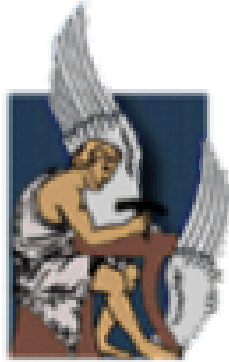


**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ  
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΚΥΚΛΟΣ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ**



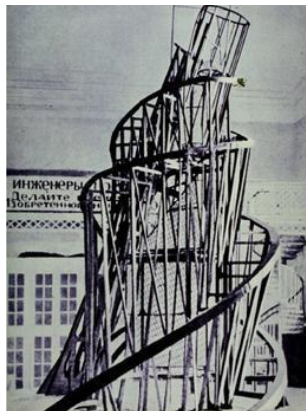
**ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΥΠΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ  
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΡΙΣΚΟΥ**

Συνθετική Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση  
των απαιτήσεων για την απόκτηση μεταπτυχιακού  
διπλώματος ειδίκευσης

του

**ΣΤΥΛΙΑΝΟΥ ΒΛΑΧΑΚΗ**

**Επιβλέπων καθηγητής:** Νικόλαος Ματσατσίνης



Χανιά, Νοέμβριος 2007



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ  
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΚΥΚΛΟΣ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗ**



**ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΥΠΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ  
ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΡΙΣΚΟΥ**

Συνθετική Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση  
των απαιτήσεων για την απόκτηση μεταπτυχιακού  
διπλώματος ειδίκευσης  
του  
**ΣΤΥΛΙΑΝΟΥ ΒΛΑΧΑΚΗ**

**Επιβλέπων καθηγητής:** Νικόλαος Ματσατσίνης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την .... Νοεμβρίου 2007.

.....	.....	.....
Νικόλαος Ματσατσίνης	Μιχαήλ Δούμπος	Ευάγγελος Γρηγορούδης
Αναπλ. Καθηγητής	Επίκουρος Καθηγητής	Επίκουρος Καθηγητής
Πολυτεχνείου Κρήτης	Πολυτεχνείου Κρήτης	Πολυτεχνείου Κρήτης

Χανιά, Νοέμβριος 2007

Copyright © Στυλιανός Σ. Βλαχάκης, 2007

στη σύζυγο και στο γιο μου

στη μνήμη της μητέρας μου

### **...Λίγα λόγια για την εικόνα του εξώφυλλου**

Ο «Πύργος του Tatlin» ή αλλιώς «Μνημείο για την Τρίτη Διεθνή» είναι ίσως το διασημότερο ουτοπικό έργο όλων των εποχών. Ο πύργος αποτέλεσε το όραμα του Ρώσου καλλιτέχνη και αρχιτέκτονα Vladimir Tatlin και σχεδιάστηκε το 1919. Δεν κατασκευάστηκε όμως ποτέ, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους και του εμφυλίου πολέμου που ακολούθησε την επανάσταση του 1917.

Το μνημείο του Tatlin θα είχε διπλάσιο ύψος από το Empire State Building και θα κατασκευαζόταν από γυαλί και σίδηρο. Ο σπειροειδής μεταλλικός σκελετός θα υποστήριζε ένα γυάλινο κύλινδρο, ένα γυάλινο κώνο και ένα γυάλινο κύβο. Ο κύλινδρος θα περιστρεφόταν γύρω από τον άξονά του μια φορά το χρόνο, ενώ οι δραστηριότητες που θα λάβαιναν χώρα σε αυτόν θα περιελάμβαναν κυρίως συνέδρια και διαλέξεις. Ο κώνος θα ολοκλήρωνε την περιστροφή του σε διάστημα ενός μήνα και θα στέγαζε κυρίως διοικητικές υπηρεσίες. Ο κύβος θα περιστρεφόταν μια φορά τη μέρα και θα αποτελούσε το κέντρο πληροφόρησης, εκδίδοντας διαρκώς δελτία τύπου, ανακοινώσεις και μανιφέστα μέσω τηλεγράφου, τηλεφώνου, ραδιοφώνου, καθώς και μέσα από μεγάφωνα. Μια φωτεινή οθόνη στην κορυφή του πύργου θα παρουσίαζε διαρκώς νέα από όλο τον κόσμο, ενώ ειδικοί προβολείς θα έγραφαν μηνύματα στα σύννεφα. Με βάση τεχνικά και κατασκευαστικά κριτήρια, το έργο είναι ουτοπικό, ενώ το κόστος και η πολυπλοκότητά του το καθιστούν μη λειτουργικό.

Αποτελεί διαχρονικό σύμβολο της προσπάθειας να υποταχτεί ο υλικός κόσμος και να επιτευχθεί η ολοκλήρωση διεπιστημονικών και διακαλλιτεχνικών γνωστικών αντικειμένων σε μια ενιαία σύνθεση με άξονα τον άνθρωπο.





## ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

Ο Στυλιανός Βλαχάκης γεννήθηκε στα Χανιά, της 11 Ιανουαρίου 1967. Είναι το μοναχοπαίδι της οικογένειας του Σταύρου Βλαχάκη και της Ελένης Πρωτοψάλτη, οι οποίοι δεν ζουν σήμερα. Είναι παντρεμένος με τη φιλόλογο Μαρία Κόλλια, με την οποία έχουν και ένα γιο πέντε μηνών.

Τον Ιούλιο του 1984 αποφοίτησε από το 1<sup>ο</sup> Λύκειο Χανίων. Το Σεπτέμβριο του 1985 εισήχθη 1<sup>ος</sup> στη Σχολή Ικάρων από όπου και αποφοίτησε τον Ιούλιο του 1989 με τον βαθμό του Ανθυποσμηναγού και ειδικότητα Εφοδιασμού (Logistics). Γνωρίζει πολύ καλά Αγγλικά και Γαλλικά.

Κατά τα 23 χρόνια υπηρεσίας του στην Πολεμική Αεροπορία, έχει εργαστεί σε διάφορους τομείς εφοδιαστικής υποστήριξης αεροσκαφών και συγκεκριμένα έχει διατελέσει:

- Manager Πυρομαχικών και Καυσίμων των αεροσκαφών A-7 στην 115 Πτέρυγα Μάχης, από το 1989 – 1993.
- Διοικητής Σμήνους Καυσίμων – Πυρομαχικών στην ίδια Μονάδα, από το 1993 – 1994.
- Επιτελής Εφοδιασμού, της Διεύθυνσης Υποστήριξης της 115 Πτέρυγας Μάχης για 6 χρόνια, από το 1994 – 1999.
- Επιτελής της Διεύθυνσης Εφοδιασμού, στη Διοίκηση Αεροπορικής Υποστήριξης στην Ελευσίνα, υπεύθυνος του προγράμματος υποστήριξης των αεροσκαφών A-7 της Πολεμικής Αεροπορίας, από το 1999 – 2003.
- Προϊστάμενος Λογιστηρίου της Μοίρας Εφοδιασμού στην 115 Πτέρυγα Μάχης, από το 2003 – 2004.
- Διοικητής Σμήνους υποστήριξης των νέων αεροσκαφών 4<sup>ης</sup> γενιάς, F-16 Block 52+, στην 115 Πτέρυγα Μάχης, από το 2004 μέχρι και σήμερα.

Έχει παρακολουθήσει το Σχολείο Εκπαιδευτών της Πολεμικής Αεροπορίας και το 2002 αποφοίτησε με επιτυχία από τη Σχολή Πολέμου της Π.Α.

Επίσης έχει διατελέσει:

- Εκπρόσωπος της Πολεμικής Αεροπορίας στο πρόγραμμα υποστήριξης των αεροσκαφών A-7 με το US Navy.
- Εκπρόσωπος της Πολεμικής Αεροπορίας στο πρόγραμμα υποστήριξης αεροσκαφών Ευρωπαϊκών κρατών (MESS, Mutual European Supply Support)

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λήψη αποφάσεων είναι αποτέλεσμα σύνθετων διαδικασιών, που έχουν σαν στόχο, αρχικά μεν να μελετήσουν και να αναλύσουν διεξοδικά της επιπτώσεις όλων των εναλλακτικών, στη συνέχεια δε, να προσχωρήσουν σε μια προσπάθεια σύνθεσης και σύγκλισης όλων των απαιτήσεων και προτιμήσεων των εμπλεκομένων, στη διαδικασία απόφασης, μερών, ώστε να καταλήξουν τελικά στην εύρεση της πλέον κοινά αποδεκτής και συμφέρουσας λύσης.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η ανάλυση αποφάσεων αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν η λήψη μιας απόφασης πρέπει να γίνει υπό το καθεστώς αβεβαιότητας (uncertainty) και κινδύνου (risk). Στις περιπτώσεις αυτές, για την επιτυχημένη εφαρμογή της Θεωρίας Αποφάσεων, είναι απαραίτητα τόσο η αποσαφήνιση της έννοιας της αβεβαιότητας, όσο και η ρεαλιστική εκτίμηση αλλά και ελαχιστοποίηση του ενεχόμενου κινδύνου.

Η παρούσα συνθετική διατριβή αποσκοπεί στην θεωρητική προσέγγιση και καταγραφή των εννοιών της *αβεβαιότητας* και του *ρίσκου*, του τρόπου που αυτές οι έννοιες επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων, καθώς και των θεωριών, μεθόδων, τεχνικών, αλλά και Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, που έχουν αναπτυχθεί για την υποστήριξη των αποφάσεων υπό καθεστώς αβεβαιότητας και ρίσκου, σε διάφορους τομείς, όπως η οικονομία, το μάρκετινγκ, η υγεία, το περιβάλλον, κ.ά.

## *Λέξεις κλειδιά*

Λήψη Αποφάσεων, Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, Αβεβαιότητα, Κίνδυνος, Θεωρία Χρησιμότητας, Ασαφής Λογική, Θεώρημα Bayes

# ABSTRACT

Decision making is a result of complex processes, the goal of which is at first, the study and extensive analysis of the repercussions of all alternatives and then, to adhere to a composition and convergence of all requirements and preferences, of the parts involved, in the process of decision, so that to lead finally to the most acceptable solution.

Furthermore, it becomes obvious that decision analysis acquires particular importance when the decision-making becomes under conditions of uncertainty and risk. In this case, for the achieved application of Decision Theory, it is essential to clarify the significance of the term *uncertainty*, as well as to make a realistic estimation and also minimisation of the included *risk*. The present synthetic master thesis aims to the theoretical approach and recording of the significances of the terms *uncertainty* and *risk*, the way that these significances influence Decision-making, as well as of the theories, methods and techniques that have been developed for the support of Decision-analysis and Decision-making under the conditions of uncertainty and risk, in various sectors as economy, marketing, health, etc

## *Key Words*

Decision-making, Decision Support Systems, Uncertainty, Risk, Utility Theory, Fuzzy Logic, Bayes Theorem

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια μερικής ικανοποίησης των απαιτήσεων για την απόκτηση μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης, του μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών «Οργάνωση και Διοίκηση» του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Μέσα από τη βιβλιογραφική έρευνα, προσεγγίζεται θεωρητικά η διαδικασία ανάλυσης και λήψης αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας και ρίσκου.

Το 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιλαμβάνει τον σκοπό της διατριβής, μια σύντομη αλλά περιεκτική ιστορική αναδρομή της Θεωρίας των Αποφάσεων, καθώς και την καταγραφή ορισμών αλλά και την ανάλυση συγκεκριμένων βασικών εννοιών, απαραίτητων για την καλύτερη κατανόηση των εν συνεχεία θεωριών και μεθόδων. Το 2<sup>ο</sup>, 3<sup>ο</sup>, 4<sup>ο</sup> και 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, αποτελούν ουσιαστικά μια ενότητα, στην οποία καταγράφεται και αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της υποστήριξης των αποφασιζόντων, οι οποίοι καλούνται να πάρουν αποφάσεις υπό καθεστώς αβεβαιότητας και κινδύνου. Στα Κεφάλαια αυτά, αναλύονται οι έννοιες της αβεβαιότητας και του ρίσκου, καθώς και το πώς αυτές επηρεάζουν τη διαδικασία ανάλυσης και λήψης μιας απόφασης και παρουσιάζονται διεξοδικότερα οι θεωρίες και οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των αποφασιζόντων σε προβληματικές αποφάσεων υπό αβεβαιότητα και κίνδυνο.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο καταγράφονται, μέσα από τη βιβλιογραφική έρευνα, συγκεκριμένα πλέον Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων για την υποστήριξη των αποφασιζόντων στη λήψη αποφάσεων σε καθεστώς αβεβαιότητας και ρίσκου, τα οποία έχουν αναπτυχθεί σε διάφορους τομείς, όπως η οικονομία, το marketing, η υγεία, το περιβάλλον, η ιατρική (κλινικές αποφάσεις) κ.ά., ενώ γίνεται ταξινόμηση και αξιολόγησή τους με βάση συγκεκριμένα κριτήρια.

Στο τελευταίο Κεφάλαιο (7<sup>ο</sup>), γίνεται μια ανακεφαλαίωση της διατριβής και καταγράφονται συμπεράσματα από την βιβλιογραφική έρευνα, καθώς και διαφαίνουσες προοπτικές για περαιτέρω έρευνα στον υποτομέα αυτό της επιστήμης των αποφάσεων.

Η πορεία μου προς την απόκτηση του μεταπτυχιακού τίτλου υπήρξε πολυκύμαντη. Έπειτα από περίπου 20 χρόνια «απουσίας» από τα Πανεπιστημιακά δρώμενα και πλησιάζοντας πλέον στο τέλος και της επαγγελματικής μου διαδρομής, ολοκληρώνεται με επιτυχία, μετά από τρία χρόνια σκληρής προσπάθειας, η φοίτησή μου στον μεταπτυχιακό κύκλο σπουδών Οργάνωσης και Διοίκησης του Πολυτεχνείου. Μία επιθυμία ετών που λόγω επαγγελματικών και οικογενειακών υποχρεώσεων δεν κατέστη δυνατό να πραγματοποιηθεί νωρίτερα. Με την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής μου κλείνει και μια πολύ σημαντική περίοδος της μέχρι τώρα ζωής μου.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της διατριβής μου, κ. Νικόλαο Μαρσατσίνη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη γενναιόδωρη υποστήριξη που μου παρείχε, η οποία με ξεχωριστό κάθε φορά

τρόπο, αποτέλεσε λύση σε κάθε μορφής δυσκολία με την οποία ήρθα αντιμέτωπος στα τρία χρόνια της φοίτησής μου.

Με την πολύτιμη καθοδήγησή του σε ολόκληρη τη διαδρομή μου στον μεταπτυχιακό αυτό κύκλο σπουδών, κατάφερα να αποκτήσω τις γνώσεις και τις βάσεις για την επιτυχή εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Θερμά ευχαριστώ και τους καθηγητές κ. Ευάγγελο Γρηγορούδη και κ. Μιχάλη Δούμπο, για τον χρόνο που διέθεσαν για την ανάγνωση και τη βελτίωση της εργασίας αυτής.

Θα ήταν παράλειψη η μη αναφορά μου, στους πολύ καλούς φίλους, συναδέλφους και συμφοιτητές Χάρη Γεροντίδη και Νίκο Γιανναράκη, για την στήριξη που μου παρείχαν σε δύσκολες στιγμές τα τρία αυτά χρόνια.

Τελευταία, αλλά σε καμία περίπτωση έσχατη, άφησα τη γυναίκα μου, Μάνια. Η έκταση του προλόγου θα λάβει δυσανάλογες διαστάσεις σε σχέση με την διατριβή, αν αναφερθώ στις αρετές και τα χαρίσματά της. Αν και η λέξη ευχαριστώ είναι πολύ μικρή για να χωρέσει το μέγεθος της συμβολής της σε αυτό το εγχείρημα, υποχρεούμαι να περιοριστώ σε αυτήν, για να της εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου που στάθηκε δίπλα μου με κάθε τρόπο αυτά τα χρόνια. Χωρίς την αρχική της ώθηση, αλλά και την συνεχή στήριξή της, είναι σίγουρο ότι η προσπάθεια αυτή δεν θα είχε επιτύχει.

Στέλιος Βλαχάκης  
Χανιά, Νοέμβριος 2007

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ</b> .....	i
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	ii
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</b> .....	iv
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	vi
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Εισαγωγή</b> .....	16
1.1 Γενικά .....	16
1.2 Σκοπός της διατριβής .....	17
1.3 Ιστορική αναδρομή .....	17
1.4 Βασικές έννοιες – Ορισμοί .....	18
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Θεωρία και Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων</b> .....	22
2.1 Εισαγωγή .....	22
2.2 Η διαδικασία λήψης μιας απόφασης .....	22
2.3 Θεωρίες Λήψης Αποφάσεων .....	29
2.3.1 Στατική και δυναμική θεωρία λήψης αποφάσεων .....	30
2.3.2 Νατουραλιστικός τρόπος λήψης αποφάσεων .....	31
2.4 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων .....	32
2.4.1 Γενικά .....	32
2.4.2 Βασικές έννοιες – ορισμοί .....	32
2.4.3 Δομή και χαρακτηριστικά .....	33
2.4.4 Διαδικασία ανάπτυξης της Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων .....	37
2.4.5 Ευφυή Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων .....	38
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Η αβεβαιότητα και το ρίσκο στη Λήψη Αποφάσεων</b> .....	42
3.1 Εισαγωγή .....	42
3.2 Λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα .....	43
3.2.1 Γενικά .....	43
3.2.2 Βασικές έννοιες – ορισμοί .....	44
3.2.3 Πληροφορία και αβεβαιότητα στη Λήψη Αποφάσεων .....	45
3.3 Λήψη αποφάσεων υπό κίνδυνο .....	47
3.3.1 Γενικά .....	47
3.3.2 Βασικές έννοιες – ορισμοί .....	47

3.3.3 Η φύση του κινδύνου .....	49
3.3.4 Διαχείριση κινδύνου (risk management) .....	50
3.3.5. Ανάλυση κινδύνου (risk analysis) .....	52
3.3.5.1 Ποιοτική ανάλυση κινδύνου .....	53
3.3.5.2 Ποσοτική ανάλυση κινδύνου .....	53
3.3.6 Ο ρόλος της προσομοίωσης στη λήψη αποφάσεων υπό κίνδυνο.....	54
<b>Κεφάλαιο 4ο : Υποστήριξη Αποφάσεων υπό αβεβαιότητα και κίνδυνο- Θεωρητική προσέγγιση .....</b>	<b>57</b>
4.1 Εισαγωγή .....	57
4.2 Χρήση πιθανοτήτων – Ο Νόμος του Bayes .....	57
4.2.1 Συντελεστές βεβαιότητας .....	59
4.2.2 Δίκτυα πιθανοτήτων .....	61
4.2.3 Εφαρμογή .....	62
4.6 Προσέγγιση Dempster – Shafer.....	64
4.6.1 Εφαρμογή .....	66
4.7 Κριτήρια για τη λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα και κίνδυνο .....	69
4.8 Info – gap θεωρία αποφάσεων .....	72
4.9 Εισαγωγή στη Θεωρία Χρησιμότητας .....	72
4.9.1 Γενικά .....	72
4.9.2 Ορισμός – Βασικές έννοιες .....	73
4.9.3 Προσδοκώμενη Χρησιμότητα .....	74
4.9.4 Αξιώματα της Θεωρίας Χρησιμότητας.....	74
4.10 Δένδρα Αποφάσεων .....	77
4.10.1 Στάδια σχεδίασης Δένδρων Απόφασης.....	77
4.10.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα .....	82
<b>Κεφάλαιο 5ο : Θεωρία Ασαφών Συνόλων και Ασαφής Λογική .....</b>	<b>84</b>
5.1 Εισαγωγή .....	84
5.2 Ασαφής γνώση.....	84
5.3 Βασικές έννοιες και ορισμοί των ασαφών συνόλων .....	85
5.4 Ιδιότητες ασαφών συνόλων .....	95
5.5 Μορφές συναρτήσεως συμμετοχής .....	99
5.6 Ασαφείς σχέσεις.....	102
5.7 Ασαφείς μεταβλητές, αριθμοί, προτάσεις και κανόνες .....	103
5.8 Ασαφής συλλογιστική.....	106

5.9	Η Αρχή της επέκτασης (extension principle) .....	109
5.10	Συστήματα ασαφούς συλλογιστικής .....	111
5.11	Η μέθοδος Mamdani .....	112
5.12	Η μέθοδος Takagi – Sugeno .....	114
5.13	Υβριδικά Συστήματα Υπολογιστικής Νοημοσύνης .....	115
5.13.1	Γενικά .....	115
5.13.2	Ασαφή Νευρωνικά Δίκτυα .....	116
5.13.3	Αρχιτεκτονικές Ασαφών Νευρωνικών Δικτύων .....	120
<b>Κεφάλαιο 6ο : Εφαρμογές και αξιολόγηση Συστημάτων Υποστήριξης</b>		
<b>Αποφάσεων</b> .....		126
7.1	Εισαγωγή .....	126
7.2	Τα κριτήρια .....	126
7.3	Τα αποτελέσματα της έρευνας .....	128
7.4	Ανάλυση Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων .....	136
<b>Κεφάλαιο 7ο : Ανακεφαλαίωση – Σχόλια – Προοπτικές</b> .....		147
<b>Βιβλιογραφία</b> .....		149
Ελληνική Βιβλιογραφία .....		149
Ξένη Βιβλιογραφία .....		151
Διαδικτυακοί Τόποι .....		159
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α : ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ</b>		
<b>ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ</b> .....		A





# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> : Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Η σωστή λύση κάθε προβλήματος εξαρτάται κυρίως από την κατανόησή του [1]. Κάνοντας μια αναδρομή στις δραστηριότητες μιας ημέρας από την προσωπική ή την επαγγελματική μας ζωή, εύκολα θα παρατηρήσουμε ότι οι περισσότερες είναι στενά συνδεδεμένες με μικρές και ασήμαντες ή μεγάλες και σοβαρές αποφάσεις. Ξεκινάμε με την πιο απλή απόφαση στο ερώτημα «τι θα κάνω σήμερα;» μέχρι την πιο σοβαρή που μπορεί να αλλάξει και αυτόν ακόμα τον ρυθμό της καθημερινής μας ζωής.

Συχνά οι αποφάσεις που θα πάρουμε μπορούν να εφαρμοσθούν χωρίς ιδιαίτερα εμπόδια, είτε γιατί η εκλογή που κάναμε είναι σαφής και δεν χρειάζεται βαθύτερη ανάλυση, είτε γιατί η ίδια η απόφαση δεν είναι ιδιαίτερα σπουδαία για να απαιτεί τόσο μεγάλη προσοχή [2], [3]. Είναι πιθανό αρκετές φορές να βρεθούμε σε τέτοια κατάσταση που να αισθανόμαστε ότι αν σκεφτούμε μεθοδικά, με επιμονή και υπομονή τις διάφορες εναλλακτικές λύσεις ενός προβλήματος, θα κερδίσουμε από το τελικό αποτέλεσμα. Εμβαθύνοντας περισσότερο στον τρόπο που παίρνονται οι αποφάσεις, θα βρούμε της εαυτούς μας να αντιμετωπίζουν προβλήματα, στα οποία δεν είναι βέβαιο το αποτέλεσμα κάθε εναλλακτικής ενέργειας η οποία μπορεί να αποτελέσει μια λύση για το κάθε πρόβλημα.

Αυτό συμβαίνει επειδή μπορεί να συμβούν γεγονότα που δεν είναι δυνατόν να ελεγχθούν ή να προβλεφθούν με βεβαιότητα και που οι συνέπειές τους, θα επηρεάσουν αναπόφευκτα τις τελικές αποφάσεις.

Η ανθρώπινη αυτή δραστηριότητα, η Λήψη δηλαδή Αποφάσεων, δεν ήταν δυνατόν να αφήσει ασυγκίνητους τους επιστημονικούς ερευνητές. Θα ήταν πράγματι παράλογο, ενώ η επιστήμη έχει κάνει τεράστια άλματα σε όλους τους τομείς, οι αποφάσεις για λύσεις προβλημάτων να στηρίζονται μόνο στην εμπειρία ή την ευστροφία του κάθε αποφασίζοντα. Έτσι λοιπόν η επιστημονική έρευνα, μέσα στην πληθώρα των δραστηριοτήτων της, περιέλαβε και την ανάπτυξη της Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων, η οποία ασχολείται με όλο το πλέγμα του ευρύτετου τομέα των αποφάσεων. Νέοι επιστημονικοί κλάδοι όπως, η επιχειρησιακή έρευνα (*operation research*), οι εφαρμοσμένες οικονομικές επιστήμες, η επιστήμη της συμπεριφοράς (*behavioral science*), η επιστήμη των υπολογιστών (*computer science*), κ.ά., αναπτύχθηκαν ή και εξελίχθηκαν περαιτέρω, με αποτέλεσμα τη διεύρυνση και ενίσχυση του ανθρώπινου παράγοντα στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, οδηγώντας έτσι στη δημιουργία, στις αρχές της δεκαετίας του '70, ενός νέου επιστημονικού κλάδου, αυτού της Επιστήμης των Αποφάσεων [1].

Η λήψη αποφάσεων αποτελεί ένα διεπιστημονικό αντικείμενο μελέτης και έρευνας, με συνεισφορά από επιστήμες όπως η ψυχολογία (μελέτη της συμπεριφοράς κατά τη λήψη αποφάσεων), η στατιστική (αποφάσεις υπό καθεστώς αβεβαιότητας ή ρίσκου), η κοινωνιολογία και οι πολιτικές επιστήμες (μελέτη των συλλογικών μηχανισμών απόφασης), οι οικονομικές επιστήμες, η πληροφορική.

## 1.2 Σκοπός της διατριβής

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια μερικής ικανοποίησης των απαιτήσεων για την απόκτηση μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης, του μεταπτυχιακού κύκλου σπουδών «Οργάνωση και Διοίκηση» του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Σκοπός της είναι, μέσα από τη βιβλιογραφική έρευνα, η θεωρητική προσέγγιση της διαδικασίας ανάλυσης και λήψης αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας και ρίσκου, τόσο με την παρουσίαση των θεωριών, των μεθόδων και των τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί για την υποστήριξη των αποφασιζόντων που καλούνται να δράσουν σε περιβάλλον ασάφειας και κινδύνου, όσο και με την καταγραφή και αξιολόγηση αντίστοιχων Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, τα οποία αναπτύχθηκαν για την υποστήριξη αποφασιζόντων, σε διάφορους τομείς (υγεία, περιβάλλον, οικονομία, κ.ά.), καθώς και η καταγραφή συμπερασμάτων, σχολίων, αλλά και των προοπτικών που διαφαίνονται για περαιτέρω έρευνα στον υποτομέα αυτόν της επιστήμης των αποφάσεων.

## 1.3 Ιστορική αναδρομή

Ουσιαστικά, η πρώτη γενική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων προτάθηκε από τον φιλόσοφο Condorcet στα πλαίσια δημιουργίας του Γαλλικού συντάγματος το 1793 [14]. Διαχωρίζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε τρία στάδια:

- 1<sup>ο</sup> Στάδιο: Συζήτηση επί των αρχών, η οποία θα αποτελέσει τη βάση της απόφασης. Αφορά στη μελέτη του προβλήματος και των μεθόδων λήψης της απόφασης.
- 2<sup>ο</sup> Στάδιο: Αποσαφήνιση των ερωτημάτων και των στόχων, δημιουργία της διαχειρίσιμου συνόλου εναλλακτικών.
- 3<sup>ο</sup> Στάδιο: Επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων εναλλακτικών.

Η μοντέρνα Θεωρία Λήψης Αποφάσεων ουσιαστικά αναπτύχθηκε το δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα [14], με αφετηρία την μελέτη του John Dewey, σύμφωνα με την οποία τα στάδια επίλυσης προβλημάτων είναι τα ακόλουθα πέντε:

- Μια αντιληπτή (αισθανόμενη) δυσκολία
- Ο ορισμός του χαρακτήρα της δυσκολίας
- Η πρόταση πιθανών λύσεων
- Η αξιολόγηση των προτάσεων

- Η περαιτέρω παρατήρηση και αξιολόγηση η οποία οδηγεί στην αποδοχή ή την απόρριψη των προτεινόμενων λύσεων

Στη συνέχεια και λόγω της συνεχώς αυξανόμενης πολυπλοκότητας των Οργανισμών και των Επιχειρήσεων, η λήψη αποφάσεων από μεμονωμένα άτομα έγινε αδύνατη και δημιουργήθηκε έτσι η ανάγκη για αποδοτικότερη και αποτελεσματικότερη οργάνωση και διοίκηση. Έτσι της αρχές της δεκαετίας του '70, δημιουργείται ένας νέος επιστημονικός κλάδος, αυτός της Επιστήμης των Αποφάσεων.

Μετά τα ακολουθιακά μοντέλα λήψης αποφάσεων των Simon (1960) και Brim (1962) – θα τα δούμε πιο αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο – έπονται τα αντίστοιχα μη ακολουθιακά των Mintzberg, Raisinghani and Theoret (1976).

Η εξέλιξη της Επιστήμης των Αποφάσεων είναι ραγδαία [1], [14]. Αναπτύσσονται τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, με της διαδοχικές θεωρητικές προσεγγίσεις των Little (1970), Alter (1977), Keen and Scott-Morton (1978), Huber (1980), Bonczek et al. (1980), Moore and Chang (1980), Zeleny (1982), Andriole (1989), Sage (1986;1991), Adelman (1992), ενώ ανάλογη είναι και η ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης [Alan Turing (1950), John McCarthy, Marvin Minsky, Claude Shannon (1956)] και των Έμπειρων Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων [Sprague and Carlson (1982), Turban (1993)].

Η Θεωρία Λήψης Αποφάσεων παίζει σήμερα σπουδαίο ρόλο σε κάθε είδους δραστηριότητα. Επειδή ζούμε σε ένα κόσμο όπου η πορεία των μελλοντικών γεγονότων δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί κάθε φορά με απόλυτη βεβαιότητα, το καλύτερο που έχουμε να κάνουμε είναι να αναζητούμε λύσεις και αποφάσεις, ελαχιστοποιώντας την αβεβαιότητα και τον κίνδυνο που ενέχουν.

Η Θεωρία Λήψης Αποφάσεων δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης πολύπλοκων αποφάσεων υπό το πρίσμα των υφιστάμενων συνθηκών αλλά και των μελλοντικών αλλαγών του περιβάλλοντος στο οποίο δρούμε.

#### 1.4 Βασικές έννοιες – Ορισμοί

Κατά τον καθηγητή D. Lindley [1], [14], *απόφαση* είναι η ενσυνείδητη επιλογή μεταξύ δύο τουλάχιστον πιθανών τρόπων ενέργειας, για την αντιμετώπιση κάποιου προβλήματος. Ενώ κατά τον καθηγητή W.T. Dorriss [14], με τον όρο *απόφαση* εννοούμε τη συνειδητοποίηση της δυνατότητας μιας επιλογής, είτε με την έννοια μιας νοητής εικόνας είτε με ένα αναλυτικό υπόδειγμα (μοντέλο).

Γενικότερα, σαν *απόφαση* θεωρούνται εκείνες οι ενέργειες (σκέψεις, κρίσεις, κλπ) που γίνονται από έναν ή περισσότερους ανθρώπους, με στόχο την επιλογή ενός τρόπου δράσης (ενέργειας) μέσα από ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών δράσης [1].

Η λήψη αποφάσεων [1], [14] είναι συνεπώς αποτέλεσμα σύνθετων διαδικασιών, που έχουν σαν στόχο, αρχικά μεν να μελετήσουν και να αναλύσουν διεξοδικά τις επιπτώσεις όλων των εναλλακτικών επιλογών, στη συνέχεια δε, να προχωρήσουν σε μια προσπάθεια σύνθεσης και σύγκλισης των απαιτήσεων όλων των

εμπλεκόμενων, στη διαδικασία απόφασης, μερών, ώστε να καταλήξουν τελικά στην εύρεση της πλέον κοινά αποδεκτής λύσης.

Αναλύοντας όλους τους παραπάνω ορισμούς, διαπιστώνουμε την ύπαρξη δύο στοιχείων:

- Του *προβλήματος*, το οποίο έχει αναγνωρισθεί και καθορισθεί με κάθε λεπτομέρεια και
- Διάφορων *εναλλακτικών* ενεργειών ή λύσεων.

Αρχικά [14], μπορούμε να διακρίνουμε τρεις γενικούς τύπους αποφάσεων, ανάλογα με τον ευρύτερο τομέα στον οποίο κατηγοριοποιείται το πρόβλημα στο οποίο ο αποφασίζων καλείται να δώσει λύση:

- *Προσωπικές αποφάσεις*, οι οποίες έχουν να κάνουν με αυστηρά προσωπικά προβλήματα, π.χ. «σε τι σπίτι να μείνω;», «τι μεταπτυχιακό να επιλέξω;», «ποιο αυτοκίνητο να αγοράσω;», κ.ά.
- *Επαγγελματικές αποφάσεις*, οι οποίες έχουν να κάνουν με τη λύση προβλημάτων που περιορίζονται στον επαγγελματικό τομέα του αποφασίζοντα, π.χ. «μια νέα πρόσληψη», «εισαγωγή της νέου προϊόντος στην αγορά», κ.ά.
- *Πολιτικές – Κοινωνικές αποφάσεις*, τις οποίες καλούνται να λάβουν οι κατά περίπτωση αποφασίζοντες και αφορούν σε προβλήματα του ευρύτερου πολιτικού και κοινωνικού χώρου.

Κατά τον Simon (1960) [1], η διαδικασία λήψης αποφάσεων αποτελείται από *προγραμματιζόμενες (programmed)* και *μη προγραμματιζόμενες (non-programmed)* αποφάσεις.

Αντίστοιχα οι Keen and Scott-Morton (1978) [1], διακρίνουν τις αποφάσεις σε *δομημένες (structured)*, *ημιδομημένες (semi-structured)* και *αδόμητες (unstructured)*.

Πιο συγκεκριμένα:

- *Δομημένες*, είναι οι αποφάσεις εκείνες των οποίων η διαδικασία που ακολουθείται για τη λήψη τους είναι πάντα η ίδια, το αντικείμενο της απόφασης είναι σαφώς καθορισμένο και τα δεδομένα εισόδου, καθώς και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας τους, είναι συγκεκριμένα.
- *Αδόμητες*, είναι οι αποφάσεις εκείνες των οποίων η διαδικασία που ακολουθείται για τη λήψη τους είναι κάθε φορά διαφορετική και το αντικείμενο της απόφασης, τα δεδομένα εισόδου, καθώς και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας τους, δεν είναι καθορισμένα.

- *Ημιδομημένες*, είναι οι αποφάσεις στις οποίες κάποιες εργασίες και διαδικασίες είναι σαφώς καθορισμένες και κάποιες άλλες είναι ασαφείς.

Οι Keen and Scott-Morton (1978) [1], εκτιμούν ότι οι δομημένες αποφάσεις μπορούν να λαμβάνονται από μηχανογραφημένες εφαρμογές, χωρίς να είναι απαραίτητη η συμμετοχή του αποφασίζοντα, ενώ οι ημιδομημένες αποφάσεις λαμβάνονται οπωσδήποτε με τη συμμετοχή του, μέσα από μια διαδικασία αλληλεπίδρασης αποφασίζοντα – συστήματος. Τέλος, αδόμητες αποφάσεις θεωρούνται εκείνες των οποίων η δόμηση δεν είναι δυνατή ή δεν έχει γίνει ακόμη κατορθωτή.

Εάν τώρα και μετά τα παραπάνω, κάνουμε αποδεκτό ότι η έννοια της απόφασης είναι αποκλειστικό χαρακτηριστικό της ανθρώπινης σκέψης και κρίσης, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι από τις παραπάνω κατηγορίες, η πρώτη, δηλαδή αυτή των δομημένων αποφάσεων σύμφωνα πάντα με τους Keen and Scott-Morton (1978), καθώς και οι προγραμματιζόμενες αποφάσεις σύμφωνα με τον Simon (1960), μπορεί να μην γίνουν αποδεκτές, καθώς σε αυτές δεν παρεμβαίνει ο ανθρώπινος παράγοντας. Έτσι οι αποφάσεις μπορεί να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες, τις ημιδομημένες και τις αδόμητες, με τις έννοιες που τους έχουν αποδοθεί.

Τέλος, ο Anthony (1965) [14], ορίζει τις ακόλουθες τρεις κατηγορίες αποφάσεων που εμπεριέχουν τις ακόλουθες διοικητικές δραστηριότητες:

- *Λειτουργικός έλεγχος (operational control)*, που αναφέρεται στην αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα της εκτέλεσης ειδικών εργασιών
- *Διοικητικός έλεγχος (managerial control)*, που αφορά στην απόκτηση και αποδοτική χρησιμοποίηση των απαραίτητων μέσων για την επίτευξη των στόχων
- *Στρατηγικός σχεδιασμός (strategic planning)*, που αναφέρεται στους μακροπρόθεσμους στόχους και τις ακολουθούμενες πολιτικές κατανομής πόρων.

Τέλος, τις αποφάσεις μπορούμε να τις κατατάξουμε σε τρεις κατηγορίες:

- Αποφάσεις υπό *βεβαιότητα*
- Αποφάσεις υπό *αβεβαιότητα* και
- Αποφάσεις κάτω από *κίνδυνο*

Μία απόφαση λέγεται ότι είναι κάτω από βεβαιότητα όταν ο αποφασίζων γνωρίζει το αποτέλεσμα στην περίπτωση που επιλεγεί μία συγκεκριμένη εναλλακτική [Bellman, (1957), [14]]. Η περίπτωση της αβεβαιότητας, την οποία εξετάζουμε

στην διατριβή αυτή, καλύπτει τις περιπτώσεις εκείνες κατά τις οποίες δεν υπάρχει επαρκής πληροφόρηση. Στην περίπτωση του κινδύνου, η οποία επίσης αναλύεται σε αυτή την εργασία, ναί μεν η διαθέσιμη πληροφόρηση δεν είναι επαρκής και πλήρης, είναι όμως τέτοια ώστε να είναι δυνατός ο χειρισμός της, με τη χρήση πιθανοτήτων.

Από τα παραπάνω, θα μπορούσαμε να καταλήξουμε συμπερασματικά, ότι οι δύο ακραίες περιπτώσεις λήψης αποφάσεων είναι η απόλυτη βεβαιότητα από τη μία πλευρά και η απόλυτη αβεβαιότητα από την άλλη. Καθώς κινούμαστε από το ένα άκρο στο άλλο, περνάμε υποχρεωτικά από κάποια ενδιάμεσα στάδια, στα οποία οι αποφάσεις λαμβάνονται κάτω από συνθήκες κινδύνου, όπου οι διάφορες διαθέσιμες εναλλακτικές χαρακτηρίζονται από κάποιο κόστος το οποίο καλείται να δεχθεί ή όχι ο αποφασίζων.

Στο επόμενο κεφάλαιο και πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των εννοιών της αβεβαιότητας και του ρίσκου, καθώς και του πώς αυτές επηρεάζουν τη λήψη μιας απόφασης, προσεγγίζονται αναλυτικότερα η Θεωρία και τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> : Θεωρία και Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων

---

Who shall decide, when doctors disagree?

*Alexander Pope*

### 2.1 Εισαγωγή

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι αποφασίζοντες είναι η λήψη ορθολογικών αποφάσεων, υπό το πρίσμα αβεβαιότητας, ελλιπούς γνώσης και ρίσκου. Η αντιμετώπιση της αβεβαιότητας, αποτελεί κυρίαρχο πρόβλημα, το οποίο εμφανίζεται στις περισσότερες προσπάθειες των εκάστοτε αποφασιζόντων.

Οι θεωρίες λήψης αποφάσεων, οι οποίες ακολουθούνται κατά περίπτωση από τους αποφασίζοντες, κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες, τις *Κανονιστικές* (normative theories), οι οποίες προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οφείλουν να λαμβάνονται οι αποφάσεις και γενικά αφορούν στον προσδιορισμό των προϋποθέσεων λήψης λογικών αποφάσεων (rational decisions) και τις *Περιγραφικές* θεωρίες (descriptive theories), οι οποίες περιγράφουν τους πραγματικούς μηχανισμούς λήψης αποφάσεων. Ο διαχωρισμός μεταξύ αυτών των δύο κατηγοριών παρουσιάζει ασάφεια, καθώς τα όρια μεταξύ κανονιστικών και περιγραφικών προσεγγίσεων είναι συχνά δυσδιάκριτα. Για την πιο κατανοητή προσέγγιση της Θεωρίας των Αποφάσεων, ας δούμε αναλυτικότερα τη διαδικασία λήψης μιας απόφασης.

### 2.2 Η διαδικασία λήψης μιας απόφασης

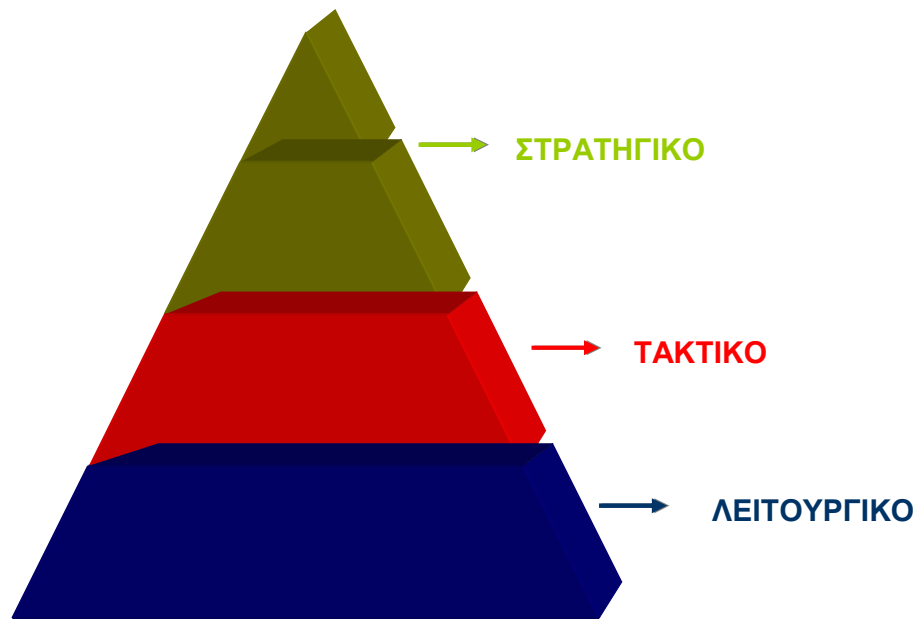
Κατά τον R. Anthony (1965) [1], [14], η διαδικασία λήψης αποφάσεων υλοποιείται σε τρία επίπεδα:

- *Το στρατηγικό*
- *Το τακτικό και*
- *Το λειτουργικό*

Τα επίπεδα αυτά βέβαια δεν είναι στεγανά και δεν καθορίζεται σαφής διαχωρισμός μεταξύ τους.



Στο σχήμα 2.1 που ακολουθεί, παριστάνονται τα επίπεδα αποφάσεων σύμφωνα με τον R. Anthony (1965):



Σχήμα 2.1: Επίπεδα Λήψης Αποφάσεων (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

Γίνεται φανερό ότι όσο απομακρυνόμαστε από την κορυφή του τριγώνου ο αριθμός των αποφάσεων αυξάνει, ενώ μικραίνει η σημασία και η σπουδαιότητά της. Είναι αλήθεια ότι στη βάση, οι αποφάσεις πρέπει να παίρνονται γρηγορότερα από αυτές που λαμβάνονται στην κορυφή.

Το κλασικό πλέον μοντέλο του Simon (1960) [1], που αναφέρεται στη διαδικασία λήψης απόφασης από έναν αποφασίζοντα, χωρίζει τη διαδικασία λήψης μιας απόφασης σε τρεις φάσεις:

- Τη νοητική
- Τον σχεδιασμό
- Την επιλογή

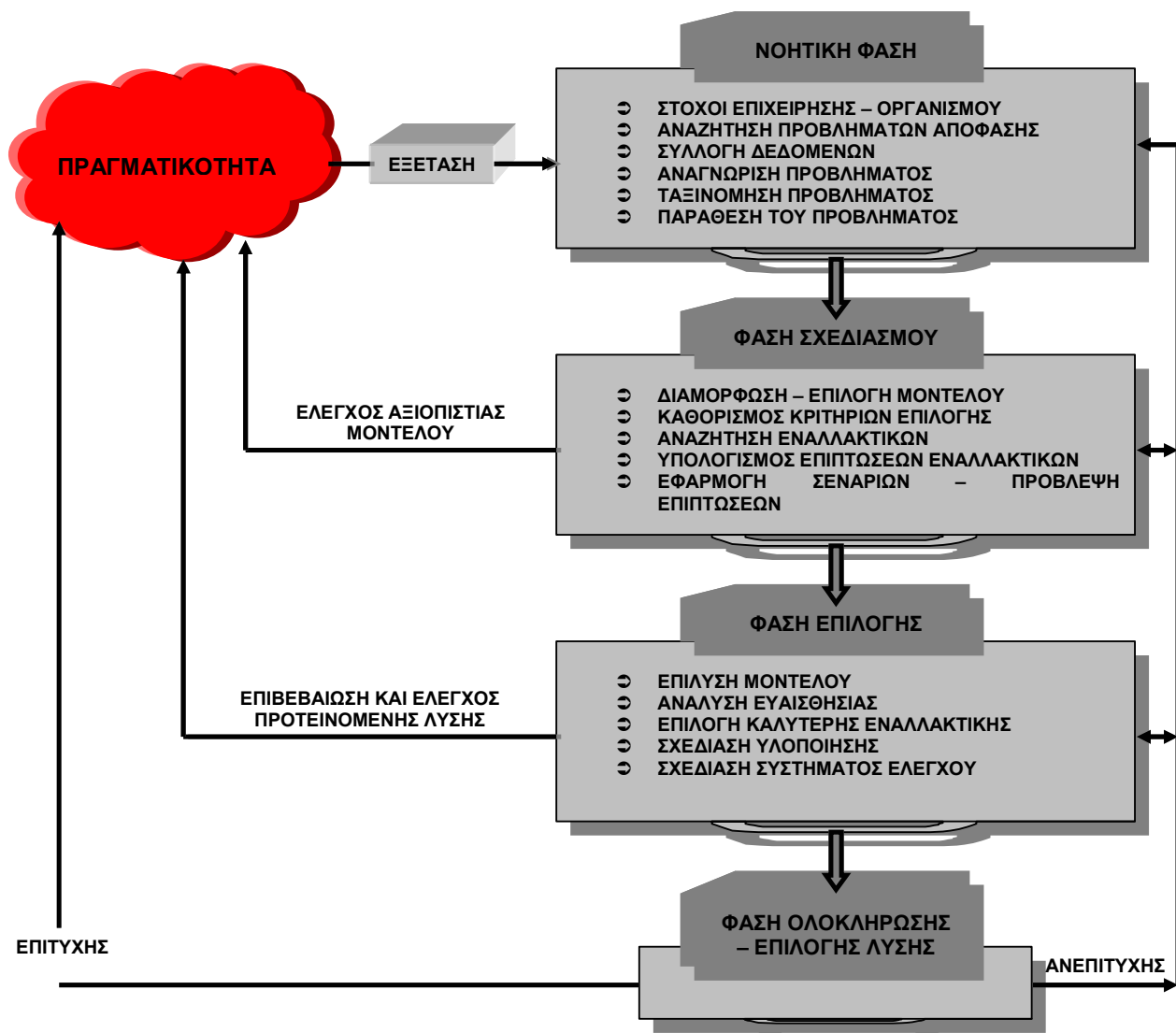
Όταν κατά τη διάρκεια λήψης μιας απόφασης και οι τρεις φάσεις είναι δομημένες, τότε πρόκειται για δομημένο πρόβλημα. Αν καμιά από τις τρεις φάσεις δεν είναι δομημένη, τότε πρόκειται για ένα πλήρως αδόμητο πρόβλημα, ενώ σε μια μικτή περίπτωση δομημένων και μη δομημένων φάσεων, έχουμε ένα ημιδομημένο πρόβλημα.

Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στην Τρίτη φάση, αυτή της επιλογής, εμπεριέχεται και η εργασία της ολοκλήρωσης της λύσης (implementation), η οποία λόγω της σημαντικότητάς της, αντιμετωπίζεται από πολλούς επιστήμονες ως μια τέταρτη ξεχωριστή φάση.

Στο σχήμα 2.2 οι παραπάνω φάσεις απεικονίζονται σχηματικά. Ας τις δούμε όμως αναλυτικότερα:

- **Νοητική φάση (intelligent phase):** Στη φάση αυτή αναζητούνται καταστάσεις και πιθανά προβλήματα, στον περιβάλλοντα χώρο, για τα οποία μπορούν να ληφθούν αποφάσεις. Στη συνέχεια γίνεται διερεύνηση για το αν το κάθε συγκεκριμένο πρόβλημα είναι αφενός μεν πραγματικό και αφετέρου δεν αποτελεί μέρος άλλου προβλήματος. Εν συνεχεία, το κάθε πρόβλημα καθορίζεται συγκεκριμένα και προσδιορίζεται ο βαθμός σπουδαιότητάς του, έτσι ώστε να είναι γνωστή και η προτεραιότητα για την επίλυσή του.

Κάθε πρόβλημα ταξινομείται σε μια από τις προαναφερθείσες κατηγορίες (δομημένο, αδόμητο ή ημιδομημένο) και στη συνέχεια διασπάται, εφόσον αυτό είναι δυνατό, σε επιμέρους υποπροβλήματα. Η φάση αυτή ολοκληρώνεται με την καταγραφή του προβλήματος.



Σχήμα 2.2: Διαδικασία Λήψης Απόφασης (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

➤ **Σχεδιασμός (design):** Κατά τη φάση αυτή γίνεται έρευνα, ανάλυση και ανάπτυξη όλων των εναλλακτικών τρόπων δράσης (αποφάσεων).

Η σχεδίαση ξεκινά με την μελέτη του προβλήματος, έτσι ώστε αυτό να γίνει κατανοητό σε όλες του τις διαστάσεις και από όλους τους εμπλεκόμενους στη διαδικασία λήψης της απόφασης. Ακολούθως γίνεται προσπάθεια να βρεθούν όλοι οι πιθανοί εναλλακτικοί τρόποι δράσης, οι οποίοι στη συνέχεια, αφού αναπτυχθούν και αναλυθούν, θα εφαρμοσθούν για τον υπολογισμό των λύσεων οι οποίες με τη σειρά τους θα ελεγχθούν για την δυνατότητα εφαρμογής τους.

Από τα πλέον σημαντικά μέρη της φάσης αυτής, είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος, δηλαδή η κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου το οποίο αναπαριστά την κατάσταση του προβλήματος. Το μοντέλο αυτό στη συνέχεια ελέγχεται και επαληθεύεται. Απομονώνοντας μέσα στη φάση του σχεδιασμού, τη διαδικασία της μοντελοποίησης, θα αναφέρουμε απλά τις διαδοχικές εργασίες αυτής της διαδικασίας, που είναι:

- Συστατικά του μοντέλου
- Δομή του μοντέλου
- Καθορισμός των αρχών επιλογής
- Δημιουργία εναλλακτικών επιλογών
- Πρόβλεψη αποτελεσμάτων
- Μέτρηση αποτελεσμάτων
- Σενάρια

➤ **Επιλογή (choice):** Στην τελική φάση γίνεται η επιλογή της καλύτερης απόφασης μέσα από το σύνολο των υφιστάμενων εναλλακτικών.

Η αναζήτηση της λύσης μπορεί να είναι είτε κατευθυνόμενη από τον στόχο (goal-driven), είτε κατευθυνόμενη από τα δεδομένα (data-driven), είτε ένας συνδυασμός και των δύο.

Στην περίπτωση της κατευθυνόμενης από τα δεδομένα αναζήτησης, προσπαθούμε να φτάσουμε σε συμπεράσματα, τα οποία προσεγγίζουν τους επιθυμητούς στόχους, με βάση τα δεδομένα που έχουμε στη διάθεσή μας. Στην περίπτωση της κατευθυνόμενης από τους στόχους αναζήτησης, ξεκινάμε είτε από τους στόχους που έχουμε θέσει, είτε από εκείνους που αναμένουμε να επιτύχουμε και αναζητούμε γεγονότα που θα στηρίξουν ή θα απορρίψουν της υποθέσεις μας.

Οι τεχνικές αναζήτησης που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα [1]. Έτσι, τα μοντέλα βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν τεχνικές αναλυτικής αναζήτησης και τυφλής πλήρους αναζήτησης, ενώ τα περιγραφικά μοντέλα χρησιμοποιούν ευριστικές τεχνικές είτε τεχνικές τυφλής μερικής αναζήτησης. Πριν περάσουμε στην τελευταία φάση της διαδικασίας λήψης απόφασης, ας δούμε περιληπτικά τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές αναζήτησης της φάσης επιλογής.

**Οι τεχνικές αναλυτικής αναζήτησης**, χρησιμοποιούνται κυρίως για την επίλυση δομημένων προβλημάτων. Η διαδικασία αναζήτησης είναι αλγοριθμική. Με αυτήν μία λύση ελέγχεται για το αν είναι δυνατή η περαιτέρω βελτίωσή της. Εάν αυτό

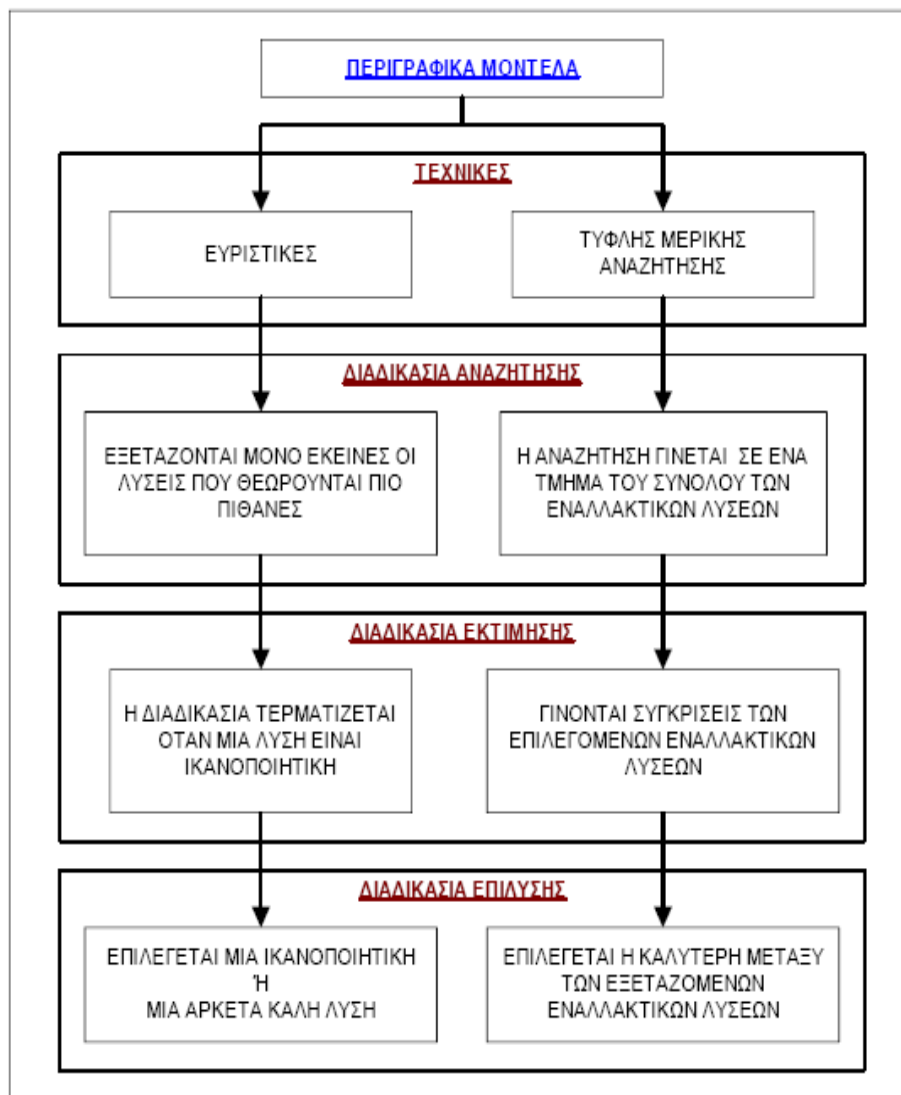
δεν είναι εφικτό, τότε η συγκεκριμένη λύση είναι η βέλτιστη και η αναζήτηση ολοκληρώνεται.

**Οι τεχνικές τυφλής πλήρους αναζήτησης**, εξετάζουν τις εναλλακτικές λύσεις, επιλέγοντας την βέλτιστη.

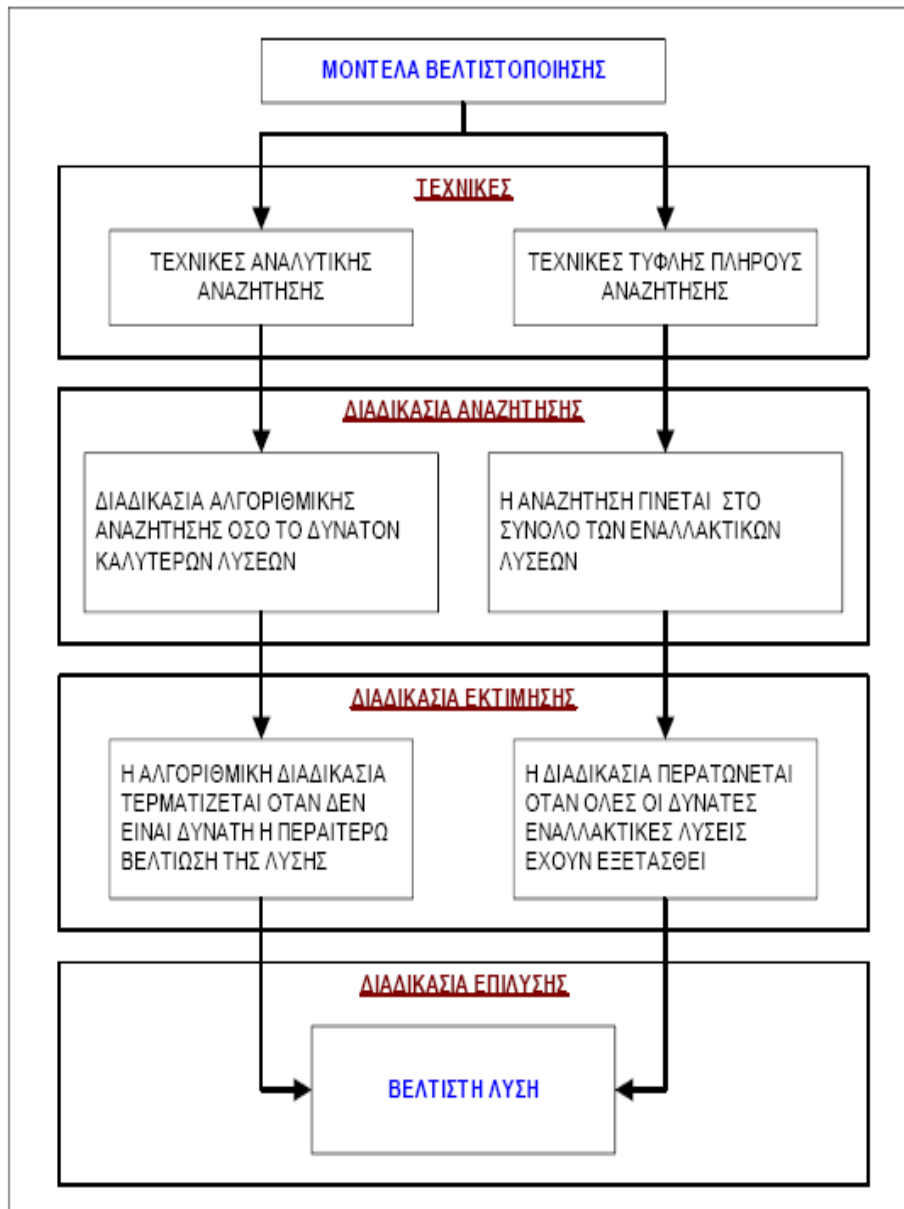
**Με τις ευριστικές τεχνικές αναζήτησης** και με στόχο τη μείωση του χρόνου αναζήτησης, ξεκινάμε την έρευνα από τις εναλλακτικές με τις περισσότερες πιθανότητες να δώσουν μια ικανοποιητική λύση μοντέλου, πάντα χρησιμοποιώντας την εμπειρία μας ή διάφορες πληροφορίες [Zanakis and Evans, (1981), Pearl, (1984)].

