



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη αλγορίθμου βασισμένου στην ασαφή λογική για τον
καθορισμό των εκμεταλλεύσιμων λιγνιτικών στρωμάτων

Ανθούλα Χ. Βασιλείου

Εξεταστική Επιτροπή:

Μιχάλης Γαλετάκης,	Λέκτορας (Επιβλέπων)
Ζαχαρίας Αγιουτάντης,	Καθηγητής
Διονύσιος Χριστόπουλος,	Αναπληρωτής Καθηγητής

Χανιά
Οκτώβριος, 2004

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα αξιολόγησης των λιγνιτικών γεωτρήσεων με την εφαρμογή της ασαφούς λογικής.

Η παραδοσιακή μέθοδος αξιολόγησης των λιγνιτικών γεωτρήσεων, είναι μια διαδικασία ενοποίησης διαδοχικών λιγνιτικών και αγόνων στρωμάτων. Δε λαμβάνει υπόψη της τον υποκειμενισμό του εμπλεκόμενου ανθρώπινου δυναμικού, τις συνθήκες εργασίας στο μέτωπο, την πίεση της παραγωγής, την αβεβαιότητα των στοιχείων, παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα του εξορυσσόμενου λιγνίτη. Χρησιμοποιεί καθαρά μαθηματικά κριτήρια, που αφορούν μόνο τα γεωμετρικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του λιγνίτη, ενώ στην πράξη αυτά δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστούν απόλυτα.

Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκε ένα έμπειρο ασαφές σύστημα, το οποίο ενσωματώνει τους παραπάνω παράγοντες, ενσωματώνοντας έτσι την αβεβαιότητα και τον υποκειμενισμό που επικρατούν κατά τη διαδικασία της εξόρυξης.

Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή του αναπτυχθέντος συστήματος και σύγκριση των αποτελεσμάτων του, με τα αποτελέσματα που δίνει η κλασσική μέθοδος αξιολόγησης. Από την εφαρμογή του έμπειρου ασαφούς συστήματος προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η αποληψιμότητα ενός λιγνιτικού στρώματος μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες εξόρυξης.
- Η πιθανότητα απόληψης ενός λιγνιτικού στρώματος είναι μεγαλύτερη, όταν οι συνθήκες εξόρυξης είναι ευνοϊκές ή μέτριες.
- Το ασαφές σύστημα δίνει διαφορετικά αποτελέσματα από την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης.

Η παρούσα εργασία έχει την ακόλουθη διάρθρωση: Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στη σημασία του λιγνίτη ως ενεργειακού πόρου, ενώ στο δεύτερο αναλύεται η υφιστάμενη μεθοδολογία αξιολόγησης των λιγνιτικών γεωτρήσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα βασικά στοιχεία της ασαφούς λογικής. Στο τέταρτο παρουσιάζεται η μεθοδολογία ανάπτυξης ενός έμπειρου ασαφούς συστήματος για την αξιολόγηση στοιχείων γεωτρήσεων, που αναπτύχθηκε με βάση το λογισμικό Matlab[®] (Fuzzy Toolbox) της Mathworks. Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η εφαρμογή του έμπειρου ασαφούς συστήματος. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζ-

ζονται όλα τα αποτελέσματα από την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή.

Πρόλογος

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης της φοίτησής μου στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η πραγματοποίησή της έγινε υπό την επίβλεψη του Λέκτορα του τμήματος κ. Μ. Γαλετάκη. Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Μ. Γαλετάκη για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, για την συνεργασία και για τον πλούτο των γνώσεων που μου μετέδωσε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ζ. Αγιουτάντη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Δ. Χριστόπουλο, που δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή.

Χανιά, Οκτώβριος 2004

A.X. Βασιλείου

Αφιερωμένη

*στην μνήμη του πατέρα μου,
στην μητέρα μου
και στα αδέρφια μου.*

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	ii
Κατάλογος Σχημάτων.....	viii
Κατάλογος Πινάκων.....	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η σημασία του λιγνίτη ως ενεργειακού πόρου.....	1
1.1 Συνοπτική περιγραφή των ενεργειακών πόρων της Ελλάδας.....	1
1.2 Έρευνα και εκμετάλλευση ελληνικών λιγνιτών.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Υφιστάμενη μεθοδολογία αξιολόγησης στοιχείων γεωτρήσεων λιγνιτικών κοιτασμάτων.....	5
2.1 Φυσικός λιγνίτης, τεχνικά απολήψιμος λιγνίτης, λιγνίτης εκμετάλλευσης, λιγνίτης τροφοδοσίας.....	5
2.2 Μεθοδολογία αξιολόγησης λιγνιτικών κοιτασμάτων.....	6
2.2.1 Καταγραφή, κωδικοποίηση στοιχείων γεωτρήσεων.....	9
2.2.2 Κανόνες αξιολόγησης λιγνιτικών στρωμάτων γεώτρησης.....	11
2.2.3 Δημιουργία μοντέλου κοιτάσματος.....	13
2.2.4 Υπολογισμός των ποιοτικών χαρακτηριστικών απολήψιμης λιγνιτικής στοιβάδας.....	16
2.3 Κριτική της υφιστάμενης μεθοδολογίας.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εισαγωγή στην ασαφή λογική και στα ασαφή συστήματα λήψης αποφάσεων.....	23
3.1 Εισαγωγή.....	23
3.2 Βασικές έννοιες και ορισμοί.....	25
3.3 Λογικοί τελεστές.....	26
3.4 Ιδιότητες και πράξεις ασαφών συνόλων.....	28
3.5 Γλωσσικές μεταβλητές.....	29
3.6 Συναρτήσεις συμμετοχής.....	30
3.7 Δομή συστήματος ασαφούς λογικής.....	32
3.7.1 Ασαφοποίηση.....	34
3.7.2 Εφαρμογή των λογικών τελεστών.....	35
3.7.3 Εφαρμογή της μεθόδου συνεπαγωγής.....	35
3.7.4 Άθροιση των εξόδων.....	35
3.7.5 Αποασαφοποίηση.....	35
3.8 Συνοπτική παρουσίαση του Fuzzy Toolbox της Matlab.....	37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάπτυξη μεθοδολογίας για αξιολόγηση στοιχείων γεωτρήσεων με βάση την ασαφή λογική.....	39
4.1 Ανάπτυξη του έμπειρου ασαφούς συστήματος για την αξιολόγηση των λιγνιτικών γεωτρήσεων.....	39
4.2 Εκπαίδευση του έμπειρου ασαφούς συστήματος.....	49
4.3 Επιφάνειες απόκρισης.....	52
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Εφαρμογή του έμπειρου ασαφούς συστήματος.....	59
5.1 Εφαρμογή του έμπειρου ασαφούς συστήματος.....	60
5.2 Κρίσιμη περιοχή αποληψιμότητας.....	63
5.3 Ποσοστό αποθέματος στην κρίσιμη περιοχή.....	64
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και προτάσεις.....	68
 Βιβλιογραφία.....	71
 Παράρτημα Α: Επιφάνειες απόκρισης.....	73
 Παράρτημα Β: Ο κώδικας του έμπειρου ασαφούς συστήματος σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab.....	78

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Στάδια αξιολόγησης στοιχείων γεωτρήσεων.....	8
2.2	Έντυπο καταγραφής στοιχείων γεωτρήσεων.....	10
2.3	Κωδικοποιημένα πετρογραφικά χαρακτηριστικά δειγμάτων γεωτρήσεων.....	10
2.4	Κατασκευή δισδιάστατου μοντέλου με τη μέθοδο των αντιστρόφων αποστάσεων στο τετράγωνο.....	15
2.5	Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας ενοποίησης στρωμάτων γεώτρησης.....	20
3.1	Χρήση των λογικών τελεστών στα ασαφή σύνολα.....	28
3.2	Η τριγωνική και η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής.....	30
3.3	Συναρτήσεις συμμετοχής του Gauss.....	31
3.4	Συναρτήσεις συμμετοχής sigmf, dsigmf, psigmf.....	31
3.5	Συναρτήσεις συμμετοχής zmf, pimf, smf.....	32
3.6	Η γενική δομή ενός συστήματος ασαφούς λογικής.....	33
4.1	Το έμπειρο ασαφές σύστημα με τις πέντε εισόδους του και την μια έξοδο.....	41
4.2	Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή thickness.....	43
4.3	Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή ash.....	44
4.4	Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή operator_experience.....	45
4.5	Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή production_target.....	46
4.6	Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή working_conditions.....	47
4.7	Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή exploitation.....	48
4.8	Εκπαίδευση του έμπειρου ασαφούς συστήματος.....	49
4.9	Διάγραμμα ασαφούς συνεπαγωγής.....	51
4.10	Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και την περιεκτικότητα σε τέφρα	52
4.11	Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και την εμπειρία του χειριστή.....	53
4.12	Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τον στόχο της παραγωγής.....	54
4.13	Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τις συνθήκες εργασίας.....	54
4.14	Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και την εμπειρία του χειριστή.....	55

4.15 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τον στόχο της παραγωγής.....	56
4.16 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τις συνθήκες εργασίας.....	56
4.17 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τον στόχο της παραγωγής.....	57
4.18 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τις συνθήκες εργασίας.....	57
4.19 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με τον στόχο της παραγωγής και τις συνθήκες εργασίας.....	58
5.1 Η βασική δομή του ασαφούς συστήματος (5 inputs, 1 output, 16 rules).....	59
5.2 Καμπύλη κατανομής του πάχους ενός λιγνιτικού στρώματος με το ποσοστό των αποθεμάτων του.....	66
5.3 Κατανομή της περιεχόμενης τέφρας των λιγνιτικών στρωμάτων σε διάγραμμα κανονικής κατανομής για την περιοχή του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας.....	67
A.1 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και την περιεκτικότητα σε τέφρα	73
A.2 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και την εμπειρία του χειριστή.....	73
A.3 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τον στόχο της παραγωγής.....	74
A.4 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τις συνθήκες εργασίας.....	74
A.5 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και την εμπειρία του χειριστή.....	74
A.6 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τον στόχο της παραγωγής.....	75
A.7 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τις συνθήκες εργασίας.....	75
A.8 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τον στόχο της παραγωγής.....	76
A.9 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τις συνθήκες εργασίας.....	76
A.10 Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με τον στόχο της παραγωγής και τις συνθήκες εργασίας.....	77

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Συμμετοχή των ενεργειακών πηγών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	2
3.1	Λογικοί τελεστές AND, OR, NOT	26
3.2	Αντικατάσταση των λογικών τελεστών.....	27
5.1	Αξιολόγηση ενός λιγνιτικού στρώματος με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης, όταν οι παράμετροι που σχετίζονται με τη διαδικασία εξόρυξης θεωρούνται ευνοϊκοί.....	61
5.2	Αξιολόγηση ενός λιγνιτικού στρώματος με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος, για διάφορες τιμές των παραμέτρων operator_experience, production_target και working_conditions	61
5.3	Σύγκριση των δύο μεθόδων αξιολόγησης όταν operator_experience=1, production target= 0 και working condition=1	62
5.4	Περιοχές εκτίμησης της αποληψιμότητας ενός λιγνιτικού στρώματος.....	64
5.5	Κατανομή αποθεμάτων κατά πάχη λιγνιτικών στρωμάτων.....	65

Κεφάλαιο 1

Η σημασία του λιγνίτη ως ενεργειακού πόρου

1.1 Συνοπτική περιγραφή των ενεργειακών πόρων της Ελλάδας

Η Ελλάδα έχει σημαντικούς ενεργειακούς πόρους, η εκμετάλλευση των οποίων μπορεί να συμβάλλει θετικά στην αντιμετώπιση της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια και συγχρόνως να δημιουργήσει πολλές νέες θέσεις εργασίας (Κούκουζας κ.ά., 1996). Η καταγραφή των ενεργειακών πόρων έχει ως εξής:

Σε όλη την Ελλάδα μπορούν να αναφερθούν σήμερα τρία διαπιστωμένα κοιτάσματα υδρογονανθράκων: α) Τα κοιτάσματα Πρίνου και Βόρειου Πρίνου των οποίων η εναπομένουσα ποσότητα υπολογίζεται σε 30 εκ. βαρέλια, εκ των οποίων τα 8–10 εκ. είναι απολήψιμα. β) Το κοιτάσμα της Επανομής υπολογίζεται ότι περιέχει 500 εκ. m³ αερίου (in place) εκ των οποίων τα ωφέλιμα απολήψιμα είναι της τάξης των 280–320 εκ. m³. γ) Το κοιτάσμα Κατάκωλου έχει περιεκτικότητα σε πετρέλαιο 40 εκ. βαρέλια με μέγιστη αποληψιμότητα 10-12 εκ. βαρέλια.

