}^{(k+1)}$  και υπολογίζεται η πιθανότητα αντιστροφής της κατάταξης  $P_{RR}(\mathbf{A}^{(k+1)})$ . Η μέση  $P_{RR}$  (ανεξάρτητα από την επιλογή του αρχικού πίνακα) υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{RR} = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{k=1}^{N_{MC}} P_{RR}(\mathbf{A}^{(k)}) \quad (6.11)$$

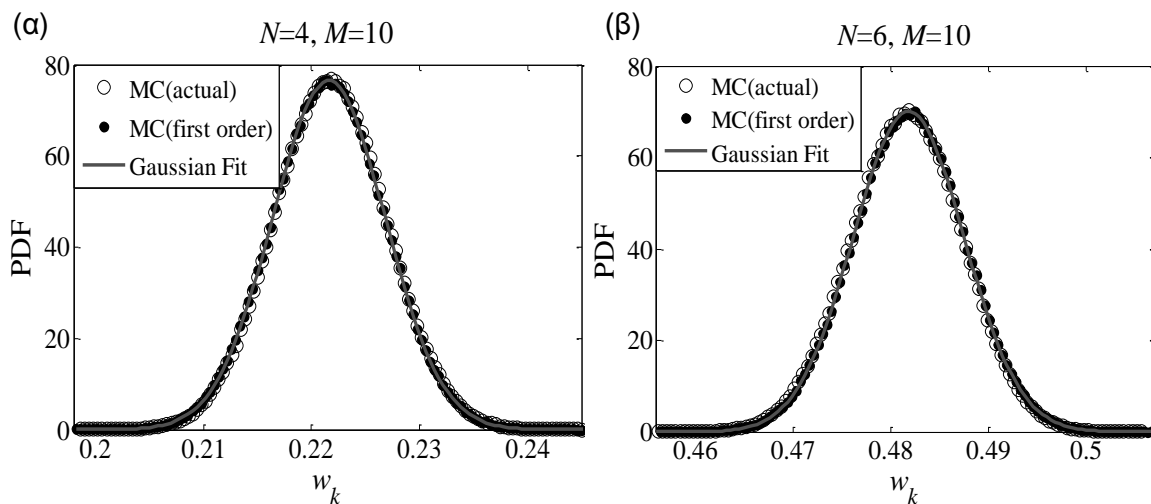
όπου,  $N_{MC}$  είναι ο συνολικός αριθμός των Monte Carlo επαναλήψεων. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι μπορεί κανείς να εκτιμήσει την  $P_{RR}$  για πολλές διαφορετικές τιμές του  $M$  χρησιμοποιώντας τα ίδια τυχαία δείγματα των κατά ζεύγη πινάκων σύγκρισης.

## 6.3 Αριθμητική Ανάλυση και Αποτελέσματα

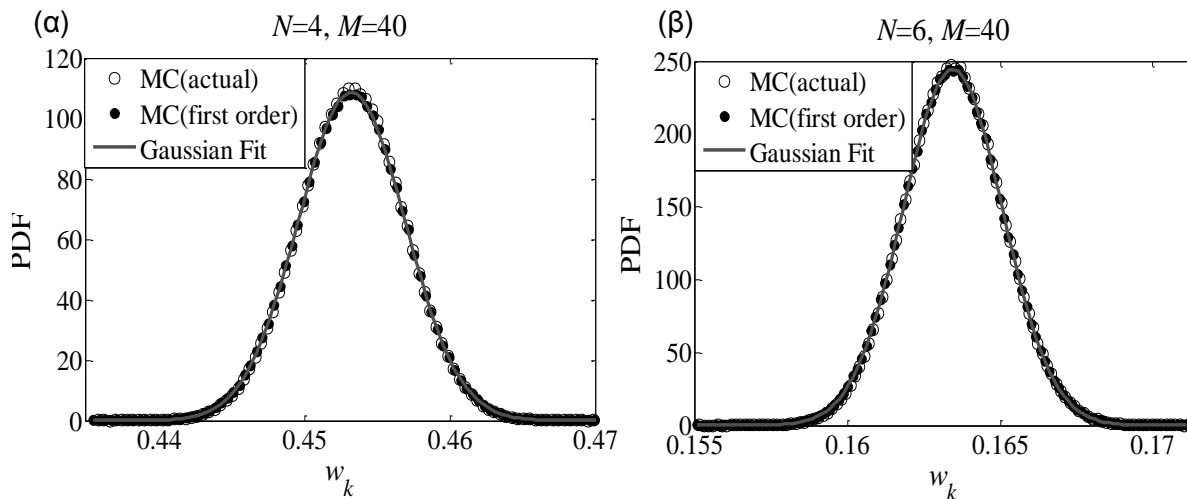
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την εφαρμογή του πλαισίου που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα (6.2). Αρχικά στην υποενότητα 6.3.1 θα παρουσιαστούν κάποια αριθμητικά αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν την πρώτη προσέγγιση ανάλυσης των διαταραχών, όπως αναλύθηκε στο 6.2.1. Στη συνέχεια, στην υποενότητα 6.3.2 θα εξεταστεί το πρώτο υπό μελέτη ζήτημα του παρόντος κεφαλαίου, που σχετίζεται με τις ιδιότητες σύγκλισης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης σε σχέση με τον αριθμό των εμπειρογνομόνων που συμμετέχουν στη διαδικασία PWC.

### 6.3.1 Επαλήθευση της Πρώτης Προσέγγισης Ανάλυσης των Διαταραχών

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η πρώτη προσέγγιση της θεωρίας των διαταραχών, που παρουσιάστηκε στο 6.2.1, υπολογίζεται αριθμητικά η PDF ενός αντιπροσωπευτικού μέσου βάρους  $w_k$ , όπως προκύπτει από μία ομάδα εμπειρογνομόνων μεγέθους  $M$ . Οι πίνακες συγκρίσεων όλων των ειδικών υπολογίζονται όπως αναλύθηκε στο 6.2.2 και 6.2.3, ξεκινώντας από τον ίδιο σχεδόν συνεπή  $N \times N$  αρχικό πίνακα  $\mathbf{A}$  με  $C.R < 0.1$ . Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 71 και την Εικόνα 72, για τις περιπτώσεις όπου ο αριθμός των ειδικών είναι  $M=10$  και  $M=40$ , αντίστοιχα, για  $N=4$  και  $N=6$  κριτήρια.  $10^6$  Monte Carlo επαναλήψεις πραγματοποιούνται και λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση όπου το επίπεδο αβεβαιότητας είναι  $L=3$ . Οι εικόνες παρουσιάζουν τις PDFs που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την μέθοδο εκτίμησης των βαρών, όπως αναλύθηκε στο 2.3.1.2 καθώς και την πρώτη προσέγγιση ανάλυσης των διαταραχών, σύμφωνα με την (6.2). Παράλληλα, παρουσιάζεται η πλησιέστερη Gaussian κατανομή στην PDF στην περίπτωση της προαναφερθείσας μεθόδου υπολογισμού του βάρους (η πλησιέστερη Gaussian κατανομή στην περίπτωση της πρώτης προσέγγισης ανάλυσης διαταραχών είναι σχεδόν η ίδια). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στις εν λόγω εικόνες, η (6.2) είναι πράγματι μια έγκυρη προσέγγιση για τον υπολογισμό των διαταραχών των ατομικών καθώς και των μέσων βαρών. Επιπρόσθετα, τα μέσα βάρη ακολουθούν μια κανονική κατανομή σύμφωνα με όσα συζητήθηκαν στην παράγραφο 6.2.1. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν για τα υπόλοιπα βάρη καθώς και για άλλες τιμές των  $N$ ,  $L$  and  $M$ . Η Εικόνα 72 παρουσιάζει την PDF που προκύπτει για  $M=40$  ξεκινώντας από έναν άλλο αρχικό πίνακα  $\mathbf{A}$ .



**Εικόνα 71: PDF ενός τυπικού βάρους  $w_k$  που προέκυψε υπολογίζοντας το μέσο όρο των  $w_k^{(m)}$ , τα οποία εκτιμώνται μέσω προσομοιώσεων. Απεικονίζεται επίσης η πλησιέστερη Gaussian κατανομή, που υπολογίζεται μέσω ελαχιστοποίηση ελαχίστων τετραγώνων. Το επίπεδο αβεβαιότητας είναι  $L=3$ , ο αριθμός των ειδικών  $M=10$  και ο αριθμός των κριτηρίων (α)  $N=4$ , (β)  $N=6$**



**Εικόνα 72: PDF ενός τυπικού βάρους  $w_k$  στην περίπτωση που  $M=40$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι οι ίδιες με την Εικόνα 71**

Η θεωρητική ανάλυση στην 6.2.1 καθώς και τα αποτελέσματα της παρούσας υποενοότητας επισημαίνουν το γεγονός ότι σε μια πρώτη προσέγγιση, εκτός από τον καθορισμό της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των προτεραιοτήτων  $w_k$ , τα στατιστικά χαρακτηριστικά των  $\Delta P_{ij}^{(m)}$  πρέπει να διαδραματίσουν έναν δευτερεύοντα ρόλο στις υπόλοιπες στατιστικές ιδιότητες των  $w_k$  (π.χ. το σχήμα της PDF τους).

### 6.3.2 Ιδιότητες Σύγκλισης της Πιθανότητας Αναστροφής Κατάταξης

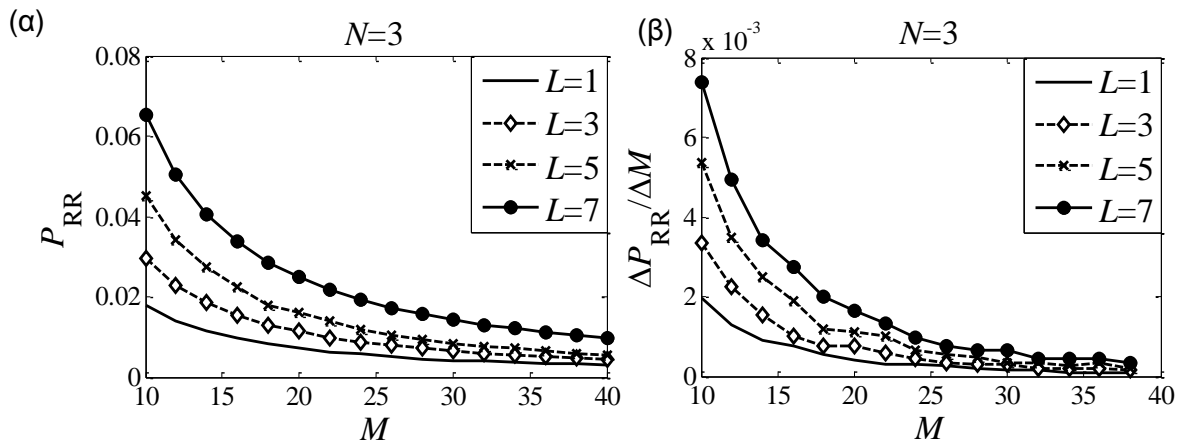
Στην παρούσα υποενοότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σχετικά με τον υπολογισμό του  $P_{RR}$  κάτω από διάφορες συνθήκες.

#### 6.3.2.1 Εφαρμογή Μοντέλου Αβεβαιότητας $P_{RR}$

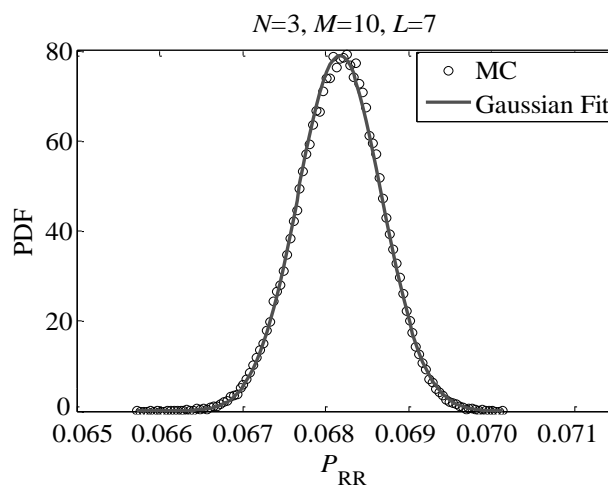
Εφαρμόζοντας το μοντέλο της αβεβαιότητας που αναλύθηκε στο 6.2.2 και τη διαδικασία προσομοίωσης Monte Carlo (6.2.3), μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης  $P_{RR}$ , προκειμένου να εξεταστεί η εξάρτησή της από το μέγεθος  $M$  της ομάδας των εμπειρογνομένων, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πρακτικό ζήτημα, όπως αναφέρθηκε στο 6.1. Πρώτα θα εξεταστούν οι ιδιότητες σύγκλισης της  $P_{RR}$  σε σχέση με το  $M$ , στην περίπτωση ενός σχετικά μικρού αριθμού εναλλακτικών λύσεων ( $N=3$ ), λαμβάνοντας υπόψη μια ποικιλία τιμών του επιπέδου αβεβαιότητας  $L$ . Για κάθε τιμή του  $M$ , πραγματοποιήθηκαν  $N_{MC}=10^3$  επαναλήψεις και σε κάθε επανάληψη δημιουργήθηκαν  $N_{matrix}=10^4$  τυχαίοι πίνακες. Όπως υποδεικνύεται στην Εικόνα 73 (α), η  $P_{RR}$  είναι ήδη χαμηλή (κάτω από 7%), ακόμη και για ένα μέγεθος ομάδας των ειδικών τόσο μικρό όσο  $M=10$  για λογικές τιμές του  $L$ . Ένα άλλο σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από την Εικόνα 73 είναι ότι ο ρυθμός σύγκλισης της  $P_{RR}$  είναι μάλλον αργός. Για παράδειγμα, για  $L=7$ , η  $P_{RR}$  αλλάζει από 7% σε 3,5 %, όταν ο αριθμός των εμπειρογνομένων αυξάνεται από 10 σε 20, γεγονός που συνεπάγεται ένα μικρό πρακτικό κέρδος από την αύξηση του μεγέθους της ομάδας των εμπειρογνομένων, δεδομένου ότι η  $P_{RR}$  είναι ήδη χαμηλή για  $M=10$ . Το κέρδος είναι ακόμη χαμηλότερο για μικρότερες τιμές αβεβαιότητας. Η Εικόνα 73 επισημαίνει επίσης ότι δεν έχει ιδιαίτερο νόημα η αύξηση του αριθμού των εμπειρογνομένων πέραν των 15, δεδομένου ότι η μείωση της  $P_{RR}$  είναι ακόμη μικρότερη.

Προκειμένου να εξεταστεί η αξιοπιστία των τιμών της  $P_{RR}$ , μπορούμε να υπολογίσουμε τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης. Για το σκοπό αυτό λαμβάνουμε υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά των τιμών  $P_r$  της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης  $P_{RR}$ , που υπολογίζονται εκτελώντας πολλές επαναλήψεις Monte Carlo για μία ομάδα

εμπειρογνομώνων μεγέθους  $M$ . Αν όλες αυτές οι τιμές είναι παρόμοιες, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα αποτελέσματά μας είναι αξιόπιστα. Η Εικόνα 74 απεικονίζει την PDF των εκτιμώμενων τιμών  $P_{RR}$ , που υπολογίζεται από το ιστόγραμμα τους για  $N_{MC}=10^3$  προσομοιώσεις Monte Carlo, στην περίπτωση όπου  $N=3$ ,  $M=10$  και  $L=7$ . Δεδομένου ότι η τιμή της  $P_{RR}$  σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται ως ο μέσος όρος πολλών ανεξάρτητων τιμών, η Gaussian PDF συμπίπτει αρκετά με την εκτιμώμενη PDF. Παράλληλα, σημειώνεται ότι υπάρχουν μικρές αποκλίσεις στις τιμές της  $P_{RR}$  που υπολογίζονται (η PDF είναι πρακτικά μη μηδενική στο διάστημα από 0.067 έως 0.070). Εφόσον τα στατιστικά χαρακτηριστικά είναι Gaussian, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί το διάστημα εμπιστοσύνης  $I_C$  για επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Χρησιμοποιώντας πρότυπους τύπους για τον υπολογισμό του διαστήματος εμπιστοσύνης (Hanke J. E., 2008) εύκολα συνάγεται ότι  $I_C=[0.067, 0.068]$  και  $I_C=[0.0179, 0.0180]$  στην περίπτωση που  $L=7$ ,  $N=3$ ,  $M=10$  και  $L=1$ ,  $N=3$ ,  $M=10$  αντίστοιχα. Από αυτά τα στενά διαστήματα εμπιστοσύνης συνεπάγεται ότι ο αριθμός των επαναλήψεων που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς στην Εικόνα 74 είναι επαρκής και μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν όταν υπολογίζονται τα διαστήματα εμπιστοσύνης και άλλων σημείων στα γραφήματα των  $P_{RR}$ , που παρουσιάζονται στον παρόν κεφάλαιο. Για παράδειγμα, για  $M=40$ ,  $L=7$ ,  $N=3$  το διάστημα εμπιστοσύνης είναι  $I_C = [0.0099, 0.01]$ .



Εικόνα 73: (α)  $P_{RR}$  και (β)  $\Delta P_{RR}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για  $N=3$



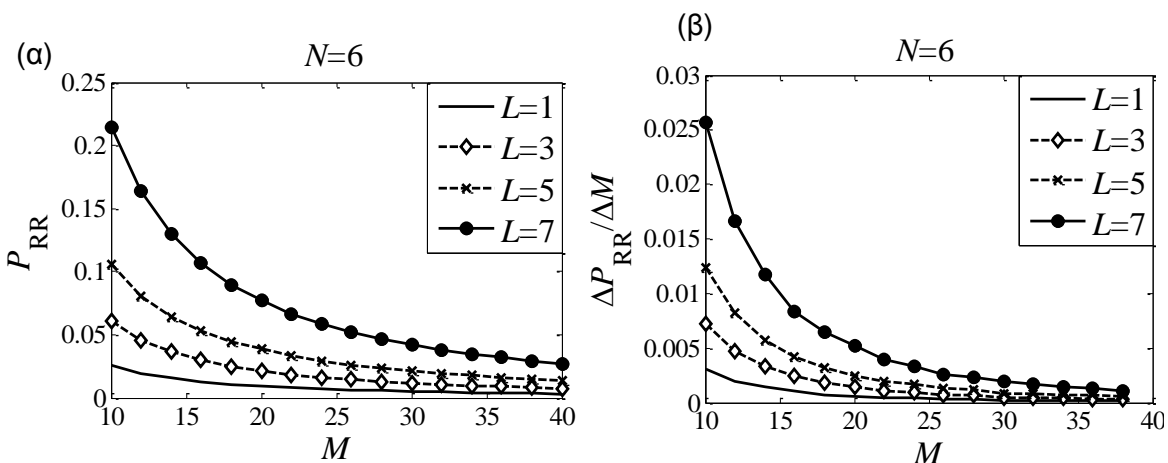
Εικόνα 74: Η PDF των τιμών  $P_{RR}$  που υπολογίζονται από πολλές προσομοιώσεις θεωρώντας ότι  $N=3$ ,  $M=10$  και  $L=7$ . Απεικονίζεται και η πλησιέστερη Gaussian κατανομή

Για να κατανοήσουμε περαιτέρω τη σύγκλιση της  $P_{RR}$  σε σχέση με το  $M$ , υπολογίζεται η διαφορική μείωση  $\Delta P_{RR}(M)$  στην πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης, όταν το μέγεθος της ομάδας αυξάνεται κατά  $\Delta M=1$  εμπειρογνώμονα:

$$\frac{\Delta P_{RR}(M)}{\Delta M} = |P_{RR}(M+1) - P_{RR}(M)| \quad (6.12)$$

Στην Εικόνα 73 (β) απεικονίζεται το  $\Delta P_{RR}$  ως συνάρτηση του  $M$ . Το σχήμα δείχνει ότι ακόμη και για  $L=7$ , οι αλλαγές στην πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης όταν ένας πρόσθετος εμπειρογνώμονας προστίθεται στην ομάδα είναι πολύ μικρή (κάτω από 1% ανά εμπειρογνώμονα) για  $M=15$ . Ως εκ τούτου, δεν έχει νόημα η αύξηση του μεγέθους της ομάδας των εμπειρογνομόνων πέραν τους 15. Αυτό φαίνεται επίσης στην Εικόνα 73 (α), όπου η αύξηση του  $M$  από 15 έως 40 έχει πολύ μικρή επίπτωση από πρακτική άποψη, δεδομένου ότι ο πρόσθετος αριθμός των εμπειρογνομόνων μειώνει μόνο οριακά την αβεβαιότητα του αποτελέσματος.

Η Εικόνα 75 (α) δείχνει τις τιμές της  $P_{RR}$  για την περίπτωση όπου  $N=6$  εναλλακτικές λύσεις συγκρίνονται κατά ζεύγη, υποθέτοντας τα ίδια επίπεδα αβεβαιότητας όπως στην Εικόνα 73. Όπως ήταν αναμενόμενο, εφόσον ο αριθμός των εναλλακτικών λύσεων είναι τώρα μεγαλύτερος, λαμβάνονται υψηλότερες τιμές για την  $P_{RR}$  (μπορεί ακόμη και να υπερβαίνει το 20% σε ορισμένες περιπτώσεις). Η Εικόνα 75 (β) δείχνει τις αντίστοιχες τιμές του  $\Delta P_{RR}$  και συμπεραίνεται ότι η μεταβολή του μεγέθους της ομάδας των εμπειρογνομόνων έχει τώρα μεγαλύτερη επίπτωση. Για  $M=10$ , η  $P_{RR}$  μειώνεται περίπου στο 18%, όταν το μέγεθος της ομάδας αυξάνεται κατά 1, στην περίπτωση όπου  $L=7$ . Ωστόσο, για  $M>15$ , η μείωση του  $P_{RR}$  γίνεται προοδευτικά μικρότερη ως αποτέλεσμα της αργής σύγκλισης. Δεδομένων των πρακτικών περιορισμών της αύξησης του μεγέθους της ομάδας, η εικόνα δείχνει ότι η χρήση πάνω από 15 εμπειρογνομόνων δεν θα έχει ισχυρή επίδραση στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων.

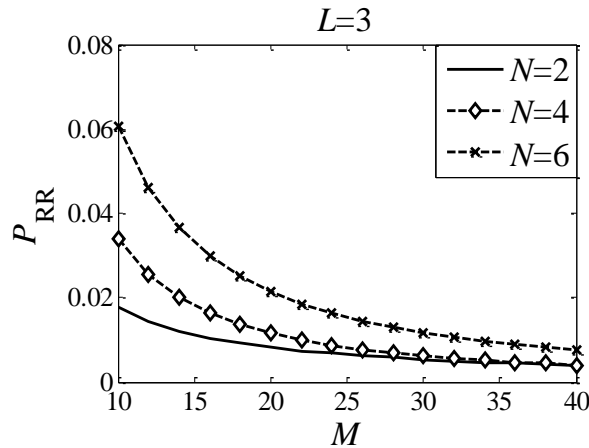


Εικόνα 75: (α)  $P_{RR}$  και (β)  $\Delta P_{RR}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για  $N=6$

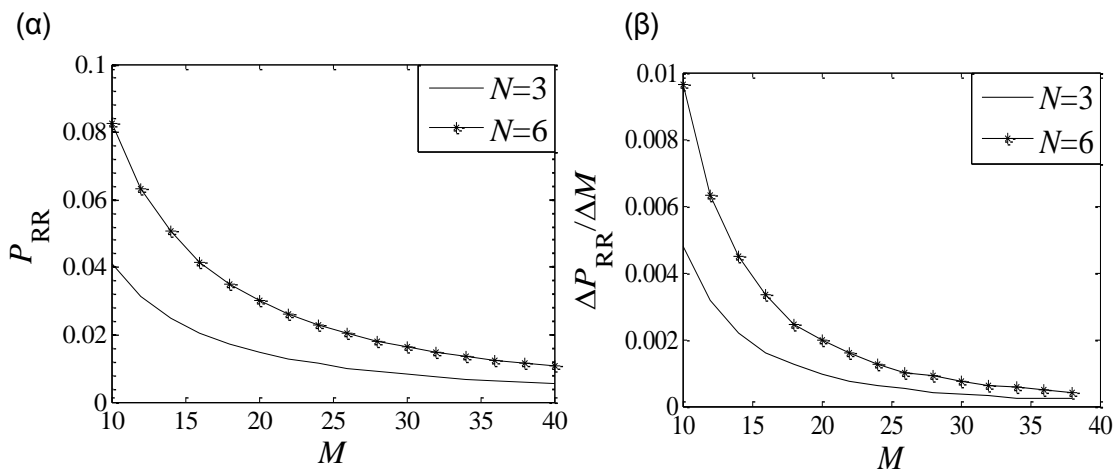
Η Εικόνα 76 απεικονίζει τη σύγκλιση της PWC για διαφορετικές τιμές των κριτηρίων  $N$  και για μια σταθερή τιμή  $L=3$ . Θεωρούμε τις περιπτώσεις όπου  $N=2$ ,  $N=4$  και  $N=6$ . Το μοντέλο επιτρέπει εύκολα να εξεταστούν οι περιπτώσεις όπου  $N>6$ . Ωστόσο, σε πραγματικές καταστάσεις, η πραγματοποίηση της PWC με τόσες πολλές εναλλακτικές λύσεις καθίσταται μη πρακτική, δεδομένου ότι ο αριθμός των κατά ζεύγη συγκρίσεων  $N_c$  για κάθε εμπειρογνώμονα είναι  $N_c=N(N-1)/2$  και συνεπώς έχει συμπεριφορά  $O(N^2)$ . Όπως φαίνεται στο σχήμα, η  $P_{RR}$  εξαρτάται από το  $N$ : Για ένα μέγεθος ομάδας δέκα εμπειρογνομόνων ( $M=10$ ), η  $P_{RR}$  είναι περίπου 6% όταν  $N=6$  και πέφτει στο 3,5% όταν  $N=4$ . Κατά τα άλλα, η ταχύτητα σύγκλισης της  $P_{RR}$  δε φαίνεται να εξαρτάται από



τον αριθμό των κριτηρίων. Σε όλες τις περιπτώσεις, δεν υπάρχει σημαντικό κέρδος όταν αυξάνεται το μέγεθος της ομάδας πέραν από τους 15 ειδικούς. Αυτό συμβαίνει λόγω της αργής σύγκλισης της  $P_{RR}$ , η οποία φαίνεται να επικρατεί ανεξάρτητα από τον αριθμό των εναλλακτικών λύσεων που χρησιμοποιούνται και το επίπεδο αβεβαιότητας.



Εικόνα 76:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για  $L=3$



Εικόνα 77:(α)  $P_{RR}$  και (β)  $\Delta P_{RR}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για με διαφορετικά επίπεδα αβεβαιότητας για κάθε ειδικό

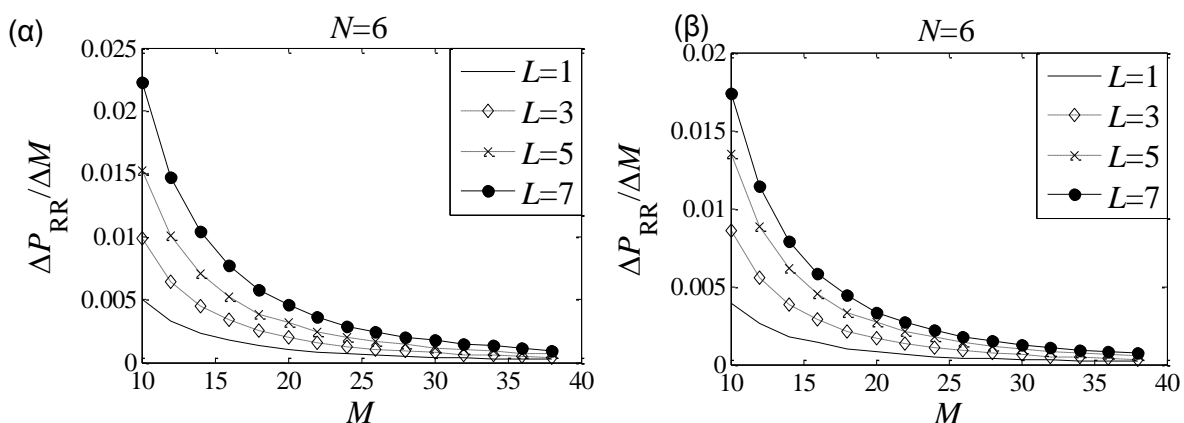
Μέχρι τώρα, η  $P_{RR}$  υπολογίστηκε λαμβάνοντας το ίδιο επίπεδο αβεβαιότητας για κάθε εμπειρογνώμονα στην ίδια ομάδα. Παρουσιάζει επίσης ενδιαφέρον ο υπολογισμός της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης, όταν θεωρούμε ένα διαφορετικό επίπεδο αβεβαιότητας  $L^{(m)}$  για κάθε εμπειρογνώμονα  $m$ . Από πρακτική άποψη, το γεγονός αυτό αντανακλά το τι συμβαίνει όταν το επίπεδο εμπειρίας κυμαίνεται ανάμεσα στους συμμετέχοντες. Η Εικόνα 77 (α) δείχνει τις τιμές της  $P_{RR}$ , ως συνάρτηση της ομάδας των εμπειρογνώμωνων, στην περίπτωση όπου το επίπεδο αβεβαιότητας  $L^{(m)}$  επιλέγεται τυχαία με ίση πιθανότητα μέσα στο διάστημα των ακεραίων 1 έως 7. Τα αποτελέσματα που εμφανίζονται αφορούν  $N=3$  και  $N=6$  κριτήρια ή εναλλακτικές λύσεις αντίστοιχα. Είναι προφανές ότι εξάγεται παρόμοια συμπεριφορά σύγκλισης με την προηγούμενη περίπτωση. Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται επίσης αν υπολογίσουμε τη διαφορική μείωση  $\Delta P_{RR}(M)$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 77 (β). Η παρόμοια συμπεριφορά σύγκλισης που παρατηρείται στην περίπτωση των διαφορετικών επιπέδων αβεβαιότητας μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη το θεωρητικό πλαίσιο της υποενότητας 6.2.1, όπου αποδείχτηκε ότι οι στατιστικές ιδιότητες των διαταραχών αβεβαιότητας, εκτός από τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση, δεν αναμένεται να

παίξουν σημαντικό ρόλο στις στατιστικές του βάρους και κατά συνέπεια της  $P_{RR}$ . Αναμένεται, λοιπόν, μια αλλαγή στις τιμές της  $P_{RR}$  αλλά η συμπεριφορά της σύγκλισης σε σχέση με το  $M$  θα είναι σχεδόν η ίδια.

### 6.3.2.2 Εναλλακτικές Κλίμακες Προτίμησης

Η γραμμική κλίμακα προτίμησης που αποτελείται από ακέραιους αριθμούς από το ένα έως το εννέα και τα αντίστροφά τους, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 21, χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον στις εφαρμογές της μεθόδου PWC. Στο [229] υποστηρίζεται αυτή την κλίμακα ως την καλύτερη για να εκπροσωπήσει τις αναλογίες των βαρών. Παρ' όλα αυτά, είναι ενδιαφέρον να διερευνηθούν οι ιδιότητες σύγκλισης της  $P_{RR}$  όταν εξετάζονται εναλλακτικές κλίμακες προτίμησης, όπως η αντιστρόφως γραμμική ή η λογαριθμική κλίμακα, σύμφωνα και με όσα παρουσιάζει ο Πίνακας 22. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίπτωση εναλλακτικά των στοιχείων που δίνει ο Πίνακας 21 χρησιμοποιούνται τα στοιχεία  $9/(10-x)$ , όπου το  $x \in \{1, 2, \dots, 9\}$ , καθώς και τα αντίστροφα τους  $(10-x)/9$ . Η εναλλακτική κλίμακα  $\{1/9, 2/9, \dots, 1, \dots, 9/2, 9\}$  μπορεί συνεπώς να αναπροσαρμοστεί κατά τον ίδιο τρόπο όπως και η κλίμακα, που παρουσιάζει ο Πίνακας 21, αλλά με μία διαφορετική αντιστοίχιση  $g(V)$ . Οι πίνακες μπορούν και πάλι να επιλεγούν με τυχαία επιλογή των δεικτών, όπως πριν, εφαρμόζοντας την εναλλακτική αντιστοίχιση. Τα στοιχεία της λογαριθμικής κλίμακας προσδιορίζονται ως  $\log_a(x+(\alpha-1))$ , όπου  $x \in \{1, 2, \dots, 9\}$  και  $\alpha > 1$ , περιλαμβάνοντας και τα αντίστροφά τους, και μπορούν να αναπροσαρμοστούν και πάλι με παρόμοιο τρόπο. Σε κάθε περίπτωση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το  $L$  ως μέτρο της αβεβαιότητας όπως και πριν.

Η Εικόνα 78 (α) και η Εικόνα 78 (β) απεικονίζουν το  $\Delta P_{RR}$  για την αντιστρόφως γραμμική και τη λογαριθμική κλίμακα, αντίστοιχα, στην περίπτωση όπου  $N=6$ . Για την λογαριθμική κλίμακα θεωρούμε ότι το  $\alpha=2$  [230]. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 78, η σύγκλιση του  $\Delta P_{RR}$  είναι παρόμοια, υπονοώντας ότι η σύγκλιση της  $P_{RR}$  παραμένει σχεδόν η ίδια, ακόμη και όταν οι εμπειρογνώμονες χρησιμοποιούν μια εναλλακτική κλίμακα προτίμησης για την αποτύπωση της κρίσης τους. Από την Εικόνα 78 (α) και (β) μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι το  $\Delta P_{RR}$  ποικίλει με παρόμοιο τρόπο όπως και πριν, υποδεικνύοντας και πάλι ότι δεν υπάρχει σημαντικό κέρδος με την αύξηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών πέραν των 15 ατόμων.



Εικόνα 78:  $\Delta P_{RR}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για διαφορετικά  $L$  για την (α) αντιστρόφως γραμμική και τη (β) λογαριθμική κλίμακα

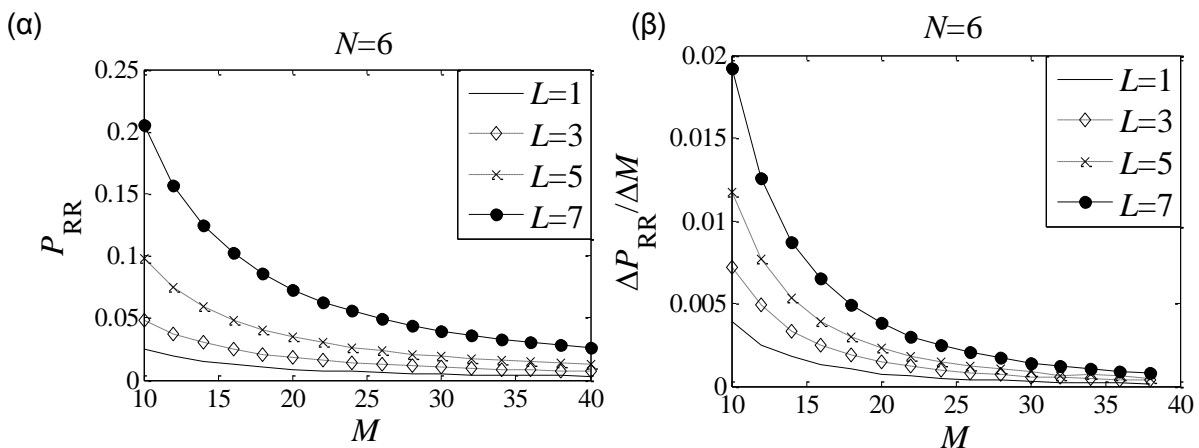
### 6.3.2.3 Εναλλακτικές Μέθοδοι Υπολογισμού των Βαρών

Ένα άλλο σημαντικό θέμα προς εξέταση είναι αν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παραπάνω εξαρτώνται από τη μέθοδο εκτίμησης των βαρών. Εναλλακτικά του υπολογισμού των βαρών  $w_k^{(m)}$  μέσω της μεθόδου της ιδιοτιμής (EM), που περιγράφηκε στην ενότητα 2.3.1.2, θα μπορούσε κανείς να εφαρμόσει τη μέθοδο γεωμετρικού μέσου (GMM) ή ισοδύναμα τη μέθοδο των λογαριθμικών ελαχίστων τετραγώνων (LLSM), όπως αναφέρθηκε στο 2.3.1.2 [120], [121]. Η μέθοδος αυτή επιχειρεί να ταιριάζει τα στοιχεία του πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη  $\mathbf{P}^{(m)}$  με ένα απόλυτα συνεπή πίνακα, δηλαδή έναν πίνακα του οποίου τα στοιχεία είναι της μορφής  $w_i^{(m)}/w_j^{(m)}$ . Ως εκ τούτου, τα βάρη υπολογίζονται με ελαχιστοποίηση της παρακάτω παράστασης μέσω μη γραμμικής βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (unconstrained nonlinear optimization):

$$Q_{\text{GMM}} = \sum_{i,j=1}^N \left( \log P_{ij}^{(m)} - \log \left| \frac{q_i^{(m)}}{q_j^{(m)}} \right| \right)^2 \quad (6.13)$$

Αφού πραγματοποιηθεί η ελαχιστοποίηση, επιλέγουμε  $w_i^{(m)} = |q_i^{(m)}| / \sum_j |q_j^{(m)}|$  ώστε να εξασφαλίζεται ότι τα βάρη είναι θετικά και αθροίζονται στη μονάδα. Στην εφαρμογή μας χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση `fminsearch` του MATLAB η οποία βασίζεται στη μέθοδο αναζήτησης `simplex` [231].

Η Εικόνα 79 (α) και (β) δείχνει τις τιμές των  $P_{RR}$  και  $\Delta P_{RR}$  για την περίπτωση της GMM, όπου  $N=6$  κριτήρια συγκρίνονται κατά ζεύγη, υποθέτοντας διάφορα επίπεδα αβεβαιότητας  $L$ . Έχει αποδειχθεί ότι τόσο για χαμηλές όσο και για υψηλές τιμές του  $L$ , παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά σύγκλισης για τα  $P_{RR}$  και  $\Delta P_{RR}$ , όπως στην περίπτωση της μεθόδου EM. Συγκρίνοντας την Εικόνα 79 (α) και (β) με την Εικόνα 75 (α) και (β) αντίστοιχα, συνάγεται επίσης ότι οι πραγματικές τιμές των  $\Delta P_{RR}$  και  $P_{RR}$  είναι περίπου οι ίδιες, πράγμα που σημαίνει ότι και οι δύο μέθοδοι εκτίμησης των βαρών επιτυγχάνουν περίπου την ίδια αξιοπιστία.