Τέλος, με τις **τεχνικές τυφλής μερικής αναζήτησης**, η αναζήτηση γίνεται σε ένα μέρος του συνόλου των εναλλακτικών λύσεων και συνεχίζεται μέχρι την εύρεση της καλύτερης λύσης μεταξύ των εξετασθέντων.

Στα σχήματα 2.3 και 2.4 που ακολουθούν, απεικονίζονται οι διαδικασίες αναζήτησης σε περιγραφικά και μοντέλα βελτιστοποίησης αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3: Αναζήτηση λύσης σε περιγραφικά μοντέλα (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])



Σχήμα 2.4: Αναζήτηση λύσης σε μοντέλα βελτιστοποίησης (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

➤ **Φάση Ολοκλήρωσης (implementation):** Κατά την φάση αυτή εφαρμόζουμε την προτεινόμενη λύση. Αν τα αποτελέσματα της φάσης αυτής είναι ικανοποιητικά, τότε συμπεραίνεται ότι οι εργασίες των προηγούμενων φάσεων έγιναν σωστά. Αν όχι, τότε έχουμε τη δυνατότητα να επαναλάβουμε τμήματα ή και ολόκληρες τις προηγούμενες εργασίες, μέχρι να καταλήξουμε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Πέρα από το κλασσικό μοντέλο του Simon (1960), όπως προαναφέραμε η αφετηρία της μοντέρνας θεωρίας αποφάσεων, ξεκίνησε με την μελέτη του John Dewey [14] πάνω στα στάδια επίλυσης προβλημάτων. Σύμφωνα με τον Dewey η

διαδικασία επίλυσης προβλημάτων και κατ' επέκταση λήψης απόφασης, διατρέχει πέντε διαδοχικά στάδια:

1<sup>ο</sup> Στάδιο: Μία αντιληπτή (αισθανόμενη) δυσκολία

2<sup>ο</sup> Στάδιο: Ο ορισμός του χαρακτήρα της δυσκολίας

3<sup>ο</sup> Στάδιο: Την πρόταση πιθανών λύσεων

4<sup>ο</sup> Στάδιο: Την αξιολόγηση των προτάσεων

5<sup>ο</sup> Στάδιο: Την περαιτέρω παρατήρηση και αξιολόγηση, η οποία οδηγεί στην απόρριψη ή αποδοχή των προτεινόμενων λύσεων.

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε και το μοντέλο διαδικασίας λήψης απόφασης του Brim (1962) [14], δύο ακριβώς χρόνια μετά από αυτό του Simon (1960), σύμφωνα με το οποίο η διαδικασία λήψης μιας απόφασης εξελίσσεται σε πέντε διαδοχικά βήματα:

1<sup>ο</sup> Βήμα: Η αναγνώριση του προβλήματος

2<sup>ο</sup> Βήμα: Η ανάκτηση των απαραίτητων πληροφοριών

3<sup>ο</sup> Βήμα: Η παραγωγή πιθανών λύσεων

4<sup>ο</sup> Βήμα: Η αξιολόγηση των πιθανών λύσεων

5<sup>ο</sup> Βήμα: Η επιλογή της στρατηγικής με την καλύτερη επίδοση

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι οι προσεγγίσεις των Dewey, Simon και Brim χαρακτηρίζονται ως «ακολουθιακές», καθώς διαχωρίζουν τη διαδικασία λήψης απόφασης σε διακριτά βήματα, τα οποία εκτελούνται διαδοχικά. Σημαντικότερη κριτική στην «ακολουθιακή» αυτή μοντελοποίηση της διαδικασίας λήψης απόφασης, άσκησε ο Witte (1972), η μελέτη του οποίου κατέδειξε ότι τα στάδια, στη διαδικασία λήψης μιας απόφασης, δεν εκτελούνται διαδοχικά αλλά παράλληλα.

*«Πιστεύουμε ότι τα ανθρώπινα πλάσματα δεν είναι δυνατόν να συλλέγουν πληροφορίες χωρίς ταυτόχρονα να παράγουν εναλλακτικές. Δεν μπορούν να αποφύγουν την άμεση αξιολόγηση αυτών των εναλλακτικών και αξιολογώντας της, καταλήγουν σε κάποια απόφαση. Αυτό συνιστά μια δέσμη ενεργειών και η χρονική αλληλουχία τέτοιων «δεσμών» συνιστά τη διαδικασία απόφασης...»*

**Witte, 1972, [14]**

Μεταγενέστερα, οι Mintzberg, Raisinghani και Theoret (1976) [14], πρότειναν ένα μη ακολουθιακό μοντέλο διαδικασίας λήψης μιας απόφασης, το οποίο, της και το αντίστοιχο του Simon (1960), αποτελείται από τρία στάδια:

1<sup>ο</sup> Στάδιο: Αναγνώρισης, το οποίο υποδιαιρείται στις ακόλουθες φάσεις:

- Αναγνώριση: «Προβλήματα και δυνατότητες εντοπίζονται στα πλαίσια ασαφούς κυρίως λεκτικής πληροφόρησης...»
- Διάγνωση: «Αποκλεισμός υπαρχόντων καναλιών πληροφόρησης και άνοιγμα καινούριων, για ξεκαθάρισμα και προσδιορισμό των ζητημάτων...»

2<sup>ο</sup> Στάδιο: Ανάπτυξης, το οποίο υποδιαιρείται στις ακόλουθες φάσεις:

- Αναζήτηση: Εντοπισμός έτοιμων λύσεων – εναλλακτικών
- Σχεδιασμός: Ανάπτυξη νέων λύσεων – εναλλακτικών ή τροποποίηση των ήδη διαθέσιμων

3<sup>ο</sup> Στάδιο: Επιλογής, το οποίο αποτελείται από τρεις φάσεις:

- Επισκόπηση και αποκλεισμός (screening): Η φάση αυτή είναι χρήσιμη όταν η αναζήτηση έτοιμων λύσεων στο προηγούμενο στάδιο, οδηγεί σε μεγάλο αριθμό εναλλακτικών και αποσκοπεί στην περικοπή των εμφανώς μη βέλτιστων λύσεων
- Αξιολόγηση και επιλογή: Στη φάση αυτή γίνεται η αξιολόγηση και επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων εναλλακτικών.
- Έγκριση: Στην τελευταία αυτή φάση η επιλεγμένη λύση λαμβάνει (εφόσον αυτό είναι απαραίτητο) την έγκριση της υψηλότερης ιεραρχίας.

Στο παραπάνω μοντέλο, η σχέση μεταξύ των προτεινόμενων φάσεων είναι κυκλική. Η δραστηριότητα του υπεύθυνου της απόφασης εναλλάσσεται μεταξύ των τριών σταδίων αναζητώντας πληροφορία, εναλλακτικές και συνθήκες αξιολόγησης, με στόχο την επίτευξη της βέλτιστης απόφασης.

## 2.3 Θεωρίες Λήψης Αποφάσεων

Διάφορες θεωρίες έχουν σήμερα αναπτυχθεί, οι οποίες αφορούν στην ανάλυση και υποστήριξη λήψης μιας απόφασης.

### 2.3.1 Στατική και δυναμική θεωρία λήψης αποφάσεων

Η θεωρία αποφάσεων ως θέμα της επιστήμης της ψυχολογίας, παρουσιάζει δύο ξεκάθαρα και μη αλληλεπιδρόμενα τμήματα, τη Στατική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων (Static Decision Theory) και τη Δυναμική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων (Dynamic Decision Theory) [2].

**Η Στατική Θεωρία Λήψης αποφάσεων** εφαρμόζεται από άτομα τα οποία καλούνται να πάρουν αποφάσεις σε περιβάλλον με καθορισμένο αριθμό τρόπων ενέργειας ή αντιδράσεων. Το άτομο που λαμβάνει την απόφαση μπορεί να λάβει υπόψη του τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του τρόπου ενεργείας χωρίς να υπόκειται σε χρονικό περιορισμό.

Παραδείγματα στατικών αποφάσεων μπορούν να θεωρηθούν αποφάσεις της ζωής μας, όπως η επιλογή συζύγου, η επιλογή εργασίας, η αγορά κατοικίας, όπου διατίθεται αρκετός χρόνος και τα αποτελέσματα της απόφασης είναι δυνατόν να προσδιορισθούν με ακρίβεια, χαρακτηρίζονται δε και από την διαχρονικότητα της, χωρίς να υπάρχει συνέχεια ή δεύτερη απόφαση βασισμένη σε διδάγματα της πρώτης απόφασης.

Αντιθέτως στη **Δυναμική Θεωρία Λήψης Αποφάσεων**, οι αποφάσεις που λαμβάνονται είναι προϊόν μιας ακολουθίας από επιμέρους αποφάσεις. Οι πρώτες αποφάσεις καθορίζουν τόσο τα αποτελέσματα των ενεργειών ως προϊόν ανταπόδοσης, καθώς και ως πληροφορίες για την εξέλιξη της κατάστασης. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να σχετίζονται ή όχι με την εξέλιξη των μετέπειτα αποφάσεων. Στις δυναμικές καταστάσεις ξεπροβάλλει μια νέα πολυπλοκότητα η οποία δεν εμφανίζεται στις στατικές αποφάσεις. Το περιβάλλον, οι πληροφορίες και τα ερεθίσματα συνεχώς μεταβάλλονται και αυτό μπορεί να οφείλεται σε προηγούμενες αποφάσεις και ενέργειες ή ακόμα και να είναι εντελώς ανεξάρτητα. Το είδος αυτό των αποφάσεων φέρει τις ονομασίες Real-life, Real-time, Real-world.

Ένα παράδειγμα της Δυναμικής Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων [2] αποτελεί το σενάριο του διοικητού πυροσβεστικού σώματος στον οποίο έχει ανατεθεί το έργο της κατάσβεσης της πυρκαϊάς σε δάσος. Ο διοικητής έχει στην δικαιοδοσία του αρκετές ομάδες καταπολέμησης της πυρκαϊάς. Ο διοικητής πρέπει να αποφασίσει που πρέπει να αποσταλεί η κάθε ομάδα, τι προμήθειες η κάθε ομάδα πρέπει να έχει, ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσει η κάθε ομάδα στον τόπο της πυρκαϊάς, καθώς και την ταχύτητα με την οποία εξαπλώνεται η πυρκαϊά. Αυτές οι αποφάσεις επηρεάζουν συνεχώς η μία την άλλη. Αν για παράδειγμα αποσταλεί μια ομάδα σε μία τοποθεσία και αποφασισθεί στην συνέχεια να μετακινηθεί σε μια άλλη, τότε θα υπάρξει απώλεια χρόνου κατά την διαδικασία μετακίνησης. Ο χρόνος ο οποίος χάνεται μπορεί να δημιουργήσει την ανάγκη για την λήψη μιας άλλης απόφασης καθώς η πυρκαϊά συνεχίζει να απλώνεται ή μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση λόγω της μεταβολής της διεύθυνσης του ανέμου. Φαίνεται λοιπόν καθαρά ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται με αυτές τις συνθήκες είναι εντελώς διαφορετικές από αυτές που λαμβάνονται σε ελεγχόμενες, σταθερές και μη επηρεαζόμενες από τον χρόνο καταστάσεις. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι κατά την λήψη αποφάσεων σε



δυναμικές καταστάσεις, υπάρχει η απαίτηση να αντιμετωπίζουμε αποτελεσματικά τις διάφορες μεταβολές περισσότερο παρά τα ίδια τα γεγονότα. Η λήψη αποφάσεων τότε γίνεται ένα είδος ελέγχου των μεταβολών παρά επιλογή εναλλακτικών λύσεων.

### 2.3.2 Νατουραλιστικός τρόπος λήψης αποφάσεων

Οι Judith Orasanu και Terry Conolly [14] τροποποίησαν τη παραπάνω θεώρηση. Εργαζόμενοι στο δυναμικό πεδίο αποφάσεων ανέπτυξαν μια νέα θεωρία περί Νατουραλιστικού Μοντέλου Λήψης Αποφάσεων. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο, οι αποφάσεις δεν είναι πάντα προϊόν ξεκάθαρων καταστάσεων, αλλά πραγματικών και σύνθετων επιλογών και για τον λόγο αυτό ονομάστηκαν Νατουραλιστικές, καθώς αντιμετωπίζονται σε φυσικό ή πραγματικό περιβάλλον και επηρεάζονται από συγκεκριμένους παράγοντες.

Οι παράγοντες αυτοί, οι οποίοι χαρακτηρίζουν τον τρόπο λήψης αποφάσεων σε Νατουραλιστικό περιβάλλον είναι οι ακόλουθοι:

- **Προβλήματα ασθενούς δόμησης.** Τα πραγματικά προβλήματα λήψης αποφάσεων σπανίως παρουσιάζονται ξεκάθαρα και σε ολοκληρωμένη μορφή ώστε να ταιριάζουν απόλυτα σε κάποιο μοντέλο λήψης αποφάσεων.
- **Περιβάλλον δυναμικό και με αβεβαιότητα.** Ο νατουραλιστικός τρόπος λήψης αποφάσεων τυπικά εμφανίζεται σε περιοχές στις οποίες οι πληροφορίες είναι όχι μόνο ελλιπείς αλλά και ατελείς. Επιπλέον ο στόχος είναι πιθανόν δυναμικός καθώς και το περιβάλλον πιθανόν να μεταβάλλεται ραγδαία μέσα στον χρόνο στον οποίο απαιτείται να ληφθεί η απόφαση.
- **Μεταλασσόμενα, ασθενώς καθοριζόμενα, ή ανταγωνιστικά.** Αν εξαιρέσουμε τους χώρους των εργαστηρίων, θα διαπιστώσουμε ότι είναι σπάνιο φαινόμενο για μία απόφαση να υπάρχει ένας μόνο και πλήρως κατανοητός στόχος ή αξία. Στην πραγματικότητα κάποιος που λαμβάνει αποφάσεις κατευθύνεται από πολλαπλές επιδιώξεις, χωρίς να είναι όλες ξεκάθαρες ενώ και κάποιες από αυτές να αντικρούουν τις άλλες.
- **Κυκλώματα ενέργειας – ανάδρασης.** Τα παραδοσιακά μοντέλα λήψης αποφάσεων εμπλέκονται μονάχα με ένα γεγονός, σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή στην οποία επιλέγεται μία αποφασιστική δράση. Εν αντιθέσει με τα νατουραλιστικά όπου είναι πολύ πιο κοινό να αντιμετωπίσουμε σειρές γεγονότων, και να διαπραγματευόμαστε με μεγάλο αριθμό ενεργειών προκειμένου να αντιμετωπίσουμε το παρουσιαζόμενο πρόβλημα.
- **Χρονική Πίεση.** Ένα εμφανές στοιχείο των Νατουραλιστικών Μοντέλων Λήψης Αποφάσεων είναι ότι οι αποφάσεις λαμβάνονται κάτω από σημαντική πίεση χρόνου. Κατά πρώτον αυτοί που λαμβάνουν αποφάσεις

κάτω από αυτές τις συνθήκες αντιμετωπίζουν υψηλές τιμές ατομικού στρες, με μεγάλη πιθανότητα εξάντλησης και απώλειας ετοιμότητας και κατά δεύτερον, εξ αιτίας της έλλειψης χρόνου εμπέδωσης του προβλήματος, επιλέγουν λιγότερο σύνθετες και αιτιολογικές στρατηγικές.

- **Μεγάλα στοιχεία – Υψηλό κόστος.** Παραδείγματα καταστάσεων Νατουραλιστικού Μοντέλου Λήψης Αποφάσεων αναφέρονται σε λήψη αποφάσεων των οποίων τα αποτελέσματα μπορεί να συνεπάγονται απώλεια ζωής, περιουσίας, καριέρας ή την επιβίωση της εταιρίας.

Αξίζει εδώ να αναφέρουμε ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, στο οποίο οι παραπάνω χαρακτηριστικές καταστάσεις είναι πάρα πολύ γνωστές, αυτό του πιλότου ενός αεροσκάφους.

Στην πραγματικότητα είναι τα στοιχεία που συνθέτουν το περιβάλλον μέσα στο οποίο εργάζεται και καλείται να λαμβάνει αποφάσεις και σε αρκετές περιπτώσεις με περιορισμένο αριθμό πληροφοριών. Ένας πιλότος πρέπει να λάβει αποφάσεις κάτω από σημαντική πίεση χρόνου και με πολύ υψηλό τίμημα για παράδειγμα την απώλεια της ζωής του, που συνιστά τον σημαντικότερο παράγοντα στην δημιουργία και την επιδείνωση του ατομικού στρες. Επιπλέον είναι ακόμα φανερό ότι ο πιλότος εμπλέκεται άμεσα με τα αποτελέσματα και τις συνέπειες των αποφάσεων του, για να γίνει δε αυτό ακόμα πιο κατανοητό, αξίζει να αναφέρουμε το παρακάτω ρητό που λέει ότι: «Doctors bury their mistakes, but pilots are buried with them», (Οι γιατροί θάβουν τα λάθη τους, οι πιλότοι όμως θάβονται μαζί με αυτά).

## 2.4 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων

### 2.4.1 Γενικά

Τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (ΣΥΑ) αποτελούν την εφαρμογή των τεχνικών της επιστήμης της πληροφορικής, ώστε να γίνει δυνατή η διευκόλυνση και υποστήριξη του εκάστοτε αποφασίζοντα, ο οποίος καλείται να αντιμετωπίσει και να καταλήξει σε αποφάσεις που αφορούν σε κακώς δομημένα και πολύπλοκα προβλήματα, για τα οποία δεν υπάρχει σαφής αλγοριθμικός τρόπος επίλυσης.

### 2.4.2 Βασικές έννοιες – ορισμοί

Ο όρος «Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων» πρωτοεμφανίζεται της αρχές της δεκαετίας του '70 και η ερμηνεία του δεν είναι πάντα η ίδια. Έτσι ο Little (1970) [1], όρισε ότι ένα ΣΥΑ είναι ένα σύνολο διαδικασιών για την επεξεργασία δεδομένων και κρίσεων με στόχο την υποβοήθηση των μάνατζερ στη διαδικασία λήψης μιας απόφασης. Ένα τέτοιο σύστημα θεωρείται επιτυχημένο αν είναι απλό, εύχρηστο, προσαρμόσιμο, πλήρες, εύκολο στη χρήση και με καλό σύστημα επικοινωνίας με τον χρήστη.

Οι Keen and Scott-Morton (1978) [1], έδωσαν για τα ΣΥΑ τον ακόλουθο κλασσικό ορισμό: «Τα ΣΥΑ συνδυάζουν τις διανοητικές ικανότητες των ανθρώπων με αυτές των ηλεκτρονικών υπολογιστών, με αντικειμενικό στόχο τη βελτίωση της ποιότητας των λαμβανομένων αποφάσεων. Είναι, βασιζόμενα στους Η/Υ, συστήματα υποστήριξης των αποφασιζόντων σε θέματα που αφορούν στην αντιμετώπιση ημιδομημένων προβλημάτων.»

Την ίδια θεώρηση με τους Keen and Scott-Morton (1978) έχουν και οι Alter (1977) και Huber (1980), [1] ενώ οι Sprague and Carlson (1982) αναφέρουν ότι τα ΣΥΑ είναι ένα σύνολο διαδικασιών, οι οποίες με τη βοήθεια του Η/Υ έχουν σαν στόχο τη διεύρυνση του γνωστικού πεδίου του αποφασίζοντα, στον τομέα του προβλήματος που αντιμετωπίζει. Ο ορισμός αυτός διευρύνθηκε από τους Andriole (1989), Sage (1986 και 1991) και Adelman (1992), με την τελική του διατύπωση να έχει την ακόλουθη μορφή:

«Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων είναι αλληλεπιδραστικά συστήματα (προγράμματα – software) που χρησιμοποιούν αναλυτικές μεθόδους για την ανάλυση αποφάσεων, αλγόριθμους βελτιστοποίησης, κ.ά., για την ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων, με στόχο την υποστήριξη των αποφασιζόντων στη διαμόρφωση εναλλακτικών λύσεων, στην ανάλυση των μεταξύ των αντιδράσεων, στην αναπαράσταση και τελικά στην επιλογή της καταλληλότερης από αυτές λύση για εφαρμογή.»

Τέλος, οι Klein and Methlie (1995) [14], ορίζουν ένα ΣΥΑ ως ένα υπολογιστικό πληροφοριακό σύστημα το οποίο παρέχει πληροφορίες σχετικά με το χώρο ενός πολύπλοκου και κακώς δομημένου προβλήματος, χρησιμοποιώντας πρόσβαση σε βάσεις δεδομένων και αναλυτικά μοντέλα αποφάσεων, προκειμένου να υποστηριχθεί ο αποφασίζων στην αποτελεσματική λήψη αποφάσεων.

Οι παραπάνω απόψεις και ορισμοί για τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, αντανακλούν τις ιδέες του Simon (1960), οι οποίες αφορούν στον τρόπο προσέγγισης των προβλημάτων απόφασης. Στο βιβλίο του αυτό ο Simon υποστήριζε ότι στην πραγματικότητα δεν έχει νόημα ο προβληματισμός για την επιλογή μιας λύσης, μεταξύ μιας ικανοποιητικής και της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος, δεδομένου ότι η δεύτερη (βέλτιστη) δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί και επομένως πρέπει απλά να προσανατολιζόμαστε στην αναζήτηση μιας εφικτής λύσης.

### 2.4.3 Δομή και χαρακτηριστικά

Οι Sprague and Carlson (1982) [1], αναφέρουν ότι τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός αποτελεσματικού ΣΥΑ, είναι οι δυνατότητες που έχει για να:

- Υποστηρίζει τις διαδικασίες λήψης ημιδομημένων και αδόμητων αποφάσεων
- Υποστηρίζουν μία ή και περισσότερες από τις φάσεις λήψης αποφάσεων (νοητική, σχεδίασης, επιλογής, ολοκλήρωσης)

- Συνδυάζουν τη συνεργασία μοντέλων, βάσεων δεδομένων και τεχνικών παρουσίασης των αποτελεσμάτων.
- Δίνουν έμφαση στην ευκολία χρήσης, την ευελιξία και την προσαρμοστικότητά της.
- Αλληλεπιδρούν με άλλα πληροφοριακά συστήματα που ήδη λειτουργούν

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αποτελούν τα κύρια σημεία διαφοροποίησης των ΣΥΑ από τα άλλα συστήματα, όπως τα πληροφοριακά συστήματα (M.I.S.). Λόγω των ποικίλων απόψεων που επικρατούν ως με το τι ακριβώς είναι ένα ΣΥΑ, κρίνουμε σκόπιμο να αναφέρουμε και τις δυνατότητες ενός αντιπροσωπευτικού Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων:

- Η χρήση του βοηθά στην αύξηση της αποτελεσματικότητας και όχι της αποδοτικότητας.
- Κατασκευάζεται για να παρέχει υποστήριξη σε όλα τα επίπεδα διοίκησης, βοηθώντας και όχι υποκαθιστώντας τον αποφασίζοντα, ο οποίος διατηρεί τον πλήρη έλεγχο του συστήματος σε όλη τη διαδικασία λήψης της απόφασης.
- Η υποστήριξη παρέχεται είτε σε ομάδες ατόμων (Group Decision Support Systems) είτε σε μεμονωμένα άτομα.
- Παρέχει υποστήριξη στον ή τους αποφασίζοντες σε όλη τη διαδικασία λήψης μιας απόφασης, διαθέτοντας ευελιξία και προσαρμοστικότητα.
- Χρησιμοποιείται κυρίως για να παρέχει υποστήριξη σε προβλήματα ημιδομημένων ή αδόμητων αποφάσεων.
- Είναι φιλικό στη χρήση, ευέλικτο και εύκολα προσαρμόσιμο σε τυχόν μεταβολές.
- Η χρήση του οδηγεί στη βελτίωση των αποφάσεων και στη δημιουργία νέων απαιτήσεων του αποφασίζοντα, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή βελτίωση του συστήματος.

Σύμφωνα με της Sprague and Carlson (1982) [1], ένα Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων, σε λειτουργία ευρισκόμενο, αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- Τον αποφασίζοντα – χρήστη

- Το υποσύστημα επικοινωνίας χρήστη – ΣΥΑ
- Το υποσύστημα διαχείρισης βάσης δεδομένων
- Το υποσύστημα διαχείρισης βάσης μοντέλων

Οι Turban et al.(1996) [1], [14], θεωρούν ότι υπάρχει άλλο ένα υποσύστημα, αυτό της διαχείρισης γνώσης. Το υποσύστημα αυτό μπορεί να υποστηρίζει τα άλλα υποσυστήματα ή να δρα ανεξάρτητα παρέχοντας γνώση για την επίλυση επιμέρους προβλημάτων.

Ας δούμε όμως πιο αναλυτικά τα επιμέρους υποσυστήματα που αποτελούν τη δομή ενός ΣΥΑ:

- **Το υποσύστημα επικοινωνίας χρήστη – ΣΥΑ:** Βασικό συστατικό για την επιτυχημένη εφαρμογή ενός ΣΥΑ είναι η ευχρηστία του, η οποία επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο επικοινωνίας του αποφασίζοντα με κάθε τμήμα του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων. Λόγω της βαρύνουσας σημασίας που έχει η επικοινωνία του χρήστη με το σύστημα, το ιδιαίτερο αυτό υποσύστημα (Dialog Generation and Management System – DGMS) είναι αποκλειστικά και μόνο υπεύθυνο για την αποδοτική και λειτουργική επικοινωνία του αποφασίζοντα με το ΣΥΑ.
- **Υποσύστημα διαχείρισης βάσης δεδομένων:** Είναι ένα πακέτο λογισμικού (Data Base Management System – DBMS) το οποίο ασχολείται με τη συστηματική αποθήκευση (storage), αναζήτηση (retrieval) και συντήρηση (maintenance) δεδομένων. Ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη για πληροφόρηση, χωρίς ο χρήστης να απασχολείται με λεπτομέρειες χειρισμού δεδομένων. Ο κύριος ρόλος του είναι να ενημερώνει τις βάσεις δεδομένων του συστήματος, προσθέτοντας, μεταβάλλοντας ή διαγράφοντας εγγραφές, να συσχετίζει δεδομένα που προέρχονται από διαφορετικές πηγές, να ανακτά δεδομένα από βάσεις δεδομένων, καθώς και να κάνει σύνθετους χειρισμούς αυτών.
- **Υποσύστημα διαχείρισης βάσης μοντέλων:** Είναι το υποσύστημα που φέρει την αποκλειστική ευθύνη διαχείρισης της βάσης με τη συλλογή όλων των μεθόδων, τεχνικών και μοντέλων ανάλυσης του προβλήματος, μέσω των οποίων παρέχεται η υποστήριξη στον αποφασίζοντα. Το υποσύστημα έχει σαν στόχο να απαλλάξει τον αποφασίζοντα από τις εργασίες αποθήκευσης και επεξεργασίας της βάσης μοντέλων. Σύμφωνα με τον Blanning (1993) [14], τρία είναι τα σημαντικότερα θέματα στη διαχείριση μοντέλων:

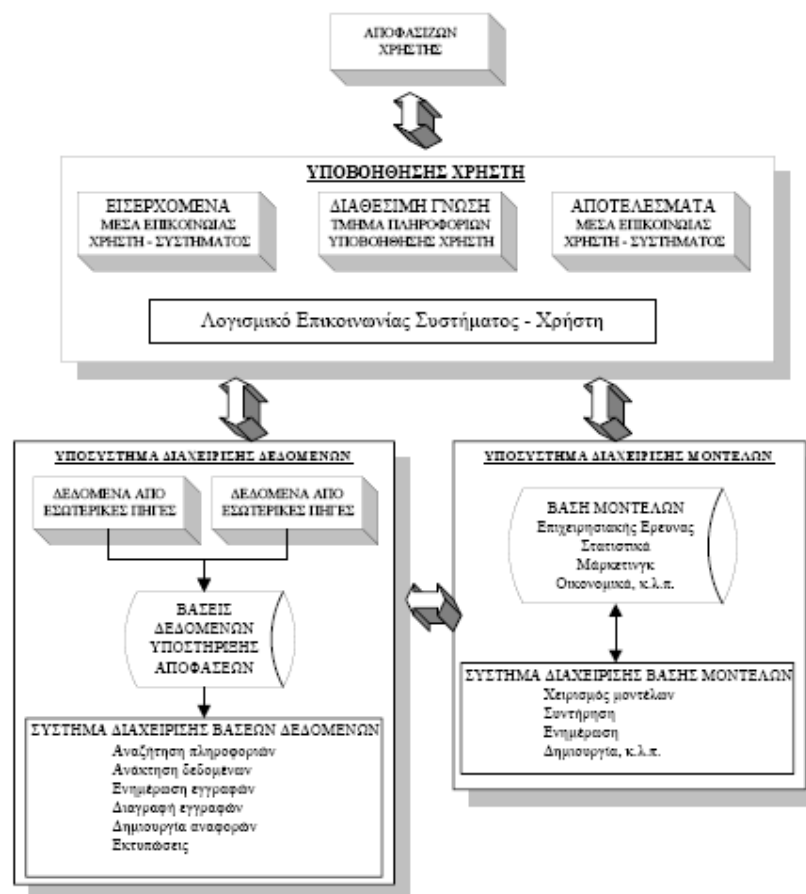
- (1) Η δομή της βάσης μοντέλων, η οποία μπορεί να είναι κατ'αντιστοιχία με αυτήν της βάσης δεδομένων, είτε σχεσιακή, είτε δικτύου. Μια πιο πρόσφατη προσπάθεια είναι η δομημένη

μοντελοποίηση (structured modeling) η οποία παρέχει ένα πλαίσιο όχι μόνο για τη δόμηση των μοντέλων, αλλά και για την τεκμηρίωση της βάσης μοντέλων

(2) Η επεξεργασία της βάσης μοντέλων, στην οποία χρησιμοποιούνται και τεχνικές που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη.

(3) Η οργάνωση του περιβάλλοντος του υποσυστήματος διαχείρισης μοντέλων, στο οποίο γίνεται της χρήση γνώσεων από τον χώρο της Τεχνητής Νοημοσύνης.

Στο Σχήμα 2.5 που ακολουθεί αναπαριστάται γραφικά η δομή της Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων.



Σχήμα 2.5: Η δομή της Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

#### 2.4.4 Διαδικασία ανάπτυξης της Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων

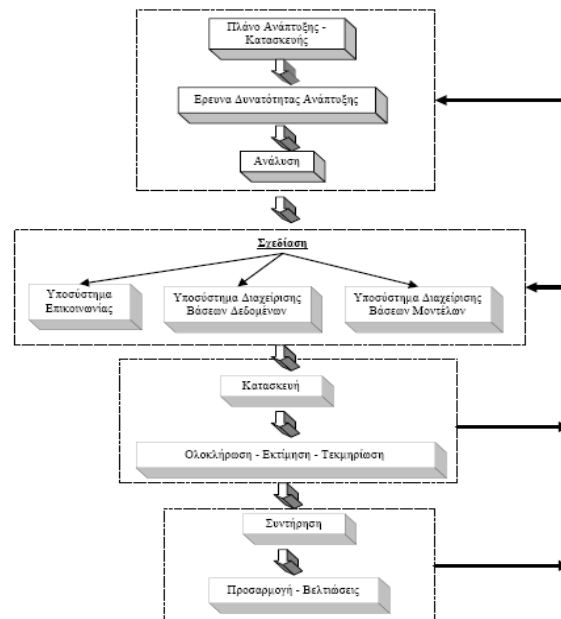
Η ανάλυση και ο σχεδιασμός είναι πολύ δύσκολες εργασίες κατά την ανάπτυξη μεγάλων και πολύπλοκων ΣΥΑ, ειδικά εάν σχεδιάζονται για την υποστήριξη πολλών και διαφορετικών λειτουργιών.

Το πρώτο στάδιο στην ανάπτυξη της μεγάλης κλίμακας Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων, ονομάζεται στάδιο Ανάλυσης Υποστήριξης Αποφάσεων (Decision Support Analysis) και περιλαμβάνει σχεδιασμό, εκτίμηση των αναγκών του χρήστη, τη διάγνωση του προβλήματος, τον προσανατολισμό διαχείρισης και τον καθορισμό των προτεραιοτήτων. Στην προσέγγιση Ανάλυσης Υποστήριξης Αποφάσεων περιλαμβάνονται συγχωνευμένα πέντε στοιχεία: δομημένες συνεντεύξεις, ανάλυση της απόφασης, ανάλυση δεδομένων, τεχνική ανάλυση και προσανατολισμός διαχείρισης. Ας δούμε τώρα τα επόμενα στάδια ανάπτυξης:

- **Πλάνο ανάπτυξης και κατασκευής:** Αρχικά καθορίζονται οι αντικειμενικοί στόχοι ανάπτυξης του συστήματος καθώς και οι αποφάσεις «κλειδιά». Ο αποφασίζοντας προκειμένου να καταλήξει σε κάποια απόφαση χρειάζεται την υποστήριξη του συστήματος, το οποίο θα τον εφοδιάσει με τις απαραίτητες πληροφορίες.
- **Έρευνα δυνατότητας ανάπτυξης:** Κατά το στάδιο αυτό γίνεται διεξοδική έρευνα αφενός μεν για τον προσδιορισμό των απαιτήσεων – αναγκών του χρήστη και αφετέρου για τη συγκέντρωση πληροφοριών για τα διαθέσιμα μέσα, την προηγούμενη εμπειρία και την κρατούσα κατάσταση στο σχετικό ερευνητικό τομέα.
- **Ανάλυση:** Αναλύεται και καθορίζεται η καλύτερη διαδικασία προσέγγισης του θέματος καθώς και τα απαιτούμενα μέσα για την ολοκλήρωση του συστήματος. Σαν μέσα θεωρούμε την ομάδα εργασίας, τα τεχνικά μέσα, τους οικονομικούς πόρους και τα οργανωτικά θέματα.
- **Σχεδίαση:** Περνάμε πλέον στο στάδιο σχεδιασμού και καθορισμού των λεπτομερειών που αφορούν στη δομή, στα χαρακτηριστικά και στα διάφορα συστατικά του συστήματος. Η εργασία προχωρά στη σχεδίαση των τριών υποσυστημάτων, επικοινωνίας, διαχείρισης βάσεων δεδομένων και διαχείρισης βάσεων δεδομένων.
- **Κατασκευή:** Η κατασκευή του συστήματος αποτελεί την προγραμματιστική υλοποίηση της προηγούμενης εργασίας. Ακολουθούν οι έλεγχοι ορθής λειτουργίας του συστήματος και τυχόν συμπληρωματικές βελτιώσεις.

➤ **Ολοκλήρωση:** Το σύστημα πλέον εγκαθίσταται στο χώρο λειτουργίας του. Πριν τεθεί σε πλήρη λειτουργία και εκμετάλλευση, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν οι έλεγχοι εγκυρότητας (validation) και επαλήθευσης (verification). Κατά τον έλεγχο εγκυρότητας ελέγχεται το αν για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων έχουν επιλεγεί και αναπτυχθεί οι κατάλληλοι αλγόριθμοι, ενώ κατά την επαλήθευση επιβεβαιώνεται ότι οι διάφορες λειτουργίες και διαδικασίες του συστήματος έχουν υλοποιηθεί με τον επιθυμητό τρόπο και σύμφωνα με τη σχεδιάσή του.

Στο Σχήμα 2.6 που ακολουθεί αναπαριστώνται γραφικά τα στάδια ανάπτυξης ενός Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων.



Σχήμα 2.6: Στάδια ανάπτυξης της Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων  
(Πηγή: Μαρσατσίνης, [1])

#### 2.4.5 Ευφυή Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων

Τα Ευφυή Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων αποτελούν το γνωστότερο πεδίο εφαρμογής της Τεχνητής Νοημοσύνης. Είναι προγράμματα που συνδυάζουν τη γνώση των ειδικών και προσπαθούν να επιλύσουν ειδικά προβλήματα, μιμούμενα τη διαδικασία της λογικής των [1], [14]. Η ανάπτυξή τους ξεκινά από τα τέλη της δεκαετίας του '60, ενώ από της αρχές του '80 οι τεχνολογίες ανάπτυξης ευφύων ΣΥΑ, οι οποίες μέχρι τότε περιορίζονταν σε πανεπιστημιακούς χώρους, αρχίζουν να εφαρμόζονται και για την ανάπτυξη εμπορικών εφαρμογών. Διάφορες ονομασίες, που αφορούν σε αυτά τα συστήματα, απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία: Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων Βασιζόμενα στη Γνώση (Knowledge – Based Decision Support Systems) [Klein and Methlie, 1990 – Guida et al., 1992 – Liberatore and Stylianos, 1993], Ευφυή Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (Intelligent Decision Support Systems)



[McGovern et al., 1991 – Gottinger and Weimann, 1992], Βασιζόμενα στη Γνώση Συστήματα Υποστήριξης του Μάνατζμεντ (Knowledge – Based Management Support Systems) [Doukidis et al., 1989] και Έμπειρα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (Expert Decision Support Systems) [Van Weelderen and Sol, 1993] [1], [14].

Και στην περίπτωση των Ε.Σ.Υ.Α., υπάρχει πληθώρα ορισμών που εξαρτώνται από την γωνία προσέγγισής τους. Γενικά οι ορισμοί των Ε.Σ.Υ.Α. μπορούν να χωρισθούν σε αυτούς που στηρίζονται στο τι κάνει ένα Ε.Σ.Υ.Α. και σε αυτούς που ασχολούνται με το πώς το κάνει.

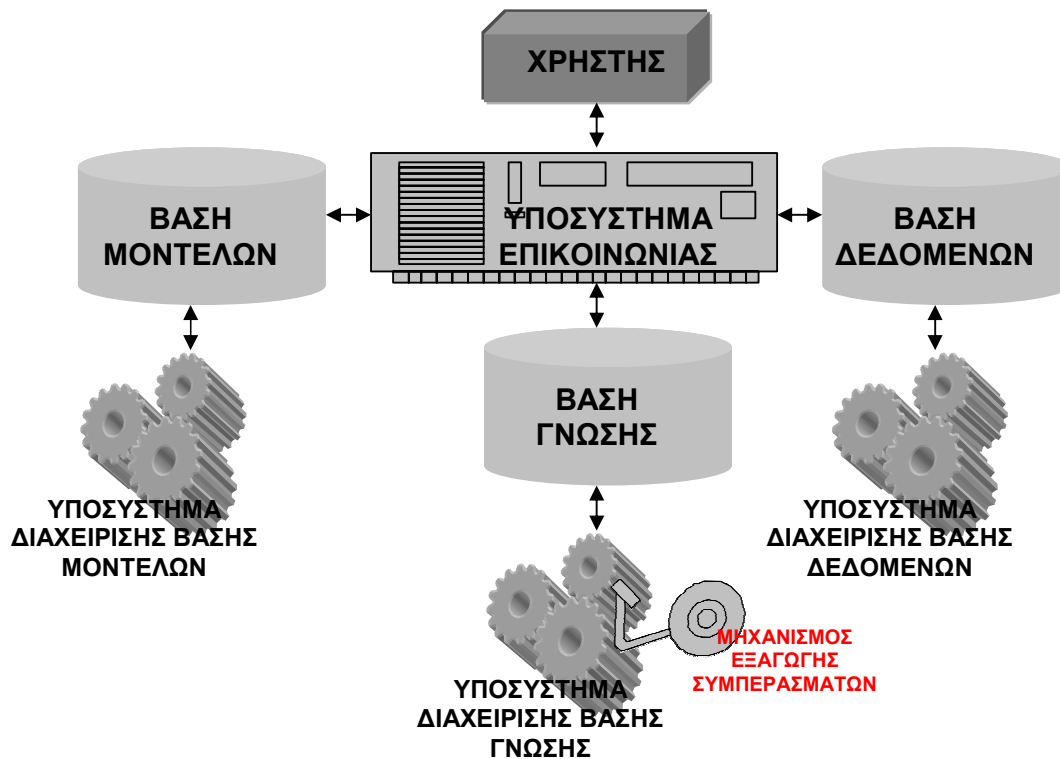
Ο Feigenbaum (1982) [14], θεωρεί ότι ένα Ε.Σ.Υ.Α. είναι ένα έξυπνο πρόγραμμα το οποίο για να λύσει κάποιο πρόβλημα, το οποίο είναι αρκετά δύσκολο και η επίλυσή του απαιτεί σημαντική εμπειρία, χρησιμοποιεί ειδική γνώση και διαδικασίες εξαγωγής συμπερασμάτων. Η γνώση που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία σε αυτό το επίπεδο, μαζί με τις διαδικασίες εξαγωγής συμπερασμάτων, μπορεί να θεωρηθούν σαν ένα μοντέλο εμπειρίας των καλύτερων ειδικών του χώρου.

Ο Hayes-Roth (1984) [14] αναφέρει ότι τα βασιζόμενα στη γνώση έμπειρα συστήματα, ή που για συντομία τα αποκαλεί τα συστήματα γνώσης, χρησιμοποιούν ανθρώπινη γνώση για να επιλύουν προβλήματα, τα οποία κανονικά για να επιλυθούν χρειάζονται ανθρώπινη νοημοσύνη.

Οι Weiss and Kulikowski (1984) [14] όρισαν ως Έμπειρο σύστημα εκείνο που αφενός μεν χειρίζεται πραγματικά σύνθετα προβλήματα που απαιτούν την παρουσία ειδικού, αφετέρου επιλύει τέτοια προβλήματα χρησιμοποιώντας ένα υπολογιστικό μοντέλο λογικής ειδικού, καταλήγοντας στα ίδια συμπεράσματα που ένας ειδικός θα έφτανε αν αντιμετώπιζε ένα ανάλογο πρόβλημα.

Η δομή ενός Ευφυούς Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων έχει δύο όψεις. Η μια είναι αυτή που βλέπει ο κατασκευαστής κατά τη φάση ανάπτυξης και εισαγωγής της γνώσης σε αυτό, ενώ η άλλη είναι αυτή που αντιλαμβάνεται ο χρήστης του συστήματος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

Στο Σχήμα 2.7 απεικονίζεται σχηματικά η δομή ενός ευφυούς συστήματος υποστήριξης αποφάσεων.



Σχήμα 2.7: Δομή Ευφυούς Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων (Πηγή: Καλέργης, 2003, [7])

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, τα κύρια συστατικά της δομής ενός Έμπειρου συστήματος δεν διαφέρουν κατά πολύ από αυτά ενός συμβατικού. Μια τυπική διαδικασία χρήσης ενός Έμπειρου συστήματος είναι αρχικά να διατυπωθεί ένα αίτημα από τον χρήστη για την παροχή μιας συμβουλής. Στη συνέχεια το σύστημα χρησιμοποιεί τον μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων για να χειρισθεί τους κανόνες της βάσης γνώσης. Μια πολύ σημαντική λειτουργία του μηχανισμού εξαγωγής συμπερασμάτων είναι η δυνατότητα διαχείρισης της αβεβαιότητας, δηλαδή πρέπει να είναι σε θέση να χειρίζεται δεδομένα και γνώση που είναι μη-πλήρη, ανακριβή ή αβέβαια. Η αβεβαιότητα αυτή είναι το αποτέλεσμα της μη-αξιοπιστίας ή της μη-πληρότητας των δεδομένων και πληροφοριών, καθώς και των διαφωνιών και των συγκρουόμενων απόψεων ανάμεσα στις πηγές των δεδομένων και ιδιαίτερα ανάμεσα σε ειδικούς.

Ιδιαίτερα ο κόσμος των επιχειρήσεων και της οικονομίας κυριαρχείται από κανόνες που είναι «συνήθως αληθινοί» ή «συχνά αληθινοί», παρά από κανόνες που είναι πάντα και απόλυτα αληθινοί. Ενώ ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων δουλεύει άψογα σε πεδία όπου υπάρχει απόλυτη βεβαιότητα, υπάρχουν προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά την κατασκευή του μηχανισμού εξαγωγής συμπερασμάτων για συλλογιστική υπό αβεβαιότητα ή για συλλογιστική η οποία θα οδηγήσει σε επιλογή εναλλακτικών που ενέχουν κίνδυνο. Το θεμελιώδες πρόβλημα αφορά στο συνδυασμό των πιθανοτικών κανόνων και

γεγονότων με σκοπό την εξαγωγή πιθανοτικών συμπερασμάτων. Οι πιθανότητες πρέπει να συνδυαστούν κατάλληλα με σκοπό να δημιουργηθεί ένα μέτρο της πιθανότητας το οποίο και θα συνδεθεί με τα εξαγόμενα συμπεράσματα. Για τον συνδυασμό των πιθανοτήτων χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι όπως για παράδειγμα το θεώρημα του Bayes και η ασαφής λογική.

Συνοψίζοντας θα μπορούσε να ειπωθεί ότι ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων είναι ένα σύνολο από ρουτίνες προγραμμάτων που καταλήγει σε συμπεράσματα χρησιμοποιώντας μια ή περισσότερες στρατηγικές συλλογιστικής (ορθή ή ανάστροφη συλλογιστική) και τεχνικές αναζήτησης (κατά βάθος έρευνα, κατά πλάτος έρευνα, έρευνα με επιλογή του βέλτιστου κόμβου, ικανοποίηση περιορισμών, ανάλυση μέσων-άκρων, αλγόριθμος MINIMAX, τεχνική διακλάδωσης-οριοθέτησης, αλγόριθμος εγγύτερου γείτονα) σε μια βάση γνώσης σχεδιασμένη κατάλληλα για το συγκεκριμένο πεδίο του προβλήματος.

Αν το σύστημα έχει κάποιες απορίες σχετικά με κάποια γεγονότα (facts), τότε απευθύνεται στον χρήστη για περισσότερες πληροφορίες. Τα γεγονότα αυτά καθώς και όσα προκύπτουν στα διάφορα ενδιάμεσα στάδια λειτουργίας του έμπειρου συστήματος αποθηκεύονται στη μνήμη εργασίας. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το σύστημα να καταλήξει σε ένα τελικό συμπέρασμα.

Ολοκληρώνοντας στο Κεφάλαιο αυτό, μέσα από τη βιβλιογραφική έρευνα, την περιεκτική αναφορά της στη Θεωρία Αποφάσεων, εστιάσαμε περισσότερο στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και διάφορες θεωρίες που την υποστηρίζουν, κλείνοντας με μια αναφορά στα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, βασικό εργαλείο στα χέρια των αποφασιζόντων για την υποβοήθησή τους στη λήψη αποφάσεων, ιδιαίτερα σε συνθήκες αβεβαιότητας και κινδύνου. Το κεφάλαιο που ακολουθεί αποτελεί την θεωρητική προσέγγιση και εισαγωγή στις έννοιες της αβεβαιότητας και του ρίσκου, καθώς και του τρόπου που αυτές επηρεάζουν τη διαδικασία λήψης μιας απόφασης.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup> : Η αβεβαιότητα και το ρίσκο στη Λήψη Αποφάσεων

So far as the theorems of mathematics are about reality,  
they are not certain; so far as they are certain,  
they are not about reality...

*Albert Einstein*

### 3.1 Εισαγωγή

Ολοκληρώνοντας στο προηγούμενο κεφάλαιο την βιβλιογραφική αναδρομή και θεωρητική προσέγγιση της Θεωρίας Αποφάσεων, θα περάσουμε στο κεφάλαιο αυτό σε μια αναλυτική προσέγγιση των εννοιών της αβεβαιότητας και του ρίσκου, καθώς και στον τρόπο που αυτές παρεμβαίνουν στη διαδικασία λήψης μιας απόφασης.

Η ανάλυση μιας απόφασης αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν η λήψη της απόφασης γίνεται υπό καθεστώς αβεβαιότητας και ρίσκου. Η αβεβαιότητα στερεί γενικά από τον αποφασίζοντα τη δυνατότητα να καθορίσει, να προβλέψει ή να ελέγξει τις παραμέτρους του προβλήματος το οποίο καλείται να αντιμετωπίσει. Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχει η ανάγκη να λαμβάνονται αποφάσεις από τους αποφασίζοντες, έχοντας ατελή πληροφορία, είτε επειδή αυτή δεν είναι διαθέσιμη ή επειδή απλά δεν χρειάζεται. Για παράδειγμα σε επείγοντα ιατρικά περιστατικά πρέπει να ληφθούν αποφάσεις χωρίς να γίνουν όλες οι απαραίτητες εξετάσεις που θα γίνονταν αν δεν υπήρχε η πίεση του χρόνου. Καθώς στα προβλήματα του πραγματικού κόσμου τέτοιες καταστάσεις είναι συνήθεις, οι μη – ακριβείς τεχνικές λήψης αποφάσεων έχουν μεγάλη πρακτική αξία και έχουν ενσωματωθεί σε συστήματα και συσκευές που χρησιμοποιούνται καθημερινά. Ουσιαστικά καθημερινό φαινόμενο είναι η αβεβαιότητα, δηλαδή η έλλειψη ακριβούς πληροφορίας για την λήψη μιας απόφασης. Οι κυριότερες πηγές αβεβαιότητας που παρουσιάζονται κατά την επίλυση προβλημάτων είναι [10], [25]:

- Ανακριβή δεδομένα
- Ελλιπή δεδομένα
- Υποκειμενικότητα ή και ελλείψεις στην περιγραφή γνώσης
- Κάθε είδους περιορισμοί που κάνουν το όλο πλαίσιο λήψης αποφάσεων ατελές: π.χ. οικονομικοί περιορισμοί, στρατηγικές, πολιτικές γραμμές που καθιστούν ασύμφορη την πραγματοποίηση του πλήρους προγράμματος επίλυσης προβλημάτων.

Ως αποτέλεσμα της αβεβαιότητας, ο κίνδυνος, με τη μορφή των δυσμενών επιπτώσεων των υφιστάμενων εναλλακτικών λύσεων σε μια προβληματική απόφασης, δημιουργεί επίσης στον εκάστοτε αποφασίζοντα δυσκολίες στη λήψη της απόφασης. Στο σύγχρονο και συνεχώς εξελισσόμενο επιχειρηματικό περιβάλλον, η ευθύνη της αξιολόγησης δυνατοτήτων και λήψης αποφάσεων που θα οδηγήσουν σε επιτυχή ολοκλήρωση των σκοπών των αποφασιζόντων είναι πολύ μεγάλη. Θεωρητικά, τέτοιες αποφάσεις πρέπει να βασίζονται σε τέλειες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά και τις συνέπειές τους. Θα πρέπει, δηλαδή όλες οι αναγκαίες πληροφορίες να είναι στη διάθεση αυτών που παίρνουν της αποφάσεις και τα αποτελέσματα αυτών των αποφάσεων να μπορεί, αφενός να προβλεφθούν με απόλυτη βεβαιότητα, αφετέρου να μην ενέχουν υψηλό ρίσκο. Στην πραγματικότητα, οι αποφάσεις που αφορούν στο μέλλον, παίρνονται σε ένα περιβάλλον αβεβαιότητας και έλλειψης των αναγκαίων πληροφοριών που κρύβει κινδύνους, αλλά και ευκαιρίες. Η επιτυχία του σκοπού ενός οργανισμού ή μιας επιχείρησης, μπορεί να επιτευχθεί με την επιδίωξη αφενός της εκμετάλλευσης των ευκαιριών, αλλά και της αποφυγής των αρνητικών συνεπειών του ρίσκου που συνδέεται με την αβεβαιότητα.

Ο αντικειμενικός σκοπός της διαχείρισης ρίσκου είναι αφενός η αναγνώριση και ο προσδιορισμός των κινδύνων και η ανάπτυξη στρατηγικών για τη μείωση ή και την αποφυγή αυτών των κινδύνων και, αφετέρου, η μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης των ευκαιριών.

Η λεπτομερής αναγνώριση των συντελεστών (ευκαιριών ή στοιχείων ρίσκου) που πιθανόν να επηρεάσουν την τελική έκβαση ενός εγχειρήματος, η ποσοτικοποίηση των πιθανών επιδράσεων για κάθε συντελεστή του εγχειρήματος (τελικό αποτέλεσμα, χρόνος, κόστος ή ποιότητα), η βασική περιγραφή των στοιχείων αβεβαιότητας που περιβάλουν το εγχείρημα και ο καθορισμός τρόπων αποφυγής κινδύνων και μείωσης ρίσκου στον κύκλο ζωής του εγχειρήματος, αποτελούν βασικούς παράγοντες επιτυχίας για κάθε αποφασίζοντα ο οποίος καλείται να πάρει μια απόφαση σε περιβάλλον μερικής ή πλήρους αβεβαιότητας και κινδύνου.

## **3.2 Λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα**

### **3.2.1 Γενικά**

Παραδοσιακά για την ανάλυση αποφάσεων υπό αβεβαιότητα χρησιμοποιείται η θεωρία των πιθανοτήτων. Η συνεισφορά της τελευταίας στο θέμα αυτό είναι οπωσδήποτε αναμφισβήτητη. Εντούτοις, η μελέτη σύγχρονων πολύπλοκων συστημάτων όπως π.χ. μιας χρηματαγοράς, αποδεικνύει ότι η θεωρία των πιθανοτήτων συχνά αδυνατεί να μοντελοποιήσει όλες τις μορφές αβεβαιότητας που πηγάζουν από τη λειτουργία αυτών, και ιδιαίτερα την ασάφεια. Πριν όμως προχωρήσουμε να δούμε πιο αναλυτικά τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις αντιμετώπισης της αβεβαιότητας, καθώς και πώς αυτή επηρεάζει τη λήψη αποφάσεων, κρίνεται χρήσιμο να ορίσουμε συγκεκριμένες βασικές έννοιες.

### 3.2.2 Βασικές έννοιες – ορισμοί

Η αβεβαιότητα είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται με διαφορετικούς τρόπους σε διάφορους τομείς, όπως η φιλοσοφία, η στατιστική, η οικονομία, τα χρηματοοικονομικά, η ψυχολογία, η εφαρμοσμένη μηχανική, κ.ά. Στην επιστημονική βιβλιογραφία δεν φαίνεται να υπάρχει καθολικός και σαφής ορισμός για την έννοια της αβεβαιότητας. Κάθε θεωρία αντιλαμβάνεται και επιχειρεί να μοντελοποιήσει συγκεκριμένες μορφές αβεβαιότητας, οι οποίες πηγάζουν από διάφορες καταστάσεις. Έτσι, η θεωρία πιθανοτήτων του Kolmogoroff ενδιαφέρεται κυρίως για την έννοια της αβεβαιότητας όπως αυτή πηγάζει από την τυχαιότητα (randomness) των φαινομένων, ενώ η θεωρία πληροφοριών του Shanon, για την έννοια της αβεβαιότητας που απορρέει από την αμφιβολία (ambiguity) στην αποκωδικοποίηση των λαμβανομένων μηνυμάτων [10].

Κοινή υπόθεση πάντως και των δύο παραπάνω «θεωριών της αβεβαιότητας», είναι ότι η τελευταία επιβάλει στη διαδικασία λήψης μιας απόφασης, έναν περιορισμό: είτε στο να καθορίσουμε την έκβαση ενός φαινομένου (θεωρία των πιθανοτήτων), είτε στο να μεταδώσουμε ένα μήνυμα με μηδενικό σφάλμα (θεωρία πληροφοριών). Επιχειρώντας λοιπόν να ορίσουμε την έννοια της αβεβαιότητας σε λειτουργικό επίπεδο, κάνοντας αναφορά και στις συνέπειές της, μπορούμε να δανειστούμε τον ακόλουθο ορισμό [25]:

*Η αβεβαιότητα σε μια κατάσταση εμποδίζει τους φορείς που εμπλέκονται σε αυτή από το να έχουν στη διάθεσή τους ποιοτικές και ποσοτικές πληροφορίες, ικανές να τους δώσουν τη δυνατότητα να περιγράψουν, να καθορίσουν ή ακόμα και να προβλέψουν ντετερμινιστικά και αριθμητικά τη συμπεριφορά ενός συστήματος ή χαρακτηριστικών που αναφέρονται σε αυτό.*

**(Zimmermann, 2000).**

Σύμφωνα με τον C.A. Holloway, (1979) [25], ο Douglas Hubbard ορίζει την αβεβαιότητα ως:

*Η έλλειψη σιγουριάς. Είναι μία κατάσταση την οποία χαρακτηρίζει η περιορισμένη γνώση και όπου είναι αδύνατον να περιγραφούν με ακρίβεια τόσο η ίδια η κρατούσα κατάσταση, όσο και ένα ή περισσότερα μελλοντικά αποτελέσματα.*

Συνοπτικά λοιπόν, η αβεβαιότητα συνεπάγεται αδυναμία ελέγχου και η αύξηση ή μείωση της αβεβαιότητας, μείωση ή αντίστοιχα αύξηση της δυνατότητας ελέγχου. Ουσιαστικά, όλες οι αποφάσεις που αφορούν στο μέλλον λαμβάνονται σε ένα περιβάλλον αβεβαιότητας και έλλειψης αναγκαίων πληροφοριών, η οποία σε πολλές περιπτώσεις είναι πλήρης.

### 3.2.3 Πληροφορία και αβεβαιότητα στη Λήψη Αποφάσεων

Όπως γίνεται φανερό και από τους ορισμούς της έννοιας της αβεβαιότητας, οι οποίοι αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, η πληροφόρηση, σε πολύπλοκες και μη δομημένες προβληματικές λήψης αποφάσεων, αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες δημιουργίας της αβεβαιότητας με ό,τι αυτή συνεπάγεται στην τελική λήψη της απόφασης.

Για να μπορούν, σήμερα, οι αποφασίζοντες να παίρνουν, μέσα σε ένα ταχέως μεταβαλλόμενο περιβάλλον αγοράς, τις καλύτερες κατά το δυνατόν αποφάσεις, πρέπει να έχουν στη διάθεσή τους την κατάλληλη χρονική στιγμή τις σωστές πληροφορίες (Gale, 1992) [1]. Οι Garvin και Bermont (1983) [1], μιλώντας για επίγνωση των συνεπειών της πληροφόρησης, υποστηρίζουν ότι κάθε πρόβλημα που αντιμετωπίζει μια επιχείρηση είναι στη πραγματικότητα πρόβλημα πληροφόρησης. Ακόμη γενικότερα, πιστεύουν ότι κάθε πρόβλημα απόφασης είναι στη πραγματικότητα πρόβλημα πληροφόρησης θεωρώντας ότι, όταν κάποιος αναφέρεται σε προβλήματα θα πρέπει να ανατρέχει στη πληροφόρηση.