Γεωθερμικές πηγές υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας απαντώνται σε πολυάριθμες περιοχές της Ελλάδας. Η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας περιορίζεται, προς το παρόν, στη θέρμανση θερμοκηπίων, τα οποία βρίσκονται κυρίως στη Μακεδονία και καλύπτουν μια έκταση περίπου 700 στρεμμάτων. Αναφορικά με τις υψηλής ενθαλπίας γεωθερμικές πηγές που απαντώνται στη Μήλο και στη Νίσυρο, υπολογίζεται ότι μπορεί να επιτευχθεί η εγκατάσταση ενεργειακών σταθμών ισχύος άνω των 200 MW. Η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 2 MW που είχε εγκατασταθεί στη Μήλο το 1988 έκλεισε, λόγω της αντίδρασης των κατοίκων, που προκλήθηκε από διαρροές H₂S, και οδήγησε σε ανησυχίες για μόλυνση του περιβάλλοντος (Fyticas *et al.*, 1995).

Η υδροηλεκτρική ενέργεια καλύπτει το 8,2% των ενεργειακών αναγκών της Ελλάδας και η εγκατεστημένη ισχύς των διασυνδεδεμένων δικτύων της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ) είναι της τάξης των 2.524 MW, γεγονός που σημαίνει ότι η υδροηλεκτρική ενέργεια θα έπρεπε να καλύπτει το 30% των ενεργειακών αναγκών της χώρας.

Τα αποθέματα ουρανίου, περίπου 600 τόνοι, που εντοπίζονται κυρίως στη Βορειοανατολική Ελλάδα, είναι ανεπαρκή για την εγκατάσταση μιας μονάδας παραγωγής πυρηνικής ενέργειας (Pergamalis, 1993). Επιπροσθέτως, έστω και αν υπήρχαν περισσότερα αποθέματα ουρανίου, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ουράνιο δεν είναι επιθυμητή από τις εκάστοτε κυβερνήσεις, λόγω της μεγάλης σεισμικότητας του ελλαδικού χώρου.

Ως εκ τούτου, η Ελλάδα βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση του λιγνίτη για την ενεργειακή της ανεξαρτησία, διότι είναι το μόνο άφθονο καύσιμο που βρίσκεται στο υπέδαφός της. Η χρησιμοποίησή του υποκαθιστά εισαγόμενα καύσιμα ή ηλεκτρική ενέργεια, συμβάλλοντας σημαντικά στην ανάπτυξη της εθνικής οικονομίας. Από τον πίνακα 1.1 καθίσταται φανερός ο σημαντικός ρόλος που παίζει και πρόκειται να παίξει ο λιγνίτης στην ενεργειακή ανεξαρτησία της χώρας και στην οικονομική της ευελιξία.

Πίνακας 1.1: Συμμετοχή των ενεργειακών πηγών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Pavloudakis *et al.*, 2003).

Έτος	Λιγνίτης		Φυσικό Αέριο		Πετρέλαιο		Υδροηλεκτρικά		Σύνολο	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%	GWh	%	GWh	%
1997	27751	76.7	2851	0.8	4976	11.3	4048	11.2	36160	100.0
1998	29231	75.8	1616	4.2	3852	10.0	3841	10.0	38540	100.0
1999	29276	70.9	3700	9.0	3528	8.5	4781	11.6	41285	100.0
2000	31058	69.2	5596	12.5	4141	9.2	4062	9.1	44856	100.0
2001	32106	72.4	5801	13.1	3551	8.0	2668	6.0	44373	99.52
2002	31242	69.8	6730	15.0	3391	7.6	3381	7.6	44744	100.0

1.2 Έρευνα και εκμετάλλευση ελληνικών λιγνιτών

Κατάλληλες συνθήκες για το σχηματισμό λιγνιτών στον ελλαδικό χώρο, συνέτρεξαν κατά περιόδους και κατά περιοχές από τις αρχές του Καινοζωικού αιώνα μέχρι τους πρόσφατους γεωλογικούς χρόνους. Η κύρια φάση λιγνιτογένεσης συμπίπτει

με τη Νεοτριτογενή και τη Τεταρτογενή γεωλογική περίοδο. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα αναπτύχθηκαν στις αβαθείς λίμνες και τα έλη κλειστών ενδοηπειρωτικών λεκανών (Αναστόπουλος και Κούκουζας, 1972).

Τα πιο σημαντικά λιγνιτικά κοιτάσματα σχηματίστηκαν σε ενδοηπειρωτικές λεκάνες, όπως αυτές της Πτολεμαΐδας, της Δράμας και της Μεγαλόπολης, ενώ μικρά τελματο-δελταικά λιγνιτικά κοιτάσματα δημιουργήθηκαν στην Ορεστιάδα, στην Πλακιά, στην Πρέβεζα, στον Πύργο και στην Ολυμπία (Παπανικολάου, 2003).

Τα λιγνιτικά κοιτάσματα της Βόρειας Ελλάδας κατανέμονται σε τρεις επιμέρους περιοχές που συνιστούν την ευρύτερη λιγνιτοφόρο λεκάνη:

- Λεκάνη Φλώρινας–Αμυνταίου
- Λεκάνη Πτολεμαΐδας–Κοζάνης
- Λεκάνη Κοζάνης–Σερβίων–Ελλασόνας

Ο κύριος όγκος των κοιτασμάτων είναι συγκεντρωμένος στην περιοχή Πτολεμαΐδας–Κοζάνης.

Σήμερα τα ορυχεία που βρίσκονται σε παραγωγική λειτουργία ή σε φάση ανάπτυξης είναι:

- Ορυχείο Κύριου Πεδίου–(Εκμεταλλεύσεις Βόρειου Πεδίου και Πεδίου Κομάνου)
- Ορυχείο Πεδίου Καρδιάς–(Εκμεταλλεύσεις Α.Ο.Κ. και Τομέα 6)
- Ορυχείο Νότιου Πεδίου
- Ορυχείο Αμυνταίου–(Εκμεταλλεύσεις κυρίως ορυχείου και Πεδίου Αναργύρων)

Η Γενική Διεύθυνση Ορυχείων το τελευταίο διάστημα προχώρησε και στη διάνοιξη δύο νέων ορυχείων στη Δυτική Μακεδονία, της Μαυροπηγής στην Πτολεμαΐδα και της Αχλάδας στη Φλώρινα, συνολικής επένδυσης 150 εκ. ευρώ.

Η Ελλάδα παράγει ετησίως 57,4 εκατ. τόνους λιγνίτη. Σχεδόν όλος ο λιγνίτης, 56,8 εκατ. τόνοι, καταναλώνεται εγχώρια από τη ΔΕΗ. Η εκμετάλλευση λαμβάνει χώρα σε μια εκτεταμένη περιοχή στην Πτολεμαΐδα και το Αμύνταιο στη Δυτική Μακεδονία, και στη Μεγαλόπολη στην Πελοπόννησο. Είκοσι μονάδες που τροφοδοτούνται με λιγνίτη παράγουν 4.533 MW. Οι σταθμοί αυτοί παρέχουν το 78,4% των αναγκών της Ελλάδας σε ηλεκτρική ενέργεια. Δεκαέξι σταθμοί με συνολική ισχύ 3.683 MW είναι εγκατεστημένοι στην ευρύτερη περιοχή της Πτολεμαΐδας–Αμυνταίου και τροφοδοτούνται από το απόθεμα των παρακείμενων ορυχείων Πτολεμαΐδας, Αμν-

νταίου και Φλώρινας. Οι εναπομείναντες τέσσερις σταθμοί, με συνολική ισχύ 850 MW, είναι εγκατεστημένοι στη Μεγαλόπολη (Παπανικολάου, 2003).

Επομένως, ο λιγνίτης είναι ο μοναδικός ενεργειακός πόρος που απαντάται σε αφθονία στην Ελλάδα. Η σημασία του λιγνίτη στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα μας είναι αδιαμφισβήτητα καθοριστική, ώστε σήμερα να μην είναι δυνατόν να διανοηθεί κανείς την ενεργειακή μας ανάπτυξη, χωρίς να περιλάβει στον σχεδιασμό το λιγνίτη και μάλιστα, σε ιδιαίτερα υψηλά ποσοστά σε σχέση με τις άλλες πηγές ενέργειας (υδατοπτώσεις, πετρέλαιο, φυσικό αέριο).

Βασιζόμενοι στα βεβαιωμένα και απολήψιμα αποθέματα γαιανθράκων, μπορούμε να πούμε ότι ο λιγνίτης μπορεί να προμηθεύσει το 70% των ενεργειακών αναγκών της Ελλάδας σε ηλεκτρισμό για τα επόμενα, τουλάχιστον, 60 έως 70 χρόνια (Παπανικολάου, 2003).

Λόγω της σπουδαιότητας και της σημασίας που έχει ο λιγνίτης για τη χώρα μας, απαιτείται η μελέτη της ποιότητας των αποθεμάτων του και η μέτρηση των ποιοτικών παραμέτρων του απολήψιμου λιγνίτη, με σκοπό τη σωστή αξιολόγησή του.

Κεφάλαιο 2

Υφιστάμενη μεθοδολογία αξιολόγησης στοιχείων γεωτρήσεων λιγνιτικών κοιτασμάτων

2.1 Φυσικός λιγνίτης, τεχνικά απολήψιμος λιγνίτης, λιγνίτης εκμετάλλευσης, λιγνίτης τροφοδοσίας

Η ιδιομορφία των λιγνιτικών κοιτασμάτων, εναλλασσόμενα λιγνιτικά στρώματα ποικίλου πάχους με στρώματα στείρων υλικών, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τη μέθοδο εκμετάλλευσης που πρόκειται να εφαρμοσθεί, οδήγησε στην θέσπιση και εφαρμογή συγκεκριμένων κανόνων αξιολόγησης των λιγνιτικών κοιτασμάτων κατά το στάδιο της κοιτασματολογικής μελέτης αυτών, που βασίζονται κυρίως στα στοιχεία που προκύπτουν από τη γεωτρητική έρευνα. Για την αξιολόγηση κρίθηκε αναγκαία η εισαγωγή νέων όρων όπως του τεχνικά απολήψιμου λιγνίτη, της τεχνικής οροφής, των τεχνικών υπερκειμένων, του λιγνίτη εκμετάλλευσης και του λιγνίτη τροφοδοσίας (Γαλετάκης, 1996).

Με τον όρο **φυσικός λιγνίτης** εννοείται ο γεωλογικός λιγνίτης όπως αυτός αναγνωρίζεται μακροσκοπικά στους πυρήνες των γεωτρήσεων και στα μέτωπα εκσκαφής των ορυχείων. Πολλές φορές είναι δύσκολη μακροσκοπικά, η διάκριση ανάμεσα σ' ένα λιγνιτικό στρώμα και σ' ένα ισχυρά ανθρακομιγές αργιλικό ή μαργαϊκό στρώμα. Στις περιπτώσεις αυτές σαν κριτήριο λαμβάνεται η τιμή της τέφρας επί ξηρού.

Σαν τεχνικά **απολήψιμος λιγνίτης** εννοείται ο λιγνίτης που προκύπτει μετά την ενοποίηση διακεκριμένων λιγνιτικών στρωμάτων με ενδιάμεσες στείρες ή ανθρακομιγείς ενστρώσεις, προκειμένου να διαμορφωθούν τα προς εξόρυξη τμήματα, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μέθοδο εκμετάλλευσης και την τεχνολογία εξόρυξης.

Ο **λιγνίτης εκμετάλλευσης** είναι το πραγματικό προϊόν της εξόρυξης, ενώ ο **λιγνίτης τροφοδοσίας** των ατμοηλεκτρικών σταθμών (ΑΗΣ) είναι το προϊόν που σχηματίζεται με την απόθεση λιγνίτη από περισσότερα πιθανόν του ενός ορυχεία, στις αυλές τροφοδοσίας των ΑΗΣ.