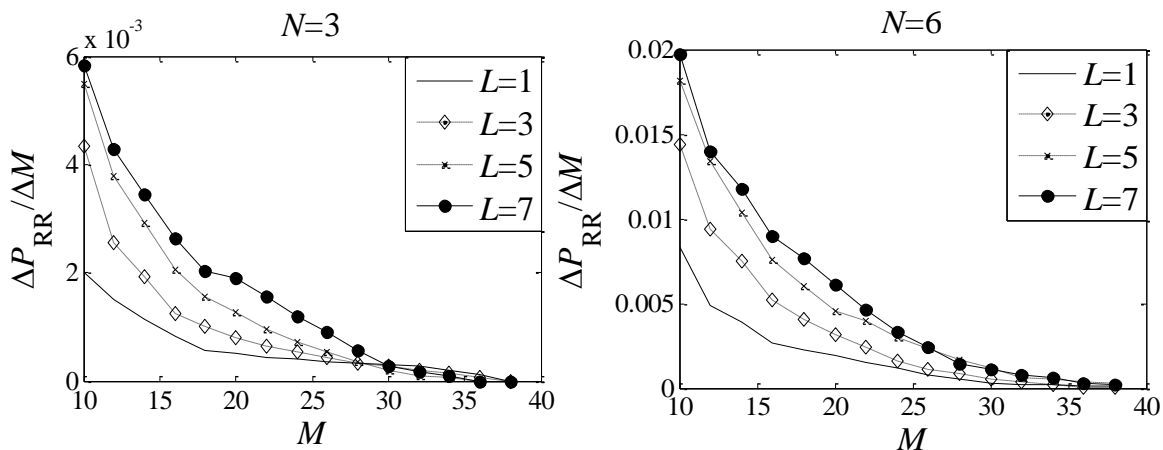
Εικόνα 79: (α)  $P_{RR}$  και (β)  $\Delta P_{RR}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για διαφορετικά  $L$  και  $N=6$ , στην περίπτωση της GMM

### 6.3.2.4 Η περίπτωση των ασαφών κρίσεων

Σε αυτή την υποενότητα θα διερευνηθεί η περίπτωση κατά την οποία οι εμπειρογνώμονες διεξάγουν τις συγκρίσεις τους με ασαφή τρόπο (Deng, 1999), δηλαδή με την ανάθεση ασαφών αριθμών στα στοιχεία του πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη. Πιο

συγκεκριμένα, οι ειδικοί καλούνται να πραγματοποιήσουν τις συγκρίσεις τους θέτοντας στους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη ασαφείς αριθμούς, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 24, εναλλακτικά της ανάθεσης των στοιχείων της κλίμακας του Saaty (Πίνακας 21). Η μεθοδολογία που ακολουθείται βασίζεται στην ασαφή αναλυτική ιεραρχική διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 2.5.

Αναλυτικότερα, με βάση όσα ορίστηκαν παραπάνω για τη Fuzzy AHP, προκειμένου να ενσωματωθεί η αβεβαιότητα σε αυτή τη fuzzy επέκταση της PWC, θεωρούμε την ακόλουθη προσέγγιση. Οι πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη των εμπειρογνομόνων λαμβάνονται και πάλι διαταράσσοντας τυχαία έναν αρχικό συνεπή πίνακα  $\mathbf{A}^{(k)}$ , προκειμένου να προκύψουν οι πίνακες  $\mathbf{P}^{(v)}$  όπως αναφέρεται στην ενότητα 6.2.3. Δεδομένων των πινάκων  $\mathbf{P}^{(v)}$ , εκτιμάται η ασαφής τους επέκταση  $\tilde{\mathbf{P}}^{(v)}$  με στοιχεία  $\tilde{P}_{ij}^{(v)} = (l_{ij}^{(v)}, b_{ij}^{(v)}, u_{ij}^{(v)})$ , όπου τα  $b_{ij}^{(v)} = P_{ij}^{(v)}$  και τα  $l_{ij}^{(v)}, u_{ij}^{(v)}$  καθορίζονται σύμφωνα με την ασαφή κλίμακα, όπως συζητήθηκε παραπάνω στο 2.5. Από αυτό το σημείο και έπειτα η διαδικασία προσομοίωσης είναι η ίδια όπως πριν με τη διαφορά ότι τα βάρη υπολογίζονται από την ελαχιστοποίηση της (2.24), αντί της μεθόδου της ιδιοτιμής που ακολουθείται στην περίπτωση της συμβατικής PWC. Στο πλαίσιο των ασαφών αποφάσεων, υποθέτουμε ότι η αντιστροφή της κατάταξης συμβαίνει κάθε φορά που υπάρχουν τουλάχιστον δύο δείκτες  $i, j$  για τους οποίους η διάταξη του κεντρικού ή του άνω άκρου της αντίστοιχης συνάρτησης ιδιότητας μέλους είναι διαφορετική από εκείνη που λαμβάνεται από μια μεγάλη ομάδα εμπειρογνομόνων.



**Εικόνα 80:  $\Delta P_{RR}$  για ασαφείς κρίσεις ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για διαφορετικά  $L$  για (α)  $N=3$  (β)  $N=6$**

Στην Εικόνα 80 (α) και (β) παρουσιάζεται το  $\Delta P_{RR}$ , για την περίπτωση των ασαφών αποφάσεων, ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των εμπειρογνομόνων, για  $N=3$ ,  $N=6$  κριτήρια, αντίστοιχα. Τα στοιχεία δείχνουν ότι ακόμα και στην περίπτωση των ασαφών αποφάσεων, η σύγκλιση του  $P_{RR}$  είναι και πάλι αργή. Για  $N=6$ , το  $\Delta P_{RR}$  είναι μικρότερο από 0,01 για  $M > 15$ , ακόμη και για μεγάλα επίπεδα αβεβαιότητας, γεγονός που δείχνει ότι δεν υπάρχει πρακτικό κέρδος από την περαιτέρω αύξηση του μεγέθους της ομάδας.

#### 6.4 Υπολογισμός της $P_{RR}$ από Πραγματικά Δεδομένα των Ειδικών

Στην προηγούμενη ενότητα ασχολήθηκαμε με την επίδραση της αβεβαιότητας στην αξιολόγηση των προτεραιοτήτων των εναλλακτικών λύσεων, η οποία ποσοτικοποιείται με την  $P_{RR}$ . Στη συγκεκριμένη ενότητα θα εξεταστεί το ζήτημα του υπολογισμού της  $P_{RR}$

από τα πραγματικά δεδομένα των χρηστών που λαμβάνουν μέρος στη λήψη αποφάσεων, δηλαδή από ένα σχετικά μικρό αριθμό των πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη  $\mathbf{P}^{(m)}$  που λαμβάνεται από μία ομάδα εμπειρογνωμόνων. Στο εν λόγω πλαίσιο, προτείνεται μια αριθμητική μέθοδος για να επιτευχθεί αυτό και να επικυρωθεί η προτεινόμενη προσέγγιση με αριθμητικές προσομοιώσεις.

#### 6.4.1 Αριθμητική Εκτίμηση της $P_{RR}$

Η προσέγγιση, που προτείνεται στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, για την εκτίμηση της πιθανότητας της αντιστροφής κατάταξης απεικονίζεται στο διακεκομμένο πλαίσιο στην Εικόνα 81. Προκειμένου να αναλυθεί περαιτέρω η εν λόγω προσέγγιση, θα πρέπει πρώτα να καταγραφούν κάποιες πληροφορίες σχετικά με τις στατιστικές ιδιότητες των διαταραχών (βήμα 2 στην Εικόνα 81). Ένας τρόπος είναι να υπολογιστούν οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές των  $P_{ij}^{(m)}$  σε σχέση με το  $m$ :

$$U'_{ij} = \max\{P_{ij}^{(m)}\}, \quad D'_{ij} = \min\{P_{ij}^{(m)}\} \quad (6.14)$$

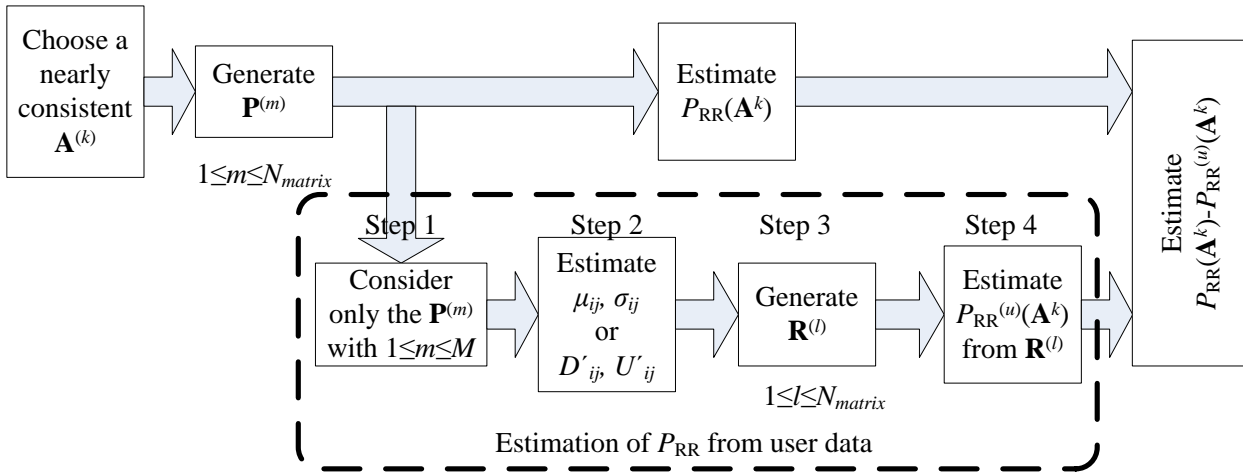
Ένας άλλος τρόπος θα ήταν η αντιστοίχιση των στοιχείων  $P_{ij}^{(m)}$  με τους αντίστοιχους ακέραιους σύμφωνα με την (6.5) και στη συνέχεια να εκτιμηθεί η μέση τιμή  $\mu_{ij}$  και η τυπική απόκλιση  $\sigma_{ij}$  του  $q(P_{ij}^{(m)})$  σε σχέση με το  $m$ , δηλαδή:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M q(P_{ij}^{(m)}) \quad (6.15)$$

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [q(P_{ij}^{(m)}) - \mu_{ij}]^2 \quad (6.16)$$

Υποθέτοντας ομοιόμορφη στατιστική, οι εξισώσεις (6.14) και (6.15)-(6.16) αντικατοπτρίζουν δύο εναλλακτικές μεθόδους για τον προσδιορισμό των στατιστικών χαρακτηριστικών των διαταραχών. Εφόσον εντοπισθούν αυτές οι στατιστικές, μπορεί κανείς να πραγματοποιήσει προσομοιώσεις Monte Carlo (βήμα 3 στην Εικόνα 81) για τον προσδιορισμό της πιθανότητας  $P_{RR}$ . Στην πρώτη περίπτωση, δημιουργείται ένας μεγάλος αριθμός  $N_{PWC}$  τυχαίων πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη  $\mathbf{R}^{(l)}$ ,  $1 \leq l \leq N_{PWC}$ , τα στοιχεία  $R_{ij}^{(l)}$  του οποίου είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στο διάστημα  $[D'_{ij}, U'_{ij}]$ . Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονισθεί ότι αυτοί οι πίνακες δεν αντιστοιχούν σε πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη που συμπληρώνονται από πραγματικούς εμπειρογνώμονες. Αντίθετα, είναι τυχαίοι πίνακες που δημιουργούνται αριθμητικά με βάση τις πληροφορίες που προέρχονται από έναν περιορισμένο αριθμό πινάκων  $\mathbf{P}^{(m)}$ , που συμπληρώνει ο εκάστοτε ειδικός  $m$ . Στη δεύτερη περίπτωση, δημιουργούνται ξανά οι τυχαίοι πίνακες  $\mathbf{R}^{(l)}$ , υποθέτοντας ότι τα  $R_{ij}^{(l)}$  ακολουθούν μια ομοιόμορφη κατανομή η οποία προσδιορίζεται από την μέση τιμή  $\mu_{ij}$  και την τυπική απόκλιση  $\sigma_{ij}$ . Σε κάθε περίπτωση, οι τυχαίοι πίνακες  $\mathbf{R}^{(l)}$  είναι κατανομημένοι σε  $\lfloor N_{PWC}/M \rfloor$  ομάδες, όπου η κάθε μία περιέχει  $M$  πίνακες. Η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης μπορεί να προσεγγιστεί με τον υπολογισμό του αριθμού των φορών για τον οποίο οι προτεραιότητες που λαμβάνονται από καθεμία από τις ομάδες αυτές δεν είναι η ίδια με εκείνη που λαμβάνεται από τα αρχικά βάρη (βήμα 4 στην Εικόνα 81). Για να γίνει διάκριση μεταξύ των δύο τρόπων εκτίμησης, ορίζονται ως  $P_{RR}^{(\min\max)}(\mathbf{A}^k)$  και  $P_{RR}^{(\text{std})}(\mathbf{A}^k)$  οι πιθανότητες αναστροφής κατάταξης που λαμβάνονται από τις (6.14) και (6.15)-(6.16), αντίστοιχα, δεδομένου ενός αρχικού πίνακα  $\mathbf{A}^k$ . Πρέπει να σημειωθεί ότι εάν το αρχικό μέγεθος της ομάδας από την οποία συλλέγονται τα δεδομένα τείνει στο άπειρο ( $M \rightarrow \infty$ ), οι δύο εναλλακτικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των  $\mathbf{R}^{(l)}$  είναι ισοδύναμες και ως εκ τούτου  $P_{RR}^{(\min\max)}(\mathbf{A}^k) = P_{RR}^{(\text{std})}(\mathbf{A}^k)$ .

Ωστόσο, στην περίπτωση των πεπερασμένου αριθμού  $M$  μπορεί να παρέχουν μια διαφορετική εκτίμηση για την  $P_{RR}$ .



**Εικόνα 81:** Αποτύπωση των προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται στην 6.4. Το πλαίσιο με τις διακεκομμένες γραμμές περιέχει την προτεινόμενη μέθοδο για την εκτίμηση της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης από ένα περιορισμένο σύνολο πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη. Το υπόλοιπο του σχήματος εξηγεί πώς η αξιοπιστία του προτεινόμενου συστήματος εκτίμησης μπορεί να επαληθευτεί με περαιτέρω αριθμητικές προσομοιώσεις.

### 6.4.2 Αποτελέσματα και Επιβεβαίωση

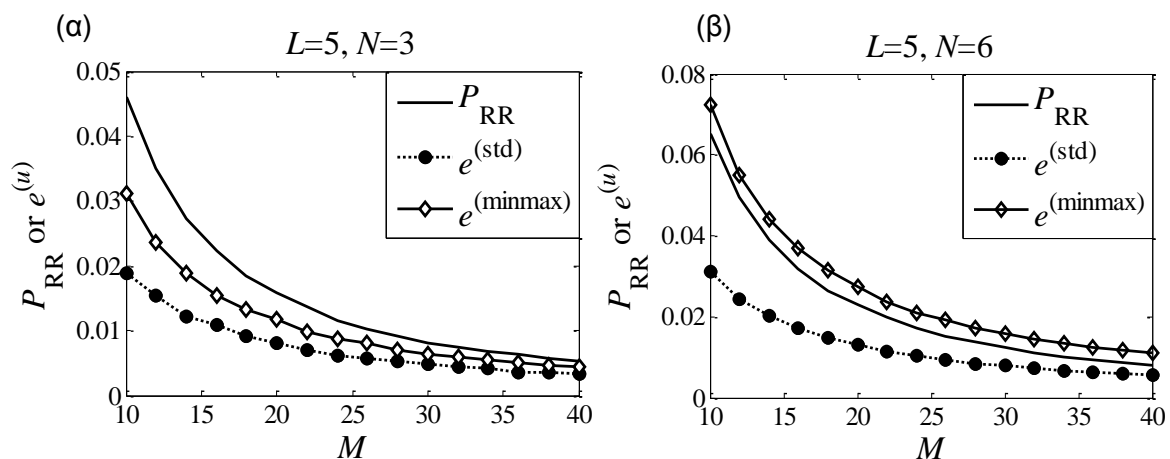
Για την επιβεβαίωση και τον έλεγχο της αξιοπιστίας της διαδικασίας εκτίμησης της  $P_{RR}$  πραγματοποιούνται προσομοιώσεις Monte Carlo, όπως προτείνεται στο υπόλοιπο μέρος στην Εικόνα 81. Σε κάθε Monte Carlo επανάληψη  $k$ , υπολογίζεται ένας αρχικός πίνακας  $\mathbf{A}^k$  και εκτιμώνται τα διαστήματα  $[D_{ij} U_{ij}]$ , όπως και πριν (6.2.3). Στη συνέχεια, δημιουργούνται οι πίνακες  $\mathbf{P}^{(m)}$  όπου  $1 \leq m \leq N_{matrix}$ . Επιλέγονται οι πρώτοι  $M$  πίνακες  $\mathbf{P}^{(m)}$  όπου  $1 \leq m \leq M$  έτσι ώστε να αντιστοιχούν στους πίνακες των χρηστών, ενώ οι υπόλοιποι πίνακες χρησιμεύουν στο να εκτιμηθεί η πραγματική πιθανότητα αναστροφής κατάταξης  $P_{RR}(\mathbf{A}^k)$ , σύμφωνα με τον τρόπο που εξηγείται στην ενότητα 6.2.3. Λαμβάνοντας υπόψη όσα συζητήθηκαν στην ενότητα 6.4.1, οι πίνακες  $\mathbf{P}^{(m)}$ , όπου  $1 \leq m \leq M$ , χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των  $D'_{ij}$  και  $U'_{ij}$  σύμφωνα με την (6.14) ή  $\mu_{ij}$  και  $\sigma_{ij}$  σύμφωνα με τις (6.15)-(6.16), αντιστοίχως. Στη συνέχεια, δημιουργούνται οι πίνακες  $\mathbf{R}^{(l)}$  και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των  $P_{RR}^{(minmax)}(\mathbf{A}^k)$  και  $P_{RR}^{(std)}(\mathbf{A}^k)$  (βήματα 1 έως 4 στο διακεκομμένο τμήμα της Εικόνα 81). Για τη μέτρηση του σφάλματος που εισάγεται από τις προαναφερθείσες μεθόδους εκτίμησης, υπολογίζεται η συνάρτηση σφάλματος που ορίζεται ως εξής:

$$e^{(u)}(\mathbf{A}^k) = |P_{RR}^{(u)}(\mathbf{A}^k) - P_{RR}(\mathbf{A}^k)| \quad (6.17)$$

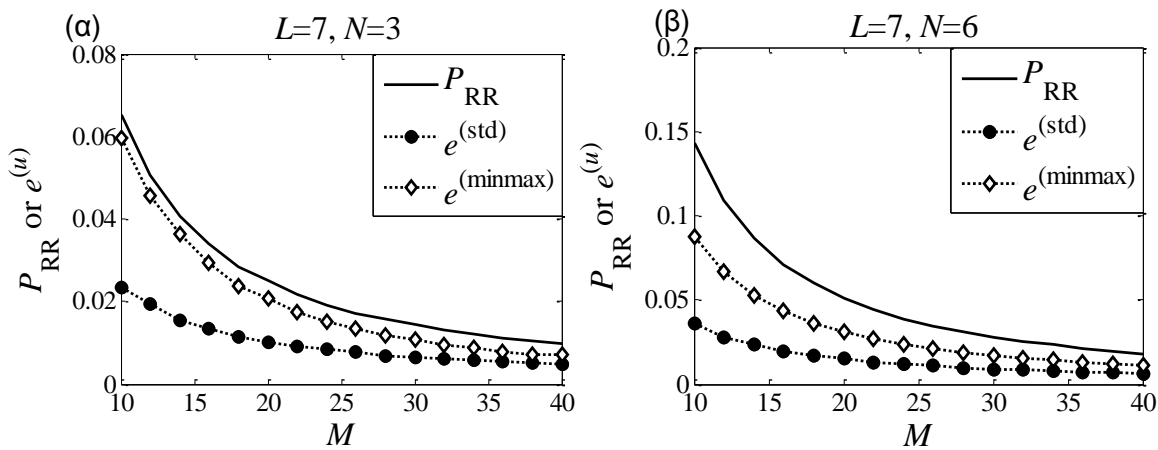
όπου το  $u$  αντιστοιχεί είτε στο «minmax» είτε στο «std», ανάλογα με τη μέθοδο στην οποία αναφέρεται για την εκτίμηση της  $P_{RR}$  με βάση τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές ή την τυπική απόκλιση, αντίστοιχα. Υπολογίζοντας το μέσο όρο από πολλούς πιθανούς αρχικούς πίνακες που λαμβάνονται στις διάφορες επαναλήψεις Monte Carlo, μπορεί, επομένως, να γίνει μια εκτίμηση για το μέσο σφάλμα:

$$e^{(u)} = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{l=1}^{N_{MC}} e^{(u)}(\mathbf{A}^k) \quad (6.18)$$

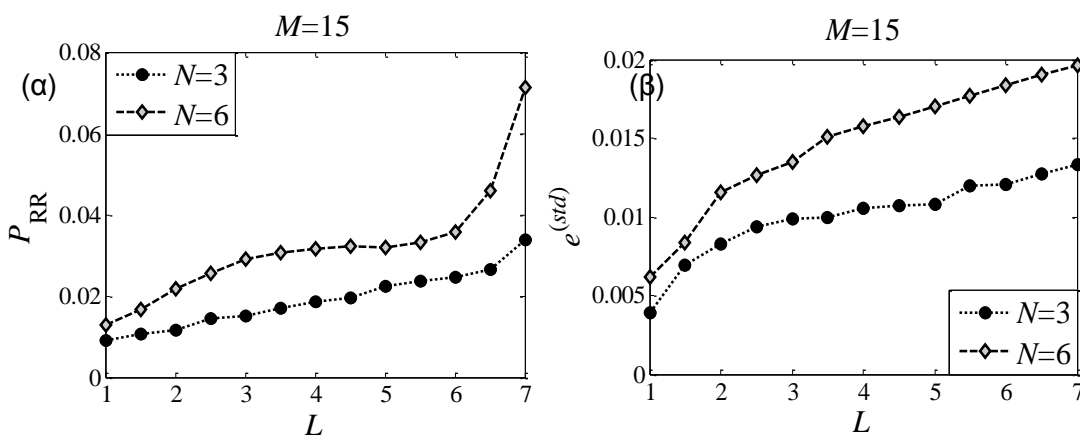
Η Εικόνα 82 (α) και (β) δείχνει τις τιμές των  $e^{(std)}$  και  $e^{(minmax)}$ , που υπολογίζονται από τις προσομοιώσεις MC, καθώς και την πιθανότητα αντιστροφής της κατάταξης  $P_{RR}$  που λαμβάνεται με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 6.2.3, για  $L=5$  και α)  $N=3$ , β)  $N=6$ . Παρατηρείται ότι το μέσο σφάλμα εξαρτάται από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των στατιστικών χαρακτηριστικών της διαταραχής. Οι τιμές του  $e^{(minmax)}$  είναι υψηλότερες από του  $e^{(std)}$ , γεγονός που αποδεικνύει ότι ο καθορισμός των στατιστικών χαρακτηριστικών των διαταραχών μέσω της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης είναι πολύ καλύτερος. Αυτό συμβαίνει σε συμφωνία με όσα συζητήθηκαν στην ενότητα 6.2.1, όπου το θεώρημα CLT χρησιμοποιήθηκε για να αναλυθούν οι στατιστικές ιδιότητες της διαταραχής. Σύμφωνα με αυτό το θεώρημα, οι στατιστικές ιδιότητες των διαταραγμένων βαρών μοιάζουν με εκείνες μιας Gaussian κατανομής. Επιπλέον, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση είναι εκείνες που καθορίζουν πλήρως αυτή την κατανομή και όχι άλλα μέτρα, όπως τα  $D'_{ij}$  και  $U'_{ij}$  που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο «minmax». Παρατηρείται ότι για  $N=3$ , η «std» μέθοδος καταλήγει σε ένα μέσο σφάλμα  $e^{(std)}=2\%$  για  $M=10$ , το οποίο αντιστοιχεί σε λιγότερο από το ήμισυ της αξίας της  $P_{RR}$ , πράγμα που σημαίνει ότι η μέθοδος εκτιμά ορθά την τάξη μεγέθους της  $P_{RR}$ . Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό στις πρακτικές εφαρμογές της μεθόδου. Παρόμοια συμπεράσματα εξάγονται στην περίπτωση όπου  $N=6$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 82 (β), επισημαίνοντας ότι η μέθοδος παρέχει λογική ακρίβεια για μεγαλύτερο αριθμό εναλλακτικών λύσεων. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος «minmax» παράγει μεγαλύτερα σφάλματα στην εκτίμηση της  $P_{RR}$  και ιδιαίτερα στην περίπτωση  $N=6$ , όπου παράγονται σφάλματα τα οποία είναι μεγαλύτερα από την τιμή της ίδιας της  $P_{RR}$ . Είναι επίσης ενδιαφέρον να διερευνηθεί η ακρίβεια των δύο μεθόδων στο πλαίσιο ενός ακόμη μεγαλύτερου βαθμού αβεβαιότητας. Στην Εικόνα 83 (α) και (β) παρουσιάζονται οι τιμές των  $e^{(std)}$  και  $e^{(minmax)}$  στην περίπτωση όπου  $L=7$  για  $N=3$  και  $N=6$ , αντίστοιχα. Προκύπτει και πάλι ότι η μέθοδος «std» παρέχει επαρκή ακρίβεια κατά την εκτίμηση της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης, ενώ η προσέγγιση «minmax» οδηγεί σε σημαντικά μεγαλύτερα λάθη. Και οι δύο μέθοδοι, ωστόσο, φαίνεται να παρέχουν μια σωστή εκτίμηση σχετικά με την τάξη μεγέθους της  $P_{RR}$ .



Εικόνα 82:  $P_{RR}$  και  $e^{(u)}$  ως συνάρτησής του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για  $L=5$  και (α)  $N=3$ , (β)  $N=6$



Εικόνα 83:  $P_{RR}$  και  $e^{(u)}$  ως συνάρτησι του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για  $L=7$  και (α)  $N=3$ , (β)  $N=6$

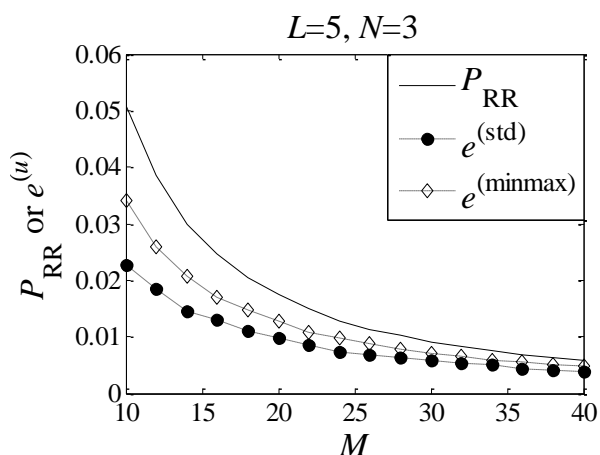


Εικόνα 84: (α)  $P_{RR}$  και (β)  $e^{(std)}$  ως συνάρτηση του επιπέδου αβεβαιότητας για  $M=15$

Η Εικόνα 84 περιγράφει την ακρίβεια της προσέγγισης «std» για ένα μέγεθος της ομάδας των ειδικών ίσο με  $M=15$ , το οποίο σύμφωνα με το 6.3 αποτελεί ένα επαρκές μέγεθος για την εκτίμηση των προτεραιοτήτων των εναλλακτικών λύσεων, δεδομένων των περιορισμών των πρακτικών εφαρμογών της PWC. Σύμφωνα με τα υπό μελέτη αποτελέσματα, επαληθεύεται ότι το  $e^{(std)}$  είναι σημαντικά μικρότερο από την  $P_{RR}$ , υπονοώντας ένα ανεκτό σφάλμα στην εκτίμηση της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης.

Στα προαναφερθέντα αποτελέσματα, η μέθοδος της ιδιοτιμής χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των PWC βαρών. Παρ'όλα αυτά, θα ήταν πολύ ενδιαφέρον να διερευνηθεί η εκτίμηση της  $P_{RR}$  από τα πραγματικά δεδομένα των χρηστών με την εφαρμογή της μεθόδου του γεωμετρικού μέσου, όπως αναλύθηκε προηγουμένως στην ενότητα 6.3.2.3. Η Εικόνα 85 δείχνει τις τιμές των  $P_{RR}$  και  $e^{(u)}$  για την περίπτωση όπου  $N=3$  κριτήρια συγκρίνονται κατά ζεύγη, υποθέτοντας ένα επίπεδο αβεβαιότητας  $L=5$ . Τα αποτελέσματα επισημαίνουν ότι οι τιμές της  $P_{RR}$ , που υπολογίζονται από τα πραγματικά δεδομένα των χρηστών, αυξάνοντας το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνομόνων είναι λίγο ή πολύ οι ίδιες με εκείνες που υπολογίστηκαν προηγουμένως στο πλαίσιο της EM στην Εικόνα 83 (α). Προκύπτει και πάλι ότι η μέθοδος «std» παρέχει επαρκή ακρίβεια, ενώ η προσέγγιση «minmax» οδηγεί σε μεγαλύτερα λάθη.

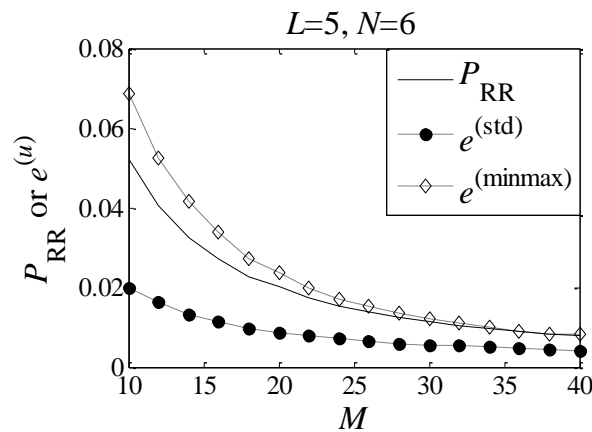




Εικόνα 85:  $P_{RR}$  and  $e^{(u)}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών για  $L=5$  και  $N=3$ , για τη GMM

### 6.4.3 Επίδραση των Ασαφών Κρίσεων

Παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον η διερεύνηση του υπολογισμού της  $P_{RR}$  από τα πραγματικά δεδομένα των χρηστών, υποθέτοντας ότι οι κρίσεις των ειδικών θα εκπροσωπούνται με ασαφείς αριθμούς εναλλακτικά της κλίμακας του Saaty, όπως αναφέρεται στην υποενότητα 2.5. Για αυτό το σκοπό, εφαρμόζεται το πλαίσιο προσέγγισης της Εικόνα 81, με τη διαφορά ότι οι πίνακες έχουν πλέον αντικατασταθεί από τις ασαφείς επεκτάσεις τους και τα βάρη υπολογίζονται με ένα ασαφή τρόπο, όπως συζητήθηκε προηγουμένως. Και σε αυτήν την περίπτωση, η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης από τα πραγματικά δεδομένα των χρηστών μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τόσο τη μέθοδο «minmax» όσο και την «std». Το μοντέλο αβεβαιότητας έχει τροποποιηθεί προκειμένου να ενσωματώσει τις ασαφείς αποφάσεις στη γνώμη των εμπειρογνομόνων κατά τη δημιουργία των πινάκων  $R^{(l)}$ , όπου τα στοιχεία  $R_{ij}^{(l)}$  είτε επιλέγονται ομοιόμορφα στο διάστημα  $[D_{ij}^l, U_{ij}^l]$  στην περίπτωση της «minmax», είτε ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή, που καθορίζεται από την μέση τιμή  $\mu_{ij}$  και την τυπική απόκλιση  $\sigma_{ij}$  για τη μέθοδο «std». Στην Εικόνα 86, παρουσιάζονται οι τιμές των  $e^{(std)}$  και  $e^{(minmax)}$  στην περίπτωση όπου  $L=5$  και  $N=6$ . Σύμφωνα με τα εν λόγω αποτελέσματα εξάγονται παρόμοια συμπεράσματα για την εκτίμηση της  $P_{RR}$  από τα πραγματικά δεδομένα των χρηστών στην περίπτωση των ασαφών αποφάσεων. Είναι προφανές ότι είτε με την εφαρμογή της συμβατικής PWC είτε της ασαφούς τριγωνικής αναπαράστασης των PWC αποφάσεων, η μέθοδος «std» επικρατεί έναντι της «minmax» για την εκτίμηση της  $P_{RR}$  από τα πραγματικά δεδομένα των χρηστών.



**Εικόνα 86:**  $P_{RR}$  and  $e^{(u)}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών στην περίπτωση των ασαφών κρίσεων

## 6.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο, προτάθηκε και εφαρμόστηκε ένα μοντέλο αβεβαιότητας για την αντιμετώπιση δύο σημαντικών ζητημάτων που αφορούν την πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης στις συγκρίσεις ανά ζεύγη. Το πρώτο υπό μελέτη θέμα αφορά το πώς αυτή η πιθανότητα μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των εμπειρογνομώνων που συμμετέχουν στις έρευνες. Τα αποτελέσματα υπαγορεύουν ότι δεν υπάρχει μεγάλο κέρδος στην τιμή της  $P_{RR}$  από την αύξηση του αριθμού των εμπειρογνομώνων πέραν των 15, ακόμη και αν το επίπεδο αβεβαιότητας είναι μεγάλο. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία των διαταραχών φάνηκε ότι η σύγκλιση της  $P_{RR}$  σε σχέση με τον αριθμό των ειδικών δεν εξαρτάται σημαντικά από τα στατιστικά χαρακτηριστικά της αβεβαιότητας. Παράλληλα, αποδείχτηκε αριθμητικά ότι η επιλογή της κλίμακας συγκρίσεων ανά ζεύγη καθώς και της μεθόδου υπολογισμού των βαρών δεν επηρεάζει σημαντικά τη σύγκλιση της  $P_{RR}$ . Το δεύτερο θέμα αφορά το πώς η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης μπορεί να εκτιμηθεί στην πράξη, από τα στοιχεία των πινάκων συγκρίσεων κατά ζεύγη μίας ομάδας εμπειρογνομώνων. Δύο εναλλακτικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τη στατιστική συμπεριφορά της αβεβαιότητας που προκαλείται από τις διαταραχές. Αποδείχτηκε ότι μία από αυτές παρέχει εύλογα καλή ακρίβεια και μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές της μεθόδου για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του αποτελέσματος. Το ενδιαφέρον είναι ότι τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από άλλες συνθήκες, όπως οι ασαφείς κρίσεις ανά ζεύγη, οι εναλλακτικές κλίμακες προτίμησης, οι μέθοδοι εκτίμησης του βάρους και η θεώρηση διαφορετικών επιπέδων αβεβαιότητας για κάθε εμπειρογνώμονα που ανήκει στην ίδια ομάδα.

## 7 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ ΑΝΑΣΤΡΟΦΗΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί στο κεφάλαιο 6, η μεθοδολογία των συγκρίσεων ανά ζεύγη αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων και κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική στην κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Δεδομένου ότι η μέθοδος βασίζεται σε ένα σύνολο συγκρίσεων που πραγματοποιούνται από μια ομάδα εμπειρογνομόνων και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εμπειρογνώμονες δεν συμμερίζονται την ίδια γνώμη ή δεν πραγματοποιούν τις συγκρίσεις κατά ζεύγη με τρόπο συνεπή, ενδέχεται να εισαχθεί αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα. Στο προηγούμενο κεφάλαιο (6) μελετήθηκε αριθμητικά η συμπεριφορά καθώς και η ταχύτητα σύγκλισης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης σε σχέση με το επίπεδο της αβεβαιότητας και το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνομόνων. Ωστόσο, είναι πολύ σημαντικό να προταθεί ένας τρόπος θωρητικής προσέγγισης του εν λόγω μεγέθους. Στο παρόν κεφάλαιο, προτείνεται ένα θεωρητικό μοντέλο εκτίμησης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης των τελικών βαρών σε σχέση με το επίπεδο της αβεβαιότητας που εμπεριέχεται στις κρίσεις των ειδικών. Αποδεικνύεται ότι η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης μπορεί να εκτιμηθεί θεωρητικά με τη χρήση της αθροιστικής συνάρτησης κανονικής κατανομής πολλών μεταβλητών (MVNCDF - multivariate normal cumulative distribution function). Παράλληλα, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των διαφόρων στατιστικών μοντέλων των διαταραχών, στους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη, οι οποίες σχετίζονται με την αβεβαιότητα.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι στο προηγούμενο κεφάλαιο προτάθηκε ένα μοντέλο αποτύπωσης της αβεβαιότητας που βασιζόταν στην ιδέα ότι οι κρίσεις των ειδικών κυμαίνονται τυχαία ανάμεσα σε δύο όρια, το κάτω και το άνω, σύμφωνα με το 6.2.2. Ωστόσο, στο παρόν κεφάλαιο, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ένα λιγότερο σύνθετο μοντέλο, το οποίο να αποτυπώνει βέβαια όσο το δυνατόν περισσότερο την αβεβαιότητα στις κρίσεις των ειδικών. Το εν λόγω απλοποιημένο εναλλακτικό μοντέλο χρησιμοποιείται προκειμένου να είναι δυνατός ο θεωρητικός υπολογισμός της MVNCDF, με τρόπο απλούστερο, που αφενός να αντικατοπτρίζει το τελικό αποτέλεσμα και αφετέρου να μην απαιτεί τη χρήση περιττών υπολογισμών.

### 7.1 Αποτύπωση του Προβλήματος

Είναι γεγονός ότι η διαδικασία συγκρίσεων ανά ζεύγη χρησιμοποιείται κατά κόρον σε μια πληθώρα τομέων, τόσο ως αναπόσπαστο κομμάτι ευρύτερων μεθοδολογιών λήψης απόφασης όσο και ως αυτόνομη μεθοδολογία, σύμφωνα άλλωστε με όσα αναλύθηκαν στο 6.1.

Μια σημαντική πτυχή της PWC είναι ότι το τελικό αποτέλεσμα ενδέχεται να υπονομεύεται από αβεβαιότητα, η οποία προέρχεται είτε επειδή οι εμπειρογνώμονες ενδέχεται να παράγουν μη συνεπείς αποφάσεις, καθώς συμπληρώνουν τους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη, είτε γιατί οι απόψεις τους μπορεί να διαφέρουν. Η μοντελοποίηση της αβεβαιότητας είναι θέμα υψίστης σημασίας και έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών έως τώρα, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 6.1 του προηγούμενου κεφαλαίου.