Η αξία της πληροφορίας, όπως γίνεται κατανοητό, αποτελεί μια από τις πλέον χρήσιμες έννοιες στην ανάλυση και λήψη αποφάσεων [4]. Για να γίνει περισσότερο κατανοητή, ας δούμε ένα παράδειγμα:

*«Μια επιχείρηση παραγγέλλει κάθε εβδομάδα ένα προϊόν προς αποθήκευση και πώληση. Κάθε μονάδα προϊόντος, έχει κόστος αγοράς 100 ευρώ, τιμή πώλησης 300 ευρώ, ενώ έχει διάρκεια ζωής μιας εβδομάδας, δηλαδή στο τέλος της εβδομάδας το προϊόν δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί. Η επιχείρηση αντιμετωπίζει το πρόβλημα λήψης απόφασης υπό αβεβαιότητα για το ύψος της εβδομαδιαίας παραγγελίας, καθώς η πιθανοτική ζήτηση για το προϊόν κυμαίνεται μεταξύ 0 και 3 μονάδων εβδομαδιαίως, με αντίστοιχες πιθανότητες που φαίνονται στον Πίνακα 1 που ακολουθεί:*

ΖΗΤΗΣΗ (ΜΟΝΑΔΕΣ)	ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΖΗΤΗΣΗΣ (%)
0	10%
1	30%
2	40%
3	20%

Πίνακας 1: Πιθανότητες ζήτησης προϊόντος

Με δεδομένο ότι το κριτήριο λήψης απόφασης της επιχείρησης για το ύψος της παραγγελίας, είναι αυτό της μέγιστης απόδοσης – θα το δούμε αναλυτικότερα παρακάτω – υπολογίζουμε τις αποδόσεις ( Πίνακας 2) με βάση τον τύπο:

$$\text{Απόδοση} = \text{Τιμή Πώλησης} \times \text{Ύψος Πωλήσεων} - \text{Τιμή Αγοράς} \times \text{Ύψος Παραγγελίας}$$

ΑΠΟΦΑΣΗ (Υψος Παραγγελίας)	ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΗ ΖΗΤΗΣΗ			
	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	-150	150	150	150
2	-300	0	300	300
3	-450	-150	150	450

Πίνακας 2: Πίνακας Αποδόσεων

Από τα παραπάνω και υπολογίζοντας τις αναμενόμενες αποδόσεις για κάθε απόφαση, βλέπουμε ότι:

$$ER_0 = 0$$

$$ER_1 = 120$$

$$ER_2 = 150$$

$$ER_3 = 60$$

συνεπώς, ή άριστη για την επιχείρηση απόφαση, σύμφωνα με το κριτήριο της μεγιστοποίησης της αναμενόμενης απόδοσης, είναι η παραγγελία 2 μονάδων προϊόντος.

Όπως γίνεται φανερό και από το παραπάνω παράδειγμα, η αξία, για την επιχείρηση, της πληροφορίας του ύψους της ζήτησης, πριν από τη λήψη της απόφασης για παραγγελία, έχει πολύ μεγάλη σημασία και εκμηδενίζει την αβεβαιότητα στη διαδικασία λήψης της απόφασης. Το ερώτημα το οποίο τίθεται στην περίπτωση αυτή, είναι «Ποιο είναι το μεγαλύτερο τίμημα, το οποίο είναι διατεθειμένη να πληρώσει η επιχείρηση, για να αποκτήσει την συγκεκριμένη πληροφορία;». Το τίμημα αυτό αποκαλείται «Αναμενόμενη Αξία της Πλήρους Πληροφόρησης» (Expected Value of Perfect Information, EVPI), ισούται με τη διαφορά που θα προκύψει, μεταξύ της αναμενόμενης απόδοσης του σεναρίου πλήρους πληροφόρησης και της αναμενόμενης απόδοσης με την ισχύουσα κατάσταση και είναι το ανώτερο ποσό που θα ήταν διατεθειμένη να πληρώσει η επιχείρηση, προκειμένου να αποκτήσει εκ των προτέρων πλήρη πληροφόρηση για την μελλοντική ζήτηση του προϊόντος που εμπορεύεται [4].

Η έννοια της πλήρους πληροφόρησης είναι μια ιδιαίτερα σημαντική έννοια στη λήψη αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Πολλές φορές οι αποφασίζοντες καλούνται να πάρουν αποφάσεις, γνωρίζοντας ότι η πληροφόρηση που έχουν είναι ελλιπής, ενώ είναι επίσης πολλές οι φορές που δαπανώνται τεράστια ποσά (π.χ. για έρευνες αγοράς, περαιτέρω μελέτες και αναλύσεις) προκειμένου αποκτηθούν περισσότερες πληροφορίες. Η έννοια της EVPI, δίνει στους αποφασίζοντες μια ένδειξη του οφέλους που ενδέχεται να αποκτηθεί από τη λήψη μιας απόφασης και κατά συνέπεια θέτει και ένα όριο στο ποσό που αξίζει να δαπανηθεί για την απόκτηση περισσότερης πληροφόρησης.



### 3.3 Λήψη αποφάσεων υπό κίνδυνο

#### 3.3.1 Γενικά

Ένα στοιχείο του κινδύνου εντοπίζεται σχεδόν σε κάθε πτυχή της καθημερινής μας ζωής. Το γεγονός αυτό συμβαίνει καθώς ο κίνδυνος μπορεί να πάρει πολλές μορφές και είναι γενικά αποδεκτό ότι οι περισσότερες σημαντικές αποφάσεις περιλαμβάνουν διάφορες μορφές κινδύνου. Ίσως ο απλούστερος τρόπος να περιγράψουμε τη φύση του κινδύνου, είναι να θεωρήσουμε τον κίνδυνο ως ένα μέτρο της αβεβαιότητας των συνεπειών μιας απόφασης. Επομένως, οποιαδήποτε ακριβής συζήτηση για την αποδοχή μιας μορφής κινδύνου, πρέπει να περιγράψει τον κίνδυνο σε ποσοτικούς όρους. Εάν ο κίνδυνος περιγράφεται μόνο με ποιοτικούς όρους, οποιαδήποτε συμπεράσματα για την αποδοχή του ή μη, στα πλαίσια λήψης μιας απόφασης, θα είναι επιπόλαια ή, για να το θέσουμε και με έναν άλλο τρόπο, θα αποσκοπούν απλά σε μια αβέβαιη κερδοσκοπία.

#### 3.3.2 Βασικές έννοιες – ορισμοί

Υπάρχουν πολύ περισσότεροι αλλά και λιγότερο ακριβείς ορισμοί της έννοιας του ρίσκου [29], [30]. Οι ορισμοί αυτοί εξαρτώνται από τις συγκεκριμένες εφαρμογές και τα κατά περίπτωση ερευνητικά πλαίσια. Η έννοια του ρίσκου μπορεί να αξιολογηθεί και να μετρηθεί ποιοτικά ή ποσοτικά. Ποιοτικά, το ρίσκο θεωρείται ως η ποσοστιαία αναλογία των αναμενόμενων απωλειών, οι οποίες μπορεί να προκληθούν από κάποιο γεγονός και της πιθανότητας να συμβεί το γεγονός αυτό. Όσο πιο σκληρή η αναμενόμενη απώλεια από ένα γεγονός και πιθανότερο το γεγονός, τόσο μεγαλύτερος είναι ο γενικός κίνδυνος.

Ας δούμε όμως και μερικούς ορισμούς της έννοιας του κινδύνου σε διάφορα επιστημονικά πεδία.

Αρχικά, με βάση το λεξικό, η έννοια του κινδύνου (risk) ορίζεται ως «*το αρνητικό ενδεχόμενο, η πιθανότητα να συμβεί ένα γεγονός που θα μπορούσε να έχει έναν ανεπιθύμητο ή αρνητικό αντίκτυπο, οτιδήποτε (πράξη, κατάσταση, συμπεριφορά, κλπ) μπορεί να προκαλέσει καταστροφή, να επιφέρει απώλειες και φθορές ή μπορεί να φέρει σε επικίνδυνη θέση κάποιον ή κάτι. Ο κίνδυνος χαρακτηρίζεται από την πιθανότητα να συμβεί το γεγονός και το αποτέλεσμα (τις επιπτώσεις), εάν και εφόσον συμβεί*».

Στην εφαρμοσμένη μηχανική (engineering) [114], ο ποσοτικός ορισμός της έννοιας του ρίσκου αποδίδεται από τη σχέση:

$$\text{Risk} = (\text{probability of an accident}) \times (\text{losses per accident})$$

Στα χρηματοοικονομικά, η έννοια του κινδύνου [114] αναφέρεται συχνά στην απροσδόκητη μεταβλητότητα ή αστάθεια των επιστροφών (κερδών) και περιλαμβάνει έτσι και την έννοια του χειρότερο – από το – αναμενόμενο, καθώς και του καλύτερο – από το – αναμενόμενο.

Στη στατιστική, το ρίσκο χαρτογραφείται συχνά ως η πιθανότητα κάποιου γεγονότος το οποίο θεωρείται ανεπιθύμητο [114]. Συνήθως, η πιθανότητα του γεγονότος αυτού και κάποιας αξιολόγησης της αναμενόμενης, από αυτό το γεγονός, ζημιάς, πρέπει να συνδυαστεί σε ένα πιστευτό σενάριο (μια πιθανή έκβαση), το οποίο συνδυάζει το σύνολο του κινδύνου και μετατρέπει τις πιθανότητες σε μια αναμενόμενη αξία για τη συγκεκριμένη έκβαση.

Στην εργασία του “Risk, Uncertainty and Profit” ο Frank Knight (1921) [114], καθορίζει τη διάκριση μεταξύ των εννοιών του ρίσκου και της αβεβαιότητας:

“ ... Uncertainty must be taken in a sense radically distinct from the familiar notion of risk, from which it has never been properly separated. The term “risk”, as loosely used in every day speech and in economic discussion, really covers two things which, functionally at least, in their casual relations to the phenomena of economic organization, are categorically different... The essential fact is that “risk” means in some cases a quantity susceptible of measurement, while at other times it is something distinctly not of this character; and there are far-reaching and crucial differences in the bearing of the phenomenon depending on which of the two is really present and operating... It will appear that a measurable uncertainty, or “risk” proper, as we shall use the term, is so far different from an unmeasurable one that it is not in effect an uncertainty at all. We....accordingly restrict the term “uncertainty” to cases of the non-quantitative type.”

*«Η έννοια της αβεβαιότητας πρέπει να καθορισθεί από μία άποψη ριζικά ευδιάκριτη σε σχέση με τη γνωστή έννοια του ρίσκου, από την οποία ποτέ δεν έχει διαχωριστεί κατάλληλα. Ο όρος «ρίσκο», όπως αόριστα χρησιμοποιείται συχνά σε κάθε καθημερινή ή ακόμα και οικονομική συζήτηση, καλύπτει ουσιαστικά δύο πράγματα που, λειτουργικά τουλάχιστον, στις περιστασιακές σχέσεις τους με διάφορα οικονομικά φαινόμενα, είναι κατηγορηματικά διαφορετικά... Το ουσιώδες γεγονός είναι ότι ο όρος «ρίσκο» σημαίνει σε ορισμένες περιπτώσεις μια ποσότητα ευαίσθητη σε μετρήσεις, ενώ σε άλλες, είναι κάτι φανερά διαφορετικό και υπάρχουν εκτεταμένες και κρίσιμες διαφορές στη λειτουργία του όρου, ανάλογα με το ποια, εκ των δύο, έννοια, είναι πραγματικά παρούσα και λειτουργεί... Θα φανεί ότι μια μετρήσιμη αβεβαιότητα, ή ένα κατάλληλο ρίσκο, έτσι όπως χρησιμοποιούμε τον όρο, είναι πολύ διαφορετικά, από μια όμοια μη μετρήσιμη που δεν ανταποκρίνεται καθόλου στον όρο αβεβαιότητα. ... Επιπρόσθετα, περιορίζουμε τον όρο «αβεβαιότητα» στις περιπτώσεις του μη – ποσοτικού τύπου.»*

Σύμφωνα με τους W.T. Singleton and J. Hovden, (1987) [29] ο Douglas Hubbard, δίνει στην έννοια του ρίσκου τον ακόλουθο ορισμό:

*«Μία κατάσταση αβεβαιότητας όπου ορισμένες πιθανές εναλλακτικές εκβάσεις έχουν μία μη επιθυμητή επίδραση ή μία σημαντική απώλεια.»*

### 3.3.3 Η φύση του κινδύνου

Όπως προαναφέραμε ο κίνδυνος ελλοχεύει παντού. Ακόμα και στην πιο απλή μορφή επένδυσης (καταθέσεις) υπάρχει ένα μικρό μεν ποσοστό κινδύνου, όχι όμως αμελητέο. Όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, ο κίνδυνος ορίζεται πολλαπλώς λόγω της μεγάλης ποικιλίας τεχνικών και μεθόδων, για την ανάλυσή του. Έτσι και η φύση του κινδύνου παρουσιάζεται με διάφορες μορφές – κατηγορίες [8].

Ως κατηγορίες κινδύνων, ορίζονται από τους αναλυτές οι ακόλουθες:

- ➔ Οι τεχνικοί
- ➔ Οι οικονομικοί
- ➔ Οι κοινωνικοπολιτικοί

Μια λεπτομερέστερη διάκριση, προσδιορίζει δώδεκα κατηγορίες κινδύνων, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- ➔ Ασθένειες
- ➔ Οικονομικοί
- ➔ Περιβαλλοντικοί
- ➔ Χρηματοοικονομικοί
- ➔ Ανθρώπινοι
- ➔ Φυσικοί
- ➔ Υγιεινής της εργασίας
- ➔ Ασφάλειας
- ➔ Ποιότητας των προϊόντων
- ➔ Ζημιών ιδιοκτησίας
- ➔ Δημόσιας ευθύνης και
- ➔ Τεχνολογίας

Οι σημαντικότεροι κίνδυνοι που αντιμετωπίζουν οι σύγχρονες επιχειρήσεις, διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες [9]:

- Επιχειρηματικοί κίνδυνοι (business risks): Σχετίζονται με τον κλάδο παραγωγής και την ευρύτερη αγορά στα οποία ανήκει και δραστηριοποιείται η επιχείρηση.
- Εμπορικοί κίνδυνοι (market risks): Αναφέρονται στις απώλειες που πιθανόν να προκύψουν, μετά από λανθασμένες αποφάσεις – κινήσεις στην αγορά. Σημαντικός παράγοντας δημιουργίας εμπορικών κινδύνων είναι το δυσμενές οικονομικό περιβάλλον στο οποίο μπορεί να βρίσκεται η επιχείρηση.
- Πιστωτικοί κίνδυνοι (credit risks): Αφορούν την πιθανότητα αδυναμίας της επιχείρησης να εκπληρώσει τις οικονομικές της υποχρεώσεις.
- Κίνδυνοι ρευστότητας (liquidity risks): Παρουσιάζονται λόγω απότομης και μη αναμενόμενης αυξομειώσης των τιμών των Α' υλών και ορισμένων αγαθών ή υπηρεσιών, η οποία διαταράσσει την ομαλή λειτουργία της αγοράς.
- Λειτουργικοί κίνδυνοι (operational risks): Αναφέρονται σε επιχειρήσεις του δευτερογενούς τομέα της οικονομίας και σχετίζονται με βλάβες στον πάγιο εξοπλισμό λόγω πλημμελούς συντήρησης κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας.
- Νομικοί κίνδυνοι (legal risks): Εμφανίζονται σε περιπτώσεις μη τήρησης συμβολαίων και συμβάσεων. Αφορούν σε καταστάσεις που είναι αντίθετες με το νομικό πλαίσιο της χώρας στην οποία δραστηριοποιείται η επιχείρηση.

Η ανάλυση του κινδύνου είναι μια διοικητική διαδικασία, η οποία διευκολύνει την αξιολόγησή του. Αποτελεί μια συστηματική αξιολόγηση μεταβαλλόμενων αποφάσεων οι οποίες υπόκεινται στον κίνδυνο και στην αβεβαιότητα. Η διαδικασία ανάλυσης κινδύνου (risk analysis) περιλαμβάνει τη διερεύνηση των πιθανοτήτων για δυσμενείς επιπτώσεις αποφάσεων, τον καθορισμό των ορίων αβεβαιότητας και την αξιολόγηση του αντίκτυπου (των επιπτώσεων) των γεγονότων. Αποτελεί μια ενδιάμεση διαδικασία της Διαχείρισης Κινδύνου. Στη συνέχεια θα τις δούμε πιο αναλυτικά.

### 3.3.4 Διαχείριση κινδύνου (risk management)

Η Διαχείριση Κινδύνου [8], [9] αποτελεί μια διαδικασία, η οποία όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 3.1, είναι ένα σύνολο συνεχών και επαναλαμβανόμενων λειτουργιών και δραστηριοτήτων, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προβλήματος για το οποίο πρέπει να ληφθεί μια απόφαση.

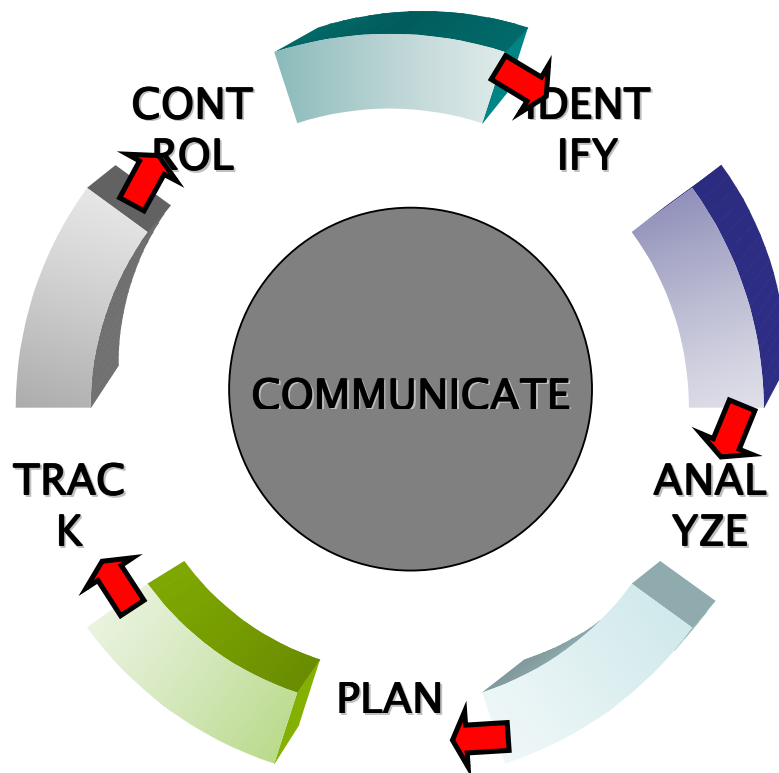
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αβεβαιότητα και ρίσκο είναι δύο έννοιες λειτουργικά συνδεδεμένες στη διαδικασία λήψης μιας απόφασης. Η αβεβαιότητα μπορεί να κρύβει θετικά αλλά και αρνητικά στοιχεία, όπου η πιθανότητα των πρώτων αποτελεί τις ευκαιρίες ενώ η αντίστοιχη πιθανότητα των δεύτερων αποτελεί το ρίσκο.

Ως Διαχείριση Ρίσκου ορίζεται [29], η συστηματική διαδικασία αναγνώρισης, ανάλυσης και αντιμετώπισης του πιθανού κινδύνου και αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της πιθανότητας των θετικών εκβάσεων μιας απόφασης και στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας των αρνητικών συνεπειών αυτής.

Η Διαχείριση Ρίσκου περιλαμβάνει τις ακόλουθες λειτουργίες:

➔ Αναγνώριση κινδύνου: Έρευνα για τον εντοπισμό στοιχείων ρίσκου πριν αυτά γίνουν πρόβλημα – προετοιμασία πλάνου διαχείρισής τους

➔ Ανάλυση κινδύνου: Μετατροπή στοιχείων ρίσκου σε χρήσιμες πληροφορίες στη διαδικασία λήψης απόφασης. Διακρίνεται σε *ποιοτική ανάλυση* και *ποσοτική ανάλυση*.



Σχήμα 3.1: Λειτουργίες Διαχείρισης Ρίσκου (Πηγή: W.T. Singleton and J. Hovden, 1987, [29])

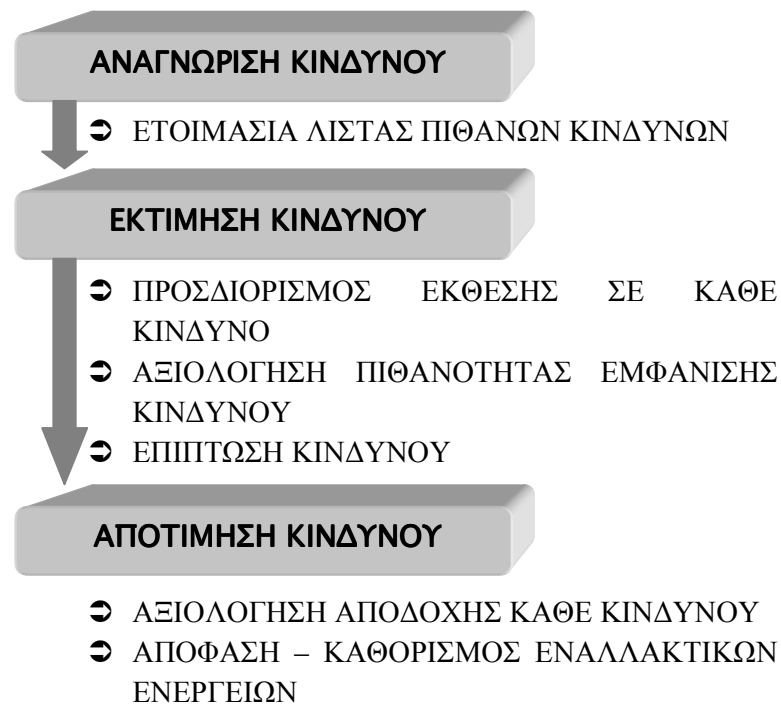
⇒ Σχεδιασμός: Μετατροπή πληροφοριών ρίσκου σε εργαλεία λήψης αποφάσεων και δράσης, ανάθεση πόρων και ευθυνών – σχέδιο εξουδετέρωσης ρίσκου.

⇒ Έλεγχος: Έλεγχος συμβατότητας πλάνου διαχείρισης κινδύνων σε σχέση με τους διαθέσιμους πόρους και τις ισχύουσες διαδικασίες – διόρθωση αποκλίσεων σχεδίου εξουδετέρωσης ρίσκου

⇒ Παρακολούθηση: Παρακολούθηση αποτελεσματικότητας εφαρμογής σχεδίου διαχείρισης και εξουδετέρωσης ρίσκου.

### 3.3.5. Ανάλυση κινδύνου (risk analysis)

Όπως είδαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, η ανάλυση κινδύνου αποτελεί μια ενδιάμεση λειτουργία της ευρύτερης διαδικασίας Διαχείρισης Κινδύνου. Αποτελείται από τρία ενδιάμεσα βήματα, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 3.2 και μπορεί να διαχωριστεί σε ποιοτική και ποσοτική [8], [9], [29].



Σχήμα 3.2: Στάδια ανάλυσης κινδύνου (Πηγή: W.T. Singleton and J. Hovden, 1987, [29])

### 3.3.5.1 Ποιοτική ανάλυση κινδύνου

Η ποιοτική ανάλυση κινδύνου είναι η διαδικασία αξιολόγησης των συνεπειών και της πιθανότητας που συνδέεται με τα στοιχεία αναγνωρισμένου ρίσκου. Με την ποιοτική ανάλυση, καθορίζεται η σημασία και διευκολύνεται η ιεράρχηση των στοιχείων ρίσκου, σύμφωνα με τις δυνητικές επιδράσεις που μπορεί αυτά να έχουν στους στόχους του αποφασίζοντα. Επίσης παρέχει στον αποφασίζοντα τη δυνατότητα καθορισμού της σημασίας των αρνητικών συνεπειών του ρίσκου, καθώς και τη δυνατότητα οδήγησης του σχεδίου εξουδετέρωσής των [8], [9].

Τα αποτελέσματα της ποιοτικής ανάλυσης κινδύνου αφορούν:

➤ Στη γενική κατάταξη των κινδύνων για τη λήψη της απόφασης: Μια τέτοια κατάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συγκριτική ανάλυση των συνολικών κινδύνων της απόφασης, σε σχέση με άλλες αποφάσεις, με τη σύγκριση των σχετικών δεικτών. Δίνει μια γενική περιγραφή του συνολικού κινδύνου και ορίζει τους πόρους που πρέπει να επενδυθούν για τη συνολική διαχείριση του ρίσκου. Αποτελεί δηλαδή τη βάση για την ανάλυση κόστους – ωφέλειας στην κατανομή πόρων, στην τελική απόφαση.

➤ Στη δημιουργία ενός καταλόγου ιεράρχησης των κινδύνων: Η ιεράρχηση αυτή γίνεται κατά σειρά σοβαρότητας των συνεπειών και παρέχει πληροφορίες σε υψηλότερο επίπεδο ανάλυσης κατά δραστηριότητα. Εύλογα συμπεραίνεται ότι κίνδυνοι που κατατάσσονται σε υψηλό ή ακόμα και μέτριο επίπεδο, αποτελούν αντικείμενο πρόσθετης ανάλυσης και προσοχής.

### 3.3.5.2 Ποσοτική ανάλυση κινδύνου

Η ποσοτική ανάλυση κινδύνου αποσκοπεί στην ποσοτικοποίηση της πιθανότητας του κάθε κινδύνου να συμβεί, καθώς και στην ανάλυση των συνεπειών του, στις επιμέρους υφιστάμενες εναλλακτικές λύσεις που εξετάζει ο αποφασίζων. Οι τεχνικές και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ποσοτική ανάλυση κινδύνου ποικίλουν ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος λήψης απόφασης.

Δύο βασικές διαστάσεις της πολυπλοκότητας των προβλημάτων λήψης αποφάσεων, είναι αυτή του αριθμού των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων και αυτή της φύσης της αβεβαιότητας [8], [9].

Ο απλούστερος τύπος προβλήματος λήψης απόφασης περιλαμβάνει την αξιολόγηση μιας μεμονωμένης επενδυτικής απόφασης και η κυρίαρχη προσέγγιση στην περίπτωση αυτή είναι ο υπολογισμός της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Κ.Π.Α.). Για τον υπολογισμό αυτόν, απαιτείται η εκτίμηση του κόστους κεφαλαίου, που προσαρμόζεται με ανάλογα με τον κίνδυνο της απόφασης – επένδυσης, ως αντιστάθμισμα της αβεβαιότητας των αποδόσεων. Ο υπολογισμός της Κ.Π.Α. συχνά συνοδεύεται από ανάλυση ευαισθησίας, η οποία περιλαμβάνει

ερωτήσεις της μορφής «τι θα συμβεί αν...», ώστε να διερευνηθούν οι επιπτώσεις αβέβαιων παραμέτρων στο μέγεθος της Κ.Π.Α.

Στην περίπτωση που στο πρόβλημα λήψης απόφασης εξετάζεται ένας μικρός αριθμός διακριτών αβεβαιοτήτων (όπως π.χ. νίκη – ήττα σε μια νομική υπόθεση ή επιτυχία – αποτυχία στην αναζήτηση αποθεμάτων πετρελαίου) και διακριτών εναλλακτικών λύσεων (όπως π.χ. επιλογή παροχέα τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών ή ανάθεση κατασκευαστικού συμβολαίου σε κάποια από τις υποψήφιες κατασκευαστικές εταιρείες), η μελέτη του προβλήματος μπορεί να γίνει με τη χρήση της Μεθόδου Σεναρίων ή με εφαρμογές της Θεωρίας Αποφάσεων (Δένδρα Αποφάσεων, Θεωρία Πιθανοτήτων, Θεωρία Χρησιμότητας).

Τέλος, σε περιπτώσεις προβλημάτων απόφασης όπου οι αβεβαιότητα περιγράφεται με συνεχείς κατανομές πιθανότητας (όπως π.χ. το μερίδιο αγοράς), χρησιμοποιούνται μέθοδοι προσομοίωσης (μέθοδος Monte Carlo) για να εξαχθεί η κατανομή πιθανότητας της αξίας του έργου.

### 3.3.6 Ο ρόλος της προσομοίωσης στη λήψη αποφάσεων υπό κίνδυνο

Η χρήση της προσομοίωσης δεν περιορίζεται μόνο σε προβλήματα υπό συνθήκες βεβαιότητας. Αντίθετα, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για ανάλυση προβληματικών λήψης απόφασης υπό κίνδυνο [4].

Η βασική ιδέα της προσομοίωσης είναι να κατασκευαστεί ένα πειραματικό μοντέλο, το οποίο θα μιμείται το πραγματικό σύστημα στις λειτουργίες εκείνες που ενδιαφέρουν τον αποφασίζοντα. Στο μοντέλο αυτό στη συνέχεια, μπορούν να εφαρμοστούν πειραματικές πολιτικές, προκειμένου αξιολογηθούν με βάση συγκεκριμένα κριτήρια και να επιλεγεί τελικά η πλέον κατάλληλη.

Για να καταστεί εφικτή η προσομοίωση συστημάτων υπό κίνδυνο, ως αποτέλεσμα της υπάρχουσας αβεβαιότητας, απαιτείται η δημιουργία τεχνητών παρατηρήσεων με τη χρήση τυχαίων αριθμών. Η δημιουργία τεχνητών προβλέψεων – παρατηρήσεων μέσα από τη χρήση τυχαίων αριθμών, αποτελεί ένα από τα βασικότερα στοιχεία που δικαιολογούν την ευρύτατη χρησιμοποίηση της προσομοίωσης.

Ένα άλλο βασικό στοιχείο που βοηθά προς αυτή την κατεύθυνση είναι η ικανότητα της «προσαύξησης του χρόνου» με το «εσωτερικό ρολόι» της προσομοίωσης, το οποίο παρακολουθεί και συντονίζει όλα τα γεγονότα που συμβαίνουν στην προσομοίωση, προσαυξάνοντας τον χρόνο πολύ γρήγορα.

Με τη χρήση της προσομοίωσης σε προβληματικές λήψης αποφάσεων υπό κίνδυνο, οι αποφασίζοντες έχουν τη δυνατότητα να λάβουν υπόψη τους όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία λήψης της απόφασης, να αξιολογήσουν κάθε εναλλακτική στρατηγική με πολλαπλά κριτήρια και να καταλήξουν στην πλέον κατάλληλη επιλογή.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της προσομοίωσης, σε αντιδιαστολή με τις αναλυτικές μεθόδους λήψης αποφάσεων (π.χ. γραμμικός προγραμματισμός) είναι τα ακόλουθα:



➤ Απαιτεί λιγότερες απλουστεύσεις της πραγματικότητας. Με τη χρήση της προσομοίωσης μπορούμε να περιγράψουμε διεξοδικά τη λειτουργία ενός περίπλοκου συστήματος μέσα από μια σειρά εντολών στον Η/Υ, χωρίς να χρειαστεί να καταφύγουμε στον μεγάλο αριθμό απλουστεύσεων που απαιτούν τα αναλυτικά μοντέλα.

➤ Η προσομοίωση αξιολογεί και δεν υποδεικνύει μια λύση. Αντίθετα με τις αναλυτικές μεθόδους, όπου η δημιουργία ενός μοντέλου οδηγεί στον εντοπισμό της άριστης στρατηγικής ή μιας καλής λύσης, στην προσομοίωση ο αποφασίζοντας περιγράφει μια στρατηγική που τον ενδιαφέρει και το σύστημα αξιολογεί τη στρατηγική αυτή με τα κριτήρια που ενδιαφέρουν τον χρήστη.

➤ Η προσομοίωση επιτρέπει τη χρήση πολλών κριτηρίων αξιολόγησης. Στις περισσότερες αναλυτικές μεθόδους η διαδικασία διατύπωσης του μοντέλου βασίζεται στον εντοπισμό και βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης – ενός στόχου. Όταν υπάρχουν πολλαπλά κριτήρια, τότε καταφεύγουμε σε ένα συνδυασμό των κριτηρίων αυτών, ή στην κατασκευή συναρτήσεων χρησιμότητας, ή στη σύγκριση – ιεράρχηση των κριτηρίων. Με την προσομοίωση όλα τα κριτήρια παρακολουθούνται, καταγράφονται και παρουσιάζονται στο τέλος της προσομοίωσης. Έτσι ο αποφασίζοντας δεν χρειάζεται να ιεραρχήσει στόχους ή κριτήρια, να αναλύσει προηγούμενες αποφάσεις του, κλπ, αφού έχει έτσι τη δυνατότητα να «φωτίσει» μια πιθανή στρατηγική από πολλές πλευρές, πριν προχωρήσει στη λήψη μιας απόφασης.

➤ Η προσομοίωση είναι σχετικά απλή στη χρήση της. Ο αποφασίζοντας αρκεί να εισάγει στον Η/Υ τα χαρακτηριστικά μεγέθη της στρατηγικής που επιθυμεί να αξιολογήσει και στη συνέχεια παρακολουθεί (σήμερα πλέον και με οπτικό τρόπο) την εξέλιξη του συστήματος και των βασικών χαρακτηριστικών αξιολόγησης.

Ένα από τα δυσκολότερα διαδικαστικά προβλήματα της προσομοίωσης, είναι το πρόβλημα του προσδιορισμού των αρχικών συνθηκών του συστήματος, με τρόπο τέτοιο ώστε τα στοιχεία που θα συλλεγούν να μην είναι επηρεασμένα από τις ειδικές συνθήκες. Είναι προφανές ότι διαφορετικές αρχικές συνθήκες οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα και επομένως το πρόβλημα είναι να προσδιορισθεί ο χρόνος εκείνος που απαιτείται ώστε η προσομοίωση να «ξεπεράσει» τις συνέπειες από τις τεχνητές (και συχνά όχι πραγματικές) συνθήκες της αρχής της λειτουργίας του μοντέλου. Δύο άλλα, επίσης σημαντικά πρακτικά προβλήματα είναι ο προσδιορισμός της συνολικής διάρκειας της προσομοίωσης, καθώς και της διάρκειας των διαστημάτων μεταξύ συνεχόμενων παρατηρήσεων. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα πρέπει να λάβουμε υπόψη την απαιτούμενη ακρίβεια των συμπερασμάτων (π.χ. εύρος διαστήματος εμπιστοσύνης), καθώς και το συνολικό κόστος της προσομοίωσης. Τέλος, υπάρχουν οι μέθοδοι ελάττωσης της μεταβλητότητας ή διακύμανσης (Variance Reduction Techniques) ή αλλιώς μέθοδοι Monte Carlo, οι οποίες βοηθούν στο να αποκτηθούν όσο το δυνατόν

ακριβέστερες πληροφορίες και μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα από μια προσομοίωση, ιδιαίτερα σε διαδικασίες λήψης αποφάσεων υπό κίνδυνο. Στη συνέχεια θα δούμε αναλυτικότερα της βασικότερες θεωρίες και μεθοδολογικές προσεγγίσεις που έχουν μέχρι σήμερα αναπτυχθεί, για να υποστηρίξουν της αποφασίζοντες οι οποίοι καλούνται να δράσουν σε περιβάλλον αβεβαιότητας, παίρνοντας αποφάσεις οι οποίες πέραν της αβεβαιότητας η οποία δυσχεραίνει τη διαδικασία λήψης της, ενέχουν και ρίσκο, ως της τα αποτελέσματά της.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Υποστήριξη Αποφάσεων υπό αβεβαιότητα και κίνδυνο– Θεωρητική προσέγγιση

### 4.1 Εισαγωγή

Παραδοσιακά, για την ανάλυση αποφάσεων υπό καθεστώς αβεβαιότητας χρησιμοποιείται η θεωρία των πιθανοτήτων. Η συνεισφορά της τελευταίας στο θέμα αυτό είναι οπωσδήποτε αναμφισβήτητη. Εντούτοις, η μελέτη σύγχρονων πολύπλοκων συστημάτων, όπως π.χ. μιας χρηματαγοράς, αποδεικνύει ότι η θεωρία των πιθανοτήτων αδυνατεί να μοντελοποιήσει της μορφές αβεβαιότητας που πηγάζουν από τη λειτουργία αυτών, και ιδιαίτερα την *ασάφεια*. Η τελευταία έχει το νόημα της αδυναμίας απόδοσης μιας ακριβούς περιγραφής σε μία κατάσταση ή ένα γεγονός. Η ασάφεια, όπως γίνεται αντιληπτή, είναι έμφυτο θα λέγαμε χαρακτηριστικό της ανθρώπινης επικοινωνίας. Ασαφείς εκφράσεις του τύπου «πολύ πιθανό» ή «αρκετά ικανοποιητικό» χρησιμοποιούνται συχνά για τη μετάδοση πληροφορίας και δύνανται να αποτελέσουν βάση για την ανάληψη δράσης.

Στο κεφάλαιο αυτό και αφού έχουμε ήδη αναφερθεί στη Θεωρία Χρησιμότητας, αναπτύσσονται και άλλες θεωρητικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των αποφασίζόντων σε προβληματικές αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας και κινδύνου.

### 4.2 Χρήση πιθανοτήτων – Ο Νόμος του Bayes

Η κλασσική προσέγγιση στο πρόβλημα λήψης αποφάσεων σε συνθήκες αβεβαιότητας είναι η χρήση του νόμου του Bayes [11], [13]. Κάτω από μια περισσότερο υποκειμενική αντιμετώπιση της πιθανότητας που επιτρέπει τη χρήση εκτιμήσεων αντί της συχνότητας εμφάνισης των γεγονότων, ο νόμος του Bayes επιτρέπει τον υπολογισμό πιθανοτήτων υπό συνθήκη, με χρήση άλλων πιθανοτήτων που είναι ευκολότερο να υπολογισθούν.

Η πιθανότητα υπό συνθήκη ορίζεται ως το πηλίκο της πιθανότητας να συμβούν ταυτόχρονα τα γεγονότα A και B της την πιθανότητα να συμβεί το B. Δηλαδή ισχύει η προτού Bayes σχέση:

$$P(A | B) = \frac{P(A \wedge B)}{P(B)}$$

και διαιρώντας με  $P(B)$  δεδομένου ότι  $P(A \wedge B) = P(B \wedge A)$  και μιας σειράς αντικαταστάσεων και απαλοιφών, προκύπτει ότι:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad \text{εφαρμογή Bayes}$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί την απλούστερη μορφή του νόμου του Bayes.

Με τη σχέση αυτή κάτω από μια περισσότερο υποκειμενική αντιμετώπιση της πιθανότητας που επιτρέπει τη χρήση εκτιμήσεων αντί συχνοτήτων μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα  $P(A|B)$ .

Το παράδειγμα που ακολουθεί δίνει μια εικόνα της αξίας του νόμου του Bayes:

Αν  $A$  είναι μια ασθένεια και  $B$  ένα σύμπτωμα το οποίο σχετίζεται με αυτήν, τότε για τον υπολογισμό της πιθανότητας εμφάνισης ασθένειας και συμπτωμάτων (προτού Bayes) θα έπρεπε να υπολογισθεί με κάποιο τρόπο, πόσοι άνθρωποι στον κόσμο πάσχουν από την αρρώστια  $A$  και ταυτόχρονα εμφανίζουν και το σύμπτωμα  $B$ , καθώς και πόσοι εμφανίζουν απλά το σύμπτωμα (πληροφορίες σχεδόν αδύνατο να καταστούν διαθέσιμες). Με την εφαρμογή του νόμου Bayes μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα  $P(B|A)$  εν αντιθέσει της πιθανότητας  $P(A|B)$  καθώς για παράδειγμα ένας γιατρός μπορεί να δώσει μια εκτίμηση για το πόσοι ασθενείς που έπασχαν από την ασθένεια  $A$  εμφάνισαν το σύμπτωμα  $B$ . Οι υπόλοιποι όροι μπορούν εύκολα να υπολογισθούν (στατιστικά ή από στοιχεία του συστήματος υγείας).

Στη γενικότερη περίπτωση, ξεφεύγοντας και από το παραπάνω παράδειγμα, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην πιθανότητα να ισχύει το υποθετικό συμπέρασμα  $A$  (της ασθένειας), δεδομένης της ισχύος των γεγονότων  $B_1, B_2, \dots, B_k$  (συμπτωμάτων), δηλαδή η ποσότητα  $P(A|B_1 \wedge B_2 \wedge B_3 \wedge \dots \wedge B_k)$ . Αυτή μπορεί να υπολογιστεί από τη γενίκευση του νόμου του Bayes :

$$P(A|B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_k) = \frac{P(B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_k|A) \cdot P(A)}{P(B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_k)}$$

Στην πράξη η παραπάνω έκφραση εμφανίζει και αυτή το πρόβλημα της ανάγκης για την εκ των προτέρων συλλογή όλων των απλών και υπό συνθήκη πιθανοτήτων των διαφόρων γεγονότων. Συγκεκριμένα και αναφερόμενοι πάλι στο παραπάνω παράδειγμα, για  $m$  πιθανές ασθένειες και  $n$  δυνατά συμπτώματα από τα οποία εμφανίζονται μόνο τα  $k$ , απαιτούνται  $(m \times n)^k + m + n^k$  τιμές πιθανοτήτων, αριθμός υπερβολικά μεγάλος. Παρ' όλα αυτά η σχέση αυτή χρησιμοποιείται στην περίπτωση που τα διάφορα γεγονότα  $A$  θεωρούνται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, οπότε και απαιτούνται μόνο  $(m \times n) + m + n$  τιμές πιθανοτήτων.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι η θεωρία των πιθανοτήτων επιτρέπει τη διαχείριση της αβεβαιότητας, αλλά με κάποιο κόστος:

- ☛ Είτε τα διάφορα γεγονότα θεωρούνται ανεξάρτητα με αποτέλεσμα ευκολότερους υπολογισμούς, σε βάρος της ακρίβειας των συλλογισμών που πραγματοποιούνται

- Η καταγράφονται αναλυτικά όλες οι πιθανότητες και οι μεταξύ τους συσχετίσεις, ώστε να προκύπτουν ακριβή συμπεράσματα, με υψηλό όμως προϋπολογιστικό κόστος.

#### 4.2.1 Συντελεστές βεβαιότητας

Μια εναλλακτική προσέγγιση στα προαναφερθέντα προβλήματα αποτελούν οι συντελεστές βεβαιότητας (certainty factors) [25], [37]. Οι συντελεστές βεβαιότητας (CF) εισάγονται για πρώτη φορά στο έμπειρο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων MYCIN για να προσδώσουν κάποιο βαθμό βεβαιότητας στα συμπεράσματα διαφόρων κανόνων.

Κάθε συντελεστής βεβαιότητας cf (certain factor) είναι ένας αριθμός ( $-1 \leq cf \leq 1$ ) ο οποίος παριστάνει το βαθμό βεβαιότητας ότι μια υπόθεση  $h$  ισχύει, δεδομένου ενός γεγονότος  $e$  και ορίζεται με βάση δύο μεγέθη – συναρτήσεις, το μέτρο βεβαιότητας (measure of belief – MB) και το μέτρο αβεβαιότητας (measure of disbelief – MD), ως εξής:

$$cf(h, e) = \frac{MB(h, e) - MD(h, e)}{1 - \min\{MB(h, e), MD(h, e)\}}$$

όπου με τη σειρά τους ορίζονται ως εξής:

Μέτρο βεβαιότητας (measure of belief – MB)

$$MB(h, e) = \begin{cases} 1 & \text{αν } p(h) = 1 \\ \max\{0, \frac{p(h/e) - p(h)}{1 - p(h)}\} & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Μέτρο αβεβαιότητας (measure of disbelief – MD)

$$MD(h, e) = \begin{cases} 1 & \text{αν } p(h) = 0 \\ \max\{0, \frac{p(h) - p(h/e)}{p(h)}\} & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

για τα οποία ισχύει  $0 \leq MB(h, e), MD(h, e) \leq 1$ , οπότε προκύπτει  $-1 \leq cf(h, e) \leq 1$ .

Τέτοιου είδους κανόνες έχουν τη μορφή:

If      γεγονός      then      υποθετικό συμπέρασμα με βεβαιότητα      CF

δηλαδή αν ισχύει το γεγονός τότε είμαστε βέβαιοι για το υποθετικό συμπέρασμα σε βαθμό CF. Οι συντελεστές βεβαιότητας παίρνουν τιμές στο διάστημα  $[-1, 1]$ . Η τιμή  $-1$  εκφράζει την απόλυτη βεβαιότητα για το ψευδές της πρότασης, η τιμή  $+1$  την απόλυτη βεβαιότητα για την αλήθεια της, ενώ η τιμή  $0$  εκφράζει άγνοια. Έτσι για παράδειγμα η πρόταση:

If πυρετός then γρίπη 0,8

δηλώνει ότι «αν κάποιος ασθενής έχει πυρετό, τότε μπορούμε να υποθέσουμε με συντελεστή βεβαιότητας 0,8 ότι έχει γρίπη».

Εκτός από την βεβαιότητα που συνοδεύει τον κανόνα, δηλαδή το υποθετικό συμπέρασμα, είναι δυνατόν να ορισθούν τιμές βεβαιότητας και στην τιμή του γεγονότος του κανόνα. Σε αυτή την περίπτωση η βεβαιότητα είναι το γινόμενο των βεβαιιοτήτων. Για παράδειγμα στον κανόνα:

If πυρετός  $CF_1$  0,7 then γρίπη  $CF_2$  0,8

το γεγονός ότι ο ασθενής έχει πυρετό καταγράφεται με βεβαιότητα 0,7. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό, για παράδειγμα στην περίπτωση που ο πυρετός δεν μετρείται με θερμόμετρο αλλά με την αφή. Σε αυτή την περίπτωση η βεβαιότητα για το υποθετικό συμπέρασμα του κανόνα είναι ίση με  $0,7 \times 0,8 = 0,56$ .

Στην περίπτωση που στο αριστερό μέρος του κανόνα υπάρχουν περισσότερα γεγονότα τα οποία συνδέονται με AND (ή OR), τότε ο συντελεστής βεβαιότητας του αριστερού τμήματος θεωρείται η μικρότερη (ή η μεγαλύτερη) τιμή CF που αντιστοιχα εμφανίζεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε τέτοιες περιπτώσεις η βεβαιότητα καθορίζεται από τον βαθμό βεβαιότητας του λιγότερου (ή περισσότερου) πιθανού γεγονότος. Ο συνολικός συντελεστής βεβαιότητας του κανόνα προκύπτει και πάλι από το γινόμενο του συνολικού συντελεστή βεβαιότητας του αριστερού τμήματος με τον συντελεστή βεβαιότητας του υποθετικού συμπεράσματος. Για παράδειγμα σε έναν κανόνα της μορφής:

If πυρετός  $CF_1$  0,7 AND συνάχι  $CF_2$  0,6 then γρίπη  $CF_3$  0,9

ο συνολικός συντελεστής βεβαιότητας των γεγονότων που καταγράφονται, δηλαδή του αριστερού τμήματος, είναι  $CF_{if} = \min(CF_1, CF_2) = 0,6$ , ενώ το υποθετικό συμπέρασμα ότι ο ασθενής έχει γρίπη συνάγεται με συντελεστή βεβαιότητας ίσο με  $CF_{if} \times CF_3 = 0,54$ .

Τέλος, στην περίπτωση που η βεβαιότητα κάποιου υποθετικού συμπεράσματος είναι  $CF_p$  και η ενεργοποίηση κάποιου άλλου κανόνα συνάγει το ίδιο υποθετικό συμπέρασμα αλλά με βεβαιότητα  $CF_n$ , τότε η συνολική βεβαιότητα του υποθετικού συμπεράσματος καθορίζεται από τα πρόσημα των  $CF_p$  και  $CF_n$  βάση των σχέσεων:

➤ Αν  $CF_p$  και  $CF_n > 0$ , τότε:

$$CF = CF_p + CF_n \times (1 - CF_p) = CF_p + CF_n - CF_n \times CF_p$$

➤ Αν  $CF_p$  και  $CF_n < 0$ , τότε:

$$CF = CF_p + CF_n \times (1 - CF_p) = CF_p + CF_n + CF_n \times CF_p$$

➤ Αν  $CF_p$  και  $CF_n$  ετερόσημα, τότε:

$$CF = \frac{CF_p + CF_n}{1 - \min(|CF_p|, |CF_n|)}$$

Η χρήση των συντελεστών βεβαιότητας, παρουσιάζει πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα:

#### Πλεονεκτήματα

- Η απλότητα του υπολογιστικού μοντέλου
- Η δυνατότητα χρήσης κανόνων παραγωγής ταυτόχρονα με την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας
- Η δυνατότητα παραγωγής επεξηγήσεων (μέσω των κανόνων παραγωγής)
- Ο ευκολότερος προσδιορισμός των συντελεστών αβεβαιότητας σε σχέση με αυτόν των πιθανοτήτων

#### Μειονεκτήματα

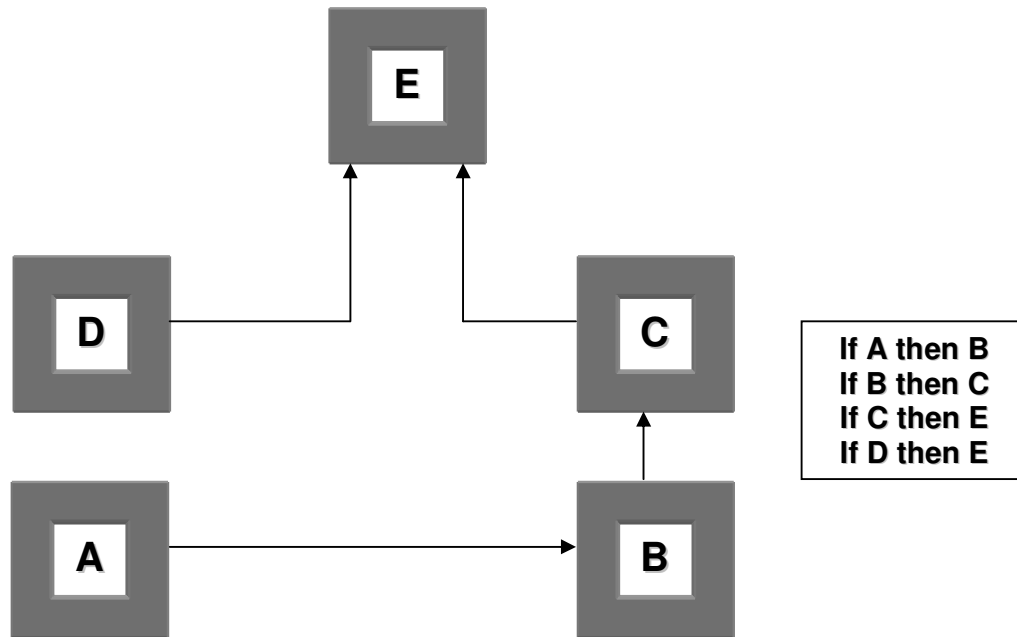
- Δεν έχουν σημαντική συμβολή στο διαγνωστικό αποτέλεσμα
- Δεν έχουν αυστηρή θεωρητική θεμελίωση
- Η ανανέωση της γνώσης οδηγεί σε αλλαγή των τιμών των συντελεστών βεβαιότητας
- Υπάρχει δυσκολία στην έκφραση γνώσης σε ορισμένες περιπτώσεις (μεγάλος αριθμός στοιχείων, ειδικές εξαρτήσεις μεταξύ αβέβαιων πεποιθήσεων)

### **4.2.2 Δίκτυα πιθανοτήτων**

Τα δίκτυα πιθανοτήτων αντιμετωπίζουν το πρόβλημα αλληλεπίδρασης των πιθανοτήτων που εμφανίζεται όταν ο χειρισμός της αβεβαιότητας γίνεται αυστηρά με το νόμο του Bayes [11], [13]. Βασίζονται στην παρατήρηση ότι στον πραγματικό κόσμο τα διάφορα γεγονότα δεν αλληλεπιδρούν όλα το ένα με το άλλο, αλλά μερικώς. Δηλαδή, μπορούν να οριστούν ομάδες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό, δεν είναι απαραίτητο να υπολογίζονται οι πιθανότητες όλων των συνδυασμών γεγονότων. Στα δίκτυα πιθανοτήτων, κανόνες με τη γενική μορφή

If           γεγονός           then    υποθετικό συμπέρασμα

συνδέονται μεταξύ τους με το υποθετικό συμπέρασμα του ενός να αποτελεί το γεγονός κάποιου άλλου, ή / και δύο ή περισσότεροι κανόνες να καταλήγουν στο ίδιο υποθετικό συμπέρασμα κάτω όμως από διαφορετικές παραδοχές (Σχήμα 4.1). Επιπλέον απαγορεύεται ή ύπαρξη βρόχων μέσα στο δίκτυο, καθώς κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε ατέρμονους συλλογισμούς.



Σχήμα 4.1 : Δίκτυο πιθανοτήτων – συνδεδεμένοι κανόνες (Πηγή: Διδακτορική)

Όταν κάποιοι κανόνες συνδέονται όπως παραπάνω, υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους οι πιθανότητες των διαφόρων κόμβων του δικτύου, αλληλεπιδρούν. Ο ένας σχετίζεται με την πιθανότητα να ισχύει ένα υποθετικό συμπέρασμα, δεδομένου ότι παρατηρήθηκε κάποιο σχετικό γεγονός και ο δεύτερος με την πιθανότητα να συνέβη κάποιο γεγονός, δεδομένου ότι ισχύει το υποθετικό συμπέρασμα. Πρόκειται δηλαδή για το πρόβλημα της αντιστροφής αιτίας – αποτελέσματος. Στα δίκτυα πιθανοτήτων γίνεται σαφής διαχωρισμός αυτού του είδους της αλληλεπίδρασης και ένας ειδικός μηχανισμός στο πλαίσιο μιας συλλογιστικής διαδικασίας, επιτρέπει, την αλλαγή ροής των πληροφοριών (πιθανοτήτων) στο δίκτυο των κανόνων, χωρίς όμως να γίνεται ταυτόχρονη χρήση κανόνων που αντιστρέφουν τη σχέση αιτίας – αποτελέσματος.

#### 4.2.3 Εφαρμογή

Στη συνέχεια παραθέτουμε μία εφαρμογή των κανόνων του Bayes [90], ούτως ώστε να γίνουν σαφείς αλλά και να αναδειχθεί η αξία αυτών και των παραγώγων θεωριών.



Η εξέταση των παρουσιαζόμενων συμπτωμάτων έπαιζε καθοριστικό ρόλο σε όλη τη διάρκεια της ιστορίας στη διάγνωση ασθενειών σε πληθυσμούς ζώων. Στη περίπτωση ασθενειών των τροπικών βοοειδών, τέτοια γνώση είναι συχνά σπάνια και όταν υπάρχει περιορίζεται σε ειδικούς με πολυετή εμπειρία. Το να συλληφθεί, να παρατηρηθεί και να διαδοθεί τόσο πολύτιμη εμπειρική γνώση παραμένει μια ενδιαφέρουσα πρόκληση της εφαρμογής των συστημάτων γνώσεις στον τομέα της κτηνιατρικής. Στο πεδίο ερευνών αυτό ερευνάτε η χρήση των δικτύων προσδοκιών του Bayes για να ποσοτικοποιήσει γνώμες ειδικών με σκοπό την εκτίμηση της πιθανότητας ποικίλων ασθενειών παρουσία και απουσία συγκεκριμένων σημάδιων. Οι πληροφορίες ελήφθησαν από ένα πάνελ σαράντα τεσσάρων έμπειρων κτηνιάτρων και παρείχαν μια μήτρα 27 σημάδιων συσχετισμένων με 20 συνήθεις ασθένειες βοοειδών. Χρησιμοποιώντας αυτή την προγενέστερη πληροφορία, εκτιμήσεις για την πιθανότητα συγκεκριμένων σημάδιων να συμβαίνουν μαζί με κάθε ασθένεια υπολογίστηκαν με το δίκτυο προσδοκιών του Bayes, το οποίο ήταν σε θέση να διαδίδει την μεταγενέστερη πιθανότητα κάθε της εκ των ασθενειών βασισμένη στα παρατηρούμενα σημάδια. Η μέθοδος αυτή συζητείται και αναπτύσσεται ως διαγνωστικό μοντέλο (στο πλαίσιο της συμβολής στη λήψη αποφάσεων). Για εύκολη πρόσβαση στα αποτελέσματα και στη διαδικασία η παραπάνω προσέγγιση κωδικοποιήθηκε σε λογισμικό πρόγραμμα CaDDiS (Cattle Disease Diagnosis System).

Η μέθοδος που χρησιμοποιείται μέσα στο CaDDiS είναι βασισμένη στο θεώρημα του Bayes το οποίο συνδέει τις υπό συνθήκη πιθανότητες (P) των γεγονότων A και B σύμφωνα με τον κανόνα :

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

Το θεώρημα αυτό επιτρέπει τη διαχείριση των υπό συνθήκη πιθανοτήτων με αυστηρά μαθηματικούς τρόπους. Χρησιμοποιώντας την ασθένεια Πυρετός Δυτικών Ακτών (East Coast Fever, (ECF)) ως παράδειγμα, αν A είναι το γεγονός «το ζώο έχει ECF» και B το γεγονός «το ζώο παρουσιάζει βήχα» τότε:

$$P\left(\frac{\text{το ζώο έχει ECF}}{\text{βήχει το ζώο}}\right) = P\left(\frac{\text{βήχει το ζώο}}{\text{το ζώο έχει ECF}}\right) \cdot \frac{P(\text{το ζώο έχει ECF})}{P(\text{το ζώο βήχει})}$$

Παρατηρείται ότι όλες οι πιθανότητες στο δεξί μέρος της εξίσωσης περιλαμβάνουν ιστορικές ή επιστημονικές πληροφορίες που είναι λογικά διαθέσιμα στο δίκτυο προσδοκιών του Bayes. Δοσμένου του γεγονότος πως ένα ζώο έχει παρατηρηθεί να βήχει, η παραπάνω εξίσωση επιτρέπει να υπολογιστεί η αντίστροφη πιθανότητα αυτής του να έχει ECF, με τη χρήση μόνο των ιστορικών δεδομένων. Το θεώρημα Bayes επιτρέπει να εκσυγχρονιστούν υπό συνθήκη πιθανότητες με νέες εισαγόμενες πληροφορίες με κατάλληλο υπολογιστικό τρόπο. Το δίκτυο προσδοκιών του Bayes λειτουργεί με την ανανέωση των μεταγενέστερων πιθανοτήτων από όλες τις επιλεγμένες ασθένειες στις οποίες παρατηρείται κάθε σημάδι. Άμεσα, η είσοδος ενός κλινικού συμπτώματος το οποίο συσχετίζεται

συχνά με μια ασθένεια διαμορφώνουν κλίμα με πιθανότητες υπέρ της διάγνωσης αυτής της ασθένειας. Αντίθετα, η παρουσία ενός σημάδιου που δεν είναι συχνό – αν ποτέ- έχει εντοπιστεί σε συγκεκριμένη ασθένεια θα οδηγήσει στην προεξόφληση της πιθανότητας, ότι αυτή η ασθένεια προκάλεσε τα παρατηρούμενα κλινικά συμπτώματα. Το κλασσικό μοντέλο προσδοκιών του Bayes απαιτεί τον υπολογισμό κάθε μιας εκ των υπό συνθήκη πιθανοτήτων ξεχωριστά. Στην δεδομένη περίπτωση, ο βαθμός εκτίμησης των λαμβανομένων υπό συνθήκη πληροφοριών καθενός κλινικού συμπτώματος που συνηγορεί στην ύπαρξη μιας ασθένειας, προέρχεται από μια ομάδα γνώσεων ειδικών ανθρώπων. Κάθε ειδικός μπορεί να επιλέξει μια τιμή πιθανότητας ( $P=1$  ή  $0$ ) ή από το διάστημα ( $P=0-0.2, 0.2-0.4, \kappa. \lambda. \pi$ ). Η τεχνική της εύρεσης ενός σημείου εκτίμησης πρέπει να παράγει συνεχείς και μεγάλου εύρους παραμέτρους για την  $P$ , όταν παρουσιάζεται με ένα δείγμα από γνώμες ειδικών. Επιπλέον, εκεί που οι ειδικοί έχουν ορίσει μια ομάδα ποικίλων απόψεων, η εκτίμηση που παράγεται πρέπει να είναι αντιπροσωπευτική των επιλεγμένων απόψεων. Τα δεδομένα αυτά μοντελοποιούνται στο πλαίσιο του προγράμματος Normal. Δοσμένου ενός πραγματικού κλινικού συμπτώματος γενικευμένης πιθανότητας  $P$ , το απλό μοντέλο Normal ορίζει την πιθανότητα ενός μόνου ειδικού να ορίζει την αντιλαμβανόμενη πιθανότητα να είναι στο πεδίο τιμών ( $a, b$ ) ως εξής :

$$\int_a^b \phi(P, \sigma^2) dP$$

όπου  $\phi$  είναι η κατανομή της Normal. Η συμπληρωματική παράμετρος ( $\sigma$ ) καθορίζει μια καταμέτρηση της «αβεβαιότητας». Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του  $\sigma$ , τόσο πιθανότερο είναι να παρουσιαστούν διαφορετικές απόψεις από τους ειδικούς. Δοσμένης μιας συγκεκριμένης ομάδας απόψεων από ειδικούς, η τιμή των  $P$  και  $\sigma$  μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τη μέγιστη πιθανότητα. Η μέθοδος συνεχίζει την ανάλυση της θεωρίας των πιθανοτήτων και ολοκληρώνεται με την κατασκευή της υπολογιστικής-βάσης μοντέλου με επέκταση στο διαδίκτυο, το CaDDiS.