Σαν **τεχνική οροφή** λαμβάνεται η επιφάνεια που βρίσκεται ορισμένα εκατοστά (συνήθως 10cm) κάτω από το πρώτο απολήψιμο λιγνιτικό στρώμα. Όπως είναι

φυσικό η τεχνική οροφή δεν συμπίπτει με τη γεωλογική οροφή και αυτό γιατί άλλη είναι η έννοια του γεωλογικού στρώματος και άλλη η έννοια του απολήψιμου στρώματος.

Τεχνικά υπερκείμενα θεωρούνται τα προς απόρριψη στείρα υλικά ή και τα μη απολήψιμα λιγνιτικά στρώματα, που βρίσκονται πάνω από την τεχνική οροφή.

Τεχνικό δάπεδο είναι η επιφάνεια που βρίσκεται ορισμένα εκατοστά (συνήθως 10cm) ψηλότερα από το τελευταίο (βαθύτερο) απολήψιμο λιγνιτικό στρώμα. Είναι και εδώ προφανές, ότι το τεχνικό δάπεδο δεν συμπίπτει με το γεωλογικό δάπεδο.

Εκμεταλλεύσιμη λιγνιτοφόρα στοιβάδα είναι αυτή που βρίσκεται ανάμεσα στην τεχνική οροφή και στο τεχνικό δάπεδο και που περιλαμβάνει όπως είναι προφανές και τις στείρες ενστρώσεις κυμαινόμενου πάχους και αριθμού. Το πάχος της λιγνιτοφόρας στοιβάδας μέσα στο εκμεταλλεύσιμο τμήμα του κοιτάσματος δεν είναι σταθερό, αλλά παρουσιάζει αυξομειώσεις που οφείλονται κυρίως στον αριθμό και το πάχος των λιγνιτικών και στείων ενστρώσεων που την απαρτίζουν.

Ο φυσικός λιγνίτης όπως είναι αναμενόμενο έχει ποιοτικά χαρακτηριστικά διαφορετικά (συνήθως ανώτερα) του τεχνικά απολήψιμου λιγνίτη, ενώ ο λιγνίτης εκμετάλλευσης και τροφοδοσίας έχει ποιοτικά χαρακτηριστικά κατώτερα του τεχνικά απολήψιμου λιγνίτη, κυρίως λόγω ρύπανσης προκαλούμενη κατά τη διαδικασία εκμετάλλευσης.

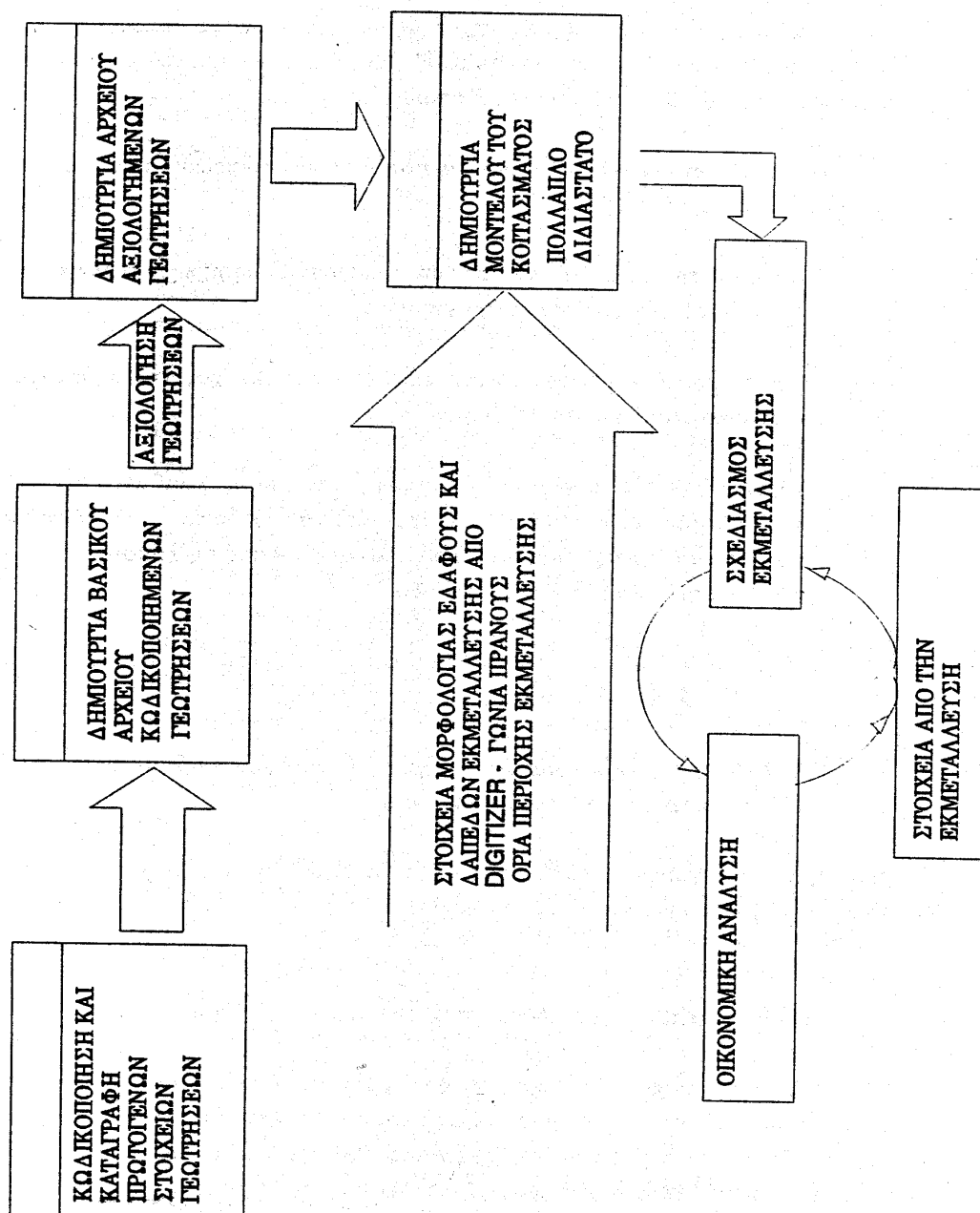
2.2 Μεθοδολογία αξιολόγησης λιγνιτικών κοιτασμάτων

Η διαδικασία συλλογής και αξιολόγησης των στοιχείων των γεωτρήσεων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Καταγραφή και κωδικοποίηση των πρωτογενών στοιχείων των γεωτρήσεων όπως αυτά συλλέγονται στην ύπαιθρο.
- Δημιουργία βάσης δεδομένων, εισαγωγή και έλεγχος της ορθότητας των κωδικοποιημένων στοιχείων.
- Αξιολόγηση των στοιχείων κάθε μίας γεώτρησης λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς που επιβάλλονται από τη μέθοδο εκμετάλλευσης και τις απαιτήσεις ποιότητας που προκύπτουν από τη χρήση για την οποία προορίζεται το εξορυσσόμενο υλικό.

- Δημιουργία μοντέλου του κοιτάσματος που βασίζεται στα στοιχεία των αξιολογημένων γεωτρήσεων.
- Υπολογισμοί όγκων και κατασκευή χαρτών ισοτίμων καμπυλών για κάθε μία από τις παραμέτρους που ενδιαφέρει.

Στο σχήμα 2.1 φαίνονται παραστατικά τα στάδια που ακολουθούνται κατά την αξιολόγηση των λιγνιτικών κοιτασμάτων.



Σχήμα 2.1: Στάδια αξιολόγησης στοιχείων γεωτρήσεων (Γαλετάκης, 1996).

2.2.1 Καταγραφή, κωδικοποίηση στοιχείων γεωτρήσεων

Καταγραφή στοιχείων γεωτρήσεων

Για την καταγραφή των στοιχείων μιας κοιτασματολογικής γεώτρησης έχει σχεδιασθεί ειδικό έντυπο, η γραμμογράφηση του οποίου φαίνεται στο σχήμα 2.2 (Καραμαλίκης, 1992).

Στις δύο πρώτες σειρές του εντύπου καταχωρούνται τα γενικά πληροφοριακά στοιχεία της γεώτρησης, όπως:

- α) Ο κωδικός της περιοχής.
- β) Ο μηχανογραφικός κωδικός, ο σχηματισμός του οποίου γίνεται με κατάλληλο συνδυασμό των ψηφίων των συντεταγμένων της γεώτρησης.
- γ) Οι συντεταγμένες και το υψόμετρο εδάφους.
- δ) Το γεωγραφικό μήκος και πλάτος του τοπογραφικού χάρτη στον οποίο ανήκει.
- ε) Ο τύπος του γεωτρύπανου και οι ημερομηνίες έναρξης και πέρατος εκτέλεσης της γεώτρησης.

Μετά την καταχώρηση των παραπάνω γενικών πληροφοριακών στοιχείων, αρχίζει η αναλυτική καταγραφή των δειγμάτων της γεώτρησης, η οποία και ολοκληρώνεται συνήθως σε περισσότερα του ενός έντυπα. Στην αναλυτική περιγραφή συμπληρώνονται:

- α) Τα βάθη οροφής και δαπέδου των δειγμάτων.
- β) Η πετρογραφική κωδικοποιημένη περιγραφή τους σύμφωνα με τον πίνακα του σχήματος 2.3.
- γ) Η περιεχόμενη υγρασία και τα ποιοτικά τους στοιχεία (τέφρα ως έχει, τέφρα + CO₂ επί ξηρού και κατωτέρα θερμογόνος δύναμη).

Σχήμα 2.2: Έντυπο καταγραφής στοιχείων γεωτρήσεων (Καραμαλίκης, 1992).

Σχήμα 2.3: Κωδικοποιημένα πετρογραφικά χαρακτηριστικά δειγμάτων γεωτρήσεων (Καραμαλίκης, 1992).

Εισαγωγή στοιχείων γεωτρήσεων

Τα καταχωρημένα στα ειδικά έντυπα στοιχεία εισάγονται στη συνέχεια είτε σε προσωπικό υπολογιστή είτε απ' ευθείας σε κεντρικό υπολογιστικό σύστημα. Κατά την παραπάνω διαδικασία εισαγωγής ελέγχονται, με ειδικά προγράμματα, τα είδη και τα μεγέθη των δεδομένων και ταυτόχρονα παρέχεται η δυνατότητα διόρθωσής τους. Παράλληλα τα εισαγόμενα στοιχεία αποθηκεύονται σε προσωρινά αρχεία με σκοπό την παραπέρα επεξεργασία τους.

Έλεγχος ορθότητας στοιχείων

Τα αποθηκευμένα σε προσωρινά αρχεία στοιχεία, στη συνέχεια περνούν από ειδικά προγράμματα ελέγχου λογικών λαθών και μετά από μια συνεχή διαδικασία διορθώσεων και ελέγχων μεταφέρονται ορθά πια στο βασικό αρχείο, το οποίο μετά την ταξινόμησή του είναι διαθέσιμο στους χρήστες. Ευνόητο είναι ότι καθημερινά κρατούνται αντίγραφα του βασικού αρχείου για την μεγαλύτερη ασφάλεια του συστήματος.

2.2.2 Κανόνες αξιολόγησης λιγνιτικών στρωμάτων γεώτρησης

Η αξιολόγηση λιγνιτικών γεωτρήσεων είναι μια διαδικασία ενοποίησης των στρωμάτων τους σε τεχνικά απολήψιμα τμήματα λιγνίτη και ενδιάμεσων στειρών, που βασίζεται σε συγκεκριμένους κανόνες που προέκυψαν ως αποτέλεσμα των περιορισμών που θέτει η μέθοδος εκμετάλλευσης, τα τεχνικά χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού, οι απαιτήσεις χρήσης και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί.

Για λιγνιτικά κοιτάσματα που εκμεταλλεύονται με την υπαίθρια συνεχή μέθοδο, θεσπίστηκαν και ακολουθούνται κατά την αξιολόγηση οι παρακάτω κανόνες (Αναστόπουλος και Κούκουζας, 1972):

- Απολήψιμο λιγνιτικό στρώμα χαρακτηρίζεται εκείνο που έχει πάχος μεγαλύτερο του ελάχιστου πάχους εκλεκτικής εξόρυξης (συνήθως 50cm για υπαίθρια εκμετάλλευση με καδοφόρους εκσκαφείς) και τέφρα επί ξηρού μικρότερη της ανώτερης επιτρεπόμενης (συνήθως 50%).