Παρά το γεγονός ότι έχουν μελετηθεί πολύ σημαντικά ζητήματα, υπάρχουν πολλά πρακτικά θέματα που σχετίζονται με την αβεβαιότητα, τα οποία παραμένουν άλυτα. Η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης  $P_{RR}$  αποτελεί συχνά ένα χρήσιμο μέτρο για την αξιολόγηση της επίδρασης της αβεβαιότητας, όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6. Στο προηγούμενο κεφάλαιο διερευνήθηκε η επίδραση της αβεβαιότητας σε σχέση με την

αύξηση του μεγέθους της ομάδας των εμπειρογνωμόνων, που συμμετέχουν στη διαδικασία συγκρίσεων ανά ζεύγη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο 6.3, αποδείχτηκε ότι παρά το γεγονός ότι η πιθανότητα αναστροφής της κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων, μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του μεγέθους της ομάδας των ειδικών που συμμετέχουν στη διαδικασία, ωστόσο η αύξηση του αριθμού των εμπειρογνωμόνων πέραν από μια συγκεκριμένη τιμή,  $M \cong 15$ , δεν επιφέρει σημαντική βελτίωση στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων, ακόμη και αν το επίπεδο αβεβαιότητας είναι μεγάλο. Σε πρακτικό επίπεδο, αυτό είναι πολύ σημαντικό δεδομένου ότι είναι συνήθως δύσκολο να εντοπίσει κανείς εμπειρογνώμονες με επαρκή γνώση και εξειδίκευση στον τομέα του εκάστοτε υπό μελέτη προβλήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ερευνητική προσπάθεια, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για την εκτίμηση της  $P_{RR}$  υπό το πρίσμα της αβεβαιότητας, βασίστηκε σε αριθμητικές προσομοιώσεις Monte Carlo. Ωστόσο, θα είχε ουσιαστική και πρακτική σημασία η ύπαρξη ενός θεωρητικού μοντέλου εκτίμησης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης. Σε αυτό το σημείο έρχεται να διαλευκάνει την κατάσταση η ερευνητική εργασία που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου, όπου προτείνεται ένα θεωρητικό πλαίσιο εκτίμησης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης, προκειμένου να αντικαταστήσει τη χρήση των αριθμητικών προσομοιώσεων. Παράλληλα, προτείνεται ένα εναλλακτικό μοντέλο εισαγωγής της αβεβαιότητας στους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη, βασιζόμενο στη θεωρία των διαταραχών. Χρησιμοποιώντας κατάλληλες στοχαστικές διαταραχές στους πίνακες συγκρίσεων PWC, υπολογίζεται η  $P_{RR}$  με βάση τη θεωρία διαταραχών του κύριου ιδιοδιανύσματος [45], υπό διαφορετικές παραδοχές. Αποδεικνύεται ότι η  $P_{RR}$  μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την αθροιστική συνάρτηση κανονικής κατανομής πολλών μεταβλητών (MVNCDF), βασιζόμενοι σε ένα μοντέλο αβεβαιότητας που δίνει τη δυνατότητα απλούστερου υπολογισμού της MVNCDF, αποτυπώνοντας παράλληλα την συμπεριφορά της αβεβαιότητας στις κρίσεις των ειδικών. Χρησιμοποιώντας αυτή τη θεωρητική προσέγγιση, προκύπτουν ενδιαφέροντα αποτελέσματα και επαληθεύεται ξανά το επαρκές μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνωμόνων  $M$  έως 15 άτομα. Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη διάφορα στατιστικά μοντέλα για την ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στις αξιολογήσεις PWC. Τα συμπεράσματα αποδεικνύεται ότι ισχύουν ανεξάρτητα από τον αριθμό των κριτηρίων, τη μέθοδο εκτίμησης των βαρών καθώς και τη στατιστική φύση της αβεβαιότητας.

Το παρόν κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής: Στο 7.2 αναλύεται ο τρόπος ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας στους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη. Επιπλέον, παρέχεται μια ανάλυση της θεωρίας διαταραχής, προκειμένου να εκτιμηθεί η επίπτωση της αβεβαιότητας στους πίνακες PWC. Παράλληλα, αναλύεται το μοντέλο εκτίμησης της  $P_{RR}$  χρησιμοποιώντας την MVNCDF. Στο 7.3, επιβεβαιώνεται το προτεινόμενο θεωρητικό μοντέλο ύστερα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα που προκύπτουν από αριθμητικές προσομοιώσεις Monte Carlo. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται το προτεινόμενο θεωρητικό μοντέλο για να εξεταστούν οι ιδιότητες σύγκλισης της PWC, δίνοντας έμφαση στην πρακτική αποτίμηση των επιπτώσεων των αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό, υπολογίζεται η ταχύτητα σύγκλισης της  $P_{RR}$ . Τέλος, κάποιες συμπερασματικές παρατηρήσεις και μελλοντικές προοπτικές παρουσιάζονται στο 7.4.

## 7.2 Περιγραφή του Μοντέλου

Στην ενότητα αυτή, εξετάζονται οι επιπτώσεις της αβεβαιότητας που προκαλούνται από τις διαταραχές στους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη, κάτω από ορισμένες συνθήκες και προϋποθέσεις. Παράλληλα, παρουσιάζεται το μοντέλο της αβεβαιότητας που προτείνεται στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

## 7.2.1 Μοντελοποίηση της Αβεβαιότητας στις Κρίσεις των Ειδικών

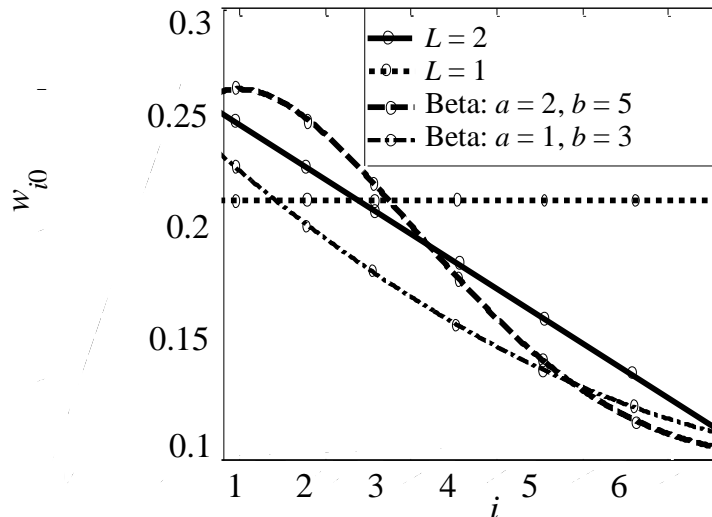
Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 6, η αβεβαιότητα στην PWC ενδέχεται να οφείλεται είτε σε ασυνέπειες στους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη είτε στο γεγονός ότι οι εμπειρογνώμονες δεν μπορούν να έχουν την ίδια άποψη σχετικά με την κατάταξη των κριτηρίων ή των εναλλακτικών λύσεων. Στην παρούσα ενότητα λαμβάνουμε υπόψη μας τη διαδικασία συγκρίσεων ανά ζεύγη χρησιμοποιώντας την κλίμακα αξιολόγησης εννέα επιπέδων (Πίνακας 21), η οποία αναφέρεται ως μέθοδος A, καθώς και την εναλλακτική ποσοστιαία κλίμακα αξιολόγησης, όπως αναφέρει ο Πίνακας 22.

. Ιδανικά, σε περίπτωση έλλειψης αβεβαιότητας, δηλαδή εάν όλοι οι εμπειρογνώμονες είχαν την ίδια γνώμη και διεξάγονταν απόλυτα συνεπείς συγκρίσεις, τότε όσον αφορά τη μέθοδο A, θα προέκυπταν τα ιδανικά βάρη  $W_p$  για τις εναλλακτικές λύσεις και οι πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη θα ήταν  $P_{ij}^{(m)} = P_{ij} = W_i / W_j$ . Για τη μέθοδο B, θεωρούμε ότι τα στοιχεία των πινάκων δίνονται από τις τιμές, που παρουσιάζει ο Πίνακας 21, που είναι πλησιέστερες στο  $W_i / W_j$ .

Στην περίπτωση που υπάρχουν αβεβαιότητες, είναι εύκολο να γίνει αντιληπτό ότι τα βάρη αναφοράς  $W_i$  πρέπει να είναι εκείνα που υπολογίζονται από μια πολύ μεγάλη ομάδα εμπειρογνομώνων (στην θεωρία  $M \rightarrow \infty$ ). Η κατανομή των ιδανικών βαρών  $W_i$  μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην  $P_{RR}$ , δεδομένου ότι η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης θα αυξηθεί όταν οι διαφορές μεταξύ των  $W_i$  είναι σχετικά μικρές. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορούμε να επιλέξουμε την κατάταξη των κριτηρίων  $C_i$ , έτσι ώστε  $W_{i-1} \geq W_i$  για  $1 \leq i \leq N$ , που σημαίνει ότι στην ιδανική περίπτωση, το κριτήριο  $C_{i-1}$  έχει μεγαλύτερη ή ίση σημασία σε σύγκριση με το κριτήριο  $C_i$ . Ορίζεται ως  $L$  ο λόγος μεταξύ του μέγιστου και του ελάχιστου βάρους  $L = \max\{W_i\} / \min\{W_i\}$ . Αυτή η αναλογία είναι ένα μέτρο της μη ομοιομορφίας των ιδανικών βαρών και με την παρουσία της αβεβαιότητας, αναμένεται ότι η  $P_{RR}$  θα αυξηθεί καθώς το  $L$  προσεγγίζει τη μονάδα. Υποθέτοντας για λόγους απλότητας ότι τα βάρη  $W_i$  βρίσκονται σε μια ευθεία γραμμή είναι εύκολο να δειχτεί ότι:

$$W_i = \frac{2}{N(L+1)} \left( L + (i-1) \frac{(1-L)}{(N-1)} \right) \quad (7.1)$$

Εναλλακτικά, τα αρχικά βάρη θα μπορούσαν επίσης να προσδιοριστούν από μια μη γραμμική κατανομή, όπως η κατανομή βήτα, δηλ.  $W_i = N_w i^{a-1} (1-i)^{b-1}$ , όπου ο παράγοντας κανονικοποίησης  $N_w$  επιλέγεται έτσι ώστε το άθροισμα των  $W_i$  να είναι ίσο με 1. Η Εικόνα 87 απεικονίζει μερικές από τις πιθανές γραμμικές και μη γραμμικές κατανομές για τα αρχικά βάρη  $W_i$ .



**Εικόνα 87: Διάφορες γραμμικές και μη γραμμικές κατανομές των αρχικών βαρών, συμπεριλαμβανομένης της κανονικής ( $L=1$ ) και της μη κανονικής γραμμικής διάταξης ( $L \neq 1$ ) καθώς και των Beta-κατανομημένων  $W_i$ .**

Σε αυτό το σημείο, εφόσον έχουν οριστεί τα αρχικά βάρη αναφοράς, μπορεί να αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να εισαχθούν οι αβεβαιότητες. Δεδομένου ότι οι εμπειρογνώμονες δεν έχουν όλοι την ίδια άποψη, μπορούμε να ορίσουμε τα αρχικά επιμέρους βάρη  $W_i^{(m)}$  για κάθε εμπειρογνώμονα ως εξής:

$$W_i^{(m)} = W_i (1 + \Delta W_i^{(m)}) \quad (7.2)$$

όπου για όλους τους εμπειρογνώμονες οι διαταραχές  $\Delta W_i^{(m)}$  μπορούν να θεωρηθούν ταυτόσημα κατανομημένες και ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές (IID) με μέση τιμή το μηδέν. Οι τυχαίες διαταραχές των αρχικών βαρών  $\Delta W_i^{(m)}$  είναι διαφορετικές για κάθε εμπειρογνώμονα, δεδομένου ότι οι συμμετέχοντες δεν έχουν όλοι την ίδια άποψη. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κάθε συμμετέχων ολοκληρώνει τις συγκρίσεις ανά ζεύγη χωρίς απαραίτητα να χρειάζεται να παράγει ένα συνεπή πίνακα. Κατά συνέπεια, θα πρέπει επίσης να προστεθεί μια τυχαία διαταραχή, που να περιγράφει την απόκλιση των στοιχείων του πίνακα συγκρίσεων από την απόλυτα συνεπή μορφή του. Για  $i < j$ , υποθέτουμε ότι τα στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{P}^{(m)} = [P_{ij}^{(m)}]$  προσδιορίζονται από:

$$P_{ij}^{(m)} = \frac{W_i^{(m)}}{W_j^{(m)}} (1 + \Delta W_{ij}^{(m)}) \quad (7.3)$$

Σύμφωνα με την (7.3), τα στοιχεία του πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη  $\mathbf{P}^{(m)}$  λαμβάνονται διαταράσσοντας τον αρχικό ιδανικό πίνακα  $\mathbf{P} = [P_{ij}]$  κατά  $\Delta \mathbf{P}^{(m)}$ , δηλ.  $\mathbf{P} + \Delta \mathbf{P}^{(m)}$ , όπου τα στοιχεία  $\Delta \mathbf{P}^{(m)} = [\Delta P_{ij}^{(m)}]$  καθορίζονται από:

$$\Delta P_{ij}^{(m)} = \frac{W_i^{(m)}}{W_j^{(m)}} (1 + \Delta W_{ij}^{(m)}) - \frac{W_i}{W_j} \quad (7.4)$$

Η εισαγωγή διαταραχών στους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη, είναι ένας συνηθισμένος τρόπος ενσωμάτωσης της αβεβαιότητας [45] [47], [38]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η (7.2) δεν εγγυάται ότι το άθροισμα των βαρών  $\sum_i W_i^{(m)}$  είναι ίσο με 1, αλλά σύμφωνα με την εξίσωση (7.4), τα στοιχεία  $\mathbf{P}^{(m)}$  δεν εξαρτώνται από την κανονικοποίηση των  $W_i^{(m)}$ . Για  $i > j$ , θέτουμε  $P_{ij}^{(m)} = 1/P_{ji}^{(m)}$ , σύμφωνα με τη μέθοδο συγκρίσεων ανά ζεύγη (2.3.1.2). Στην (7.3), τα  $\Delta W_{ij}^{(m)}$  είναι οι διαταραχές που περιγράφουν τη σχετική απόκλιση των

στοιχείων του πίνακα  $\mathbf{P}^{(m)}$  από την ιδανική του απόλυτα συνεπή μορφή και ελλείπει οποιασδήποτε ασυνέπειας ( $\Delta w_{ij}^{(m)}=0$ ), τα βάρη, που υπολογίζονται με την (2.10), είναι απλά  $w_i^{(m)}=W_i^{(m)}$ . Οι διαταραχές  $\Delta w_{ij}^{(m)}$  μπορούν επίσης να θεωρηθούν IID με μηδενική μέση τιμή. Αναμένεται ότι η στατιστική φύση των  $\Delta w_i^{(m)}$  και των  $\Delta w_{ij}^{(m)}$  θα επηρεάσει την σύγκλιση της PWC. Στην πλειοψηφία των προσομοιώσεων, που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου, η κατανομή τους λαμβάνεται ομοιόμορφη στο εσωτερικό των διαστημάτων  $[-s/2, s/2]$  και  $[-s_w/2, s_w/2]$ , αντίστοιχα, με διακύμανση  $\sigma^2=\langle(\Delta w_{ij}^{(m)})^2\rangle=s^2/12$  και  $\sigma_w^2=\langle(\Delta w_i^{(m)})^2\rangle=s_w^2/12$ . Τα  $s$  και  $s_w$  αναφέρονται ως η ένταση των διαταραχών  $\Delta w_{ij}^{(m)}$  και  $\Delta w_i^{(m)}$  αντίστοιχα. Επιπρόσθετα για να διερευνηθεί η σταθερότητα του μοντέλου υπό διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά, λαμβάνονται υπόψη, επίσης, συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας μορφής U και Bell για τις διαταραχές, όπως αναλύεται στις επόμενες ενότητες. Η επίδραση των στατιστικών ιδιοτήτων των διαταραχών αναλύεται θεωρητικά στην υποενότητα 7.2.2.

Το εν λόγω πλαίσιο για την περιγραφή της αβεβαιότητας προτείνεται εναλλακτικά του μοντέλου αβεβαιότητας που περιγράφεται στο κεφάλαιο 6. Δεδομένου ότι σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η αποτύπωση ενός μοντέλου θεωρητικής εκτίμησης της  $P_{RR}$ , με τρόπο κατανοητό που να αντικατοπτρίζει όσο το δυνατόν τη συμπεριφορά στις κρίσεις των ειδικών προτείνεται ένας εναλλακτικός τρόπος μοντελοποίησης της αβεβαιότητας που θα δίνει την δυνατότητα απλούστερων υπολογισμών και αποφυγής περιπτώσεων εκτιμήσεων. Πράγματι, με τον παρόντα τρόπο αποτύπωσης της αβεβαιότητας στους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη, είναι σχετικά απλούστερος ο υπολογισμός της MVNCDF μέσω του υπολογισμού του πίνακα συνδιακύμανσης (covariance matrix), όπως θα παρουσιαστεί στην ενότητα 7.2.4.

## 7.2.2 Θεωρητική Ανάλυση

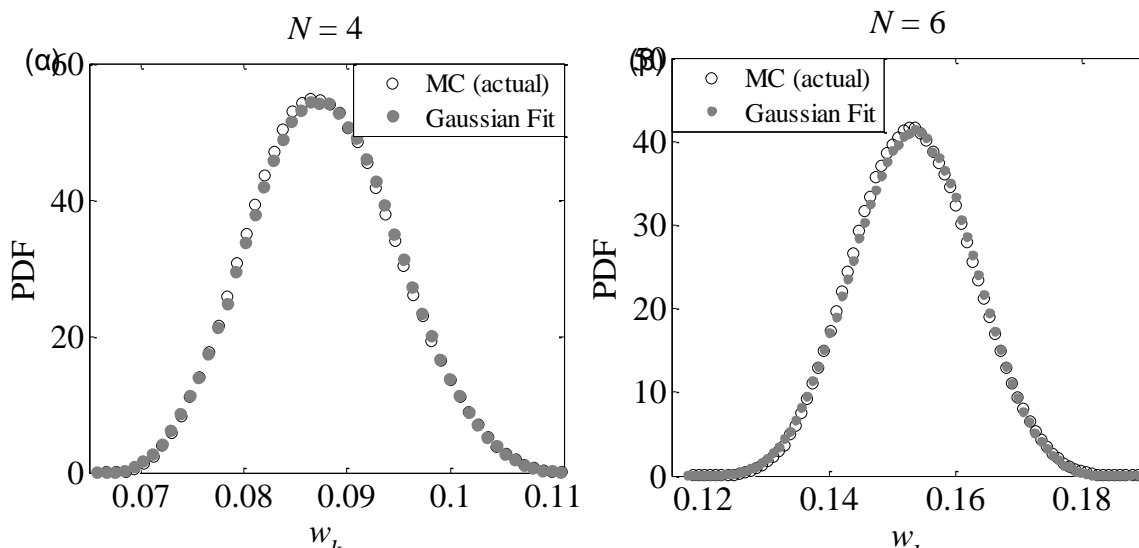
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο 6.2.1 και αφορούν τη διαταραχή του κυρίου ιδιοδιανύσματος  $\Delta \mathbf{x}_1^{(m)}$  ενός πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη, αποδεικνύεται ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά των διαταραχών αβεβαιότητας  $\Delta P_{ij}^{(m)}$  αναμένεται να επηρεάσουν κυρίως τη διακύμανση των Gaussian κατανεμημένων βαρών  $w_k^{(m)}$  και να έχουν μικρότερο αντίκτυπο στην πραγματική στατιστική συμπεριφορά τους (π.χ. στην PDF τους). Αυτό σημαίνει ότι, σε μια πρώτη προσέγγιση, τα συμπεράσματα που εξάγονται για την εκτίμηση της  $P_{RR}$ , στην περίπτωση των ομοιόμορφα κατανεμημένων διαταραχών (όπως προτείνεται στο 7.2.1) δεν θα αλλάξουν σημαντικά όταν λαμβάνονται υπόψη διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά για τις διαταραχές αβεβαιότητας.

Η Gaussian συμπεριφορά αναμένεται και στην περίπτωση της μεθόδου GM. Ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση εφαρμόζεται στα λογαριθμισμένα βάρη  $z_k=\ln(w_k)$  και όχι στα γραμμικά βάρη  $w_k^{(m)}$ . Πράγματι αντικαθιστώντας την (2.12) στην (2.17) και λαμβάνοντας το λογάριθμο προκύπτει ότι:

$$z_k = \ln w_k = \frac{1}{NM} \sum_{m=1}^M \sum_{z=1}^N \ln P_{kz}^{(m)} = \frac{1}{NM} \sum_{m=1}^M \sum_{z=1}^N \left\{ \frac{W_k^{(m)}}{W_z^{(m)}} \left( 1 + \Delta w_{kz}^{(m)} \right) \right\} \quad (7.5)$$

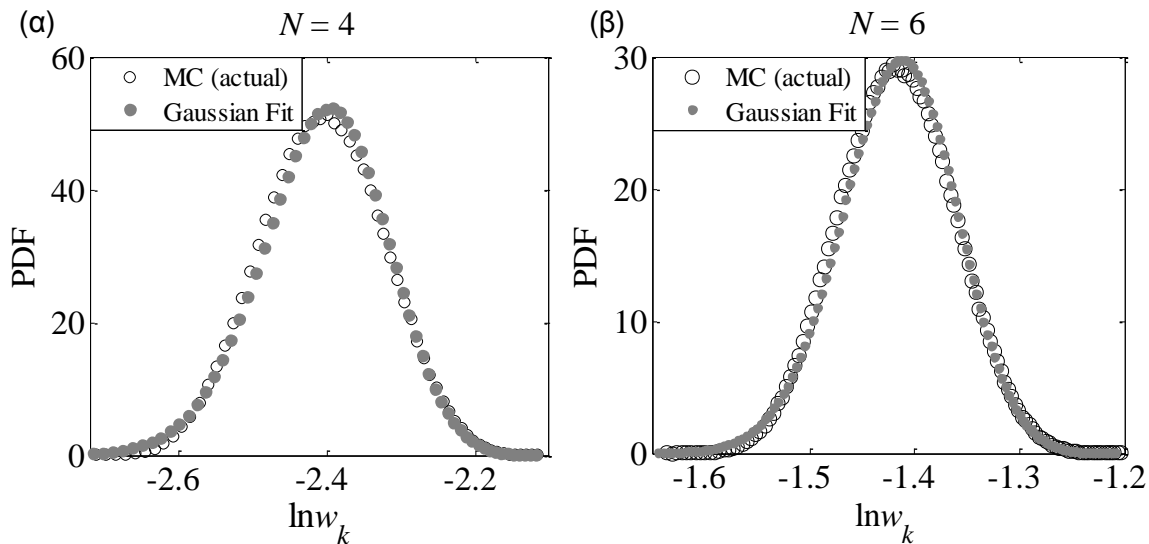
Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση τα λογαριθμισμένα βάρη  $w_k$  είναι το άθροισμα των  $NM$  τυχαίων μεταβλητών, οι περισσότερες από τις οποίες είναι ανεξάρτητες και συνεπώς τα  $z_k$  θα είναι ασυμπτωτικά Gaussian τυχαίες μεταβλητές. Παρόλο που τα προαναφερθέντα συμπεράσματα προέκυψαν από την περίπτωση όπου  $NM \rightarrow \infty$ , μπορούμε να δείξουμε αριθμητικά ότι το σχήμα των PDF για τα  $w_k$  και τα  $z_k$  στην περίπτωση της EV και της GM είναι Gaussian για πεπερασμένες τιμές των  $N$  και  $M$ .

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 88 και στην Εικόνα 90 για ένα τυπικό βάρος θεωρώντας ότι  $N=4$  ή  $N=6$  και  $M=15$ ,  $N_{MC}=10^5$ ,  $L=2$ ,  $s_w=0$ ,  $s=1.5$  για την περίπτωση των EV και GM αντίστοιχα. Η εικόνα δείχνει τις PDFs που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας είτε τη EV είτε τη GM, ενώ παράλληλα απεικονίζεται η πλησιέστερη Gaussian κατανομή στις προαναφερθείσες. Είναι προφανές ότι στην περίπτωση της EV, η PDF των μέσων βαρών  $w_k$  περιγράφεται όντως πολύ καλά από μία Gaussian κατανομή και το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση των  $z_k$  στην Εικόνα 90. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν για τα υπόλοιπα βάρη καθώς και για άλλες τιμές των  $N, M, s$ . Το γεγονός ότι η PDF των βαρών ή των λογαριθμισμένων βαρών είναι σχεδόν Gaussian επιβαιώνεται από το θεώρημα κεντρικού ορίου, όπως αναλύθηκε παραπάνω, και δείχνει ότι οι στατιστικές των διαταραχών θα επηρεάσουν κυρίως τις δύο παραμέτρους που καθορίζουν την κανονική κατανομή, δηλαδή τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση.



Εικόνα 88: PDFs ενός αντιπροσωπευτικού βάρους  $w_k$  που λαμβάνεται από την προσομοίωση σύμφωνα με το κύριο ιδιοδιάνυσμα  $\chi_1^{(m)}$  του διαταραγμένου πίνακα  $\mathbf{P}^{(m)} = \mathbf{P} + \Delta\mathbf{P}^{(m)}$ . Παράλληλα, απεικονίζεται η πλησιέστερη Gaussian κατανομή στην πρώτη περίπτωση με βάση τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η ένταση των διαταραχών είναι  $s=1.5$  και ο αριθμός των κριτηρίων είναι (a)  $N=4$ , (b)  $N=6$ .

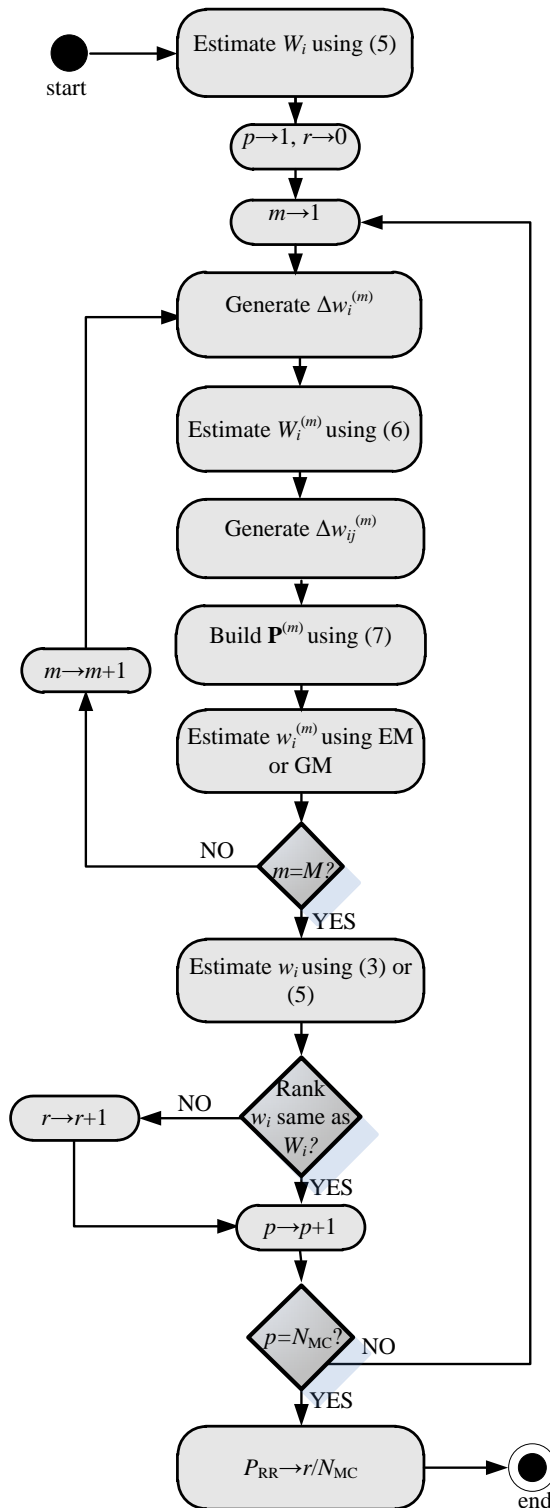




**Εικόνα 89:** PDFs ενός αντιπροσωπευτικού λογαριθμισμένου βάρους  $\ln w_k$  που λαμβάνεται από την προσομοίωση σύμφωνα με τα πραγματικά βάρη  $\ln w_k^{(m)}$  του διαταραγμένου πίνακα  $\mathbf{P}^{(m)} = \mathbf{P} + \Delta \mathbf{P}^{(m)}$ . Παράλληλα, απεικονίζεται η πλησιέστερη Gaussian κατανομή στην πρώτη περίπτωση με βάση τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η ένταση των διαταραχών είναι  $s=1.5$  και ο αριθμός των κριτηρίων είναι (a)  $N=4$ , (b)  $N=6$ .

### 7.2.3 Αριθμητική Εκτίμηση της $P_{RR}$

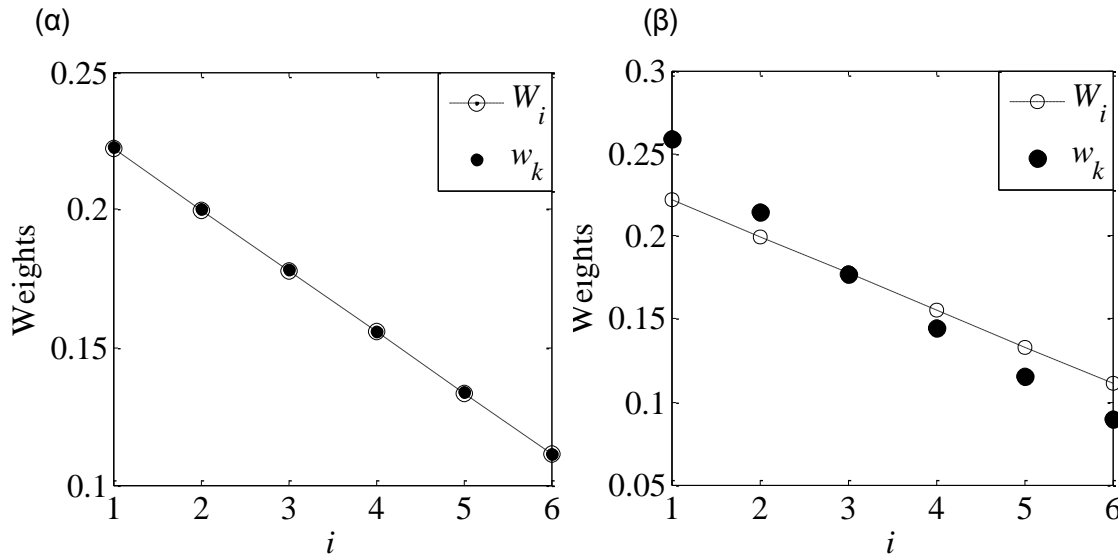
Στην παρούσα υποενότητα αναλύεται η αριθμητική μέθοδος εκτίμησης της  $P_{RR}$  με τη χρήση προσομοιώσεων Monte Carlo. Η εν λόγω προσέγγιση θα αποδειχθεί χρήσιμη για την επιβεβαίωση του θεωρητικού μοντέλου εκτίμησης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης, που προτείνεται στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου. Σύμφωνα, λοιπόν, με την αριθμητική προσέγγιση, σε κάθε επανάληψη πρώτα υπολογίζονται τα βάρη  $W_i^{(m)}$  για μια ομάδα  $M$  εμπειρογνομόνων χρησιμοποιώντας την (7.2), δεδομένου ότι τα  $\Delta w_{ij}^{(m)}$  επιλέγονται τυχαία. Στη συνέχεια, παράγονται οι διαταραχές  $\Delta w_{ij}^{(m)}$  και δημιουργούνται οι αντίστοιχοι πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη  $\mathbf{P}^{(m)}$  σύμφωνα με την (7.3). Δεδομένου ότι έχουν καθοριστεί τα στοιχεία των  $\mathbf{P}^{(m)}$  εφαρμόζεται η μέθοδος υπολογισμού των βαρών σύμφωνα με την PWC, όπως αναλύεται στο 2.3.1.2., προκειμένου να υπολογιστούν τα βάρη  $w_i^{(m)}$  και στη συνέχεια τα μέσα βάρη  $w_i$  χρησιμοποιώντας την (2.17) και ελέγχοντας κάθε φορά τότε συμβαίνει αντιστροφή κατάταξης. Επαναλαμβάνοντας αυτή τη διαδικασία για πολλές επαναλήψεις MC (έστω  $\geq 10^4$ ), μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η  $P_{RR}$ . Στην Εικόνα 90 παρουσιάζεται αναλυτικά το αντίστοιχο διάγραμμα δραστηριοτήτων, που περιγράφει την αριθμητική διαδικασία.



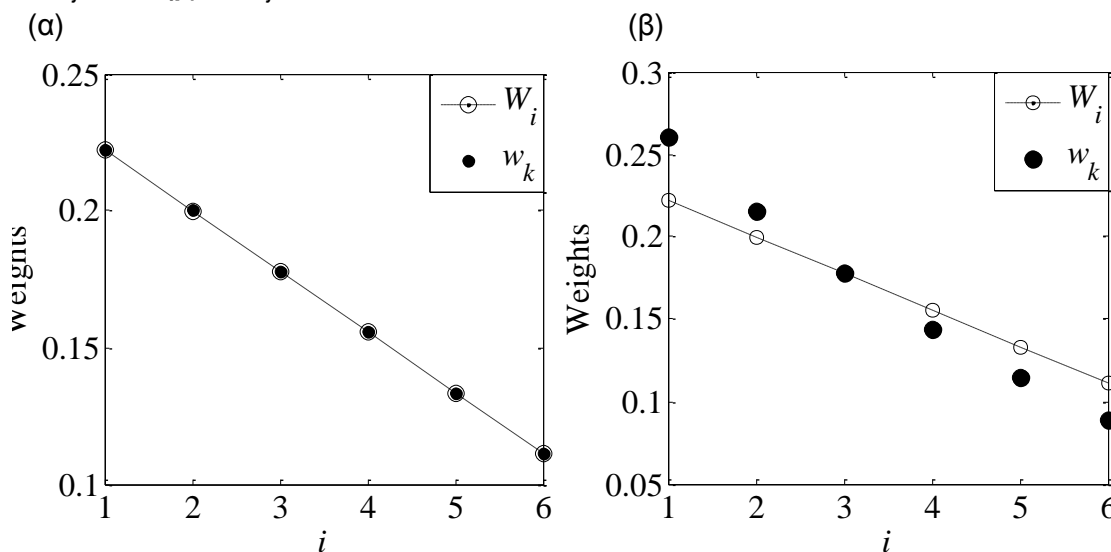
**Εικόνα 90: Διάγραμμα δραστηριοτήτων περιγραφής αριθμητικής διαδικασίας**

Σε αυτό το σημείο αξίζει να γίνει μια εκτενέστερη αναφορά σε κάποιες από τις υποθέσεις και παραδοχές που λήφθηκαν υπόψη στο πλαίσιο του υπό μελέτη προβλήματος. Όσον αφορά τη μέση τιμή των  $\Delta w_i^{(m)}$  είναι φυσικό να υποθέσουμε ότι  $\langle \Delta w_i^{(m)} \rangle = 0$ , εναλλακτικά από μια μεγάλη ομάδα εμπειρογνομόνων θα προέκυπταν διαφορετικά βάρη από τα  $W_i$ . Ο λόγος για την επιλογή του  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0$  είναι παρόμοιος. Πιο συγκεκριμένα, αν όλοι οι ειδικοί είχαν την ίδια άποψη, δηλαδή  $W_i^{(m)} = W_i$ , τότε τα βάρη που παράγονται από μια μεγάλη ομάδα εμπειρογνομόνων θα έπρεπε να ίσα με τα  $W_i$ . Προκειμένου να επιβεβαιωθεί αυτό, η Εικόνα 91 (α) και η Εικόνα 92 (α)

παρουσιάζουν τα βάρη από τους πίνακες για τις μεθόδους EV και GM, στην περίπτωση όπου  $M=10^3$ ,  $s=2$ ,  $N=6$ ,  $L=2$  και  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0$ . Για αυτήν την εκτίμηση πραγματοποιούνται  $10^6$  MC επαναλήψεις. Όπως φαίνεται στις εικόνες, τα βάρη από ένα σύνολο  $10^3$  ειδικών  $w_i$  είναι σχεδόν ταυτόσημα με τα  $W_i$ . Μπορούμε συνεπώς να συμπεράνουμε ότι όταν  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0$ , τα βάρη  $w_i$  συγκλίνουν (έστω και αργά) στις ιδανικές τους τιμές  $W_i$  τόσο για την EV όσο και για την GM.



Εικόνα 91: Τα βάρη  $w_i$  που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας την EV για  $N=6$ ,  $M=10^3$  και (α)  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0$  (β)  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0.4$ .



Εικόνα 92: Τα βάρη  $w_i$  που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας την GM για  $N=6$ ,  $M=10^3$  και (α)  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0$  (β)  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle = 0.4$ .

Η Εικόνα 91 (β) και η Εικόνα 92 (β) δείχνουν τα βάρη που λαμβάνονται από τους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη όταν το  $M = 10^3$ , στην περίπτωση όπου  $s = 2$ ,  $N = 6$ ,  $L = 2$  και το  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle$  είναι μη μηδενικό και συγκεκριμένα ίσο με 0,4, για EV και GM αντίστοιχα. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον το γεγονός ότι δεν υπάρχει καμία αισθητή διαφορά μεταξύ των  $w_i$  και  $W_i$  στη συγκεκριμένη περίπτωση (το  $w_k$  αντιστοιχεί σε μία μεγαλύτερη τιμή του  $L$ ). Πιο συγκεκριμένα, ένα θετικό  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle$  έχει ως αποτέλεσμα να καθίστανται τα βάρη περισσότερο διακριτά. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό από την (7.3), δεδομένου ότι οι εμπειρογνώμονες φαίνεται να είναι περισσότερο

προκατειλημμένοι όταν το  $\langle \Delta w_{ij}^{(m)} \rangle$  είναι θετικό. Συνάγεται επομένως η διαπίστωση ότι θα πρέπει οι διαταραχές να έχουν μηδενική μέση τιμή, γιατί διαφορετικά τα βάρη που υπολογίζονται στο όριο μιας πολύ μεγάλης ομάδας εμπειρογνωμόνων ( $M \rightarrow \infty$ ) δεν θα συγκλίνουν με τα βάρη που υπολογίζονται από τον ιδανικό πίνακα  $\mathbf{P}$ , αφού ο λόγος  $L$  αλλάζει σημαντικά και ως εκ τούτου, οι αρχικές παραδοχές δεν πληρούνται. Με άλλα λόγια, αν οι διαταραχές  $\Delta w_{ij}^{(m)}$  δεν έχουν μέση τιμή μηδέν, τότε τα βάρη  $w_k$  που υπολογίζονται από μια πολύ μεγάλη ομάδα εμπειρογνωμόνων στην ουσία θα αντιστοιχούν στα  $W_i$  που λαμβάνονται για μια διαφορετική τιμή του  $L$ .