#### 4.6 Προσέγγιση Dempster – Shafer

Ο χειρισμός της αβεβαιότητας κατά Dempster – Shafer (D-S) [37] γίνεται με περισσότερη ευκολία από ότι συνήθως κατά Bayes, καθώς δεν απαιτείται η συλλογή όλων των απλών και των υπό συνθήκη πιθανοτήτων.

Η μέθοδος βασίζεται σε λογισμό με αριθμητικές τιμές πεποίθησης (belief), δηλαδή πίστης για την ισχύ κάποιου υποθετικού συμπεράσματος για το οποίο υπάρχουν ενδείξεις (γεγονότα). Τα βασικά στοιχεία της θεωρίας D-S είναι το πλαίσιο διάκρισης και η βασική κατανομή πιθανότητας.

Το πλαίσιο διάκρισης (frame of discernment) είναι το σύνολο  $U$  των διακριτών και αμοιβαία αποκλειόμενων προτάσεων ενός τομέα γνώσης. Για παράδειγμα, αν εξετάζεται η ασθένεια κάποιου, το  $U$  αντιπροσωπεύει όλες τις πιθανότητες διάγνωσης (τα υποθετικά συμπεράσματα). Το σύνολο των υποσυνόλων του  $U$

(δυναμοσύνολο) συμβολίζεται με  $\text{Powerset}(U)$  ή πιο απλά  $\text{Pow}(U)$ . Αν για παράδειγμα  $U = \{A, B, C\}$  είναι το σύνολο των πιθανών ασθενειών, τότε το σύνολο:

$$\text{Pow}(U) = \{ \{ \}, \{A\}, \{B\}, \{C\}, \{A, B\}, \{A, C\}, \{B, C\}, \{A, B, C\} \}$$

υποδηλώνει τις πιθανές διαγνώσεις για μια περίπτωση ασθένειας. Κάθε στοιχείο  $\text{Pow}(U)$  αντιστοιχεί σε διαζευγμένες προτάσεις. Για παράδειγμα, στο πρόβλημα διάγνωσης ασθένειας, το στοιχείο  $\{A, B\}$  σημαίνει «ασθένεια A ή B». Στοιχεία του  $U$  που δεν ανήκουν σε ένα στοιχείο του  $\text{Pow}(U)$ , όπως η ασθένεια C στο  $\{A, B\}$ , κάνουν σαφή την άρνηση του αντίστοιχου υποθετικού συμπεράσματος. Το κενό υποσύνολο  $\{ \}$  αντιστοιχεί στην περίπτωση που όλα τα υποθετικά συμπεράσματα είναι ψευδή (null hypothesis). Η βασική κατανομή πιθανότητας (basic probability assignment – bpa) είναι μια απεικόνιση:

$$m : \text{Pow}(U) \rightarrow [0, 1]$$

η οποία αναθέτει μια τιμή πεποίθησης μεταξύ 0 και 1 για κάθε στοιχείο του  $\text{Pow}(U)$ . Είναι δηλαδή το μέτρο της πεποίθησης που υπάρχει για το κατά πόσο ισχύει το υποθετικό συμπέρασμα που εκφράζεται με το συγκεκριμένο στοιχείο. Η ποσότητα αυτή είναι εν γένει υποκειμενική και δεν μοιράζεται στα επί μέρους στοιχεία κάθε στοιχείου του  $\text{Pow}(U)$ . Αν για παράδειγμα  $m\{A, B\} = 0,3$ , τότε αυτή η πεποίθηση δεν μοιράζεται στα στοιχεία  $\{A\}$  και  $\{B\}$ , αλλά ισχύει μόνο για το  $\{A, B\}$ . Ειδικά για την περίπτωση του κενού υποσυνόλου  $\{ \}$ , ισχύει  $m\{ \} = 0$ . Επιπλέον, δεδομένου ότι το αληθές υποθετικό συμπέρασμα βρίσκεται κάπου στα στοιχεία του  $\text{Pow}(U)$ , θα ισχύει:

$$\sum_{X \in \text{Pow}(U)} m(X) = 1$$

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι η ποσότητα  $m(X)$  εκφράζει πόσο ισχυρή είναι η πεποίθηση για το ότι ένα συγκεκριμένο στοιχείο του  $U$  ανήκει στο  $X$  αλλά όχι και σε κάποιο από τα υποσύνολα του  $X$ . Η συνολική πεποίθηση ότι ένα στοιχείο του  $U$  ανήκει στο  $X$ , συμβολίζεται με  $\text{Bel}(X)$  και δίδεται από τη σχέση:

$$\text{Bel}(X) = \sum_{Y \subseteq X} m(Y)$$

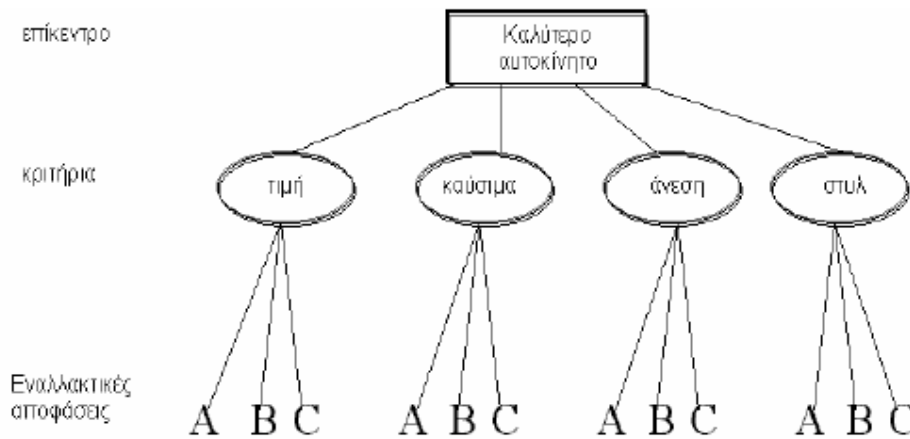
Αν  $m_1$  και  $m_2$  είναι δύο ανεξάρτητες εκτιμήσεις (βασικές κατανομές πιθανότητας) που αποδίδουν κάποιο βαθμό πεποίθησης στα στοιχεία του  $\text{Pow}(U)$ , τότε αυτές συνδυάζονται σε μια Τρίτη εκτίμηση  $m_3 = m_1 \otimes m_2$  με τρόπο που ορίζεται από τον κανόνα D-S :

$$m_3(A_{A \in \text{Pow}(U)}) = m_1 \otimes m_2(A) = \frac{\sum_{X,Y \in U: X \cap Y = A} m_1(X) \cdot m_2(Y)}{1 - \sum_{X,Y \in U: X \cap Y = \emptyset} m_1(X) \cdot m_2(X)}$$

#### 4.6.1 Εφαρμογή

Στη συνέχεια δίνεται μια εφαρμογή [91] της χρήσης της θεωρίας D-S, μέσω της οποίας αναδεικνύεται η φιλοσοφία της προσέγγισης D-S, καθώς και η δυνατότητα που παρέχει στο να συνδυάζονται ανεξάρτητες εκτιμήσεις αλλά και μέθοδοι.

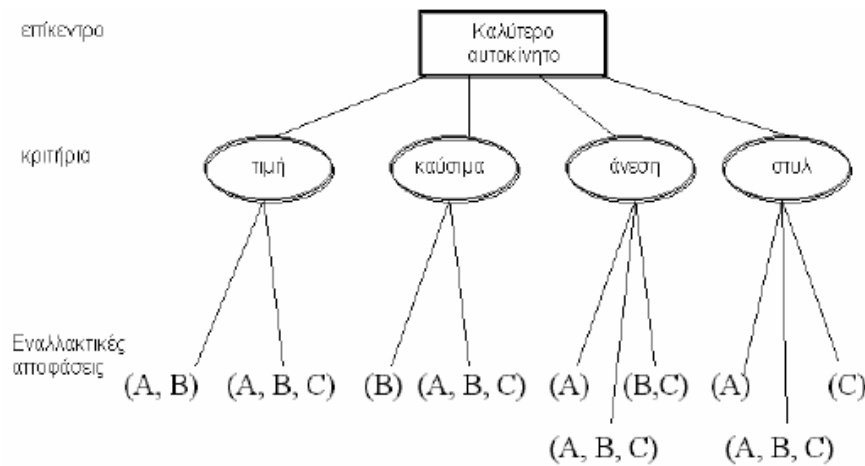
Η μέθοδος που περιγράφεται στην ενότητα αυτή συνδέει την θεωρία Dempster – Shafer (DST) με τη φιλοσοφία που ενυπάρχει στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία-(AHP). Η AHP είναι ένα ευρέως γνωστό εργαλείο διαχείρισης αποφάσεων που αναπτύχθηκε από τον Thomas L. Saaty, και είναι κατασκευασμένο να επιλύει σύνθετα προβλήματα που περιέχουν πολλαπλά κριτήρια. Αποτελεί μια συστηματική διαδικασία η οποία παραθέτει τα στοιχεία κάθε προβλήματος με ιεραρχημένο τρόπο, αναλύοντας το πρόβλημα σε μικρότερα και ακόμη μικρότερα συστατικά μέρη, και οδηγεί, βοηθά συστηματικά τον αποφασίζοντα μέσω μιας σειράς κριτικών και συγκριτικών ζευγών. Η έρευνα για της χρήσεις του AHP συνεχίζεται και πολλά παραδείγματα εντοπίζονται ως νέες εφαρμογές. Η συγκεκριμένη έρευνα διαπραγματεύεται την αγορά ενός καινούργιου αυτοκινήτου ανάμεσα από τρεις γνωστούς τύπους, έστω A, B και C. Στην ορολογία του DST αντιπροσωπεύονται {A, B, C} τότε το πεδίο διαχωρισμών τίθεται Θ. Τα κριτήρια που συνηγορούν στην απόφαση και βοηθούν την σύγκριση είναι Τιμή, Καύσιμα, Άνεση και Στυλ, το κύριο αντικείμενο (επίκεντρο) είναι να ληφθεί η απόφαση για την πιο συμφέρουσα αγορά αυτοκινήτου. Ο αποφασίζων καλείται να εκφράσει και να αποδώσει μια άποψη για τη σχετική βαρύτητα κάθε κριτηρίου, αφού συγκριθούν τα κριτήρια κατά δυνάδες. Για αριθμητικά κριτήρια όπως το κόστος, όσο οι τιμές είναι γνωστές με βεβαιότητα, δεν απαιτούνται τέτοιου είδους συγκρίσεις. Στο πρόβλημα αυτό ο καθορισμός της ιεραρχίας πραγματοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα που συνέθεσε την αναφορά αυτή και εξάγεται ως ανεστραμμένο όπως στο σχήμα που ακολουθεί :



Σχήμα 4.2: Ιεραρχία επιλογών για αυτοκίνητο μέσω του μοντέλου της AHP  
(Πηγή: Morgan Cardi et al., 1998 [91])

Για τους κόμβους του δέντρου όπου αντιπροσωπεύουν οι εναλλακτικές αποφάσεις, απαιτούνται κατά ζεύγη συγκρίσεις ικανότητας και αδυναμίας μεταξύ των τεσσάρων κριτηρίων. Για κάθε επίπεδο, οι συγκρίσεις μεταξύ των ζευγών κανονικοποιούνται, ώστε να παραχθεί ένα ιδιοδιάνυσμα βαρών και τα βάρη τότε συντίθενται ώστε να παράγουν μια εκτίμηση για τις εναλλακτικές των αποφάσεων. Μια κριτική που εφαρμόζεται στην AHP μέθοδο είναι η κατακόρυφη αρίθμηση των συγκριτικών ζευγών, καθώς θα έπρεπε να εφαρμόζεται πριν εκτιμηθούν οι κατατάξεις. Στο παράδειγμα που παρατέθηκε θα υπήρχαν τρεις συγκρίσεις μεταξύ των επιπέδων εναλλακτικών αποφάσεων, πραγματοποιώντας δώδεκα συγκρίσεις στο σύνολο για το επίπεδο αυτό. Επιπλέον έξι στο επίπεδο του κριτηρίου, θα έδιναν συνολικά δεκαοχτώ συγκριτικές διαδικασίες. Ο αριθμός των ζευγών καθώς ο αριθμός των συγκρίσεων αυξάνεται καθώς μεγαλώνει ο αριθμός των εναλλακτικών και των κριτηρίων. Ένας λόγος για τον υψηλό αριθμό συγκρίσεων είναι η ανάγκη να πραγματοποιηθούν συγκρίσεις σε κάθε μια εκ των εναλλακτικών αποφάσεων με κάθε αντίστοιχη εναλλακτική απόφαση. Μια επιπλέον αδυναμία είναι η συνοχή αυτών των συγκρίσεων, καθώς αν το Α προτιμάτε εκ του Β, το Β εκ του C και το C εκ του Α, αυτό θα συνιστούσε μια ασυνέχεια. Αυτή η καταμέτρηση της ασυνέχειας μετράται και συζητάται στην μέθοδο AHP. Επίσης δεν προβλέπεται η περίπτωση της άγνοιας με σκέψη στους τύπους των αυτοκινήτων και στα διαθέσιμα κριτήρια. Συνοψίζοντας, το πεδίο εργασιών της μεθόδου AHP εντοπίζεται στα εξής:

- Των αριθμό των συγκρίσεων.
- Τη συνοχή των συγκρίσεων.
- Την έλλειψη ενδεχόμενης άγνοιας της διαδικασίες του μοντέλου



Σχήμα 4.3: Ιεραρχία τροποποιημένης μεθόδου επιλογής αυτοκινήτου (Πηγή: Morgan Cardi et al., 1998 [91])

Εξετάζεται αν η θεωρία λήψης αποφάσεων(D-S) μπορεί να συνεισφέρει σε μία μέθοδο ώστε να μειωθούν τέτοιου είδους δυσκολίες. Για να μειωθεί ο αριθμός των συγκρίσεων θα έπρεπε να μην λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένες, μεμονωμένες εναλλακτικές αποφάσεις (D.A.), αλλά ολόκληρα γκρουπ. Η μέθοδος που προτείνεται είναι βασισμένη στην μέτρηση προτιμώμενης γνώσης που υπάρχει για κάθε γκρουπ D.A's συγκρινόμενη με το  $\Theta$ , το πλαίσιο της διάκρισης μέσα στο γενικό πλαίσιο καθενός συγκεκριμένου κριτηρίου. Η γνώση αυτή μπορεί να προέρθει μέσω μεγάλης ποσότητας στοιχείων ή αποδείξεων για μία συγκεκριμένη συλλογή D.A's. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο παράδειγμα που ακολουθεί και αναφέρεται στο τροποποιημένο Σχήμα 4.3.

Για κάθε κριτήριο υπάρχουν συγκεκριμένα γκρουπ D.A.'s συμπεριλαμβανομένων και  $\Theta$ , για κάθε ένα εκ των οποίων ο αποφασίζων μπορεί να εκπονήσει ένα βαθμό προτίμησης για κάθε γνώση. Η άγνοια της γνώσης για κάποια στοιχεία,  $\Theta$  (π.χ. {A, B, C}) ως D.A.'s γκρουπ δίνει την δυνατότητα κατανομή της άγνοιας και καθώς δεν πραγματοποιείται σύγκριση κατά ζεύγη αλλά συσχετισμός των γκρουπ εναλλακτικών αποφάσεων (D.A.'s) με το  $\Theta$ , δεν υπάρχει πρόβλημα συνοχής σε ένα κριτήριο, καθόσον δεν υπάρχουν δυο συγκεκριμένα αντικείμενα του  $\Theta$  που να θεωρούνται από τα κριτήρια ότι έχουν μια D.A.'s κοινή. Έτσι στο κριτήριο της άνεσης ,αν οι ομάδες {A, B} και {B, C} συγκρίνονταν με κάποιο τρόπο προτιμήσεων στο  $\Theta$ , θα υπήρχε σύγχυση στην κρίση της καθότι η επιλογή B εντοπίζεται σε δύο γκρουπ, σε κάθε ένα εκ των οποίων έχει αποδοθεί διαφορετική τιμή προτίμησης. Η μεθοδολογία που περιγράφεται διαχειρίζεται καταστάσεις με παρόμοιο τρόπο της η AHP, μολονότι χρησιμοποιούνται ομάδες D.A.'s. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται επιπλέον εκτίμηση της γνώσης για τις εναλλακτικές αποφάσεις, παρατηρώντας πρώτα το επίπεδο των εναλλακτικών αποφάσεων και στη συνέχεια επιτρέπετε η προσθήκη ποιοτικής ή ποσοτικής γνώσης ως στοιχείο που θα συμβάλλει στον καθορισμό της τιμής προτίμησης των γκρουπ D.A.'s στο  $\Theta$  και η κλίμακα των πέντε βαθμίδων που ακολουθεί υιοθετήθηκε ως η βάση του διαχωρισμού των επιπέδων γνώσης

ΓΝΩΣΗ – ΓΝΩΜΗ	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΟΓΙΑ	ΓΝΩΣΗ – ΓΝΩΜΗ	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΟΓΙΑ
Εξαιρετικά προτιμώμενοι	6	Μέτρια της ισχυρά	3
Ισχυρά της εξαιρετικά	5	Μέτρια προτιμώμενοι	2
Ισχυρά προτιμώμενοι	4		

Παρατηρείται πως δεν χρησιμοποιείται το 1, αυτό είναι συνέπεια της εκτίμησης των γκρουπ των D.A.'s ως ικανότητα της ικανότητα στο πλαίσιο των διακρίσεων.

#### 4.7 Κριτήρια για τη λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα και κίνδυνο

Εάν σε κάποιες περιπτώσεις οι αποφασίζοντες δεν είναι σε θέση να καθορίσουν τις απαραίτητες πιθανότητες των εναλλακτικών τους επιλογών υποκειμενικά, τότε το πρόβλημα της απόφασης παίρνει μια φιλοσοφική ή και ψυχολογική μορφή. Για παράδειγμα, ένας αποφασίζων μπορεί να είναι υπερβολικά προσεκτικός ή και απαισιόδοξος και να αντιμετωπίζει τη φύση, δηλαδή το περιβάλλον μέσα στο οποίο δρα και καλείται να πάρει μια απόφαση, σαν έναν «αντίπαλο». Αντίθετα, ένας άλλος αποφασίζων, μπορεί να διακατέχεται από αισιοδοξία, να είναι πολύ τολμηρός και ριψοκίνδυνος και να λαμβάνει αποφάσεις με σκοπό το μεγαλύτερο δυνατό όφελος, ακόμα και αν αυτές ενέχουν την πιθανότητα σοβαρών απωλειών. Τέλος και σε μια εναλλακτική περίπτωση, κάποιος αποφασίζων μπορεί να κινηθεί κάπου ενδιάμεσα σε αυτή την κλίμακα «αισιοδοξίας – απαισιόδοξίας».

Για τους παραπάνω λόγους, συγκεκριμένα κριτήρια έχουν καθιερωθεί, τα οποία έχουν θεωρηθεί ως επί το πλείστον ότι συμβάλουν στην βελτιστοποίηση λήψης αποφάσεων υπό αβεβαιότητα και κίνδυνο. Αυτά είναι [4], [25]:

➤ **Το κριτήριο Laplace (criterion of the mean):** Αυτό το κριτήριο ορίζει μια ίση πιθανότητα σε όλες τις καταστάσεις της φύσης, δηλαδή κατ' ουσία τις διαθέσιμες εναλλακτικές επιλογές. Κατόπιν η τελική επιλογή του αποφασίζοντα, θα επικεντρωνόταν σε εκείνο το σχέδιο δράσης του οποίου ο απλός αριθμητικός μέσος όρος (ή το άθροισμα) των τιμών χρησιμότητας των εκβάσεων του, είναι μεγαλύτερος των υπολοίπων.

➤ **Το κριτήριο Hurwicz -& (optimism – pessimism coefficient):**

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, ο υποκειμενικά καθορισμένος δείκτης «&», ορίζει τα προκαθορισμένα σχετικά βάρη στο καλύτερο και το χειρότερο των πιθανών αποτελεσμάτων κάθε απόφασης. Εκείνη η επιλογή επιλέγεται από τον αποφασίζοντα, η οποία έχει έπειτα τον υψηλότερο σταθμισμένο μέσο όρο, μεταξύ

του καλύτερου και του πιο χειρότερου των πιθανών αποτελεσμάτων, τα οποία μπορούν να προέλθουν από μια δεδομένη απόφαση.

### ➤ Κριτήριο Μεγιστοποίησης Αναμενόμενης Απόδοσης

Το κριτήριο αυτό είναι το πλέον συνηθισμένο στη λήψη αποφάσεων υπό αβεβαιότητα και κίνδυνο και ειδικότερα στην τεχνική των Δένδρων Αποφάσεων (Decision trees). Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, ο αποφασίζων επιλέγει την απόφαση εκείνη (έστω  $D_k$ ) για την οποία ισχύει:

$$ER_k = \max \{ ER_j, j = 1, 2, \dots, n \}$$

δηλαδή μεγιστοποιεί τη συνολική αναμενόμενη απόδοση. Εδώ θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το κριτήριο αυτό θεωρείται «αδιάφορο» ως προς τον κίνδυνο, εφόσον δεν «λαμβάνει υπόψη του» τη διασπορά που ενδεχομένως υπάρχει μεταξύ των πραγματικών αποδόσεων  $R_{ik}$  της απόφασης  $D_k$  κάτω από τις εναλλακτικές ενδεχόμενες καταστάσεις  $K_i$ . Έτσι όποτε χρησιμοποιείται το κριτήριο αυτό, χρήζει συμπλήρωσης με πρόσθετη πληροφόρηση για τον αποφασίζοντα (προφίλ κινδύνου, ανάλυση ευαισθησίας).

### ➤ Κριτήριο MAXIMIN (Ελαχιστοποίησης της ζημίας)

Το κριτήριο αυτό συνήθως χρησιμοποιείται από αποφασίζοντες οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως πολύ συντηρητικοί ή και απαισιόδοξοι και οι αποφάσεις τους είναι τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα έκθεσής τους σε ζημία. Την πολιτική αυτή εκφράζει το συγκεκριμένο κριτήριο maximin (maximize the minimum possible result). Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, καταγράφεται το χειρότερο δυνατό αποτέλεσμα που μπορεί να προκύψει από μια απόφαση κάτω από κάθε ενδεχόμενη εξωτερική κατάσταση και επιλέγεται η απόφαση εκείνη η οποία δίνει το καλύτερο από τα καταγεγραμμένα αποτελέσματα.

### ➤ Κριτήριο MAXIMAX (Μεγιστοποίηση κέρδους)

Το κριτήριο αυτό βρίσκεται στον αντίποδα του προηγούμενου, επιλέγει δηλαδή την απόφαση εκείνη η οποία μεγιστοποιεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα (maximize the maximum possible result). Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, καταγράφουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα που μπορεί να προκύψει από μια απόφαση, κάτω από κάθε ενδεχόμενη εξωτερική κατάσταση και επιλέγουμε την απόφαση εκείνη που μας δίνει το καλύτερο από τα παραπάνω αποτελέσματα.

### ➤ Κριτήριο MINIMAX REGRET (Ελαχιστοποίηση κόστους ευκαιρίας)

Τα τρία τελευταία κριτήρια που παρουσιάσαμε, βασίζονται στον πίνακα αποδόσεων, όπως αυτός προκύπτει από τα πραγματικά οικονομικά αποτελέσματα κάθε απόφασης. Το κριτήριο minimax regret εισάγει ένα νέο σκεπτικό: μετρά το κόστος ευκαιρίας μιας απόφασης, δηλαδή την απώλεια απόδοσης που θα προκύψει μεταξύ αυτής της απόφασης και της καλύτερης δυνατής απόφασης για τη συγκεκριμένη εξωτερική κατάσταση. Για την καλύτερη κατανόηση του κριτηρίου



ας δούμε την εφαρμογή του στο παράδειγμα της παραγράφου 3.2.3 του προηγούμενου κεφαλαίου:

Το κόστος ευκαιρίας της απόφασης «Παραγγελία 1» όταν εμφανισθεί «Ζήτηση 2» είναι 150 ευρώ. Αυτό προκύπτει εάν σκεφτούμε ότι η καλύτερη δυνατή απόφαση για «Ζήτηση 2» είναι η απόφαση «Παραγγελία 2» η οποία έχει απόδοση 300 ευρώ, ενώ η συγκεκριμένη απόφαση («Παραγγελία 1») για την ίδια ζήτηση έχει απόδοση 150 ευρώ. Ο νέος Πίνακας με τα Κόστη Ευκαιρίας  $C_{ij}$  για το συγκεκριμένο πρόβλημα φαίνεται παρακάτω:

ΑΠΟΦΑΣΗ (Υψος Παραγγελίας)	ΕΝΔΕΧΟΜΕΝΗ ΖΗΤΗΣΗ			
	0	1	2	3
0	0	150	300	450
1	150	0	150	300
2	300	150	0	150
3	450	300	150	0

Πίνακας 1: Πίνακας με τα Κόστη Ευκαιρίας

Ο παραπάνω Πίνακας μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον Πίνακα Αποδόσεων (Πίνακας 2, παράγραφος 3.2.3) ως εξής:

(1) Για κάθε στήλη (ενδεχόμενη ζήτηση) του Πίνακα Αποδόσεων καταγράφουμε τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση (π.χ. για Ζήτηση =2, μεγαλύτερη δυνατή απόδοση = 300)

(2) Στον Πίνακα με τα Κόστη Ευκαιρίας, καταγράφουμε σε κάθε κυψέλη τη διαφορά μεταξύ της μεγαλύτερης δυνατής απόδοσης που υπολογίσθηκε παραπάνω για την αντίστοιχη στήλη και της πραγματικής απόδοσης, όπως αυτή εμφανίζεται στην αντίστοιχη κυψέλη του Πίνακα Αποδόσεων.

Το κριτήριο minimax regret προτείνει σαν απόφαση εκείνη που ελαχιστοποιεί το αναμενόμενο κόστος ευκαιρίας  $EC_i$  το οποίο προκύπτει από κάθε απόφαση  $i$ . Επομένως για το συγκεκριμένο πρόβλημα έχουμε:

$$EC_0 = 255$$

$$EC_1 = 135$$

$$EC_2 = 105$$

$$EC_3 = 195$$

Επομένως η απόφαση η οποία ελαχιστοποιεί το αναμενόμενο κόστος ευκαιρίας είναι η απόφαση για παραγγελία 2 μονάδων προϊόντος.

Στο σημείο αυτό πρέπει να παρατηρήσουμε ότι το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του αναμενόμενου κόστους ευκαιρίας μας οδήγησε στην ίδια απόφαση με το κριτήριο μεγιστοποίησης της αναμενόμενης απόδοσης. Το αποτέλεσμα αυτό δεν είναι τυχαίο. Σε προβλήματα λήψης αποφάσεων υπό αβεβαιότητα, το κριτήριο της

μεγιστοποίησης της αναμενόμενης απόδοσης και το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του αναμενόμενου κόστους ευκαιρίας, οδηγούν στην ίδια απόφαση.

Σαν τελικό σχόλιο θα πρέπει να επισημάνουμε ότι γενικά, για όμοιες προβληματικές απόφασης, διαφορετικά κριτήρια λήψης απόφασης, οδηγούν σε διαφορετικές επιλογές εναλλακτικών. Επίσης, διαφορετικά κριτήρια λήψης αποφάσεων μπορεί να είναι βέλτιστα για διαφορετικές προβληματικές απόφασης και δεν είναι πάντοτε εύκολο, για τον εκάστοτε αποφασίζοντα, να επιλέξει το σωστό για κάθε περίπτωση κριτήριο. Τελικά, ίσως απαιτείται ένα ξεχωριστό κριτήριο απόφασης για αυτά καθ' αυτά τα κριτήρια υποστήριξης αποφάσεων, καθώς η εφαρμογή της κλασσικής θεωρίας αποφάσεων παρέχει μικρή βοήθεια στο πρόβλημα αυτό (Miller and Starr, 1967, pp. 124-126) [25].

#### 4.8 Info – gap θεωρία αποφάσεων

Η θεωρία της «ελλιπούς πληροφόρησης» (Info-gap decision theory) [111] είναι μια μη-πιθανολογική θεωρία απόφασης που επιδιώκει να βελτιστοποιήσει τη ελάχιστη δυνατή αποτυχία (η περίπτωση απόφασης όπου οι ελάχιστες απαιτήσεις πάντα ικανοποιούνται – robustness), ή την ευκαιρία του αναπάντεχου κέρδους. Αυτό διαφέρει από την κλασσική θεωρία απόφασης, η οποία μεγιστοποιεί χαρακτηριστικά την αναμενόμενη χρησιμότητα. Σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμοσμένης μηχανικής, των οικονομικών, του μάνατζμεντ, της βιολογικής συντήρησης, της ιατρικής, της ασφάλειας, αλλά και άλλων, οι αναλυτές χρησιμοποιούν μοντέλα και πληροφορίες για να αξιολογήσουν και να διαμορφώσουν αποφάσεις. Ένα «χάσμα πληροφορίας» (info-gap) είναι η διαφορά μεταξύ αυτού που είναι γνωστό και αυτού που πρέπει να μαθευτεί, προκειμένου να ληφθεί μια αξιόπιστη και σωστή απόφαση. Τα «χάσματα πληροφοριών» είναι αβεβαιότητες διαφόρων μορφών: μια έλλειψη γνώσης, ή μία μη πλήρης κατανόηση.

Μία κοινή μορφή «χάσματος πληροφορίας», αν και όχι η μόνη μορφή, είναι η αβεβαιότητα με τη μορφή μιας κατανομής πιθανότητας. Μία άλλη κοινή μορφή είναι η αβεβαιότητα στη λειτουργική μορφή της συστήματος, όπως η δύναμη τριβής στην εφαρμοσμένη μηχανική, ή η καμπύλη Phillips στα οικονομικά. Το «χάσμα πληροφορίας» εστιάζει συνήθως στη λήψη αποφάσεων με τέτοιο τρόπο, ώστε οι απαράδεκτα ελλειπείς και ανεπαρκείς εκβάσεις, διαφόρων εναλλακτικών επιλογών, να αποφεύγονται. Η εστίασή της στη χειρότερη πιθανή έκβαση, παρουσιάζει πολλά κοινά χαρακτηριστικά γνωρίσματα με την minimax θεωρία απόφασης.

#### 4.9 Εισαγωγή στη Θεωρία Χρησιμότητας

##### 4.9.1 Γενικά

Από όσα είδαμε μέχρι τώρα, σε περιπτώσεις λήψης αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας και κατ' επέκταση κινδύνου, τα δύο κριτήρια που

μπορούν να εφαρμοστούν, δηλαδή το κριτήριο της μεγιστοποίησης της αναμενόμενης απόδοσης και το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του αναμενόμενου κόστους ευκαιρίας, οδηγούν στην ίδια απόφαση [4]. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που δεν καλύπτονται από τα συγκεκριμένα κριτήρια. Για καλύτερη κατανόηση ας δούμε δύο παραδείγματα:

*«Σε μια κάλπη έχουμε τοποθετήσει 100 μπίλιες, εκ των οποίων οι 99 είναι άσπρες και 1 μαύρη. Ο κανόνας του παιχνιδιού είναι ο εξής: εάν τραβήξουμε άσπρη μπίλια, χάνουμε 10000 ευρώ, ενώ εάν τραβήξουμε μαύρη κερδίζουμε 1000000 ευρώ. Μετά από κάθε τράβηγμα, η μπίλια επανατοποθετείται στην κάλπη. Οι εναλλακτικές αποφάσεις που αντιμετωπίζουμε είναι δύο: να συμμετάσχουμε ή όχι στο παιχνίδι;»*

Σύμφωνα με το κριτήριο της μεγιστοποίησης της απόδοσης έχουμε:

$$ER_1 = (-10000)(0,99) + (1000000)(0,01) = 100$$

$$ER_2 = 0$$

Εφόσον  $ER_1 > ER_2$ , προφανώς η άριστη απόφαση είναι να συμμετάσχουμε στο παιχνίδι. Παρ' όλα αυτά η συγκεκριμένη απόφαση δεν καλύπτει πολλούς αποφασίζοντες, καθώς δεν είναι διατεθειμένοι να δεχθούν έναν τόσο μεγάλο αρνητικό κίνδυνο (99% πιθανότητες να χάσουν 10000 ευρώ). Ας δούμε όμως και ένα άλλο παράδειγμα:

*«Επενδυτής αντιμετωπίζει δύο επιλογές: Να εισπράξει από μια επένδυση το σταθερό ποσό των 49 ευρώ ή να τοποθετήσει τα χρήματά του σε άλλη επένδυση με αβέβαιο ποσό απόδοσης, το οποίο μπορεί να ισούται με 100 ευρώ με πιθανότητα 50% αλλά και με μηδέν ευρώ με πιθανότητα 50%.»*

Και στο παράδειγμα αυτό, υπολογίζοντας την αναμενόμενη απόδοση κάθε επιλογής έχουμε:

$$ER_1 = 49$$

$$ER_2 = (100)(0,50) + (0)(0,50) = 50$$

Εφόσον  $ER_2 > ER_1$ , η προτιμητέα επιλογή φαίνεται να είναι η δεύτερη, δηλαδή η απόφαση επένδυσης υπό καθεστώς κινδύνου. Και εδώ όμως, δεν είναι βέβαιο ότι διαφορετικοί αποφασίζοντες θα προτιμήσουν την ίδια επιλογή.

#### 4.9.2 Ορισμός – Βασικές έννοιες

Η έννοια της χρησιμότητας ουσιαστικά είναι η ποσοτικοποίηση της σημασίας ή αλλιώς της ωφελιμότητας που έχει για έναν αποφασίζοντα μια εναλλακτική απόφαση, σε μια προβληματική λήψης απόφασης υπό κίνδυνο [4].

### 4.9.3 Προσδοκώμενη Χρησιμότητα

Ο Bernoulli (1713) [1], συνεισέφερε την έννοια της χρησιμότητας (utility) ή της υποκειμενικής αξίας (subjective value) στα οικονομικά μέσω της προτεινόμενης λύσης του στο παράδοξο St. Petersburg [10]:

*«Ένα νόμισμα είναι «δίκαιο» όταν η πιθανότητα να δείξει κορώνα είναι ακριβώς  $\frac{1}{2}$ . Έστω λοιπόν το εξής παιχνίδι: Το νόμισμα ρίχνεται διαδοχικά έως ότου δείξει κορώνα. Ο παίχτης λαμβάνει αμοιβή  $2^n$  ευρώ, εάν η πρώτη κορώνα συμβεί στη  $n$ -οστή ρίψη. Το ερώτημα είναι πόσα χρήματα είναι κάποιος διατεθειμένος να πληρώσει για να παίξει».*

Η πιθανότητα να εμφανιστεί κορώνα στη  $n$ -οστή ρίψη είναι  $(1/2)^n$  διότι ζητάμε το νόμισμα να δείξει γράμματα σε κάθε μια από τις  $n-1$  ρίψεις και αμέσως μετά κορώνα. Άρα ο παίχτης λαμβάνει αμοιβή  $2^n$  ευρώ με πιθανότητα  $(1/2)^n$ . Η αναμενόμενη τιμή του παιχνιδιού είναι συνεπώς:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2}\right)^n 2^n = 1 + 1 + 1 + \dots = \infty.$$

Αν ο παίχτης δρα με βάση την αναμενόμενη τιμή, τότε θα ήταν έτοιμος να στοιχηματίσει οποιοδήποτε ποσό. Φυσικά αυτό δεν συμβαίνει, καθώς οι άνθρωποι δεν συμπεριφέρονται πάντα με βάση την αναμενόμενη τιμή του αποτελέσματος. Αντίθετα φαίνεται ότι η χρησιμότητα του χρήματος μειώνεται όσο η ποσότητα του χρήματος αυξάνεται. Με άλλα λόγια, μια αμοιβή 1 ευρώ μπορεί να έχει πολύ μεγαλύτερη χρησιμότητα για κάποιον που έχει στη διάθεσή του μηδέν ευρώ, σε σχέση με κάποιον άλλο ο οποίος έχει στη διάθεσή του 1000000 ευρώ.

### 4.9.4 Αξιώματα της Θεωρίας Χρησιμότητας

Η Θεωρία Χρησιμότητας διέπεται από συγκεκριμένα αξιώματα, γνωστά και ως αξιώματα των Von Neuman – Morgenstern (VNM) [1], [10]. Για να κατανοήσουμε τα αξιώματα αυτά, πρέπει πρώτα να ορίσουμε την έννοια του τεχνικού όρου της λαχειοφόρου αγοράς (lottery), ο οποίος ορίζεται ως ένα σύνολο αβέβαιων αποτελεσμάτων συνδυαζόμενα σε ζεύγη με τις αντίστοιχες πιθανότητες τους.

Αποδεχόμενοι ότι ο συμβολισμός  $>$  δείχνει την προτίμηση και ο συμβολισμός  $\sim$  την αδιαφορία, ας προχωρήσουμε στην παρουσίαση των αξιωμάτων της Θεωρίας Χρησιμότητας:

#### ➤ Αξίωμα της Πλήρους Διάταξης (complete ordering axiom)

Η ικανότητα διάταξης σύμφωνα με την οποία ο αποφασίζων πρέπει να είναι σε θέση να δηλώσει της προτιμήσεις του για όλα τα αποτελέσματα (outcomes) μιας λαχειοφόρου αγοράς. Αυτό συνεπάγεται δύο πράγματα:

(1) Συγκρισιμότητα. Για οποιαδήποτε από τα δύο αποτελέσματα (εκβάσεις)  $r_1$  και  $r_2$  θα πρέπει να ισχύει ένα από τα ακόλουθα:

Ο αποφασίζων προτιμά την  $r_1$  από την  $r_2$  ( $r_1 > r_2$ )

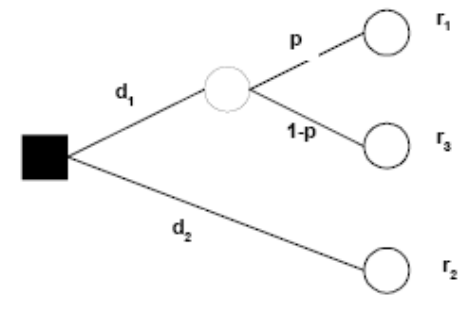
Ο αποφασίζων προτιμά την  $r_2$  από την  $r_1$  ( $r_1 < r_2$ )

Ο αποφασίζων είναι αδιάφορος τόσο για την  $r_1$  όσο και για την  $r_2$  ( $r_1 \sim r_2$ )

(2) Μεταβατικότητα. Ισχύει επίσης και η μεταβατικότητα των προτιμήσεων, σύμφωνα με την οποία αν ο αποφασίζων προτιμά την  $r_1$  από την  $r_2$  ( $r_1 > r_2$ ) και την  $r_2$  από την  $r_3$  ( $r_2 > r_3$ ) τότε συνεπάγεται ότι θα προτιμά και την  $r_1$  από την  $r_3$  ( $r_1 > r_3$ ).

### ➤ Αξίωμα της Συνέχειας (continuity axiom)

Αν ο αποφασίζων προτιμά την  $r_1$  από την  $r_2$  και την  $r_2$  από την  $r_3$  ( $r_1 > r_2 > r_3$ ) τότε θα υπάρχει κάποια τιμή της πιθανότητας  $p$  ( $0 < p < 1$ ) για την οποία ο αποφασίζων είναι αδιάφορος μεταξύ της λαχειοφόρου αγοράς  $d_1$  και του αποτελέσματος με βεβαιότητα  $d_2$  (Σχήμα 4.4). Το  $d_2$  καλείται ισοδύναμο βεβαιότητας (certain equivalent) της λαχειοφόρου αγοράς για δεδομένη πιθανότητα  $p$ .

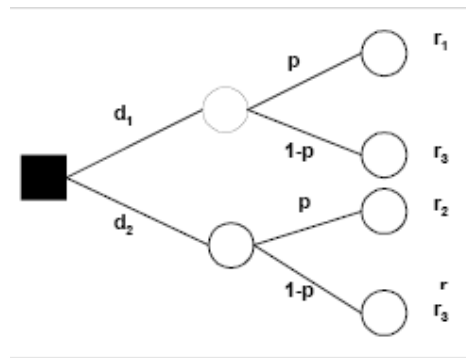


Σχήμα 4.4: Αξίωμα της συνέχειας (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

### ➤ Αξίωμα της Ανεξαρτησίας (independence axiom)

Έστω ότι ένας αποφασίζων είναι αδιάφορος μεταξύ δύο αποτελεσμάτων-εκβάσεων  $r_1$  και  $r_2$  ( $r_1 \sim r_2$ ) και έστω ότι υπάρχει και ένα άλλο αποτέλεσμα-έκβαση  $r_3$ . Τότε, για οποιαδήποτε  $p$  ( $0 < p < 1$ ), ο αποφασίζων θα είναι αδιάφορος μεταξύ των αποφάσεων  $d_1$  και  $d_2$  όπως αυτά περιγράφονται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4.5). Το αξίωμα αυτό εξασφαλίζει στον αποφασίζοντα ότι το αποτέλεσμα  $r_1$  με πιθανότητα  $p$ , θα έχει την ίδια χρησιμότητα με το αποτέλεσμα  $r_2$  με την ίδια πιθανότητα  $p$ . Αν ο αποφασίζων προτιμά την  $r_1$  από την  $r_2$  ( $r_1 > r_2$ ) τότε αυτό εξασφαλίζει στον αποφασίζοντα ότι το αποτέλεσμα  $r_1$  με πιθανότητα  $p$  θα του

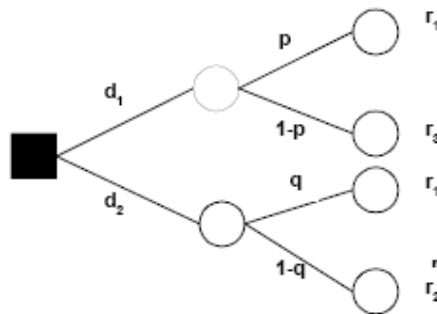
αποδώσει μεγαλύτερη χρησιμότητα από το αποτέλεσμα  $r_2$  με την ίδια πιθανότητα  $p$ .



Σχήμα 4.5: Αξίωμα της ανεξαρτησίας (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

### ➤ Αξίωμα Μονοτονίας (monotony axiom)

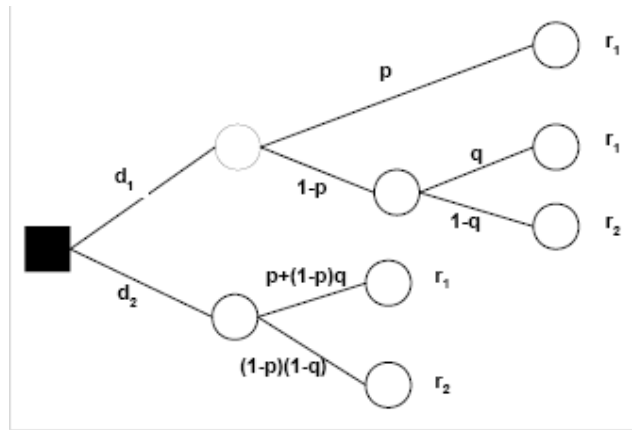
Έστω ένας αποφασίζων που προτιμά την  $r_1$  από την  $r_2$  ( $r_1 > r_2$ ). Δεδομένης της ύπαρξης δύο αποφάσεων  $d_1$  και  $d_2$  που τα αποτελέσματα-εκβάσεις τους οδηγούν είτε στην  $r_1$  είτε στην  $r_2$ , ο αποφασίζων θα προτιμήσει εκείνη την απόφαση που θα του προσφέρει με μεγαλύτερη πιθανότητα την  $r_1$ . Με απλά λόγια, αν  $p > q$  στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4.6), ο αποφασίζων θα επιλέξει την απόφαση  $d_1$ . Δηλαδή προτιμάται η λαχειοφόρος αγορά με την υψηλότερη πιθανότητα απόκτησης καλύτερου αποτελέσματος-έκβασης.



Σχήμα 4.6: Αξίωμα της Μονοτονίας (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

### ➤ Αξίωμα της Σύνθετης Λοταρίας (compound lottery axiom or decomposability)

Οι λαχειοφόρες αγορές που αποτελούνται από άλλες λαχειοφόρες αγορές, μπορεί να αντικατασταθούν από απλές λαχειοφόρες αγορές με τις πανομοιότυπες κατανομές πέρα από τα τελικά αποτελέσματα-εκβάσεις, έτσι ώστε ο αποφασίζων να είναι αδιάφορος μεταξύ της σύνθετης και της απλής. Με απλά λόγια, ο αποφασίζων θα είναι αδιάφορος μεταξύ των  $d_1$  και  $d_2$  που περιγράφονται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Αξίωμα της Σύνθετης Λοταρίας (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

Λέμε ότι ο αποφασίζων προτιμά εκείνο το αποτέλεσμα-έκβαση από την οποία προσδοκά να έχει το μεγαλύτερο όφελος-χρησιμότητα. Έτσι, προτιμώντας την  $r_1$  από την  $r_2$  ( $r_1 > r_2$ ) δηλώνει ότι προσδοκά να έχει μεγαλύτερο όφελος από την  $r_1$  από ότι από την  $r_2$ .

#### 4.10 Δένδρα Αποφάσεων

Τα δένδρα απόφασης είναι πολύ καλά εργαλεία για αποφάσεις στις οποίες απαιτείται να ληφθούν υπόψη πολλές σύνθετες πληροφορίες. Ένα δέντρο απόφασης (decision tree) δέχεται σαν είσοδο ένα αντικείμενο ή μια κατάσταση που περιγράφεται από ένα σύνολο ιδιοτήτων και αποτελέσματα μια απόφαση της μορφής «ναι» ή «όχι». [1], [4], [109], [119]. Έτσι, σε προβληματικές λήψης αποφάσεων υπό κίνδυνο, κατά τις οποίες απαιτείται η λήψη μιας σειράς αποφάσεων κάθε μια από τις οποίες οδηγεί σε ένα ή περισσότερα αβέβαια αποτελέσματα, τα οποία πρέπει να ληφθούν εν συνεχεία υπόψη, η χρήση της συγκεκριμένης τεχνικής κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη.

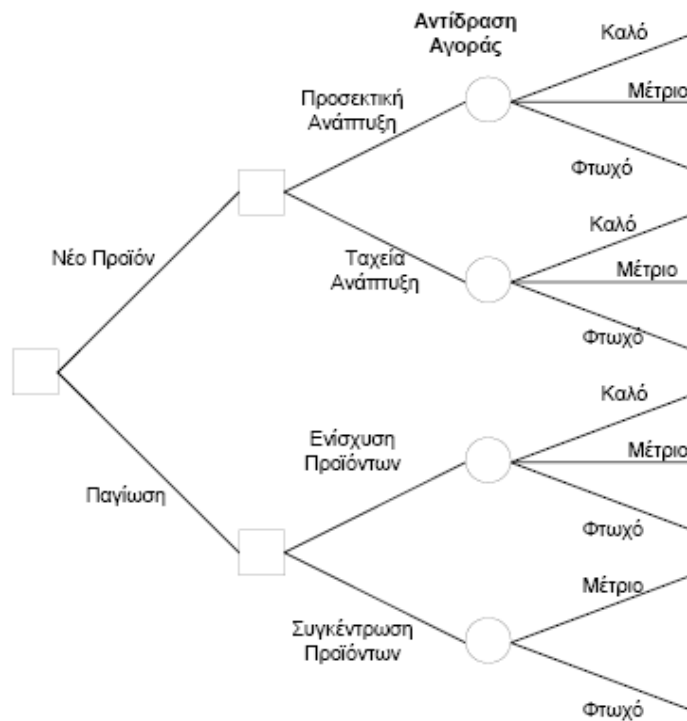
##### 4.10.1 Στάδια σχεδίασης Δένδρων Απόφασης

Ένα δέντρο απόφασης ξεκινά με μια απόφαση που πρέπει να ληφθεί. Η απόφαση αυτή αναπαρίσταται με ένα μικρό τετράγωνο, το οποίο έστω ότι τοποθετείται στην αριστερή πλευρά του δένδρου. Από το τετράγωνο αυτό ξεκινούν γραμμές προς τα δεξιά, μια για κάθε πιθανή λύση η οποία και γράφεται κατά μήκος της γραμμής αυτής. Στο τέλος κάθε γραμμής (λύσης), τοποθετούνται τα αποτελέσματα. Εάν το αποτέλεσμα της λήψης αυτής της απόφασης είναι αβέβαιο τότε αυτό παρίσταται με έναν μικρό κύκλο. Εάν το αποτέλεσμα είναι μια άλλη απόφαση που πρέπει να ληφθεί, τότε αυτό παρίσταται με ένα άλλο τετράγωνο. Συνοπτικά τα τετράγωνα αναπαριστούν αποφάσεις ενώ οι κύκλοι αναπαριστούν αβεβαιότητα ή τυχαίους παράγοντες. Εάν στο τέλος μιας γραμμής πρέπει να εμφανισθεί μια λύση, τότε την αφήνουμε κενή.

Για την καλύτερη κατανόηση της όλης διαδικασίας, ας δούμε ένα παράδειγμα που αφορά στην ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος:

*Το πρόβλημα του αποφασίζοντα στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχει να κάνει με το εάν είναι συμφέρουσα η ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος και η εισαγωγή του στην αγορά, ή εάν συμφέρει περισσότερο η παγίωση της υφιστάμενης κατάστασης.*

Στο Σχήμα 4.8 που ακολουθεί απεικονίζεται το πρώτο στάδιο ανάπτυξης του δένδρου απόφασης, στο οποίο είναι εμφανείς οι συνθήκες αβεβαιότητας οι οποίες ενέχουν και κίνδυνο και επικρατούν στη φάση αξιολόγησης της αντίδρασης της αγοράς σε κάθε μια από τις εναλλακτικές επιλογές του αποφασίζοντα.



Σχήμα 4.8: Δένδρο Απόφασης για την ανάπτυξη και εισαγωγή ενός νέου προϊόντος στην αγορά (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

Προχωρώντας στα επόμενα βήματα, ελέγχουμε κάθε κόμβο του δένδρου απόφασης, προκειμένου διασφαλίσουμε ότι δεν υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις ή αποτελέσματα τα οποία δεν έχουν μελετηθεί και στη συνέχεια ακολουθεί η αξιολόγηση του δένδρου απόφασης.

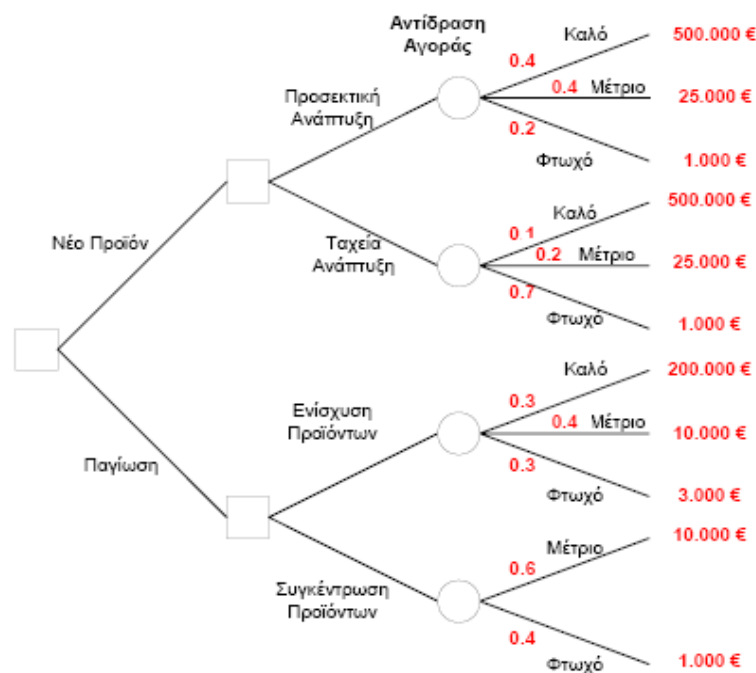
Η αξιολόγηση γίνεται με τον υπολογισμό της εναλλακτικής εκείνης που έχει τη μέγιστη αξία για τον αποφασίζοντα, με βάση την αριθμητική αξία κάθε πιθανού αποτελέσματος και της πιθανότητας που έχει αυτό να συμβεί. Η μορφή του



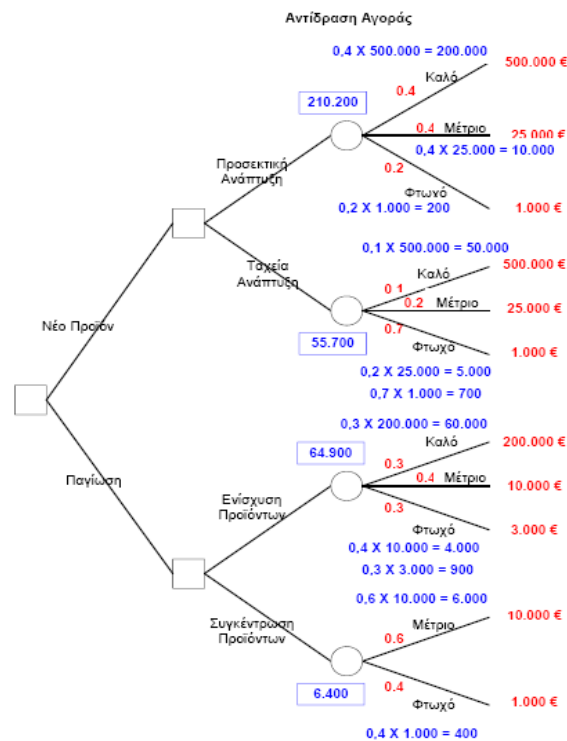
δένδρου απόφασης στο παράδειγμα που αναφέραμε, μετά τον καθορισμό των αριθμητικών αξιών των εναλλακτικών και των πιθανοτήτων τους παίρνει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 4.9.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές οι οποίες θα βοηθήσουν τον αποφασίζοντα στη λήψη της πλέον συμφέρουσας εναλλακτικής λύσης. Αρχίζοντας από τη δεξιά πλευρά του δέντρου απόφασης και προχωρώντας προς τα πίσω, ολοκληρώνεται ένα σύνολο υπολογισμών σε κάθε κόμβο (τετράγωνο απόφασης ή κύκλο αβεβαιότητας) και καταγράφεται το αποτέλεσμα. Οι τιμές που υπολογίζονται, καταγράφονται στα κουτιά δίπλα από κάθε κόμβο (Σχήμα 4.10).

Όταν αξιολογείται ένας κόμβος απόφασης, σημειώνεται σε κάθε γραμμή απόφασης το κόστος της κάθε επιλογής. Εν συνεχεία αφαιρείται το κόστος από τη τιμή του κάθε αποτελέσματος που έχει ήδη υπολογιστεί. Αυτό δίνει μια τιμή η οποία αντιπροσωπεύει το όφελος της συγκεκριμένης εναλλακτικής απόφασης.



Σχήμα 4.9: Δένδρο απόφασης μετά τον καθορισμό αριθμητικών αξιών και πιθανοτήτων (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

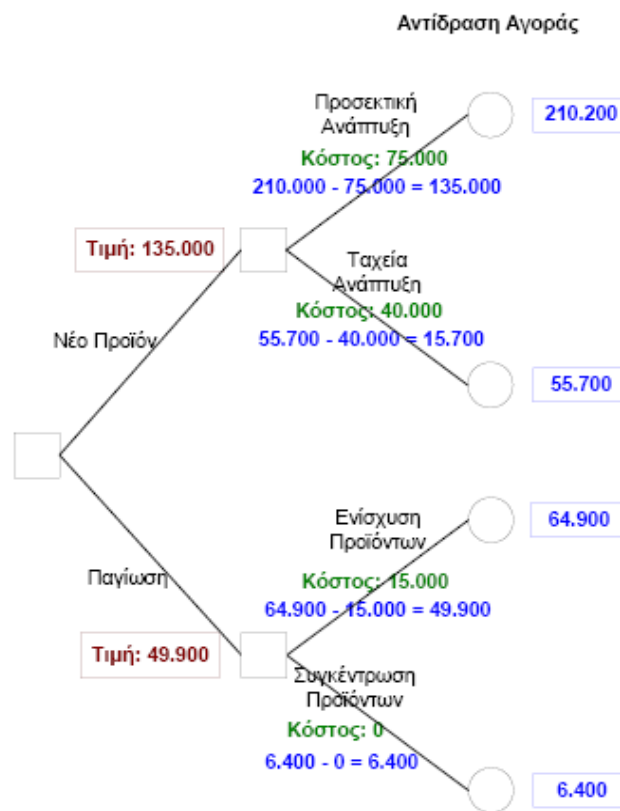


Σχήμα 4.10: Δένδρο απόφασης μετά τον υπολογισμό των τιμών των κόμβων  
(Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

Οι δαπάνες επένδυσης που αφορούν ποσά τα οποία ήδη ξοδεύτηκαν, δεν λαμβάνονται υπόψη σε αυτή την ανάλυση. Όταν υπολογίσουμε το κέρδος κάθε απόφασης, επιλέγεται εκείνη η απόφαση που δίνει το μεγαλύτερο κέρδος.

Στα δύο επόμενα Σχήματα 4.11 και 4.12 απεικονίζονται τα επόμενα στάδια υπολογισμού των τιμών των κόμβων του δένδρου απόφασης για το παράδειγμα που αναφέραμε, μέχρι την κατάληξη στην βέλτιστη επιλογή μεταξύ των εναλλακτικών.





Σχήμα 4.12: Υπολογισμός τιμών κόμβων δένδρου απόφασης (Πηγή: Ματσατσίνης, [1])

Στο παράδειγμά μας, το κέρδος που υπολογίστηκε για την απόφαση «νέο προϊόν – προσεκτική ανάπτυξη» ήταν 210.000 €. Αυτό το παράδειγμα δείχνει ότι υπολογίζεται το κόστος αυτής της προσέγγισης σε 75.000 € και το καθαρό κέρδος ανέρχεται σε 135.000 €. Το κέρδος της απόφασης «νέο προϊόν – ταχεία ανάπτυξη» ήταν 15.700 €. Ως εκ τούτου, σε αυτόν τον κλάδο επιλέγεται η καλύτερη επιλογή, «νέο προϊόν - προσεκτική ανάπτυξη» και αποδίδεται αυτή η τιμή στον κόμβο απόφασης.