- Στείρα ενδιάμεση ένστρωση με πάχος μεγαλύτερο του ορίου εκλεκτικής εξόρυξης (συνήθως 20cm για υπαίθρια εκμετάλλευση με καδοφόρους εκσκαφείς) και με τέφρα επί ξηρού μεγαλύτερη του 70% απομακρύνεται σαν άγονο.
- Εάν μεταξύ δύο ενστρώσεων ενός απολήψιμου στρώματος λιγνίτη, με τέφρα επί ξηρού μικρότερη του ανώτερου επιτρεπόμενου ορίου (συνήθως 50%) υπάρχει ένστρωση που μακροσκοπικά χαρακτηρίζεται σαν λιγνίτης ενώ η χημική ανάλυση έχει δώσει τέφρα επί ξηρού μεγαλύτερη του ορίου (50%) και κατώτερη του 55% (πολύ ισχυρά αργιλιούχος λιγνίτης), η ένστρωση αυτή συνυπολογίζεται με την υπερκείμενη και την υποκείμενη ένστρωση, με την υπόθεση ότι η μέση τέφρα επί ξηρού της στοιβάδας που θα σχηματισθεί κατ' αυτό τον τρόπο θα είναι μικρότερη ή ίση του ανώτερου επιτρεπτού ορίου. Εάν είναι μεγαλύτερή του, τότε η ενδιάμεση ένστρωση του πολύ ισχυρά αργιλιούχου λιγνίτη δεν συνυπολογίζεται και αξιολογείται σαν στείρο υλικό.
- Στείρα ενδιάμεση ένστρωση με πάχος 20–25cm που χαρακτηρίζεται σαν ανθρακομιγής μέχρι πολύ ανθρακομιγής, με λεπτές λιγνιτικές ενστρώσεις συνολικού πάχους τουλάχιστον 25% του πάχους της, συνυπολογίζεται στο απολήψιμο απόθεμα και λαμβάνεται με τα υπερκείμενα και τα υποκείμενα στρώματα. Στην περίπτωση αυτή η τέφρα επί ξηρού της ενδιάμεσης στείρας ένστρωσης υπολογίζεται ως 100%, όταν φυσικά δεν υπάρχει ιδιαίτερη χημική ανάλυση.
- Στις δύο παραπάνω περιπτώσεις θα πρέπει οπωσδήποτε η μέση σταθμική τέφρα επί ξηρού της στοιβάδας να μην υπερβαίνει το όριο της τέφρας του απολήψιμου λιγνίτη. Σε αντίθετη περίπτωση η ενδιάμεση ένστρωση απορρίπτεται.
- Εάν υπάρχουν δύο εκμεταλλεύσιμα στρώματα που μεταξύ τους παρεμβάλλεται στείρα ένστρωση με πάχος 10–20cm, τα εκμεταλλεύσιμα στρώματα και η στείρα ένστρωση θα αποτελούν εκμεταλλεύσιμη στοιβάδα εάν η μέση τέφρα επί ξηρού δεν υπερβαίνει το προκαθορισμένο ανώτατο όριο της τέφρας για να χαρακτηριστεί σαν εκμεταλλεύσιμο λιγνιτικό στρώμα. Σε αντίθετη περίπτωση τα δύο εκμεταλλεύσιμα στρώματα αξιολογούνται ξεχωριστά.
- Από το πραγματικό πάχος κάθε απολήψιμης στοιβάδας ή μεμονωμένου απολήψιμου στρώματος αφαιρούνται ορισμένα εκατοστά (συνήθως 10cm) από την οροφή και το δάπεδο, που υπολογίζονται στα ενδιάμεσα στείρα. Το πραγματικό πάχος της στοιβάδας είναι αυτό που μένει μετά την αφαίρεση των

10cm από την οροφή και των 10cm από το δάπεδο. Η αφαίρεση αυτή αντιπροσωπεύει τις απώλειες κατά την εκμετάλλευση που απαιτούνται για τον πλήρη καθορισμό ενός απολήψιμου στρώματος. Επειδή όμως σε κάθε γεώτρηση το πάχος και ο αριθμός των απολήψιμων λιγνιτικών στρωμάτων είναι διαφορετικό, διαφορετική είναι και η απώλεια εκμετάλλευσης από χώρο σε χώρο του κοιτάσματος που ελέγχεται από κάθε γεώτρηση.

- Σε κάθε εκμεταλλεύσιμο τμήμα προστίθεται ένα στείρο στρώμα καθορισμένου πάχους (από 5 έως 20cm ανάλογα με τον τύπο του εξορυκτικού εξοπλισμού) που αντιστοιχεί στη ρύπανση εκμετάλλευσης.

2.2.3 Δημιουργία μοντέλου κοιτάσματος

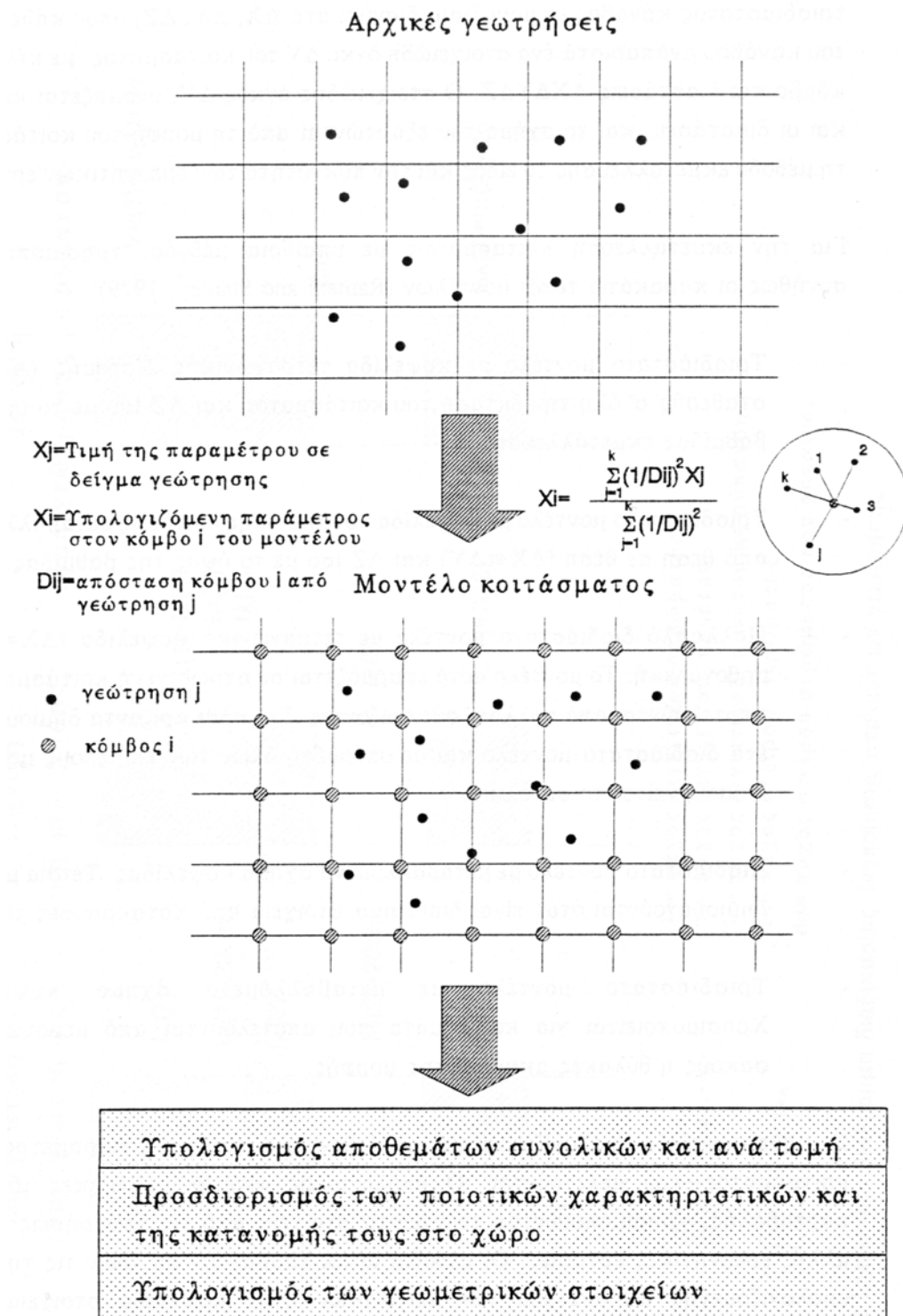
Ο σκοπός της δημιουργίας του μοντέλου, είναι η όσο το δυνατόν πιο πιστή αριθμητική αναπαράσταση στο χώρο των παραμέτρων που ενδιαφέρουν για το υπό μελέτη κοίτασμα. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού απαραίτητη είναι η γνώση του κοιτάσματος (συνθήκες σχηματισμού, ιδιομορφίες, παράγοντες που ελέγχουν την μεταλλογέννεση, τεκτονική κ.ά.) και η μέθοδος εκμετάλλευσης που θα εφαρμοστεί, ώστε να είναι δυνατή η επιλογή του κατάλληλου τύπου. Η αρχή που πρέπει να τηρείται πάντα, είναι ότι το μοντέλο προσαρμόζεται στο κοίτασμα και όχι το κοίτασμα στο μοντέλο.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος υλοποίησης ενός ψηφιακού μοντέλου είναι ένας τρισδιάστατος κανάβος με μοναδιαία διανύσματα μήκους ΔX , ΔY , ΔZ , όπου κάθε κόμβος του κανάβου αναπαριστά ένα στοιχειώδη όγκο ΔV του κοιτάσματος, με κέντρο τον κόμβο και διαστάσεις $\Delta X \Delta Y \Delta Z$. Ο στοιχειώδης όγκος ΔV , ονομάζεται κυψελίδα και οι διαστάσεις και το σχήμα του εξαρτώνται από τη μορφή του κοιτάσματος, τη μέθοδο εκμετάλλευσης, το είδος και την πυκνότητα των ερευνητικών εργασιών.

Σε κάθε κυψελίδα υπολογίζονται και αποδίδονται οι τιμές των παραμέτρων του κοιτάσματος που μελετούνται. Ο υπολογισμός γίνεται με ειδικές μεθόδους παρεμβολής, χρησιμοποιώντας τα γνωστά στοιχεία από τις γεωτρήσεις και τις άλλες ερευνητικές εργασίες. Οι μέθοδοι αυτοί λαμβάνουν υπ' όψιν τις τιμές της υπολογιζόμενης παραμέτρου των γειτονικών στην κυψελίδα στοιχείων των γεωτρήσεων, τις αποστάσεις τους και τις σχετικές τους θέσεις ως προς αυτή. Οι πιο γνωστές είναι οι μέθοδοι των αντίστροφων αποστάσεων, των κινητών μέσων, οι στατιστικές και οι γεω-

στατιστικές. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ένα πολλαπλό δισδιάστατο μοντέλο με τετραγωνική κυψελίδα και με μέθοδο παρεμβολής των αντίστροφων αποστάσεων στο τετράγωνο.

Αφού γίνει η κατασκευή του μοντέλου του κοιτάσματος, στη συνέχεια γίνονται οι διάφοροι υπολογισμοί και οι απαραίτητοι χάρτες. Με χρήση τόσο των στοιχείων του μοντέλου, όσο και των τοπογραφικών στοιχείων της επιφάνειας, της κλίσης των πρανών και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των βαθμίδων, γίνονται οι υπολογισμοί των συνολικών αποθεμάτων και των αποθεμάτων ανά τομή. Οι παράμετροι που υπολογίζονται συνήθως είναι το πάχος του λιγνίτη, των ενδιαμέσων, των υπερκειμένων, ο λόγος αποκάλυψης, η τέφρα, η υγρασία, και η κατώτερη θερμογόνο δύναμη (ΚΘΔ).



Σχήμα 2.4: Κατασκευή δισδιάστατου μοντέλου με τη μέθοδο των αντιστρόφων αποστάσεων στο τετράγωνο (Γαλετάκης, 1996).