#### 7.2.4 Θεωρητική Εκτίμηση της $P_{RR}$

Όπως παρουσιάστηκε στο 7.2.1, τα αρχικά βάρη  $W_k$  μπορούν να επιλεχθούν έτσι ώστε  $W_{k-1} \geq W_k$  για  $2 \leq k \leq N$ . Σε περίπτωση μη αναστροφής της κατάταξης, κάποιος θα περίμενε ότι  $w_{k-1} \geq w_k$ . Οι μέσες διαταραχές των βαρών προσδιορίζονται ως  $\delta w_k = M^{-1} \sum_m \delta w_k^{(m)}$  και στην απουσία οποιασδήποτε αναστροφής κατάταξης ισχύει ότι  $W_1 + \delta w_1 > W_2 + \delta w_2 > \dots > W_N + \delta w_N$ . Η πιθανότητα της μη αντιστροφής της κατάταξης  $P_n$  ορίζεται, επομένως, ως  $P_n = P(W_2 - W_1 > \delta w_2 - \delta w_1, \dots, W_{N-1} - W_N > \delta w_{N-1} - \delta w_N)$ , ενώ η πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης είναι απλά  $P_{RR} = 1 - P_n$ . Δεδομένου ότι τα  $\delta w_k^{(m)}$  και  $y_k = \delta w_k - \delta w_{k-1}$  ακολουθούν Gaussian κατανομή (σύμφωνα με την υποενοότητα 7.2.2), η  $P_{RR}$  μπορεί να προσεγγιστεί από την MVNPDF, εφόσον ο πίνακας συνδιακύμανσης και οι μέσες τιμές των  $y_k$  προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας τις μεθόδους που αναλύονται στο [239].

Αναλυτικότερα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η πυκνότητα της κατανομής των  $y_k$  ορίζεται ως εξής:

$$f(y_2, \dots, y_N) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \det(\mathbf{C})}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu}) \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{y} - \boldsymbol{\mu})^T \right\} \quad (7.6)$$

όπου  $\mathbf{y} = (y_2, y_3, \dots, y_N)$ , ως  $\boldsymbol{\mu}$  ορίζεται το διάνυσμα των μέσων τιμών  $\boldsymbol{\mu} = (\langle y_2 \rangle, \langle y_3 \rangle, \dots, \langle y_N \rangle)$  και  $\mathbf{C}$  ο πίνακας συνδιακύμανσης έτσι ώστε  $C_{\kappa\mu} = \text{COV}(y_\kappa, y_\mu)$ .

Με βάση τα παραπάνω, μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα μη αναστροφής κατάταξης ως εξής:

$$P_n = \int_{-\infty}^{W_1 - W_2} dx_1 \int_{-\infty}^{W_2 - W_3} dx_2 \dots \int_{-\infty}^{W_{N-1} - W_N} dx_{N-1} f(x_1, \dots, x_{N-1}) \quad (7.7)$$

Προκειμένου, λοιπόν, να εκτιμηθεί η MVNPDF, θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί ο πίνακας συνδιακύμανσης  $C_{\kappa\mu}$ , λαμβάνοντας υπόψη ότι  $y_k = \delta w_k - \delta w_{k-1}$  και επομένως  $\langle y_\kappa \rangle = \langle \delta w_\kappa \rangle - \langle \delta w_{\kappa-1} \rangle$ , ως εξής:

$$C_{\kappa\mu} = \langle y_\kappa y_\mu \rangle - \langle y_\kappa \rangle \langle y_\mu \rangle = c_{\kappa\mu} - c_{\kappa, \mu-1} - c_{\kappa-1, \mu} + c_{\kappa-1, \mu-1} - \langle y_\kappa \rangle \langle y_\mu \rangle \quad (7.8)$$

όπου  $c_{ij} = \langle \delta w_i \delta w_j \rangle$  και οι ακέραιοι  $i, j, \kappa, \mu \in [1, N]$ . Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι  $\delta w_k = M^{-1} \sum_m \delta w_k^{(m)}$  τότε μπορεί εύκολα να αποδειχτεί ότι:

$$\langle \delta w_k \rangle = \sum_{r=2}^N x_{rk} \sum_{p,q} \frac{W_p}{W_q} (f_5 - 1) \frac{v_{pr} x_{q1}}{\mathbf{v}_k^T \mathbf{x}_k \lambda_1} \quad (7.9)$$

Παράλληλα, τα στοιχεία του βοηθητικού πίνακα  $\mathbf{c}=[c_{ij}]$  της εξίσωσης (7.10) υπολογίζονται ακολούθως, βασιζόμενοι στη σχέση της διαταραχής του κυρίου ιδιοδιανύσματος (6.2):

$$c_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{k=2}^N x_{ki} \sum_{l=2}^N x_{lj} \left\langle \sum_{z=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{v_{zk} \Delta P_{zn} x_{n1}}{\mathbf{v}_k^T \mathbf{x}_k (\lambda_l - \lambda_k)} \cdot \sum_{p=1}^N \sum_{q=1}^N \frac{v_{pl} \Delta P_{pq} x_{q1}}{\mathbf{v}_l^T \mathbf{x}_l (\lambda_l - \lambda_l)} \right\rangle$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{k=2}^N x_{ki} \sum_{l=2}^N x_{lj} \sum_{z,n,p,q=1}^N \frac{\langle \Delta P_{zn} \Delta P_{pq} \rangle v_{zk} x_{n1} v_{pl} x_{q1}}{(\mathbf{v}_k^T \mathbf{x}_k)(\mathbf{v}_l^T \mathbf{x}_l)(\lambda_l - \lambda_k)(\lambda_l - \lambda_l)}$$
(7.10)

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση για να προβούμε σε περαιτέρω υπολογισμούς θα πρέπει καταρχάς να υπολογίσουμε τη μέση τιμή του γινομένου των διαταραχών των πινάκων  $\langle \Delta P_{zn} \Delta P_{pq} \rangle$ . Προς αυτήν την κατεύθυνση διακρίνουμε διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με τα  $z, n, p, q$ . Αναλυτικότερα, έστω το  $l_i$  είναι το σύνολο των τετραπλών  $(z, n, p, q)$  τότε για κάθε α)  $n=q$  και όλα τα άλλα στοιχεία διαφορετικά, εάν  $i=1$ , β)  $z=q$ ,  $n=p$  και  $z \neq n$  εάν  $i=2$ , γ) όλα τα στοιχεία διαφορετικά για  $i=3$ , δ)  $n=p$  και τα υπόλοιπα στοιχεία διαφορετικά για  $i=4$ , ε)  $z=p$ ,  $n=q$  και  $z \neq n$ , εάν  $i=5$ , στ)  $z=p$ , ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία διαφορετικά για  $i=6$  και τέλος ζ)  $z=q$  και όλα τα άλλα διαφορετικά για  $i=7$  ισχύουν τα εξής:

$$\langle \Delta P_{zn} \Delta P_{zq} \rangle = \begin{cases} l_1 \rightarrow (f_7 - 2f_5 + 1) \frac{W_z W_p}{W_n^2}, \\ l_2 \rightarrow (2 - f_5 (f_6 + 1)) \\ l_3 \rightarrow (f_5 - 1)^2 \frac{W_z W_p}{W_n W_q}, \\ l_4 \rightarrow (1 - f_5) \frac{W_z}{W_q} \\ l_5 \rightarrow (f_4 - 2f_5 + 1) \frac{W_z^2}{W_n^2} \\ l_6 \rightarrow (f_1 f_5^2 - 2f_5 + 1) \frac{W_z^2}{W_n W_q} \\ l_7 \rightarrow (1 - f_5) \frac{W_p}{W_n} \end{cases}$$
(7.11)

Επίσης ορίζονται  $f_1=1+s_w^2/12$ ,  $f_2=1+s^2/12$ ,  $f_3=(1-1/2s_w)^{-1}-(1-1/2s_w)^{-1}$ ,  $f_4=s_w^{-1}f_3f_2f_1$ ,  $f_7=s_w \log f_3$ , ενώ:

$$f_5 = s_w^{-1} \log \left( (1 + 0.5s_w)(1 - 0.5s_w)^{-1} \right)$$
(7.12)

$$f_6 = s^{-1} \log \left( (1 + 0.5s)(1 - 0.5s)^{-1} \right)$$
(7.13)

Κάνοντας τις πράξεις στην εξίσωση (7.10) σύμφωνα με τα στοιχεία της (7.11), μπορεί να αποδειχτεί ύστερα από αλγεβρικούς υπολογισμούς ότι:

$$C_{ij} = \frac{1}{M\lambda_{l_1}^2} \sum_{k=2}^N x_{ki} \sum_{l=2}^N \frac{x_{lj}}{F_{kl}} E_{kl} \quad (7.14)$$

Όπου το  $E_{kl}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} E_{kl} = & N^2 (f_7 - 2f_5 + 1) \sum_{l_1} W_z W_p \Omega_{zp}^{(kl)} + (2 - f_5 (f_6 + 1)) \sum_{l_2} G_{zn}^{(kl)} \\ & + N^2 (f_5 - 1)^2 \sum_{l_3} W_z W_p \Omega_{zp}^{(kl)} + N(1 - f_5) \sum_{l_4} W_p \Omega_{zq}^{(kl)} \\ & + N(f_4 - 2f_5 + 1) \sum_{l_5} W_z^2 \Omega_{zz}^{(kl)} + N(f_1 f_5^2 - 2f_5 + 1) \sum_{l_6} W_m^2 \Omega_{zp}^{(kl)} \\ & + N(1 - f_5) \sum_{l_7} W_z \Omega_{znp}^{(kl)} \end{aligned} \quad (7.15)$$

όπου  $\Omega_{ij}^{(kl)} = v_{ik} v_{jl}$ ,  $\Omega_{jv}^{(kl)} = v_{ik} x_{j1} v_{v1}$ ,  $G_{ij}^{(kl)} = v_{ik} x_{j1} v_{ij} x_{i1}$  και  $F_{kl} = (v_k \cdot x_k^T)(v_l \cdot x_l^T)$ .

Οι εξισώσεις (7.9)-(7.15) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τον πίνακα συνδιακύμανσης που χρησιμεύει στον αριθμητικό υπολογισμό της MVNPDF [239], η οποία σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως παρέχει μια εκτίμηση της  $P_n$  και επομένως η  $P_{RR}$  υπολογίζεται ως  $1 - P_n$ . Για τον υπολογισμό της MVNPDF χρησιμοποιείται η αντίστοιχη συνάρτηση στο MATLAB, η οποία λαμβάνει ως παραμέτρους τα  $\Delta Y$ ,  $\mu$  και  $C$ .

Με παρόμοιο τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε την  $P_{RR}$  μέσω της MVNPDF στην περίπτωση όπου η GM χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των βαρών από τους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη. Λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο της αβεβαιότητας, όπως αναλύθηκε παραπάνω, τα μέσα βάρη  $w_k$  εκφράζονται ως εξής:

$$w_k = W_k \left( \prod_{m=1}^M \prod_{j=1}^N \frac{\delta_{kj}^{(m)}}{W_j} \right)^{\frac{1}{MN}}$$

όπου:

$$\delta_{kz} = \frac{1 + \Delta W_k^{(m)}}{1 + \Delta W_z^{(m)}} (1 + \Delta W_{kz}^{(m)})$$

Ορίζουμε τις διαταραχές  $\delta z_k^{(m)}$  των λογαριθμισμένων βαρών ως  $\delta z_k^{(m)} = \ln w_k^{(m)} - \ln W_k$  και τις διαδοχικές τους διαφορές ως  $v_k = \delta z_k - \delta z_{k-1}$ , που ακολουθούν Gaussian κατανομή. Η  $P_{RR}$  μπορεί να προσεγγιστεί από την MVNPDF δεδομένου ότι έχουν καθοριστεί ο πίνακας συνδιακύμανσης και οι μέσες τιμές  $v_k$ . Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $\langle v_k \rangle = \langle \delta z_k \rangle$   $\langle \delta z_{k-1} \rangle$  ο πίνακας συνδιακύμανσης ορίζεται ως εξής:

$$R_{\kappa\lambda} = \langle v_\kappa v_\lambda \rangle - \langle v_\kappa \rangle \langle v_\lambda \rangle = r_{\kappa\lambda} - r_{\kappa,\mu-1} - r_{\kappa-1,\mu} + r_{\kappa-1,\mu-1} \quad (7.16)$$

όπου  $r_{ij} = \langle \delta z_i \delta z_j \rangle - \langle \delta z_i \rangle \langle \delta z_j \rangle$  είναι ο πίνακας συσχέτισης. Ύστερα από μαθηματικούς υπολογισμούς προκύπτει ότι:

$$\delta z_k = \frac{1}{NM} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N \{ \ln(1 + \Delta w_k^{(m)}) - \ln(1 + \Delta w_j^{(m)}) + \ln(1 + \Delta w_{kj}^{(m)}) - \ln W_j \} \quad (7.17)$$

$$\langle \delta z_k \rangle = \frac{1}{NM} \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N \{ \langle \ln(1 + \Delta w_{kj}^{(m)}) \rangle - \ln W_j \} \quad (7.18)$$

$$r_{k\lambda} = \frac{1}{N^2 M^2} \left\{ \begin{array}{l} N^2 M Q_{k\lambda}^{(m)} + M \sum_{pq} Q_{kp\lambda q} \\ - N M f_7 + (N M - 2)(N - 1) f_9^2 \end{array} \right\} \quad (7.19)$$

όπου  $Q_{k\lambda} = f_7$  ή  $Q_{k\lambda} = f_{10}$  για  $k=\lambda$  και  $k \neq \lambda$ , αντίστοιχα και  $Q_{kp\lambda q} = f_8 - f_9^2$  για τις περιπτώσεις όπου α)  $k=\lambda=p=q$ , β)  $k=\lambda, p=q, p \neq k$ , γ)  $k \neq \lambda, k=q, \lambda=p$ , διαφορετικά είναι μηδέν και:

$$f_7 = s_w^{-1} \left[ (0.5s_w + 1)(\ln^2(0.5s_w + 1) - 4) - (1 - 0.5s_w)(\ln^2(1 - 0.5s_w) - 4) \right] \quad (7.20)$$

$$f_8 = s^{-1} \left[ (0.5s + 1)(\ln^2(0.5s + 1) - 4) - (1 - 0.5s)(\ln^2(1 - 0.5s) - 4) \right] \quad (7.21)$$

$$f_9 = s^{-1} \left[ -s + (0.5s + 1)\ln(0.5s + 1) + (0.5s - 1)\ln(1 - 0.5s) \right] \quad (7.22)$$

$$f_{10} = s_w^{-1} \left[ -s_w + (0.5s_w + 1)\ln(0.5s_w + 1) + (0.5s_w - 1)\ln(1 - 0.5s_w) \right] \quad (7.23)$$

### 7.3 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

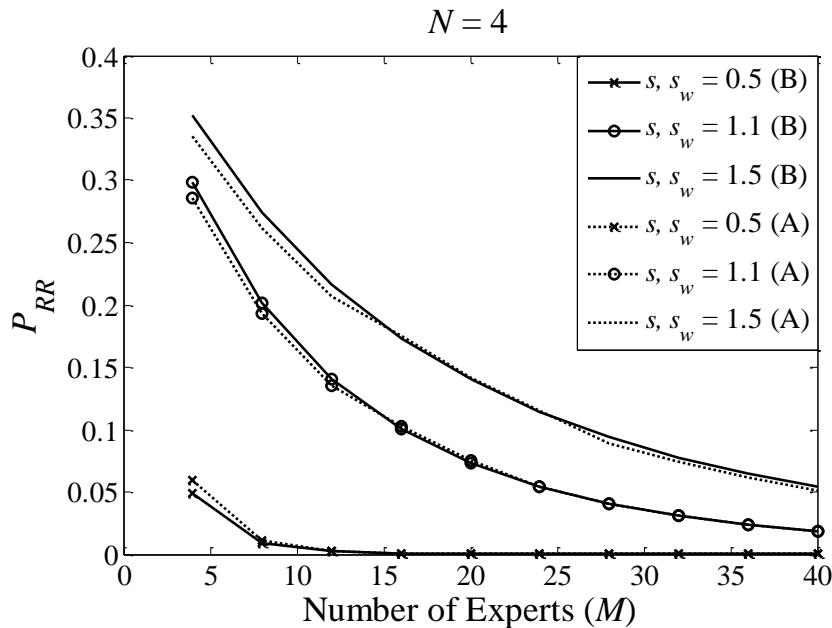
Στην ενότητα αυτή εφαρμόζεται το μοντέλο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, προκειμένου να εξεταστούν οι ιδιότητες σύγκλισης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης, καθώς αυξάνεται ο αριθμός  $M$  των ειδικών, που εμπλέκονται στη διαδικασία λήψης απόφασης.

#### 7.3.1 Μέθοδοι Συμπλήρωσης του Πίνακα Συγκρίσεων ανά Ζεύγη

Στην ενότητα 7.2 αναφέρθηκαν δύο εναλλακτικές μέθοδοι, σύμφωνα με τις οποίες οι ειδικοί συμπληρώνουν τα στοιχεία του πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη. Στην Εικόνα 93, απεικονίζεται η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης και για τις δύο προσεγγίσεις, στην περίπτωση όπου  $N=4$  και  $L=2$ , υποθέτοντας ομοιόμορφα κατανομημένες διαταραχές με μηδενική μέση τιμή τόσο για τα στοιχεία του πίνακα όσο και για τα βάρη. Για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται, χρησιμοποιούνται προσομοιώσεις Monte Carlo και ο αριθμός των εμπειρογνομόνων  $M$  μεταβάλλεται από 4 έως 40 ειδικούς για  $10^5$  επαναλήψεις. Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη τρεις εναλλακτικές τιμές για τις δυνάμεις των διαταραχών και πιο συγκεκριμένα  $s=s_w=1/2$ ,  $s=s_w=1$  και  $s=s_w=1.5$ , οι οποίες αντιστοιχούν σε μια μέγιστη επιτρεπόμενη απόκλιση 25%, 50% και 75%, αντίστοιχα, τόσο στα στοιχεία του πίνακα  $P_{ij}^{(m)}$  όσο και στα βάρη  $w_i^{(m)}$  συγκρινόμενα με τις ιδανικές τους τιμές. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην εν λόγω εικόνα αποκαλύπτουν ότι η  $P_{RR}$  είναι περίπου η ίδια και για τις δύο μεθόδους σύγκρισης. Αυτό συνεπάγεται ότι η αβεβαιότητα επηρεάζει την έκβαση της PWC κατά τον ίδιο τρόπο, ανεξάρτητα από το ποια από τις δύο μεθόδους εφαρμόζεται, προκειμένου να συμπληρωθούν τα στοιχεία του πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη. Το γεγονός αυτό βέβαια

δεν αποτελεί μεγάλη έκπληξη, δεδομένου ότι τα στοιχεία των πινάκων στη μέθοδο Β μπορούν να θεωρηθούν ως οι κβαντισμένες εκδόσεις των στοιχείων της μεθόδου Α. Δεδομένης της ομοιότητας των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από τις δύο μεθόδους, το παρόν κεφάλαιο θα εστιάσει στη χρήση μόνο της μεθόδου Α.

Παράλληλα, η Εικόνα 93 παρέχει επίσης μια επιβεβαίωση σχετικά με τις ιδιότητες σύγκλισης της PWC, καθώς αυξάνεται το μέγεθος της ομάδας των ειδικών, όπως μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Πράγματι, η προσθήκη πέντε επιπλέον ατόμων σε μια ομάδα από  $M=5$  εμπειρογνώμονες μειώνει σημαντικά την  $P_{RR}$ . Ωστόσο, προσθέτοντας τον ίδιο αριθμό εμπειρογνομόνων σε μία μεγαλύτερη ομάδα, ας πούμε  $M=15$ , ένα από τα μεγαλύτερα μεγέθη ομάδας εμπειρογνομόνων που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία, δεν θα οδηγήσει σε μια πολύ καλύτερη  $P_{RR}$ .



Εικόνα 93:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για τις μεθόδους «Α» και «Β», υποθέτοντας ότι  $N=4$  και  $L=2$ .

### 7.3.2 Σύγκριση του Θεωρητικού και Αριθμητικού Μοντέλου

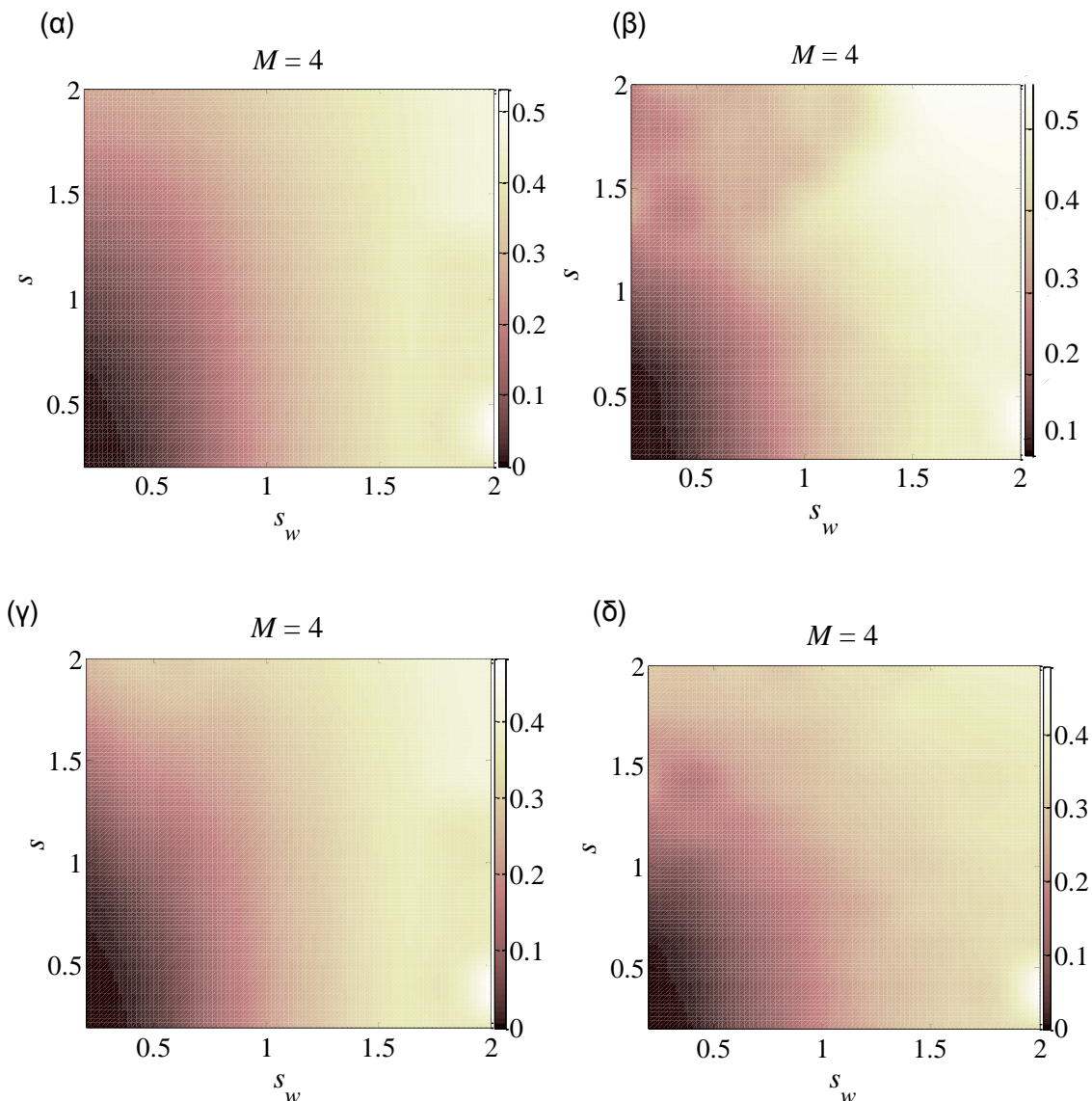
Στην παρούσα ενότητα γίνεται σύγκριση του αναλυτικού μοντέλου που προτείνεται στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής έναντι της αριθμητικής προσέγγισης, που βασίζεται σε προσομοιώσεις Monte Carlo. Προς αυτήν την κατεύθυνση, ο αριθμός των εμπειρογνομόνων  $M$  κυμαίνεται από 4 έως 40 ειδικούς, και στην περίπτωση της προσομοίωσης Monte Carlo χρησιμοποιούνται  $10^5$  επαναλήψεις για να υπολογιστεί η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης  $P_{RR}$ . Στην Εικόνα 94 (α) και (β) παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα επιφάνειας της  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του  $s$  και  $s_w$  για  $M=4$  εμπειρογνώμονες και  $N=4$  κριτήρια, όπως υπολογίζεται χρησιμοποιώντας το θεωρητικό και αριθμητικό μοντέλο αντίστοιχα για την περίπτωση της EV. Στην Εικόνα 94 (γ) και (δ) εμφανίζεται η αντίστοιχη επιφάνεια στην περίπτωση της GM. Είναι εμφανές ότι οι τιμές των  $P_{RR}$  είναι παρόμοιες και για τις δύο περιπτώσεις. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην εκτίμηση της  $P_{RR}$  με τη χρήση του αναλυτικού θεωρητικού μοντέλου, υπολογίστηκε ένα σχετικό σφάλμα της τάξης του 6,3% και 6,1% κατά μέσο όρο για την περίπτωση της EV και GM, αντίστοιχα.

Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν για την περίπτωση όπου  $M=16$ , όπως φαίνεται [95], όπου οι δύο προσεγγίσεις συμπίπτουν ακόμα περισσότερο σε σχέση με τα



προηγούμενα αποτελέσματα. Στην περίπτωση αυτή, εκτιμήθηκε ένα μέσο σφάλμα περίπου 3,1%. Καλύτερη συμφωνία ανάμεσα στις δύο μεθόδους αναμένεται με την αύξηση του  $M$ , δεδομένου ότι θα υπάρχουν περισσότεροι όροι στο άθροισμα  $\delta\omega_k = M^{-1} \sum_m \delta\omega_k^{(m)}$  και ως εκ τούτου το  $\delta\omega_k$  θα περιγράφεται καλύτερα από μια Gaussian τυχαία μεταβλητή. Το ίδιο συμπεραίνεται και για την περίπτωση του  $\delta Z_k$ .

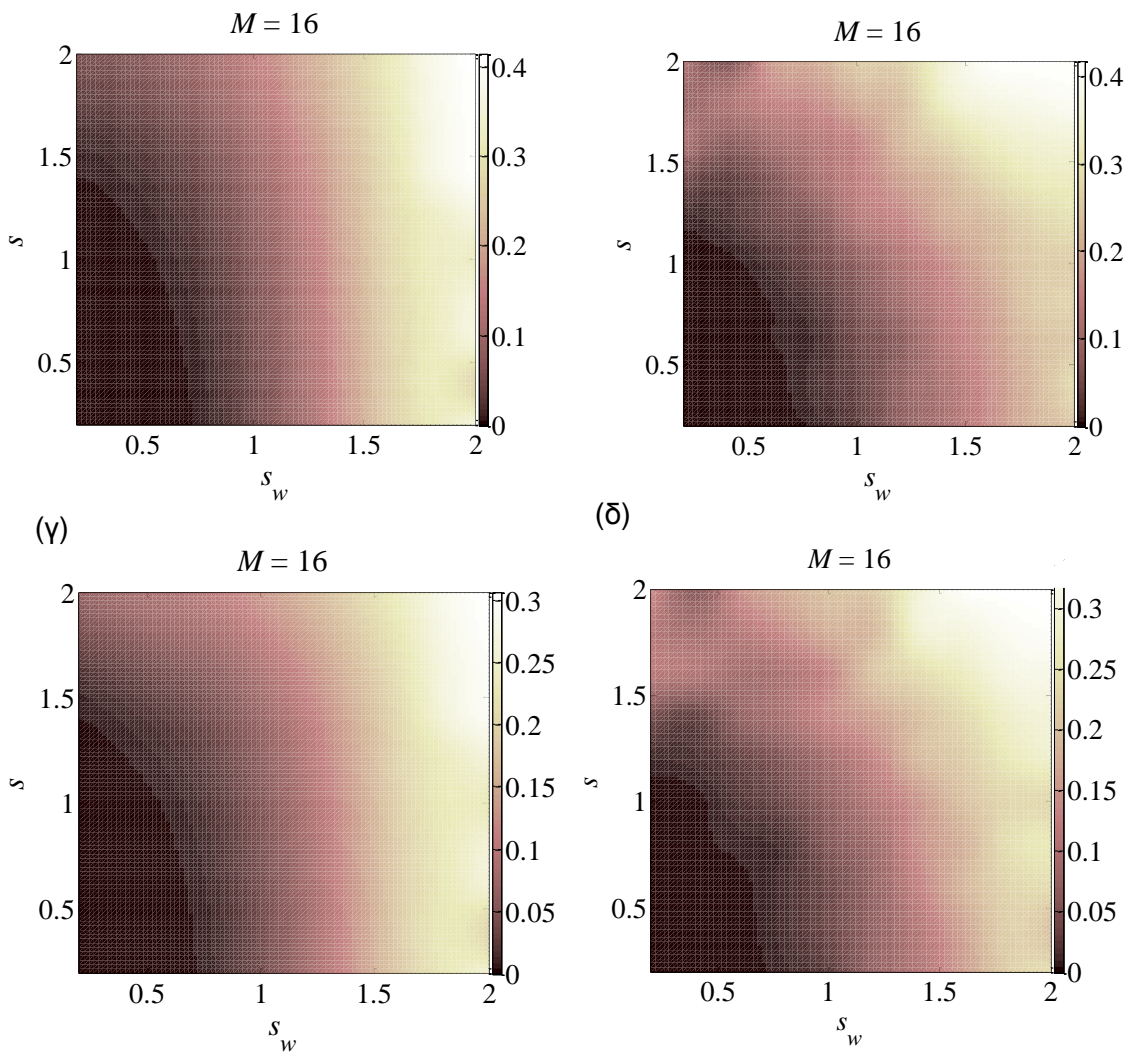
Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, συμπεραίνεται ότι οι τιμές των  $P_{RR}$  που προκύπτουν από την εφαρμογή του θεωρητικού μοντέλου είναι αρκετά ακριβείς. Παράλληλα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η προσέγγιση με τη GM δίνει  $P_{RR}$  χαμηλότερη σε σχέση με την EV στις περισσότερες περιπτώσεις. Πρόκειται για μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση που ενδέχεται να δίνει προβάδισμα στην GM σε σχέση με την EV στις πολυκριτηριακές διαδικασίες λήψης απόφασης. Επιπρόσθετα τα θεωρητικά μοντέλα και των δύο μεθόδων φαίνεται να παρέχουν μια πολύ καλή εκτίμηση της τάξης μεγέθους της  $P_{RR}$ .



**Εικόνα 94:**  $P_{RR}$  ως συνάρτηση των  $s$  and  $s_w$  για  $N=4$  κριτήρια και  $M=4$  ειδικούς, όπως προκύπτει από (α) την MVNCDF για EV και (β) προσομοιώσεις Monte Carlo για EV, (γ) την MVNCDF για GM και (δ) προσομοιώσεις Monte Carlo για GM

(α)

(β)



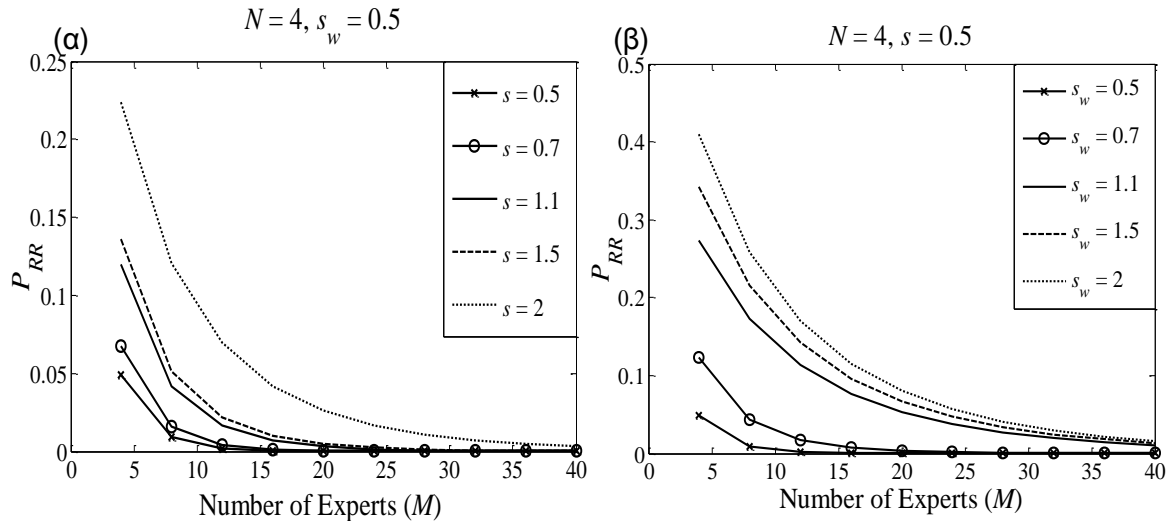
**Εικόνα 95:**  $P_{RR}$  ως συνάρτηση των  $s$  and  $s_w$  για  $N=4$  κριτήρια και  $M=16$  ειδικούς, όπως προκύπτει από (α) την MVNCDF για EV και (β) προσομοιώσεις Monte Carlo για EV, (γ) την MVNCDF για GM και (δ) προσομοιώσεις Monte Carlo για GM

### 7.3.3 Επίδραση του Επιπέδου Αβεβαιότητας

Σε αυτήν την ενότητα εξετάζεται η επιρροή του επιπέδου της αβεβαιότητας στην εκτίμηση της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης. Τα αποτελέσματα στην Εικόνα 93 προκύπτουν υποθέτοντας ότι η ένταση των διαταραχών είναι η ίδια τόσο για το  $\Delta w_i^{(m)}$  όσο και το  $\Delta w_{ij}^{(m)}$ . Είναι ενδιαφέρον να ερευνηθεί αν τα συμπεράσματα που συνάγονται από αυτό το σχήμα ισχύουν ακόμα και στην περίπτωση διαταραχών με ανόμοιες δυνάμεις. Στην Εικόνα 96 (α), η  $P_{RR}$  απεικονίζεται ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των εμπειρογνομόνων για διάφορες τιμές δυνάμεων των διαταραχών στους πίνακες PWC για  $N=4$  και  $L=2$  στην περίπτωση της EV. Επιλέγεται το  $s_w=1/2$  και υπολογίζεται η  $P_{RR}$  για διάφορες τιμές του  $s$  για διαταραχές με μηδενική μέση τιμή. Αυτό ουσιαστικά ισοδυναμεί με την περίπτωση, όπου οι εμπειρογνώμονες έχουν σχεδόν την ίδια άποψη σχετικά με την κατάταξη των κριτηρίων (μικρή τιμή του  $s_w$ ) και εξετάζεται η επίδραση των διαφορετικών επιπέδων ασυνέπειας στον πίνακα PWC. Σύμφωνα με το σχήμα, η  $P_{RR}$  είναι περίπου μηδέν για μικρές διαταραχές. Για μεγαλύτερες δυνάμεις διαταραχών ( $s > 1$ ) πλησιάζει στο μηδέν για  $M > 15$ , γεγονός που οδηγεί στα ίδια συμπεράσματα με τα προαναφερθέντα στο κεφάλαιο 6.

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και στην περίπτωση που υπάρχουν διαφορετικές τιμές του  $s_w$ , υποθέτοντας μικρές ασυνέπειες στους πίνακες, δηλαδή μικρά  $s$ . Η Εικόνα 96 (β) παρουσιάζει τις τιμές της  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των εμπειρογνομόνων για διάφορες δυνάμεις διαταραχών  $s_w$  υποθέτοντας ότι  $s=1/2$ . Η ομοιότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων της Εικόνα 96 (α) και (β) συνάγει το γεγονός ότι όσον αφορά την αβεβαιότητα, τα  $s$  και  $s_w$  έχουν περίπου την ίδια βαρύτητα.

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και στην περίπτωση της GM.