Εφαρμόζοντας αυτή τη τεχνική, μπορούμε να δούμε ότι η καλύτερη επιλογή, μπορεί να είναι η ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος. Αυτό που η ανάλυση μας δίνει, το οποίο ίσως να μην έχουμε εκτιμήσει, είναι ότι αξίζει το κόπο και το χρόνο, για να πάρουμε ένα καλό προϊόν από το να σπρώξουμε το προϊόν στην αγορά. Στην πραγματικότητα, είναι καλύτερα απλώς να βελτιώσουμε τα υπάρχοντα προϊόντα, από το να αναπτύξουμε πρόχειρα ένα νέο προϊόν, ακόμα κι αν αυτό έχει μικρότερο κόστος.

#### 4.10.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι τα δέντρα απόφασης παρέχουν μια αποτελεσματική μέθοδο λήψης απόφασης επειδή αυτά:

➤ Παρουσιάζουν σαφώς το πρόβλημα έτσι ώστε όλες οι επιλογές να μπορούν να εμφανισθούν, να συζητηθούν και να συγκριθούν,

➤ Παρέχουν ένα πλαίσιο που ποσοτικοποιεί τις τιμές των αποτελεσμάτων και των πιθανοτήτων επίτευξής των

➤ Βοηθούν στη λήψη των καλύτερων δυνατών αποφάσεων με βάση τις υπάρχουσες πληροφορίες και τις καλύτερες εκτιμήσεις.

➤ Είναι εύκολα στην κατανόηση, ενώ παρέχουν και ευκολία στη δημιουργία κανόνων

Παρ' όλα αυτά δεν μπορούμε να παραλείψουμε και κάποια μειονεκτήματά τους όπως:

➤ Η χρήση τους παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες στην περίπτωση επεξεργασίας μη αριθμητικών δεδομένων

➤ Μπορεί να είναι πολύ μεγάλα σε μέγεθος, όταν αναπτύσσονται για προβληματικές λήψης απόφασης με μεγάλο αριθμό εναλλακτικών, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν δυσκολίες στην αναζήτηση.

Όπως με όλες τις μεθόδους λήψης απόφασης, εν τούτοις, η ανάλυση δέντρων απόφασης θα πρέπει να χρησιμοποιείται από κοινού με την κοινή αίσθηση-γνώση. Τα δένδρα απόφασης αποτελούν απλά ένα σημαντικό εργαλείο λήψης αποφάσεων, το οποίο βρίσκεται στη διάθεση των αποφασιζόντων.

Στο Κεφάλαιο που ακολουθεί θα δούμε αναλυτικά μία ακόμα Θεωρία που χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε προβληματικές αποφάσεων οι οποίες χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα, αυτή της Ασαφούς Λογικής, ενώ θα αναφερθούμε περιληπτικά και στα Υβριδικά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, εξελιγμένα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν τα Ασαφή Σύνολα και την Ασαφή Λογική σε συνδυασμό με τεχνικές Νευρωνικών Δικτύων για την καλύτερη αντιμετώπιση προβληματικών με αβεβαιότητα και υποστήριξη των κατά περίπτωση αποφασιζόντων.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Θεωρία Ασαφών Συνόλων και Ασαφής Λογική

### 5.1 Εισαγωγή

Τον όρο «ασαφή λογική» (fuzzy logic) εισήγαγε το 1962 με άρθρο του ο Zadeh [42], ο οποίος αναφέρθηκε στην αναγκαιότητα δημιουργίας της μαθηματικής θεωρίας που θα επεξεργαζόταν ασαφείς-ανακριβείς έννοιες, οι οποίες δεν είναι δυνατό να μοντελοποιηθούν μέσω της θεωρίας των πιθανοτήτων. Η μαθηματική θεμελίωση της ασαφούς λογικής επιτεύχθηκε με τη διατύπωση της θεωρίας των ασαφών συνόλων (fuzzy sets theory) από τον Zadeh (1965) λίγα χρόνια αργότερα.

Η ασαφής λογική αποτελεί ένα υπερσύνολο της κλασικής λογικής, την οποία επεκτείνει, προκειμένου να μπορεί να χειριστεί τιμές αληθείας μεταξύ του «απολύτως αληθούς» και του «απολύτως ψευδούς». Η ασαφής λογική κατά τον Zadeh αποτελεί «τη διαδικασία της μετατροπής διακριτών μεγεθών σε ασαφή (fuzzification) που επιτρέπει τη γενίκευση μιας διακριτής (distinct) θεωρίας σε συνεχή (continuous)».

### 5.2 Ασαφής γνώση

Η ασάφεια (fuzziness) είναι μια έννοια που σχετίζεται με την ποσοτικοποίηση της πληροφορίας και οφείλεται κυρίως σε μη-ακριβή (imprecise) δεδομένα [42]. Για παράδειγμα η φράση «Ο Νίκος είναι ψηλός», επιτρέπει να βγουν κάποια συμπεράσματα ή να ληφθούν ορισμένες αποφάσεις που σχετίζονται με το ύψος του Νίκου, παρά το γεγονός ότι δεν προσδιορίζει με ακρίβεια το ύψος του Νίκου.

Το πρόβλημα σε αυτές τις περιπτώσεις δεν οφείλεται τόσο στις έννοιες που χρησιμοποιούνται, όσο στην αντίληψη που έχει ο καθένας για τέτοιους λεκτικούς προσδιορισμούς ποσοτικών μεγεθών. Κατά συνέπεια, η ασάφεια είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό της γλώσσας. Αν και είναι δυνατό να αποδοθούν συγκεκριμένες τιμές σε λεκτικά προσδιορισμένα μεγέθη για να περιοριστεί η ασάφεια, αυτό οδηγεί πολλές φορές σε λάθος κρίσεις.

Στο προηγούμενο παράδειγμα, αν θεωρήσουμε ότι ψηλό είναι οποιοδήποτε άτομο έχει ύψος πάνω από 1.80 μέτρα, δεν είναι απόλυτα σωστό να βγει το συμπέρασμα ότι κάποιος άνθρωπος με ύψος 1.79 μέτρα δεν είναι ψηλός. Ένα άλλο παράδειγμα, το οποίο δίνει μια καλύτερη «αίσθηση» της ασάφειας, είναι το σύνολο των καρεκλών μέσα σε ένα δωμάτιο. Στην κλασική θεωρία συνόλων, ο προσδιορισμός των αντικειμένων που ανήκουν στο σύνολο «καρέκλα», μπορεί να γίνει απλά προσδιορίζοντας για κάθε αντικείμενο με «ναι» ή «όχι» αν είναι καρέκλα. Αν όμως ζητηθεί να προσδιοριστεί το σύνολο των αντικειμένων που μπορούν να

«λειτουργήσουν» ως καρέκλα, τότε θα προκύψει ένα αρκετά διαφορετικό σύνολο, καθώς υπάρχουν πολλά αντικείμενα σε ένα δωμάτιο με αυτήν την ικανότητα, όπως ένας πάγκος, ένα γραφείο ή ακόμη και το πάτωμα. Ένα τέτοιο σύνολο αποτελεί ένα ασαφές σύνολο (fuzzy set) με την έννοια ότι δεν υπάρχουν αυστηρά κριτήρια που να καθορίζουν το κατά πόσο ένα αντικείμενο ανήκει σε αυτό το σύνολο ή δεν ανήκει. Η ασαφής λογική και η θεωρία των ασαφών συνόλων παρέχουν ένα πλαίσιο χειρισμού της ασάφειας και της αβεβαιότητας και ένα πλαίσιο συλλογιστικής βασισμένης στην ασάφεια.

### 5.3 Βασικές έννοιες και ορισμοί των ασαφών συνόλων

Ένα ασαφές σύνολο (fuzzy set) ορίζεται ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών  $(x, \mu_A(x))$ , όπου  $x \in X$  και  $\mu_A(x) \in [0,1]$  [42].

Το σύνολο  $X$  αποτελεί το ευρύτερο σύνολο αναφοράς (universe of discourse) που περιλαμβάνει όλα τα αντικείμενα στα οποία μπορεί να γίνει αναφορά. Η τιμή  $\mu_A(x)$  λέγεται βαθμός αληθείας (degree of truth), συμβολίζει το βαθμό συγγένειας του  $x$  στο  $A$  και παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ .

Τέλος η συνάρτηση  $\mu_A$  ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής (συγγένειας) (membership function). Στην πράξη η συνάρτηση συμμετοχής μπορεί να προέρχεται από:

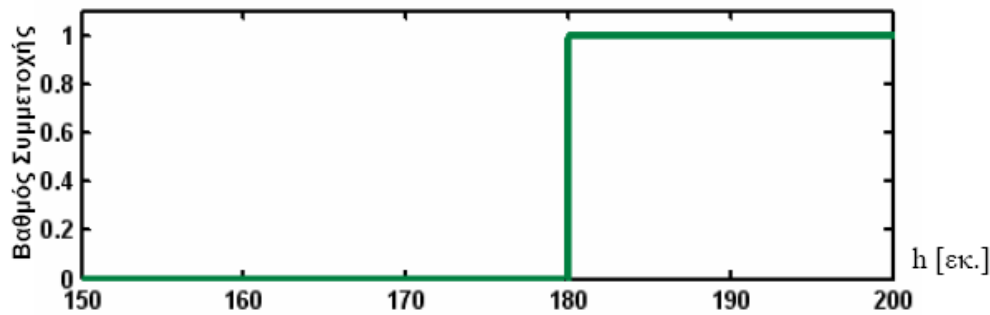
- Υποκειμενικές εκτιμήσεις
- Προκαθορισμένες (ad hoc) και απλοποιημένες μορφές
- Συχνότητες εμφανίσεων και πιθανότητες
- Φυσικές μετρήσεις
- Διαδικασίες μάθησης και προσαρμογής (συνήθως με νευρωνικά δίκτυα)

Η διαφορά των ασαφών συνόλων συγκριτικά με την κλασική θεωρία συνόλων είναι ότι για τη χαρακτηριστική συνάρτηση αντιστοίχισης της δεύτερης ισχύει  $\mu_A(x) \in \{0,1\}$ , δηλαδή το  $x$  είτε ανήκει στο  $A$  [ $\mu_A(x)=1$ ] ή δεν ανήκει [ $\mu_A(x)=0$ ]. Άρα η ασαφής θεωρία συνόλων μεταπίπτει στην αντίστοιχη κλασική, όταν οι δυνατές τιμές της συνάρτησης συμμετοχής είναι μόνο 0 και 1.

Επανερχόμαστε στο παράδειγμα του κλασικού και του ασαφούς συνόλου «ψηλοί άνθρωποι», προκειμένου να αποδείξουμε τη χρησιμότητα της χρησιμοποίησης των ασαφών συνόλων στην αναπαράσταση εννοιών που δεν έχουν σαφώς καθορισμένα όρια προσδιορισμού της.

Το σχήμα 5.1 προσεγγίζει το σύνολο «ψηλοί άνθρωποι» από τη σκοπιά της προσέγγισης των κλασικών συνόλων. Για κάθε υποσύνολο  $A$  του συνόλου αναφοράς  $X$  αντιστοιχεί μία χαρακτηριστική συνάρτηση (έστω  $\mu_A$ ) με πεδίο τιμών  $\{0,1\}$ . Κατά συνέπεια οι μοναδικές τιμές που μπορεί να πάρει αυτή η συνάρτηση αντιστοίχισης των στοιχείων του  $X$  στα στοιχεία του συνόλου  $\{0,1\}$ , είναι το

μηδέν στην περίπτωση που το στοιχείο αυτό δεν ανήκει στο υποσύνολο  $A$ , και η μονάδα στην περίπτωση που το στοιχείο αυτό ανήκει στο υποσύνολο  $A$ . Το παρακάτω παράδειγμα επαλήθευσης της πρότασης «Ο Νίκος είναι ψηλός» ακολουθώντας την προσέγγιση των κλασικών συνόλων γίνεται με βάση την οριοθέτηση ότι στο κλασικό σύνολο «ψηλοί άνθρωποι» ανήκουν όσοι έχουν ύψος μεγαλύτερο των 180 εκατοστών.



Σχήμα 5.1: Σύνολο «Ψηλοί Άνθρωποι» - κλασική προσέγγιση [Πηγή: Zadeh, 1970, [42)]

#### Κλασικό Σύνολο ψηλών ανθρώπων

$$A = \{h \mid h \geq 180 \text{ εκατοστά}\}$$

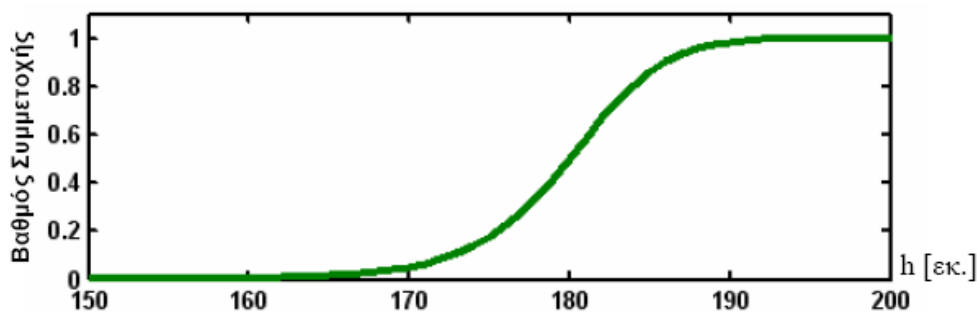
Πρόταση «Ο Νίκος είναι ψηλός»

Ύψος Νίκου μ Πρόταση

$h_{\text{NIKOY}} = 180 \text{ εκ.}$   $\mu_A = 1$  Αληθής

$h_{\text{NIKOY}} = 179 \text{ εκ.}$   $\mu_A = 0$  Ψευδής

Προσεγγίζοντας το ίδιο πρόβλημα με βάση τα ασαφή σύνολα, έχουμε το παρακάτω σχήμα 5.2. Η συνάρτηση συμμετοχής του ασαφούς συνόλου «ψηλοί άνθρωποι» δεν παίρνει δύο τιμές μόνο, όπως η χαρακτηριστική συνάρτηση του παραπάνω παραδείγματος, αλλά έχει πεδίο τιμών το διάστημα  $[0,1]$ .



Σχήμα 5.2: Σύνολο «Ψηλοί Άνθρωποι» - ασαφής προσέγγιση (Πηγή: Zadeh, 1970, [42)]



### Ασαφές Σύνολο «Ψηλών Ανθρώπων»

$$A = \int_X \mu_A(h)/h$$

$$\mu_A(h) = \begin{cases} 1 & , \text{ Το } h \text{ ανήκει πλήρως στο } A & h \geq 192 \\ (0,1) & , \text{ Το } h \text{ ανήκει μερικώς στο } A & 168 < h < 192 \\ 0 & , \text{ Το } h \text{ δεν ανήκει στο } A & h \leq 168 \end{cases}$$

Έστω  $X$  ένα μη κενό σύνολο αντικειμένων, με την κλασική έννοια του όρου, το οποίο αποτελεί το σύνολο αναφοράς (universe of discourse). Θεωρούμε ένα υποσύνολο  $A$  του  $X$ . Τότε υπάρχει μία συνάρτηση  $\mu_A: X \rightarrow \{0,1\}$ , η οποία ονομάζεται χαρακτηριστική συνάρτηση συμμετοχής κάθε στοιχείου  $x$  στο υποσύνολο  $A$  και ορίζεται ως

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & , x \in A \\ 0 & , x \notin A \end{cases}$$

Αν επεκτείνουμε το πεδίο τιμών της  $\mu$  στο διάστημα  $[0,1]$  τότε ορίζουμε ένα ασαφές υποσύνολο  $A$  του συνόλου  $X$ . Χαρακτηριστικό των ασαφών υποσυνόλων είναι ότι κάθε στοιχείο του υπό θεώρηση συνόλου  $X$  δύναται να ανήκει σε αυτά, αλλά με διαφορετικό βαθμό συμμετοχής. Συνεπώς, ένα ασαφές υποσύνολο ορίζεται ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών όπως έχουμε ήδη αναφέρει.

Ένας εναλλακτικός συμβολισμός προτείνεται από τον Zadeh (1972): Όταν το σύνολο  $X$  είναι πεπερασμένο, δηλ.  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , τότε ένα ασαφές υποσύνολο  $A$  μπορεί να γραφεί ως:

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i$$

Ο συμβολισμός αυτός επεκτείνεται στην περίπτωση του μη πεπερασμένου συνόλου αναφοράς ως εξής:

$$A = \int_X \mu_A(x)/x, \quad x \in X$$

Η κάθετος δεν αναπαριστά διαίρεση, το «+» και το « $\int$ » δεν υποδεικνύουν πραγματική πρόσθεση ή πραγματική ολοκλήρωση. Η σημασία της είναι καθαρά συμβολική.

Ας δούμε επίσης εδώ και κάποια παραδείγματα για την καλύτερη κατανόηση των παραπάνω:

➤ **Ασαφή Σύνολα με διακριτά μη διατεταγμένα σύνολα αναφοράς (fuzzy sets with a discrete non ordered universe)**

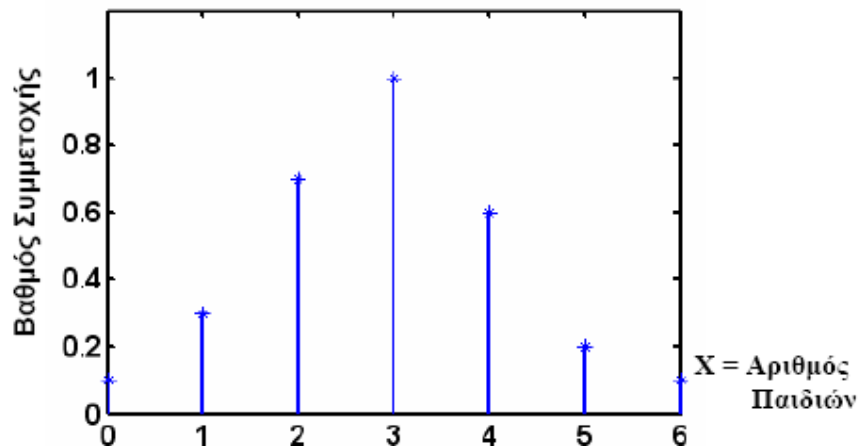
Έστω  $X = \{\text{Αθήνα, Χανιά, Ηράκλειο}\}$  το σύνολο των πόλεων που κάποιος μπορεί να επιλέξει για να ζήσει. Το ασαφές σύνολο  $C = \{\text{επιθυμητή πόλη για να ζήσει κάποιος}\}$  μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως:  $C = \{(\text{Αθήνα}, 0.9), (\text{Χανιά}, 0.8), (\text{Ηράκλειο}, 0.6)\}$ .

Προφανώς το σύνολο αναφοράς  $X$  είναι διακριτό και περιλαμβάνει μη-διατεταγμένα αντικείμενα, καθώς στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε τρεις πόλεις της Ελλάδος. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι αναφερθέντες αυτοί βαθμοί συμμετοχής είναι αρκετά υποκειμενικοί, καθώς αναπαριστούν συγκεκριμένες προτιμήσεις, οι οποίες διαφέρουν από άτομο σε άτομο.

➤ **Ασαφή Σύνολα με διακριτά διατεταγμένα σύνολα αναφοράς (fuzzy sets with a discrete ordered universe)**

Έστω  $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  το σύνολο των παιδιών που μια οικογένεια μπορεί να επιλέξει να έχει. Τότε το ασαφές σύνολο  $A = \text{«λογικός αριθμός παιδιών σε μία οικογένεια»}$  (βλέπε σχήμα 5.3) μπορεί να περιγραφεί ως ακολούθως:

$$A = \{(0, 0.1), (1, 0.3), (2, 0.7), (3, 1), (4, 0.6), (5, 0.2), (6, 0.1)\}$$



Σχήμα 5.3: Ασαφή σύνολα με διακριτά διατεταγμένα σύνολα αναφοράς (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

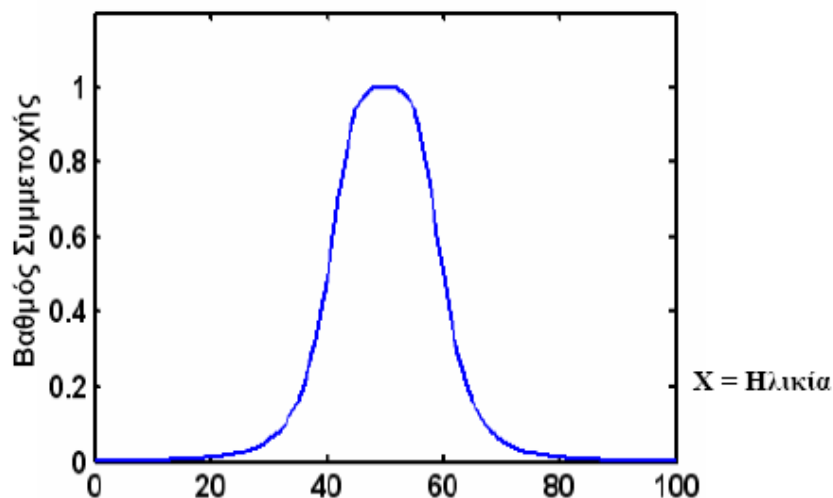
➤ **Ασαφή Σύνολα με συνεχή σύνολα αναφοράς (fuzzy sets with a continuous universe)**

Έστω  $X = \mathbb{R}^+$  το σύνολο των πιθανών ηλικιών του ανθρώπου, Τότε το ασαφές σύνολο  $B = \text{«περίπου 50 ετών»}$  (βλέπε σχήμα 5.4) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$B = \{(x, \mu_B(x)) \mid x \in X\}$$

όπου:

$$\mu_B(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-50}{10}\right)^4}$$



Σχήμα 5.4: Ασαφή σύνολα με συνεχή σύνολα αναφοράς (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

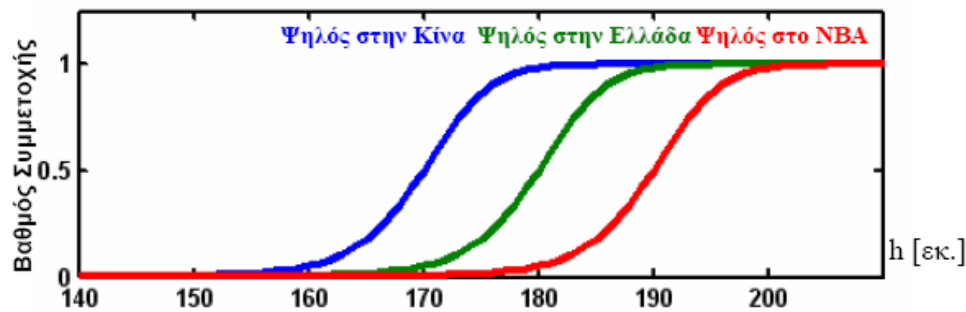
Από τα προηγούμενα παραδείγματα γίνεται φανερό ότι η κατασκευή ενός ασαφούς συνόλου εξαρτάται από δύο παράγοντες:

- Τον εντοπισμό ενός κατάλληλου συνόλου αναφοράς και
- Τη συγκεκριμενοποίηση μιας κατάλληλης συνάρτησης συμμετοχής.

Η συγκεκριμενοποίηση των συναρτήσεων συμμετοχής είναι υποκειμενική, γεγονός που σημαίνει ότι οι συναρτήσεις συμμετοχής που σχηματίζονται για να περιγράψουν την ίδια έννοια (π.χ. τον «επιθυμητό αριθμό παιδιών σε μια οικογένεια») μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα σε διαφορετικά άτομα. Αυτή η υποκειμενικότητα προέρχεται από τις ατομικές διαφορές στην αντίληψη ή

την έκφραση ασαφών εννοιών, και δεν σχετίζεται με την επίδραση κάποιου τυχαίου παράγοντα.

Χρησιμοποιώντας ξανά το παράδειγμα του ασαφούς συνόλου «ψηλοί άνθρωποι», μπορούμε να καθορίσουμε με υποκειμενικά κριτήρια τις συναρτήσεις συμμετοχής, στην προσπάθειά μας να προσεγγίσουμε αποτελεσματικά την πραγματικότητα. Για αυτόν το λόγο η συνάρτηση συμμετοχής διαφοροποιείται όταν για παράδειγμα αναφερόμαστε στους «ψηλούς ανθρώπους» α) της Κίνας, β) της Ελλάδας και γ) των παικτών του NBA! Στο σχήμα 5.5 παραθέτουμε τη διαγραμματική απεικόνιση της συνάρτησης συμμετοχής για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις.



Σχήμα 5.5: Υποκειμενικότητα στην εκτίμηση συναρτήσεων συμμετοχής με βάση το πλαίσιο αναφοράς (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

Επομένως η υποκειμενικότητα και η μη – τυχειότητα των ασαφών συνόλων είναι η πρωταρχική διαφοροποίηση ανάμεσα στην θεωρία των ασαφών συνόλων και την θεωρία πιθανοτήτων, που επικεντρώνεται στην αντικειμενική αντιμετώπιση τυχαίων φαινομένων.

Το ασαφές σύνολο ορίζεται ως:

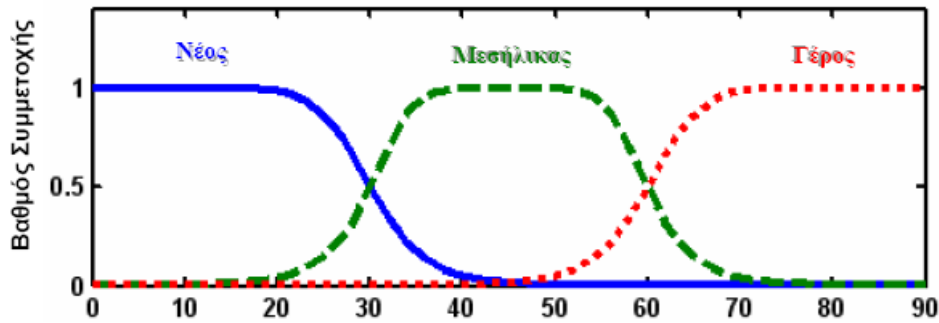
$$\rightarrow A = \sum_{x_i \in X} \mu_A(x_i) / x_i, \text{Όταν το } X \text{ αποτελεί ένα σύνολο διακριτών αντικειμένων}$$

$$\rightarrow A = \int_X \mu_A(x) / x \quad \text{Όταν το } X \text{ αποτελεί ένα συνεχές διάστημα (συνήθως το } \mathbb{R}^+)$$

Στην πράξη, όταν το σύνολο αναφοράς αποτελεί ένα συνεχές διάστημα, τότε συνήθως το επιμερίζουμε σε διαφορετικά ασαφή σύνολα, των οποίων οι συναρτήσεις συμμετοχής καλύπτουν το  $X$  με έναν λίγο έως πολύ ομοιόμορφο τρόπο. Αυτά τα ασαφή σύνολα συνήθως παριστάνονται με ονομασίες που αντιστοιχούν σε επίθετα, της είναι τα «μεγάλο», «μεσαίο», «μικρό», τα οποία ονομάζονται λεκτικές μεταβλητές.

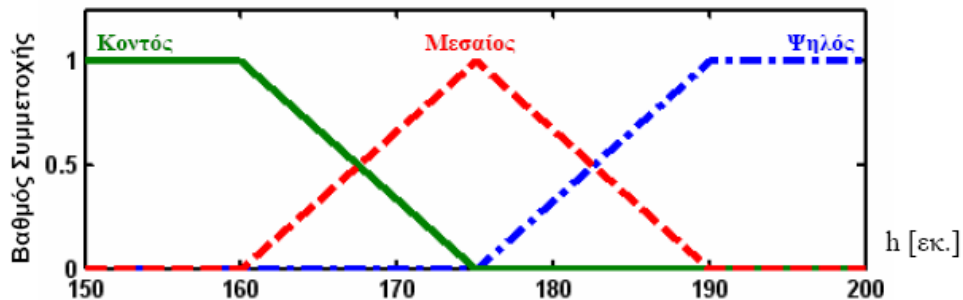
Για παράδειγμα έστω το σύνολο αναφοράς  $X = \text{«ηλικία»}$ . Τότε μπορούμε να προσδιορίσουμε τα ασαφή σύνολα «νέος», «μεσήλικας» και «γέρος». Η λεκτική μεταβλητή «ηλικία» μπορεί να πάρει διαφορετικές λεκτικές τιμές όπως «νέος», «μεσήλικας» και «γέρος», κατά τρόπο αντίστοιχο που οι μεταβλητές με την κλασική έννοια του όρου παίρνουν διαφορετικές τιμές. Οι συνηθισμένες

συναρτήσεις συμμετοχής (MF = membership function) για αυτές τις λεκτικές τιμές παρουσιάζονται στο σχήμα 5.6, όπου το σύνολο αναφοράς  $X$  καλύπτεται πλήρως από τις M.F.'s και η μετάβαση από τη μία M.F. στην άλλη γίνεται ομαλά και σταδιακά.



Σχήμα 5.6: Συνάρτηση συμμετοχής της μεταβλητής «ηλικία» (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

Σε κάποιες εφαρμογές χρησιμοποιείται η τμηματικώς γραμμική απεικόνιση της συνάρτησης συμμετοχής, όπως στο σχήμα 5.7 για τα ασαφή σύνολα «κοντός», «μεσαίος» και «ψηλός». Η αλληλοεπικάλυψη των συναρτήσεων συμμετοχής για κάποιες τιμές του ύψους (π.χ. κοντός-μεσαίος στο διάστημα 160 ως 175 εκατοστά) αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό της θεωρίας των ασαφών συνόλων και πάνω σε αυτό στηρίζεται, όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, η ασαφής συλλογιστική.



Σχήμα 5.7: Συνάρτηση συμμετοχής των ασαφών συνόλων «κοντός», «μεσαίος» και «ψηλός», (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

Με βάση τον εναλλακτικό τρόπο, που παρουσιάσαμε παραπάνω, το ασαφές σύνολο «ψηλός» γράφεται:

$$\Psi\eta\lambda\acute{o}\varsigma = 0/170 + 0/175 + 0.33/180 + 0.66/185 + 1/190 + 1/195,$$

Η κάθετος διαχωρίζει το  $\mu_A(x)$  από το  $x$  και δεν αναπαριστά διαίρεση, όπως επίσης το «+» δεν υποδεικνύει πρόσθεση.

Το ασαφές σύνολο ψηλός με τη χρησιμοποίηση ζευγών της μορφής  $(x, \mu_A(x))$  γράφεται ως εξής:

$$\Psi\eta\lambda\acute{o}\varsigma = \{(170,0), (175,0), (180,0.33), (185,0.66), (190,1), (195,1)\}$$

Η διαφορά στους δύο τρόπους αναπαράστασης είναι ότι η αναπαράσταση με ζεύγη τιμών περιγράφει διακριτές τιμές, δηλαδή μόνο τα συγκεκριμένα ύψη (170, 175, 180, 185, 190, 195), ενώ η αναπαράσταση με αναλυτική συνάρτηση του  $\mu(x)$  περιγράφει συνεχείς τιμές ύψους στο διάστημα ορισμού της  $\mu(x)$ .

Παρακάτω δίνονται κάποιοι ορισμοί που είναι απαραίτητοι για την περιγραφή των συναρτήσεων συμμετοχής.

### ➤ Χώρος Αναφοράς Ασαφούς Συνόλου – Support

Ο χώρος αναφοράς (support) της ασαφούς συνόλου  $A$  είναι το σύνολο όλων των σημείων  $x$  του  $X$  για τα οποία  $\mu_A(x) > 0$ :

$$\text{Support}(A) = \{x \mid \mu_A(x) > 0\}$$

### ➤ Πυρήνας Ασαφούς Συνόλου – Core

Ο πυρήνας (core) ενός ασαφούς συνόλου  $A$  είναι το σύνολο όλων των σημείων  $x$  του  $X$  για τα οποία  $\mu_A(x) = 1$ :

$$\text{Core}(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 1\}$$

### ➤ Κανονικότητα – Normality

Ένα ασαφές σύνολο  $A$  είναι κανονικό (normal) όταν ο πυρήνας (core) του είναι μη κενό σύνολο. Με άλλα λόγια θα πρέπει να υπάρχει έστω ένα  $x \in X$  τέτοιο που να ισχύει  $\mu_A(x) = 1$

### ➤ Σημεία Διασταύρωσης Ασαφούς Συνόλου – Crossover points

Το σημείο διασταύρωσης (crossover point) της ασαφούς συνόλου  $A$  είναι ένα σημείο  $x \in X$  για το οποίο  $\mu_A(x) = 0,5$ :

$$\text{Crossover}(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 0,5\}$$

### ➤ Ασαφές singleton – Fuzzy singleton

Ένα ασαφές σύνολο του οποίου ο χώρος αναφοράς είναι ένα μοναδικό στοιχείο στο  $X$  με  $\mu_A(x) = 1$  αποκαλείται ασαφές singleton (fuzzy singleton).

### ➤ α-τομή, ισχυρή α-τομή – α-cut, strong α-cut

Η α-τομή (α-cut) ή το σύνολο α-επιπέδου (α-level set) ενός ασαφούς συνόλου A είναι ένα συγκεκριμένο και σαφώς ορισμένο σύνολο που ορίζεται ως:

$$A_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}$$

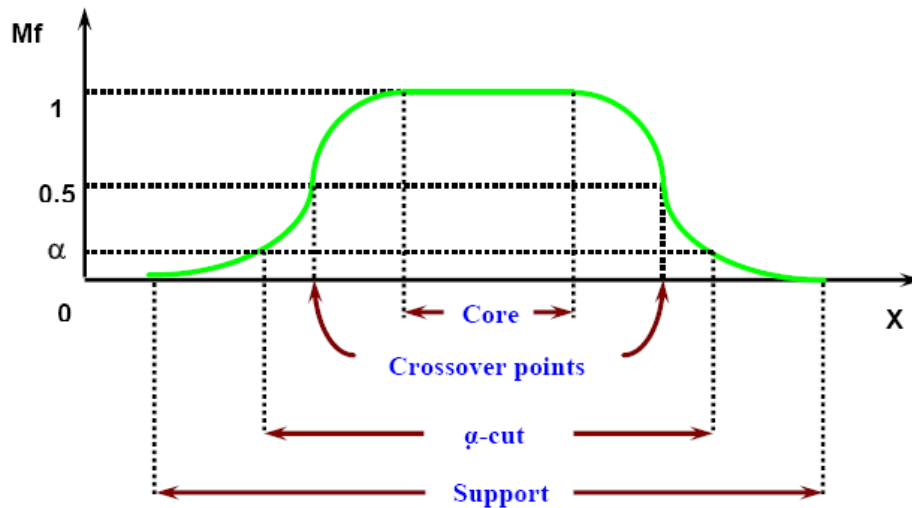
Η ισχυρή α-τομή (strong α-cut) ή το ισχυρό σύνολο α-επιπέδου (strong α-level set) ορίζονται ως

$$A^*_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) > \alpha\}$$

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω ορισμούς μπορούμε να εκφράσουμε το χώρο αναφοράς και τον πυρήνα ενός ασαφούς συνόλου ως:

$$\text{Support}(A) = A_0 \text{ και } \text{Core}(A) = A_1$$

Το σχήμα 5.8 εμφανίζει τις έννοιες που μόλις παρουσιάσαμε.



Σχήμα 5.8: Αναπαράσταση core, crossover points, α-cut, support (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

### ➤ Κυρτότητα – Convexity

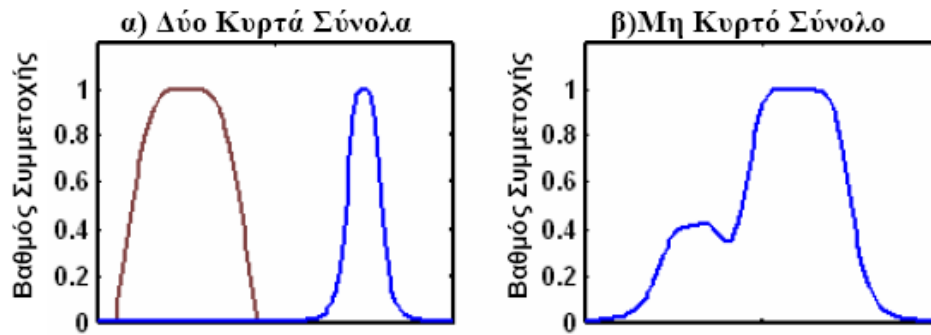
Ένα ασαφές σύνολο είναι κυρτό (convex), αν και μόνο αν για κάθε  $x_1, x_2 \in X$  και οποιοδήποτε  $\lambda \in [0,1]$  ισχύει:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2))$$

Εναλλακτικά, το A είναι κυρτό όταν όλα τα α-επιπέδου σύνολά του (α-level sets) είναι κυρτά<sup>1</sup>.

Παρατηρούμε ότι ο ορισμός της κυρτότητας ενός ασαφούς συνόλου δεν είναι τόσο αυστηρός, όσο ο συνήθης ορισμός της κυρτότητας μιας συνάρτησης ο οποίος για μια συνάρτηση  $f$  είναι:

$$f(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \lambda f(x_1) + (1-\lambda)f(x_2)$$



Σχήμα 5.9: Αναπαράσταση κυρτών και μη κυρτών συνόλων (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

Στο σχήμα 5.9α παρουσιάζονται δύο κυρτά ασαφή σύνολα, εκ των οποίων το αριστερό ικανοποιεί και τις δυο προτάσεις που παραθέσαμε παραπάνω, ενώ το δεξιό ικανοποιεί μόνο την πρώτη πρόταση. Στο σχήμα 5.9β παρουσιάζεται ένα μη-κυρτό ασαφές σύνολο.

### ➤ Ασαφείς Αριθμοί – Fuzzy numbers

Ένας ασαφής αριθμός  $A$  είναι ένα ασαφές σύνολο στο πραγματικό εκείνο διάστημα του  $\mathbb{R}$  που ικανοποιεί τις προϋποθέσεις της κανονικότητας (normality) και της κυρτότητας (convexity). Τα περισσότερα μη-σύνθετα ασαφή σύνολα ικανοποιούν αυτές τις συνθήκες, και έτσι οι ασαφείς αριθμοί αποτελούν τον πιο βασικό και συνηθισμένο τύπο ασαφών συνόλων.

### ➤ Πλάτος κανονικών και κυρτών ασαφών συνόλων – Bandwidth of normal and convex fuzzy sets

Για ένα κανονικό και κυρτό ασαφές σύνολο, το πλάτος (bandwidth) ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα στα δύο μοναδικά σημεία διασταύρωσης (crossover points).

<sup>1</sup> Ένα σαφές σύνολο διακριτών τιμών (crisp set) ορισμένο στο  $\mathbb{R}_n$  είναι κυρτό, αν και μόνο αν για οποιαδήποτε δύο σημεία  $x_1 \in C$  και  $x_2 \in C$ , ο κυρτός συνδυασμός της:

$$\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2,$$

εξασκοιούει να ανήκει στο  $C$ , όπου  $0 \leq \lambda \leq 1$ . Επομένως η κυρτότητα της  $\alpha$ (crisp)-level set  $A_\alpha$  υποδεικνύει ότι το  $A_\alpha$  αποτελείται από ένα στοιχείο-γραμμή μόνο.



$$\text{width}(A) = |x_2 - x_1|$$

όπου

$$\mu A(x_1) = \mu A(x_2) = 0,5$$

### ➤ Συμμετρία – Symmetry

Ένα ασαφές σύνολο  $A$  είναι συμμετρικό αν η συνάρτηση συμμετοχής του είναι συμμετρική γύρω από ένα συγκεκριμένο σημείο  $x = c$ , δηλαδή όταν ισχύει:

$$\mu A(c + x) = \mu A(c - x), \text{ για κάθε } x \in X$$

### ➤ Ανοιχτό αριστερά ή δεξιά ασαφές σύνολο, κλειστό ασαφές σύνολο – Open left or right, closed

Ένα ασαφές σύνολο είναι «ανοιχτό από αριστερά» όταν  $\lim_{x \rightarrow -\infty} \mu A(x) = 1$  και  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \mu A(x) = 0$ , ενώ είναι «ανοιχτό από δεξιά» όταν  $\lim_{x \rightarrow -\infty} \mu A(x) = 0$  και  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \mu A(x) = 1$ , και τέλος είναι «κλειστό» όταν  $\lim_{x \rightarrow -\infty} \mu A(x) = \lim_{x \rightarrow +\infty} \mu A(x) = 0$ .

Για παράδειγμα το ασαφές σύνολο «νέος» είναι ανοιχτό αριστερά (open left), το «γέρος» είναι ανοιχτό δεξιά (open right), και το «μεσήλικας» είναι κλειστό (closed) (βλέπε σχήμα 5.6).

## 5.4 Ιδιότητες ασαφών συνόλων

Για τα ασαφή σύνολα ορίζονται πράξεις και ισχύουν ιδιότητες ανάλογες με αυτές που ισχύουν στα κλασικά σύνολα. Ορισμένες από αυτές, όπως είναι η ένωση και η τομή, ορίζονται μέσω των τελεστών  $\min$  και  $\max$  που συμβολίζονται με  $\wedge$  και  $\vee$  αντίστοιχα. Οι τελεστές αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή του μικρότερου και του μεγαλύτερου αντίστοιχα μεταξύ δύο στοιχείων (π.χ.  $3 \wedge 4 = 3$ ,  $3 \vee 4 = 4$ ) ή μεταξύ των στοιχείων ενός συνόλου. Το σύμβολο του εκάστοτε τελεστή μπορεί να γραφεί και στην αρχή των στοιχείων του συνόλου (προθεματική γραφή) ως εξής:

$$\mu = \wedge(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) = \bigwedge_{k=1}^n (\mu_k)$$

Ισχύουν οι εξής ιδιότητες:

- Ένα ασαφές σύνολο ονομάζεται κανονικό αν υπάρχει τουλάχιστον ένα σημείο  $x_0$  του πεδίου ορισμού του για το οποίο  $\mu(x_0) = 1$

- ☞ Δύο ασαφή σύνολα A και B ορισμένα στο ευρύτερο σύνολο αναφοράς X είναι ισοδύναμα αν οι συναρτήσεις συμμετοχής τους είναι ίσες σε όλο το πεδίο ορισμού τους. Δηλαδή:

$$A = B \text{ αν } \mu_A(x) = \mu_B(x), \forall x \in X$$

Το συμπληρωματικό ενός ασαφούς συνόλου A είναι το  $\bar{A}$  με συνάρτηση συμμετοχής:

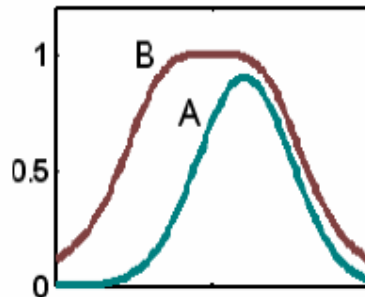
$$\bar{A} = X - A \Leftrightarrow \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Η συμπληρωματικότητα στα ασαφή σύνολα είναι ισοδύναμη της άρνησης (NOT) στην ασαφή λογική.

- ☞ Για δύο ασαφή σύνολα A και B ορισμένα στο X, το A είναι υποσύνολο (subset, containment) του B,  $A \subseteq B$  αν

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A \leq \mu_B$$

Το σχήμα 5.10 απεικονίζει την έννοια του υποσυνόλου, όπου το A ασαφές σύνολο εμπεριέχεται στο B.



Σχήμα 5.10: Αναπαράσταση της έννοιας του υποσυνόλου στα ασαφή σύνολα  
(Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

- ☞ Η ένωση δυο ασαφών συνόλων A και B ορισμένων στο ίδιο σύνολο X είναι ένα νέο ασαφές σύνολο  $C = A \cup B$ , ή αλλιώς  $C = A \text{ OR } B$ , ορισμένο επίσης στο X, για το οποίο ισχύει:

$$A \cup B: \mu_{A \cup B}(x) = \vee(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in X \quad \text{ή}$$

$$C = A \cup B \Leftrightarrow \mu_c(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$$

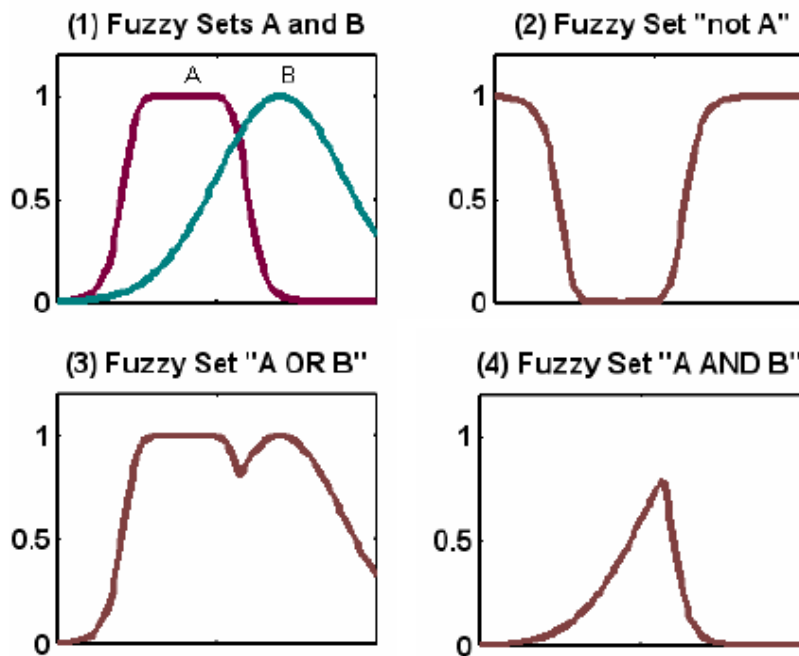
Η ένωση δυο ασαφών συνόλων σχετίζεται με τη διάζευξη (OR) της ασαφούς λογικής.

- ☞ Η τομή δυο ασαφών συνόλων A και B ορισμένων στο ίδιο σύνολο X είναι ένα νέο ασαφές σύνολο  $C = A \cap B$ , ή αλλιώς  $C = A \text{ AND } B$  ορισμένο επίσης στο X, για το οποίο ισχύει:

$$A \cap B: \mu_{A \cap B}(x) = \wedge(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \forall x \in X$$

$$C = A \cap B \Leftrightarrow \mu_c(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$$

Η τομή δυο ασαφών συνόλων σχετίζεται με τη σύζευξη (AND) της ασαφούς λογικής. Το σχήμα 5.11 απεικονίζει δύο ασαφή σύνολα A και B, το A, την ένωση  $A \cup B$  και την τομή  $A \cap B$ .



Σχήμα 5.11: Αναπαράσταση ένωσης – τομής ασαφών συνόλων (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

- ☞ Κενό ασαφές σύνολο « $\emptyset$ » είναι αυτό για το οποίο η συνάρτηση συμμετοχής έχει την τιμή 0 σε όλο το πεδίο ορισμού του
- ☞ Το γινόμενο δυο ασαφών συνόλων A και B ορισμένων στο X, είναι ένα νέο ασαφές σύνολο του οποίου η συνάρτηση συμμετοχής ισούται με το αλγεβρικό γινόμενο των αντίστοιχων συναρτήσεων συμμετοχής των A και B.

$$\mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x) \mu_B(x) \quad \forall x \in X$$

- ➔ Το γινόμενο ενός πραγματικού αριθμού  $\alpha$  με ένα ασαφές σύνολο  $A$ , δίνει ένα νέο ασαφές σύνολο  $\alpha \cdot A$  για το οποίο ισχύει:

$$\mu_{\alpha \cdot A}(x) = \alpha \cdot \mu_A(x) \quad \forall x \in X$$

- ➔ Ένα ασαφές σύνολο μπορεί να υψωθεί στη δύναμη  $\alpha$  (θετικός πραγματικός αριθμός), υψώνοντας στο  $\alpha$  τη συνάρτηση συμμετοχής του.

$$\mu_A^\alpha(x) = [\mu_A(x)]^\alpha \quad \forall x \in X$$

Η ύψωση ενός ασαφούς συνόλου στη δεύτερη δύναμη ( $\alpha=2$ ), λαμβάνεται συνήθως ως μεταβολή της λεκτικής τιμής που αντιστοιχεί στο ασαφές σύνολο και συμβολίζεται με τον όρο «πολύ». Για παράδειγμα η ύψωση της συνόλου  $A = \{\text{μικροί ακέραιοι}\}$  στη δεύτερη δύναμη δίνει  $A^2 = \{\text{πολύ μικροί ακέραιοι}\}$ . Στην ασαφή θεωρία συνόλων, σε αντιστοιχία με την κλασική θεωρία συνόλων, ισχύουν τα παρακάτω για τα ασαφή σύνολα  $A$ ,  $B$  και  $C$  ορισμένα στο ίδιο σύνολο  $X$ :

- ➔ Νόμος της διπλής άρνησης:  $\overline{(\overline{A})} = A$
- ➔ Ταυτοδυναμία:  $A \cup B = B \cup A$  και  $A \cap B = B \cap A$
- ➔ Προσεταιριστική ιδιότητα:  $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$  και  $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$
- ➔ Επιμεριστική ιδιότητα:  $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$  και  $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
- ➔ Απορροφητική ιδιότητα:  $A \cap (A \cup B) = A$  και  $A \cup (A \cap B) = A$
- ➔ Νόμος του De Morgan:  $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$  και  $\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$

Επίσης οι παραπάνω ιδιότητες μπορούν να εκφραστούν χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών συνόλων  $A$ ,  $B$  και  $C$  αντί για τα ίδια τα ονόματά τους. Για παράδειγμα η αντιμεταθετική ιδιότητα θα μπορούσε να γραφεί και σαν:

$$\mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \mu_B(x) \cap \mu_A(x)$$

Υπάρχουν επίσης ιδιότητες της κλασικής θεωρίας συνόλων που δεν ισχύουν στην περίπτωση των ασαφών συνόλων. Για παράδειγμα η σχέση  $A \cap \overline{A} = \emptyset$ , που στην κλασική θεωρία συνόλων αποτελεί το νόμο της αντίφασης, στη θεωρία των ασαφών συνόλων γίνεται:

$$A \cap \overline{A} \neq \emptyset$$

Παρόμοια η σχέση που στην κλασική θεωρία συνόλων αποτελεί το νόμο του αποκλειόμενου μέσου, στη θεωρία των ασαφών συνόλων γίνεται:

$$A \cup \bar{A} \neq X$$

### 5.5 Μορφές συναρτήσεως συμμετοχής

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες μορφές μονοδιάστατων παραμετρικών συναρτήσεων συμμετοχής, δηλαδή συναρτήσεων συμμετοχής με μία μοναδική είσοδο (input).

#### ➤ Συναρτήσεις Συμμετοχής Τριγωνικής Μορφής (Triangular M.F.s)

Μια τριγωνικής μορφής συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται από τρεις παραμέτρους  $\{a, b, c\}$  ως ακολούθως:

$$\text{trimf}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$$

#### ➤ Συναρτήσεις Συμμετοχής Τραπεζοειδούς Μορφής (Trapezoidal MFs)

Η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται από τέσσερις παραμέτρους  $\{a, b, c, d\}$  ως ακολούθως:

$$\text{trapmf}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$

Οι παράμετροι  $\{a, b, c, d\}$  με  $a < b < c < d$  καθορίζουν τις συντεταγμένες στον οριζόντιο άξονα των τεσσάρων γωνιών της συγκεκριμένης τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής. Στο διάγραμμα (2) του σχήματος 12 παρουσιάζεται η συνάρτηση συμμετοχής της μορφής  $\text{trapezoid}(x; 10, 20, 60, 95)$ , η οποία για  $b=c$  καταλήγει να είναι ίδια με την τριγωνική.

Χάρη στην απλή μορφή τους και την υπολογιστική αποτελεσματικότητα, τόσο οι τριγωνικές M.F., όσο και οι τραπεζοειδείς, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως και ιδιαίτερα σε εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Επίσης από τη στιγμή που κατασκευάζονται από τμήματα ευθειών, δεν είναι ομαλές στα άκρα (γωνίες), όπως αυτά προσδιορίζονται από τις παραμέτρους. Παρακάτω αναλύονται εναλλακτικοί τύποι συναρτήσεων συμμετοχής που προσδιορίζονται από ομαλές και μη γραμμικές συναρτήσεις.

#### ➤ Συναρτήσεις Συμμετοχής Γκαουσιανής Μορφής (Gaussian MFs)

Μια Γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται από δύο παραμέτρους  $\{c, \sigma\}$ :

$$\text{gaussmf}(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-c}{\sigma} \right)^2}$$

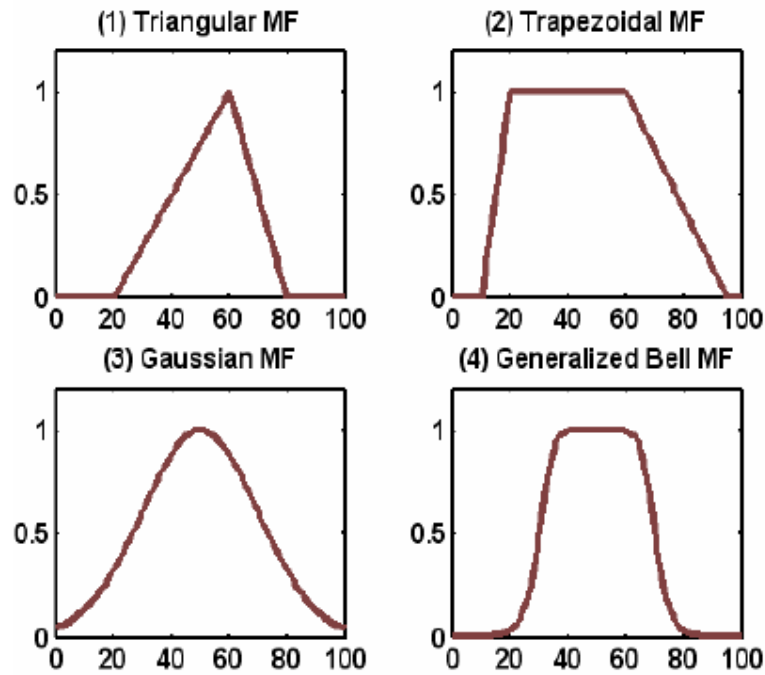
Η Γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται επακριβώς από δύο παραμέτρους  $\{c, \sigma\}$ . Το  $c$  αναπαριστά το κέντρο της, και το  $\sigma$  το πλάτος της. Στο διάγραμμα (3) του σχήματος 5.12 απεικονίζεται η  $\text{Gaussian}(x; 50, 20)$

### ➤ Συναρτήσεις Συμμετοχής Γενικευμένης Καμπανοειδούς Μορφής (Generalized bell MFs)

Η γενικευμένη καμπανοειδής συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται από τρεις παραμέτρους  $\{a, b, c\}$ , όπου η παράμετρος  $b$  είναι συνήθως θετική.

$$\text{gbellmf}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x-c}{a} \right|^{2b}}$$

Στο διάγραμμα (4) του σχήματος 5.12 απεικονίζεται η  $\text{gbellmf}(x; 20, 4, 50)$ . Λόγω της ομαλότητας και του ακριβούς ορισμού τους, η Γκαουσιανή (Gaussian) και καμπανοειδής (bell) MFs τείνουν να χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στον προσδιορισμό ασαφών συνόλων, αλλά δεν μπορούν να προσδιορίσουν ασύμμετρες συναρτήσεις συμμετοχής.



Σχήμα 5.12: Αναπαράσταση μορφών συναρτήσεων συμμετοχής (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

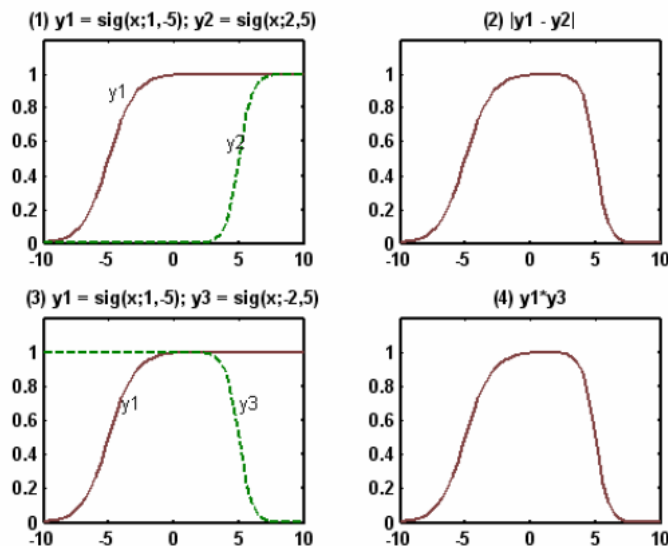
### ➤ Συνάρτηση Συμμετοχής Σιγμοειδούς Μορφής (Sigmoidal MF)

Η σιγμοειδής συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται ως ακολούθως:

$$\text{sigmf}(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

Το  $a$  ρυθμίζει την κλίση στο σημείο διασταύρωσης  $x = c$ . Ανάλογα με την τιμή που θα πάρει το  $a$  η σιγμοειδής M.F. είναι ανοιχτή αριστερά, ή ανοιχτή δεξιά, και επομένως είναι κατάλληλη να χρησιμοποιηθεί στην αναπαράσταση εννοιών όπως «πολύ μεγάλο» ή «πολύ αρνητικό». Σιγμοειδείς συναρτήσεις αυτής της μορφής χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως συναρτήσεις ενεργοποίησης (activation function) των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Προκειμένου ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο να προσομοιάσει τη συμπεριφορά ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων (fuzzy inference system), το πρώτο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται είναι η δημιουργία της κλειστής συνάρτησης συμμετοχής (closed M.F.) μέσω μιας σιγμοειδούς συνάρτησης. Θα δείξουμε δύο απλούς τρόπους για να το πετύχουμε αυτό στο αμέσως επόμενο παράδειγμα.

Το διάγραμμα (1) του σχήματος 5.13 απεικονίζει δύο σιγμοειδείς συναρτήσεις, τις  $y_1 = \text{sig}(x; 1, -5)$  και  $y_2 = \text{sig}(x; 2, 5)$ . Μπορούμε να εξάγουμε μια κλειστή και ασύμμετρη MF μέσα από την απόλυτη διαφορά της  $|y_1 - y_2|$ , όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (2). Το διάγραμμα (3) απεικονίζει μια επιπλέον σιγμοειδή MF της μορφής  $y_3 = \text{sig}(x; -2, 5)$ . Ένας εναλλακτικός τρόπος δημιουργίας μιας κλειστής και ασύμμετρης MF είναι μέσω του γινομένου  $y_1 y_3$ , όπως φαίνεται και από το διάγραμμα (4) του σχήματος 5.13.