2.2.4 Υπολογισμός των ποιοτικών χαρακτηριστικών απολήψιμης λιγνιτικής στοιβάδας

- W = Υγρασία επί φυσικού %
 AWF = Τέφρα επί ξηρού %
 A = Τέφρα επί φυσικού
 $KΘΔ$ = Κατώτερη θερμογόνος δύναμη σε kcal/kg
 d_j = Πάχος σε cm του στρώματος i της γεώτρησης
 d_0 = Αφαιρούμενο πάχος σε cm από κάθε απολήψιμη στοιβάδα λόγω απωλειών εκμετάλλευσης
 d_σ = Πάχος ρυπαντικού στρώματος
 ρ_i = Πυκνότητα του στρώματος i
 ρ_σ = Μέση πυκνότητα στείρων στρωμάτων (1.8 g/cm^3)

Ο δείκτης ε αναφέρεται στην υπολογιζόμενη απολήψιμη στοιβάδα και ο δείκτης σ στο στείρο υλικό. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά μιας απολήψιμης λιγνιτοφόρας στοιβάδας εκτιμούνται με τη βοήθεια της μέσης σταθμικής τιμής των τιμών των διακεκριμένων στρωμάτων (n) που την απαρτίζουν. Οι τύποι υπολογισμού είναι οι παρακάτω (Γαλετάκης, 1996):

$$W_\varepsilon = \frac{(d_1 - d_o)W_1\rho_1 + \sum_{i=2}^{n-1} d_i W_i \rho_i + (d_n - d_o)W_n \rho_n + d_\sigma W_\sigma \rho_\sigma}{\sum_{i=1}^n d_i \rho_i - d_o(\rho_1 + \rho_n) + d_\sigma \rho_\sigma} \quad (2.1)$$

$$AWF_\varepsilon = \frac{(d_1 - d_o)AWF_1\rho_1 + \sum_{i=2}^{n-1} d_i AWF_i \rho_i + (d_n - d_o)AWF_n \rho_n + d_\sigma AWF_\sigma \rho_\sigma}{\sum_{i=1}^n d_i \rho_i - d_o(\rho_1 + \rho_n) + d_\sigma \rho_\sigma} \quad (2.2)$$

$$K\Theta\Delta_{\varepsilon} = \frac{(d_1 - d_o)K\Theta\Delta_1\rho_1 + \sum_{i=2}^{n-1} d_i K\Theta\Delta_i \rho_i + (d_n - d_o)K\Theta\Delta_n \rho_n + d_{\sigma} K\Theta\Delta_{\sigma} \rho_{\sigma}}{\sum_{i=1}^n d_i \rho_i - d_o(\rho_1 + \rho_n) + d_{\sigma} \rho_{\sigma}} \quad (2.3)$$

Οι τιμές της τέφρας, της υγρασίας και της ΚΘΔ που δεν έχουν αναλυθεί λαμβάνονται προσεγγιστικά. Συνήθως σαν τέφρα επί ξηρού για τα ενδιάμεσα στείρα στρώματα λαμβάνεται 100%, ενώ η υγρασία επί φυσικού λαμβάνεται 35%. Η ΚΘΔ θεωρείται ίση με μηδέν ή λαμβάνει αρνητικές τιμές.

Κατά την διαδικασία της αξιολόγησης απαιτείται λοιπόν ο προσδιορισμός των παρακάτω βασικών παραμέτρων :

- Τα ελάχιστα απαιτούμενα πάχη για την εκλεκτική εξόρυξη των λιγνιτικών και στείρων ενδιαμέσων στρωμάτων, σύμφωνα με τον χρησιμοποιούμενο μηχανολογικό εξοπλισμό και την μέθοδο εξόρυξης.
- Το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό τέφρας για τον χαρακτηρισμό ενός στρώματος ως λιγνιτικού.
- Το αφαιρούμενο πάχος λιγνίτη από κάθε απολήψιμο στρώμα (απώλεια εκμετάλλευσης).
- Τα ειδικά βάρη λιγνίτη και ενδιαμέσων στείρων.
- Την τέφρα επί ξηρού και την ΚΘΔ των ενδιαμέσων στείρων.
- Το ισοδύναμο πάχος στείρου στρώματος που αντιστοιχεί στην ρύπανση που προκαλεί η εξόρυξη.

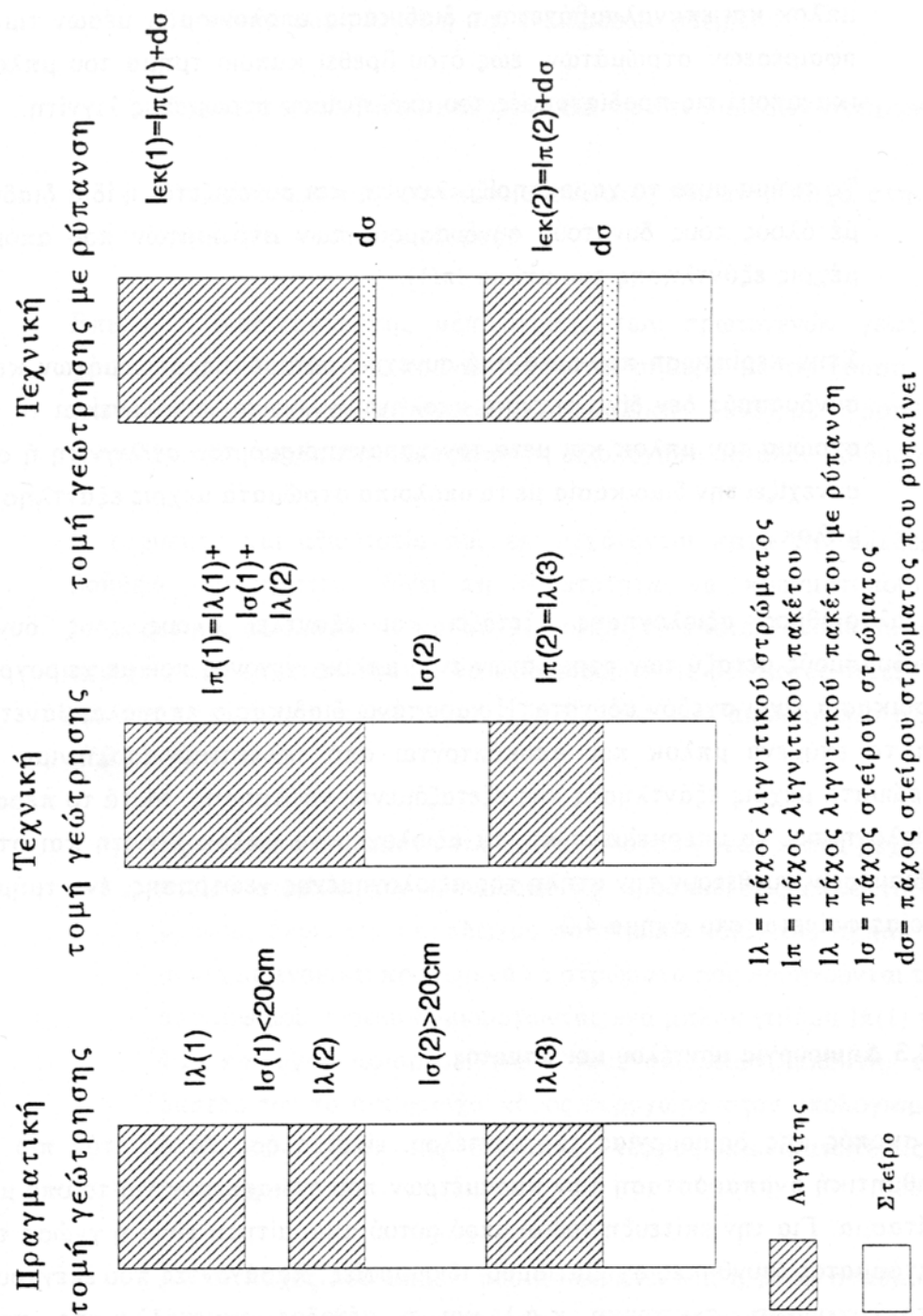
Επειδή η διαδικασία της αξιολόγησης των πρωτογενών γεωτρήσεων είναι χρονοβόρα και επίπονη, πραγματοποιείται σήμερα με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και ειδικού λογισμικού (Καραμαλίκης, 1992), με τη βοήθεια του οποίου είναι δυνατή η ταχύτατη και αξιόπιστη αξιολόγηση μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων.

Η ταχύτητα και η αξιοπιστία που επιτυγχάνονται κατά την επεξεργασία με τη βοήθεια του υπολογιστή, δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιηθούν πολλές διαφορετικές αξιολογήσεις και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τα πραγματικά στοιχεία της εκμετάλλευσης, να καθορίσουμε τις βέλτιστες τιμές των κρίσιμων για την αξιολόγηση παραμέτρων. Τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος της αξιολόγησης είναι:

- Εξετάζει τα στρώματα της υπό αξιολόγηση γεώτρησης μέχρι να εντοπίσει στείο στρώμα που ικανοποιεί τις προϋποθέσεις εκλεκτικής απολήψης αγόνου, όπως για παράδειγμα το στρώμα $1\sigma(2)$ του σχήματος 2.5. Στην συνέχεια ενοποιεί προσωρινά τα στρώματα που προηγούνται του εκλεκτικά απολήψιμου αγόνου δημιουργώντας ένα μπλοκ (τμήμα $1\pi(1)$ του σχήματος 2.5) και αφού αφαιρέσει για λόγους απωλειών, από την οροφή και το δάπεδο του το αντίστοιχο πάχος, προχωρά στον υπολογισμό των μέσων σταθμικών τιμών της υγρασίας, τέφρας και κατώτερης θερμογόνου δύναμής του.
- Αν το πάχος του μπλοκ που προκύπτει και η μέση σταθμική τέφρα του ικανοποιεί τις προϋποθέσεις του απολήψιμου μπλοκ λιγνίτη, χαρακτηρίζεται λιγνιτικό στρώμα του αποδίδονται οι μέσες τιμές υγρασίας, τέφρας, ΚΘΔ και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις εξάντλησης των στρωμάτων της συγκεκριμένης γεώτρησης.
- Αν όμως ο σταθμικός μέσος όρος της τέφρας του παραπάνω μπλοκ και το συνολικό του πάχος δεν ικανοποιούν τις προϋποθέσεις του εκλεκτικά απολήψιμου λιγνιτικού στρώματος, αφαιρείται το τελευταίο στρώμα του μπλοκ και επαναλαμβάνεται η διαδικασία υπολογισμών μέσων τιμών και αφαιρέσεων στρωμάτων, έως ότου βρεθεί κάποιο τμήμα του μπλοκ που ικανοποιεί τις προδιαγραφές του απολήψιμου στρώματος λιγνίτη.
- Το τμήμα αυτό το χαρακτηρίζει λιγνίτη και συνεχίζεται η ίδια διαδικασία με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς των στρωμάτων που απομένουν μέχρις εξάντλησης του μπλοκ $1\pi(1)$.

- Στην περίπτωση που μετά από συνεχείς αφαιρέσεις στρωμάτων κανέναν συνδυασμός δεν δίνει τεχνικά απολήψιμο λιγνίτη, αξιολογείται το πρώτο στρώμα του μπλοκ και μετά τον χαρακτηρισμό του σε λιγνίτη ή στείρο, συνεχίζει την διαδικασία με τα υπόλοιπα στρώματα μέχρι εξάντλησης του μπλοκ.

Ο αλγόριθμος αξιολόγησης εξετάζει και εξαντλεί όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ των στρωμάτων ενός μπλοκ, γεγονός που με χειρογραφική διαδικασία είναι σχεδόν αδύνατο. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα επόμενα μπλοκ που αποκόπτονται από εκλεκτικά απολήψιμα άγονα στρώματα μέχρι εξάντλησης της εξεταζόμενης γεώτρησης. Μετά το πέρας της αξιολόγησης, τα υπερκείμενα και τα αξιολογημένα μπλοκ λιγνίτη και στείρων ενδιάμεσων συνθέτουν την στήλη της αξιολογημένης γεώτρησης, ένα τμήμα της οποίας φαίνεται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας ενοποίησης στρωμάτων γεώτρησης (Γα-λειτουργία, 1996).