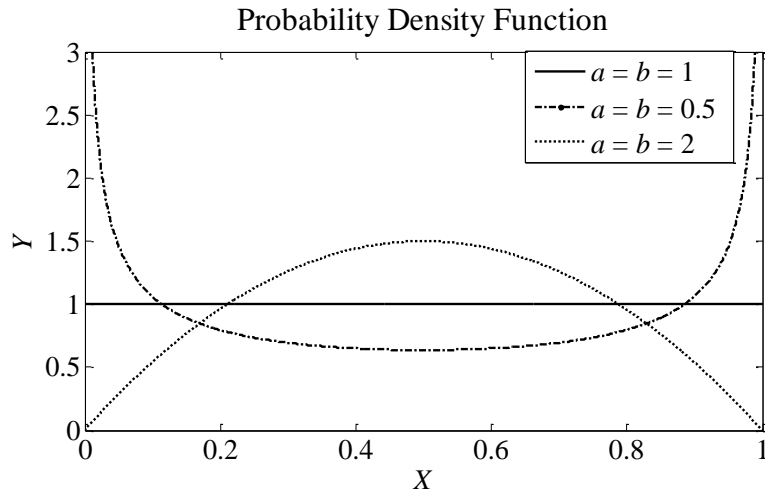


Εικόνα 96:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για  $N=4$ ,  $L=2$ , (α)  $s_w=0.5$ , (β)  $s=0.5$

### 7.3.4 Επίδραση των Στατιστικών Χαρακτηριστικών των Διαταραχών

Προκειμένου να διερευνηθούν περαιτέρω οι επιπτώσεις των στατιστικών χαρακτηριστικών της αβεβαιότητας, υπολογίστηκε εκ νέου η πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης, υποθέτοντας ότι οι διαταραχές επιλέγονται από μια βήτα (Beta) κατανομή, σε αντίθεση με τις προηγούμενες ενότητες όπου εξεταζόταν η περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF)  $f(x)$  για μια βήτα κατανομημένη τυχαία μεταβλητή  $X$  μέσα στο διάστημα  $[0, 1]$  δίνεται από την  $f(x)=Bx^{\alpha-1}(1-x)^{b-1}$  [240], όπου  $B=\Gamma(\alpha+b)/\Gamma(\alpha)\Gamma(b)$  και  $\Gamma(x)$  είναι η συνάρτηση Γάμμα (Gamma) [241]. Η Εικόνα 97 παρουσιάζει την PDF  $f(x)$  για διάφορες τιμές των  $\alpha$  και  $b$ . Για  $\alpha=b=1$ , λαμβάνεται απλά μια ομοιόμορφη κατανομή, ενώ για  $\alpha=b=2$  και  $\alpha=b=1/2$ , προκύπτουν PDFs με σχήμα καμπάνας (bell-shaped) και σχήμα U (U-shaped), αντιστοίχως. Συνεπώς, διαπιστώνεται ότι η βήτα κατανομή μπορεί να περιγράψει μια πληθώρα στατιστικών μοντέλων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να εξεταστεί η σύγκλιση της  $P_{RR}$  υπό αβεβαιότητες με διαφορετικά στατιστικά χαρακτηριστικά. Για να προκύψουν βήτα κατανομημένες διαταραχές, που βρίσκονται στο εσωτερικό του διαστήματος  $[-s_b/2, s_b/2]$  αντί του  $[0, 1]$ , χρησιμοποιούμε το μετασχηματισμό  $Y=s_b X-s_b/2$ . Η διακύμανση  $\sigma_Y^2$  του  $Y$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_Y^2 = s_b^2 \frac{\alpha b}{(\alpha + b)^2 (\alpha + b + 1)} \quad (7.24)$$



**Εικόνα 97: PDF  $f(X)$  των βήτα κατανεμημένων τυχαίων μεταβλητών που προκύπτουν για  $a=b=1/2$  (U-shaped),  $a=b=1$  (ομοιόμορφη),  $a=b=2$  (Bell-shaped).**

Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα της παρούσας προσέγγισης με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες, θα πρέπει να επιλεχθούν  $s_b$ , έτσι ώστε η διακύμανση  $\sigma_{\gamma}^2$  των νέων δειγμάτων να είναι ίση με τη διακύμανση των δειγμάτων της ομοιόμορφης κατανομής, που δίνονται είτε με διακύμανση  $s^2/12$  είτε με  $s_w^2/12$ , για τις αντίστοιχες διαταραχές  $\Delta w_{ij}^{(m)}$  και  $\Delta w_i^{(m)}$ . Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, όπως περιγράφεται στο 7.2.4, υπολογίζεται ο πίνακας συνδιακύμανσης υποθέτοντας ότι οι διαταραχές ακολουθούν μια βήτα κατανομή. Μετά από μαθηματικούς υπολογισμούς προκύπτει για την περίπτωση της EV ότι:

$$\langle \delta w_k \rangle = \sum_{r=2}^N x_{rk} \sum_{p,q} \frac{W_p}{W_q} (b_3 - 1) \frac{v_{pr} x_{q1}}{\mathbf{v}_k^T \mathbf{x}_k \lambda_1} \quad (7.25)$$

$$\begin{aligned} E_{kl} &= N^2 (b_5 - 2b_3 + 1) \sum_{l_1} W_z W_p \Omega_{zp}^{(kl)} + (2 - b_3 (b_4 + 1)) \sum_{l_2} G_{zn}^{(kl)} \\ &+ N^2 (b_3 - 1)^2 \sum_{l_3} W_z W_p \Omega_{zp}^{(kl)} + N(1 - b_3) \sum_{l_4} W_p \Omega_{zq}^{(kl)} \\ &+ N(b_5 b_1 b_2 - 2b_3 + 1) \sum_{l_5} W_z^2 \Omega_{zz}^{(kl)} + N(b_1 b_3^2 - 2b_3 + 1) \sum_{l_6} W_m^2 \Omega_{zp}^{(kl)} \quad (7.26) \\ &+ N(1 - b_3) \sum_{l_7} W_z \Omega_{znp}^{(kl)} \end{aligned}$$

Στις παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιούνται οι ορισμοί, όπως αναφέρθηκαν στο 7.2.4. Επιπλέον, ορίζονται τα ακόλουθα:  $f(X) = X^{a-1} (1-X)^{b-1}$ ,  $F_i(x) = 1 + r_i + v_i x$ , όπου  $i=1$  ή  $2$ ,  $v_1 = s_w (\sigma_w \sqrt{12})^{-1}$ ,  $v_2 = s (\sigma \sqrt{12})^{-1}$ ,  $r_1 = s_w a(a+b)^{-1} (\sigma_w \sqrt{12})^{-1}$ ,  $r_2 = s a(a+b)^{-1} (\sigma \sqrt{12})^{-1}$  ενώ:

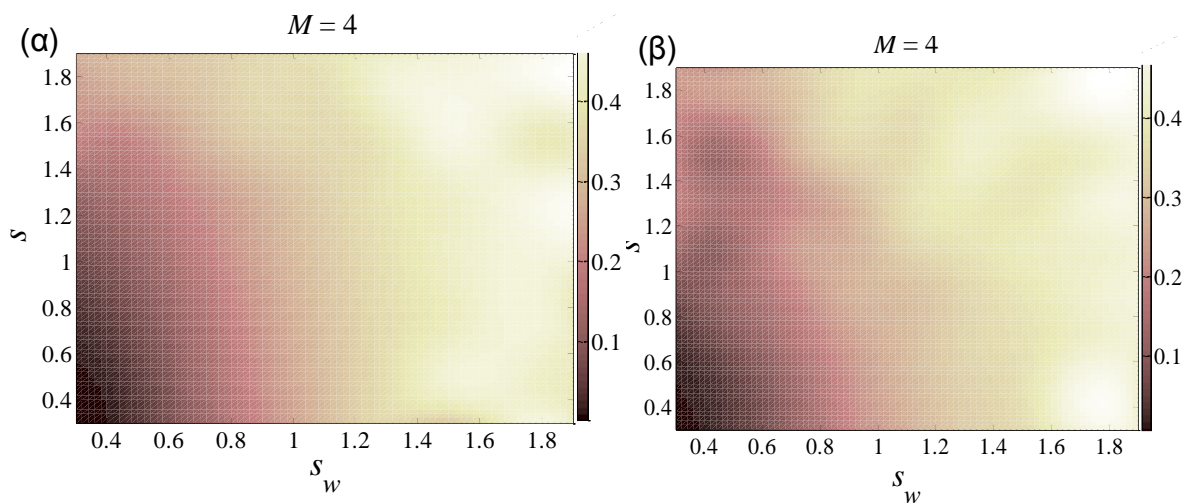
$$b_i = B^{-1} \int_0^1 (F_i(x))^2 f(x) dx \quad (7.27)$$

$$b_{i+2} = B^{-1} \int_0^1 f(x) F_i(x)^{-1} dx \quad (7.28)$$

$$b_5 = B^{-1} \int_0^1 f(x) (F_1(x))^{-2} dx \quad (7.29)$$

Το μοντέλο που προτείνεται στην παρούσα ενότητα, επιβεβαιώνεται στην Εικόνα 98 και στην Εικόνα 99, όπου συγκρίνονται οι τιμές της  $P_{RR}$ , όπως λαμβάνονται από την MVNCDF και τις προσομοιώσεις Monte Carlo, για  $M=4$  και  $M=16$ , αντίστοιχα. Υποθέτουμε μια συμμετρική βήτα κατανομή  $\alpha=b=2$ . Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, συμπεραίνεται ότι, όπως συνέβη στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής στο 7.3.2, και τα δύο μοντέλα συμφωνούν αρκετά. Επίσης, το ποσοστό σφάλματος στις τιμές της  $P_{RR}$  εκτιμάται στο 6,5% για  $M=4$  και 3,3% για  $M=16$ . Στην Εικόνα 100, εμφανίζονται οι τιμές της  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του  $M$  στις περιπτώσεις όπου  $\alpha=b=0,5$ , καθώς και  $\alpha=b=2$ , για  $s=s_w=1/2$ . Επιβεβαιώνεται ότι επιτυγχάνεται παρόμοια συμπεριφορά σύγκλισης, στην περίπτωση των βήτα κατανεμημένων διαταραχών στους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη, σε σχέση με τις ομοιόμορφα κατανεμημένες διαταραχές. Άλλωστε, η βασική αιτία για την οποία η σύγκλιση της  $P_{RR}$  δεν επηρεάζεται από τα στατιστικά χαρακτηριστικά της αβεβαιότητας έχει προαναφερθεί στο 7.2.2.

Με παρόμοιο τρόπο πραγματοποιείται και η περίπτωση της GM.

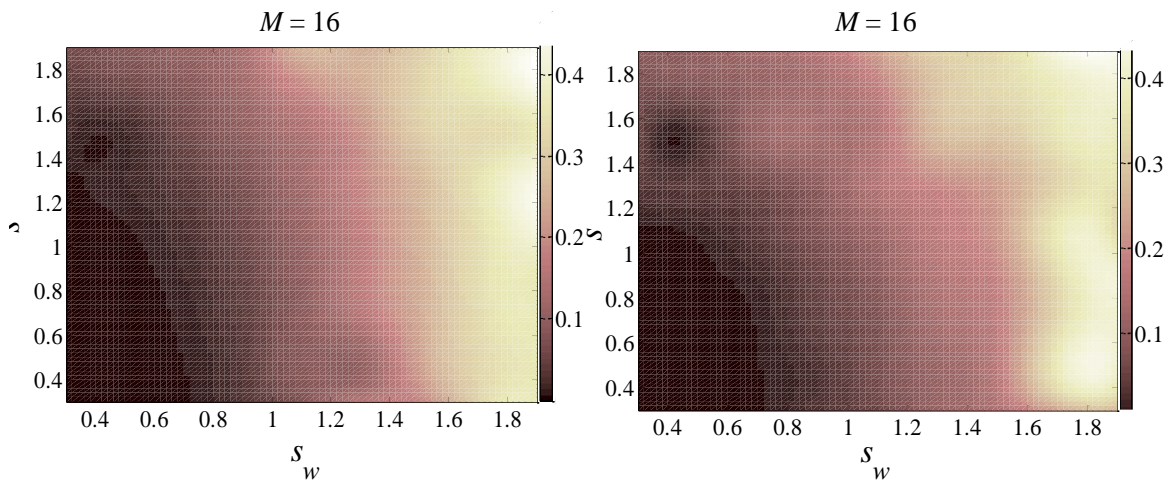


**Εικόνα 98:**  $P_{RR}$  ως συνάρτηση των  $s$  και  $s_w$  για  $N=4$  κριτήρια και  $M=4$  ειδικούς, όπως προκύπτουν από (α) την MVNCDF και (β) τις Monte-Carlo προσομοιώσεις υποθέτοντας βήτα κατανεμημένες διαταραχές  $\alpha=2$ ,  $b=2$ .

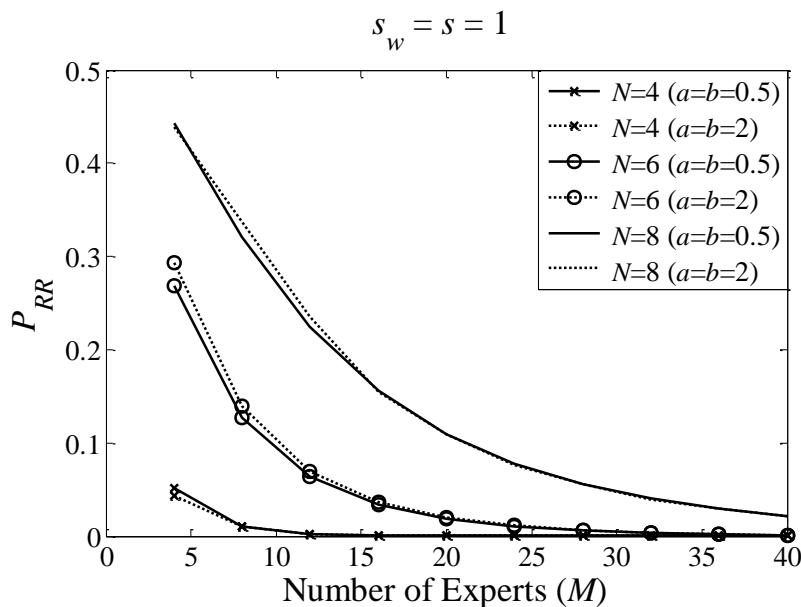
(α)

(β)





Εικόνα 99:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση των  $s$  και  $s_w$  για  $N=4$  κριτήρια και  $M=16$  ειδικούς όπως προκύπτουν από (α) την MVN CDF και (β) τις Monte-Carlo προσομοιώσεις υποθέτοντας βήτα κατανεμημένες διαταραχές  $a=2, b=2$ .

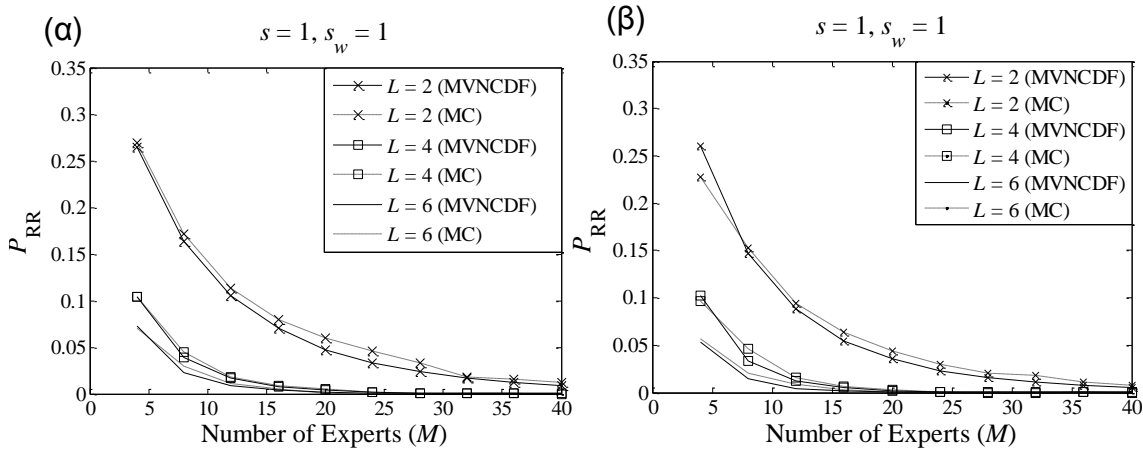


Εικόνα 100:  $P_{RR}$  στην περίπτωση ασύμμετρων βήτα κατανομών με  $a=b=1/2$  ή 2, για τα  $\Delta w_{ij}^{(m)}$  και  $\Delta w_{ij}^{(m)}$ .

### 7.3.5 Ομοιογένεια των Κριτηρίων

Στην ενότητα 7.2, αναλύθηκε το πώς η τελική κατάταξη των εκτιμώμενων βαρών επηρεάζεται από το βαθμό της ομοιομορφίας των ιδανικών βαρών  $W_i$  και συνεπώς από την τιμή του  $L$ . Η Εικόνα 101 (α) και (β) παρουσιάζει την πιθανότητα αναστροφής κατάταξης, που λαμβάνεται για διάφορες τιμές του  $L$ , όπως ορίζεται στο 7.2. Η περίπτωση του  $L=1$  δεν λαμβάνεται υπόψη, δεδομένου ότι αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου τα κριτήρια έχουν όλα την ίδια βαρύτητα και ως εκ τούτου δεν έχει νόημα να μελετηθεί η αναστροφή κατάταξης. Για μια ακόμα φορά παρουσιάζεται πολύ καλή σύγκλιση ανάμεσα στην θεωρητική και αριθμητική προσέγγιση είτε με την EV είτε με την GM μέθοδο. Όπως παρατηρείται, η αύξηση της τιμής του  $L$  έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της  $P_{RR}$ , δεδομένου ότι οι τιμές των βαρών  $W_i$  γίνονται περισσότερο διακριτές

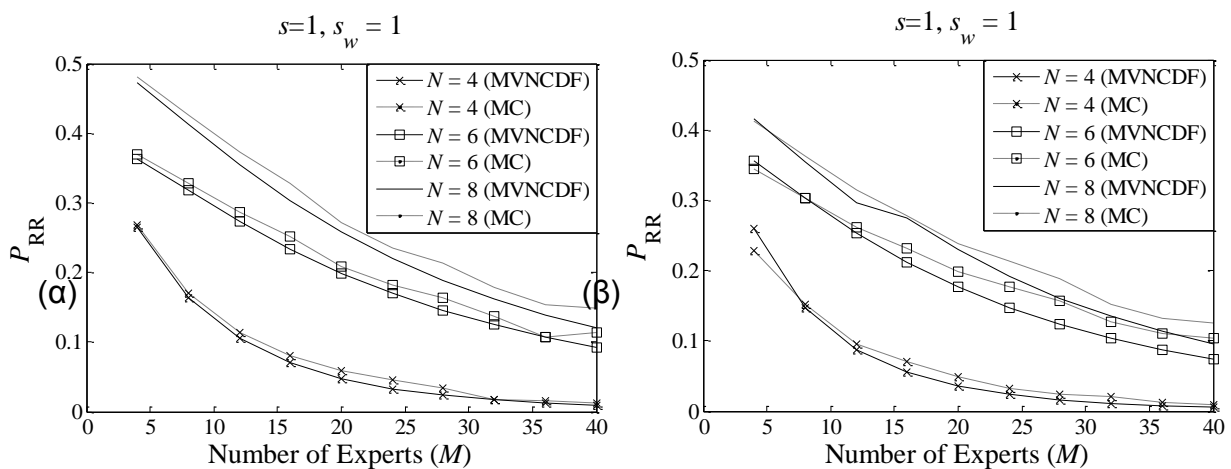
και κατά συνέπεια, το αποτέλεσμα της PWC είναι πιο ανθεκτικό στην αβεβαιότητα. Για  $s=s_w=1$  (δηλαδή για μεσαίο επίπεδο αβεβαιότητας), η Εικόνα 101 (α) δείχνει ότι η  $P_{RR}$  συγκλίνει στο μηδέν και είναι σημαντικά χαμηλότερη για  $L=4$  ή  $6$ . Σε κάθε περίπτωση, δεν υπάρχει σημαντική αλλαγή για ένα μέγεθος της ομάδας των ειδικών  $M>15$ . Η εν λόγω παρατήρηση ισχύει επίσης και για υψηλότερο επίπεδο αβεβαιότητας.



Εικόνα 101:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για  $N=4$  κριτήρια και διάφορες τιμές του  $L$ , για  $s=1, s_w=1$ , στην περίπτωση των μεθόδων (α) EV (β) GM).

### 7.3.6 Επιρροή του Αριθμού των Κριτηρίων

Η Εικόνα 102 (α) και (β) απεικονίζει τη σύγκλιση της  $P_{RR}$  για διάφορες περιπτώσεις του αριθμού των κριτηρίων  $N$ . Στην εν λόγω εικόνα, λαμβάνονται υπόψη οι περιπτώσεις όπου  $N=4, N=6$  και  $N=8$ . Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να συμπεριλάβει εύκολα τις περιπτώσεις όπου  $N>8$ , αλλά στην πράξη, η εφαρμογή της PWC με τόσα πολλά κριτήρια αποφεύγεται, λόγω του μεγάλου αριθμού των συγκρίσεων που απαιτούνται. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 102 η αξιοπιστία του θεωρητικού μοντέλου για τον υπολογισμό της  $P_{RR}$  είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των κριτηρίων και για τις δύο μεθόδους EV, GM. Παράλληλα, φαίνεται ότι οι τιμές της  $P_{RR}$  είναι χαμηλότερες στην περίπτωση της GM σε σχέση με την EV.



Εικόνα 102:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για  $L=2$  και για διάφορες τιμές του  $N$ , για  $s=1, s_w=1$ , στην περίπτωση των μεθόδων (α) EV (β) GM.

### 7.3.7 Επίδραση της Μεθόδου Υπολογισμού των Βαρών

Ένα άλλο σημαντικό θέμα που πρέπει να εξεταστεί είναι εάν η συμπεριφορά της  $P_{RR}$  εξαρτάται από τη μέθοδο εκτίμησης των βαρών. Εναλλακτικά των μεθόδων EV και GM θα μπορούσε κανείς να εφαρμόσει την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (LSM) [118], όπως αναφέρθηκε στο 2.3.1.2. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο θα πρέπει ο πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη  $\mathbf{P}^{(m)}$  να συγκλίνει σε έναν απόλυτα συνεπή πίνακα, δηλαδή έναν πίνακα του οποίου τα στοιχεία  $M_{ij}$  είναι της μορφής  $w_i^{(m)}/w_j^{(m)}$ . Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, τα βάρη  $w_i^{(m)}$  προσδιορίζονται με την ελαχιστοποίηση της παρακάτω αριθμητικής παράστασης:

$$Q = \sum_{i,j=1}^N \left( P_{ij}^{(m)} - \frac{w_i^{(m)}}{w_j^{(m)}} \right)^2 \quad (7.30)$$

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να θεωρήσουμε τα  $w_i^{(m)}$ , δηλαδή τις λύσεις που προκύπτουν από την προαναφερθείσα ελαχιστοποίηση, ως συναρτήσεις των στοιχείων του πίνακα συγκρίσεων ανά ζεύγη,  $w_i^{(m)} = Q_i(\mathbf{P}^{(m)})$ . Στο πλαίσιο των διαταραχών του πίνακα  $\Delta \mathbf{P}^{(m)}$  εύκολα προκύπτει ότι  $\mathbf{P}^{(m)} = \mathbf{P} + \Delta \mathbf{P}^{(m)}$  και τα αντίστοιχα βάρη μπορούν να προσεγγιστούν από την ακόλουθη σχέση:

$$w_i^{(m)} = Q_i(\mathbf{P} + \Delta \mathbf{P}^{(m)}) \cong Q_i(\mathbf{P}) + \sum_{pq} \frac{\partial Q_i(\mathbf{P})}{\partial P_{pq}^{(m)}} \Delta P_{pq}^{(m)} \quad (7.31)$$

όπου οι παράγωγοι  $D_{pq}^{(i)} = \partial Q_i(\mathbf{P}) / \partial P_{pq}^{(m)}$  είναι οι μερικές παράγωγοι του  $Q_i$  ως προς τα στοιχεία του πίνακα συγκρίσεων  $\mathbf{P}^{(m)}$ . Μολονότι οι συναρτήσεις  $Q_i$  δεν μπορούν να αποτυπωθούν εύκολα σε αναλυτική μορφή, μπορούν να εκτιμηθούν αριθμητικά μέσω των εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών. Για παράδειγμα, για τον υπολογισμό της  $D_{12}^{(1)}$  διαταράσσεται το στοιχείο  $P_{12}$  του ιδανικού πίνακα συγκρίσεων  $\mathbf{P}$  κατά  $\Delta$  (δηλαδή εναλλακτικά του  $W_1/W_2$  το στοιχείο αυτό τίθεται ίσο με  $W_1/W_2 + \Delta$ ) και υπολογίζονται τα βάρη μέσω της διαδικασίας ελαχιστοποίησης, όπως συζητήθηκε παραπάνω. Αν το  $w_1$  είναι το βάρος που λαμβάνεται, τότε, η  $D_{12}^{(1)}$  προσεγγίζεται πολύ απλά από την πεπερασμένη διαφορά  $(w_1 - W_1)/\Delta$ . Δεδομένου ότι η  $D_{pq}^{(i)}$  μπορεί να εκτιμηθεί αριθμητικά με παρόμοιο τρόπο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η (7.31) για να υπολογιστεί ο πίνακας συνδιακύμανσης  $c_{ij} = \langle \delta w_i \delta w_j \rangle$  ως εξής:

$$\begin{aligned} c_{ij} = \frac{1}{M} & \left\{ \sum_{l_1} D_{znpq}^{(ij)} (f_7 - 2f_5 + 1) \frac{W_z W_p}{W_n^2} \right. \\ & + \sum_{l_2} D_{znpq}^{(ij)} (2 - f_5 (f_6 + 1)) + \sum_{l_3} D_{znpq}^{(ij)} (f_5 - 1)^2 \frac{W_z W_p}{W_n W_q} \\ & + \sum_{l_4} D_{znpq}^{(ij)} (f_4 - 2f_5 + 1) \frac{W_z^2}{W_n^2} + \sum_{l_5} D_{znpq}^{(ij)} (1 - f_5) \frac{W_p}{W_n} \\ & \left. + \sum_{l_6} D_{znpq}^{(ij)} (f_1 f_5^2 - 2f_5 + 1) \frac{W_z^2}{W_n W_q} + \sum_{l_7} D_{znpq}^{(ij)} (1 - f_5) \frac{W_z}{W_q} \right\} \quad (7.32) \end{aligned}$$

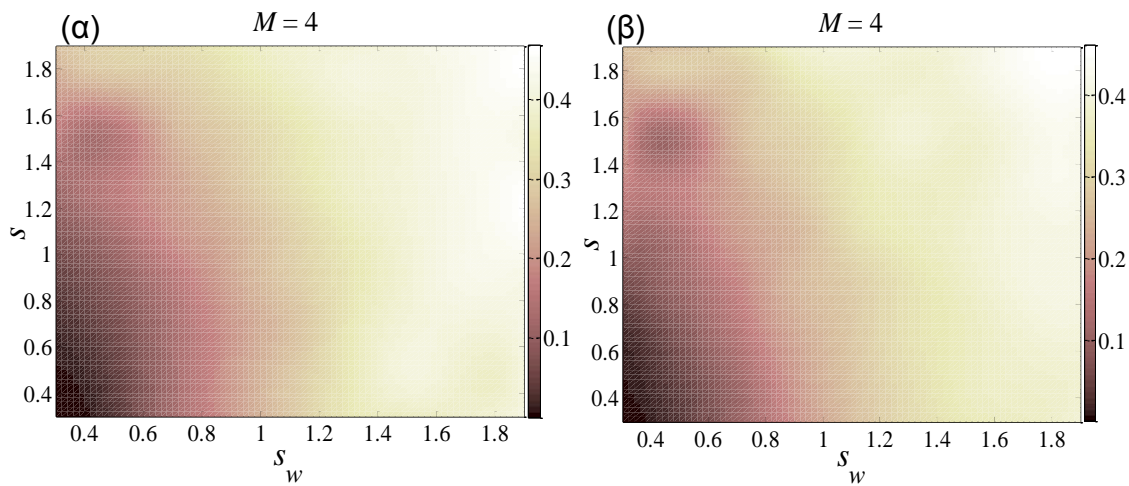
ενώ η μέση τιμή των διαταραχών των βαρών προλύπτει από:



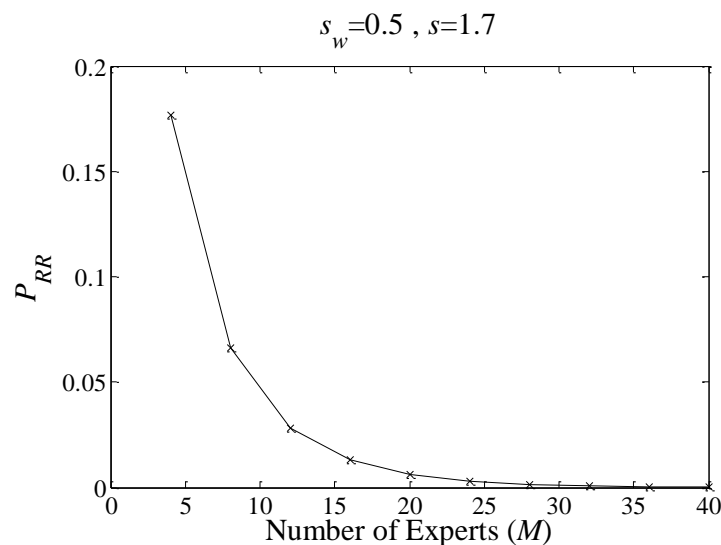
$$\langle \delta w_k \rangle = \sum_{z,n} D_{zn}^{(i)} \frac{W_z}{W_n} (f_5 - 1) \quad (7.33)$$

όπου  $F_{kl}$ ,  $f_k$  και  $l_i$  ορίζονται όπως στο 7.2.4 και  $D_{zn}^{(ij)} = D_{zn}^{(i)} D_{pq}^{(j)}$ .

Η Εικόνα 103 (α) και η Εικόνα 103 (β) απεικονίζουν τις τιμές της  $P_{RR}$  όταν  $N=4$  κριτήρια συγκρίνονται ανά ζεύγη, εφαρμόζοντας το θεωρητικό μοντέλο και τις προσομοιώσεις Monte Carlo, αντίστοιχα, στην περίπτωση όπου τα βάρη υπολογίζονται με τη μέθοδο LSM. Παρατηρείται μια πάρα πολύ καλή συμφωνία ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις, υποδεικνύοντας ότι η  $P_{RR}$  μπορεί να εκτιμηθεί από την MVNCDF και σε αυτήν την περίπτωση. Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν για τις ιδιότητες σύγκλισης της  $P_{RR}$ , όταν αυξάνεται το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνομόνων, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 104.



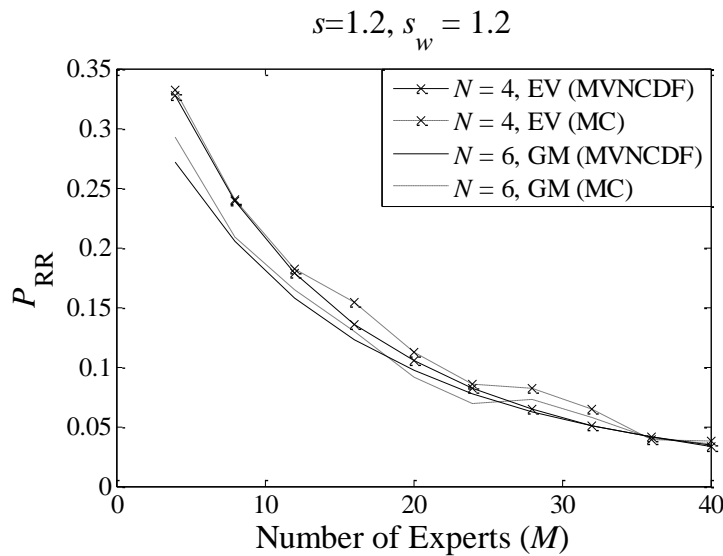
Εικόνα 103:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση των  $s$  και  $s_w$  για  $N=4$  κριτήρια και  $M=16$  ειδικούς, όπως προκύπτει από (α) την MVNCDF και (β) τις προσομοιώσεις Monte-Carlo στην περίπτωση της LSM.



Εικόνα 104:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για  $N=4$  κριτήρια.

### 7.3.8 Μη Γραμμική Κατανομή Ιδανικών Βαρών

Στα αποτελέσματα και την ανάλυση που παρουσιάστηκαν έως τώρα, υποθέσαμε ότι τα ιδανικά βάρη  $W_i$  είναι σημεία μιας ευθείας γραμμής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 87. Στην Εικόνα 105, υπολογίζεται η  $P_{RR}$  για τα ιδανικά βάρη  $W_i$ , που αποτελούν σημεία μιας βήτα κατανομής (όπως φαίνεται επίσης στην Εικόνα 87), για  $\alpha=2$ ,  $b=5$ , υποθέτοντας ότι τα  $\Delta w_i^{(m)}$  είναι ομοιόμορφα κατανομημένα με  $s=1$  και 2 αντίστοιχα. Τα βάρη  $W_i$  ταξινομούνται, έτσι ώστε  $W_i \geq W_{i-1}$ . Το σχήμα δείχνει ότι ο τρόπος που επιλέγονται τα αρχικά βάρη δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια του θεωρητικού μοντέλου καθώς και στην σύγκλιση της  $P_{RR}$ . Υπό το πρίσμα αυτό, τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την περίπτωση μη γραμμικής κατανομής των  $W_i$  ισχύουν και για άλλες κατανομές ιδανικών βαρών.



Εικόνα 105:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για μη γραμμικά ιδανικά βάρη  $W_i$  στην περίπτωση όπου  $s=s_w=1.2$ ,  $\alpha=2$ ,  $b=5$ .

### 7.3.9 Ομαδοποίηση Ειδικών

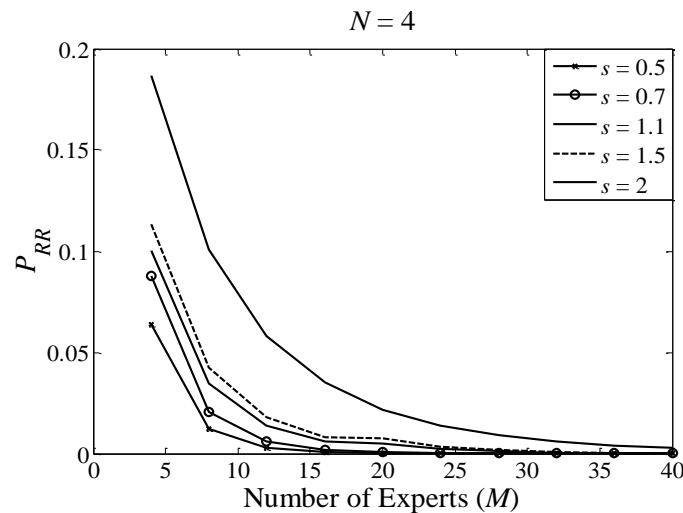
Είναι ενδιαφέρον να διερευνηθεί τι θα συμβεί εάν οι εμπειρογνώμονες κατηγοριοποιηθούν σε ομάδες, ανάλογα με τον τομέα εξειδίκευσής τους. Για παράδειγμα, κάποιοι ειδικοί ενδέχεται να προέρχονται από τον τομέα της βιομηχανίας και κάποιοι άλλοι από την ακαδημαϊκή κοινότητα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των  $P_{RR}$  των διακριτών ομάδων που έχουν κατηγοριοποιηθεί οι εμπειρογνώμονες. Μέσα σε αυτές τις διαφορετικές ομάδες, οι εμπειρογνώμονες μπορεί να αναθέσουν διαφορετικά βάρη στα διάφορα κριτήρια (π.χ. ενδέχεται να έχουν διαφορετικό  $L$ ). Η Εικόνα 106 παρουσιάζει την πιθανότητα αναστροφής κατάταξης για την περίπτωση  $N=4$ , όπου οι εμπειρογνώμονες υποτίθεται ότι ανήκουν είτε σε μια ομάδα με  $L=2$  είτε σε μια ομάδα με  $L=4$ , με ίση πιθανότητα 50%, υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή για διάφορες δυνάμεις διαταραχών, στην περίπτωση της EV. Όπως υποδεικνύεται από το σχήμα, οι ιδιότητες σύγκλισης ισχύουν ακόμη και στην ύπαρξη μιας τέτοιας ομαδοποίησης.

Μια εναλλακτική περίπτωση ομαδοποίησης θα μπορούσε να βασίζεται στην ανατρεπτικότητα που διακατέχει τους ειδικούς σε σχέση με τα κριτήρια που καλούνται να αξιολογήσουν. Υπό αυτές τις συνθήκες, μπορούμε να υποθέσουμε ότι υπάρχουν κάποιοι ειδικοί στην ομάδα που είναι περισσότερο ανατρεπτικοί από τους άλλους, δηλαδή η κατανομή των αρχικών βαρών  $W_i^{(m)}$  υπόκειται σε διαταραχές με μεγαλύτερα

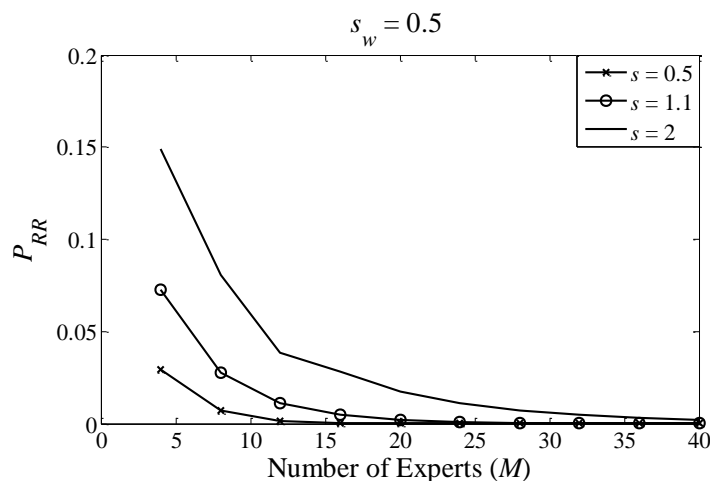
$s^{(m)}$  ή  $s_w^{(m)}$ . Στην Εικόνα 107 (α), (β) απεικονίζεται η  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του μεγέθους της ομάδας των εμπειρογνομώνων στην περίπτωση όπου υπάρχει ίση πιθανότητα ο εκάστοτε ειδικός να ανήκει σε μία από τις τρεις ομάδες, ανάλογα με το αν η ένταση της διαταραχής  $s^{(m)}$  ή  $s_w^{(m)}$  λαμβάνει τις τιμές 0.5, 1.1 ή 2. Οι εν λόγω διαταραχές θα αντικατοπτρίζουν την τάση του εκάστοτε εμπειρογνώμονα για μικρή, μεσαία ή μεγάλη ανατροπή αντίστοιχα.

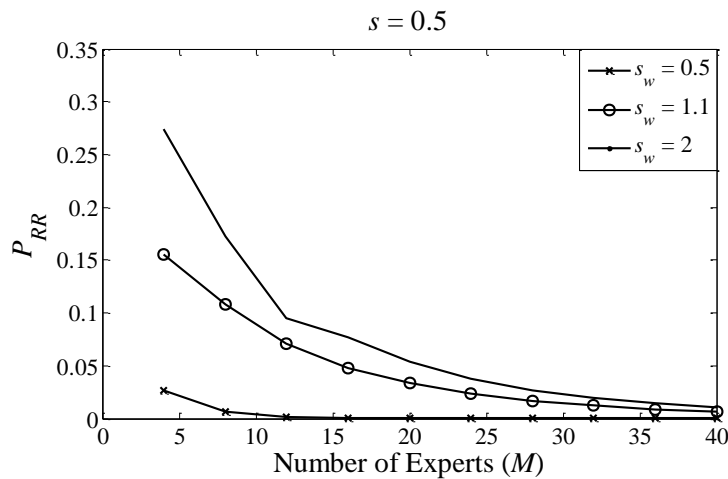
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, παρουσιάζεται παρόμοια συμπεριφορά σύγκλισης της  $P_{RR}$ , καθώς αυξάνεται το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνομώνων, όπως έχει ήδη προαναφερθεί. Σε όλες τις περιπτώσεις, δεν παρουσιάζεται σημαντικό κέρδος με την αύξηση του μεγέθους της ομάδας πέραν από τα 15 άτομα, ανεξάρτητα από το μοντέλο της αβεβαιότητας που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

Παρόμοια συμπεράσματα ισχύουν και για την περίπτωση της μεθόδου GM.



Εικόνα 106:  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για διαφορετικές τιμές του  $s_w^{(m)}$  για  $N=4$ ,  $L=2$ .



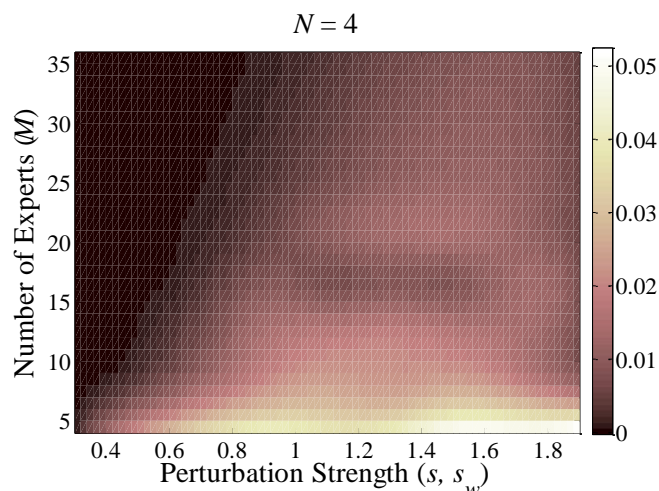


**Εικόνα 107:**  $P_{RR}$  ως συνάρτηση του αριθμού των ειδικών για διαφορετικές ομάδες των ειδικών (διαφορετικά  $L$ ) για  $N=4$ , όπου (α)  $s_w=0.5$  and (β)  $s=0.5$ .