Σχήμα 5.13: Κλειστές (closed) και ασύμμετρες (□symmetric) συναρτήσεις συμμετοχών βασισμένες σε σιγμοειδείς συναρτήσεις (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

## 5.6 Ασαφείς σχέσεις

Οι ασαφείς σχέσεις είναι ασαφή σύνολα ορισμένα σε πεδία αναφοράς ανώτερης διάστασης (π.χ.  $X \times X$ ,  $X \times Y$ ,  $X \times Y \times Z$ , κλπ). Ποιοτικά μια ασαφής σχέση  $R$  θα μπορούσε να είναι για παράδειγμα μια έκφραση της μορφής «είναι βαρύτερο από» και η οποία θα συνδέει τα στοιχεία δυο άλλων συνόλων:

$$R = \langle x \text{ είναι βαρύτερο από } y \rangle x \in X, y \in Y \text{ και } R \in X \times Y$$

Οι ασαφείς σχέσεις μπορούν να εκφραστούν με την παράθεση όλων των ζευγών (τιμή, βαθμός συμμετοχής), δηλαδή ζευγών της μορφής  $((x,y), \mu_R(x,y))$ . Ένας εναλλακτικός τρόπος αναπαράστασης, ιδιαίτερα χρήσιμος σε υπολογισμούς, είναι σε μορφή πίνακα:

$$R = \{((x,y), \mu_R(x,y)) | (x,y) \in X \times Y\}$$

$$R = \begin{bmatrix} \mu_R(x_1, y_1) & \mu_R(x_1, y_2) & \dots & \mu_R(x_1, y_n) \\ \mu_R(x_2, y_1) & \mu_R(x_2, y_2) & \dots & \mu_R(x_2, y_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mu_R(x_m, y_1) & \mu_R(x_m, y_2) & \dots & \mu_R(x_m, y_n) \end{bmatrix}$$

Οι ασαφείς σχέσεις μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους μέσω της διαδικασίας της σύνθεσης. Αν για παράδειγμα συνδυαστεί η ασαφής σχέση  $R_1(x,y)$  ορισμένη στο  $X \times Y$ , με την ασαφή σχέση  $R_2(y,z)$  ορισμένη στο  $Y \times Z$ , τότε θα προκύψει μία ασαφής σχέση  $R(x,z)$ , η οποία θα ορίζεται στο σύνολο  $X \times Z$  και θα συσχετίζει άμεσα τα στοιχεία των συνόλων  $X$  και  $Z$ . Βέβαια είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί επακριβώς η συνάρτηση συμμετοχής  $\mu_R(x,z)$  της  $R$  με χρήση των συναρτήσεων συμμετοχής των  $R_1$  και  $R_2$ , δηλαδή των  $\mu_{R_1}(x,y)$  και  $\mu_{R_2}(y,z)$ .

Η σύνθεση αποτελεί μία πολύ σημαντική διεργασία, καθώς οι κανόνες της μορφής If...Then αντιστοιχούν σε ασαφείς σχέσεις και το πρόβλημα της ασαφούς συλλογιστικής είναι μαθηματικά ισοδύναμο με τη σύνθεση. Οι περισσότερο γνωστές μέθοδοι σύνθεσης ασαφών σχέσεων είναι η σύνθεση  $\max - \min$  ( $\max - \min$  composition) και η σύνθεση  $\max$ -product ( $\max$ -product composition).

Αν  $R_1(x,y)$  και  $R_2(y,z)$  είναι δύο ασαφείς σχέσεις ορισμένες στα σύνολα  $X \times Y$  και  $Y \times Z$  αντίστοιχα, τότε η σύνθεσή της δίνει μια νέα σχέση  $R_1 \circ R_2$  ορισμένη στο  $X \times Z$ , της οποίας η συνάρτηση συμμετοχής για την περίπτωση της  $\max - \min$  σύνθεσης είναι:

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x,z) = \bigvee_y [\mu_{R_1}(x,y) \wedge \mu_{R_2}(y,z)]$$



ενώ για την περίπτωση της σύνθεσης max – product είναι:

$$\mu_{R1 \circ R2}(x,z) = \bigvee_y [\mu_{R1}(x,y) \cdot \mu_{R2}(y,z)]$$

Οι υπολογισμοί στο δεξιό μέρος των παραπάνω σχέσεων είναι παρόμοιοι με αυτούς του πολλαπλασιασμού πινάκων.

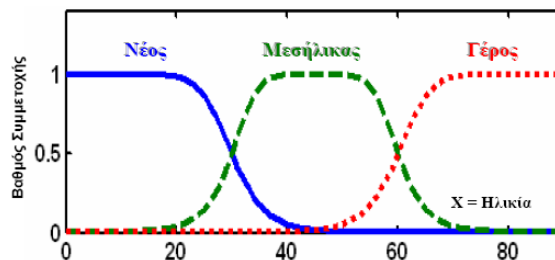
### 5.7 Ασαφείς μεταβλητές, αριθμοί, προτάσεις και κανόνες

Η μεταβλητή εκείνη της οποίας οι τιμές ορίζονται με ασαφή σύνολα ονομάζεται ασαφής μεταβλητή (fuzzy variable). Για παράδειγμα τα ασαφή σύνολα {κοντός, μεσαίος, ψηλός} θα μπορούσαν να είναι το πεδίο τιμών της ασαφούς μεταβλητής «ύψος». Για αυτόν το λόγο, η μεταβλητή «ύψος» χαρακτηρίζεται και ως λεκτική μεταβλητή, ενώ τα «κοντός», «μεσαίος», «ψηλός» ως πρωταρχικές λεκτικές τιμές.

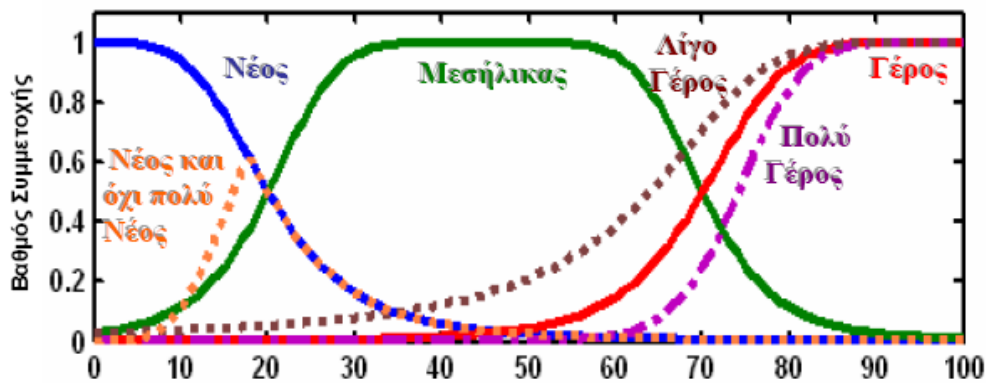
Μια λεκτική μεταβλητή (linguistic variable) χαρακτηρίζεται από 5 στοιχεία {x, T(x), X, G, M} όπου x είναι η ονομασία της μεταβλητής, T(x) είναι το σύνολο ορισμού του x (term set), δηλαδή των σύνολο των λεκτικών τιμών ή λεκτικών όρων, X είναι το σύνολο αναφοράς, G είναι ο συντακτικός κανόνας (syntactic rule) που δημιουργεί τους όρους στο T(x) και M είναι ένας σημασιολογικός κανόνας (semantic rule) που αντιστοιχεί την κάθε λεκτική τιμή A με τη σημασία της M(A), όπου M(A) απεικονίζει ένα ασαφές σύνολο στο A. Για παράδειγμα αν χρησιμοποιήσουμε την ηλικία ως λεκτική μεταβλητή, τότε το αντίστοιχο term set T(age) θα μπορούσε να είναι:

**T(ηλικία) =** {νέος, όχι νέος, πολύ νέος, λίγο νέος ...  
μεσήλικας, όχι μεσήλικας, ...  
γέρος, όχι γέρος, πολύ γέρος, λίγο γέρος, ...  
όχι πολύ νέος και όχι πολύ γέρος, ...}

όπου ο κάθε όρος στο T(ηλικία) χαρακτηρίζεται από ένα ασαφές σύνολο του συνόλου αναφοράς X=[0,100], όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Ο σημασιολογικός κανόνας προσδιορίζει τη συνάρτηση συμμετοχής της κάθε λεκτικής τιμής του συνόλου ορισμού (term set). Κάποιες τυπικές τέτοιες συναρτήσεις συμμετοχής παρουσιάζονται στα σχήματα 5.14 και 5.15:



Σχήμα 5.14: Αναπαράσταση λεκτικής μεταβλητής «ηλικία» (Πρωταρχικές Λεκτικές Τιμές) (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])



Σχήμα 5.15: Αναπαράσταση λεκτικής μεταβλητής «ηλικία» (Σύνθετες Λεκτικές Τιμές) (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

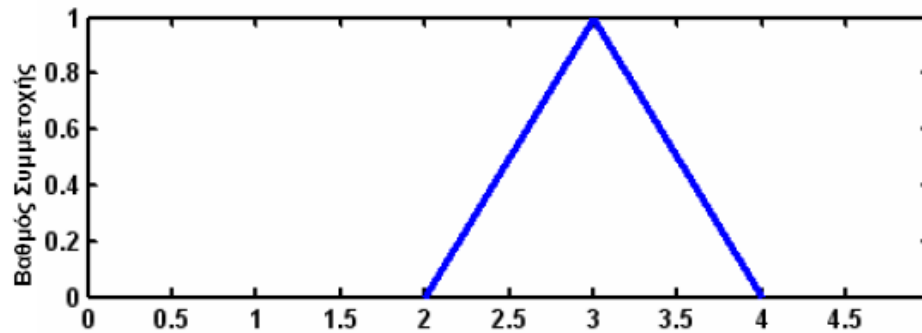
Στο παράδειγμα του σχήματος 5.14 μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το σύνολο ορισμού αποτελείται από ορισμένους πρωταρχικούς όρους (primary terms) όπως «νέος», «μεσήλικας» και «γέρος» που τροποποιούνται στο σχήμα 5.15, από την άρνηση «όχι» (not), και / ή από τις σταθμίσεις της μορφής «πολύ» (very), «λίγο» (more or less), οι οποίες έπειτα συνδέονται με συνδετικούς όρους, όπως το «και» και το διαζευκτικό όρο «ή».

Επομένως συμπεραίνουμε ότι είναι δυνατόν από έναν αρχικά μικρό αριθμό πρωταρχικών λεκτικών τιμών, να προκύψει ένας πολύ μεγαλύτερος αριθμός σύνθετων λεκτικών τιμών με τη χρήση λεκτικών τελεστών όπως το AND (και), το OR (ή), το NOT (όχι), το VERY (πολύ) κλπ. Όπως ήδη αναφέρθηκε, τέτοιοι τελεστές ουσιαστικά επηρεάζουν κατά δεδομένο τρόπο τη συνάρτηση συμμετοχής που αντιστοιχεί σε μια λεκτική τιμή. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνεται η μορφή της συνάρτησης συμμετοχής που αντιστοιχεί σε μια πρωταρχική λεκτική τιμή κάτω από τη δράση συγκεκριμένων τελεστών.

Λεκτικοί Τελεστές	Επίδραση στη συνάρτηση συμμετοχής
Συστολή (πολύ) CON A,	$\mu_{\text{CON}(A)}(x) = [\mu_A(x)]^2$
Διαστολή (λίγο) DIL A	$\mu_{\text{DIL}(A)}(x) = \sqrt{\mu_A(x)}$
Τομή (και) A AND B	$\mu_{A \text{ AND } B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$
Ένωση (ή) A OR B	$\mu_{A \text{ OR } B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$
Συμπλήρωμα (όχι) NOT A	$\mu_{\neg A}(x) = [1 - \mu_A(x)]$

Οι ασαφείς μεταβλητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ασαφείς κανόνες και στην ασαφή συλλογιστική, που θα εξεταστεί παρακάτω. Οι ασαφείς αριθμοί (fuzzy numbers) είναι ασαφή υποσύνολα του συνόλου των πραγματικών αριθμών και

χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές ελέγχου. Για παράδειγμα, η συνάρτηση συμμετοχής του αριθμού «ασαφές 3» θα μπορούσε να είναι όπως στο σχήμα 5.16. Συνήθως χρησιμοποιούνται τριγωνικές, τραπεζοειδείς ή εκθετικές (π.χ. Γκαουσιανές) συναρτήσεις συμμετοχής.



Σχήμα 5.16: Συνάρτηση συμμετοχής του αριθμού «ασαφές 3» (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

*Ασαφής πρόταση* είναι αυτή που θέτει μια τιμή σε μια ασαφή μεταβλητή. Για παράδειγμα, στην ασαφή πρόταση «Το ύψος του Νίκου είναι μέτριο», το «ύψος» είναι η ασαφής μεταβλητή και «μέτριο» είναι ένα ασαφές σύνολο που αποτελεί την τιμή αυτής της μεταβλητής.

Ένα έμπειρο σύστημα (expert system) στην παραδοσιακή του μορφή αποτελείται από μια αλληλουχία κανόνων που περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός φυσικού συστήματος. Οι έμπειροι κανόνες βασίζονται στην κλασική λογική και στη θεωρία συνόλων και ακολουθούν το επόμενο σχήμα ορισμού:

If condition A AND condition B then action C

Τα σύνολα A, B είναι κλασικά σύνολα τα οποία προσδιορίζουν καταστάσεις εισόδου του συστήματος, ενώ το σύνολο C εκφράζει μια κατάσταση ή ένα σήμα εξόδου. Οι έμπειροι κανόνες χρησιμοποιούν τους κλασικούς λογικούς τελεστές AND, OR και NOT για τη σύνδεση των μεταβλητών. Ένα σύνολο από διαφορετικούς κανόνες τέτοιας μορφής συνθέτει μια έμπειρη βάση κανόνων (expert rule bank), η οποία εκφράζει την εμπειρία που χρησιμοποιείται στην περιγραφή λειτουργιών ελέγχου ενός συστήματος. Τα περισσότερα συστήματα εμφανίζονται να είναι αρκετά πιο πολύπλοκα από ό,τι μια απλή λίστα κανόνων και επομένως η εξαγωγή της απόφασης δεν είναι μια απλή εφαρμογή των κανόνων αυτών. Η ιδέα της χρήσης της ασαφούς λογικής μέσα σε μία βάση κανόνων προτάθηκε αρχικά από τον Mamdani (1976). Έτσι η θεώρηση των συνόλων στον παραπάνω κανόνα ως ασαφών επιτρέπει την ενσωμάτωση της θεωρίας των ασαφών συνόλων σε ένα έμπειρο σύστημα. Σε έναν ασαφή κανόνα της μορφής if – then το τμήμα if του κανόνα είναι η υπόθεση (antecedent premise), ενώ το τμήμα then είναι το συμπέρασμα (consequence) του κανόνα.

### 5.8 Ασαφής συλλογιστική

Μια βάση ασαφών κανόνων αποτελείται από ένα σύνολο ασαφών κανόνων της μορφής if – then που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα σύστημα. Ο μηχανισμός εξαγωγής συμπερασμάτων ενός συνόλου ασαφών κανόνων καλείται *ασαφής συλλογιστική* (fuzzy reasoning) ή *προσεγγιστική συλλογιστική* (approximate reasoning).

Ένας *ασαφής κανόνας* είναι μία υπό συνθήκη έκφραση που συσχετίζει δύο ή περισσότερες ασαφείς προτάσεις. Στην απλούστερη εκδοχή, ένας ασαφής κανόνας έχει τη μορφή:

If x is A then y is B

Για παράδειγμα, στον κανόνα «Εάν η ταχύτητα είναι μέτρια, τότε η πίεση στα φρένα πρέπει να είναι μέτρια», οι όροι «ταχύτητα» και «πίεση» είναι οι ασαφείς μεταβλητές που έχουν ως τιμή το ασαφές σύνολο «μέτρια». Η αναλυτική περιγραφή ενός ασαφούς κανόνα if – then είναι μια ασαφής σχέση  $R(x,y)$ , που ονομάζεται σχέση συνεπαγωγής (implication relation), η οποία προκύπτει με κατάλληλο συνδυασμό του if και του then τμήματος του κανόνα, δηλαδή των συναρτήσεων συμμετοχής των ασαφών συνόλων A και B. Στη γενική της μορφή η συνάρτηση συνεπαγωγής ορίζεται ως:

$$R(x,y) \equiv \mu(x,y) = \varphi(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

Η συνάρτηση  $\varphi$  ονομάζεται τελεστής συνεπαγωγής (implication operator) και υποδεικνύει τον ακριβή τρόπο με τον οποίο πρέπει να συνδυαστούν οι συναρτήσεις συμμετοχής του if και του then τμήματος ενός ασαφούς κανόνα, ώστε να προκύψει η αναλυτική του έκφραση. Ο επόμενος πίνακας παρέχει τις πιο σημαντικές από τις εκφράσεις που έχουν προταθεί για τον τελεστή συνεπαγωγής.

Ονομασία Τελεστή	Αναλυτική έκφραση του $\varphi[\mu_A(x), \mu_B(y)]$
$\varphi_m$ : Zadeh Max-Min	$[\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \vee [1 - \mu_A(x)]$
$\varphi_c$ : Mandani Min	$\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)$
$\varphi_p$ : Larsen Product	$\mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$
$\varphi_a$ : Arithmetic	$1 \wedge [1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]$
$\varphi_b$ : Boolean	$(1 - \mu_A(x)) \vee \mu_B(y)$

Η σχέση συνεπαγωγής χρησιμοποιείται στα προβλήματα που προκύπτουν κατά τη συλλογιστική με ασαφείς κανόνες. Αυτά στη γενική τους μορφή είναι δύο ειδών:

If x is A then y is B  
x is A' y is B' (?)

δηλαδή είναι γνωστή η τιμή  $A'$  της ασαφούς μεταβλητής  $x$  και πρέπει να υπολογιστεί η τιμή  $B'$  της ασαφούς μεταβλητής  $y$  και της:

$$\begin{array}{l} \text{If } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B \\ x \text{ is } A' (?) y \text{ is } B' \end{array}$$

δηλαδή είναι γνωστή η τιμή  $B'$  της ασαφούς μεταβλητής  $y$  και πρέπει να υπολογιστεί η τιμή  $A'$  της ασαφούς μεταβλητής  $x$ .

Το πρώτο πρόβλημα διευθετείται μέσω της συλλογιστικής διαδικασίας GMP (Generalized Modus Ponens) που ορίζει ότι  $B' = A' \circ R(x, y)$ , ενώ το δεύτερο διευθετείται μέσω της συλλογιστικής διαδικασίας GMT (Generalized Modus Tollens), που ορίζει ότι  $A' = R(x, y) \circ B'$ . Και στις δύο περιπτώσεις, η σχέση συνεπαγωγής  $R(x, y)$  που έχει επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί, πρέπει να συνδυασθεί με την κατά περίπτωση γνωστή παράμετρο ( $A'$  ή  $B'$ ), ώστε να υπολογιστεί η άγνωστη παράμετρος. Υπενθυμίζεται εδώ ότι οι δύο περισσότερο διαδεδομένες μέθοδοι σύνθεσης είναι η max – min και η max – product.

Ο βασικός κανόνας συνεπαγωγής στην παραδοσιακή δυαδική (binary) λογική είναι η Modus Ponens, σύμφωνα με την οποία μπορούμε να εξάγουμε αν η υπόθεση  $B$  είναι αληθής από την ορθότητα της  $A$  και την υπόθεση  $A \rightarrow B$ . Για παράδειγμα αν η  $A$  είναι η πρόταση «η τομάτα είναι κόκκινη» και  $B$  η πρόταση «η τομάτα είναι ώριμη», τότε έχουμε

$$\begin{array}{ll} \text{Παραδοχή 1 (γεγονός)} & x \text{ is } A \\ \text{Παραδοχή 2 (κανόνας)} & \text{if } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B, \\ \hline \text{Συμπέρασμα} & y \text{ is } B \end{array}$$

Όσον αφορά την ανθρώπινη συλλογιστική, η Modus Ponens εφαρμόζεται κατά προσέγγιση στις περισσότερες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, αν έχουμε τον ίδιο κανόνα συνεπαγωγής «αν (if) η τομάτα είναι κόκκινη, τότε (then) είναι ώριμη» και γνωρίζουμε ότι «η τομάτα είναι λίγο έως πολύ κόκκινη», τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι «η τομάτα είναι λίγο έως πολύ ώριμη». Αυτό μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$\begin{array}{ll} \text{Παραδοχή 1 (γεγονός)} & x \text{ is } A' \\ \text{Παραδοχή 2 (κανόνας)} & \text{if } x \text{ is } A \text{ then } y \text{ is } B, \\ \hline \text{Συμπέρασμα} & y \text{ is } B' \end{array}$$

Όπου  $A'$  είναι παρόμοιο (έχει αρκετές ομοιότητες, αναλογίες) με το  $A$  και το  $B'$  είναι παρόμοιο με το  $B$ . Όταν τα  $A$ ,  $B$ ,  $A'$  και  $B'$  είναι ασαφή σύνολα κατάλληλων συνόλων αναφοράς, η μόλις περιγραφείσα διαδικασία αποκαλείται ως προσεγγιστική συλλογιστική ή ασαφής συλλογιστική, ή αλλιώς Generalized Modus Ponens (GMP) γιατί συμπεριλαμβάνει την Modus Ponens ως ειδική περίπτωση της. Προκειμένου να γίνει κατανοητή η GMP, θα πρέπει πρώτα να παρουσιαστεί ο συνθετικός κανόνας συνεπαγωγής.

Ο *συνθετικός κανόνας συνεπαγωγής* (max – min compositional rule) διατυπώθηκε από τον Zadeh το 1973 ως μέθοδος συλλογιστικής κάτω από αβεβαιότητα.

Έστω A ένα ασαφές σύνολο στο X, B ένα ασαφές σύνολο στο Y και R μια ασαφής σχέση στο  $X \times Y$

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

$$B = \{(y, \mu_B(y)) \mid y \in Y, \mu_B(y): B \rightarrow [0,1]\}$$

$$R = \{((x,y), \mu_R(x,y)) \mid (x,y) \in X \times Y, \mu_R(x,y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}\}$$

Τότε, δεδομένων των A και R, το B προκύπτει από τη σχέση  $B = A \circ R$  μέσω της σχέσης

$$\mu_B(y) = \max_x \{\min\{\mu_A(x), \mu_R(x,y)\}\}$$

όπου  $\circ$  το σύμβολο του max – min composition τελεστή.

Χρησιμοποιώντας τον συνθετικό κανόνα συνεπαγωγής, μπορούμε να αναπαραστήσουμε τη διαδικασία συμπερασμού της ασαφούς συλλογιστικής μέσα από τον παρακάτω ορισμό:

### Ορισμός

Έστω A, A' και B ασαφή σύνολα ορισμένα στο X, X και Y αντίστοιχα. Υποθέτουμε ότι η ασαφής πρόταση  $A \rightarrow B$  είναι εκφρασμένη ως ασαφής σχέση R στο  $X \times Y$ . Τότε το ασαφές σύνολο B που δημιουργείται από το «x είναι A» και τον ασαφή κανόνα «if x is A then y is B» προσδιορίζεται από

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \max_x \min[\mu_{A'}(x), \mu_R(x,y)] \\ &= \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x,y)] \end{aligned}$$

ή ισοδύναμα

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B)$$

Τώρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την διαδικασία εξαγωγής συμπερασμάτων της ασαφούς συλλογιστικής, προκειμένου να εξάγουμε συμπεράσματα, δεδομένου ότι ο ασαφής ισχυρισμός  $A \rightarrow B$  προσδιορίζεται ως μια κατάλληλη ασαφής σχέση. Συμπερασματικά, με έναν ασαφή κανόνα της μορφής «IF x is A then y is B» και έστω συλλογιστική διαδικασία GMP (δηλαδή γνωστό το A' ως τιμή του x και ζητούμενο το B' ως τιμή του y), τα ασαφή σύνολα A και B συνδυάζονται με κάποιον από τους τελεστές συνεπαγωγής και παράγουν τη σχέση συνεπαγωγής  $R(x,y)$ , από την οποία μέσω σύνθεσης (έστω max – min σύνθεση) με το A' προκύπτει η άγνωστη ποσότητα B'.

Η περιγραφή ενός προβλήματος με ασαφείς μεταβλητές, ασαφείς τιμές και ασαφείς κανόνες ονομάζεται ασαφής λεκτική περιγραφή του προβλήματος (fuzzy linguistic description).

### 5.9 Η Αρχή της επέκτασης (extension principle)

Η αρχή της επέκτασης είναι μια μαθηματική μέθοδος που επιτρέπει την επέκταση των εννοιών και των υπολογιστικών τεχνικών των κλασικών μαθηματικών στο πλαίσιο των ασαφών. Η αρχή της επέκτασης προτάθηκε από τον Zadeh (1965, 1973) και αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο που επιτρέπει την ενσωμάτωση των ασαφών συνόλων στην κλασική μαθηματική ανάλυση. Με βάση την αρχή της επέκτασης μπορούν να οριστούν αριθμητικοί τελεστές για την πρόσθεση, την αφαίρεση, το πολλαπλασιασμό και τη διαίρεση των ασαφών συνόλων, καθιστώντας δυνατή την εφαρμογή μη-ασαφών μαθηματικών εννοιών στο πεδίο της ασαφούς ανάλυσης. Η αρχή της επέκτασης εφαρμόζεται ιδιαίτερα σε προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού των οποίων οι παράμετροι δίνονται με τη μορφή ασαφών συνόλων.

Η αντιστοίχιση  $f$  από ένα σύνολο  $X$  σε ένα σύνολο  $Y$  απεικονίζεται με τον παρακάτω τρόπο:

$$f: X \rightarrow Y,$$

όπου το σύνολο  $X$  είναι το πεδίο της  $f$  και  $Y$  το εύρος της  $f$ .

Μία τέτοια αντιστοίχιση μπορεί να θεωρηθεί ως ένας κανόνας που αναθέτει κάποιο στοιχείο  $y = f(x)$  στο  $Y$ , σε κάθε στοιχείο  $x$  στο  $X$ . Η αντιστοίχιση  $f$  αποτελεί συνάρτηση στην περίπτωση που το  $X$  και το  $Y$  αποτελούν σύνολα πραγματικών αριθμών. Για ένα υποσύνολο  $A$  του  $X$ , η απεικόνιση του  $A$  μέσω της  $f$  αποτελεί ένα υποσύνολο του  $Y$  και ορίζεται ως:

$$f(A) = \{y \mid y = f(x), x \in A\},$$

Επιπλέον, για ένα υποσύνολο  $B$  του  $Y$ , η αντίστροφη απεικόνιση του  $B$  μέσω της  $f$  αποτελεί ένα υποσύνολο του  $X$  και ορίζεται ως:

$$f^{-1}(B) = \{x \mid f(x) = y, y \in B\},$$

όπου η  $f^{-1}$  αποτελεί την αντίστροφη αντιστοίχιση της  $f$ .

Έστω ότι το  $B$  είναι ένα ασαφές σύνολο στο  $Y$ , του οποίου η συνάρτηση συμμετοχής είναι  $\mu_B(y)$ . Τότε η αντίστροφη αντιστοίχιση  $f^{-1}$  δημιουργεί ένα ασαφές σύνολο  $A$  στο  $X$ , του οποίου η συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται ως εξής:

$$\mu_A(x) = \mu_B(f(x)), \text{ για κάθε } y \in Y$$

για όλα τα  $x \in X$  που αντιστοιχούν μέσω της  $f$  στο  $y$ .

Κατά ανάλογο τρόπο, όταν το  $A$  δεν είναι πλέον ένα σαφώς ορισμένο σύνολο, αλλά ένα ασαφές σύνολο μέσα στο  $X$ , τότε το ερώτημα που δημιουργείται είναι ποια είναι η συνάρτηση συμμετοχής για το ασαφές σύνολο  $B$  στο  $Y$  που δημιουργείται μέσα από την αντιστοίχιση  $f: X \rightarrow Y$ .

Αν η  $f$  είναι ένα – προς – ένα συνάρτηση, τότε η απάντηση είναι

$$\mu_f(A)(y) = \mu_A(x)$$

Εάν  $\varsigma$  η  $f$  δεν είναι ένα προς ένα συνάρτηση, τότε προκύπτει ασάφεια στην περίπτωση που δύο ή περισσότερα διακριτά στοιχεία στο  $X$ , για παράδειγμα  $x_1$  και  $x_2$ , αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο  $y$  του  $Y$ . Για τη διαλεύκανση αυτής της ασάφειας ο Zadeh (1965) πρότεινε την ανάθεση του μεγαλύτερου βαθμού συμμετοχής εκ των δύο στο  $y$ . Γενικεύοντας καταλήγουμε στο ότι η συνάρτηση συμμετοχής για το  $B$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$\mu_B(y) = \sup_{x \in f^{-1}(y)} \mu_A(x)$$

όπου  $f^{-1}(y)$  αποτελεί το σύνολο των σημείων του  $X$  που αντιστοιχίζονται στο  $y$  μέσω της  $f$ .

Την αρχική διατύπωση του Zadeh (1965) ακολούθησαν τροποποιήσεις από τον ίδιο τον Zadeh (1973), τον Gaines (1976), τον Jain (1976, 1977) και άλλους.

Παρακάτω παρέχουμε τον γενικευμένο ορισμό της αρχής της επέκτασης, που εφαρμόζεται στον Καρτεσιανό χώρο.

### Ορισμός

Έστω  $X$  ένα καρτεσιανό γινόμενο συνόλων αναφοράς,  $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$  και  $A_1, A_2, \dots, A_n$  ασαφή υποσύνολα των  $X_1, X_2, \dots, X_n$  αντίστοιχα και  $f: X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow Y$  με  $y = f(x_1 \times x_2 \times \dots \times x_n)$  μια σαφώς ορισμένη (crisp) συνάρτηση. Η Αρχή της Επέκτασης μεταφέρει την ασάφεια των  $A_1, A_2, \dots, A_n$  σε ένα ασαφές σύνολο  $B$  του  $Y$ , όπου:

$$B = \{(y, \mu_B(y)) \mid y = f(x_1, \dots, x_n), (x_1, \dots, x_n) \in X_1 \times \dots \times X_n\}$$

Και

$$\mu_B(y) = \begin{cases} \sup_{(x_1, \dots, x_n) \in f^{-1}(y)} \min\{\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_n}(x_n)\}, & f^{-1}(y) \neq \emptyset \\ 0, & f^{-1}(y) = \emptyset \end{cases}$$



Η αρχή της επέκτασης επιτρέπει σε μια σαφώς ορισμένη (crisp) συνάρτηση  $f$  των κλασικών συνόλων, με πεδίο ορισμού το σαφές σύνολο  $X$ , να αλλάξει πεδίο ορισμού, σε συγκεκριμένα ασαφή υποσύνολα του  $X$  (αντί για το ίδιο το σύνολο  $X$ ).

Για παράδειγμα αν  $A$  είναι ένα ασαφές υποσύνολο του σαφούς συνόλου  $X$  και  $f$  η crisp συνάρτηση ορισμένη στο  $X$ , τότε η αρχή της επέκτασης φανερώνει πώς η συνάρτηση  $f$  μπορεί να εφαρμοστεί πάνω στο ασαφές σύνολο  $A$ .

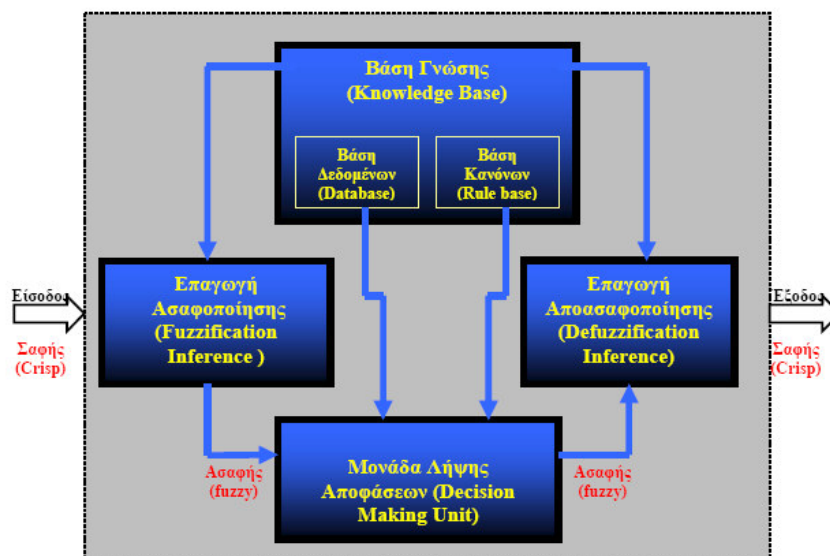
Συγκεκριμένα αν  $A = \mu A(x_1)/x_1 + \dots + \mu A(x_n)/x_n$ , τότε  $f(A) = f(\mu A(x_1)/x_1 + \dots + \mu A(x_n)/x_n) = \mu A(x_1)/f(x_1) + \dots + \mu A(x_n)/f(x_n)$ .

Σημειώνεται ότι η  $f$  εφαρμόζεται πάντα πάνω στα στοιχεία του κλασικού συνόλου  $X$ .

Συμπερασματικά, η αρχή της επέκτασης επιτρέπει σε υπαρκτούς αλγόριθμους που έχουν οριστεί για σαφή δεδομένα, να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση που τα δεδομένα είναι, για κάποιο λόγο, ασαφή.

### 5.10 Συστήματα ασαφούς συλλογιστικής

Ένα σύστημα ασαφούς συμπερασμού (fuzzy inference system) αποτελεί μια δομή υπολογισμού που βασίζεται στη θεωρία των ασαφών συνόλων, στους ασαφείς κανόνες if – then και στην ασαφή συλλογιστική. Τα ασαφή συστήματα έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε διάφορα πεδία, όπως στον αυτόματο έλεγχο, στην ταξινόμηση δεδομένων, τη λήψη αποφάσεων και στα έμπειρα συστήματα. Ένα σύστημα ασαφούς συμπερασμού είναι γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως «fuzzy inference system», «fuzzy rule based system», «fuzzy expert system», «fuzzy logic controller» ή απλά «fuzzy model». Ένα σύστημα για συλλογιστική με βάση την ασαφή λογική περιγράφεται, στην γενική του μορφή από το σχήμα 5.17.



Σχήμα 5.17: Σύστημα ασαφούς συμπερασμού (Πηγή: Zadeh, 1970, [42])

- **Βάση γνώσης (knowledge base):** Αποτελείται από τη βάση κανόνων και τη βάση δεδομένων.
- **Βάση κανόνων (rule base):** Περιέχει την κωδικοποίηση ενός αριθμού ασαφών κανόνων (fuzzy rules) της μορφής if – then.
- **Βάση δεδομένων (database):** Ορίζει τις συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών συνόλων που χρησιμοποιούνται στους ασαφείς κανόνες.
- **Μονάδα λήψης αποφάσεων (decision making unit):** Χρησιμοποιεί τους κανόνες και τις συναρτήσεις συμμετοχής, προκειμένου να υλοποιήσει ευέλικτα τη λειτουργία της εξαγωγής συμπερασμάτων.
- **Επαγωγή Ασαφοποίησης (fuzzyfication inference):** Μετασχηματίζει τα δεδομένα εισόδου σε βαθμούς συμμετοχής χρησιμοποιώντας τιμές λεκτικών μεταβλητών.
- **Επαγωγή Αποασαφοποίησης (defuzzification inference):** Μετασχηματίζει τα ασαφή σύνολα, που επιστρέφονται ως αποτελέσματα της επεξεργασίας, σε τιμές εξόδου που μπορούν να είναι είτε κλιμακωτές (scalar) είτε διανυσματικές (vector).

Η κατασκευή ενός συστήματος (π.χ. ελέγχου) βασισμένου σε ασαφή λογική, προϋποθέτει καταρχήν πολύ καλή κατανόηση της διαδικασίας που πρόκειται να μοντελοποιηθεί. Το δυσκολότερο σημείο είναι η επιλογή των ασαφών μεταβλητών, των τιμών καθώς και των κανόνων με τους οποίους θα συνδυαστούν. Συνήθως ο προσδιορισμός των συναρτήσεων συμμετοχής γίνεται αυτόματα με τη χρήση νευρωνικών δικτύων. Άλλα σημεία που απαιτούν προσοχή είναι η επιλογή του κατάλληλου τελεστή συνεπαγωγής, της μεθόδου αποσαφήνισης, κλπ. Ένα από τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένα σύστημα ασαφούς συλλογιστικής είναι η σταθερότητα, δηλαδή η ικανότητά του να εμφανίζει καλή συμπεριφορά σε όλο το φάσμα τιμών εισόδου. Συνήθως η σταθερότητα συμπεριλαμβάνεται σαν ασαφής μεταβλητή στην περιγραφή του συστήματος και σχετικοί κανόνες ρυθμίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος σε ακραίες καταστάσεις.

Τα ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων (fuzzy inference systems) που εμφανίζονται πιο συχνά είναι το μοντέλο του Mamdani (1976) και το μοντέλο των Takagi-Sugeno-Kang (1985).

### 5.11 Η μέθοδος Mamdani

Το **ασαφές μοντέλο Mamdani** [87] αποτελεί την πρώτη προσπάθεια υλοποίησης συστημάτων ασαφούς ελέγχου. Η γενική μορφή των λεκτικών ασαφών κανόνων σε ένα ασαφές μοντέλο Mamdani είναι της μορφής:

$R_j$ : If  $x$  is  $A_j$  then  $y$  is  $B_j$   $j = 1, \dots, c$

Όπου  $x$  είναι η μεταβλητή της υπόθεσης του κανόνα (είσοδος) και  $y$  η μεταβλητή του συμπεράσματος (αποτέλεσμα) του κανόνα. Τα  $x$  και  $y$  αποτελούν τις λεκτικές μεταβλητές και τα σύμβολα  $A_j$  και  $B_j$  αποτελούν τις λεκτικές τιμές (ασαφή σύνολα) που ορίζονται από τις συναρτήσεις συμμετοχής (MFs)  $\mu_{A_j}(x): X \rightarrow [0,1]$  και  $\mu_{B_j}(y): Y \rightarrow [0,1]$  αντίστοιχα. Τέλος, το  $c$  αποτελεί τον αριθμό των κανόνων στο ασαφές σύστημα.

Τα ασαφή σύνολα  $A_j$  ορίζουν περιοχές στο χώρο των υποθέσεων, για τις οποίες ισχύουν τα αντίστοιχα συμπεράσματα των προτάσεων. Στην περίπτωση που η είσοδος  $x$  αποτελεί ένα  $n$ -διαστάσεων διάνυσμα, προτιμάται για λόγους ευχρηστίας η υιοθέτηση  $n$ -ασαφών προτάσεων στην αναπαράσταση του  $n$  διαστάσεων ασαφούς συνόλου, από ό,τι η αναπαράσταση του  $A_j$  ως ένα  $n$  διαστάσεων ασαφές σύνολο.

Συγκεκριμένα ο λεκτικός ασαφής κανόνας λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$R_j$  : If  $x$  is  $A_{x_1}$  AND ... AND  $x_n$  is  $A_{x_n}$  then  $y$  is  $B$

Οι μονοδιάστατες συναρτήσεις συμμετοχών  $A_{x_i}$ ,  $i = 1, \dots, n$  μπορούν να λάβουν διάφορες μορφές (τριγωνική, καμπανοειδή, γκαουσιανή κλπ). Για δεδομένη είσοδο, τα τελικά ασαφή σύνολα εξάγονται με βάση τον τελεστή ασαφούς συνεπαγωγής (fuzzy implication operator)  $A \rightarrow B$ , που μπορεί να υπολογιστεί με βάση το ελάχιστο (Mamdani), το γινόμενο (Larsen) ή κάποιον άλλο τύπο συνεπαγωγής (συνεπαγωγή κατά Lukasiewicz ή συνεπαγωγή κατά Zadeh).

Ελάχιστο (Mamdani minimum)

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min [\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

Γινόμενο (Larsen product)

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$$

Τελεστής κατά Lukasiewicz

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min [1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]$$

Τελεστής κατά Zadeh

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max \{ \min [\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x) \}$$

Η τιμή συμμετοχής  $\mu_A(x)$  στις παραπάνω εξισώσεις αποτελεί την ενεργοποίηση του κανόνα (rule activation) ή εναλλακτικά το βαθμό εκπλήρωσης (degree of fulfillment) και υπολογίζεται μέσω της τομής των  $A_{x_i}$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Οι δύο πιο συνήθεις τύποι για τον υπολογισμό της τομής των ασαφών συνόλων είναι αυτοί του ελαχίστου και του γινομένου:

Ελάχιστο  $\mu_A(x) = \min [\mu_{A_{x1}}(x), \mu_{A_{x2}}(x), \dots, \mu_{A_{xn}}(x)]$

Γινόμενο  $\mu_A(x) = \mu_{A_{x1}}(x) \cdot \mu_{A_{x2}}(x) \cdot \dots \cdot \mu_{A_{xn}}(x)$

Υποθέτοντας ότι οι συναρτήσεις συμμετοχής των αποδόσεων είναι συμμετρικές με κέντρα τα  $y_j$ ,  $j = 1, \dots, c$  και με ίσες διασπορές, το γινόμενο κατά Larsen απλοποιείται στην παρακάτω μορφή:

$$\mu_{A_j \rightarrow B_j}(x, y) = \mu_{A_j}(x) \cdot y_j$$

Το αποσαφηνισμένο αποτέλεσμα του ασαφούς μοντέλου μπορεί να υπολογιστεί με βάση την αποασαφοποίηση με τη μέθοδο του Κέντρου Βάρους (center of gravity) ως εξής:

$$y_{FS} = \frac{\sum_{j=1}^c \mu_{A_j}(x) y_j}{\sum_{j=1}^c \mu_{A_j}(x)}$$

Στην περίπτωση που οι συναρτήσεις συμμετοχής έχουν διαφορετικές διασπορές (spreads), οι διαφορές αυτές μπορούν να συνυπολογιστούν λαμβάνοντας το Σταθμισμένο Κέντρο Βάρους (weighted center of gravity).

$$y_{FS} = \frac{\sum_{j=1}^c \mu_{A_j}(x) w_j y_j}{\sum_{j=1}^c \mu_{A_j}(x) w_j}$$

όπου  $w_j$  είναι το εμβαδόν του τελικού ασαφούς συνόλου  $B_j$ .

## 5.12 Η μέθοδος Takagi – Sugeno

Το **ασαφές μοντέλο Sugeno** [87], γνωστό και ως μοντέλο TSK, παρουσιάστηκε από της Takagi και Sugeno (1985). Στην γενική του μορφή το μοντέλο αυτό αναπτύσσει μια συστηματική μέθοδο δημιουργίας ασαφών κανόνων από ένα σύνολο δεδομένων.

Η τυπική μορφή ενός ασαφούς κανόνα στο μοντέλο αυτό είναι της μορφής:

$$\text{If } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } \dots \text{ and } x_N \text{ is } A_N \text{ then } y = f(x_1, \dots, x_N)$$

Όπου τα  $A_k$ ,  $k = 1, \dots, N$  αποτελούν τις ασαφείς τιμές των υποθέσεων (ασαφή σύνολα εισόδου). Η ειδοποιός διαφοροποίηση του μοντέλου αυτού έγκειται στη συναρτησιακή μορφή του αποτελέσματος που βρίσκεται σε αντιδιαστολή με το ασαφές αποτέλεσμα που δίδεται από το μοντέλο Mamdani.

Συνήθως η συνάρτηση  $f$  είναι πολυωνυμική ως προς τις μεταβλητές εισόδου  $x_k$ , δηλαδή ισχύει  $f(x_1, \dots, x_N) = p_1 x_1 + \dots + p_N x_N + p_0$ . Για ένα σύνολο  $m$  ασαφών κανόνων, το μοντέλο συμπερασμού υπολογίζει μια έξοδο συνεχούς τιμής  $y$  εκφρασμένη ως σταθμισμένο μέσο όρο (weighted average) των επιμέρους εξόδων  $y_i$  ( $i = 1, \dots, m$ )

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m w_i y_i}{\sum_{j=1}^m w_j} = \frac{\sum_{i=1}^m w_i}{\sum_{j=1}^m w_j} (p_i x_i + \dots + p_i x_N + p_i 0)$$

όπου το  $w_i$  εκφράζει την ισχύ του κανόνα  $I$  ( $w_i = \mu_{A_{i1}}(x) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{iN}}(x_N)$ ). Το ασαφές μοντέλο Sugeno προσφέρει ένα μεγάλο πλεονέκτημα ως προς την περιγραφή πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου, επιτρέποντας τη διάσπαση ενός συστήματος σε μικρότερα υποσυστήματα και επιπλέον το διαμερισμό του χώρου εισόδου.

Στην επόμενη παράγραφο θα αναφερθούμε στα υβριδικά συστήματα υπολογιστικής νοημοσύνης, τα οποία είναι εξελιγμένα συστήματα που χρησιμοποιούν συνδυασμό μεθόδων της ασαφούς λογικής και των νευρωνικών δικτύων.

### 5.13 Υβριδικά Συστήματα Υπολογιστικής Νοημοσύνης

#### 5.13.1 Γενικά

Τα νευρωνικά δίκτυα και τα ασαφή συστήματα μπορούν να θεωρηθούν ως ισοδύναμες μέθοδοι, όσον αφορά τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Όλοι οι παραπάνω λόγοι οδήγησαν στην ανάπτυξη συνδυασμών μεθόδων των δύο ερευνητικών πεδίων με κύριο στόχο τον περιορισμό των παραπάνω μειονεκτημάτων. Τα υβριδικά συστήματα υπολογιστικής νοημοσύνης (Hybrid Computational Intelligent Systems) περιλαμβάνουν συνθέσεις των δύο παραπάνω μεθόδων [88].

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι υβριδικές τεχνικές μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω σημεία:

- Η δημιουργία καινούριων υπολογιστικών μοντέλων προσφέρει νέες δυνατότητες θεωρητικής εμβάθυνσης.
- Ανοίγονται καινούριοι ορίζοντες και διαστάσεις στον τομέα των εφαρμογών με τη δυνατότητα χρησιμοποίησης κάθε μεθόδου για την επίλυση διάφορων μορφών προβλημάτων της.
- Αυξάνονται οι δυνατότητες ως προς την ελευθερία σχεδιασμού και ανάπτυξη ευφυών τεχνικών, και παρέχονται εναλλακτικές λύσεις συμβάλλοντας στην πληρέστερη εξέταση των προβλημάτων.
- Παρέχεται δυνατότητα επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων, που με τις μεθόδους θα φαίνονταν ανεπίλυτα.
- Διευκολύνεται η χρήση και ενσωμάτωση μεθόδων από τις γνωστικές περιοχές.

Συνδυάζοντας τα νευρωνικά δίκτυα και τα ασαφή συστήματα δημιουργείται μια νέα οικογένεια υβριδικών τεχνικών, που είναι τα ασαφή νευρωνικά δίκτυα (Neural – Fuzzy Networks), τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν στην επίλυση προβλημάτων ασαφών συστημάτων.

### 5.13.2 Ασαφή Νευρωνικά Δίκτυα

Οι υπάρχουσες τεχνικές ασαφούς συμπερασμού παρουσιάζουν τις παρακάτω δυσκολίες [88]:

- Την έλλειψη μιας ακριβούς μεθόδου καθορισμού των συναρτήσεων συμμετοχής.
- Την έλλειψη δυνατότητας μάθησης ή προσαρμοστικότητας στις ασαφείς διαδικασίες.

Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται στην προσαρμογή των συναρτήσεων συμμετοχής ασαφών συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε προβλήματα ελέγχου. Μολονότι η ασαφής λογική χαρακτηρίζεται από την ικανότητα εφαρμογής έμπειρης γνώσης μέσω ασαφών κανόνων, ο χρόνος σχεδιασμού και προσαρμογής των λεκτικών τιμών (ασαφών συνόλων) σε ένα πρόβλημα είναι τις περισσότερες φορές απαγορευτικός, ιδιαίτερα όσον αφορά σε διαδικασίες δοκιμής και σφάλματος (trial and error). Επιπλέον, ο συντονισμός των συναρτήσεων συμμετοχής καθίσταται μια περίπλοκη διαδικασία, καθώς υποθέτει τον έμπειρο καθορισμό ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων. Οι τεχνικές νευρωνικών δικτύων μέσα από τις διαδικασίες μάθησης επιτρέπουν την αυτοματοποίηση του σχεδιασμού ασαφών συστημάτων, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητά τους και μειώνοντας σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο. Η βασική δομή των ασαφών νευρωνικών δικτύων αποτελεί μια άμεση απεικόνιση ενός ασαφούς συστήματος πάνω στη δομή ενός νευρωνικού δικτύου (αποασαφοποίηση) μετατροπής των εισόδων και εξόδων αντίστοιχα. Η πρώτη μετατροπή αποτελεί ουσιαστικά την ασαφοποίηση των δεδομένων εισόδου και έπειτα η δεύτερη μετατροπή συμβάλλει στην αποασαφοποίηση τους κατά την έξοδο<sup>2</sup>.

Ο αριθμός των κανόνων αντιστοίχισης μειώνεται σημαντικά με αυτόν τον τρόπο, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η απαιτούμενη πληροφορία για την εκκίνηση του συστήματος. Όπως έχουμε προαναφέρει, η θεωρία των ασαφών συνόλων ομοιάζει με τον ανθρώπινο τρόπο σκέψης και οργάνωσης της γνώσης και για αυτόν το λόγο τα ασαφή νευρωνικά δίκτυα παρέχουν έναν κατάλληλο μηχανισμό απόκτησης γνώσης και ένα φιλικό για τον άνθρωπο (αλλά και για τους υπολογιστές) τρόπο χειρισμού της.

Τα ασαφή νευρωνικά δίκτυα τελικά διεξάγουν μια σημείο – προς – σημείο αντιστοίχιση, αλλά με διαφορετικό τρόπο από τα νευρωνικά δίκτυα. Αποτελείται από τρία κύρια στάδια [88].

<sup>2</sup> Το σύνολο της παραπάνω προτάσεις αποτελεί υποσύνολο του χώρου του προβλήματος

Πρώτα μετατρέπουν τα δεδομένα εισόδου σε μια συνάρτηση συμμετοχής ασαφούς συνόλου. Στο επόμενο στάδιο διεξάγεται η διαδικασία της ασαφούς συλλογιστικής, ή με άλλα λόγια χρησιμοποιείται η ασαφής μνήμη συσχέτισης (fuzzy associative memory) για το συσχετισμό των ασαφών συνόλων της εισόδου με τα κατάλληλα ασαφή σύνολα της εξόδου. Στο τελευταίο στάδιο οι συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών εξόδων μετατρέπονται σε αριθμητικές εξόδους μέσα από τη διαδικασία της αποασαφοποίησης. Η λειτουργία των ασαφών νευρωνικών δικτύων είναι τέτοια που επιτρέπει την απόκτηση, αναπαράσταση και χρησιμοποίηση της γνώσης του ειδικού σε ένα αντικείμενο και αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές, όπως των προσαρμοστικών συστημάτων ελέγχου, όπου δεν μπορούν να προσδιοριστούν οι ακριβείς συναρτήσεις ενεργοποίησης του συστήματος και όπου τα σύνολα δεδομένων εκμάθησης δεν είναι αρκετά.

Εκτός από τα προβλήματα ελέγχου, τα ασαφή νευρωνικά δίκτυα μπορούν να εφαρμοστούν και σε προβλήματα αναγνώρισης προτύπων [89]. Η παραδοσιακή θεωρία συνόλων περιγράφει γεγονότα με απότομα όρια, τα οποία μπορούν να συμβούν ή να μη συμβούν. Τα παραδοσιακά-κλασικά σύνολα χρησιμοποιούν τη θεωρία πιθανοτήτων για να χαρακτηρίσουν την εμφάνιση ενός γεγονότος, υπολογίζοντας την πιθανότητα με την οποία ένα δοθέν γεγονός αναμένεται να συμβεί. Αντίθετα η θεωρία των ασαφών συνόλων επιτρέπει τον υπολογισμό ενός βαθμού μέτρησης της εμφάνισης ενός γεγονότος, ο οποίος αποδεικνύεται περισσότερο πληροφοριακός.

Η αναγνώριση προτύπων διαμερίζει ένα χώρο επιρροής σε διάφορες κατηγορίες (σύνολα) και στη συνέχεια απεικονίζει κάθε πρότυπο σε μια από τις κατηγορίες. Αντιστοιχίζοντας κάθε κατηγορία με τη μορφή ενός ασαφούς συνόλου και προσδιορίζοντας τη λειτουργία απεικόνισης υπό το πρίσμα μιας συνάρτησης συμμετοχής, δημιουργείται μια άμεση σχέση μεταξύ των ασαφών συνόλων και της αναγνώρισης προτύπων. Έτσι οι κατηγορίες των προτύπων θεωρούνται ως ασαφή σύνολα, όπου ένα πρότυπο ανήκει σε κάθε μία από τις κατηγορίες με έναν κατάλληλο βαθμό συμμετοχής.

Η σχέση μεταξύ κατηγοριών προτύπων και ασαφών συνόλων παρουσιάστηκε από της Bellman et al. (1966), οι οποίοι όρισαν την ασαφή ταξινόμηση προτύπων [89]. Αργότερα παρουσιάστηκε η ιδέα αντικατάστασης των απότομων ορίων απόφασης του νευρωνικού δικτύου perceptron με όρια απόφασης ασαφών υπερεπιπέδων. Στην βιβλιογραφία καταγράφονται διάφοροι τύποι συνδυασμών ασαφών συστημάτων και νευρωνικών δικτύων, οι οποίοι κατασκευάζουν αποτελεσματικούς ταξινομητές προτύπων, εκμεταλλευόμενοι τα συγκεκριμένα πλεονεκτήματα που προσφέρει η συνεργεία των δύο τεχνικών.

Τα ασαφή νευρωνικά δίκτυα ταξινόμησης προσπαθούν να διαμορφώσουν κατάλληλα τα όρια των κατηγοριών προτύπων με μάθηση των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής.

Τα συστήματα που βασίζονται στην ασαφή λογική και αυτά που βασίζονται στα ΤΝΔ έχουν αντιθετικές απαιτήσεις κατά την εφαρμογή τους. Για παράδειγμα τα ασαφή συστήματα είναι κατάλληλα όταν υπάρχει αρκετή γνώση ειδικού για την

εξεταζόμενη διαδικασία, ενώ τα συστήματα ΤΝΔ είναι χρήσιμα σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν αρκετά ή μετρήσιμα δεδομένα για την εξεταζόμενη διαδικασία.

Και οι δύο προσεγγίσεις κατασκευάζουν μη-γραμμικά συστήματα βασισμένα πάνω σε φραγμένες συνεχείς μεταβλητές, με τη διαφορά ότι η μεταχείριση των νευρωνικών συστημάτων γίνεται με τρόπο αριθμητικό-ποσοτικό, ενώ η μεταχείριση των ασαφών συστημάτων γίνεται με τρόπο συμβολικό-ποιοτικό. Τα ασαφή συστήματα επίσης παρουσιάζουν τόσο συμβολικά, όσο και αριθμητικά, χαρακτηριστικά, καθώς οι συναρτήσεις συμμετοχής επιτρέπουν την αριθμητική επεξεργασία των λεκτικών μεταβλητών που μεταχειρίζονται.

Κατά συνέπεια, η σύνθεση νευρωνικών και ασαφών συστημάτων οδηγεί σε μια νέα κατάσταση, όπου το ασαφές σύστημα παρέχει ένα ισχυρό υπόβαθρο για την αναπαράσταση της γνώσης των ειδικών, ενώ τα ΤΝΔ παρέχουν ικανότητες μάθησης και είναι εξαιρετικά κατάλληλα για υπολογιστικά αποτελεσματικές εφαρμογές μέσω Η/Υ. Η σημασία της σύνθεσης αυτής εξάγεται και από τις διαφορές των ξεχωριστών αυτών συστημάτων, καθώς τα ΤΝΔ δεν παρέχουν ένα ισχυρό πλαίσιο για αναπαράσταση γνώσης, ενώ οι ελεγκτές ασαφούς λογικής δεν διακρίνονται για την ικανότητα αυτόματης μάθησης.

Τα υβριδικά νευροασαφή συστήματα μπορούν να δημιουργηθούν με δύο τρόπους: παρέχοντας σε ένα νευρωνικό δίκτυο την ικανότητα χειρισμού ασαφούς πληροφορίας [Fuzzy – Neural Network (FNN)] και ενισχύοντας ένα ασαφές σύστημα με νευρωνικά δίκτυα, προκειμένου να βελτιωθούν ορισμένα χαρακτηριστικά, όπως είναι η ευελιξία, η ταχύτητα και η προσαρμοστικότητα (Neural – Fuzzy Systems NFS)].

Σε ένα FNN οι είσοδοι και / ή τα βάρη των συνδέσεων και / ή οι έξοδοι του δικτύου αποτελούν ασαφή υποσύνολα ή ένα σύνολο από τιμές συμμετοχής σε ασαφή σύνολα. Για τη μοντελοποίηση αυτών των δικτύων χρησιμοποιούνται λεκτικές τιμές όπως «μικρό, μεσαίο, μεγάλο», ή ασαφείς αριθμοί. Νευρωνικά δίκτυα που χρησιμοποιούν ασαφείς νευρώνες χαρακτηρίζονται επίσης FNN, καθώς θεωρούνται ικανά να επεξεργαστούν ασαφείς πληροφορίες.

Ένα νευροασαφές σύστημα (NFS) από την άλλη πλευρά έχει ως σκοπό την πραγματοποίηση της διαδικασίας ασαφούς συλλογιστικής (fuzzy reasoning), όπου τα βάρη των συνδέσεων του δικτύου αντιστοιχούν στις παραμέτρους της ασαφούς συλλογιστικής. Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους μάθησης της μορφής ανάστροφης διάδοσης του σφάλματος (backpropagation) το NFS μπορεί να αναγνωρίσει ασαφείς κανόνες και να «μάθει» τις συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς συλλογιστικής. Συγκεκριμένα το NFS θα πρέπει να είναι ικανό είτε να «μάθει» λεκτικούς κανόνες και / ή συναρτήσεις συμμετοχής, είτε να βελτιστοποιεί τους ήδη υπάρχοντες κανόνες ή τις συναρτήσεις συμμετοχών. Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις:

- ➔ Το σύστημα ξεκινά χωρίς κανόνες και δημιουργεί νέους κανόνες μέχρι το πρόβλημα της μάθησης να επιλυθεί. Η δημιουργία ενός νέου κανόνα προκύπτει από ένα πρότυπο εκμάθησης που δεν καλύπτεται αρκετά από την τρέχουσα βάση κανόνων.



- Το σύστημα ξεκινά με όλους εκείνους τους κανόνες που μπορούν να δημιουργηθούν από το διαμερισμό των μεταβλητών και διαγράφοντας ανεπαρκείς κανόνες από την βάση κανόνων ανάλογα με την αξιολόγηση της επίδοσής τους.
- Το σύστημα ξεκινά με μια βάση κανόνων που αποτελείται από σταθερό αριθμό κανόνων. Κατά τη διαδικασία της εκμάθησης οι κανόνες αντικαθίστανται μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Παρακάτω παραθέτουμε διάφορους τρόπους συνδυασμών νευρο-ασαφών στοιχείων που χρησιμοποιούνται στη σύνθεση υβριδικών συστημάτων υπολογιστικής νοημοσύνης. Οι κατηγορίες 1,3,4,5 αφορούν FNN δίκτυα, ενώ η κατηγορία 2 αφορά NFS. Παρακάτω περιγράφονται οι τρόποι με τους οποίους στοιχεία των ΤΝΔ μπορούν να συνδυαστούν με στοιχεία της ασαφούς λογικής, προκειμένου να δημιουργηθούν FNN και NFS δίκτυα.

### **1. Ενσωματώνοντας ασάφεια στο πλαίσιο των νευρωνικών δικτύων:**

Ασαφοποιώντας τα δεδομένα εισόδου, αναθέτοντας ασαφείς χαρακτηρισμούς σε δείγματα εκμάθησης, ασαφοποιώντας, ενδεχομένως, τη διαδικασία εκμάθησης και εξάγοντας εξόδους του νευρωνικού δικτύου με τη μορφή ασαφών συνόλων.