2.3 Κριτική της υφιστάμενης μεθοδολογίας

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του υπολογιζόμενου από την αξιολόγηση εκμεταλλεύσιμου λιγνίτη, δεν ανταποκρίνονται με ακρίβεια στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου λιγνίτη. Το συνολικό σφάλμα εκτίμησης της ποιότητας αποτελείται από τα σφάλματα της δειγματοληψίας, των αναλύσεων, της αξιολόγησης της γεώτρησης και το σφάλμα κατά την κατασκευή του μοντέλου του κοιτάσματος. Οι αδυναμίες της μεθόδου αξιολόγησης μιας γεώτρησης που οδηγούν σε εσφαλμένες εκτιμήσεις μπορούν να συνοψιστούν στις παρακάτω (Γαλετάκης, 1996):

α) Η σύνθεση των διαμορφούμενων από την υφιστάμενη μεθοδολογία λιγνιτικών απολήψιμων τμημάτων δεν είναι η ίδια με εκείνων που εξορύσσονται στο μέτωπο. Αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας των παρακάτω :

i) Κατά την εξόρυξη δεν εφαρμόζεται πλήρως ο καθαρισμός των λιγνιτικών στρωμάτων όπως προβλέπεται από τη μέθοδο (αφαίρεση 10-15cm από οροφή και δάπεδο).

ii) Τα κριτήρια απόληψης ή απόρριψης μιας λιγνιτικής ή μιας στείρας ένστροφης αντίστοιχα, δεν βασίζονται στο μέτωπο εξόρυξης στα αυστηρά μαθηματικά όρια που τίθενται από τη μεθοδολογία. Π.χ. μια στείρα ένστροφή 22cm, δηλαδή μόλις 2cm μεγαλύτερη του ορίου των 20cm, θα απορριφθεί με εκλεκτική εξόρυξη ή θα συναποληφθεί με την εκμεταλλεύσιμη υπερκείμενη και υποκείμενη λιγνιτική ένστροφή; Χωρίς αμφιβολία στο μέτωπο εξόρυξης μπορεί να συμβούν κατά περίπτωση και τα δύο γεγονότα.

iii) Οι συνθήκες εργασίας στα μέτωπα (μεγάλο ύψος μετώπων, καιρικές συνθήκες κ.ά.) καθιστούν πολλές φορές δύσκολη μακροσκοπικά, τη διάκριση ανάμεσα σ' ένα λιγνιτικό στρώμα και σε μια ισχυρά ανθρακομιγή αργιλομαργαϊκή ένστροφή. Έτσι πολλές φορές οι ανθρακομιγείς ενστρώσεις με υψηλό ποσοστό τέφρας εξορύσσονται σε λιγνιτικά στρώματα.

iv) Οι ενοποποιήσεις των εναλλασόμενων στρωμάτων στο μέτωπο γίνονται εντός του διαστήματος που καθορίζεται από το ύψος του, ενώ κατά την αξιολόγηση δεν υφίσταται ο περιορισμός αυτός.

β) Οι χρησιμοποιούμενες προσεγγιστικές τιμές για τον υπολογισμό των σταθμικών μέσων τιμών W_e , AWF_e , $K\Theta\Delta_e$ των διαμορφούμενων απολήψιμων λιγνιτικών τμημάτων, εφ' όσον αναλύσεις για ενδιάμεσα στείρα υλικά υπάρχουν μόνο ελάχιστες, δημιουργούν μερικές φορές σημαντικά υπολογιστικά σφάλματα. Θα πρέπει να τονιστεί ότι μερικές φορές υπάρχει σημαντική μεταβολή στη σύσταση των ενδιάμεσων στείων ενστρώσεων και κατά το βάθος και από θέση σε θέση, ακόμα και εντός του ίδιου τομέα ενός ορυχείου. Οι πιο συνηθισμένες μεταβολές συμβαίνουν στο ποσοστό των οργανικών συστατικών που περιέχουν και στη χημική σύσταση του ανόργανου μέρους τους (κυρίως στο περιεχόμενο CaO και SiO_2) που επηρεάζουν σημαντικά την τιμή της $K\Theta\Delta$. Κατά συνέπεια η εφαρμογή μιας ενιαίας τιμής κατά την αξιολόγηση του λιγνιτικού κοιτάσματος ενός τομέα του ορυχείου μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό σφάλμα.

γ) Αντιμετωπίζονται προσεγγιστικά τα φαινόμενα της ρύπανσης (ενιαία τιμή για ολόκληρο το κοίτασμα, εμπειρικός τρόπος καθορισμού του ποσοστού), που συμβαίνει λόγω συστηματικής και τυχαίας συνεξόρυξης στείων ενδιάμεσων ενστρώσεων.

Από όλα τα παραπάνω, είναι φανερό ότι η έννοια της αβεβαιότητας και του υποκειμενισμού δεν ενσωματώνονται στο σύστημα αξιολόγησης. Στο μέτωπο εξόρυξης ο χειριστής πολλές φορές δρα υποκειμενικά, δεν βασίζεται στα αυστηρά μαθηματικά όρια που τίθενται από τη μεθοδολογία. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα εσφαλμένες εκτιμήσεις. Με την χρήση της ασαφούς λογικής ενσωματώνουμε στο σύστημα αξιολόγησης την αβεβαιότητα και τον υποκειμενισμό, με την μοντελοποίηση διαφόρων παραγόντων, όπως οι συνθήκες εργασίας, η εμπειρία του χειριστή κ.ά.

Κεφάλαιο 3

Εισαγωγή στην ασαφή λογική και στα ασαφή συστήματα λήψης αποφάσεων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη εισαγωγή για την ιστορική εξέλιξη και τη σημασία της ασαφούς λογικής και αναφέρονται οι βασικοί ορισμοί και έννοιές της.

3.1 Εισαγωγή

Τα θεμέλια της λογικής ως επιστήμη τέθηκαν πριν από περισσότερα από δυο χιλιάδες χρόνια, όταν ο Αριστοτέλης ανέπτυξε τις αρχές της Τυπικής Λογικής ή Λογικής Πρώτης Τάξης (Formal Logic, First Order Logic). Η λογική αυτή βασίστηκε στο ότι ένας συλλογισμός ήταν ή δεν ήταν αληθής, ένα στοιχείο ανήκε ή δεν ανήκε σε ένα σύνολο, σύμφωνα με κάποιους συγκεκριμένους κανόνες, όπως για παράδειγμα το σύνολο των ζυγών αριθμών. Η συμμετοχή ενός στοιχείου, επομένως, σε ένα σύνολο μπορεί να παρασταθεί από ένα δυαδικό ψηφίο: 1 για ένα στοιχείο του συνόλου και 0 για ένα στοιχείο που δεν ανήκει στο σύνολο.

Τη δεκαετία του 1920, έγινε το επόμενο βήμα. Τα λογικά παράδοξα και η αρχή της απροσδιοριστίας συνέβαλαν στην ανάπτυξη της "διακριτής" λογικής από το Lukasiewicz, όπου το "σωστό" και το "λάθος", η "αλήθεια" και το "ψεύδος" ενός συλλογισμού, θεωρούνταν οι ακραίες τιμές ενός πεδίου τιμών, όπου μπορούσε να ορισθεί μια ή και περισσότερες ενδιάμεσες τιμές.

Η "διακριτή" λογική αυτή μετάβαση από το απόλυτα αληθές στο απόλυτα ψευδές, οδήγησε στη συνέχεια τον Lotfi Zadeh τη δεκαετία του '60 στην ανάπτυξη μιας λογικής που να βασίζεται στη συνεχή μετάβαση ανάμεσα στις δύο αυτές τιμές. Η λογική αυτή είναι η ασαφής λογική και στηρίζεται στα ασαφή σύνολα.

Δεν υπάρχει τίποτα το ασαφές γύρω από την ασαφή λογική. Στηρίζεται σε πολύ γερά μαθηματικά θεμέλια και δίνει εντελώς συγκεκριμένα αποτελέσματα. Επίσης δεν είναι άλλη μια θεωρία πιθανοτήτων. Με τις πιθανότητες μοντελοποιείται η έννοια της τυχαιότητας, με την ασαφή λογική η έννοια της αβεβαιότητας.

Η ασαφής λογική έχει δύο διαφορετικές έννοιες. Υπό μια στενή έννοια, η ασαφής λογική είναι ένα λογικό σύστημα, το οποίο είναι μια επέκταση της κλασσικής λογικής. Αλλά σε μια ευρύτερη έννοια, η οποία είναι σε κυρίαρχη χρήση σήμερα, η ασαφής λογική είναι σχεδόν συνώνυμη με τη θεωρία των ασαφών συνόλων, μια θεωρία που υποστηρίζει ότι τα στοιχεία ανήκουν σε διάφορα σύνολα, με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής.

Η ασαφής λογική είναι ένας τρόπος να αντιστοιχιστεί ένα ασαφές, όχι σαφώς ορισμένο στοιχείο, σε ένα σύνολο. Αντί να απαιτεί το στοιχείο να είναι μέλος του συνόλου ή του συμπληρωματικού του, δέχεται να ανήκει σε διάφορα σύνολα κατά ένα ποσοστό. Η λογική αυτή είναι πολύ πιο κοντά στον τρόπο που ο άνθρωπος είναι ικανός να διαχειρίζεται έννοιες όχι τόσο σαφείς και να φθάνει σε λογικά συμπεράσματα.

Η ασαφής λογική βασίζεται στη θεωρία των ασαφών συνόλων που ανέπτυξε ο Lotfi Zadeh τη δεκαετία του '60, στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, στο Berkeley της Καλιφόρνιας. Η θεωρία αυτή υποστηρίζει ότι ο περιβάλλον χώρος απαρτίζεται από στοιχεία που ανήκουν σε διάφορα σύνολα με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής. Ο μόνος περιορισμός σε αυτήν είναι ότι το άθροισμα των βαθμών συμμετοχής ενός στοιχείου σε ένα ασαφές σύνολο και στο συμπληρωματικό του πρέπει να είναι ίσο με 1. Μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί ότι η κλασσική λογική, στην οποία ένα αντικείμενο ανήκει κατά 100% σε ένα σύνολο και κατά 0% στο συμπληρωματικό του, αποτελεί μια οριακή κατάσταση της ασαφούς λογικής.

Στη συνέχεια αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο συνάγονται συμπεράσματα από δεδομένα στοιχεία. Σύμφωνα με τους κανόνες της λογικής, εάν είναι γνωστό ένα μόνο μέρος από κάποια δεδομένα ή από κάποιο μέρος της γνώσης, τότε νέα γνώση μπορεί να εξαχθεί μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται λογική εξαγωγής συμπερασμάτων. Η βασική μορφή της έχει ως εξής:

Δεδομένα: Το x είναι μέρος του συνόλου X και το y είναι μέρος του συνόλου Y .

Κανόνας: Αν το x είναι μέρος του συνόλου X και το y είναι μέρος του συνόλου Y , τότε το z είναι μέρος του συνόλου Z .

Συμπέρασμα: Το z είναι μέρος του συνόλου Z .

Αν όμως τα δεδομένα εκφράζονται μέσω αβέβαιων όρων όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή και στις συναλλαγές ανάμεσα στους ανθρώπους, όπως π.χ. "το x είναι σχεδόν X " ή "το y είναι λίγο Y ", τότε η χρήση της κοινής λογικής δε

μπορεί να οδηγήσει στην εξαγωγή οποιουδήποτε συμπεράσματος. Αν ωστόσο τα σύνολα X , Y και Z είναι ασαφή, η ασαφής λογική παρέχει μια μέθοδο εξαγωγής συμπερασμάτων από τέτοιου είδους ανακριβή δεδομένα. Συγκεκριμένα αν είναι γνωστό το "πόσο πολύ" το x είναι X και το y είναι Y , τότε μπορεί να συναχθεί "πόσο πολύ" το z είναι Z , όπως ακριβώς μπορεί να συμπεράνει ένας άνθρωπος από τέτοιου είδους δεδομένα.

Η ασαφής λογική χρησιμοποιείται σε διάφορες επιστημονικές και τεχνικές εφαρμογές, γιατί είναι εννοιολογικά απλή. Οι μαθηματικές έννοιες πίσω από τον ασαφή λογική είναι πολύ απλές. Επιπλέον είναι ανεκτική σε ανακριβή στοιχεία. Ένα άλλο πλεονέκτημά της είναι ότι μπορεί να ενσωματώσει εύκολα την εμπειρία των ειδικών. Η ασαφής λογική μπορεί να συνδυαστεί με τις συμβατικές τεχνικές ελέγχου, δεν τις αντικαθιστά απαραίτητως. Σε πολλές περιπτώσεις τα ασαφή συστήματα αυξάνουν αυτές και απλοποιούν την εφαρμογή τους. Τέλος η ασαφής λογική είναι βασισμένη στη φυσική γλώσσα. Η βάση για την ασαφή λογική είναι η βάση για την ανθρώπινη επικοινωνία. Η φυσική γλώσσα, αυτή που χρησιμοποιείται από τους απλούς ανθρώπους καθημερινά, έχει διαμορφωθεί από χιλιάδες έτη ανθρώπινης ιστορίας για να είναι κατάλληλη και αποδοτική. Δεδομένου ότι η ασαφής λογική χτίζεται επάνω στις δομές της ποιοτικής περιγραφής που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή γλώσσα, είναι εύχρηστη.