### 7.3.10 Ταχύτητα Σύγκλισης

Τα αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί έως τώρα, σχετίζονται με τις τιμές που λαμβάνει η  $P_{RR}$  σε σχέση με το μέγεθος της ομάδας των ειδικών  $M$  για την περίπτωση της μεθόδου EV. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί περαιτέρω η ταχύτητα σύγκλισης της  $P_{RR}$  με τη χρήση της διαφορικής μείωσης  $\Delta P_{RR}(M) = P_{RR}(M) - P_{RR}(M+1)$ .

Εξ' ορισμού, η  $\Delta P_{RR}(M)$  είναι η μείωση της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης όταν ο αριθμός των εμπειρογνομώνων αυξάνεται κατά 1 άτομο. Στην Εικόνα 108 παρουσιάζεται το διάγραμμα επιφάνειας της  $\Delta P_{RR}$ , ως συνάρτηση του  $M$  και της έντασης των διαταραχών  $s$ , για  $N=4$  κριτήρια, υποθέτοντας ότι  $s=s_w$ . Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, συνάγεται ότι η προσθήκη ενός επιπλέον εμπειρογνώμονα στην ομάδα δεν θα αποφέρει σημαντική μείωση στην  $P_{RR}$ , εκτός εάν το  $s$  είναι πολύ μεγάλο ή ο αριθμός των εμπειρογνομώνων πολύ μικρός. Αξίζει να σημειωθεί ότι για  $M > 15$ , η  $\Delta P_{RR}$  είναι μικρότερη από 0,02, γεγονός που συνεπάγεται αμελητέα μείωση της  $P_{RR}$  ακόμη και σε μεγάλες δυνάμεις διαταραχής.



**Εικόνα 108:**  $\Delta P_{RR}$  ως μια συνδυαστική συνάρτηση του αριθμού των ειδικών  $M$  και των διαφορετικών τιμών για τις δυνάμεις διαταραχής  $s, s_w$ , όταν  $N=4$ .

## 7.4 Πρακτική Εφαρμογή του Θεωρητικού Μοντέλου

Στην ενότητα αυτή αναλύεται πώς εφαρμόζεται το θεωρητικό μοντέλο για την εκτίμηση της  $P_{RR}$  στην πράξη όταν ο λήπτης απόφασης δεν γνωρίζει τις στατιστικές παραμέτρους ( $W_k$ ,  $s$  και  $s_w$ ). Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι αυτές οι παράμετροι μπορούν να οριστούν από τους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη που συμπληρώνουν οι ειδικοί. Οι εκτιμήσεις  $\tilde{s}$  και  $\tilde{s}_w$  για τις δυνάμεις των διαταραχών  $s$  και  $s_w$  καθορίζονται μέσω του τετραγώνου των στοιχείων των πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7.4) μπορεί εύκολα να δειχθεί ότι το άθροισμα των τετραγώνων των στοιχείων του άνω τριγωνικού πίνακα υπολογίζεται ως εξής:

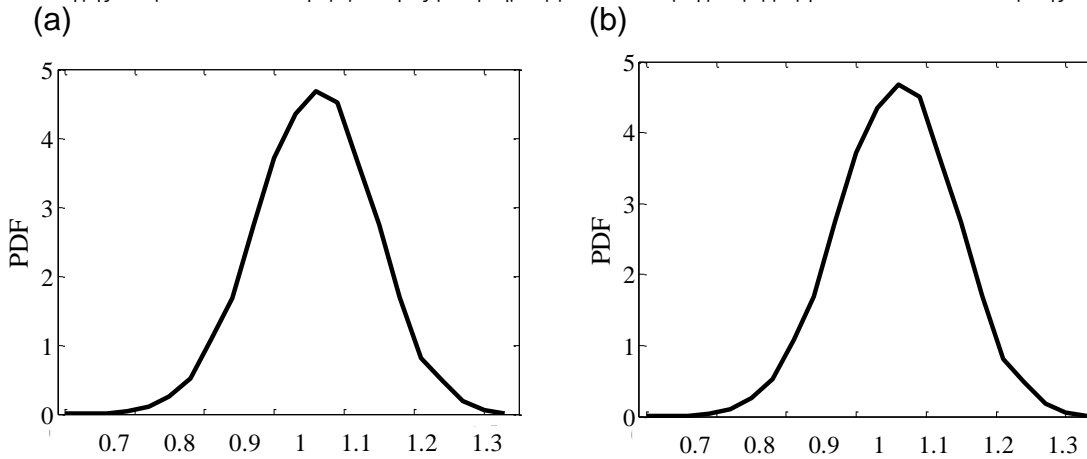
$$\sum_{i<j} \left\langle (P_{ij}^{(m)})^2 \right\rangle = s_w^{-1} f_1 f_2 f_3 \sum_{i<j} \frac{W_i^2}{W_j^2} \quad (7.34)$$

Οι παράμετροι  $f_k$  ορίζονται στην ενότητα 7.2.4. Τα στοιχεία στο αριστερό μέρος μπορούν να προσεγγιστούν χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές  $I_{ij}$  των τετραγώνων των πραγματικών στοιχείων των ειδικών  $\left\langle (P_{ij}^{(m)})^2 \right\rangle \cong \frac{1}{M} \sum_m (P_{ij}^{(m)})^2 = I_{ij}$ . Για να αποκτήσουμε τις καλύτερες δυνατές εκτιμήσεις  $\tilde{s}$ ,  $\tilde{s}_w$  και  $\tilde{w}_k$  για τις στατιστικές παραμέτρους  $s$ ,  $s_w$  και  $W_k$  μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε την ακόλουθη παράμετρο:

$$Q(\tilde{s}, \tilde{s}_w) = \left[ \frac{1}{M} \sum_m \sum_{i<j} (P_{ij}^{(m)})^2 - \tilde{s}_w^{-1} \tilde{f}_1 \tilde{f}_2 \tilde{f}_3 \sum_{i<j} \frac{w_i^2}{w_j^2} \right]^2 \quad (7.35)$$

Στην (7.35), οι παράμετροι  $\tilde{f}_k$  υπολογίζονται από τις εξισώσεις που παρέχουν τα  $f_k$  στην ενότητα 7.2.4 αντικαθιστώντας  $s$  με  $\tilde{s}$  και  $s_w$  με  $\tilde{s}_w$ , π.χ.  $f_1 = 1 + \tilde{s}_w^2 / 12$ ,  $f_2 = 1 + \tilde{s}^2 / 12$  και  $f_3 = (1 - \frac{1}{2} \tilde{s}_w)^{-1} - (1 + \frac{1}{2} \tilde{s}_w)^{-1}$ . Παράλληλα, έχουμε θεωρήσει ότι τα μέσα βάρη  $w_i$  παρέχουν μια πολύ καλή προσέγγιση των αρχικών βαρών  $W_k$  ( $\tilde{w}_k \cong w_k$ ). Αυτή η προσέγγιση απλοποιεί την ελαχιστοποίηση και παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα. Η ελαχιστοποίηση δύο διαστάσεων της συνάρτησης  $Q(\tilde{s}, \tilde{s}_w)$  μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας τυπικές μεθόδους ελαχιστοποίησης ή εξαντλητική αναζήτηση και αποδίδει τις εκτιμήσεις  $\tilde{s}$  και  $\tilde{s}_w$ . Η εκτιμώμενη τιμή  $\tilde{P}_{RR}$  της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης μπορεί να καθοριστεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ενότητας 7.2.4, όπου εφαρμόζονται οι εκτιμήσεις  $\tilde{s}$  και  $\tilde{s}_w$  στη θέση των στατιστικών παραμέτρων  $s$  και  $s_w$  και χρησιμοποιούνται τα  $w_k$  ως προσέγγιση στα αρχικά βάρη  $W_k$ .

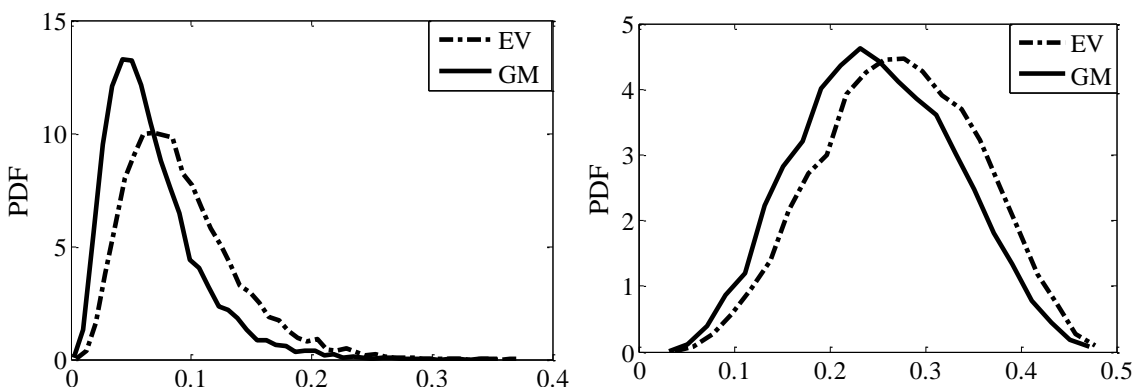
Πριν αναλυθεί η ακρίβεια της εκτίμησης της  $\tilde{P}_{RR}$  με αυτόν τον τρόπο είναι ενδιαφέρον να διερευνηθούν οι εκτιμήσεις των  $\tilde{s}$  και  $\tilde{s}_w$ . Χρησιμοποιείται προσομοίωση Monte Carlo, όπου σε κάθε επανάληψη γεννιέται ένας πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη μιας ομάδας  $M$  ειδικών και έπειτα υπολογίζονται οι εκτιμήσεις των παραπάνω ποσοτήτων. Στην Εικόνα 109 (α) και (β) παρουσιάζονται οι PDF των  $\tilde{s}$  και  $\tilde{s}_w$  θεωρώντας  $L=2$ ,  $N=4$ ,  $M=15$  για ένα υψηλό επίπεδο αβεβαιότητας  $s=s_w=1$ . Παρατηρείται ότι για τις δύο ποσότητες οι PDFs έχουν τη μεγαλύτερη τιμή κοντά στην τιμή των αρχικών στατιστικών παραμέτρων.



**Εικόνα 109: PDFs των εκτιμήσεων  $\tilde{s}$ ,  $\tilde{s}_w$  για  $M=15$ ,  $N=4$ ,  $L=2$ ,  $s=s_w=1$ .**

Η Εικόνα 110 παρουσιάζει τις PDFs των εκτιμώμενων πιθανοτήτων αναστροφής κατάταξης  $\tilde{P}_{RR}$  από τους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη για τις ίδιες παραμέτρους με πριν (α)  $N=4$  and (β)  $N=6$ . Στην περίπτωση όπου  $N=4$ , η  $P_{RR}$ , που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις αρχικές παραμέτρους, είναι  $\cong 7\%$  και  $\cong 5\%$ , για τις μεθόδους EV και GM αντίστοιχα. Η Εικόνα 110 (α) εισηγείται ότι προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης παρέχει πολύ καλή προσέγγιση για την τιμή της  $P_{RR}$  δεδομένου ότι υψηλότερες τιμές της PDF λαμβάνονται πολύ κοντά στις αρχικές τιμές  $P_{RR}$ . Παρόμοια συμπεράσματα εμφανίζονται στην περίπτωση όπου  $N=6$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 110 (β). Στην περίπτωση όπου η  $P_{RR}$  υπολογίζεται, χρησιμοποιώντας τις στατιστικές παραμέτρους, είναι  $\cong 28\%$  και  $\cong 25\%$  για τις μεθόδους EV και GM αντίστοιχα.

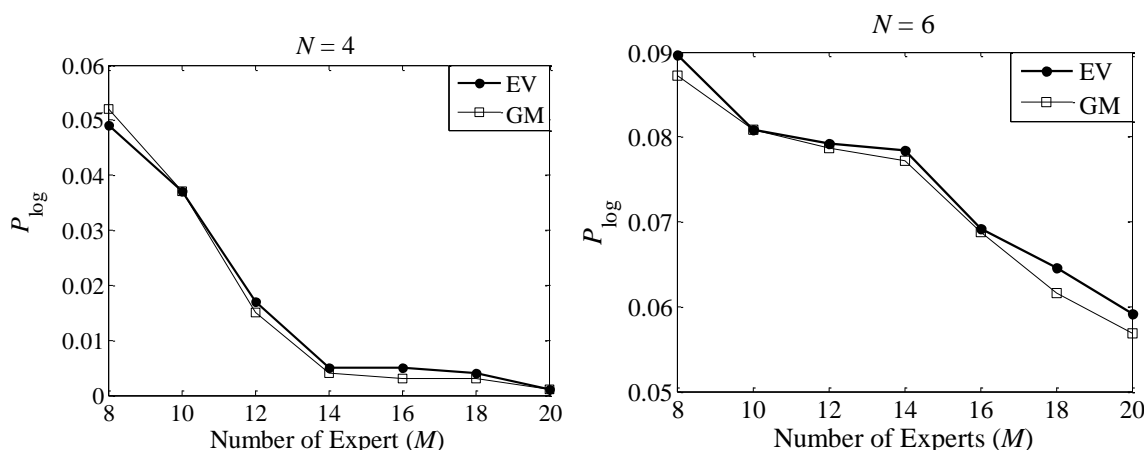
Καθώς αναλύουμε τα αποτελέσματα θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι το βασικό ζήτημα είναι η σωστή εκτίμηση της τάξης μεγέθους της  $P_{RR}$  και όχι η ακριβής τιμή της, που είναι σχετικά δύσκολο να υπολογιστεί δεδομένου ενός μικρού αριθμού πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη που μπορεί να είναι διαθέσιμοι από μια μικρή ομάδα εμπειρογνομόνων. Πράγματι, στην πράξη θα πρέπει να ενδιαφερόμαστε περισσότερο για τις περιπτώσεις όπου υποτιμούμε την τάξη μεγέθους της πιθανότητας, δεδομένου ότι σε αυτήν την περίπτωση ο λήπτης απόφασης ενδέχεται να πιστεύει εσφαλμένα ότι η κατάταξη είναι αξιόπιστη, ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι. Από την άλλη πλευρά, εάν υπερεκτιμήσουμε την τάξη μεγέθους οι συνέπειες δεν είναι σοβαρές δεδομένου ότι ο λήπτης απόφασης μπορεί να καλέσει τους ειδικούς να επαναλάβουν τις συγκρίσεις ή ακόμα και να προθέσει μερικούς ακόμα ειδικούς στην ομάδα.



**Εικόνα 110: PDF της  $\tilde{P}_{RR}$  στην περίπτωση όπου  $M=15$  για (α) $N=4$ , (β) $N=6$ .**

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανωτέρω παρατηρήσεις η Εικόνα 111(α) και (β) παρουσιάζει την πιθανότητα  $P_{log}$  ο λογάριθμος  $\tilde{x} = \log_{10} \tilde{P}_{RR}$  της εκτιμώμενης πιθανότητας αναστροφής κατάταξης να είναι χαμηλότερος από 50% του λογαρίθμου  $x = \log_{10}(P_{RR})$  της αρχικής  $P_{RR}$ . Θεωρήσαμε  $N=4$  και  $N=6$  αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι οι ίδιες με εκείνες στην Εικόνα 110 (α) και (β). Η εικόνα δείχνει ότι και στις δύο περιπτώσεις η τιμή της  $P_{log}$  μειώνεται σημαντικά καθώς το μέγεθος της ομάδας αυξάνεται. Για  $N=4$  οι τιμές της  $P_{log}$  είναι μόνο  $\cong 5\%$  ακόμα και για μια μικρή ομάδα ειδικών, για παράδειγμα  $M=8$ , και για τις δύο μεθόδους εκτίμησης των βαρών. Μια τέτοια μικρή τιμή της  $P_{log}$  αποτελεί ένδειξη ότι η προτεινόμενη μέθοδος λειτουργεί πολύ καλά ακόμα και για λίγους εμπειρογνώμονες.

Συγκρίνοντας την Εικόνα 111 (α) και την Εικόνα 111 (β) συμπεραίνουμε ότι υπάρχει μία μικρή αύξηση της  $P_{log}$ , καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ειδικών, αλλά παρ'όλα αυτά η πιθανότητα είναι μικρότερη από 10%. Παρατηρείται επίσης ότι οι εικόνες αντιστοιχούν σε πολύ διαφορετικές πιθανότητες αναστροφής κατάταξης: στην περίπτωση όπου  $M=8$ , για  $N=4$ , οι αρχικές πιθανότητες αναστροφής κατάταξης είναι περίπου  $\cong 16\%$  και  $\cong 13\%$  για τις μεθόδους EV και GM αντίστοιχα, ενώ για  $N=6$  οι αντίστοιχες τιμές είναι  $\cong 39\%$  και  $\cong 37\%$ . Αυτό συνεπάγεται ότι η προτεινόμενη προσέγγιση φαίνεται να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα τόσο για μικρές όσο και για μεγάλες πιθανότητες αναστροφής κατάταξης.



**Εικόνα 111:  $P_{log}$  ως συνάρτηση της ομάδας των ειδικών στην περίπτωση όπου  $s=s_w=1$ ,  $L=2$  για (α)  $N=4$ , (β)  $N=6$ ,**

## 7.5 Συμπεράσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, προτείνεται ένα θεωρητικό μοντέλο, που βασίζεται στην MVNCDF, για τον υπολογισμό της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης και την επίδραση της αβεβαιότητας στο τελικό αποτέλεσμα της μεθόδου συγκρίσεων ανά ζεύγη PWC. Η προσέγγιση βασίζεται στην εισαγωγή τυχαίων διαταραχών τόσο στη γνώμη των εμπειρογνομώνων όσο και στα στοιχεία των πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη. Η εν λόγω θεωρητική προσέγγιση συγκρίνεται με μια αριθμητική διαδικασία, που στηρίζεται σε προσομοιώσεις Monte Carlo, και μελετώνται στην εκάστοτε περίπτωση οι ιδιότητες σύγκλισης της PWC σε σχέση με το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνομώνων. Τα αποτελέσματα της θεωρητικής εκτίμησης της  $P_{RR}$  επιβεβαιώνεται από την εξέταση αρκετών παραλλαγών εφαρμογής του μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων των διαφορετικών επιπέδων αβεβαιότητας και ομοιομορφίας των βαρών, του διαφορετικού αριθμού των κριτηρίων, της αβεβαιότητας με στατιστικά

χαρακτηριστικά διαφόρων ειδών καθώς και των διαφορετικών μοντέλων και μεθόδων εκτίμησης των βαρών. Δεδομένης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης που ελλοχεύει στη διαδικασία συγκρίσεων ανά ζεύγη, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των ειδικών, γίνεται κατανοητό ότι η ύπαρξη ενός τέτοιου θεωρητικού μοντέλου εκτίμησης της  $P_{RR}$  κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για τη σταθερότητα των αποτελεσμάτων στις μεθόδους λήψης απόφασης που βασίζονται στην PWC. Παράλληλα, αναλύεται μια προσέγγιση εκτίμησης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης από τα πραγματικά δεδομένα, όπου οι στατιστικές παράμετροι είναι άγνωστες. Αποδεικνύεται ότι αυτές οι παράμετροι μπορούν να εκτιμηθούν μόνο από τους πίνακες συγκρίσεων ανά ζεύγη των ειδικών και το λάθος στην πιθανότητα είναι πολύ μικρό. Η μεθοδολογία που παρουσιάζεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επεκτείνει τη μέθοδο συγκρίσεων ανά ζεύγη προκειμένου να παρέχει επιπρόσθετη πληροφορία σχετικά με την αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων τη διαδικασία λήψης απόφασης.



## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται τα σημαντικότερα ερευνητικά θέματα που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτήν την ανάλυση. Τέλος, παρουσιάζονται κάποιες ερευνητικές κατευθύνσεις, που χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας, για μελλοντική έρευνα.

### 8.1 Επισκόπηση - Συμπεράσματα

Κάνοντας μια επισκόπηση των ερευνητικών στόχων και αποτελεσμάτων της παρούσας διδακτορικής διατριβής γίνεται φανερός ο διττός της στόχος. Πιο συγκεκριμένα, η εν λόγω διατριβή είχε ως απώτερο σκοπό αφενός τη δημιουργία ενός οδικού χάρτη με εφαρμογή στα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς, με τη βοήθεια των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης απόφασης και αφετέρου την μελέτη κρίσιμων θεμάτων αβεβαιότητας που ελλοχεύουν στις διαδικασίες λήψης απόφασης και ενδέχεται να επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα. Η μελέτη και ανάπτυξη των ανωτέρω βασίστηκε στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, σε κάποιες παραλλαγές της και ιδιαίτερα στη μέθοδο συγκρίσεων ανά ζεύγη, η οποία χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερο και αναπόσπαστο κομμάτι πολλών διαδικασιών λήψης απόφασης ακόμα και πέραν της AHP. Αξίζει να αναφερθεί ότι ανάμεσα στις εναλλακτικές πολυκριτηριακές μεθόδους λήψης απόφασης που αναλύονται στο Κεφάλαιο 2, επιλέχθηκε η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, ως η υπό μελέτη μεθοδολογία, δεδομένων των πλεονεκτημάτων που παρέχει και της ευκολίας εφαρμογής της δίνοντας τη δυνατότητα εύρεσης της κατάλληλης λύσης ή συνδυασμού λύσεων μέσα από την ιεράρχηση και την επιμέρους ανάλυση του προβλήματος σε εξειδικευμένα χαρακτηριστικά. Στο πλαίσιο εξάλλου, των τεχνολογικών λύσεων, που μελετούνται στην παρούσα διατριβή, η υποανάλυση του προβλήματος σε επιμέρους κριτήρια και παράγοντες που αφορούν την εκάστοτε τεχνολογική λύση είναι υψίστης σημασίας, προκειμένου να μπορεί να εξασφαλιστεί η πλέον κατάλληλη και αποδοτική λήψη απόφασης με βάση τα χαρακτηριστικά του δικτύου.

Ξεκινώντας από τον πρώτο επιμέρους στόχο, στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάστηκαν ποικίλες τεχνολογικές λύσεις που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στην εξέλιξη και περαιτέρω ανάπτυξη των οικιακών δικτύων επόμενης γενιάς, έχοντας ως γνώμονα την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων. Δεδομένου ότι κάθε τεχνολογική λύση έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της, φαίνεται ότι τα μελλοντικά οικιακά δίκτυα θα αποτελούνται πιθανότατα από υβριδικά συστήματα και η δημιουργία ενός οδικού χάρτη θα αποτελέσει το κλειδί για τη διασφάλιση της ομαλής ανάπτυξής τους. Ο οδικός χάρτης πρόκειται να προδιαγράψει την πορεία τους και να καθορίσει τις καταλληλότερες τεχνολογικές λύσεις για την ανάπτυξη των συστημάτων των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις τεχνολογικές δυσκολίες, ο σχεδιαστής του δικτύου πρέπει να λάβει υπόψην του ποικίλα οικονομικά και κοινωνικά θέματα που επηρεάζουν την υιοθέτηση των οικιακών δικτυακών συστημάτων από το ευρύ κοινό. Για παράδειγμα, το κόστος του συστήματος καθίσταται υψηλής σημασίας καθώς κινούμαστε πιο κοντά στις προσδοκίες των χρηστών. Είναι κατανοητό ότι οι προοπτικές των οικιακών δικτύων επηρεάζονται από ένα συνδυασμό ζητημάτων απόδοσης, κόστους, υγείας και ασφάλειας. Εν όψει αυτών των δυσκολιών, η ανάγκη για ένα χάρτη οικιακών δικτυακών συστημάτων, για την αντιμετώπιση όλων αυτών των θεμάτων, είναι προφανής, προκειμένου να επιτευχθεί η συναίνεση σχετικά με το σύνολο των αναγκών και των τεχνολογιών που απαιτούνται. Προς αυτήν την κατεύθυνση, τα βασικά ζητήματα των οικιακών δικτύων επόμενης γενιάς, που διερευνήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή σχετίζονται και με την επέκταση του δικτύου καθώς και με την προοπτική του οικιακού δικτύου που θα βασίζεται πλήρως σε

οπτικά συστήματα, δεδομένου ότι οι οπτικές τεχνολογίες αποτελούν μια πρόκληση για το μέλλον, παρέχοντας μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης.

Αναλυτικότερα, στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιήθηκε το πρώτο βήμα με σκοπό τη δημιουργία ενός οδικού χάρτη για τα οικιακά δίκτυα επόμενης γενιάς. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκαν ποικίλα κρίσιμα τεχνολογικά και κοινωνικοοικονομικά θέματα, προκειμένου να διευρευνηθεί η επιρροή που εξασκούν στην ανάπτυξη των μελλοντικών οικιακών δικτύων. Με βάση τις έρευνες που πραγματοποιήθηκαν, σύμφωνα με την μέθοδο της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας, αποδείχθηκε ότι η κοινωνική αποδοχή θεωρείται ως ένα κριτήριο πρωταρχικής σημασίας για την επιτυχή εμπορία των προϊόντων, που σχετίζονται με τα οικιακά δίκτυα. Στο πλαίσιο του εν λόγω κριτηρίου, τα θέματα υγείας αντικατοπτρίζουν την κύρια ανησυχία, πιθανόν αντανακλώντας το δημόσιο ενδιαφέρον σχετικά με τις βιολογικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Όσον αφορά τα ζητήματα απόδοσης, η κάλυψη κρίθηκε ως το πιο σημαντικό μέτρο απόδοσης, ακολουθούμενη από το ρυθμό μετάδοσης του κάτω καναλιού. Μια συσχέτιση των ζητημάτων αυτών με τις επικείμενες τεχνολογίες, οδηγεί στη διαπίστωση ότι προκειμένου να επιτευχθούν ευρυζωνικοί ρυθμοί μετάδοσης, στην περίπτωση που η εγκατάσταση των οπτικών ινών δεν είναι μια επιθυμητή επιλογή, οι ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες (RF, PLC, OW ή κάποια υβριδική εναλλακτική) μπορούν να παρέχουν μια ευρυζωνική εναλλακτική λύση κάθε μια με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά. Προς αυτόν τον σκοπό, η συμβατότητα με τις υπάρχουσες λύσεις και οικιακές συσκευές βαθμολογούνται επίσης υψηλά. Από οικονομική άποψη, το κόστος εγκατάστασης αποδείχθηκε ότι είναι ο πιο κρίσιμος παράγοντας. Δεδομένου ότι οι ασύρματες λύσεις και ακόμη οι PLC δεν απαιτούν την εγκατάσταση νέων καλωδίων, θα μπορούσε επομένως μια υβριδική λύση να οδηγήσει σε μείωση του κόστους εγκατάστασης. Τέλος, λήφθηκαν υπόψη και αξιολογήθηκαν οι διαφορετικές απαιτήσεις για HDTV και VoIP, που προβλέπεται να αποτελέσουν τα κύρια σενάρια εφαρμογής των υπηρεσιών για τα μελλοντικά οικιακά δίκτυα.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται και αναλύεται ένας οδικός χάρτης, που σχετίζεται με το σύστημα οικιακής δικτύωσης, και συγκεκριμένα με τη λειτουργικότητα της επέκτασης του δικτύου, που αποτέλεσε αντικείμενο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος στο πλαίσιο του έργου ICT OMEGA. Η λειτουργία επέκτασης είναι ένα θεμελιώδες κομμάτι του οικιακού δικτύου που σκοπεύει να επεκτείνει την κάλυψή του και να επιτρέπει την επικοινωνία ανάμεσα σε συσκευές που έχουν διαφορετικές διεπαφές φυσικού επιπέδου. Λαμβάνοντας υπόψη τους διάφορους κοινωνικούς, οικονομικούς και τεχνολογικούς παράγοντες, τρεις εναλλακτικές τεχνολογίες, δηλαδή το 802.11n, τα συστήματα 60GHz και τα συστήματα PLC αξιολογούνται, με τη χρήση της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας στο πλαίσιο της μεθοδολογίας TDE. Κύριος στόχος είναι η αξιολόγηση των προοπτικών των διαφόρων τεχνολογιών οικιακής δικτύωσης, τόσο από τεχνικής όσο και από κοινωνικοοικονομικής άποψης. Με βάση τα κριτήρια και τους παράγοντες, που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3, η AHP, στο πλαίσιο της TDE, εφαρμόζεται με σκοπό να ταξινομήσει τις διάφορες τεχνολογικές εναλλακτικές λύσεις. Τα αποτελέσματα μπορεί να επικεντρώθηκαν στην επέκταση του δικτύου, αλλά είναι επίσης ενδεικτικά και για τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία του οικιακού δικτύου. Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν με βάση την AHP υποδεικνύουν ότι η PLC λαμβάνει κάποιο προβάδισμα σε σχέση με τις ασύρματες εναλλακτικές λύσεις. Η 802.11 κατατάσσεται ως δεύτερη καλύτερη, ενώ το σύστημα 60GHz θεωρείται ως μια πιο μακροπρόθεσμη εναλλακτική λύση, η οποία θα μπορούσε να παρέχει συνδεσιμότητα της τάξης των Gigabit ανά δευτερόλεπτο. Παράλληλα, συζητήθηκαν τα πλεονεκτήματα των υβριδικών λύσεων αυτών των τεχνολογιών, είτε στο φυσικό είτε σε ένα υψηλότερο επίπεδο δικτύου. Πράγματι, το PLC φαίνεται να είναι η πλέον επικρατείσα σύνδεση στο σπίτι, ενώ όλες οι συσκευές θα πρέπει να περιλαμβάνουν πρόσθετη διεπαφή για να

υποστηρίζουν τα οφέλη της ευφυούς μεταγωγής, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ασύρματη επέκταση. Επιπρόσθετα, διάφορα θέματα που αφορούν την απόδοση της συσκευής και το κόστος των δομικών στοιχείων του δικτύου έρχονται στο φως και συζητείται η συνάφειά τους με τις τρέχουσες δραστηριότητες έρευνας και τυποποίησης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για την επικύρωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, η μεθοδολογία της AHP, στο πλαίσιο της TDE, επεκτείνεται με την ενσωμάτωση της ανάλυσης ευαισθησίας και την προσομοίωση με Monte Carlo, προκειμένου να διερευνηθεί το πώς η αβεβαιότητα επηρεάζει την τελική κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Με ιδιαίτερο ενδιαφέρον αποδείχτηκε ότι δεν επηρεάζονται δραματικά τα αποτελέσματα της κατάταξης των εναλλακτικών.

Κατόπιν, το Κεφάλαιο 5 της παρούσας διδακτορικής διατριβής εστίασε στην αξιολόγηση των εν δυνάμει οπτικών ασύρματων τεχνολογιών για την ανάπτυξη του οικιακού δικτύου, έχοντας ως όραμα ένα μελλοντικό σπίτι ή γραφείο βασιζόμενο εξ'ολοκλήρου σε οπτικά συστήματα. Μια σειρά από σημαντικά ευρήματα προέκυψαν, βασισμένα στη μέθοδο Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας, τα οποία πρέπει να αποτελούν μέρος οποιουδήποτε προσεκτικά σχεδιασμένου οδικού χάρτη για τις οπτικές τεχνολογίες της οικιακής δικτύωσης. Το πρώτο εύρημα αφορούσε την κατάρτιση και την ιεράρχηση των διαφόρων παραγόντων και κριτηρίων που καθορίζουν την ανάπτυξη των συστημάτων αυτών. Κατέστη σαφές ότι υπάρχουν πολλοί κοινωνικοί και οικονομικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, δεδομένου ότι τα συστήματα οικιακής δικτύωσης θα τοποθετηθούν στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Οι κοινωνικές πτυχές έδειξαν να είναι υψίστης σημασίας και τα θέματα υγείας ενδέχεται να προσφέρουν ένα σοβαρό κίνητρο για την εγκατάσταση IR και VLC σταθμών βάσης, που είναι εγγενώς ασφαλή. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν επεξηγούνται, λαμβάνοντας υπόψη τη φύση των οπτικών ασύρματων συστημάτων. Στη συνέχεια, εντόπιστηκαν και ταξινομήθηκαν πέντε εναλλακτικά σενάρια αρχιτεκτονικής, που αποτελούνται από ένα συνδυασμό IR, VLC, POF και PLC συστημάτων. Αυτές οι εναλλακτικές λύσεις αξιολογήθηκαν χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία της AHP. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ένας συνδυασμός των VLC και IR σταθμών βάσης, μαζί με PLC δίκτυο κορμού παρέχει την πιο ευνοϊκή επιλογή, αλλά ακολουθείται στενά από την εναλλακτική λύση των IR σταθμών βάσης που συνδέονται με PLC δίκτυο κορμού. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα έδειξαν σαφώς τα πλεονεκτήματα του PLC δικτύου κορμού από την άποψη της ευκολίας της εγκατάστασης σε μεγάλα κτίρια. Παράλληλα, τα αποτελέσματα ταξινόμησης επεξεργάστηκαν περαιτέρω με τη χρήση ανάλυσης ευαισθησίας και προσομοίωσης Monte Carlo. Η ερευνητική προσπάθεια που πραγματοποιήθηκε στο παρόν κεφάλαιο παρέχει ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τον εντοπισμό των παραγόντων που θα μπορούσαν να επιταχύνουν ή να εμποδίσουν την ανάπτυξη των τεχνολογιών οπτικών επικοινωνιών στο οικιακό δίκτυο. Το εν λόγω πλαίσιο αναμένεται να αποτελέσει το πρώτο βήμα για τη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των σημαντικών ερευνητικών εργασιών που διεξάγονται σε αυτόν τον τομέα, καθώς και των κοινωνικο-οικονομικών απαιτήσεων, γεγονός που θα εγγυηθεί την επιχειρηματική προοπτική για την ευρεία εγκατάσταση αυτών των συστημάτων.

Όσον αφορά τον δεύτερο επιμέρους στόχο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, τα Κεφάλαια 6 και 7 εστιάζουν στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων της αβεβαιότητας, που εισάγεται όταν οι εμπειρογνώμονες συμπληρώνουν τους πίνακες των συγκρίσεων ανά ζεύγη, στο πλαίσιο των διαδικασιών πολυκριτηριακής λήψης απόφασης. Η μεθοδολογία των συγκρίσεων ανά ζεύγη αποτελεί αναπόσπαστο μέρος των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης αποφάσεων και κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική στην κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων. Δεδομένου ότι η μέθοδος βασίζεται σε ένα σύνολο συγκρίσεων που πραγματοποιούνται από μια ομάδα εμπειρογνώμωνων και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εμπειρογνώμονες δεν συμμερίζονται την ίδια γνώμη ή δεν

πραγματοποιούν τις συγκρίσεις κατά ζεύγη με τρόπο συνεπή, ενδέχεται να εισαχθεί αβεβαιότητα στο τελικό αποτέλεσμα.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, στο Κεφάλαιο 6 προτάθηκε και εφαρμόστηκε ένα μοντέλο αβεβαιότητας για την αντιμετώπιση δύο σημαντικών ζητημάτων που αφορούν την πιθανότητα αντιστροφής κατάταξης στις συγκρίσεις ανά ζεύγη. Το πρώτο υπό μελέτη θέμα αφορά το πώς αυτή η πιθανότητα μειώνεται με την αύξηση του αριθμού των εμπειρογνωμόνων που συμμετέχουν στις έρευνες. Τα αποτελέσματα υπαγορεύουν ότι δεν υπάρχει μεγάλο κέρδος στην τιμή της  $P_{RR}$  από την αύξηση του αριθμού των εμπειρογνωμόνων πέραν των 15, ακόμη και αν το επίπεδο αβεβαιότητας είναι μεγάλο. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία των διαταραχών φάνηκε ότι η σύγκλιση της  $P_{RR}$  σε σχέση με τον αριθμό των ειδικών δεν εξαρτάται σημαντικά από τα στατιστικά χαρακτηριστικά της αβεβαιότητας. Παράλληλα, αποδείχτηκε αριθμητικά ότι η επιλογή της κλίμακας συγκρίσεων ανά ζεύγη καθώς και της μεθόδου υπολογισμού των βαρών δεν επηρεάζει σημαντικά τη σύγκλιση της  $P_{RR}$ . Το δεύτερο θέμα, που μελετήθηκε σε αυτό το κεφάλαιο, αφορά το πώς η πιθανότητα αναστροφής κατάταξης μπορεί να εκτιμηθεί στην πράξη, από τα στοιχεία των πινάκων συγκρίσεων κατά ζεύγη μίας ομάδας εμπειρογνωμόνων. Δύο εναλλακτικές μέθοδοι αναπτύχθηκαν για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με τη στατιστική συμπεριφορά της αβεβαιότητας που προκαλείται από τις διαταραχές. Αποδείχτηκε ότι μία από αυτές παρέχει εύλογα καλή ακρίβεια και μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές της μεθόδου για την εκτίμηση της αξιοπιστίας του αποτελέσματος. Το ενδιαφέρον είναι ότι τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται από άλλες συνθήκες, όπως οι ασαφείς κρίσεις ανά ζεύγη, οι εναλλακτικές κλίμακες προτίμησης, οι μέθοδοι εκτίμησης του βάρους και η θεώρηση διαφορετικών επιπέδων αβεβαιότητας για κάθε εμπειρογνώμονα που ανήκει στην ίδια ομάδα. Το μεθοδολογικό πλαίσιο που παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο, μπορεί να επιτρέψει στους ιθύνοντες να επιλέξουν σωστά τον αριθμό των εμπειρογνωμόνων που θα συμμετέχουν στη διαδικασία συγκρίσεων κατά ζεύγη καθώς και να αποκτήσουν ένα τρόπο υπολογισμού της αξιοπιστίας του αποτελέσματος.