### **2. Σχεδιάζοντας νευρωνικά δίκτυα καθοδηγούμενα από σχηματισμούς με βάση την ασαφή λογική:**

Σχεδιάζοντας νευρωνικά δίκτυα για την εφαρμογή ασαφούς λογικής και ασαφούς λήψης αποφάσεων και δημιουργώντας συναρτήσεις συμμετοχής για την αναπαράσταση ασαφών συνόλων.

### **3. Μεταβάλλοντας τα βασικά χαρακτηριστικά των νευρώνων:**

Οι νευρώνες σχεδιάζονται για την πραγματοποίηση ποικίλων λειτουργιών μέσα στα πλαίσια χρησιμοποίησής τους στη θεωρία ασαφών συνόλων (όπως ασαφή ένωση, τομή, συνάθροιση), αντί για πράξεις όπως π.χ. ο απλός πολλαπλασιασμός.

### **4. Χρησιμοποιώντας μέτρα ασάφειας, της το σφάλμα ή την αστάθεια του δικτύου:**

Τα μέτρα ασάφειας ή αβεβαιότητας ενός ασαφούς συνόλου χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν το σφάλμα ή την αστάθεια ή τη συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος που βασίζονται σε νευρωνικό δίκτυο.

## 5. Καθιστώντας ασαφείς τους ξεχωριστούς νευρώνες του δικτύου:

Οι εισόδοι και οι εξόδοι των νευρώνων είναι ασαφή σύνολα και η λειτουργία των δικτύων, που συμπεριλαμβάνουν τους ασαφείς νευρώνες, αποτελεί επίσης μια ασαφή διαδικασία.

Υπάρχουν επίσης και άλλου είδους κατηγοριοποιήσεις για τα νευροασαφή μοντέλα στην βιβλιογραφία. Οι Buckley και Hayashi (1994) έχουν ταξινομήσει τα ασαφοποιημένα νευρωνικά δίκτυα ως εξής. Τα δίκτυα μπορούν να διακρίνονται από:

- Εισόδους με τη μορφή πραγματικών αριθμών, ασαφείς εξόδους και συνδετικά βάρη με τη μορφή πραγματικών αριθμών
- Ασαφείς εισόδους, ασαφείς εξόδους και συνδετικά βάρη με τη μορφή πραγματικών αριθμών
- Ασαφείς εισόδους, ασαφείς εξόδους και ασαφή συνδετικά βάρη.

### 5.13.3 Αρχιτεκτονικές Ασαφών Νευρωνικών Δικτύων

Ο κύριος σκοπός της ανάπτυξης νευρο-ασαφών συστημάτων είναι η σύνθεση της ικανότητας μάθησης των νευρωνικών δικτύων με την ικανότητα αναπαράστασης των συστημάτων ασαφούς συμπερασμού (fuzzy inference systems), έτσι ώστε οι μηχανές μάθησης που δημιουργούνται με αυτόν τον τρόπο να μπορούν να εξάγουν γνώση από τα δεδομένα και να την αναπαριστούν με τη μορφή ασαφών κανόνων (Jang και Sun, 1995; Jang, 1993; Nauck, Klawonn και Kruse, 1997; Brown και Harris, 1994; Zurada και Lozowski, 1996) [89]. Το ασαφές σύστημα συμπερασμού (FIS) μπορούμε να το δημιουργήσουμε στην περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμη γνώση εκφρασμένη σε λεκτικούς κανόνες, ενώ τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) προτιμώνται στην περίπτωση που έχουμε διαθέσιμα δεδομένα ή επιδιώκεται η εκμάθηση μέσω της προσομοίωσης. Για την κατασκευή της FIS απαιτείται ο προσδιορισμός των ασαφών συνόλων, των ασαφών τελεστών και της βάσης γνώσης.

Για την κατασκευή ενός ΤΝΔ και τη χρησιμοποίησή του σε κάποια εφαρμογή απαιτείται ο προσδιορισμός της αρχιτεκτονικής του δικτύου και ο αλγόριθμος εκμάθησης από την πλευρά του χρήστη. Κάποιες από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους νευρο-ασαφών συστημάτων παρουσιάζονται παρακάτω.

#### ➤ Fuzzy Adaptive learning Control Network (FALCON)

Η δομή του FALCON (Lin και Lee, 1991) [89], είναι πέντε επιπέδων. Για κάθε μεταβλητή εξόδου υπάρχουν δύο λεκτικοί κόμβοι, από τους οποίους ο ένας αφορά τα δεδομένα εκμάθησης (επιθυμητή έξοδο), και ο άλλος την πραγματική έξοδο του

FALCON. Το πρώτο κρυμμένο επίπεδο χρησιμοποιείται για την ασαφοποίηση της κάθε μεταβλητής εισόδου. Ο κάθε κόμβος μπορεί να είναι απλώς ένας μοναδικός κόμβος που αναπαριστά μία απλή συνάρτηση συμμετοχής ή να αποτελείται από κόμβους πολλαπλών επιπέδων που υπολογίζουν μία περίπλοκη συνάρτηση συμμετοχής. Το δεύτερο κρυμμένο επίπεδο προσδιορίζει τις υποθέσεις του κανόνα, ενώ τα συμπεράσματα του κανόνα προσδιορίζονται από το τρίτο κρυμμένο επίπεδο.

Το FALCON εφαρμόζει έναν υβριδικό αλγόριθμο μάθησης που χρησιμοποιεί τόσο μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning) για τον εντοπισμό των αρχικών συναρτήσεων συμμετοχής και της αρχικής βάσης κανόνων, όσο και μάθηση μέσω φθίνουσας κλίσης (gradient descent learning) για τη βέλτιστη προσαρμογή των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής, προκειμένου να εξαχθούν οι επιθυμητές έξοδοι.

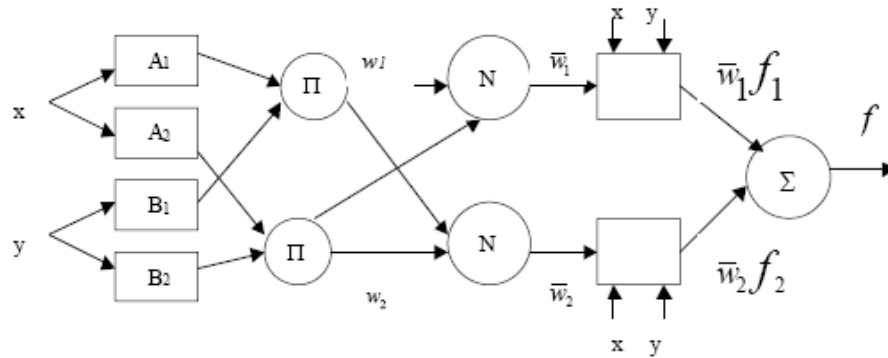
### ➤ Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

Το ANFIS (Jang, 1992) [86] υλοποιεί ένα ασαφές σύστημα συμπερασμού τύπου Takagi-Sugeno και η δομή του είναι πέντε επιπέδων. Το πρώτο κρυμμένο επίπεδο χρησιμοποιείται για την ασαφοποίηση των μεταβλητών εισόδου, ενώ στο δεύτερο κρυμμένο επίπεδο χρησιμοποιούνται T-form τελεστές για τον υπολογισμό της υπόθεσης του κανόνα. Το τρίτο κρυμμένο επίπεδο κανονικοποιεί την ισχύ των κανόνων, το τέταρτο κρυμμένο επίπεδο προσδιορίζει τις παραμέτρους του συμπεράσματος του κανόνα και το επίπεδο εξόδου υπολογίζει τη συνολική έξοδο ως τη συνάθροιση όλων των εισερχόμενων σημάτων. Το ANFIS χρησιμοποιεί τη μάθηση της ανάστροφης διάδοσης του σφάλματος (backpropagation learning) για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των υποθέσεων των κανόνων και το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα για τον υπολογισμό των παραμέτρων των συμπερασμάτων των κανόνων. Κάθε βήμα σε αυτήν τη διαδικασία εκμάθησης αποτελείται από δύο στάδια:

- Κατά το πρώτο στάδιο τα πρότυπα εισόδου διαδίδονται και ακολουθείται μία επαναλαμβανόμενη διαδικασία υπολογισμού των ελαχίστων μέσων τετραγωνικών σφαλμάτων για τον προσδιορισμό των βέλτιστων παραμέτρων των συμπερασμάτων των κανόνων, θεωρώντας στον εκάστοτε τρέχοντα κύκλο σταθερές τις παραμέτρους της υπόθεσης των κανόνων για ολόκληρο το σύνολο εκμάθησης.
- Κατά το δεύτερο στάδιο τα πρότυπα διαδίδονται ξανά και χρησιμοποιείται η ανάστροφη διάδοση του σφάλματος για την τροποποίηση των παραμέτρων των υποθέσεων των κανόνων, καθώς οι παράμετροι των συμπερασμάτων παραμένουν σταθερές. Στη συνέχεια η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται.

Το σύστημα είναι «οικοδομημένο» με βάση ένα σύνολο ασαφών κανόνων (IF – THEN), χρησιμοποιώντας αρχές της ασαφούς λογικής, και ο αλγόριθμος εκπαίδευσης προσαρμόζει τις παραμέτρους ενός συστήματος της ασαφούς

λογικής. Το σύστημα αυτό παρουσιάστηκε από τους Jang και Sun το 1995 και κάνει χρήση ενός υβριδικού κανόνα εκπαίδευσης για να βελτιστοποιήσει τις ασαφείς παραμέτρους της πρώτης τάξεως συστήματος Sugeno. Ένα πρώτης τάξης σύστημα Sugeno παρουσιάζεται γραφικά παρακάτω.



Σχήμα 6.11: Αρχιτεκτονική ANFIS για ένα πρώτης τάξης σύστημα Sugeno με δύο εισόδους και δύο κανόνες (Πηγή: Heikki Koivo, [86])

Η αρχιτεκτονική του ANFIS στηρίζεται σε δύο σύνολα εκπαιδευόμενων παραμέτρων:

- Τις παραμέτρους των συναρτήσεων συμμετοχής αιτίου (antecedent) [a, b, c, d], δηλαδή του IF μέρους των κανόνων.
- Τις πολωνυμικές παραμέτρους [p, q, r] της εξόδου, που καλούνται και παράμετροι αποτελέσματος.

Κατά την εκπαίδευση του ANFIS χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος σταδιακής μείωσης για βελτιστοποίηση των παραμέτρων αιτίου και ένας αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων για την επίλυση των παραμέτρων του αποτελέσματος. Επειδή χρησιμοποιεί δύο εντελώς διαφορετικούς αλγορίθμους για να επιτύχει μείωση του σφάλματος, ο κανόνας εκπαίδευσης καλείται υβριδικός. Αρχικά ανανεώνονται οι παράμετροι αποτελέσματος με χρήση της αλγορίθμου ελαχίστων τετραγώνων και στη συνέχεια ανανεώνονται οι παράμετροι αιτίου με όπισθεν διάδοση των σφαλμάτων που εξακολουθούν να υπάρχουν.

Όπως διαφαίνεται από το σχήμα 6.11 η αρχιτεκτονική του ANFIS αποτελείται από πέντε επίπεδα. Παρακάτω παρατίθεται περιγραφή της αρχιτεκτονικής του ANFIS για ένα πρώτης τάξης σύστημα Sugeno με δύο εισόδους και δύο κανόνες. Με  $O_i^1$  θα χαρακτηριστεί η έξοδος του  $i$  κόμβου του επιπέδου 1.

**Επίπεδο 1:** Παραγωγή των βαθμών συμμετοχής:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x)$$

**Επίπεδο 2:** Παραγωγή των ενεργοποιούμενων βαρών

$$O_i^2 = w_i = \prod_{j=1}^m \mu_{A_j}(x)$$

**Επίπεδο 3:** Κανονικοποίηση των βαρών

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}$$

**Επίπεδο 4:** Υπολογισμός των εξόδων των κανόνων με βάση τις παραμέτρους αποτελέσματος

$$O_i^4 = y_i = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i)$$

**Επίπεδο 5:** Άθροισμα όλων των εισόδων από το τέταρτο επίπεδο

$$O_i^5 = \sum_i y_i = \sum_i \bar{w}_i f_i = (\bar{w}_1 x_1) p_1 + (\bar{w}_1 x_2) q_1 + \bar{w}_1 r_1 + (\bar{w}_2 x_1) p_2 + (\bar{w}_2 x_2) q_2 + \bar{w}_2 r_2$$

Μετά το επίπεδο πέντε γίνεται έλεγχος της τιμής του σφάλματος και σε περίπτωση μη ικανοποιητικής τιμής, χρησιμοποιείται αλγόριθμος βαθμιαίας μείωσης, ο οποίος εκπαιδεύει της παραμέτρους αιτίου.

Κάθε εποχή εκπαίδευσης του ANFIS, που χρησιμοποιεί υβριδικό κανόνα εκπαίδευσης, αποτελείται από δύο περάσματα. Αρχικά υπολογίζονται οι παράμετροι αποτελέσματος κατά το εμπρόσθιο πέρασμα, με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης ελαχίστων τετραγώνων, και στην συνέχεια ενημερώνονται οι παράμετροι αιτίου με χρήση βαθμιαίας μείωσης. Κατά το εμπρόσθιο πέρασμα υπολογίζονται οι εξοδοί όλων των κόμβων μέχρι το επίπεδο 4. Στο επίπεδο 4 υπολογίζονται οι παράμετροι αποτελέσματος. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι εξοδοί με τις νέες τιμές των παραμέτρων αποτελέσματος και σήματα σφαλμάτων διαδίδονται πίσω, μέσα από τα επίπεδα για να ενημερώσουν τις παραμέτρους αιτίου.

### ➤ Generalized Approximate Reasoning based Intelligent Control (GARIC)

Το σύστημα GARIC (Bherenji και Khedkar, 1992) εφαρμόζει ένα νευροασαφή ελεγκτή χρησιμοποιώντας δύο νευρωνικά δίκτυα, τα AEN και ASN: Το AEN

(Action State Evaluation Network) αποτελεί ένα προσαρμοστικό μηχανισμό αξιολόγησης των ενεργειών του ASN. Το ASN (Action Selection Network) αποτελεί ένα νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με πέντε επίπεδα. Οι σύνδεσμοι μεταξύ των επιπέδων δεν είναι σταθμισμένοι. Το πρώτο κρυμμένο επίπεδο αποθηκεύει τις λεκτικές τιμές όλων των μεταβλητών εισόδου. Κάθε μονάδα εισόδου συνδέεται μόνο με εκείνες τις μονάδες του πρώτου κρυμμένου επιπέδου που αναπαριστούν τις λεκτικές τιμές που συνδέονται με αυτήν. Το δεύτερο κρυμμένο επίπεδο αναπαριστά τους κόμβους ασαφών κανόνων που προσδιορίζουν το βαθμό της ικανοποίησης ενός κανόνα χρησιμοποιώντας τον ειδικό τελεστή  $\text{soft} - \min$ . Το τρίτο κρυμμένο επίπεδο αναπαριστά τις λεκτικές τιμές της μεταβλητής εξόδου. Τα αποτελέσματα του κανόνα υπολογίζονται με βάση την ισχύ των υποθέσεων του κανόνα, και μέσω της διαδικασίας τοπικού μέσου του μεγίστου ( $\text{local mean} - \text{of} - \text{maximum}$ ). Η τελική έξοδος του ελεγκτή προκύπτει μετά την αποασαφοποίηση των αποτελεσμάτων του κάθε κανόνα. Το GARIC χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό της μεθόδου φθίνουσας κλίσης ( $\text{gradient descent}$ ) και της ενισχυτικής μάθησης ( $\text{reinforcement learning}$ ) για τον καθορισμό των παραμέτρων των κόμβων.

### ➤ Neuro-Fuzzy Control (NEFCON)

Το NEFCON (Nauck και Kruse, 1993) σχεδιάστηκε προκειμένου να εφαρμόσει ένα ασαφές σύστημα συμπερασμού τύπου Mamdani. Οι μονάδες εισόδου εφαρμόζουν την ασαφοποίηση των δεδομένων. Η επαγωγική λογική που εφαρμόζεται αναπαρίσταται από τις συναρτήσεις διάδοσης ( $\text{propagation functions}$ ) και η μονάδα εξόδου εφαρμόζει την αποασαφοποίηση του αποτελέσματος. Η διαδικασία μάθησης του NEFCON βασίζεται σε ένα συνδυασμό ενισχυτικής μάθησης και μάθησης με ανάστροφη διάδοση του σφάλματος. Το NEFCON μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την εκμάθηση της αρχικής βάσης κανόνων, όταν δεν είναι διαθέσιμη προηγούμενη γνώση για το σύστημα, όσο και για τη βελτιστοποίηση της υπάρχουσας βάσης κανόνων. Τα συστήματα NEFPROX (για την εκτίμηση συνάρτησης) και NEFCLASS (για την ταξινόμηση δεδομένων) αποτελούν δύο παραλλαγές της δομής NEFCON.

Το σύστημα NEFCLASS (Nauck και Kruse, 1995), το οποίο αποτελεί έναν τριών-επιπέδων ασαφή  $\text{perceptron}$ . Το συγκεκριμένο δίκτυο χρησιμοποιεί ασαφή σύνολα ως βάρη μεταξύ της εισόδου και του κρυμμένου επιπέδου, και δυαδικά βάρη (0/1) μεταξύ του κρυμμένου επιπέδου και του επιπέδου εξόδου. Οι νευρώνες του επιπέδου εισόδου εισάγουν τα χαρακτηριστικά του χώρου αναφοράς στο δίκτυο. Οι νευρώνες του κρυμμένου επιπέδου αναπαριστούν τους ασαφείς κανόνες και οι νευρώνες του επιπέδου εξόδου αναπαριστούν τις διαφορετικές κατηγορίες ταξινόμησης των χαρακτηριστικών.

Ένας ασαφής κανόνας της μορφής  $\text{if} - \text{then}$  εξάγεται από ένα κρυμμένο νευρώνα λαμβάνοντας ως συμπέρασμα του κανόνα αυτής της εισόδου των συνδυαστικών βαρών του κρυμμένου επιπέδου, και θέτοντας το συμπέρασμα του κανόνα ισοδύναμο με την κατηγορία του νευρώνα εξόδου, με τον οποίο συνδέεται ο κρυφός κόμβος.

Ο αλγόριθμος επαγωγής της βάσης κανόνων αποτελείται από τρία βήματα.

- Τη δημιουργία της αρχικού συνόλου κανόνων,
- Την επιλογή των καλύτερων κανόνων σύμφωνα με κάποιο κριτήριο και
- Την κατάλληλη ρύθμιση των ασαφών συνόλων που μοντελοποιούν τους λεκτικούς όρους, οι οποίοι ανατίθενται στα πρότυπα της εισόδου.

Το χαρακτηριστικό γνώρισμα του NEFCLASS εντοπίζεται στο τρίτο βήμα, όπου εφαρμόζεται μία ασαφής ευρετική παραλλαγή της μεθόδου της φθίνουσας κλίσης, η οποία χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των συνδετικών βαρών σε ένα τριών επιπέδων νευρωνικό δίκτυο τύπου perceptron.

### ➤ Fuzzy Net (FUN)

Στο FUN (Sulzberger et al., 1993) οι νευρώνες του πρώτου κρυμμένου επιπέδου περιλαμβάνουν τις συναρτήσεις συμμετοχής. Στο πρώτο κρυμμένο επίπεδο ασαφοποιούνται οι τιμές εισόδου, στο δεύτερο κρυμμένο επίπεδο υπολογίζονται οι συζεύξεις «AND» και στο τρίτο κρυμμένο επίπεδο αποθηκεύονται οι συναρτήσεις συμμετοχών των μεταβλητών εξόδου. Η συνάρτηση ενεργοποίησης των νευρώνων είναι το διαζευκτικό «OR». Ο νευρώνας εξόδου εκτελεί την αποασαφοποίηση. Το δίκτυο ξεκινά με μία βάση ασαφών κανόνων και τις αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής. Έπειτα το σύστημα χρησιμοποιεί μία τεχνική στοχαστικής μάθησης, που μεταβάλλει τυχαία τις παραμέτρους των συναρτήσεων συμμετοχής και τους συνδέσμους μέσα στη δομή του δικτύου. Για τη διαδικασία της μάθησης χρησιμοποιείται μία συνάρτηση κόστους, η οποία υπολογίζεται μετά από την αρχική τυχαία τροποποίηση των παραμέτρων. Η τροποποίηση που γίνεται αποδεκτή είναι εκείνη που οδηγεί σε βελτιωμένη αποτελεσματικότητα.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> : Εφαρμογές και αξιολόγηση Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων

### 7.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο αυτό και μετά την εκτενή αναφορά στις θεωρητικές και μεθοδολογικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των αποφασίζοντων που δρουν σε περιβάλλον αβεβαιότητας και καλούνται να αποφασίσουν μεταξύ εναλλακτικών επιλογών, οι οποίες ενέχουν κίνδυνο, παρουσιάζονται συγκεκριμένες πλέον εφαρμογές Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, που έχουν τη δυνατότητα διαχείρισης της αβεβαιότητας και του κινδύνου.

Τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο τις μεθοδολογικές προσεγγίσεις που ήδη αναφέραμε και έχουν καταγραφεί σε διάφορα πεδία εφαρμογών, όπως τα χρηματοοικονομικά, το management, η υγεία, το περιβάλλον, ο τομέας ενέργειας, κ.ά., ενώ πρέπει να επισημάνουμε ότι η έρευνα που έγινε για την καταγραφή τους, αφορά στο χρονικό διάστημα από το 1995 και μετά. Εδώ θα πρέπει να επισημάνουμε, ότι πέραν των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων τα οποία κατεγράφησαν, εντοπίστηκαν και πάρα πολλές περιπτώσεις προβληματικών λήψης αποφάσεων, σε διάφορα πεδία εφαρμογών, στις οποίες χρησιμοποιούνται οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Στις περιπτώσεις αυτές και όσον αφορά τις μεθόδους και τεχνικές που έχουν καταγραφεί, ναι μεν αφορούν σε μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν τις θεωρητικές προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν για τη διαχείριση αβεβαιότητας και κινδύνου, δεν έχουν όμως ακόμα ενταχθεί σε συγκεκριμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, με τη δομή και τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

### 7.2 Τα κριτήρια

Κατόπιν των ανωτέρω, η καταγραφή τους περιορίστηκε σε ό,τι αφορά μόνο σε πλήρως ανεπτυγμένα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων. Για την ταξινόμηση και αξιολόγηση των συστημάτων αυτών, χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα 18 κριτήρια:

- Το έτος κατασκευής του συστήματος
- Η ονομασία του συστήματος



- **Οι συγγραφείς του συστήματος**
- **Το Πανεπιστημιακό ίδρυμα, το εργαστήριο ή η επιχείρηση όπου δημιουργήθηκε**
- **Το είδος και η κατηγορία που ανήκει στο σύστημα**  
Συστήματα Υποστήριξης Ομαδικών Αποφάσεων (Group DSS), Web-Based DSS, Συστήματα Υποστήριξης Διαπραγματεύσεων (Negotiation DSS), Χωρικά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (Spatial DSS ή GIS-Based DSS), Διοικητικά Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (Executive DSS), Expert DSS, Hybrid DSS.
- **Το πεδίο εφαρμογής του συστήματος**  
Προγραμματισμός (planning), Οργάνωση (organizing), Τομέας Υγείας (medical), Marketing, Εφοδιαστική αλυσίδα (Supply Chain), Περιβάλλον (Environment), Διαχείριση Ενέργειας (Energy management), κ.ά.
- **Τα μέσα, οι τεχνικές και οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του**  
Πράκτορες (Agents), Νευρωνικά δίκτυα (Neural nets), Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic), Συλλογιστική βασισμένη σε περιπτώσεις (Case-based reasoning), Δίκτυα πιθανοτήτων Bayes (Bayesian networks), Εξελικτικοί αλγόριθμοι, κ.ά.
- **Το περιβάλλον λειτουργίας του συστήματος**  
MS DOS, MS WINDOWS, UNIX, LINUX, κ.ά.
- **Η φιλικότητα του συστήματος προς τους χρήστες**  
Ναι ή Όχι
- **Οι τεχνικές αναπαράστασης της γνώσης**  
Λογική, Κανόνες, Πλαίσια, Σενάρια, Fuzzy κανόνες, Σημασιολογικά δίκτυα, κ.ά.
- **Η χρήση What – If – Analysis**  
Ναι ή Όχι
- **Οι πηγές γνώσεις του συστήματος**  
Βιβλιογραφία, Γνώσεις ειδικών, Τεχνικές Τεχνητής Νοημοσύνης, Γενική γνώση, Εμπειρία συγγραφέων-κατασκευαστών του Συστήματος, Επεξεργασία δεδομένων, συνεντεύξεις με επαγγελματίες – χρήστες, κ.ά.

➤ **Η δυνατότητα διαδικασίας ανανέωσης της γνώσης**

Ναι ή Όχι

➤ **Οι χρήστες του συστήματος**

➤ **Η δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών αποφασίζόντων**

Ναι ή Όχι

➤ **Η φάση ανάπτυξης του συστήματος**

Ανάλυση, Σχεδίαση, Πρωτότυπο, σε δοκιμαστική λειτουργία, εφαρμογή – εγκατάσταση, εγκατεστημένο – σε πλήρη λειτουργία, κ.ά.

➤ **Εκτίμηση του συστήματος**

➤ **Τα αποτελέσματα της εφαρμογής – εκτίμησης του συστήματος**

Ικανοποιητικά με προτάσεις βελτιστοποίησης, ικανοποιητικά, κ.ά.

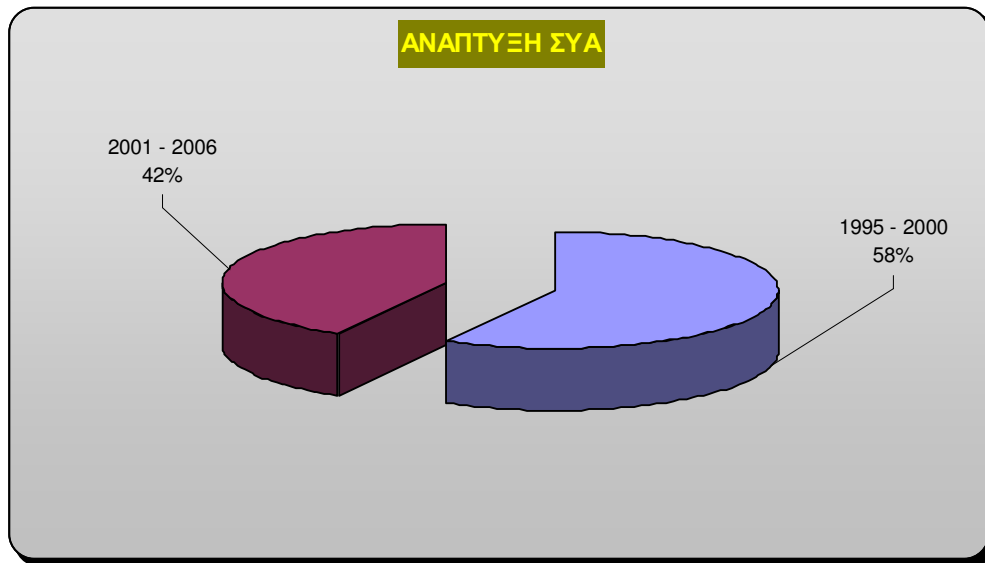
Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε άρθρα, βιβλία και περιοδικά διαφόρων ηλεκτρονικών βάσεων δεδομένων στο διαδίκτυο, στη βιβλιοθήκη του Πολυτεχνείου Κρήτης, καθώς και σε ηλεκτρονικές βάσεις δεδομένων βιβλιοθηκών άλλων Πανεπιστημιακών Ιδρυμάτων. Από την έρευνα, η οποία όπως προαναφέρθηκε αφορά στο χρονικό διάστημα των τελευταίων 12 ετών, κατεγράφησαν 26 Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς και έχουν την δυνατότητα χειρισμού της αβεβαιότητας και του ρίσκου, στα πλαίσια υποστήριξης των αποφασίζόντων. Στο Παράρτημα Α της παρούσας εργασίας, παρατίθεται ο Πίνακας Ταξινόμησης και Αξιολόγησης αυτών των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, ενώ στη συνέχεια παρατίθενται σχόλια, διαπιστώσεις και γραφικές αναπαραστάσεις των αποτελεσμάτων της έρευνας.

### 7.3 Τα αποτελέσματα της έρευνας

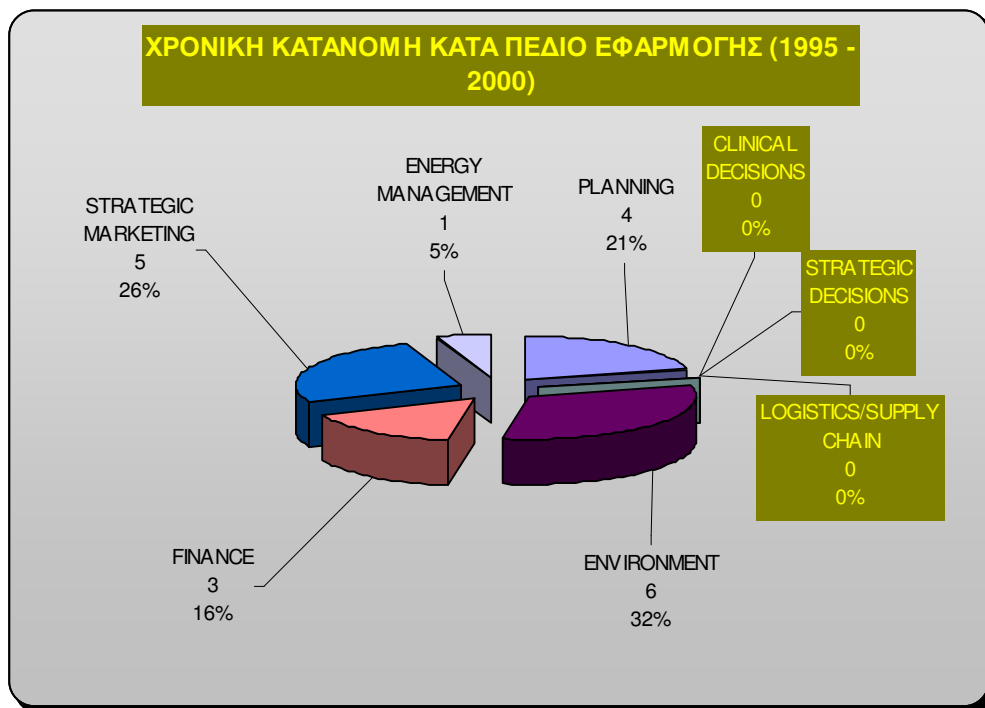
Από τη χρονολογία κατασκευής και συγγραφής των ΣΥΑ, στη χρονική περίοδο των ετών 1995 – 2000, παρουσιάζεται μια έξαρση κατασκευής Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων σε διάφορους τομείς, σε αντίθεση με την εξαετία 2001 – 2006 που ακολουθεί, στην οποία ο ρυθμός ανάπτυξής της παρουσιάζει σχετική ύφεση (Διάγραμμα 7.1).

Αναλύοντας περισσότερο τα παραπάνω αποτελέσματα, μπορούμε να δούμε ότι σε τομείς στους οποίους η ανθρωπότητα έρχεται αντιμέτωπη με σοβαρότατες προκλήσεις με την πάροδο των ετών, όπως είναι η ιατρική, το περιβάλλον, αλλά και ο ευρύτερος τομέας της λήψης στρατηγικών αποφάσεων, παρουσιάζεται μια σταθεροποιητική και σε ορισμένους τομείς, αυξητική τάση στην ανάπτυξη Συστημάτων τα οποία υποστηρίζουν τους εκάστοτε αποφασίζοντες στη λήψη αποφάσεων υπό συνθήκες που απαιτούν διαχείριση αβεβαιότητας και σωστή εκτίμηση των ενδεχόμενων κινδύνων.

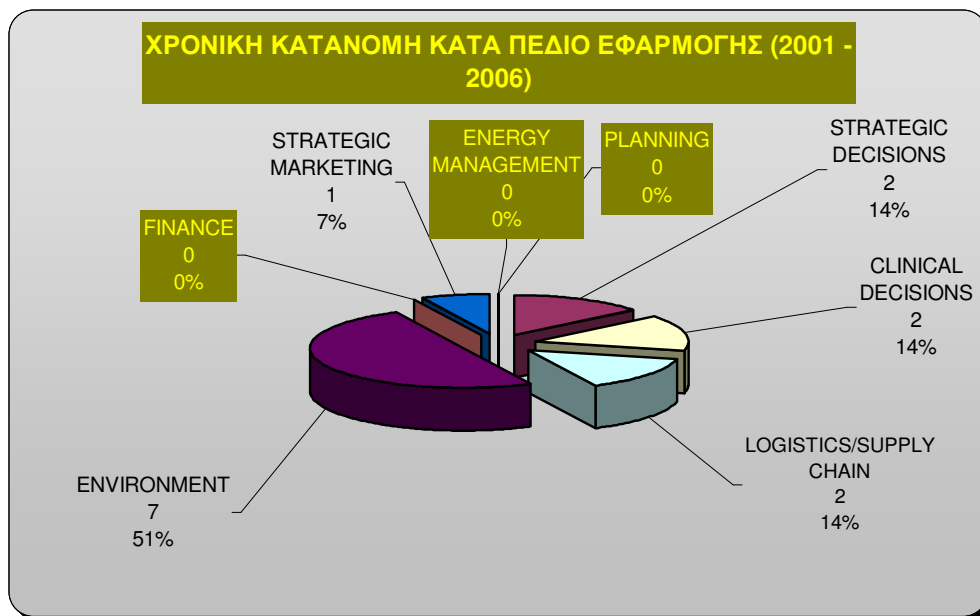
Η τάση αυτή απεικονίζεται στα Διαγράμματα 7.2 (a) και 7.2 (b).



Διάγραμμα 7.1

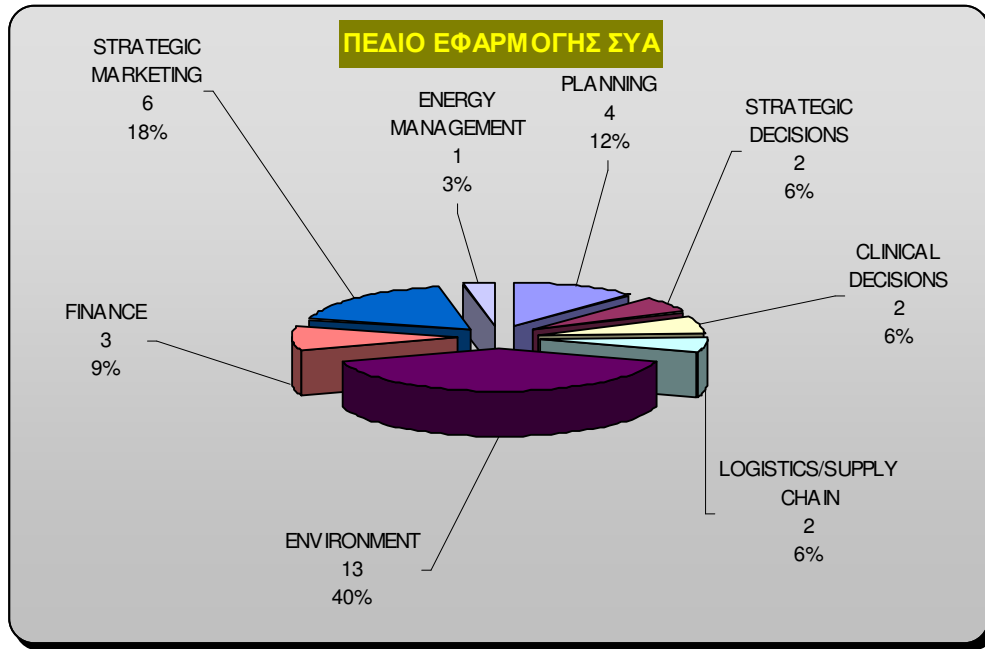


Διάγραμμα 7.2 (a)



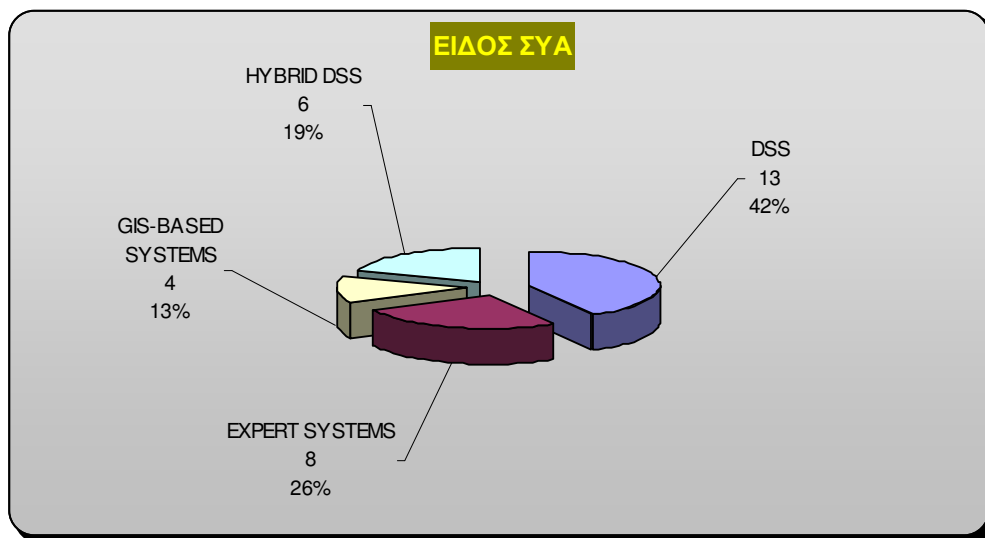
Διάγραμμα 7.2 (b)

Όσον αφορά στα πεδία εφαρμογής των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων που κατεγράφησαν, βλέπουμε ότι ποικίλουν. Και εδώ, η διαχείριση των κινδύνων που αφορούν στον ευρύτερο τομέα του περιβάλλοντος, συγκεντρώνει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, ενώ και ο τομέας της ιατρικής, με τον υψηλό βαθμό αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τη διαδικασία λήψης κλινικών αποφάσεων, επέβαλλε την ανάπτυξη ικανού αριθμού συστημάτων υποστήριξης των αποφασιζόντων. Εδώ θα πρέπει να επισημάνουμε ότι μέσα από τη βιβλιογραφική έρευνα, εντοπίστηκαν πάρα πολλές περιπτώσεις χρησιμοποίησης μεθοδολογικών προσεγγίσεων, μοντέλων και τεχνικών, για τη διαχείριση της αβεβαιότητας και της ασάφειας στον τομέα των κλινικών αποφάσεων, χωρίς όμως τελικά αυτές να έχουν τελικά οδηγήσει στην ανάπτυξη της ολοκληρωμένου Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων. Στο Διάγραμμα 7.3 που ακολουθεί, φαίνεται η κατανομή των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων ανά ευρύτερο πεδίο εφαρμογής.



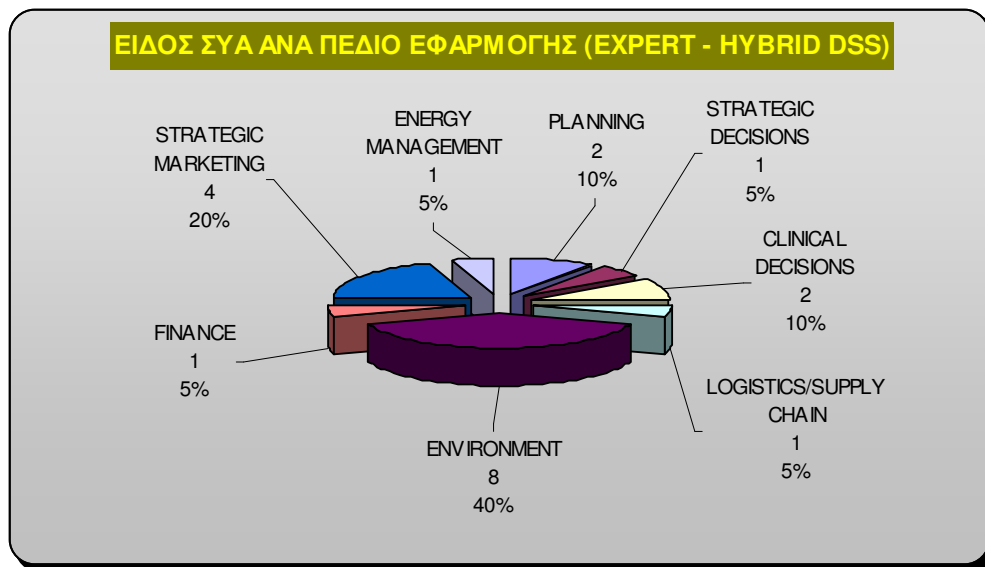
Διάγραμμα 7.3

Τα είδη και οι κατηγορίες των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων που καταγράφησαν, φαίνονται στο επόμενο Διάγραμμα (7.4). Από τα αποτελέσματα της καταγραφής, βλέπουμε ότι τα Έμπειρα Συστήματα, καθώς και τα Υβριδικά, τα οποία χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης (Νευρωνικά Δίκτυα, Ασαφής Λογική, κ.ά.), αντιπροσωπεύουν ένα ικανό ποσοστό επί του συνόλου των καταγεγραμμένων συστημάτων.

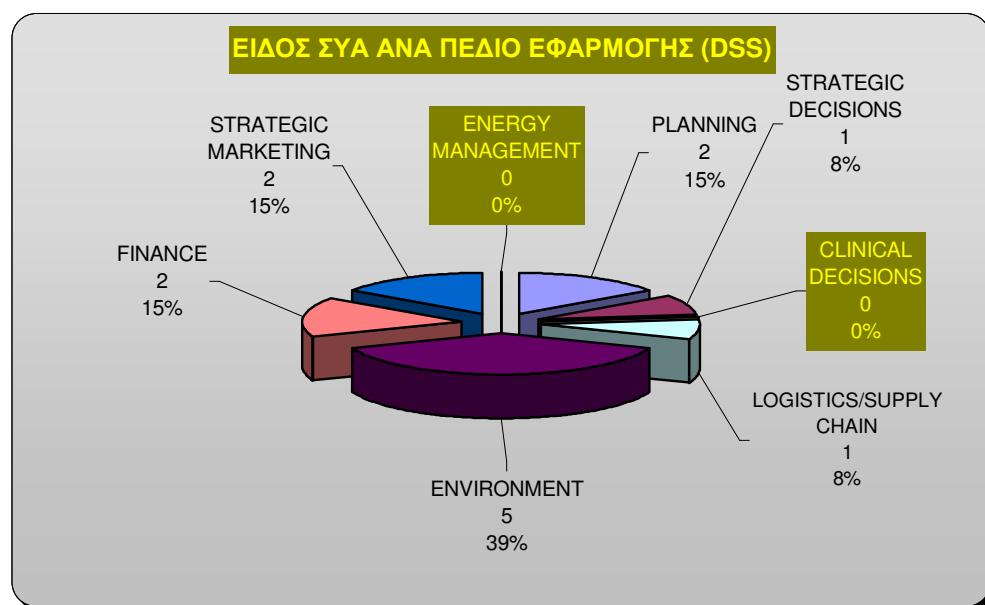


Διάγραμμα 7.4

Επίσης, από μια περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι τομείς όπως αυτοί του περιβάλλοντος, των κλινικών αποφάσεων και του στρατηγικού marketing, ή ακόμα και αυτός της διαχείρισης ενεργειακών πόρων, στους οποίους αφενός η λήψη αποφάσεων, χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό αβεβαιότητας των δεδομένων και αφετέρου οι διαθέσιμες εναλλακτικές επιλογές από εξίσου υψηλό βαθμό κινδύνου, συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό Έμπειρων και Υβριδικών Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, οι δυνατότητες των οποίων βοηθούν ακόμα περισσότερο τους αποφασίζοντες στη λήψη της σωστότερης απόφασης [Διάγραμμα 7.5 (a) και 7.5(b)].

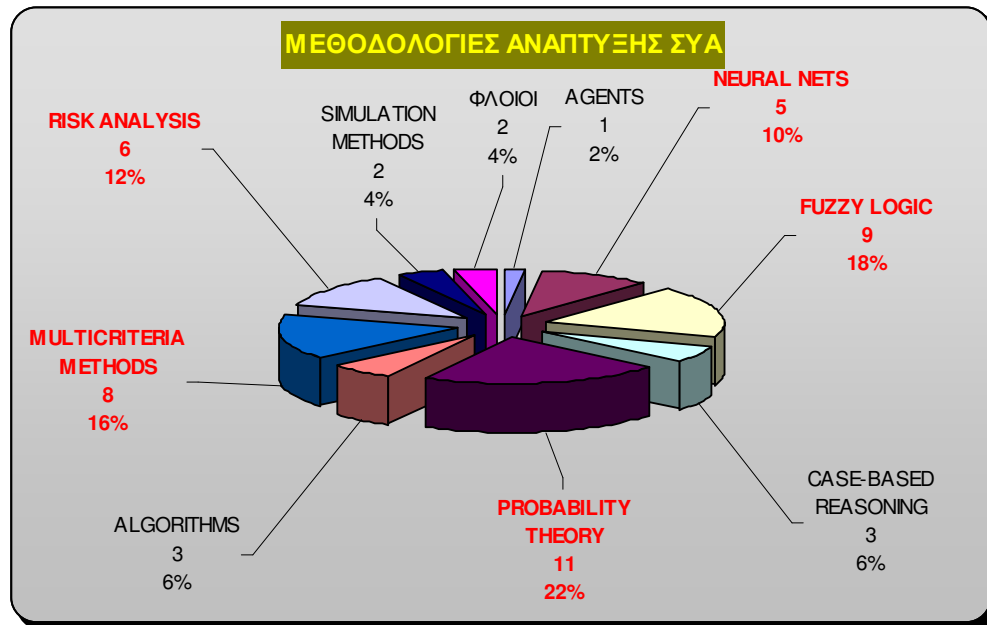


Διάγραμμα 7.5 (a)



Διάγραμμα 7.5 (b)

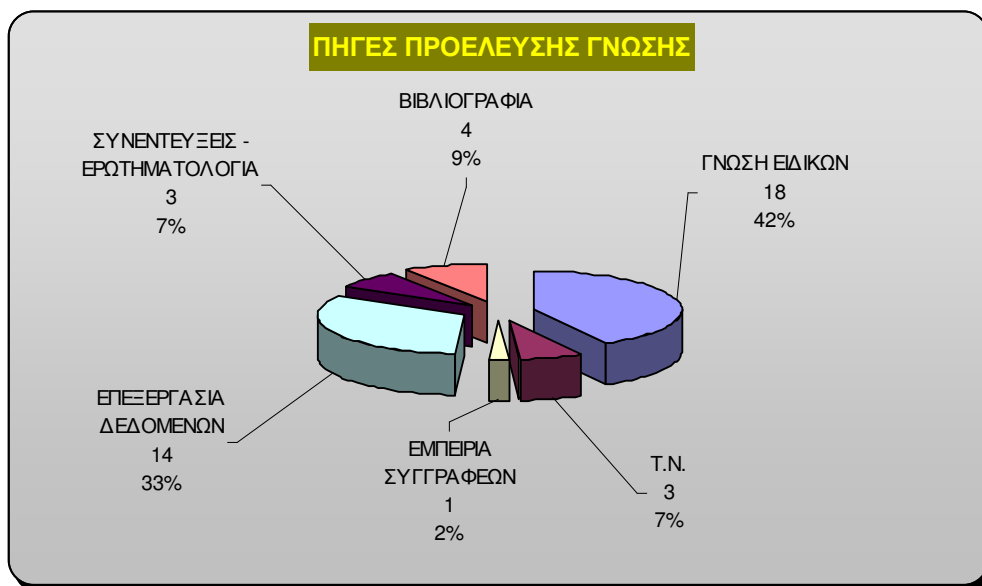
Οι μεθοδολογικές προσεγγίσεις και τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται και εφαρμόζονται, παρέχουν τη δυνατότητα διαχείρισης της αβεβαιότητας, καθώς και εκτίμησης και ανάλυσης των ενδεχόμενων κινδύνων. Στο Διάγραμμα 7.6 απεικονίζεται η ποσοστιαία αναλογία συμμετοχής των υπόψη μεθοδολογικών προσεγγίσεων και θεωριών στο σύνολο των καταγεγραμμένων Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων.



Διάγραμμα 7.6

Είναι εμφανής η χρήση μεθοδολογιών της Θεωρίας των πιθανοτήτων (Νόμος του Bayes, προσέγγιση Dempster-Shafer, δίκτυα Bayes), της Ασαφούς Λογικής, των Νευρωνικών δικτύων, καθώς και μεθόδων της Πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων. Στα περισσότερα ΣΥΑ, ο υψηλός βαθμός αβεβαιότητας και ασάφειας των δεδομένων, αλλά και η επικινδυνότητα των εναλλακτικών επιλογών, επιβάλλουν τον συνδυασμό δύο ή και περισσότερων μεθοδολογιών. Εξετάζοντας αναλυτικότερα τις χρησιμοποιούμενες μεθόδους, βλέπουμε ότι είναι φανεροί οι συνδυασμοί των παραπάνω μεθόδων, ως οι πλέον κατάλληλοι για την αντιμετώπιση συνθηκών αβεβαιότητας και ρίσκου.

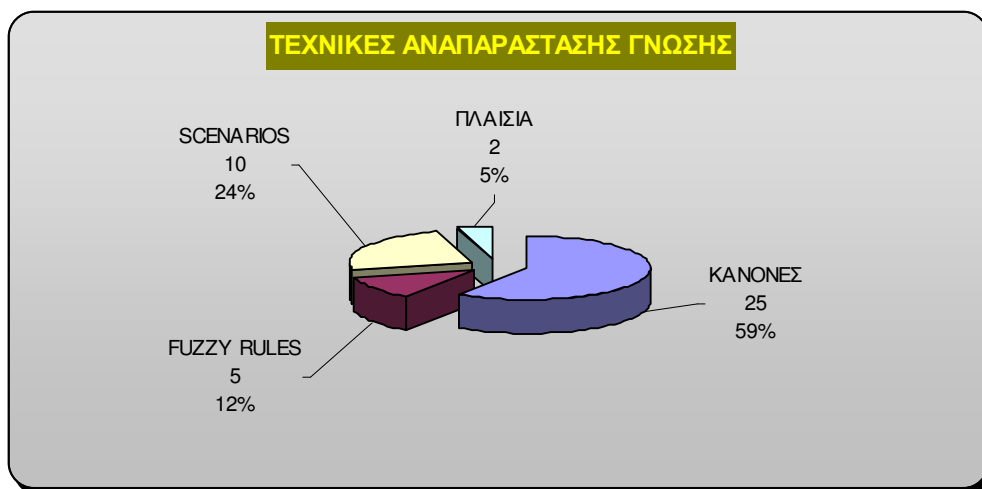
Όσον αφορά τις πηγές από τις οποίες τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων αντλούν τη γνώση, η οποία αποτελεί το στοιχείο επεξεργασίας των χρησιμοποιούμενων μοντέλων, αυτές ποικίλουν, της φαίνεται και στο επόμενο Διάγραμμα 7.7.



Διάγραμμα 7.7

Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα, η γνώση των ειδικών και η επεξεργασία δεδομένων και πραγματικών στατιστικών και ιστορικών στοιχείων, αποτελούν ιεραρχικά τις βασικότερες πηγές γνώσεις, με την ισχύουσα βιβλιογραφία και τις συνεντεύξεις ειδικών και τα ερωτηματολόγια να ακολουθούν.

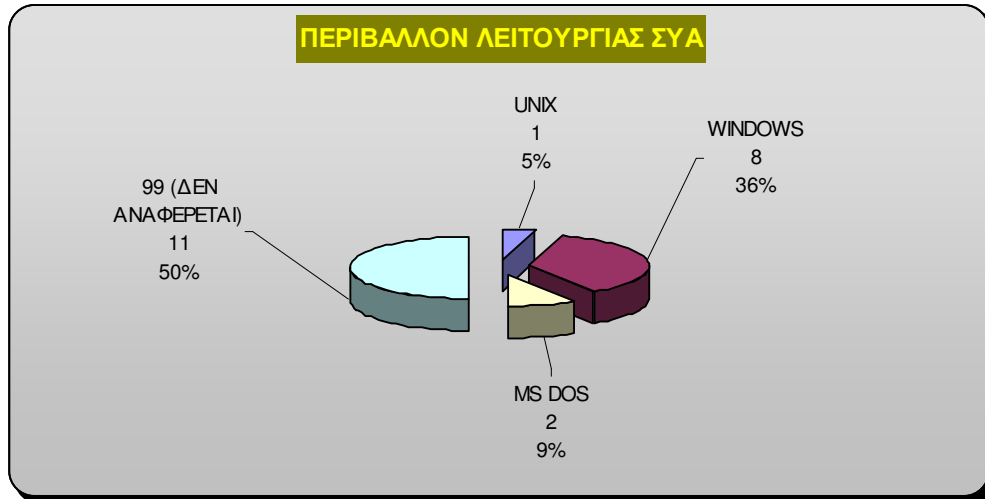
Όσον αφορά τις τεχνικές που χρησιμοποιούν τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, για να αναπαραστήσουν αυτή τη γνώση με τη μορφή υποστήριξης στον αποφασίζοντα, η χρήση κανόνων αποτελεί την πλέον συχνά χρησιμοποιούμενη τεχνική, με τη δημιουργία σεναρίων να ακολουθεί (Διάγραμμα 7.8).



Διάγραμμα 7.8



Αναφερόμενοι και σε ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, όπως το περιβάλλον λειτουργίας τους, βλέπουμε ότι στα μισά από τα καταγεγραμμένα ΣΥΑ το στοιχείο αυτό δεν αναφέρεται. Επίσης σε ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό (48%), δεν γίνεται αναφορά στη φιλικότητα και ευκολία λειτουργίας των ΣΥΑ, απέναντι στους κατά περίπτωση χρήστες (Διαγράμματα 7.9 και 7.10).

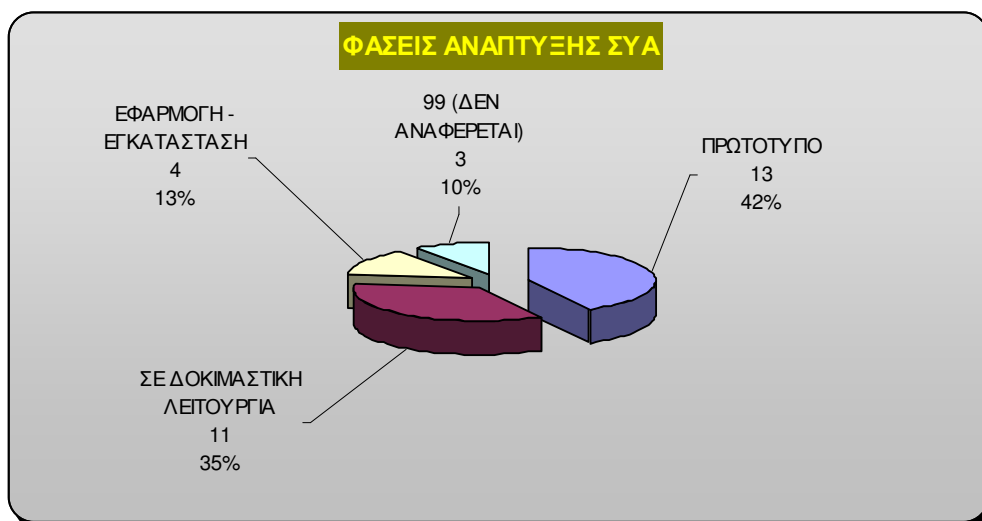


Διάγραμμα 7.9



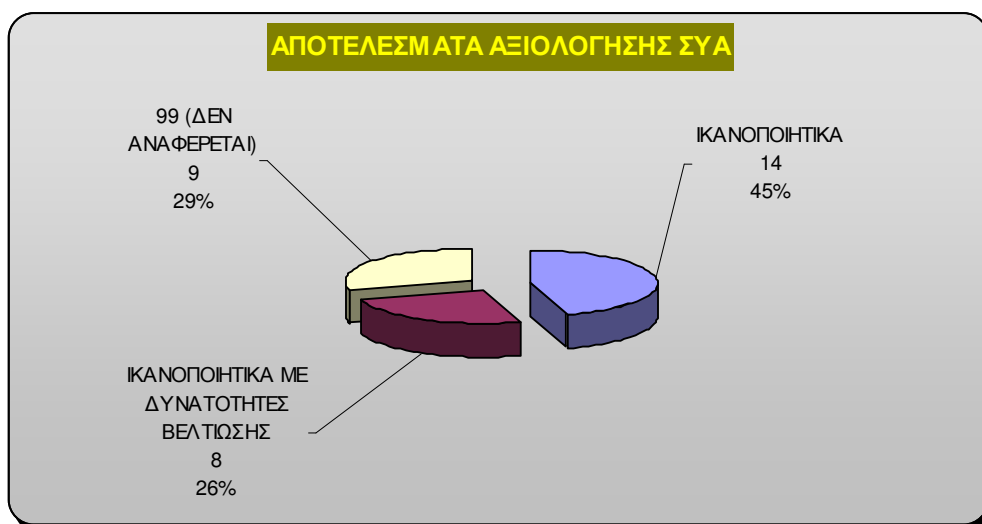
Διάγραμμα 7.10

Τα περισσότερα από τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων που έχουν αναπτυχθεί, βρίσκονται στη φάση του «πρωτότυπου», αν και πολύ κοντά βρίσκονται και αυτά που έχουν ήδη μπει σε δοκιμαστική λειτουργία (11 ΣΥΑ). Τέσσερα (4) συστήματα έχουν ήδη εγκατασταθεί και βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία, ενώ σε τρία (3) συστήματα δεν αναφέρεται ο τρόπος δοκιμής και αξιολόγησής τους (Διάγραμμα 7.11)



Διάγραμμα 7.11

Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε και τα αποτελέσματα του ελέγχου και της αξιολόγησης των συστημάτων, όπου σε ποσοστό 71% (18 ΣΥΑ) τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά, με ορισμένες απαιτούμενες βελτιώσεις (Διάγραμμα 7.12).



Διάγραμμα 7.12

#### 7.4 Ανάλυση Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται περισσότερο αναλυτικά, ορισμένα από τα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων που καταγράφηκαν σε διάφορους τομείς:

- **Strategic Marketing – «MAPS»** - An International Market Entry Planning System

Το MAPS είναι ένα έμπειρο σύστημα μάρκετινγκ το οποίο βοηθάει τους μάνατζερ να πάρουν στρατηγικές αποφάσεις, αναφορικά με την είσοδο της επιχείρησής τους στην αγορά. Το σύστημα αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό τεχνικών αναπαράστασης γνώσης με βάση την Τεχνητή Νοημοσύνη (για παράδειγμα κανόνες, σημασιολογικά δίκτυα, τεχνικές text – analysis) και πολυκριτήρια μοντέλα απόφασης για δοκιμή και αξιολόγηση. Προηγούμενες έρευνες των κατασκευαστών του είχαν καταλήξει στη δημιουργία διάφορων συστατικών μερών του MAPS, τα οποία αναπτύχθηκαν ως αυτόνομα προϊόντα χρησιμοποιώντας έναν φλοιό που ονομάζεται CEVAL. Ο φλοιός αυτός χρησιμοποιείται τώρα για αναβαθμίσει τα συστατικά αυτά μέρη σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα, το οποίο θα αντιμετωπίζει προβλήματα που συναντούν διεθνείς σύμβουλοι μάρκετινγκ.