3.2 Βασικές έννοιες και ορισμοί

Στην κλασσική θεωρία συνόλων ένα σύνολο αποτελείται από ένα πεπερασμένο ή άπειρο αριθμό στοιχείων. Τα στοιχεία όλων των συνόλων ανήκουν σε ένα *υπερσύνολο αναφοράς* (universe of discourse ή referential). Τα στοιχεία ενός υπερσυνόλου αναφοράς που περιέχει το σύνολο υπό μελέτη A ανήκουν ή όχι στο σύνολο αυτό.

Αυτό μπορεί να εκφραστεί με τη χαρακτηριστική συνάρτηση του Bool (Boolean characteristic function) $f_A(x)$ του σαφούς συνόλου A (Yager and Zadeh, 1992):

$$f_A(x) \begin{cases} = 1, & \text{εάν } x \in A \\ = 0, & \text{εάν } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

που ορίζει την τιμή 1 σε κάθε στοιχείο που ανήκει στο σύνολο A και την τιμή 0 σε κάθε στοιχείο που δεν ανήκει στο σύνολο A .

Η ασάφεια μπορεί να εισαχθεί στη θεωρία των συνόλων εάν γενικευθεί η χαρακτηριστική συνάρτηση έτσι ώστε να λαμβάνει άπειρο αριθμό τιμών στο διάστημα $[0,1]$.

Εάν X είναι το υπερσύνολο αναφοράς με επί μέρους στοιχεία x, τότε $X=\{x\}$. Ένα ασαφές σύνολο A του υπερσυνόλου αναφοράς X, μπορεί να εκφρασθεί συμβολικά ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών (ordered pairs) (Harris *et al.*, 1993):

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (3.2)$$

όπου $\mu_A(x)$ είναι η *συνάρτηση συμμετοχής* (membership function) του x στο σύνολο A και είναι μια απεικόνιση από το υπερσύνολο αναφοράς X στο κλειστό διάστημα $[0,1]$. Η συνάρτηση συμμετοχής υποδεικνύει το βαθμό κατά τον οποίο το στοιχείο x ανήκει στο σύνολο A (Harris *et al.*, 1993), δηλαδή:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (3.3)$$

3.3 Λογικοί τελεστές

Ο ασαφής λογικός συλλογισμός είναι ένα υπερσύνολο της τυποποιημένης λογικής του Bool. Εάν κρατηθούν ασαφείς τιμές στα άκρα, 1 (απολύτως αληθινός), και 0 (απολύτως ψεύτικος), ισχύουν οι τυποποιημένες λογικές διαδικασίες. Για παράδειγμα, εξετάζονται τα πρότυπα αλήθειας στους παρακάτω πίνακες (Fuzzy Toolbox της Matlab):

Πίνακας 3.1: Λογικοί τελεστές AND, OR, NOT (Fuzzy Toolbox της Matlab).

A	B	A and B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

AND

A	B	A or B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

OR

A	not A
0	1
1	0

NOT

Στην ασαφή λογική η αλήθεια οποιασδήποτε δήλωσης είναι ένα θέμα βαθμού. Οι τιμές εισόδου μπορούν να είναι πραγματικοί αριθμοί μεταξύ 0 και 1. Η δήλωση $A \text{ AND } B$, όπου το A και το B περιορίζονται στο διάστημα $[0,1]$, επιλύεται με τη χρησιμοποίηση της συνάρτησης $\min(A,B)$. Χρησιμοποιώντας τον ίδιο συλλογισμό, μπορεί να αντικατασταθεί η λειτουργία OR με την μέγιστη λειτουργία, έτσι ώστε το $A \text{ OR } B$ να γίνεται ισοδύναμο με το $\max(A,B)$. Τέλος, η λειτουργία NOT A γίνεται ισοδύναμη με τη λειτουργία $1-A$. Ο πίνακας αλήθειας είναι απολύτως αμετάβλητος από αυτήν την αντικατάσταση.

Πίνακας 3.2: Αντικατάσταση των λογικών τελεστών (Fuzzy Toolbox της Matlab)

A	B	$\min(A,B)$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

AND

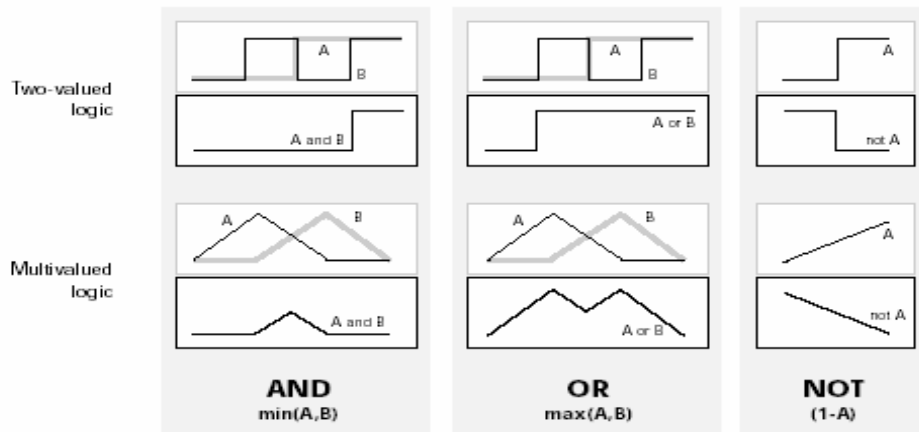
A	B	$\max(A,B)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

OR

A	$1 - A$
0	1
1	0

NOT

Δεδομένου ότι υπάρχει μια συνάρτηση πίσω από τον πίνακα αλήθειας, παρά ακριβώς ο ίδιος ο πίνακας αλήθειας, μπορούν να εξεταστούν και τιμές εκτός από 1 και 0. Η επόμενη εικόνα χρησιμοποιεί μια γραφική παράσταση για να παρουσιάσει τις ίδιες πληροφορίες. Έχει μετατραπεί ο πίνακας αλήθειας σε μια γραφική δύο ασαφών συνόλων μαζί, για να δημιουργήσει ένα ασαφές σύνολο. Το ανώτερο μέρος της εικόνας επιδεικνύει τις γραφικές που αντιστοιχούν σε δύο τιμές αλήθειας, ενώ το χαμηλότερο μέρος της, επιδεικνύει πώς οι διαδικασίες λειτουργούν και με πολλές τιμές αλήθειας A και B .



Σχήμα 3.1: Χρήση των λογικών τελεστών στα ασαφή σύνολα (Fuzzy Toolbox της Matlab).

3.4 Ιδιότητες και πράξεις ασαφών συνόλων

Οι ιδιότητες των ασαφών συνόλων και οι πράξεις που πραγματοποιούνται μεταξύ τους είναι οι παρακάτω (Driankov *et al.*, 1993):

1) Ένα ασαφές σύνολο A του X θεωρείται *κενό* (null), εάν η συνάρτηση συμμετοχής του είναι μηδενική παντού, δηλαδή:

$$A = \emptyset \text{ εάν } \mu_A(x) = 0, \forall x \in X \quad (3.4)$$

2) Το *συμπλήρωμα* (complement) \bar{A} ενός ασαφούς συνόλου A , είναι ένα νέο ασαφές σύνολο με συνάρτηση συμμετοχής:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \forall x \in X \quad (3.5)$$

3) Δύο ασαφή σύνολα θεωρούνται *ισοδύναμα* (equivalent), όταν οι συναρτήσεις συμμετοχής τους είναι ίσες παντού, δηλαδή:

$$A = B \text{ εάν } \mu_A(x) = \mu_B(x), \forall x \in X \quad (3.6)$$

4) Ένα ασαφές σύνολο B είναι *υποσύνολο* (subset) ενός συνόλου A , εάν η συνάρτηση συμμετοχής του B είναι μικρότερη ή ίση με αυτή του A παντού στο X , δηλαδή:

$$B \subset A \text{ εάν } \mu_B(x) \leq \mu_A(x), \forall x \in X \quad (3.7)$$

5) Η *ένωση* (union) δυο ασαφών συνόλων A και B στο X , ορίζεται ως:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X \quad (3.8)$$

6) Η *τομή* (intersection) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X, ορίζεται ως:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)], \forall x \in X \quad (3.9)$$

7) Το *γινόμενο* (algebraic product) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X, ορίζεται ως:

$$\mu_{A \otimes B}(x) = \mu_A(x) \bullet \mu_B(x), \forall x \in X \quad (3.10)$$

8) Το *άθροισμα* (algebraic sum) δύο ασαφών συνόλων A και B στο X, ορίζεται ως:

$$\mu_{A \oplus B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \mu_B(x), \forall x \in X \quad (3.11)$$

3.5 Γλωσσικές μεταβλητές

Οι τιμές μιας ασαφούς μεταβλητής (fuzzy variable) μπορούν να θεωρηθούν όροι ασαφών συνόλων. Για παράδειγμα, το "Ύψος" μπορεί να θεωρηθεί ως μια ασαφής μεταβλητή που μπορεί να πάρει τιμές όπως *χαμηλό*, *κανονικό*, *ψηλό* και οι οποίες στη συνέχεια μπορούν να περιγραφούν εύκολα από ασαφή σύνολα. Μια ασαφής μεταβλητή δηλαδή, παίρνει τιμές που είναι προτάσεις μιας φυσικής ή τεχνητής γλώσσας για να περιγράψει τα ασαφή σύνολα. Σε αυτήν την περίπτωση καλείται *γλωσσική μεταβλητή* (linguistic variable). Συνήθως είναι ένας σύνθετος όρος αποτελούμενος από επιμέρους όρους. Οι όροι αυτοί διαίρουνται στις ακόλουθες υποκατηγορίες:

- *πρωτεύοντες όροι* (primary terms): είναι όροι ασαφών συνόλων του υ-περσυνόλου αναφοράς (π.χ. Ψηλό, Χαμηλό, Μέσο, Μικρό, Μηδέν).
- την *άρνηση* (negation) ΟΧΙ και τα *συνδετικά* (connectives) ΚΑΙ και Ή.
- *γλωσσικά περιγράμματα* (linguistic descriptors) όπως *πολύ*, *ελαφρά*, *σχετικά*.

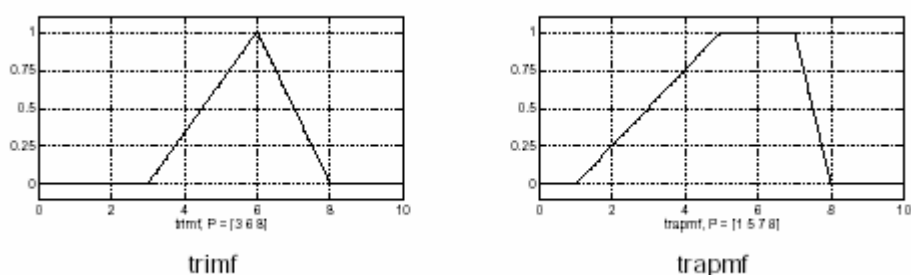
Τα συνδετικά ΚΑΙ και Ή και η άρνηση ΟΧΙ, μπορούν να ορισθούν μέσω των πράξεων του συμπληρώματος, της ένωσης και της τομής.

Τα γλωσσικά περιγράμματα χρησιμεύουν στη δημιουργία ενός ευρύτερου συνόλου γλωσσικών τιμών μιας γλωσσικής μεταβλητής από μια μικρότερη συλλογή πρωτεύοντων όρων. Χρησιμοποιώντας το περίγραμμα *πολύ* σε συνδυασμό με τα συνδετικά *ΟΧΙ*, *ΚΑΙ* και τον πρωτεύοντα όρο *μεγάλο*, μπορούμε να δημιουργήσουμε τα επιπλέον ασαφή σύνολα *πολύ μεγάλο*, *πάρα πολύ μεγάλο*, *ΟΧΙ πολύ μεγάλο*, *μεγάλο ΚΑΙ ΟΧΙ πολύ μεγάλο*, κλπ.

3.6 Συναρτήσεις συμμετοχής

Μια συνάρτηση συμμετοχής (membership function) είναι μια καμπύλη που αντιστοιχεί κάθε σημείο της εισόδου, σε μια τιμή συμμετοχής (ή βαθμό συμμετοχής) μεταξύ 0 και 1.