Τέλος, στο τελευταίο κεφάλαιο της εν λόγω διδακτορικής διατριβής, προτείνεται ένα θεωρητικό μοντέλο, που βασίζεται στην MVNCDF, για τον υπολογισμό της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης και την επίδραση της αβεβαιότητας στο τελικό αποτέλεσμα της μεθόδου συγκρίσεων ανά ζεύγη. Δεδομένου ότι στο Κεφάλαιο 6 μελετήθηκε αριθμητικά η συμπεριφορά καθώς και η ταχύτητα σύγκλισης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης σε σχέση με το επίπεδο της αβεβαιότητας και το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνωμόνων, είναι πολύ σημαντικό να προταθεί ένας τρόπος θεωρητικής προσέγγισης του εν λόγω μεγέθους. Η προσέγγιση, που προτείνεται σε αυτό το κεφάλαιο, βασίζεται στην εισαγωγή τυχαίων διαταραχών τόσο στη γνώμη των εμπειρογνωμόνων όσο και στα στοιχεία των πινάκων συγκρίσεων ανά ζεύγη. Η εν λόγω θεωρητική προσέγγιση συγκρίνεται με μια αριθμητική διαδικασία, που στηρίζεται σε προσομοιώσεις Monte Carlo, και μελετώνται στην εκάστοτε περίπτωση οι ιδιότητες σύγκλισης της PWC σε σχέση με το μέγεθος της ομάδας των εμπειρογνωμόνων. Τα αποτελέσματα της θεωρητικής εκτίμησης της  $P_{RR}$  επιβεβαιώνονται από την εξέταση αρκετών παραλλαγών εφαρμογής του μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων των διαφορετικών επιπέδων αβεβαιότητας και ομοιομορφίας των βαρών, του διαφορετικού αριθμού των κριτηρίων, της αβεβαιότητας με στατιστικά μοντέλα διαταραχών διαφόρων ειδών, καθώς και των διαφορετικών μοντέλων και μεθόδων εκτίμησης των βαρών. Δεδομένης της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης που ελλοχεύει στη διαδικασία συγκρίσεων ανά ζεύγη, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα των ειδικών, γίνεται κατανοητό ότι η ύπαρξη ενός τέτοιου θεωρητικού μοντέλου εκτίμησης της  $P_{RR}$  κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για τη σταθερότητα των αποτελεσμάτων στις μεθόδους λήψης απόφασης που βασίζονται στην PWC.

## 8.2 Προτάσεις για Μελλοντική έρευνα

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής, καθώς και καθ'όλη τη διάρκεια συγγραφής της προέκυψαν ιδέες που θα ήταν ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για μελλοντική έρευνα. Άλλωστε, δεδομένου ότι σε ένα διδακτορικό μπορεί να εξεταστεί ένα συγκεκριμένο πεδίο έρευνας, πάντα θα προκύπτουν και άλλα ερευνητικά θέματα τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας και μελέτης. Σε αυτό το πλαίσιο, στο παρόν υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν σκέψεις καθώς επίσης και προτάσεις για μελλοντική έρευνα, με απώτερο στόχο την επέκταση των ζητημάτων που ερευνήθηκαν κατά τη διάρκεια της διδακτορικής διατριβής, η οποία δίνει την ώθηση για διευρεύνηση περαιτέρω σημαντικών θεμάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο στόχος του παρόντος διδακτορικού ήταν εν τέλει διπτός, στο ίδιο μήκος κύματος θα κυμανθούν και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Πιο συγκεκριμένα, προτάσεις που αφορούν τη χρήση των διαδικασιών λήψης αποφάσεων στα μελλοντικά μοντέλα οικιακής δικτύωσης, καθώς επίσης και ιδέες για την περαιτέρω διερεύνηση της αβεβαιότητας και όχι μόνο σε αυτές τις διαδικασίες.

Όσον αφορά την ερευνητική προσέγγιση των οικιακών δικτύων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η μελέτη των οπτικών επικοινωνιών στην περίπτωση της επέκτασης του δικτύου. Το γεγονός αυτό βέβαια προϋποθέτει την ωρίμανση αυτών των τεχνολογιών στο μέλλον, παράγοντας που μας απέτρεψε, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής, να τις λάβουμε υπόψη για την λειτουργικότητα επέκτασης του δικτύου, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.

Επιπρόσθετα, κάνοντας μια επισκόπηση των αποτελεσμάτων, στα οποία κατέληξε η παρούσα διδακτορική διατριβή, για τα οικιακά δίκτυα, τις υπηρεσίες και τις λειτουργικότητες, γίνεται εμφανής η τάση υβριδοποίησης που ενδέχεται να παρουσιάζει η μελλοντική οικιακή δικτύωση. Σε αυτό το πλαίσιο, αξίζουν να μελετηθούν ποικίλα σενάρια δικτύωσης πέραν από την προοπτική ενός οικιακού χώρου, που βασίζεται μόνο σε οπτικές τεχνολογίες, όπως μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 5, σενάριο βέβαια εξαιρετικά θελκτικό για την πραγματοποίηση του οράματος των Gbps. Προς αυτήν την κατεύθυνση θα μπορούσε να διερευνηθεί η ύπαρξη ενός υβριδικού δικτύου που θα έδινε τη δυνατότητα επιλογής της καταλληλότερης τεχνολογίας, ανάλογα με την υπηρεσία που θα ήθελε κάθε φορά ο εκάστοτε χρήστης. Αυτό το ενδεχόμενο βέβαια προδιαγράφει την ύπαρξη ενός αυτόνομου οικιακού δικτύου, όπου πραγματοποιείται αυτόματα μεταγωγή ανάμεσα στις ποικίλες τεχνολογίες, λαμβάνοντας υπόψη την υπηρεσία που επιθυμεί ο χρήστης και τις απαιτήσεις ως προς την ταχύτητα, το εύρος ζώνης και άλλα καθοριστικά χαρακτηριστικά για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας. Θα μπορούσαμε, λοιπόν, να μιλάμε για το όραμα ενός μελλοντικού οικιακού δικτύου που θα βασίζεται στο μοντέλο υβριδικής δικτύωσης με τεχνολογίες, όπως τα OW, PLC, POF, Radio 60 Ghz, IEEE 802.11n.

Όσον αφορά την περίπτωση της διερεύνησης των διαδικασιών λήψης απόφασης, ιδιαίτερη σημασία θα παρουσίαζε η μελέτη της αβεβαιότητας στην κρίση των ειδικών και σε άλλες μεθόδους πέραν της PWC, όπως μελετήθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Παράλληλα, θα μπορούσαν να μελετηθούν και παραλλαγές της AHP ή ακόμα και ενδεχόμενοι συνδυασμοί με άλλες μεθόδους. Επιπρόσθετα, θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθούν ποικίλα σενάρια μελέτης της αβεβαιότητας, όπως στην περίπτωση των μη συμπληρωμένων κρίσεων των ειδικών. Πιο συγκεκριμένα, πόσο θα επηρέαζαν το τελικό αποτέλεσμα και την πιθανότητα αναστροφής κατάταξης οι ελλειπίες κρίσεις των ειδικών; Σε αυτό το μήκος κύματος θα μπορούσε να διερευνηθεί και η περίπτωση της ανεπαρκούς εύρεσης εμπειρογνομώνων. Υπό το πρίσμα αυτό, μπορεί να μελετηθεί η επιρροή του μη επαρκούς μεγέθους της ομάδας των εμπειρογνομώνων στην τελική κατάταξη, εάν λάβουμε υπόψη το πόσο σίγουροι είναι οι ήδη εμπλεκόμενοι ειδικοί. Μια

άλλη εναλλακτική πρόταση για μελλοντική έρευνα, είναι η μελέτη της αβεβαιότητας στην περίπτωση μη συνεπών κρίσεων, υπό το πρίσμα της πιθανότητας αναστροφής κατάταξης σε συνδυασμό με τον δείκτη συνέπειας CI του Saaty, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2.

Τέλος, θα μπορούσαμε να διεισδύσουμε σε άλλους τομείς που να σχετίζονται με τις μεθόδους λήψης απόφασης. Προς αυτήν την κατεύθυνση ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε ο συνδυασμός των υπό μελέτη μεθόδων με τις μεθόδους της μαθηματικής ψυχολογίας. Αναλυτικότερα, θα μπορούσε να διερευνηθεί ο τρόπος σκέψης των ειδικών, το πώς απόφασίζουν άραγε οι εμπειρογνώμονες προκειμένου να εισάγουν τις κρίσεις τους. Υπό αυτό το πρίσμα, θα μπορούσαν να εξαχθούν ερευνητικά συμπεράσματα, προκειμένου να αξιοποιηθούν στον τομέα του μάρκετινγκ. Για παράδειγμα, εάν αποτυπωθεί ο τρόπος απόδοσης της κρίσης των ειδικών για την μελέτη της εκάστοτε τηλεπικοινωνιακής υπηρεσίας/ τεχνολογίας, θα μπορούσαν να αποτυπωθούν καλύτερα οι ανάγκες και οι επιθυμίες των εν δυνάμει καταναλωτών, έτσι ώστε να αναπτυχθούν τα αντίστοιχα προϊόντα/υπηρεσίες με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες που ο πελάτης επιθυμεί, σε συνδυασμό με την διανομή τους στην αγορά την κατάλληλη χρονική στιγμή. Μια τέτοια προσέγγιση θα ήταν ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη λήψη σημαντικών αποφάσεων, και μάλιστα, σε ένα απαιτητικό επιχειρηματικό περιβάλλον, όπως αυτό στο οποίο βρισκόμαστε. Μελέτες έχουν δείξει ότι οργανισμοί που χρησιμοποιούν μοντέρνες και προχωρημένες μεθόδους λήψης αποφάσεων πρωταγωνιστούν σε διεθνές επίπεδο, αποκτώντας και συντηρώντας συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των ανταγωνιστών τους.

Τέλος, κάνοντας μια επισκόπηση των θεμάτων που παρουσίασε η παρούσα διατριβή, είναι εμφανές ότι οι ιδέες για μελλοντική έρευνα είναι πολλές και πάντα από μια ερευνητική εργασία θα προκύπτει κάτι άλλο, εξίσου και περισσότερο σημαντικό, για περαιτέρω διερεύνηση και μελέτη.

## 9 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ

Η έρευνα που αφορά τα κεφάλαια 3, 4 και 5, χρηματοδοτήθηκε από το έβδομο Ευρωπαϊκό Κοινοτικό Πρόγραμμα FP7/2007-2014 βάσει της συμφωνίας επιχορήγησης αριθ. 213311, που αναφέρεται επίσης ως OMEGA. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους εμπειρογνώμονες που συμμετείχαν στις εν λόγω έρευνες, καθώς και τους ανθρώπους που εργάστηκαν στα Πακέτα Εργασίας 1, 4 και 8 του ICT-OMEGA. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω για την πολύτιμη συμβολή τους την κα. Κέλλυ Παπαδογεωργάκη και τον κ. Γιώργο Κακαλέτρη, από το Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών, για το σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη συντήρηση της πλατφόρμας υποστήριξης των ερευνών στο πλαίσιο της δημιουργίας του οδικού χάρτη για τα οικιακά δίκτυα.





**ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ**

<b>Ξενόγλωσσος Όρος</b>	<b>Ελληνικός Όρος</b>
Ad hoc network	Αυτοοργανωμένο δίκτυο που δε βασίζεται σε κάποια προϋπάρχουσα υποδομή
Additive	Προσθετική
Additive aggregation model	Προσθετική πολυκριτηριακή συνάρτηση χρησιμότητας
Affirmation	Κατάφαση
Alternatives	Εναλλακτικές
Analytic hierarchy process	Αναλυτική διαδικασία ιεράρχησης, Αναλυτική ιεραρχική διαδικασία
Analytic Network Process	Αναλυτική Δικτυακή Διαδικασία
Attribute	Ιδιότητα-χαρακτηριστικό
Automatic Repeat Request	Αίτηση αυτόματης επανάληψης (μηνύματος)
Benefits, opportunities, costs, and risks	Ανάλυση οφελών, κόστους, ευκαιριών και ρίσκων
Binary relation	Δυαδική σχέση
Blocking	Παρεμπόδιση
Blu ray	Ψηφιακός οπτικός δίσκος αποθήκευσης δεδομένων
Blue channel bandwidth	Εύρος ζώνης μπλε χρώματος
Bluetooth	«Κυανόδους»
Bottleneck	Συμφόρηση
Bottom-up	Από κάτω προς τα πάνω
Cable connectors	Καλώδια σύνδεσης
Capacity	Χωρητικότητα

Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance	Πολλαπλή πρόσβαση με τη χρήση ανίχνευσης φέροντος / αποφυγής σύγκρουσης
Categor 5 cable	Συστρεμμένο ζεύγος καλωδίων κατηγορίας 5
Channel bonding	Μίξη δύο ή περισσότερων καναλιών με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας μέσω του διαμοιρασμού των δεδομένων στα κανάλια
Chipsets	Σύνολο ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που λειτουργούν ομαδοποιημένα
Choice	Επιλογή
Coalition of the criteria	Αρκετά από τα κριτήρια
Comparability	Συμβατότητα
Compatibility with legacy systems	Συμβατότητα με συμβατικά συστήματα
Complementary Metal Oxide Semiconductor	Κυκλώματα συμπληρωματικών ημιαγωγών μεταλλικών οξειδίων
Completeness	Πληρότητα
Consistency index, CI	Δείκτης συνέπειας
Consistency Ratio, CR	Λόγος Συνέπειας
Consistent	Συνεπής
Consumer Electronics Show	Έκθεση ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης
Content diversity	Ποικιλομορφία περιεχομένου
Cost of telephone set	Κόστος τηλεφωνικού εξοπλισμού
Cost of television set	Κόστος εξοπλισμού τηλεόρασης
Coverage	Κάλυψη
Crisp or precise	Ακριβές
Criteria	Κριτήρια
Cross talk	Διαφωνία

Data encryption standard	Πρότυπο κρυπτογράφησης δεδομένων
Data envelopment analysis	Περιβάλλουσα ανάλυση δεδομένων
Data link layer	Επίπεδο διασύνδεσης δεδομένων
Data Over Cable Service Interface Specification	Προδιαγραφή διεπαφής υπηρεσίας για μεταφορά δεδομένων πάνω από καλώδια
Decision makers	Άτομα ή ομάδες ατόμων που λαμβάνουν αποφάσεις
Decision matrix	Πίνακας απόφασης
Decision-theoretic rough sets	Μεθοδολογία ακατέργαστου συνόλου θεωρητικής απόφασης
Delphic hierarchy process	Δελφική διαδικασία ιεράρχησης
Design	Σχεδιασμός
Desirability value	Επιθυμητή τιμή
Deviational variables	Μεταβλητές απόκλισης
Diffuse	Διάχυση
Digital subscriber line	Ψηφιακή συνδρομητική γραμμή
Digital versatile disc	Ψηφιακός δίσκος πολλαπλών χρήσεων
Direct broadcast satellite	Άπευθείας δορυφορική μετάδοση
Direct-sequence spread spectrum	Διαμόρφωση με διασπορά φάσματος άμεσης ακολουθίας
Discontent	Δυσφορία
Discordance index	Δείκτη ασυμφωνίας
Discordance test	Έλεγχος ασυμφωνίας
Dominance-based rough set approach	Μέθοδος ακατέργαστου συνόλου βασισμένη στην κυριαρχία
Downstream	Κάτω κανάλι
Dual mode	Υποστηρίζει φωνή και δεδομένα

Economic	Οικονομικά ζητήματα
Effective isotropically radiated power	Ενεργός ιστροπική ισοδύναμη ισχύς
Eigenvector	Ιδιοδιάνυσμα
Elimination and Choice Expressing Reality	Οικογένεια μεθόδων αποβολής και επιλογής εκφράζοντας την πραγματικότητα
End-to-end	Από άκρη σε άκρη
Entering flow	Εισερχόμενη ροή
Euclidean distances	Ευκλείδειες αποστάσεις
European Telecommunications Standards Institut	Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών
Expected utility function	Αναμενόμενης συνάρτησης χρησιμότητας
Experts	Ειδικοί, εμπειρογνώμονες
Extender Device Survey	Έρευνα συσκευής επέκτασης
Extenders	Συσκευές επέκτασης
Extension principle theory	Θεωρία αρχής της επέκτασης
Extreme	Ακραία
Eye safety	Ασφάλεια ματιών
Factors	Παράγοντες/υποκριτήρια
Federal Communications Commission	Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών
Fiber To The Home	Οπτική Ίνα στο σπίτι
Fictitious worst	Αρνητικά ιδανική λύση
Field of view	Γωνία θέασης
Final outranking relation	Τελική σχέση υπεροχής
Flexibility	Ευελξία
Forecast	Προβλέπω-πρόβλεψη

Forward Error Correction	Κώδικες διόρθωσης λάθους
Frequency hopping	Μεταπήδηση συχνότητας
Frequency-hopping spread spectrum	Επικοινωνίες διευρυμένου φάσματος με μεταπήδηση συχνότητας
Fuzzy	Ασαφής
Fuzzy Analytic Hierarchy Process	Ασαφής Αναλυτική Ιεραρχικής Διαδικασίας
Fuzzy conjunctive/disjunctive method	Ασαφής ενωτική/διαζευκτική μέθοδος
Fuzzy weighted sum	Ασαφές σταθμισμένο άθροισμα
Gallium arsenide	Γάλλιο αρσενικό
Gaming cluster	Ομάδα παιχνιδιού
Gateway	Οικιακός δρομολογητής
Geometric mean methods	Μέθοδοι του γεωμετρικού μέσου
Goal	Στόχος
Goal programming	Προγραμματισμός στόχων
Goal, aspiration or reference level models	Μοντέλα στόχου, φιλοδοξιών ή επιπέδου αναφοράς
Hardware	Εξοπλισμός
HDTV Survey	Έρευνα για HDTV
Health issues	Θέματα υγείας
High Definition TV	Υψηλής ευκρίνειας τηλεόραση
High Fidelity	Ηχοσύστημα υψηλής αξιοπιστίας
High Performance Radio Local Area Network	Τοπικό ραδιοδίκτυο υψηλής απόδοσης
Home integration with no new wires	Οικιακή ολοκλήρωση χωρίς την εγκατάσταση νέων καλώδια
Home Network	Οικιακό Δίκτυο
Home Phonenumber Networking Alliance	Ένωση επικοινωνιών μέσω τηλεφωνικής

	γραμμής οικιακής δικτύωσης
Home Radiofrequency	Οικιακή ραδιοσυχνότητα
HomePlug Powerline Alliance	Ένωση επικοινωνιών μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος στην οικιακή δικτύωση
Hot swap	Αντικατάσταση στοιχείων συστήματος χωρίς τη διακοπή της λειτουργίας του
Hotspot	Σταθμός Βάσης
Identically distributed independent random variables	Ταυτόσημα κατανομημένες και ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές
Implementation	Υλοποίηση
Imprecise	Ανακριβείς
Imprecision	Ασάφεια
Incomparability	Μη συγκρισιμότητας
Inconsistent matrix	Ασυνεπής πίνακας
Independence condition	Συνθήκη ανεξαρτησίας
Independence condition	Συνθήκη ανεξαρτησίας
Infrared Communications Protocol	Πρωτόκολλο για τη μετάδοση με υπέρυθρη ακτινοβολία
Infra-Red Data Association	Ένωση για την μετάδοση με χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας
Infrared Link Access Protocol	Πρωτόκολλο πρόσβασης για μετάδοση με υπέρυθρη ακτινοβολία
Infrared Link Management Protocol	Πρωτόκολλο διαχείρισης της σύνδεσης για μετάδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας
Infrared Local Area Network	Τοπικό δίκτυο που χρησιμοποιεί υπέρυθρη ακτινοβολία

Infrared Object Exchange	Πρωτόκολλο επικοινωνίας με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας για την ανταλλαγή δυαδικών αντικειμένων μεταξύ των συσκευών
Infrared Physical Layer Specification	Προδιαγραφή φυσικού επιπέδου για μετάδοση με υπέρυθρη ακτινοβολία
Infrared Simple	Πρωτόκολλο για μετάδοση υψηλής ταχύτητας με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας
Infrared SimpleShot	Πρωτόκολλο για γρήγορη μετάδοση ψηφιακών εικόνων σε τηλεοράσεις και εκτυπωτές με τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας
Institute of Electrical and Electronics Engineers	Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
Intallation first cost	Κόστος πρώτης εγκατάστασης
Integrated Services for Digital Network	Ολοκληρωμένες Υπηρεσίες για ψηφιακό Δίκτυο
Intelligence	Γνώση
Inter symbol interference	Παρεμβολή μεταξύ των συμβόλων
Interchangeability	Δυνατότητα αλλαγής δομικών στοιχείων
inter-MAC	Ενδιάμεσο πρωτόκολλο ελέγχου πρόσβασης του μέσου
International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection	Διεθνής Επιτροπή για την Προστασία από τις Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες
International Society on Multiple Criteria Decision Making	Διεθνής Κοινότητα των πολυκριτηριακών μεθόδων λήψης απόφασης
International Telecommunication Union-Standardization	Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών τομέας Τυποποίησης
Internet	Διαδίκτυο
Internet Protocol television	Τηλεόραση πρωτόκολλου Διαδικτύου
Laser	Συσκευή που εκπέμπει φως μέσω μιας διαδικασίας οπτικής ενίσχυση με βάση την εξαναγκασμένη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Least square methods	Μέθοδοι ελαχίστων τετραγώνων
Leaving flow	Εξερχόμενη ροή
Legacy device	Συμβατική συσκευή
Legacy device adapter	Συμβατικός προσαρμογέας
Line of Sight	Με απευθείας οπτική επαφή
Linear	Γραμμικές
Linear feedback shift register	Καταχωρητής ολίσθησης γραμμικής ανατροφοδότησης
Linear programming	Γραμμικός Προγραμματισμό
Link	Σύνδεση
Link budget	Ισολογισμός ισχύος
Link reach	Μέχρι που φτάνει η σύνδεση
Logarithmic least square methods	Μέθοδοι λογαριθμικών ελαχίστων τετραγώνων
Long haul	Μεγάλων αποστάσεων
Lotteries	Στοιχήματα
Maintenance cost	Κόστος συντήρησης
Marginal utility function	Οριακές συναρτήσεις χρησιμότητας
Mean Time Between Failure	Μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών
Membership function	Συνάρτηση ιδιότητας μέλους
Mesh network	Δίκτυο πλέγματος
Mobility	Κινητικότητα
Multi Attribute Decision Making	Λήψη αποφάσεων πολλαπλών ιδιοτήτων
Multi Criteria Decision Making	Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων



Multi Objective Decision Making	Λήψη αποφάσεων πολλαπλών στόχων
Multi-Attribute Utility Theory	Θεωρία πολυκριτηριακής χρησιμότητας
Multiattribute utility theory methods	Μεθόδοι πολυκριτηριακής θεωρίας χρησιμότητας
Multi-Attribute Value Theory	Θεωρία πολυκριτηριακής τιμής
Multi-Attributes Decision Making	Λήψη Αποφάσεων Πολλαπλών Ιδιοτήτων
Multi-criteria Decision Aid	Ευρωπαϊκή Πολυκριτηριακή Βοήθεια Απόφασης
Multi-Criteria Decision Making	Αμερικανική Πολυκριτηριακή Λήψη Απόφασης
Multi-Dimensions Decision making	Πολυδιάστατη Λήψη Αποφάσεων
Multi-Dwelling Units	Συγκρότημα πολλών κατοικιών
Multi-group Hierarchical Discrimination	Πολλαπλή ομάδα ιεραρχικής διάκρισης
Multimedia player	Αναπαραγωγέας πολυμέσων
Multi-Objective Decision Making	Πολύ-αντικειμενικές μεθόδους λήψης αποφάσεων
Multi-Objective/Goal programming	Πολύ-αντικειμενικές μέθοδοι λήψης αποφάσεων ή προγραμματισμού στόχων
Multiple Criteria Decision Analysis	Πολυκριτηριακή ανάλυση αποφάσεων
Multiplicative	Πολλαπλασιαστική
Mutually preferentially independent	Αμοιβαία προτιμητέα ανεξάρτητα
Non-additive	Μη προσθετικές
Notebook	Φορητός υπολογιστής
Null	Άκυρη
Off-the-air	Συμβατική ασύρματη τηλεόραση
OMEGA Network Survey	Έρευνα Οικιακού δικτύου OMEGA

Operations Research method	Μέθοδοι ερευνητικού χειρισμού
Optical electrical converter	Οπτικήηλεκτρονικός μετατροπέας
Optical Wireless	Οπτικά ασύρματα
Optimal sorting model	Βέλτιστο μοντέλο ταξινόμησης
Optimisation	Βελτιστοποίηση
Optimization methods	Μέθοδοι βελτιστοποίησης
Ordinal	Τακτικές
Ordinal regression	Τακτική Οπισθοδρόμησης
Orthogonal frequency-division multiplexing	Ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας
Outranking methods	Μέθοδοι σχέσεων υπεροχής
Over the top	Μετάδοση βίντεο και ήχου μέσω του Διαδικτύου χωρίς τη χρήση πολλαπλού χειριστή συστήματος στον έλεγχο ή τη διανομή του περιεχομένου
Over-estimation error	Σφάλμα υπερεκτίμησης
Pairwise comparison matrix	Πίνακας συγκρίσεων ανά ζεύγη
Peripheral Component Interconnect Express	Δίαυλος περιφερειακής ένωσης στοιχείων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή
Personal digital assistant	προσωπικός ψηφιακός βοηθός
Perturbation strength	Ένταση διαταραχών
Physical Layer	Φυσικό επίπεδο
Plastic Optical Fiber	Πλαστική οπτική ίνα
Plug and Play	Δυνατότητα άμεσης εγκατάστασης χωρίς παραμετροποίηση
Point to point	Σημείο σε σημείο
Popularity	Δημοτικότητα

Power Line Communications	Επικοινωνία μέσω γραμμών ηλεκτρικού ρεύματος
Precise	Ακριβείς
Preference disaggregation	Μέθοδοι ανάλυσης προτιμήσεων
Preference functions	Συναρτήσεις προτίμησης
Preference index	Δείκτης προτίμησης
Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations	Οικογένεια μεθόδων προτίμησης κατάταξης για τον εμπλουτισμό των αξιολογήσεων
Preferential independence	Ανεξαρτησία προτίμησης
Probability of rank reversal	Πιθανότητα αναστροφής κατάταξης
Problematic	Προβληματική
Public switched telephone network	Δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής
Quality of degradation of picture	Υποβάθμιση ποιότητας εικόνας
Quality of degradation of sound	Υποβάθμιση ποιότητας ήχου
Quality of Service	Ποιότητα υπηρεσίας
Quasi-additive	Ημι-προσθετική
Radiation exposure	Έκθεση στην ακτινοβολία
Radio 60Ghz	Ραδιοκύμα 60GHz
Radio Frequency	Ραδιοσυχνότητες
Radio over fiber	Ραδιοκύματα μέσω οπτικών ινών
Random ration of consistency	Τυχαίος λόγος συνέπειας
Real time	Σε πραγματικό χρόνο
Reciprocal matrix	Αντίστροφος πίνακας
Regime Analysis	Μέθοδοι ανάλυσης καθεστώτος
Resonant cavity LED	LED πολλαπλών κοιλοτήτων συντονισμού

Rich multipath propagation	Έντονη διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών
Risk attitude	Συμπεριφορά αβεβαιότητας
Risk averse	Αβεβαιότητα απέχθειας
Risk neutral	Ουδέτερη αβεβαιότητα
Risk prone	Επιρρεπής αβεβαιότητα
Risky outcomes	Αβέβαια αποτελέσματα
Roadmapping	Δημιουργία οδικού χάρτη
Rough set theory	Μέθοδοι θεωρίας «ακατέργαστου συνόλου»
Scaling constants	Σταθερές κλίμακας
Security/privacy	Ασφάλεια/Ιδιωτικότητα
Semistructured	Ημιδομημένα
Service interruption	Διακοπή υπηρεσίας
Service performance	Απόδοσης υπηρεσίας
Service subscription rate	Κόστος συνδρομής υπηρεσίας
Set Top Box	Συσκευή που συνδέεται με την τηλεόραση και μια εξωτερική πηγή σήματος και μετατρέπει το σήμα της πηγής σε μια μορφή περιεχομένου που μπορεί να εμφανιστεί στην τηλεόραση ή σε άλλη συσκευή προβολής
Shared Wireless Application Protocol	Πρωτόκολλο για την ασύρματη δικτύωση φωνής και δεδομένων στο σπίτι
Simple additive weighting method	Απλή προσθετική μέθοδος με βάρη
Simple Multi-Attribute Rating Technique	Πολυκριτηριακή τεχνική απλής κατάταξης
Single synthesizing criterion methods	Μέθοδοι μονοκριτηριακής σύνθεσης
Skin safety	Ασφάλεια δέρματος
Social acceptance	Κοινωνική αποδοχή

Solid state electronics	Ηλεκτρονικά στερεάς κατάστασης
Special Interest Group	Ειδική Ομάδα Ενδιαφέροντος
Standard balanced pair	Τυπική γραμμή μετάδοσης που αποτελείται από δύο αγωγούς του ίδιου τύπου
Standard Definition TV	Τυπικής ευκρίνειας τηλεόραση
streaming	Ροή δεδομένων
Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats	Πλεονεκτήματα, Αδυναμίες, Ευκαιρίες και Απειλές
Strong	Ισχυρή
Sure thing principle	Πρότυπο βεβαιότητας
System performance	Απόδοση συστήματος
System Trustworthiness/Confidence	Αξιοπιστία/Εμπιστοσύνη συστήματος
Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution	Τεχνική για τη σειρά προτίμησης με βάση την ομοιότητα στην ιδανική λύση
Technological metrics	Τεχνολογικά μέτρα ή Τεχνολογικές μετρήσεις
Technology Development Envelope	Ιεραχικό πλαίσιο για την ανάπτυξη μιας Τεχνολογίας
Technology value	Αξία της τεχνολογίας ή Τεχνολογική αξία
Theory evidence	θεωρία αποδείξεως
Time Division Multiple Access	Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου
Tiny Transport Protocol	«Μικροσκοπικό» πρωτόκολλο μεταφοράς
Transitivity	Μεταβατικότητα
Transitivity	Μεταβατικότητα
Triple play	Ενιαία ευρυζωνική σύνδεση για βίντεο, φωνή και δεδομένα
Twisted	Συστρεμμένα
Ultra Wide Band	Εξαιρετικά ευρεία ζώνη

Uncertainty	Αβεβαιότητας
Under-estimation error	Σφάλμα υποεκτίμησης
Universal Powerline Association	Παγκόσμιος οργανισμός για επικοινωνίες πάνω από ηλεκτρικά καλώδια
Universal Serial Bus	Ενιαίος Σειριακός Δίαυλος
Upgradability	Δυνατότητα αναβάθμισης
upstream	Πάνω κανάλι
Upstream traffic throughput	Upstream ρυθμός απόδοσης
Usability	Ευχρηστία
Utilities Additives	Αθροιστικές χρησιμότητες
Utilities Additives Discriminants	Διακρίνουσες αθροιστικές χρησιμότητες
Utility scores	Βαθμοί χρησιμότητας
Vague	Ασαφής
Value function	Συνάρτηση τιμής
Value measurement methods	Μέθοδοι μέτρησης τιμής
Value outranking graph	Γράφος τιμών υπεροχής
Vector	Διάνυσμα
Veto threshold	Κατώφλι απαγόρευσης
videoconference	Τηλεδιάσκεψη
Visible light communications	Επικοινωνίες ορατού φωτός
VoIP Survey	Έρευνα για VoIP
Weak	Ασθενής
Weights	Βάρη
White light emitting diodes	Δίοδοι εκπομπής λευκού φωτός

Wide Line of Sight	Με απευθείας οπτική επαφή χρησιμοποιώντας πιο ευρείες οπτικές δέσμες
Wideband	Ευρύ εύρος ζώνης
Wi-Fi Protected Access	Προστατευμένη πρόσβαση υψηλής αξιοπιστίας
Wireless fidelity	Ασύρματη αξιοπιστία
Wireless local area network	Ασύρματο τοπικό δίκτυο
Wireless Personal Area Networks	Ασύρματα δίκτυα προσωπικού χώρου
Modulator-demodulator	Διαμορφωτής-αποδιαμορφωτής
Multi-hopper	Με πολλαπλά άλματα
Multiple-input multiple output	Πολλαπλές εισόδους-πολλαπλές εξόδους
Narrow Line of Sight	Με απευθείας οπτική επαφή χρησιμοποιώντας στενές οπτικές δέσμες
Narrowband	Στενό εύρος ζώνης
Network extension	Επέκταση δικτύου
No new wires technologies	Τεχνολογίες χωρίς την εγκατάσταση νέων καλωδίων





## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

Αρτικόλεξα	Πλήρης Ονομασία
AHP	Analytic hierarchy process
ANP	Analytic Network Process
ARQ	Automatic Repeat Request
BOCR	Benefits, Opportunities, Costs, and Risks
CAT5	Category 5 cable
CES	Consumer Electronics Show
CI	Consistency Index
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CR	Consistency Ratio
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DBS	Direct Broadcast Satellite
DEA	Data Envelopment Analysis
DES	Data Encryption Standard
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DRSA	Dominance-based rough set approach
DSL	Digital Subscriber Line
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
DTRS	Decision-theoretic rough sets
DVD	Ddigital Versatile Disc
EIRP	Effective Isotropically Radiated Power
ELECTRE	Elimination and Choice Expressing Reality
ETSI	European Telecommunications Standards Institut

FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process
FCC	Federal Communications Commission
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum
FIR	Fast Infrared
FTTH	Fiber To The Home
GaAs	Gallium arsenide
GMM	Geometric Mean Methods
HDTV	High Definition TV
HiFi	High Fidelity
HiperLAN	High Performance Radio Local Area Network
HN	Home Network
HomePNA	Home Phonenumber Networking Alliance
HomeRF	Home Radiofrequency
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
Inter-MAC	Inter Media Access Aontrol
IPTV	Internet Protocol television
IrCOMM	Infrared Communications Protocol
IrDA	Infra-Red Data Association
IrLAN	Infrared Local Area Network
IrLAP	Infrared Link Access Protocol
IrLMP	Infrared Link Management Protocol
IrOBEX	Infrared Object Exchange
IrPHY	Infrared Physical Layer Specification
IrS	Infrared Simple
IrSS	Infrared SimpleShot

ISDN	Integrated Services for Digital Network
ISI	Inter-Symbol interference
ITU-T.	International Telecommunication Union-Standardization
LFSR	Linear Feedback Shift Register
LLSM	Logarithmic Least Square Methods
LOS	Line of Sight
LSM	Least Square Methods
MADM	Multi-Attributes Decision Making
MADM	Multi Attribute Decision Making
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MAVT	Multi-Attribute Value Theory
MCDA	Multiple Criteria Decision Analysis
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MDDM	Multi-Dimensions Decision making
MDU	Multi-Dwelling Units
MHDIS	Multi-group Hierarchical DIScrimination
MIMO	Multiple-Input Multiple Output
MIR	Medium Infrared
MOCD	Multi-Objective Decision Making
MODM	Multi Objective Decision Making
MTBF	Mean Time Between Failure
OEC	Optical Electrical Converter
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
ORESTE	Operations Research method

OW	Optical Wireless
PCI Express	Peripheral Component Interconnect Express
PDA	Personal Digital Assistant
PHY	Physical Layer
PLC	Power Line Communications
POF	Plastic Optical Fiber
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations
PS3	Play Station 3
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoS	Quality of Service
RCLED	Resonant Cavity LED
RF	Radio Frequency
RI	Random ration of consistency
RoF	Radio over Fiber
SDTV	Standard Definition TV
SIG	Special Interest Group
SIR	Serial Infrared
SMART	Simple Multi-Attribute Rating Technique
STB	Set Top Box
SWAP	Shared Wireless Application Protocol
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats
TDE	Technology Development Envelope
TDMA	Time Division Multiple Access
Tiny TP	Tiny Transport Protocol
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution

TV	Technology Value
UPA	Universal Powerline Association
USB	Universal Serial Bus
UTA	Utilities Additives
UTADIS	Utilities Additives Discriminants
UWB	Ultra Wide Band
VFIR	Very Fast Infrared
VLC	Visible Light Communications
White LEDs	White Light Emitting Diodes
Wide LOS	Wide Line of Sight
Wifi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPAN	Wireless Personal Area Networks
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
Narrow LOS	Narrow Line of Sight
OTT	Over The Top



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] R. Gaudino, D. Cardenas, M. Bellec, B. Charbonnier, N. Evanno, P. Guignard, S. Meyer, A. Pizzinat, I. Mollers, and D. Jager, "Perspective in next-generation home networks: Toward optical solutions?" *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 2, pp. 39–47, 2010.
- [2] [www.homepcnetwork.com/](http://www.homepcnetwork.com/)
- [3] S. Gardner, B. Markwalter, L. Yonge, "HomePlug Standard Brings Networking to the Home," *Communications System Design*, vol. 6, no 12, December 2006.
- [4] S. Teger, D.J. Waks, "End-User Perspectives on Home Networking," *IEEE Communications Magazine, System Dynamics Inc.*, pp. 114-119, 2002.
- [5] N. Garfinkle, "Video on Demand", US Patents, June 1996.
- [6] N. Higashi, "High Definition TV", US Patents, May 2010.
- [7] M. E. Gorzynski, M. D. Derocher, "Telepresence System" US Patents, January 2011.
- [8] G. Burdea, P. Coiffet, "Virtual Reality Technology 2<sup>nd</sup> Ed.," *Presence: Teleoperators and Virtual Environments, MIT Press Journals*, vol. 12, no. 6, pp.663-664, December 2003.
- [9] M. J. Ball, J. Lillis, "E-health: transforming the physician/patient relationship," *Int. J. of Medical Informatics*, vol. 61, issue 1, pp. 1-10, April 2001.
- [10] P. Polishuk, "Plastic optical fibers branch out," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 44, no. 9, pp. 140–148, 2006.
- [11] P. W. Shumate, "Fiber-to-the-home: 1977–2007," *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, pp. 1093–1103, 2008.
- [12] "FTTH Council – Definition of Terms". FTTH Council. September 2011. Retrieved June 27, 2013.
- [13] M. Norris, "Gigabit Ethernet, Technology and Applications", Artech House Inc, USA, 2003.
- [14] <https://www.ieee.org/index.html>
- [15] <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.3.html>
- [16] "Universal Serial Bus Specification (Technical report)", p. 40. v2.0, 2000.
- [17] "Universal Serial Bus 3.0 Specification". USB Implementers Forum. 2008-11-12. Retrieved 2012-12-29
- [18] R.H.J. Bloks, "The IEEE-1394 high speed serial bus," *Philips Journal of Research*, vol. 50, Issues 1–2, pp. 209-216, 1996.
- [19] [www.homepna.org/](http://www.homepna.org/)
- [20] IPTV Standardization on Track Say Industry Experts". ITU-T Newslog. 2006-10-27. Retrieved 2012-01-17.
- [21] A. Reid, J. Lorenz "Networking for home and small Businesses", cisco, 2008
- [22] Specification, Radio Frequency Interface. "Data-Over-Cable Service Interface Specifications." SP—RFIV2.0 — (1999): 102-020617.
- [23] K. H. Afkhamie, S. Katar, L. Yonge, & R. Newman, "An overview of the upcoming HomePlug AV standard," *Power Line Communications and Its Applications, IEEE International Symposium on*, pp. 400-404, April 2005.
- [24] A. M. Tonello, P. Siohan, A. Zeddami, X. & Mongaboure, "Challenges for 1 Gbps power line communications in home networks," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC (2008). IEEE 19th International Symposium on*, pp. 1-6, September 2008.
- [25] R. Hashmat, P. Pagani, A. Zeddami, T. Chonavel, "MIMO communications for inhome PLC networks: Measurements and results up to 100 MHz," *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC 2010), IEEE International Symposium on*, pp. 120-124, March 2010.
- [26] *IEEE std. P1905, Standard for a Convergent Digital Home Network for Heterogeneous Technologies*, IEEE, 2011.
- [27] *IEEE std. P1901, Broadband over Power Line Networks*, IEEE, 2009.
- [28] *IEEE std. 802.3, CSMA/CD (Ethernet) Access Method*, IEEE, 1998.
- [29] Bluetooth Innovation World Cup". Bluetooth.com. Retrieved 4 September 2010.
- [30] "IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications". (2012 revision). IEEE-SA. 5 April 2012. doi:10.1109/IEEESTD.2012.6178212.
- [31] C.C.Chong, Y.E.Kim, S.K.Yong, S.S.Lee, "Statistical characterization of the UWB propagation channel in indoor residential environment", *Wiley J. Wireless Commun. Mobile Computing*, vol.5, no.5, pp.503-512, Aug. 2005.
- [32] A.F.Molisch, "Ultrawideband Propagation Channels-Theory, Measurements and Modeling", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.54, no.5, pp. 1528-1545, Sep. 2005.
- [33] A.F.Molisch, D.Cassoli, C.C.Chong, S. Emami, A. Fort, B. Kannan, J. Karedal, J. Kunisch, H.G. Schantz, K.Siwak, and M.Z. Win. "A Comprehensive Standardized Model for UWB Propagation Channels", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.54, no.11, pp.3151-3166, 2006.