Οι τεχνικές αναπαράστασης γνώσης που χρησιμοποιεί ο φλοιός CEVAL είναι:

**Evaluation Criteria:** Μια ιεραρχία κριτηρίων, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει ζευγάρια ratings / threshold scores και από ένα βάρος που καθορίζει το επίπεδο της σημαντικότητάς του.

**Contextual Questions:** Πρόκειται για ερωτήσεις πολλαπλών επιλογών για την αντιστοίχιση των σκορ του κάθε κριτηρίου. Μερικές ερωτήσεις μπορεί να είναι τύπου quick – reject, όπου μια απάντηση ενεργοποιεί μια σύσταση η οποία απορρίπτει το αντίστοιχο κριτήριο.

**Interpretation Fragments:** Είναι παράγραφοι κειμένου που ενεργοποιούνται από συνδυασμούς εκτίμησης κριτηρίων. Επιπρόσθετα περιλαμβάνουν μια *στρατηγική καταστολής (suppression strategy)* η οποία εμποδίζει την ταυτόχρονη εμφάνιση αντικρουόμενων ερμηνειών.

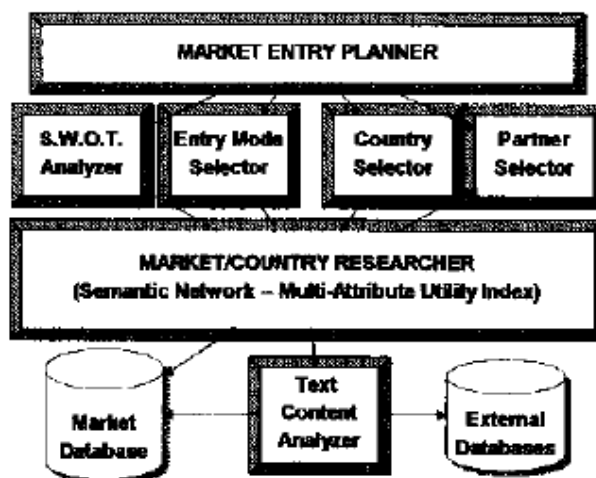
**Plans:** Ένα σχέδιο αντιπροσωπεύει μια εναλλακτική απόφαση. Τα σχέδια ταξινομούνται με βάση το σκορ τους από το πιο ελπιδοφόρο στο λιγότερο ελπιδοφόρο αναφορικά με την απόδοση του υποψήφιου κριτηρίου. Τα σχέδια ταξινομούνται σε κατηγορίες οι οποίες ονομάζονται *τύποι σχεδίων*.

**Hypertext Tutorials:** Είναι τα κύρια εγχειρίδια, με τη μορφή υπερκειμένου, του φλοιού. Η πρόσβαση σε αυτά γίνεται μέσω ενός βοηθητικού μενού ή μέσω συνδέσεων από επεξηγήσεις και ερμηνευτικές παραγράφους.

**Semantic Network MAU Database Index:** Ο φλοιός περιέχει ένα ευρετήριο της βάσης δεδομένων του, το οποίο συνδυάζει ένα σημασιολογικό δίκτυο με πολυκριτήρια μοντέλα χρησιμότητας. Αυτός ο συνδυασμός επιτρέπει την εξαγωγή εκτιμήσεων υπό την απουσία μιας φόρμας ερωτήσεων προς τη βάση δεδομένων. Περιλαμβάνει *αρχεία εκτιμήσεων* που περιέχουν ένα ή περισσότερα *πεδία αξιολόγησης* οι τιμές των οποίων προέρχονται από κάποια ποιοτική κλίμακα, όπως {άριστος, καλός, μέτριος, κακός, πολύ κακός} και συνδέονται με *πεδία επιπέδων εμπιστοσύνης*.

Δύο είναι τα κρίσιμα ερωτήματα που πρέπει να απαντηθούν κατά το σχεδιασμό της εισόδου μιας επιχείρησης σε μια αγορά: σε ποια αγορά

(που) και με ποιο τρόπο (πώς). Το «που» αφορά την επιλογή των καλύτερων χωρών ή / και περιοχών και το «πώς» την επιλογή της καλύτερης μεθόδου (εξαγωγές, franchise, στήσιμο εγκαταστάσεων και χιλιάδες άλλες επιλογές. Αυτά τα είδη των αποφάσεων απεικονίζονται στη δομή του συστήματος MAPS, στο Σχήμα 7.13.



Σχήμα 7.13: Συνολική δομή συστήματος MAPS [Πηγή: M. Mitri, (1995)]

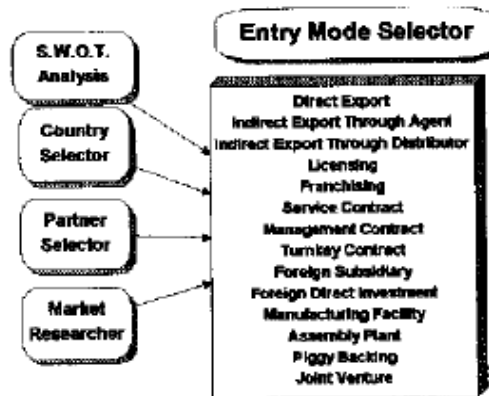
#### (1) S.W.O.T Analyzer (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats)

Αντιπροσωπεύει το βαθμό ετοιμότητας μιας επιχείρησης να διεθνοποιηθεί (Σχήμα 7.14) και παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα για την επιλογή της κατάλληλης εισόδου στην αγορά. Η σχεδίασή του αποδίδεται στον Cavusgil (Cavusgil S.T., 1987), ο οποίος προσδιόρισε διάφορα κριτήρια εκτίμησης των δυνατοτήτων (strengths) και των αδυναμιών (weaknesses) μιας επιχείρησης και τα ονόμασε *εσωτερικούς παράγοντες*, καθώς και τις ευκαιρίες (opportunities) και τις απειλές (threats) που θα αντιμετωπίσει και τα ονόμασε *εξωτερικούς παράγοντες*.

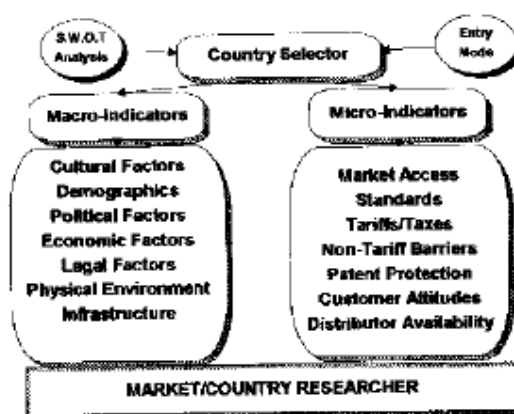


Σχήμα 7.14: Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats [Πηγή: M. Mitri, (1995)]

Τμήματα του MAPS χρησιμοποιούνται από επιχειρήσεις, κυβερνητικές υπηρεσίες και πανεπιστήμια, για να υπηρετήσουν εκπαιδευτικούς σκοπούς και λήψη αποφάσεων. Άλλα τμήματα, όπως τα Entry Mode Selector (Σχήμα 7.15) και Country Selector (Σχήμα 7.16) είναι υπό κατασκευή. Υπό κατασκευή, επίσης, βρίσκεται η ολοκλήρωση του τελικού συστήματος που θα προκύψει από τη συνεργασία των επιμέρους, αυτόνομων, τμημάτων.



Σχήμα 7.15: Entry mode Selector [Πηγή: M. Mitri, (1995)]

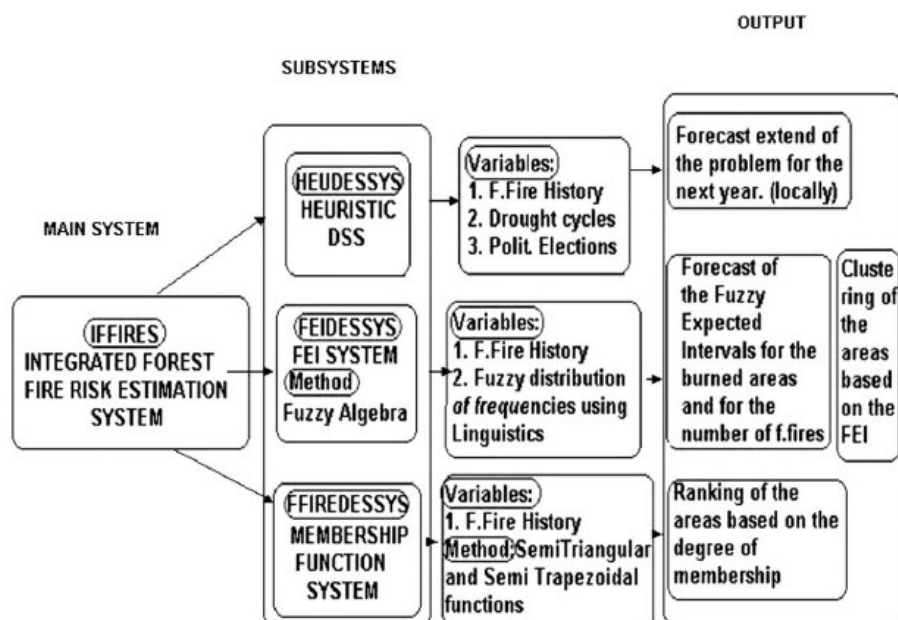


Σχήμα 7.16: Country Selector [Πηγή: M. Mitri, (1995)]

- **Environment** – «FFIREDESSYS» - A decision support system applying an integrated fuzzy model for long – term forest fire risk estimation

Το σύστημα υποστήριξης απόφασης που έχει αναπτυχθεί εφαρμόζει έναν μηχανισμό συμπεράσματος που είναι βασισμένος στις διάφορες πτυχές των ασαφών συνόλων και των ασαφών τεχνικών μηχανικής μάθησης. Το σύστημα έχει εφαρμοστεί στην Ελλάδα, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πιο ευρεία βάση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα υπολογίζει επιτυχώς τις επικίνδυνες περιοχές δασικής πυρκαγιάς.

Η δομή του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 7.15 που ακολουθεί:



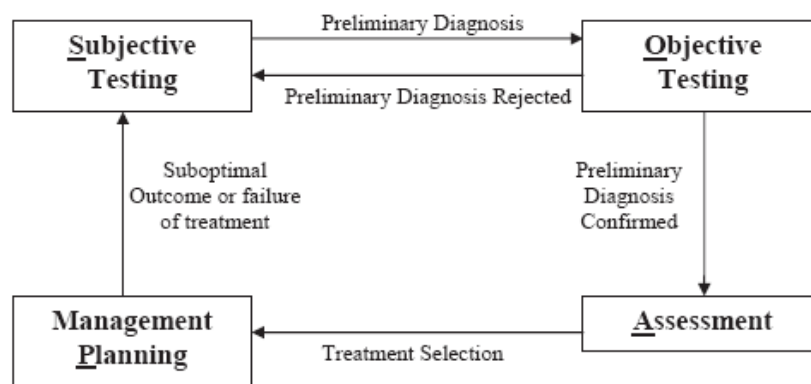
Σχήμα 7.15: Η δομή του συστήματος [Πηγή: L.S. Iliadis, 2003]

Το Σύστημα λειτουργεί σε H/Y Pentium III και μεταγενέστερο, σε περιβάλλον WINDOWS, αρκετά φιλικό για τον χρήστη. Το Σύστημα έχει αξιολογηθεί ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στις περιοχές της Φθιώτιδας, Λάρισας, Εύβοιας, Βοιωτίας, Αττικής και Χανίων.

➤ **Clinical Decisions** – A Decision Support System for lower back pain diagnosis: Uncertainty management and clinical evaluations

Ο χαμηλός πόνος στην πλάτη (L.B.P.) είναι ένα κοινό ιατρικό πρόβλημα που στερεί πολλά άτομα από τους κανονικούς τρόπους ζωής τους και τα κρατά από τις στερεότυπες δραστηριότητες. Η διάγνωση του L.B.P. είναι προκλητική στον τομέα της ιατρικής, επειδή απαιτεί την ιδιαίτερα εξειδικευμένη γνώση που περιλαμβάνει μια σύνθετη ανατομική και φυσιολογική δομή καθώς επίσης και τις διαφορετικές κλινικές εκτιμήσεις. Αν και κάποιες μελέτες έχουν προτείνει ή και αναπτύξει συστήματα για την υποστήριξη της διάγνωσης L.B.P. και κατ' επέκταση της βελτίωσης και επέκταση της γνώσης, αυτά τα συστήματα έχουν περιορισμένο γνωστικό πεδίο, δεν παρουσιάζουν συστηματικές αξιολογήσεις, ή / και αγνοούν τις διαγνώσεις που αποτελούνται από πολλαπλές εναλλακτικές (δηλ., εκβάσεις απόφασης), κάθε μία από τις οποίες αντιστοιχεί σε έναν ιδιαίτερο ιατρικό όρο, μια ασθένεια, ή μια ανωμαλία. Το Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων που θα αναλύσουμε, είναι ένα Web – Based σύστημα υποστήριξης απόφασης που χρησιμοποιεί ένα διαισθητικό και εύχρηστο πλαίσιο για να αξιολογήσει τις πληροφορίες του ασθενή και να συστήσει μια διάγνωση που αποτελείται από μία ή πολλαπλές εναλλακτικές. Το Σύστημα εξετάζει τα χαρακτηριστικά μιας διάγνωσης L.B.P. και χρησιμοποιεί τη λεκτική εκτίμηση πιθανότητας για να αναπαραστήσει και να «επιχειρηματολογήσει» απέναντι στη σχετική αβεβαιότητα. Οι αξιολογήσεις του συστήματος είναι συστηματικές, συμπεριλαμβανομένης της επαλήθευσης βάσεων γνώσεων, της επικύρωσης συστημάτων που χρησιμοποιούν μια τροποποιημένη δοκιμή Turing, και τέλος της κλινικής αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας που περιλαμβάνει πέντε νοσοκομειακούς γιατρούς και 180 πραγματικές περιπτώσεις που συλλέγονται από τις γεωγραφικά διασκορπισμένες κλινικές. Το σχέδιο αξιολόγησης είναι πιο λεπτομερές από εκείνο που έχει χρησιμοποιηθεί στις περισσότερες από τις προηγούμενες μελέτες και το προτεινόμενο σύστημα είναι σχετικά έτοιμο για την κλινική του επέκταση. Επομένως, αυτή η μελέτη και συμβάλλει στην έρευνα συστημάτων υποστήριξης απόφασης και έχει προωθήσει την κλινική υποστήριξη για τη διάγνωση L.B.P.

Η κοινή διαδικασία εξέτασης – διάγνωσης – παρακολούθησης ασθενών με L.B.P. από τους φυσιοθεραπευτές απεικονίζεται στο Σχήμα 7.17 που ακολουθεί:



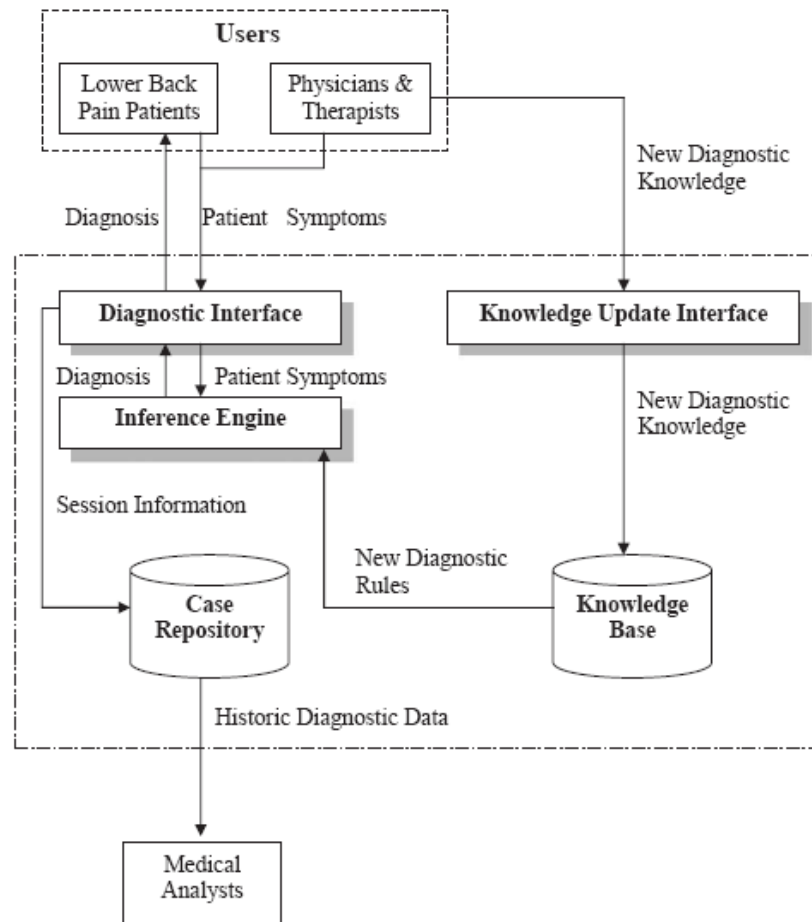
Σχήμα 7.17: The common S.O.A.P. process for managing LBP patients by physical therapists [Πηγή: L. Lin et al. (2003)]

Οι σημαντικές κατευθυντήριες αρχές για την ανάπτυξη του Συστήματος και την εφαρμογή του, είναι η επαληθεύσιμη γνώση, η επικυρωμένη χρησιμότητα συστημάτων και την κλινική αποτελεσματικότητα και οι φιλικές προς το χρήστη διεπαφές για τις κατάλληλες αναπροσαρμογές πρόσβασης και γνώσης. Το Web – Based αυτό σύστημα επιτρέπει την πρόσβαση χωρίς χρονικούς ή γεωγραφικούς περιορισμούς.

Εκτός από την ενίσχυση των διαγνώσεων των νοσοκομειακών γιατρών, το σύστημα υποστηρίζει την αυτοεξυπηρέτηση από τους ασθενείς, με ή χωρίς τη βοήθεια ενός νοσοκομειακού γιατρού.

Η αρχιτεκτονική του Συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 7.18 που ακολουθεί:





Σχήμα 7.18: Η αρχιτεκτονική του Web-Based Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για την διάγνωση L.B.P. – [Πηγή: L. Lin et al. (2003)]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.18, η αρχιτεκτονική του Συστήματος αποτελείται από μια βάση γνώσεων, μια μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων, μια αποθήκη γεγονότων – περιπτώσεων και δύο βασισμένες στο Web διεπαφές για την πρόσβαση στο σύστημα και την επικαιροποίηση της γνώσης. Η βάση γνώσεων περιλαμβάνει συνολικά 140 κανόνες και χρησιμοποιεί ένα τροποποιημένο σχέδιο παράγοντα βεβαιότητας με σκοπό να ανακουφίσει τις φορτικές ειδικές απαιτήσεις εκτίμησης πιθανότητας. Οι κανόνες ζητήθηκαν από δύο ιδιαίτερα έμπειρους φυσιοθεραπευτές και αποθηκεύονται σε μια σχετική βάση δεδομένων με την χρησιμοποίηση MySQL. Η μηχανή εξαγωγής συμπερασμάτων, που λειτουργεί με Ansi Java 2, υποστηρίζει τις διαγνώσεις πολλών εναλλακτικών, με έναν αλγόριθμο που στηρίζεται σε ένα πρότυπο συναίνεσης για το συνδυασμό της πιθανότητας των μεμονωμένων κανόνων. Ο αλγόριθμος είναι αποτελεσματικός για την αποκλειστική άρνηση, χαρακτηριστική μιας διάγνωσης L.B.P.

Για κάθε περίπτωση ασθενούς, το σύστημα συστήνει μια διάγνωση που αποτελείται από ένα ή περισσότερα μέρη που υπολογίζουν τις ποικίλες τιμές βεβαιότητας, με βάση τις πληροφορίες ασθενών και τα κλινικά στοιχεία που παρέχονται από το χρήστη (νοσοκομειακός γιατρός ή ασθενής), καθώς επίσης και

τα ενδιάμεσα αποτελέσματα από την ενεργοποίηση των κανόνων του συστήματος. Τελικά, η από – το – σύστημα συστημένη διάγνωση περιλαμβάνει τη φυσική κατάσταση (ασθένεια ή ανωμαλία) με την υψηλότερη πιθανότητα ή εκείνους που υπερβαίνουν ένα διευκρινισμένο κατώτατο όριο πιθανότητας. Το σύστημα έχει δύο γραφικά περιβάλλοντα επικοινωνίας με τον χρήστη. Η διεπαφή διαγνώσεων επιτρέπει στο χρήστη για να περιγράψει σημαντικά συμπτώματα χωρίς τη χρήση ιατρικής ορολογίας.

Το σύστημα περιλαμβάνει επίσης μια διεπαφή ανανέωσης της γνώσης, που επιτρέπει στο νοσοκομειακό γιατρό να ενημερώσει τη βάση γνώσεων άμεσα. Χρησιμοποιώντας αυτήν την γραφική διεπαφή, ο νοσοκομειακός γιατρός μπορεί να προσθέσει, να άρει, ή να τροποποιήσει έναν υπάρχοντα κανόνα αναφορικά με την παρατήρησή του (αριστερή πλευρά), την έκβαση της απόφασης – διάγνωσης (δεξιά πλευρά), ή το επίπεδο βεβαιότητας. Η υποστήριξη των αναπροσαρμογών γνώσης των νοσοκομειακών γιατρών είναι ουσιαστική επειδή μπορούν να αποκτήσουν την πρόσθετη γνώση διαγνώσεων κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Στο Σχήμα 7.19 που ακολουθεί βλέπουμε ένα παράδειγμα συγκεκριμένου τμήματος από το περιβάλλον λειτουργίας του συστήματος:

The image displays two parts of a diagnostic interface. The top part, titled 'Your pain feels...', contains a list of radio button options for pain characteristics and a line graph. The bottom part, titled 'Pain Location', shows three human figures (front, side, and back views) with checkboxes for various pain locations and a list of corresponding radio button options.

**Your pain feels...**

- ☐ Worst in the morning and better as the day progresses
- ☐ Best in the morning and worsens as the day progresses
- ☐ Bad in the morning, but then it improves, later worsens again
- ☐ Stays the same throughout the day no matter the activity
- ☐ Worst at night
- ☐ None of the Above

**Submit**

**Pain Location**

Three human figures are shown: Front view (Right/Left), Left Side view, and Right Side view. The back view shows the spine and buttocks. Red shading indicates the location of pain on the buttocks.

- ☒ One sided, upper-outer butt pain (either right or left)
- ☐ One sided, lower-outer butt pain (either right or left)
- ☐ One sided, lower-inner butt pain (either right or left)
- ☐ One sided, around the anus pain (either right or left)
- ☐ Both sides, upper-outer butt pain
- ☐ Both sides, lower-outer butt pain
- ☐ Both sides, lower-inner butt pain
- ☐ Both sides, around the anus

**Submit** **Reset**

Σχήμα 7.19: Sample diagnostic interface based on non-medical terminology and graphs [Πηγή: L. Lin et al. (2003)].

Οι αξιολογήσεις του συστήματος, περιλαμβάνουν την επαλήθευση των βάσεων γνώσεων, την επικύρωση του συστήματος και την κλινική αποτελεσματικότητα χρησιμοποιώντας τις πραγματικές εξεταστικές περιπτώσεις. Κεντρικά πρόσωπα στις αξιολογήσεις του συστήματος, είναι πέντε ανώτεροι θεράποντες, όλοι κλινικά ενεργοί με τουλάχιστον 10 έτη εμπειρίας στη διάγνωση και τη θεραπεία L.B.P. Μεταξύ τους, τρεις σε πρακτική σε μια εθνικού επιπέδου κλινική για L.B.P. στις Ηνωμένες Πολιτείες, και οι άλλοι με πρακτική εξάσκηση στην Ευρώπη. Με τη συμπερίληψη θεραπόντων που ασκούν το επάγγελμά τους σε διαφορετικές κλινικές και περιοχές, αυξήσαμε την ισχύ και τη δυνατότητα γενίκευσης των αποτελεσμάτων αξιολόγησής μας.

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει περιληπτικά το σχέδιο αξιολόγησης του συστήματος:

Evaluation focus	Evaluation methods	Evaluation metrics
Knowledge base verification	<ul style="list-style-type: none"> <li>–Preliminary completeness verification</li> <li>–Face value verification</li> <li>–Completeness verification</li> <li>–Check for developer-induced errors</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usefulness</li> <li>• Completeness</li> </ul>
System validation	Modified Turing test	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interpreted system performance benchmarked by experts' performance</li> </ul>
Clinical efficacy	Test using 180 real-world clinical cases	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recall rate</li> <li>• Precision rate</li> <li>• Accuracy</li> </ul>

[Πηγή: L. Lin et al. (2003)]

Η αξιολόγηση της κλινικής αποτελεσματικότητας του συστήματος έγινε με τη χρήση 180 πραγματικών περιστατικών, επιλεγμένα τυχαία παγκοσμίως.

Δύο ιδιαίτερα έμπειροι θεράποντες εξέτασαν κάθε περίπτωση προτού αυτή συμπεριληφθεί στην κλινική αξιολόγηση αποτελεσματικότητας του συστήματος: ένας άλλος δεν είχε συμμετάσχει στην ανάπτυξη του συστήματος, ενώ άλλοι ήταν ενεργά συμμετέχοντες. Κάθε θεράπων εξέτασε τη διάγνωση η οποία προβλέφθηκε από το σύστημα σε μια περίπτωση δοκιμής και την συμπλήρωσε με τη διάγνωσή του / της εάν ήταν απαραίτητο. Μαζί, οι εμπειρογνώμονες εξέτασαν, συζήτησαν, και παγίωσαν τις ιδιαίτερες αξιολογήσεις τους για να παραγάγουν μια διάγνωση "χρυσών προτύπων" για κάθε περίπτωση δοκιμής. Χρησιμοποιήσαμε τις προκύπτουσες διαγνώσεις για να προσεγγίσουμε τις "επαρκείς διαγνώσεις", ενάντια στις οποίες η κλινική αποτελεσματικότητα του συστήματός μας αξιολογήθηκε. Χρησιμοποιήσαμε τρεις μετρήσεις στην αξιολόγηση αποτελεσματικότητάς μας: ανάκληση, ακρίβεια, και ακρίβεια. Το ποσοστό ανάκλησης αναφέρεται στη μερίδα μιας διάγνωσης χρυσών προτύπων (που μπορεί

να αποτελείται από πολλαπλάσια μέρη) που έχει συστηθεί σωστά από το σύστημα. Όπως καθορίζεται εδώ, το ποσοστό ανάκλησης μετρά τη δύναμη του συστήματος και υπογραμμίζει ιδιαίτερα, ψεύτικα αρνητικά. Το ποσοστό ακρίβειας μετρά την αποδοτικότητα του συστήματος και δίνει έμφαση στα ψεύτικα θετικά. Συγκεκριμένα, το ποσοστό ακρίβειας ορίζεται ως η μερίδα μιας διάγνωσης που επιτυγχάνεται από το σύστημα που συμπεριλαμβάνεται πραγματικά στην αντίστοιχη διάγνωση χρυσών προτύπων.

Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει περιληπτικά τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του συστήματος:

Diagnosis category	Testing cases	Distribution of testing cases (cumulative)	Precision (%)	Recall (%)	Accuracy (%)
1	16	8.79	46.88	46.88	56.25
2	16	8.79	37.50	40.62	50.00
3	46	25.27	74.47	86.17	89.36
4	45	24.73	64.44	81.11	62.22
5	10	5.49	60.00	80.00	60.00
6	1	0.55	0.00	0.00	0.00
7	3	1.65	66.67	100.00	100.00
8	3	1.65	33.33	66.67	33.33
9	11	6.04	72.72	90.91	90.91
10	13	7.14	76.92	73.08	92.31
11	14	7.69	82.14	92.86	92.86
12	3	1.65	50.00	50.00	33.33
13	1	0.55	0.00	0.00	0.00
14	0	0.00	0	0	0
Overall	182	100.00	64.56	75.82	73.08
Total Excluded Category 6 and 13	180	98.90	65.28	76.67	73.89

[Πηγή: L. Lin et al. (2003)]

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αξιολόγησης βασισμένα σε αποδόσεις πολλαπλάσιων μετρήσεων, το σύστημα αγκαλιάζει τη σημαντική και επαληθεύσιμη γνώση των διαγνώσεων, είναι σε θέση να συναγωνιστεί σε επίπεδο συγκρίσιμο τους εμπειρογνώμονες διαφόρων περιοχών, και εκθέτει την ενθάρρυνση της κλινικής αποτελεσματικότητας.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Ανακεφαλαίωση – Σχόλια – Προοπτικές

Στα πλαίσια της παρούσας συνθετικής διατριβής, επιχειρήθηκε η παρουσίαση, μέσα από τη βιβλιογραφική έρευνα, του θεωρητικού υπόβαθρου της λήψης αποφάσεων υπό συνθήκες αβεβαιότητας και ρίσκου, καθώς και μία έρευνα και καταγραφή Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, τα οποία έχουν τη δυνατότητα χειρισμού της αβεβαιότητας και ανάλυσης του ενεχόμενου κινδύνου, για την υποστήριξη των αποφασίζοντων, σε διάφορους τομείς (περιβάλλον, υγεία, στρατηγικό marketing και αποφάσεις, χρηματοοικονομικά, στρατηγικός σχεδιασμός, logistics, κ.ά.).

Η επιστήμη των αποφάσεων αποτελεί ένα ιδιαίτερα ευρύ και ταχύτατα εξελισσόμενο πεδίο έρευνας, τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Πέρα όμως από την κλασσική θεωρία αποφάσεων, η ανάλυση και όλη η διαδικασία λήψης μιας απόφασης αποκτά ιδιαίτερη σημασία, όταν γίνεται κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας και κινδύνου.

Εδώ θα πρέπει να διευκρινίσουμε ότι η έννοια της αβεβαιότητας, εμφανίζεται στη διαδικασία λήψης αποφάσεων με δύο ουσιαστικά μορφές και σε δύο στάδια, αφενός με τη μορφή της ασάφειας ή της έλλειψης δεδομένων και πληροφοριών, τα οποία είναι απαραίτητα στον αποφασίζοντα για να προχωρήσει τη διαδικασία της τελικής επιλογής του και αφετέρου, με τη μορφή της άγνοιας των αποτελεσμάτων και των επιπτώσεων κάθε μιας από τις εναλλακτικές επιλογές. Στην περίπτωση αυτή, η έννοια της αβεβαιότητας συνδυάζεται με αυτή του κινδύνου (ρίσκου), η οποία αντανakλά στις επιπτώσεις που έχει κάθε μια από τις εναλλακτικές επιλογές. Όπως είδαμε, για την ανάλυση αποφάσεων υπό καθεστώς αβεβαιότητας χρησιμοποιείται παραδοσιακά η θεωρία των πιθανοτήτων. Η συνεισφορά της τελευταίας στην υποστήριξη αποφασίζοντων, οι οποίοι δρουν σε περιβάλλον αβεβαιότητας και κινδύνου, είναι οπωσδήποτε αναμφισβήτητη. Εντούτοις, η μελέτη σύγχρονων και πολύπλοκων συστημάτων, όπως π.χ. μιας χρηματαγοράς, ή η λήψη μιας στρατηγικής απόφασης μιας εταιρίας, που αφορά στην είσοδο στην αγορά ενός νέου προϊόντος, αποδεικνύει ότι η θεωρία των πιθανοτήτων αδυνατεί να μοντελοποιήσει όλες τις μορφές αβεβαιότητας που πηγάζουν από τη λειτουργία αυτών, και ιδιαίτερα την ασάφεια.

Έτσι, θεωρίες, τεχνικές και μεθοδολογικές προσεγγίσεις αναπτύχθηκαν ή οι ήδη υπάρχουσες εξελίχθηκαν, προκειμένου καλυφθούν τα κενά στην υποστήριξη των αποφασίζοντων. Στην δεύτερη ενότητα της εργασίας, αναπτύχθηκε αναλυτικότερα το θεωρητικό υπόβαθρο της υποστήριξης των αποφασίζοντων που δρουν κάτω από συνθήκες αβεβαιότητας και ρίσκου. Η θεωρία πιθανοτήτων με την κλασσική προσέγγιση του Bayes, σε συνδυασμό με τη Θεωρία χρησιμότητας και τα κριτήρια λήψης αποφάσεων υπό αβεβαιότητα και κίνδυνο, τα δίκτυα Bayes, οι συντελεστές

βεβαιότητας, η προσέγγιση Depster-Shafer, η info-gap θεωρία αποφάσεων, καθώς και η διαδικασία διαχείρισης και ανάλυσης κινδύνου με χρήση τεχνικών προσομοίωσης, αποτελούν εναλλακτικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις. Περισσότερο βάρος δόθηκε στην ανάπτυξη της θεωρίας της Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic) και των υβριδικών Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων (συνδυασμός τεχνικών Ασαφούς Λογικής και Νευρωνικών Δικτύων (Neural Nets)), ο συνδυασμός των οποίων, μαζί με τις ήδη προαναφερθείσες μεθόδους και αντίστοιχες της πολυκριτήριας ανάλυσης, οδήγησε στη δημιουργία έμπειρων Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, τα οποία παρέχουν πολύτιμη υποστήριξη στους αποφασίζοντες σε διάφορους τομείς.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, καταγράφηκαν, μετά από μια βιβλιογραφική έρευνα στο χρονικό διάστημα των τελευταίων δέκα περίπου ετών (1995 – 2006), Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων που αναπτύχθηκαν με τον συνδυασμό των παραπάνω θεωριών και μεθόδων και έχουν τη δυνατότητα χειρισμού της αβεβαιότητας και του ρίσκου, στα διάφορα στάδια της διαδικασίας λήψης αποφάσεων. Από τα αποτελέσματα της έρευνας διαπιστώθηκε ότι ένας αξιόλογος αριθμός Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων έχει αναπτυχθεί για την υποστήριξη των αποφασιζόντων, σε διάφορα πεδία, όπως αυτό του περιβάλλοντος, της διαχείρισης ενέργειας, των κλινικών αποφάσεων (υγεία), του στρατηγικού marketing, των logistics, του στρατηγικού σχεδιασμού των επιχειρήσεων, όπου οι έννοιες της αβεβαιότητας και του ρίσκου εμφανίζονται έντονα τόσο στις διάφορες φάσεις της διαδικασίας απόφασης όσο και στις επιπτώσεις των διαθέσιμων εναλλακτικών επιλογών.

Πέρα όμως από την ανάπτυξη των συστημάτων αυτών, διαπιστώθηκε σε έντονο βαθμό, η απλή χρήση μεθόδων, τεχνικών και μοντέλων, στη φάση της μοντελοποίησης της διαδικασίας λήψης της απόφασης, χωρίς την περαιτέρω ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων.

Είναι προφανές ότι οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για λήψη έγκυρων και ρεαλιστικών αποφάσεων στο σύγχρονο περιβάλλον μέσα στο οποίο καλούνται να δράσουν οι επιχειρήσεις και οι αποφασίζοντες, προϋποθέτουν και την ύπαρξη των κατάλληλων εργαλείων υποστήριξης για τη λήψη αυτών των αποφάσεων. Επίσης η πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος δράσης έχει σαν αποτέλεσμα, η αβεβαιότητα και ο κίνδυνος να ελλοχεύουν σε κάθε φάση της διαδικασίας λήψης μιας απόφασης.

Είναι σίγουρο πως η συνεχής εξέλιξη επιστημών όπως αυτές των ηλεκτρονικών υπολογιστών και της Τεχνητής Νοημοσύνης θα συμβάλει αποτελεσματικά στην ανάπτυξη και άλλων Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων, προσανατολισμένα στην υποστήριξη των αποφασιζόντων στην αντιμετώπιση της αβεβαιότητας και στην ελαχιστοποίηση των κινδύνων, στη λήψη σημαντικών αποφάσεων σε διάφορους τομείς.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- [1] Σημειώσεις Πανεπιστημιακών παραδόσεων μεταπτυχιακού μαθήματος «Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων», Νικόλαος Ματσατσίνης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 1998
- [2] «Θεωρία και Πρακτική για την Λήψη Κρισίμων Αποφάσεων Κάτω από Ψυχολογική Πίεση», Ιωσήφ-Χρήστος Κ. Κονδυλάκης, Αεροπορική Επιθεώρηση, Τεύχος 64, 2001.
- [3] «Ηγεσία – Διοικητική», Τόμος 2, Σχολή Πολέμου Αεροπορίας, 1998
- [4] «Διοικητική Επιστήμη – Λήψη Επιχειρηματικών Αποφάσεων στην κοινωνία της πληροφορίας», Γρηγόρης Πραστάκος, Εκδόσεις Σταμούλη ΑΕ, Αθήνα, 2000
- [5] «Ασαφής Λογική και Λήψη Αποφάσεων υπό καθεστώς αβεβαιότητας», Θωμαΐδης Νίκος, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2001
- [6] «Τεχνικές Πρόβλεψης – Εκτίμησης και Διαχείριση Ρίσκου», Κ. Ράνος, Πάντειο Πανεπιστήμιο, Υπουργείο Ανάπτυξης / Γ. Γ. Βιομηχανίας / Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα», 2004
- [7] «Ευφυείς Μέθοδοι Υποστήριξης Αποφάσεων», Εμμανουήλ Γ. Καλέργης, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2003
- [8] «Ανάλυση και Διαχείριση Κινδύνου στις σύγχρονες επιχειρηματικές Μονάδες», Βασίλειος Ν. Κέφης, Τμήμα Δημόσιας Διοίκησης Παντείου Πανεπιστημίου, 2005
- [9] «Η ανάλυση του επιχειρηματικού ρίσκου», Κυρ. Βλάχος, Innnews ΑΕ – Οικονομικός Ταχυδρόμος, σελ 54, 2004.
- [10] «Στήριξη και Λήψη Αποφάσεων – Βασικές Αρχές», Δ. Χρήστου – Βαρσακέλης, Πανεπιστημιακές παραδόσεις μαθήματος 2007 – 2008, Τμήμα

Εφαρμοσμένης Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας Οικονομικών και Κοινωνικών Επιστημών

**[11]** «Εισαγωγή στη Στατιστική Σκέψη», Πανάρετος Ι. & Ξεκαλάκη Ε., Τόμος ΙΙ, Αθήνα, 2000

**[12]** «Γραμμικά Μοντέλα (με έμφαση στις εφαρμογές)», Πανάρετος Ι., Δ' έκδοση, Αθήνα, 2001

**[13]** «Στατιστική Κατά Bayes», Δελλαπόρτας Π & Τσιαμυρτζής Π., Αθήνα, 2004

**[14]** «Σημειώσεις Πανεπιστημιακών παραδόσεων μεταπτυχιακού μαθήματος «Συστήματα Αποφάσεων στην παραγωγή», Δρ Δ. Ασκούνης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα ΗΜΜΥ

**[15]** «Εφαρμογή νευροασαφών Συστημάτων στην εκτίμηση πιστωτικού κινδύνου», Κίτσιος Εμμανουήλ, 2004, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης

**[16]** «Μοντελοποίηση του χώρου της Δημόσιας Υγείας για τον εντοπισμό αδυναμιών και την ανάδειξη προτεραιοτήτων πολιτικής», Σκληρός Νικόλαος – Σχινάς Παναγιώτης, 2004, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**[17]** «Ανάπτυξη έξυπνου συστήματος σύντηξης αποφάσεων για πρόβλεψη ανεπιθύμητων αλλαγών λωρίδας κυκλοφορίας», Κουτσημανής Σ. Χρυσόστομος, 2004, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**[18]** «Σχεδίαση, ανάπτυξη και σύνθεση κατανεμημένων υπηρεσιών σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον υποστήριξης κλινικών αποφάσεων», Ανδρουλιδάκης Άγγελος, 2006, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**[19]** «Στατιστική», Κων/νος Δρακάτος, Δεύτερη Έκδοση, Αθήνα, 1984

**[20]** «Βασικές αρχές και σύγχρονα θέματα του χρηματοοικονομικού μάνατζμεντ», Κων/νος Ζοπουνίδης, 2003.

**[21]** «Τεχνοοικονομικές αποφάσεις με πολλαπλά κριτήρια», Κων/νος Ζοπουνίδης, Μιχάλης Δούμπος, Κυριακή Κοσμίδου, 2004



[22] «Πολυκριτήριες τεχνικές ταξινόμησης», Μιχάλης Δούμπος, Κων/νος Ζοπουνίδης, 2001

[23] «Εισαγωγή στην Τεχνητή Νοημοσύνη και στα συστήματα πολλαπλών πρακτόρων», Νικόλαος Ματσατσίνης, Νικόλαος Σπανουδάκης, Ανδρέας Σαμαράς, 2005

[24] «Συστήματα Αποφάσεων στην παραγωγή», Δρ Δ. Ασκούνης, Σημειώσεις Μεταπτυχιακού μαθήματος Διοίκηση Παραγωγής και Συστημάτων Υπηρεσιών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

### **Ξένη Βιβλιογραφία**

[25] «Decision Making under Uncertainty: Models and Choises», Charles A. Holloway, 1979, Stanford University

[26] «Uncertainty in Artificial Intelligence», L.N. Kanal and J.F. Lemmer, 1986, University of Matyland, USA

[27] «Marketing Decisions under Uncertainty», Dung Nguyen, 1997, University of Pittsburgh

[28] «Decision Making under Uncertainty: an artificial Intelligence approach», Jerry Felsen, 1976, CDS Publishing Company, New York

[29] «Risk and Decisions», W.T. Singleton and Jan Hovden, University of Aston in Birmingham – Scientific and Industrial Research Foundation, 1987

[30] «The philosophy of Risk», John C. Chicken and Tamar Posner, 1998

[31] «Bank Lending Policy, credit scoring and value at Risk», Tor Jacobson – Kasper Roszbach, 1998

[32] «Credit Portfolio Modelling, Marginal Risk Contributions, and Granularity Adjustment», Hans Rau-Bredow, 2002

[33] «How Does Systematic Risk Impact US Credit Spreads? A Copula Study», Hayette Gatfaoui, TEAM Pole Finance (UMR 8059 of the CNRS) University Paris I - Panthéon-Sorbonne, Maison des Sciences Economiques, 2003

[34] «Is Firm Interdependence within Industries Important for Portfolio Credit Risk?», Kenneth Carling, Lars Rönnegård, and Kasper Roszbach, 2007

- [35] «Pricing and Hedging in the Presence of Extraneous Risks», Pierre Collin Dufresne, Julien Hugonnier, 2003
- [36] «Spectral Risk Measures For Credit Portofolios», Claudio Albanese – Stephan Lawi, 2000
- [37] «Bayes and Empirical Bayes Methods For Data Analysis», Bradley P. Carlin και Tomas A. Louis. (1996), First Edition., London UK
- [38] «The Practice of Bayesian Analysis», S. French and J.Q. Smith. (1997) First Edition., London UK
- [39] «Bayesian Statistical Inference», Gudmund R. Iversen. (1985) Second Edition. London UK
- [40] «Applied Regression Analysis», Normal R. Draper and Harry Smith (1998) Third Edition., New York
- [41] «Reference-dependent Qualitative Models for Decision Making under Uncertainty», Patrice Perny and Antoine Rolland, (2005)
- [42] «Decision-making in a Fuzzy Environment» Bellman, R., Zadeh L.A. (1970), Management Science, Vol.17.
- [43] «Neuro-fuzzy adaptive modelling and control», Brown, M., Harris, C. (1994), New York: Prentice-Hall.
- [44] «Fuzzy neural networks: a survey», Buckley, J.J., Hayashi, Y. (1994) Fuzzy Sets and Systems 66 1–13.
- [45] «ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems», Jang, J.-S. R. (1993), IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No.3, pp. 665-685.
- [46] «Neuro-Fuzzy Modeling: Architectures, Analyses and Applications», Jang, R. (1992), PhD Thesis, University of California, Berkeley.
- [47] «Neural-Network-Based Fuzzy Logic Control and Decision Systems», Lin, C.T., Lee, C.S.G. (1991), IEEE Trans. on Computers, 40(12):1320-1336.

**[48]** «NEFCLASS - A Neuro-Fuzzy Approach for the Classification of Data», Nauck, D., Kruse, R. (1995), In K. George, J.H.Carrol, E. Deaton, D. Oppenheim and J. Heightower, eds: Applied Computing 1995. Proc. 1995 ACM Symposium on Applied Computing, Nashville, Feb. 26-28, pp. 461-465. ACM Press, New York.

**[49]** «Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights», Chapman, Chris and Ward, Stephen , John Wiley & Sons Ltd., New York, 1977.

**[50]** «Risk Management», Crouhy, Michel; Mark, Robert; and Galai, Dan, ISBN: 0071357319. McGraw-Hill, 2000.

**[51]** «Introduction to Simulation and Risk Analysis», Evans, James R.; and Olson, David L. ISBN: 0130329282. Prentice-Hall, 2001.

**[52]** «An introduction to neural networks», Gurney Kevin, University of Sheffield. Routledge.Taylor and Francis Group. London1997.

**[53]** «NEURAL NETWORKS - A Comprehensive Foundation», Simon Haykin , Second Edition". McMaster University Hamilton, Ontario, Canada.1999 by Prentice Hall.

**[54]** «The civil justice system and going concern audit reports: comments on auditors decision making under going concern uncertainties in low litigation risk environments: evidence from Hong-Kong», Randall E. LaSalle, 2006, Department of Accounting, West Chester University of Pennsylvania, USA

**[55]** «Riding the storm: a comparison of uncertainty modeling techniques for storm surge risk management», A. Zerger, D.I. Smith, G.J. Hunter and S.D. Jones, 2001, Centre of GIS and Modeling, Department of Geomatics, University of Melbourne, Australia

**[56]** «Bayesian risk-based decision method for model validation under uncertainty», Xiaomo Jiang and Sankaran Mahadevan, 2005, Vanderbilt University, USA

**[57]** «Risk-based decision making for drilling waste discharges using a fuzzy synthetic evaluation technique», Rehan Sadiq, Tahir Husain, Brian Veitch and Neil Bose, 2003, Memorial University of Newfoundland, Canada

**[58]** «Modeling decision support and uncertainty for large transport infrastructure projects: The CLG DSS model», Kim Bang Salling, Steen Leleur and Anders Vestergaard Jensen, 2006, CTT-DTU, Technical University of Denmark

- [59] «IFRP: A hybrid interval – parameter fuzzy robust programming approach for waste management planning under uncertainty», X.H. Nie, G.H. Huang, Y.P.Li and L. Liu, 2005, Faculty of Engineering, University of Regina, Canada
- [60] «A fuzzy compromise approach to water resource systems planning under uncertainty», Michael J. Bender and Slobodan P. Simonovic, 1998, Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, Canada
- [61] «An ecosystem model for assessing ecological risks in Quebec rivers, lakes and reservoirs», Steven M. Bartell et al., 1999, Montreal, Canada
- [62] «An interactive Decision Support System for bank asset liability management», Dieter Langen, 2003, Institute for Statistics and Mathematical Economics, University of Karlsruhe
- [63] «Framework to support decisions on chemical pest control under uncertainty, applied to aphids and brown rust in winter wheat», W.A.H. Rossing, R.A. Daamen and E. M.T. Hendrix, 1993, Department of Theoretical Production Ecology, Agriculture University, The Netherlands
- [64] «Enterprise-wide decision support systems: PSE contributions and promise», G.V. Rex Reklaitis, 2006, School of Chemical Engineering Purdue University West Lafayette, USA
- [65] «Combining decision tree and MAUT for selecting a country for a global manufacturing facility», Yavuz Burak Canbolat, Kenneth Chelst and Nitin Garg, 2005, Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Wayne State University, USA
- [66] «Clinical Decision Support Systems: Perspectives in Dentistry», Eneida A. Mendoca, M.D., Ph.D., 2004
- [67] «Assessing Wildfire Destruction Danger: Decision Support System incorporating uncertainty», Spiros Kaloudis, A. Tocatlidou, N. Lorentzos, A. Sideridis and M. Karteris, 2003, Technological Education Institute of Lamia, Greece
- [68] «Accepting uncertainty, assessing risk: Decision quality in managing wildfire, forest resource values and new technology», Jeffrey G. Borchers, 2004, USDA Forest Service, Redwood Science Laboratory, USA

**[69]** «A knowledge-based expert system for earthquake resistant design of reinforced concrete buildings», A. Berrais, 2004, Civil and Architectural Technology Department, Saudi Arabia

**[70]** «A fuzzy logic expert system to estimate intrinsic extinction vulnerabilities of marine fishes to fishing», W. Cheung, T. Pitcher and D. Pauly, 2004, The University of British Columbia, Canada

**[71]** «A fuzzy knowledge-based decision support system for groundwater pollution risk evaluation», V. Uricchio, R. Giordano and N. Lopez, 2003, Water Research Institute, Italian National Research Council, Bari, Italy

**[72]** «A Decision Support System for water resources management under uncertainty by scenario analysis», S. Pallottino, G. Sechi and P. Zuddas, 2004, Department of Land Engineering, University of Cagliari, Italy

**[73]** «MAPS: An international market entry planning system», Mitri, 1995, Dept. of Finance and Computer Information Systems, Eastern Michigan University

**[74]** «ACTION-DM: Multiple value decision supporting application in software production facing global market», Lei, Shouju, Garcia, Zuzhao, 2000, Tsinghua University, Beijing – Federal University of Paraiba, Brazil (Garcia)

**[75]** «Process WebTM: Web-enabled process support for planning the formation of a virtual enterprise», Azad M. Madni and Carla C. Madni, Cliff Stogdill, 1998, Intelligent Systems Technology, Inc., Santa Monica, California, USA, Wright Laboratory/Mfg Tech Division, Wright- Patterson AFB, USA

**[76]** «An Intelligent Decision Support System applied in the investment of real estate», Lin, Wang, Hu, Gao, Lu, 1996, Department of Automation, Shanghai University, China

**[77]** «A hybrid intelligent system for predicting bank holding structures», Hashemi, Blanc, Rucks, Rajaratnam, 1998, Department of Management, College of Business Administration, University of Arkansas

**[78]** «An Intelligent Decision Support System for investment analysis», K.L.Poh, 2000, Department of Industrial and Systems Engineering, National University of Singapore

**[79]** «An intelligent stock trading decision support system through integration of genetic algorithm based fuzzy neural network and artificial neural

network», R.J.Kuo, C.H.Chen, Y.C.Hwang, 2001, National Taipei University of Technology, Taiwan, IShou University, Kaohsiuna County, Taiwan, Wei Computer Company, Taipei, Taiwan

**[80]** «Intelligent decision support system using the ceres-wheat crop modeling system», Ahmed Kamel, John Sticklen, Kris Shroeder, Eman El- Sheikh, Urs Schulthess, Richard Ward, Joe Ritchie, A.Rafea, A.Salah, Computer Science Department, Michigan State University. Crop and Soil Sciences Department, Michigan State University. Laboratory for Expert Systems for Crop Improvement Egyptian National Agricultural Research Center, Cairo, Egypt

**[81]** «FARSYS: a knowledgebased system for managing strategic change», Henk W. Volberda, A. Rutges, 1999, Department of Strategic Management and Business Environment, Rotterdam School of Management, Erasmus University, Rotterdam, The Netherlands. Department of Production and Operation Management, University of Groningen, The Netherlands

**[82]** «Intelligent decision support system for diagnosis and maintenance of automated systems», Sanjiv A. Patel Ali K. Kamrani, 1996, Manufacturing Systems Engineering Program and Department of Industrial & Manufacturing Systems Engineering, The University of Michigan-Deaborn, Deaborn, USA.

**[83]** «Intelligent Decision Support for Waste Minimization in Electroplating Plants», K.Q.Luo Y.L.Huang, 1997, Wayne State University, Detroit, MI, USA

**[84]** «SIMERFISH: Intelligent system for fish stock prediction and allowable catch evaluation», Ludmila Sazonova, Gennady Osipov, Maxim Godovnikov, 1999, Russian Academy of Science, Program Systems (Software) Institute, Artificial Intelligence Research Centre, 152140 Pereslavl-Zalessky, Russia

**[85]** «MADIS: Soft computing based multi-agent marketing decision support system», Rafik A. Aliev, Bijan Fazlollahi, Rustam M. Vahidov, 2000, Department of Automatic Control Systems, Azerbaijan State Oil Academy, 20 Azadlyg Ave., Baku, Azerbaijan 370601, Department of Decision Sciences, Georgia State University, 35 Broad St., Atlanta, GA 30303, USA

**[86]** «ANFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System», Heikki Koivo, 2000

**[87]** «Takagi-Sugeno fuzzy logic versus Mamdani fuzzy logic», Dr A.G. Tony Pipe, University of West England

**[88]** «Neuro – fuzzy adaptive modeling and control», Brown M. Harris, 1994,, New York: Prentice Hall.

**[89]** «Fuzzy neural networks: a survey», Buckley J.J. Hayashi, 1994, Fuzzy Sets and Systems, 66 1 – 13.

**[90]** «Using a Bayesian belief network to aid differential diagnosis of tropical bovine diseases», I.J. McKendrick a,l, G. Gettinbya, Y. Gua, S.W.J. Reidb, C.W. Reviea, 2000, Department of Statistics and Modelling Science and of Information Science, Veterinary Informatics and Epidemiology Group, University of Strathclyde, Glasgow G1 1XH, UK, Veterinary Informatics and Epidemiology Group, University of Glasgow School of Veterinary Medicine, Bearsden Road, Glasgow G61 1QH, UK

**[91]** «The Dempster-Shafer theory of evidence: an alternative approach to multicriteria decision modelling.», Malcolm Beynon, Bruce Curry, Peter Morgan,Cardi, 1998, Business School, Colum Drive, Cardi, CF1 3EU, UK

**[92]** « MCE-RISK: integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision-making in natural hazards», Keping Chen, Russell Blong, Carol Jacobson, 2000, Environmental Modelling & Software 16 (2001) 387–397, Natural Hazards Research Centre, Macquarie University, Sydney, NSW 2109, Australia b Department of Physical Geography, Macquarie University, Sydney, NSW 2109, Australia

**[93]** «A Methodological Study on Fitting a Nonlinear Stochastic Model of the AIDS Epidemic in Philadelphia», 1997, C. K. SLEEMAN AND C. J. MODE Department of Mathematics and Computer Science Drexel University, Philadelphia, PA 19104, U.S.A. Mathl. Comput. Modelling Vol. 26, No. 2, pp. 33-51

**[94]** «A Bayesian Network for predicting yield response of winter wheat to fungicide programmes», 1996, F. Tari, Mathematics and Decision Systems Group Silsoe Research institute, Wrest Park. Siisoe, Bedford MK4.5 UK

**[95]** «A decision support system for lower back pain diagnosis: Uncertainty management and clinical evaluations», Lin Lin, Paul Jen-Hwa Hu, Olivia R. Liu Sheng, 2003, Department of Management, College of Business and Economics, Lehigh University Bethlehem, PA 18015, USA Accounting and Information Systems, David Eccles School of Business, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112, USA

**[96]** «A decision support system for managing forest fire casualties», 2005, Marc Bonazountas, Despina Kallidromitou, Pavlos Kassomenos, Nikos

Passas, National Technical University of Athens, Faculty of Civil Engineering, Department of Water Resources Hydraulics & Maritime Engineering, Epsilon International SA, University of Ioannina, Department of Physics, Laboratory of Meteorology, Technical University of Crete, Department of Environmental Engineering

**[97]** «A fuzzy compromise approach to water resource systems planning under uncertainty», Michael J. Bender, Slobodan P. Simonovic, 1998, Golder Associates Ltd., 1000, 940-6 Avenue SW, Calgary, AB, Canada T2P 3T1, Department of Civil & Geological Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Canada

**[98]** «A knowledge-based expert system for earthquake resistant design of reinforced concrete buildings», 2005, A. Berrais, Civil and Architectural Technology Department, Abha College of Technology, POB 238, Abha, Saudi Arabia

**[99]** «A GIS-based decision support system for risk assessment of wind damage in forest management», 2005, Hongcheng Zeng, Ari Talkkari, Heli Peltola, Seppo Kelloma`ki, Faculty of Forestry, University of Joensuu, P.O. Box 111, FI-80101 Joensuu, Finland

**[100]** «A decision support system for product design selection: A generalized purchase modeling approach», 2005, B. Besharati, S. Azarma, T. P.K. Kannan, Department of Mechanical Engineering, A. James Clark School of Engineering, University of Maryland, United States, Department of Marketing, Robert H. Smith School of Business, University of Maryland, USA.

**[101]** «A hybrid knowledge-based decision support system for enterprise mergers and acquisitions, 2005, W. Wena, W.K. Wang, T.H. Wang, Department of Information Management, LungHwa University of Science and Technology, Taiwan, ROC, Department of Accounting, YuanZe University, Taiwan

**[102]** «An exploratory cognitive DSS for strategic decision making», 2002, Jim Q. Chen, Sang M. Lee, Herberger College of Business, St. Cloud State University, USA, College of Business Administration, University of Nebraska-Lincoln, USA

**[103]** «Modelling decision support and uncertainty for large transport infrastructure projects: The CLG-DSS model of the Øresund Fixed Link», 2006, Kim Bang Salling, Steen Leleur, Anders Vestergaard Jensen, Centre for Traffic and Transport, CTT-DTU,, Technical University of Denmark



**[104]** «SEDPA, an expert system for disease diagnosis in eel rearing systems», 2003 J.C. Gutierrez-Estrada, E. De Pedro Sanz, R. Lopez-Luque, I. Pulido-Calvo, Dep. Ciencias Agroforestales, Univ. Huelva, Dep. Produccion Animal, Univ. Cordoba, ETSIAM, Dep. Fisica Aplicada, Univ. Cordoba, ETSIAM, Spain

**[105]** «The development of a hybrid intelligent system for developing marketing strategy», 1999, Shuliang Li, Gloucestershire Business School, Cheltenham and Gloucester College of Higher Education, P.O. Box 220, The Park, Cheltenham, Gloucestershire GL50 2QF, England, UK

**[106]** «A fuzzy knowledge-based decision support system for groundwater pollution risk evaluation», 2003, Vito F. Uricchio, Raffaele Giordano, Nicola Lopez, Water Research Institute, Italian National Research Council, Department of Bari, Via De Blasio 5, 70123 Bari, Italy

#### **Λιαδικτυακοί Τόποι**

**[107]** [http://en.wikipedia.org/wiki/Bayesian\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Bayesian_network)

**[108]** [http://en.wikipedia.org/wiki/Decision\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Decision_theory)

**[109]** [http://en.wikipedia.org/wiki/Decision\\_trees](http://en.wikipedia.org/wiki/Decision_trees)

**[110]** [http://en.wikipedia.org/wiki/Expected\\_value\\_of\\_perfect\\_information](http://en.wikipedia.org/wiki/Expected_value_of_perfect_information)

**[111]** [http://en.wikipedia.org/wiki/Info-gap\\_decision\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Info-gap_decision_theory)

**[112]** [http://www.defaultrisk.com/jel\\_d81.htm](http://www.defaultrisk.com/jel_d81.htm)

**[113]** <http://www.econlib.org/library/Knight/knRUP.html>

**[114]** <http://en.wikipedia.org/wiki/Risk>

**[115]** <http://www.auth.gr/home/>

**[116]** <http://argo.ekt.gr/opac2/zConnectELL.html>

**[117]** <http://dlib.libh.uoc.gr/index1.html>

**[118]** <http://www.sciencedirect.com/>

**[119]** <http://www.aaai.org/AITopics/html/trees.html>



ΠΙΝΑΚΑΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΔΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

[illegible]