- [34] J. Karedal, S. Wyne, P. Almers, F. Tufvesson, and A.F. Molisch, "A Measurement-Based Statistical Model for Industrial Ultra-Wideband Channels", *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol.6, no.8, pp.3028- 3037, Aug. 2007
- [35] C. H. Doan, S. Emami, D. A. Sobel, A. M. Niknejad, and R. W. Brodersen, "Berkeley Wireless Research Center Design Considerations for 60 GHz CMOS Radios," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 12, December 2004
- [36] L. Caetano, S. Li, "Benefits of 60 GHz: right frequency, right time," *White paper*, SiBEAM, 2005.
- [37] Z. Genc, B. L. Dang, J. Wang, I. Niemegeers, "Home networking at 60 GHz: challenges and research issues," *Ann. Telecommun.* vol. 63, pp. 501–509, 2008.
- [38] A. Doufexi, S. Armour, M. Butler, A. Nix, D. Bull, J. McGeehan, P. Karlsson, "A comparison of the HIPERLAN/2 and IEEE 802.11 a wireless LAN standards," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 40, no. 5, pp. 172-180, 2002.
- [39] Home Networking Technologies, Property of HomeRF Working Group, Inc. ,May 2001.
- [40] <http://www.iec.org>, "Fiber to the Home", The Engineering Consortium, Web ProForum Tutorials
- [41] D. O'Brien, M. Katz, "Optical wireless communications within fourth-generation wireless systems," *Journal of Optical Networking*, vol. 4, pp. 312-322, 2005.
- [42] J.M. Kahn, W.J. Krause, J.B. Carruthers, "Experimental characterization of non-directed indoor infrared channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, pp. 1613-1623, 1995.
- [43] T. Komine, M. Nakagawa, "Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 49, pp. 71- 79, 2003.
- [44] T. Rokkas, T. Kamalakis, D. Katsianis, D. Varoutas and T. Spicopoulos, "Business Prospects of Wide-Scale Deployment of Free Space Optical Technology as a Last-Mile Solution: A Techno-Economic Evaluation," *IEEE/OSA Journal of Optical Networking*, vol. 6, 860-87, 2007.
- [45] [www.irda.org](http://www.irda.org)
- [46] G. W. Marsh, J. M. Kahn, „Performance evaluation of experimental 50-Mb/s diffuse infrared wireless link using on-off keying with decision-feedback equalization," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 11, pp. 1496-1504, 1996.
- [47] G. Ntogari, T. Kamalakis, J. Walewski, T. Spicopoulos, "Combining Illumination Dimming Based on Pulse-Width Modulation With Visible-Light Communications Based on Discrete Multitone," *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 1, pp. 56-65, 2011.
- [48] S. Kobayashi, H. Makino, X. Liu, J. Kudo, Y. Maeda, "Fluorescent light communication: a study of waveform characteristics and decoding methods," *ISPSJ SIG technical reports*, vol.8, no. 116, pp. 101-108, 2006.
- [49] M. G. Craford, "LEDs challenge the incandescents," *Circuits and Devices Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 5, pp. 24-29, 1992.
- [50] Y. Tanaka, S. Haruyama, M. Nakagawa, "Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links," *Proc. Int. Symp. On Personal Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC 00)*, vol. 2, pp. 1325-1329, 2000.
- [51] <http://www.vlcc.net>
- [52] S. Haruyama, "Japan's Visible Light Communications Consortium and its standardization activities," *IEEE 802 Interim Meeting*, Taipei, January 2008.
- [53] HG. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, "High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, pp. 1243-1245, 2008.
- [54] J. Grubor, K.-D. Langer, S. C. J. Lee, T. Koonen, and J. W. Walewski, "Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs," *in Proc. ECOC 2007*, 2007.
- [55] H. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, "100-Mb/s NRZ Visible light communications using a postequalized white LED," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, pp. 1063- 1065, 2009.
- [56] J. Vucic, C. Kottke, S. Nerreter, A. Büttner, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "White light wireless transmission at 200+ Mb/s net data rate by use of discrete-multitone modulation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, pp. 1511-1513, 2009.
- [57] <http://www.ict-omega.eu/>
- [58] J. P. Javaudin, M. Bellec, P. Jaffré, A. Foglar, O. Hoffmann, O. Isson, "Inter-MAC Concept for Gigabit Home Networks", *PIMRC (2009)*, Tokyo, Japan, 2009.
- [59] D. C O'Brien, "Cooperation in Optical Wireless Communications", *Springer Cooperation in Optical Wireless Communications*, 2007.
- [60] L. Ophir, Y. Bitran, I. Sherman, "Wi-Fi (IEEE 802.11) and Bluetooth coexistence: issues and solutions," *2004 Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 15th IEEE International Symposium*, vol. 2, pp. 847 – 852, 2004.
- [61] Technical characteristics of multiple gigabit wireless systems in the 60 GHz range, ETSI TR 102 555, System Reference Document.



- [62] R. Kraemer, M. Katz, *Short-Range Wireless Communications: Emerging Technologies and Applications*, Wiley, 2009.
- [63] ICT-OMEGA, OMEGA Architecture Model, Deliverable 6.1, December 2008. Available: <http://www.ict-omega.eu>
- [64] A. Raniwala, T. C. Chiueh, "Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network," *INFOCOM 2005, 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*. Proceedings IEEE, vol. 3, pp. 2223-2234, 2005, March 2005.
- [65] H. Le Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, O. Bouchet, M. Wolf, L. J. Grobe, "A 1.25-Gb/s indoor cellular optical wireless communications demonstrator" *IEEE Photonics Technology Letters*, vol 22, pp.1598-1600, 2010.
- [66] ICT-OMEGA Deliverable D4.2b, Physical Layer Design and Specification, February 2010. Available at: [http://www.ict-omega.eu/fileadmin/documents/deliverables/Omega\\_D4.2b.pdf](http://www.ict-omega.eu/fileadmin/documents/deliverables/Omega_D4.2b.pdf)
- [67] J. P. Javaudin, M. Bellec, P. Jaffré, A. Foglar, O. Hoffmann, O. Isson, "Inter-MAC Concept for Gigabit Home Networks," *PIMRC 2009*, Tokyo, Japan, 2009
- [68] R. Saeed, S. Khatun, B. M. Ali, and M. K. Abdulllah, "Ultra Wide Band (UWB) Ad-hoc Networks: Review and Trends", *Journal of Computer Science*, vol.1, pp. 35-39, 2005.
- [69] Tim. O'reilly, "What is web 2.0," O'Reilly Media, Inc., 2009.
- [70] A. Maiga, J.Y. Baudais and J. F. H elard, "Very High Bit Rate Power Line Communications For Home Networks," *IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, Dresden, Germany, 2009.
- [71] I. Mollers, D. Jager, R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann, N. Weber, T. Koonen, C. Lezzi, A. Bluschke, S. Randel, "Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project pof-all," *IEEE Communications Magazine* vol. 47, pp. 58-68, 2009.
- [72] H.J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, Kluwer Academic Publishers, Second Edition, Boston, MA, 1991.
- [73] E. Turban, J.E. Aronson, T.P. Liang, R. Sharda, *Decision Support and Business Intelligence Systems*, Pearson International Edition, 2007.
- [74] H.A. Simon, *The new science of management decision*, New York, NY: Harper and Row, 1960.
- [75] K.C. Laudon, J.P. Laudon, *Πληροφοριακά Συστήματα Διοίκησης*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2009.
- [76] Γ. Πραστάκος, *Διοικητική Επιστήμη στην πράξη – Εφαρμογές στη σύγχρονη επιχείρηση*, Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα, 2002.
- [77] E. Triantaphyllou, B. Shu, S. Nieto Sanchez, and T. Ray, *Multi-Criteria Decision Making: An Operations Research Approach*, Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, (J.G. Webster, Ed.), John Wiley & Sons, New York, NY, vol. 15, pp. 175-186, 1998.
- [78] R.R. Yager, "Modeling prioritized multicriteria decision making," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vo. 34, pp. 2396-2404, 2004.
- [79] E. Triantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [80] <http://www.mcdmsociety.org/>
- [81] S.D. Pohekar, M. Ramachandran, "Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 8, pp. 365–381, 2004.
- [82] G. Mavrotas, D. Diakoulaki, C. Capros, "Combined MCDA-IP Approach for Project Selection in the Electricity Market," *Annals of Operations Research*, vol. 120, pp. 159-170, 2003.
- [83] G.A. Mendoza, H. Martins, "Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms," *Forest Ecology and Management*, vol. 230, pp. 1-22, 2006.
- [84] I. Linkov, A. Varghese, S. Jamil, T.P. Seager, G. Kiker and T. Bridges, *Multi-criteria decision analysis: a framework for structuring remedial decisions at contaminated sites, Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making*, pp. 15-54, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [85] L. Olson David, "Comparison of three multicriteria methods to predict known outcomes," *European Journal of Operational Research* vol. 130, pp. 576-587, 2001.
- [86] S.J. Chen, and C.L. Hwang, *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, no. 375, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1992.
- [87] B. Roy, *Methodologie multicrit re d'aide   la d cision*. Economica, Paris, 1985.
- [88] Χ. Ευαγγέλου και Ν. Καρακαπιλίδης, *Πολυκριτήρια Λήψη Αποφάσεων Ταξινόμησης σε Προβλήματα Στρατηγικού Μάνατζμεντ: Μια Μελέτη Περίπτωσης*, στο: Ε. Γρηγορούδης, Μ. Δούμπος, Κ. Ζοπουνίδης και Ν.Φ. Ματσατσίνης (eds.) *Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων: Μεθοδολογικές Προσεγγίσεις και Εφαρμογές*, Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, Αθήνα, σελ. 77-103, 2004.
- [89] A. Guitouni, J. M. Martel, "Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method," *European Journal of Operational Research*, vol. 109, pp. 501- 521, 1998.

- [90] E. Loken, "Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems," *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 1584-1595, 2007.
- [91] G.A. Mendoza, H. Martins, "Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms," *Forest Ecology and Management*, vol. 230, pp. 1-22, 2006.
- [92] X. Wang, *Study of ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods and a proposed new MCDM method based on regret and rejoicing*, A thesis submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College in partial fulfillment of the Master of Science in Industrial Engineering in the Department of Industrial and manufacturing Systems Engineering, 2007.
- [93] A. Mateu, *ClusDM : A multiple Criteria Decision Making Method for Heterogeneous Data Sets*, TESI DOCTORAL, Programa de Doctorat en Intel·ligència Artificial, 2002,
- [94] C. Zopounidis and M. Doumpos, "Multi-criteria Decision Aid in Financial Decision Making: Methodologies and Literature Review," *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 11, pp. 167-186, 2002.
- [95] V. Belton, & T. Stewart, *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer, 2002.
- [96] S. Malerud, "A Multi-Methodological Framework for Analysing Crisis Management and Low Intensity Conflicts," *NATO SECURITY THROUGH SCIENCE SERIES D-INFORMATION AND COMMUNICATION SECURITY*, vol. 12, no. 3, 2007.
- [97] H. Polatidis, D. Haralambopoulos, G. Munda, R. Vreeker, "Selecting an appropriate multi-criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 1, no. 2, pp. 181-193, 2006.
- [98] P. Vincke, "Analysis of multicriteria decision aid in Europe," *European Journal of Operational Research*, vol. 25, pp. 160-168, 1986.
- [99] T. L. Saaty and L. G. Vargas, *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*, Boston, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [100] Y. Lee, K. A. Kozar, "Investigating the effect of website quality on e-business success: An analytic hierarchy process (AHP) approach," *Decision Support Systems*, vol. 42, pp. 1383-1401, 2006
- [101] F.T.S. Chan, H.K. Chan, H.C.W. Lau and R.W.L. Ip, "An AHP approach in benchmarking logistics performance of the postal industry," *International Journal of Benchmarking*, vol. 13, pp. 636-66, 2006.
- [102] Ch.-Ch. Huang, P.-Y. Chub, and Y.-H. Chiang, "A fuzzy AHP application in government-sponsored R&D project selection", *Omega*, vol. 36, pp. 1038-1052, 2008.
- [103] M. J. Liberatore, R. L. Nydick, "The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: A literature review," *European Journal of Operational Research*, vol. 189, pp. 194-207, 2008.
- [104] N. Gerdri, and D. F. Kocaoglu, "Applying the Analytic Hierarchy Process (AHP) to build a strategic framework for technology roadmapping," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 46, pp. 1071-1080, 2007.
- [105] P. R. Drake, "Using the Analytic Hierarchy Process in Engineering Education," *International Journal of Engineering Education*, vol. 14, pp. 191±196, 1998.
- [106] C.Y.T. Maggie, V.M. Rao Tummala, "An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system," *Elsevier, The International Journal of Management Science*, vol. 29, pp. 171-182, 2001.
- [107] O. S. Vaidya, & S. Kumar, S, "Analytic hierarchy process: An overview of applications," *European Journal of operational research*, vol. 169, no. 1, pp. 1-29, 2006.
- [108] T. L. Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures," *Journal of mathematical psychology*, vol. 15, no. 3, pp. 234-281, 1977.
- [109] P. T. Harker, & L. G. Vargas, "The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process," *Management science*, vol. 33, no. 11, pp. 1383-1403, 1987.
- [110] F. A. Lootsma, T. C. A. Mensch, & F. A. Vos, "Multi-criteria analysis and budget reallocation in long-term research planning," *European Journal of Operational Research*, vol. 47, no. 3, pp. 293-305, 1990.
- [111] A. Ishizaka, A. Labib, "Review of the main developments in the analytic hierarchy process," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 14336-14345, 2011.
- [112] F. J. Dodd, H. A. Donegan, & T. B. M. McMaster, "Scale horizons in analytic hierarchies," *Journal of Multi - Criteria Decision Analysis*, vol. 4, no. 3, pp. 177-188, 1995.
- [113] D. Ma, & X. Zheng, "9/9-9/1 Scale method of AHP," *In Proceedings of the 2nd International Symposium on the AHP*, vol. 1, pp. 197-202, 1991.
- [114] A. A. Salo, & R. P. Hämäläinen, "On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process," *Journal of Multi - Criteria Decision Analysis*, vol. 6, no. 6, pp. 309-319, 1997.
- [115] T.L. Saaty, M.S. Ozdemir, "Why the magic number seven plus or minus two," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 38, issues 3-4, pp. 233-244, August 2003.

- [116] T. L. Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures," *Journal of mathematical psychology*, vol. 15, no. 3, pp. 234-281, 1977.
- [117] T. L. Saaty, & L. G. Vargas, *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [118] T. L. Saaty and L. G. Vargas, "Inconsistency and rank preservation," *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 28, pp. 205-214, 1984.
- [119] M.T. Escobar, J. Aguarón, J.M. Moreno-Jiménez, "A note on AHP group consistency for the row geometric mean prioritization procedure," *European Journal of Operational Research*, vol.153, issue 2, pp. 318-322, March 2004.
- [120] T. L. Saaty, "Eigenvector and logarithmic least squares," *European Journal of Operational Research*, vol. 48, no 1, pp. 156-160, 1990.
- [121] G. B. Crawford, "The geometric mean procedure for estimating the scale of a judgement matrix," *Mathematical Modelling*, vol. 9, no. 3, pp. 327-334, 1987.
- [122] P.A. Gurnani, *An approach to multiattribute selection problems under uncertainty, the overlap measure method*, a thesis submitted to the Faculty of the Graduate School of State University of New York at Buffalo in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Sciences, 14-8-2003.
- [123] R. Heuberger, C. Sutter, L. Santos, *Host Country Approval for CDM Projects in Uruguay: Application of a Sustainability Assessment Tool*, Institute of Environmental Physics, Energy & Climate, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 2003.
- [124] B.P.M. Duarte, A. Reis, "Developing a projects evaluation system based on multiple attribute value theory," *Computers & Operations Research*, vol. 33, pp. 1488 – 1504, 2006.
- [125] D.J. Morrice, J. Butler, W. Mullarkey, "An approach to ranking and selection for multiple performance measures", *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, pp. 719 – 725, 1998.
- [126] J. Ananda and G. Herath, "Evaluating public risk preferences in forest land-use choices using multi-attribute utility theory," *Ecological Economics*, vol. 55, issue 3, pp. 408-419, November 2005.
- [127] H. Söderberg, E. Kärrman, *MIKA, Methodologies for Integration of Knowledge Areas, The case of sustainable urban water management*, Report, Dept. of Built Environment & Sustainable Development, Chalmers Architecture, Chalmers University of Technology, Göteborg 2003.
- [128] A. Bezama, J. Wolfbauer, S. Nova, K. E. Lorber, "Application of a Balanced Scorecard System for Supporting Decision Making in Contaminated Sites Remediation," *Water Air Soil Pollution*, vol. 181, pp. 3-16, 2007.
- [129] M. Kajanus, J. Kangas, M. Kurttila, "The use of value focused thinking and the A' WOT hybrid method in tourism management," *Tourism Management*, vol. 25, pp. 499-506, 2004.
- [130] J. Barzilai and F. A. Lootsma, "Power Relations and Group Aggregation in the Multiplicative AHP and SMART," *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 6, issue 3, pp. 155-165, 1997.
- [131] E. Costa, C. A. Bana, & J. C. Vansnick, "MACBETH—An interactive path towards the construction of cardinal value functions," *International transactions in operational Research*, vol. 1, no. 4, pp. 489-500, 1994.
- [132] A. Moffett and S. Sarkar, "Incorporating Multiple Criteria into the Design of Conservation Area Networks: A Minireview with Recommendations," *Diversity and Distributions*, vol. 12, pp. 125 -137, 2006.
- [133] L. Mikhailov, P. Tsvetinov, "Evaluation of services using a fuzzy analytic hierarchy process," *Applied Soft Computing*, vol. 5, pp. 23-33, 2004.
- [134] N. Gerdri, & D. F. Kocaoglu, "An analytical approach to building a technology development envelope (TDE) for roadmapping of emerging technologies: a case study of emerging electronic cooling technologies for computer servers," *In Management of Engineering and Technology, PICMET'03. Technology Management for Reshaping the World. Portland International Conference on* (pp. 380-389). IEEE, 2003.
- [135] M. Beynon, "An investigation of the Role of Scale values in the DS/AHP Method of Multi-Criteria Decision making," *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 11, pp. 327-343, 2002.
- [136] T. L. Saaty, *Analytic network process*, In *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, pp. 28-35, Springer US, 2001.
- [137] R. Khorramshahgol & V. S. Moustakis, "Delphic hierarchy process (DHP): A methodology for priority setting derived from the Delphi method and analytical hierarchy process," *European Journal of Operational Research*, vol. 37, no. 3, pp. 347-354, 1988.
- [138] D. J. Wijnmalen, "Analysis of benefits, opportunities, costs, and risks (BOCR) with the AHP–ANP: A critical validation," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 46, no. 7, pp. 892-905, 2007.
- [139] W. W. Cooper, L. M. Seiford, & K. Tone, *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-Solver Software*, Second editions. Springer, ISBN, 387452818, 490, 2007.

- [140] H. Deng, "Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison," *Fuzzy Systems Conference Proceedings, FUZZ-IEEE '99*, 2, pp. 726-731, 1999.
- [141] H.C. Chung, "Optimal evaluation of infectious medical waste disposal companies using the fuzzy analytic hierarchy process," *Waste Management*, vol. 31, pp. 1553–1559, 2011.
- [142] K. K. F. Yuen, & H. C. Lau, "A fuzzy group analytical hierarchy process approach for software quality assurance management: Fuzzy logarithmic least squares method," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 8, pp. 10292-10302, 2011.
- [143] G. Gerla, L. Scarpati, "Extension principles of fuzzy set theory," *Journal of Information Sciences*, vol. 106, pp. 49-69, 1998.
- [144] M. Hazewinkel, *Linear interpolation*, Encyclopedia of Mathematics, Springer, ISBN 978-1-55608-010-4, 2001.
- [145] R. Benayoun, B. Roy, & B. Sussman, "ELECTRE: Une méthode pour guider le choix en présence de points de vue multiples," *Note de travail*, vol. 49, 1966.
- [146] M. Hostmann, *Decision support for river rehabilitation*, DISS. ETH, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2005.
- [147] V. G. Huylenbroeck, "Theory and Methodology, The Conflict Analysis Method: Bringing the gap between ELECTRE, PROMETHEE and ORESTE," *European Journal of Operational Research*, vol. 82, pp. 490-502, 1995.
- [148] W. C. Huang, C. H. Chen, "Using the ELECTRE II method to apply and analyze the differentiation theory," *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, vol. 5, pp. 2237 – 2249, 2005.
- [149] J. Buchanan, P. Sheppard, D. Vanderpooten, *Project ranking using ELECTRE III*, Department of Management Systems, University of Waikato, 1999.
- [150] J. Hokkanen, P. Salminen Pekka, "ELECTRE III and IV Decision Aids in an Environmental Problem," *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, vol. 6, pp. 215-226, 1997.
- [151] A. Karagiannidis, N. Moussiopoulos, "Application of ELECTRE III for the integrated management of municipal solid wastes in the Greater Athens area," *European Journal of Operational Research*, vol. 97, pp. 439-449, 1997.
- [152] C. Zopounidis and M. Doumpos, "Multi-criteria Decision Aid in Financial Decision Making: Methodologies and Literature Review," *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 11, pp. 167-186, 2002.
- [153] M. Rogers, M. Bruen, "Choosing realistic values of indifference, preference and veto thresholds for use with environmental criteria within ELECTRE," *European Journal of Operational Research*, vol. 107, pp. 542-551, 1998.
- [154] J. P. Brans, P. Vincke, & B. Mareschal, "How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method," *European journal of operational research*, vol. 24, no. 2, pp. 228-238, 1986.
- [155] J.P. Brans, B. Mareschal, *PROMETHEE Methods*, Chapter 5, Springer 2002, <http://www.springerlink.com/content/m03v43282u466g36/fulltext.pdf>.
- [156] K. P. Yoon, & C. L. Hwang, *Multiple attribute decision making: an introduction*, vol. 104, Sage Publications, 1995.
- [157] E. Jacquet – Lagrèze and Y. Siskos, "Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision making, the UTA method," *European Journal of Operational Research*, vol. 10, pp. 151-164, 1982.
- [158] M.C. González – Araya, L.A.D. Rangel, M.P.E. Lins, L.F.A.M Gomes, "Building the Additive Utility Functions for CAD-UFRJ Evaluation Staff criteria," *Annals of Operations Research*, vol. 116, pp. 271-288, 2002.
- [159] J. Spronk, R.E. Steuer, & C. Zopounidis, *Multicriteria decision aid/analysis in finance. In Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, pp. 799-848, Springer New York, 2005.
- [160] D. Bouyssou, & M. Pirlot, *Conjoint measurement tools for MCDM. In Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, pp. 73-112, Springer New York, 2005.
- [161] C. Zopounidis, & M. Doumpos, "Building additive utilities for multi-group hierarchical discrimination: the MH Dis method," *Optimization Methods and Software*, vol. 14, no. 3, pp. 219-240.
- [162] Z. Pawlak, "Rough sets," *International Journal of Computer & Information Sciences*, vol. 11, no. 5, pp. 341-356, 1982.
- [163] <http://195.134.67.63/roadmapping/PHome.aspx>
- [164] G. Dede, D. Varoutas, T. Kamalakis, R. G. Fuentetaja, J.P. Javaudin, "Evaluation of Technological and Socio-Economic Issues Affecting the Deployment of Home Networks: Evidence from the ICT-OMEGA project", *Netnomics: Economic Research and Electronic Networking* (Springer), vol. 11, no. 2, pp. 181-200, 2010
- [165] ICT-OMEGA Deliverable 1.4 Focus Group Sessions Report, April.2009. Available at <https://www.ict-omega.eu>
- [166] ICT-OMEGA Deliverable 1.5 OMEGA Final Business Cases, October 2009. Available at <https://www.ict-omega.eu>



- [167] Institute of Electronics and Electrical Engineers. Standard C95.1-2005: IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3kHz to 300GHz, 2005.
- [168] K.R. Foster, R. Kenneth, "Radiofrequency Exposure From Wireless Lans Utilizing Wi-Fi Technology," *Health Physics*, vol. 92, issue 3, pp. 280-289, 2007.
- [169] N. Kuster, F. Schönborn, "Recommended minimal requirements and development guidelines for exposure setups of bio-experiments addressing the health risk concern of wireless communications," *Bioelectromagnetics*, Wiley InterScience, vol. 21, issue 7, pp. 508-514, 2000.
- [170] Guideline, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Phys*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [171] IEEE-SA Standards Board, "Wireless lan medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," *Communications Magazine*, IEEE, 2007.
- [172] D. C. O'Brien, G. E. Faulkner, E. B. Zyambo, K. Jim, D. J. Edwards, P. Stavrinou, G. Parry, J. Bellon, M. J. Sibley, V. A. Lalithambika, V. M. Joyner, R. J. Samsudin, D. M. Holburn, and R. J. Mears, "Integrated transceivers for optical wireless communications," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 11, pp. 173-83, 2005.
- [173] S. D. Alessandro, A. M. Tonello and L. Lampe, "Improving WLAN Capacity via OFDMA and Cyclic Prefix Adaptation," *IFIP Wireless Days 2009*, Paris-France 2009.
- [174] G. Dede, T. Kamalakis, D. Varoutas, "Towards a Roadmap for Future Home Networking Systems: An Analytical Hierarchy Process Approach", *IEEE Systems Journal*, vol. 5, no. 3, pp. 374-384, 2011.
- [175] A. Oram, "Peer-to-peer: Harnessing the power of disruptive technologies," *SIGMOD Record*, vol. 32, no.2, 2003.
- [176] T. L. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process," *Int. J. Services Sciences*, vol. 1, no. 1, 2008.
- [177] R. Y. Rubinstein, D. P. Kroese, *Simulation and the Monte Carlo Method (2nd ed.)*, New York: John Wiley & Sons, ISBN 978-0-470-17793-8, 2007.
- [178] C. M. Ta, B. Wicks, F. Zhang, B. Yang, Y. Mo, K. Wang, Z. Liu, G. Felic, P. Nadagouda, T. Walsh, R. J. Evans, I. Mareels and E. Skafidas, "Issues in the Implementation of a 60GHz Transceiver on CMOS," *2007 2nd IEEE International Workshop on Radio-Frequency Integration Technology*, Singapore, 2007.
- [179] IEEE 802.15 WPAN Task Group 3c (TG3c) Millimeter Wave Alternative PHY. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c.html>
- [180] Y. H. Ma, P. L. So and E. Gunawan, "Performance analysis of OFDM systems for broadband power line communications under impulsive noise and multipath," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, pp. 674-681, April 2005.
- [181] K. S. Al-Mawali, F. S. Al-Qahtani and Z. M. Hussain, "Adaptive Power Loading for OFDM-Based Power Line Communications Impaired by Impulsive Noise," *2010 IEEE ISPLC - International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, 2010.
- [182] M. Huchard, M. Weiss, A. Pizzinat, S. Meyer, P. Guignard, and B. Charbonnier, "Ultra-Broadband Wireless Home Network Based on 60-GHz WPAN Cells Interconnected via RoF," *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, pp. 2364-2372, 2008.
- [183] M.S. Gast, *802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide, Second Edition*, O'Reilly Media, 2005.
- [184] N. Guo, R. C. Qiu, S. S. Mo, and K. Takahashi, "60-GHz Millimeter-Wave Radio: Principle, Technology, and New Results," Hindawi Publishing Corporation, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007.
- [185] Z. Genc, B. L. Dang, J. Wang, I. Niemegeers, "Home networking at 60 GHz: challenges and research issues," *Ann. Telecommun.*, vol. 63, pp. 501-509, 2008.
- [186] J. M. Wilson, "The Next Generation of Wireless LAN Emerges with 802.11n," *Technology Intel Magazine*, 2004.
- [187] L. Lily Yang, "60GHz: Opportunity for Gigabit WPAN and WLAN Convergence," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 39, 2008.
- [188] B. Olsen and K. Stordahl, "Models for forecasting cost evolution of components and technologies," *Elektronikk*, vol.100, pp.138-148, 2004.
- [189] T. Komine, M. Nakagawa, "Integrated system of white LED visible-light communication and power-line communication," *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol.49, pp. 71- 79, Feb. 2003.
- [190] M. Kwiesielewicz and M. Van Uden, "Inconsistent and contradictory judgments in pairwise comparison method in the AHP," *Computers & Operations Research*, vol. 31, pp. 713-719, 2004.
- [191] G. Dede, T. Kamalakis, D. Varoutas, "Prospects of Optical Wireless Technologies for Home Networking", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 3, no. 11, pp. 850-859, 2011.

- [192] I. Mollers, D. Jager, R. Gaudino, A. Nocivelli, H. Kragl, O. Ziemann, N. Weber, T. Koonen, C. Lezzi, A. Bluschke, S. Randel, "Plastic optical fiber technology for reliable home networking: overview and results of the EU project pof-all," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 58-68, 2009.
- [193] D. H. Byun, "The AHP approach for selecting an automobile purchase model," *Information & Management*, vol. 38, pp. 289-297, 2001.
- [194] C. W. Chang, C. R. Wu, C. T. Lin, H. C. Chen, "An application of AHP and sensitivity analysis for selecting the best slicing machine," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 52, pp. 296-307, 2007.
- [195] D.-S. Ly-Gagnon, S. Tsukamoto, K. Katoh, K. Kikuchi, "Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 12- 21, 2006.
- [196] G. Ntogari, T. Kamalakis, T. Sphicopoulos, "Performance analysis of space time block coding techniques for indoor optical wireless systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, pp. 1545-1552, 2009.
- [197] J.P. Faure, "The IEEE P1901 project: broadband over power lines," *International Conference on Consumer Electronics*, Digest of Technical Papers, 2006.
- [198] A. Maiga, J.Y. Baudais and J. F. Hélar, "Very High Bit Rate Power Line Communications For Home Networks," *IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, Dresden, Germany, 2009.
- [199] T. L. Saaty, "Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary?," *European Journal of Operational Research*, vol. 145, pp. 85-91, 2003.
- [200] Y.-H. Chang, C.-H. Yeh, "Evaluating airline competitiveness using multiattribute decision making," *Omega*, vol. 29, pp. 405-415, 2001.
- [201] J.P. Brans, Ph. Vincke, B. Mareschal, "How to select and how to rank projects: The Promethee method," *European Journal of Operational Research*, vol. 24, pp. 228-238, 1986.
- [202] T.L. Saaty, "Fundamentals of the analytic network process — Dependence and feedback in decision-making with a single network," *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 13, pp. 129-157, 2004.
- [203] F. Zahedi, "The Analytic Hierarchy Process, A Survey of the Method and its Applications," *Interfaces*, vol. 16, pp. 96-108, 1986.
- [204] M. C. Tam, & V. M. Tummala, "An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system," *Omega*, vol. 29, no. 2, pp. 171-182, 2001.
- [205] J. Abildtrup, E. Audsley, M. Fekete-Farkas, C. Giupponi, M. Gylling, P. Rosato and M. Rounsevell, "Socio-economic scenario development for the assessment of climate change impacts on agricultural land use: a pairwise comparison approach," *Environmental Science & Policy*, vol. 9, pp. 101-115, 2006.
- [206] M. Kok and F. A. Lootsma, "Pairwise-comparison methods in multiple objective programming, with applications in a long-term energy-planning model," *European Journal of Operational Research*, vol. 22, pp. 44-55, 1985.
- [207] Z. P. Fan, Y. Liu, "An Approach to Solve Group-Decision-Making Problems With Ordinal Interval Numbers," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, vol. 40, pp. 1413-1423, 2010.
- [208] M. Doumpos, C. Zopounidis, "A multicriteria classification approach based on pairwise comparisons," *European Journal of Operational Research*, vol. 158, pp. 378-389, 2004.
- [209] J. Barzilai, "Deriving weights from pairwise comparison matrices," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, pp.1226-1232, 1997.
- [210] E. U. Choo, "A common framework for deriving preference values from pairwise comparison matrices," *W. C. Wedley, Computers & Operations Research*, vol. 31, pp. 893-908, 2004.
- [211] C. G. E. Boenderb, J. G. Graan, F. A. Lootsma, "Multi-criteria decision analysis with fuzzy pairwise comparisons," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 29, pp. 133-143, 1989.
- [212] L. Mikhailov, "A fuzzy approach to deriving priorities from interval pairwise comparison judgments," *European Journal of Operational Research*, vol. 159, pp. 687-704, 2005.
- [213] M. Marimin, M. Umamo, I. Hatono, H. Tamura, "Linguistic labels for expressing fuzzy preference relations in fuzzy group decision making," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, vol. 28, pp. 205- 218, 1998.
- [214] S. Shiraishi, O. Tsuneshi and D. Motomasa, "Properties of a positive reciprocal matrix and their application to AHP," *Journal of the Operations Research Society of Japan-Keiei Kagaku*, vol. 4, no. 1, pp. 404-414, 1998.
- [215] G. J. Klir, T. A. Folger, *Fuzzy sets, Uncertainty, and Information*, Prentice Hall, 1988.
- [216] Y. Yuan, M. J. Shaw, "Induction of fuzzy decision trees," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 69, no. 2, pp. 125-139, 1995.
- [217] X.-Z. Wang, L.-C. Dong, J.-H. Yan, "Maximum ambiguity based sample selection in fuzzy decision tree induction," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 24, no. 8, pp. 1491-1505, 2011.

- [218] P.T. Harker, "Incomplete pairwise comparisons in the analytic hierarchy process," *Mathematical Modelling*, vol. 9, no. 11, pp. 837-848, 1987.
- [219] X. Wang, D. Yeung, E. Tsang, "A comparative study on heuristic algorithms for generating fuzzy decision trees," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, vol. 31, no. 2, pp. 215-226, 2001.
- [220] X. Wang, C. Dong, "Improving generalization of fuzzy if-then rules by maximizing fuzzy entropy," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 556-567, 2009.
- [221] R.R. Yager, "Uncertainty representation using fuzzy measures," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol.32, no.1, pp.13-20, 2002.
- [222] A. Farkas, "The analysis of the principal eigenvector of pairwise comparison matrices," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 4, no. 2, pp. 99-115, 2007
- [223] F. J. Carmone, A. Karab, S. H. Zanakis, "A Monte Carlo investigation of incomplete pairwise comparison matrices in AHP," *European Journal of Operational Research*, vol. 102, pp. 538-553, 1997.
- [224] R. Aull-Hyde, S. Erdogan, and J. Duke, "An experiment on the consistency of aggregated comparison matrices in AHP," *European Journal of Operational Research*, vol. 171, pp. 290-295, 2006.
- [225] E. D. Hahn, "Decision Making with Uncertain Judgments: A Stochastic Formulation of the Analytic Hierarchy Process," *Decision Sciences*, vol. 34, pp. 443-466, 2003.
- [226] H. Chen, & D. F. Kocaoglu, "A sensitivity analysis algorithm for hierarchical decision models," *European Journal of Operational Research*, vol. 185, no. 1, pp. 266-288, 2008.
- [227] T. L. Saaty, and L. G. Vargas, "Uncertainty and rank order in the analytic hierarchy process," *European Journal of Operational Research*, vol. 32, pp. 107-117, 1987.
- [228] J. A. Rice, *Mathematical Statistics and Data Analysis (Second edition)*. Duxbury Press, Belmont, C.A., 1995.
- [229] T. L. Saaty, "Response to Holder's comments on the analytic hierarchy process," *Journal Operational Research Society*, vol. 42, pp. 909-929, 1991.
- [230] A. Ishizaka, D. Balkenborg and T. Kaplan, "Influence of aggregation and measurement scale on ranking a compromise alternative in AHP," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 62, pp. 700-710, 2011.
- [231] J.C. Lagarias, J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions," *SIAM Journal of Optimization*, vol. 9, pp. 112-147, 1998.
- [232] S. Shunsuke, T. Obata, and M. Daigo, "Properties of a positive reciprocal matrix and their application to AHP," *Journal of the Operations Research Society of Japan-Keiei Kagaku*, vol. 41, no. 3, pp.404-414, 1998.
- [233] C. Hongyi, D.F. Kocaoglu, "A sensitivity analysis algorithm for hierarchical decision models," *European Journal of Operational Research*, vol. 185, no. 1, pp.266-288, 2008.
- [234] O'L. E. Daniel, "Determining Differences in Expert Judgment: Implications for Knowledge Acquisition and Validation", *Decision Sciences*, vol. 24, no. 2, pp. 395-408, 1993.
- [235] C. Kahraman, U. Cebeci, D. Ruan, "Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey," *International Journal of Production Economics*, vol. 87, no. 2, pp. 171-184, 2004.
- [236] B. Dae-Ho, "The AHP approach for selecting an automobile purchase model," *Information & Management*, vol. 38, no. 5, pp. 289-297, 2001.
- [237] C.Y.T. Maggie, V.M. Rao Tummala, "An application of the AHP in vendor selection of a telecommunications system," *Elsevier, The International Journal of Management Science*, vol. 29, pp. 171-182, 2001.
- [238] G. Dede, T. Kamalakis, Th. Sphicopoulos, "Convergence Properties and Practical Estimation of the Probability of Rank Reversal in Pairwise Comparisons", *ELSEVIER European Journal of Operational Research*, vol. 241, no. 2, pp. 458-468, 2014.
- [239] A. Genz, and F. Bretz, "Comparison of Methods for the Computation of Multivariate t Probabilities," *Journal of Computational and Graphical Statistics*, vol. 11, no. 4, pp. 950-971, 2002.
- [240] A. K. Gupta and S. Nadarajah, *Handbook of beta distribution and its applications*, New York: Marcel Dekker, 2004.
- [241] M. Abramowitz, I.A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Ninth Printing, Dover Publications, Inc., New York, 1972.