Οι απλούστερες συναρτήσεις συμμετοχής διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας ευθείες γραμμές. Από αυτές, οι απλούστερες είναι η τριγωνική και η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής. Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής έχει το όνομα `trimf` στο λογισμικό Matlab που χρησιμοποιήθηκε και είναι μια συλλογή τριών σημείων που διαμορφώνουν ένα τρίγωνο. Η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής, `trapmf`, έχει μια επίπεδη κορυφή και είναι ακριβώς μια περικομμένη καμπύλη τριγώνων.



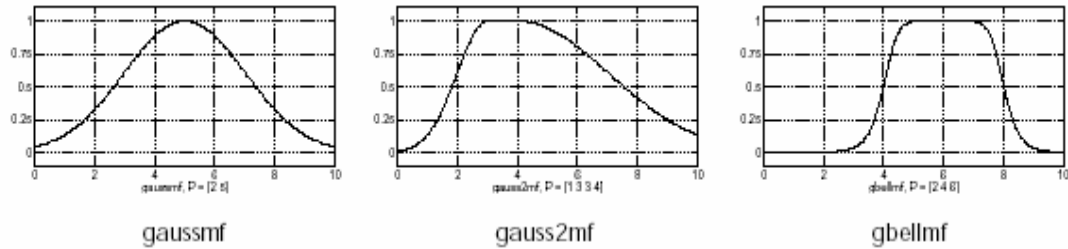
Σχήμα 3.2: Η τριγωνική και η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής ((Fuzzy Toolbox της Matlab).

Συνήθεις επίσης συναρτήσεις συμμετοχής είναι αυτές που βασίζονται στην συνάρτηση της κανονικής κατανομής του Gauss ή αλλιώς γκαουσσισιανής καμπύλης.

Οι συναρτήσεις αυτές είναι η `gaussmf`, που είναι μια απλή γκαουσσισιανή καμπύλη και η `gauss2mf`, η οποία είναι μια σύνθεση δύο διαφορετικών γκαουσσισιανών καμπυλών.

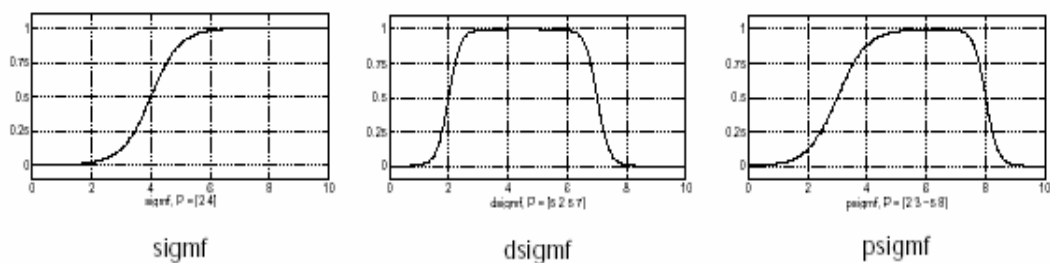
Η `gbellmf` είναι μια γενικευμένη συνάρτηση συμμετοχής που καθορίζεται από τρεις

παραμέτρους. Η συνάρτηση συμμετοχής gbellmf έχει μια παραπάνω παράμετρο από την γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής. Λόγω της ομαλότητάς τους, οι γκαουσιανές συναρτήσεις και η gbell είναι δημοφιλείς μέθοδοι για τα ασαφή σύνολα.



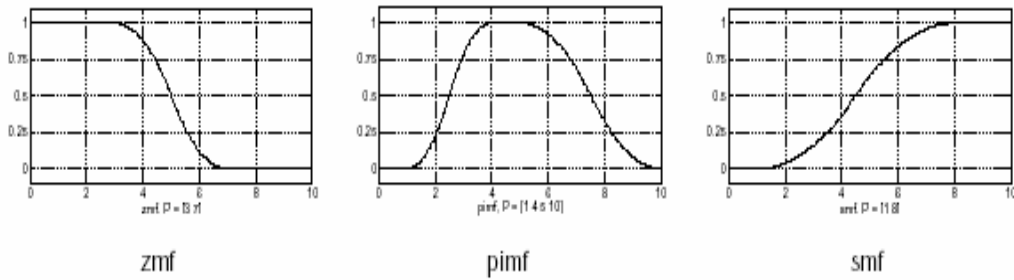
Σχήμα 3.3: Συναρτήσεις συμμετοχής του Gauss (Fuzzy Toolbox της Matlab).

Μια άλλη συνήθης συνάρτηση συμμετοχής είναι η σιγμοειδής, sigmf, η οποία είναι είτε ανοικτή αριστερά είτε δεξιά. Ασύμμετρες και κλειστές (όχι ανοικτές αριστερά ή δεξιά) συναρτήσεις συμμετοχής, μπορούν να συντεθούν χρησιμοποιώντας δύο σιγμοειδής συναρτήσεις. Έτσι εκτός από τη βασική sigmf, υπάρχει επίσης η διαφορά μεταξύ σιγμοειδών συναρτήσεων, που ονομάζεται dsigmf και το προϊόν από δύο σιγμοειδής συναρτήσεις, που ονομάζεται psigmf.



Σχήμα 3.4: Συναρτήσεις συμμετοχής sigmf, dsigmf, psigmf (Fuzzy Toolbox της Matlab).

Τέλος, τρεις συναρτήσεις συμμετοχής είναι οι καμπύλες Z, P_i και S. Η συνάρτηση συμμετοχής zmf, είναι μια ασύμμετρη πολυωνυμική καμπύλη, η οποία είναι ανοικτή αριστερά, η pimf είναι μηδέν στα δύο άκρα με μια άνοδο στη μέση και η smf είναι μια συνάρτηση που είναι ανοικτή δεξιά.



Σχήμα 3.5: Συναρτήσεις συμμετοχής zmf, pimf, smf (Fuzzy Toolbox της Matlab).

3.7 Δομή συστήματος ασαφούς λογικής

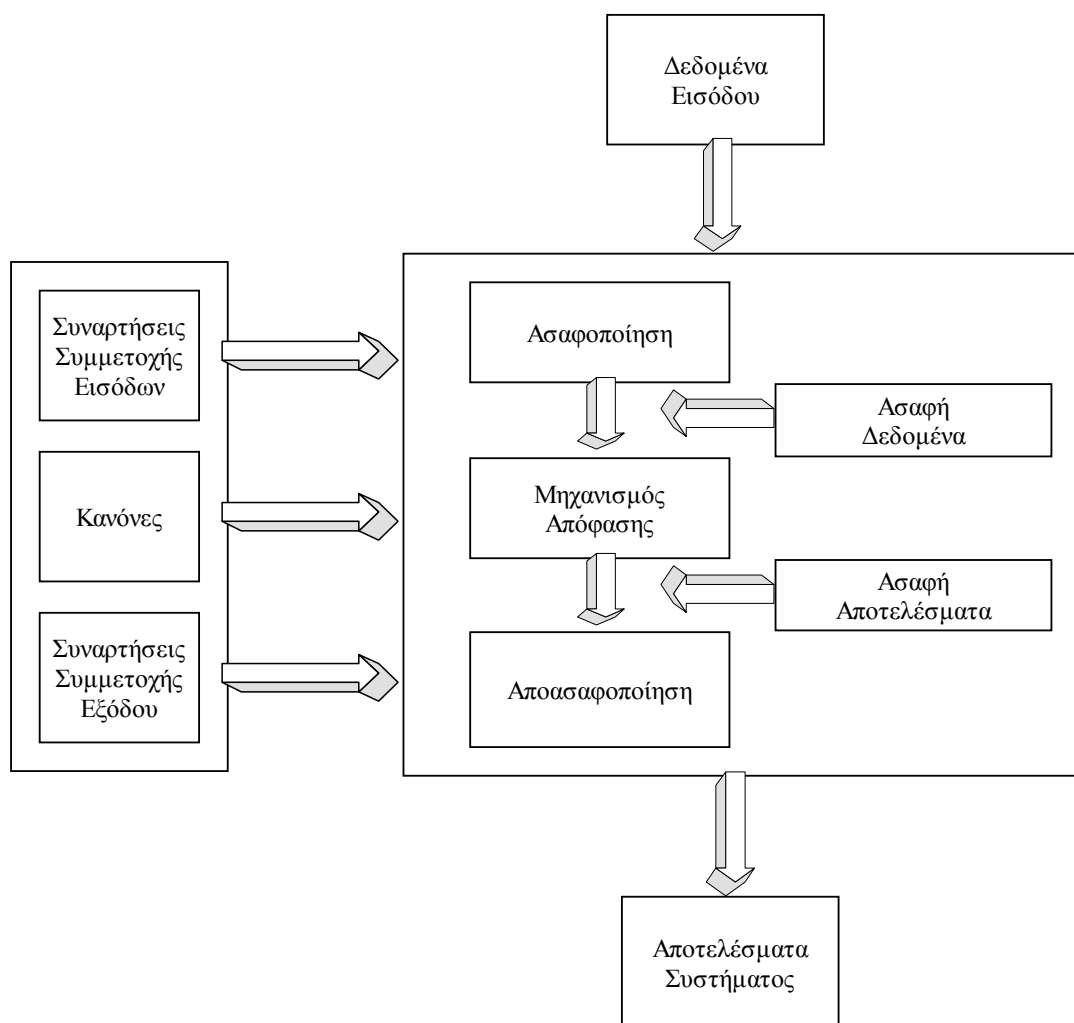
Η ασαφής επαγωγή είναι η διαδικασία αντιστοίχισης μιας δεδομένης εισόδου σε μια έξοδο, χρησιμοποιώντας την ασαφή λογική. Η διαδικασία αυτή αφορά όλες τις έννοιες που προαναφέρθηκαν: συναρτήσεις συμμετοχής, τελεστές ασαφούς λογικής και κανόνες *EAN... TOTE...*

Τα συστήματα ασαφούς επαγωγής εφαρμόζονται επιτυχημένα εδώ και χρόνια σε τομείς όπως: ο αυτόματος έλεγχος, η κατηγοριοποίηση των δεδομένων, η ανάλυση των αποφάσεων, τα έμπειρα συστήματα και την τεχνητή όραση. Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα της προσέγγισης, μόνο λίγες εφαρμογές της ασαφούς λογικής στα προβλήματα βιομηχανίας μεταλλείων έχουν αναφερθεί μέχρι σήμερα. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές είναι οι παρακάτω: Ο Nguyen το 1985 μελέτησε μερικές ασαφείς εφαρμογές σε θέματα βραχομηχανικής και καθόρισε την ασάφεια της ταξινόμησης των πετρωμάτων. Ο Bandopadhyay το 1986 ανέπτυξε έναν ασαφή αλγόριθμο για να εξαγάγει χρήσεις του εδάφους και για τη λήψη απόφασης στην εκμετάλλευση μεταλλείων. Ο Bascetin το 1998 μελέτησε την εφαρμογή του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού για να λυθούν τα προβλήματα της εκλεκτικής εξόρυξης. Επίσης βασίστηκε σε συστήματα ασαφούς θεωρίας για την επιλογή ενός βέλτιστου συστήματος μεταφορών άνθρακα από το ορυχείο, στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (Kesimal and Bascetin, 2002).

Λόγω της ιδιαίτερης φύσης του, η οποία εφαρμόζεται σε πολλούς χώρους, ένα σύστημα ασαφούς επαγωγής έχει πολλά ονόματα: ασαφές σύστημα βασιζόμενο σε κανόνες (fuzzy-rule-based system), ασαφές έμπειρο σύστημα (fuzzy expert system), ασα-

φές μοντέλο (fuzzy model), ασαφής λογικός ελεγκτής (fuzzy logic controller) ή απλούστερα ασαφές σύστημα.

Η γενική δομή ενός συστήματος ασαφούς λογικής παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.6: Η γενική δομή ενός συστήματος ασαφούς λογικής.

- οι ασαφείς μεταβλητές, τα ασαφή σύνολα και οι συναρτήσεις συμμετοχής τους. Το Fuzzy Toolbox της Matlab προσφέρει ένα αρκετά μεγάλο αριθμό συναρτήσεων συμμετοχής για την δημιουργία του συστήματος: τριγωνικές, τραπεζοειδείς, Gauss, κλπ, όπως έχει αναφερθεί. Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης συμμετοχής επαφίεται στον ειδικό και γίνεται συνήθως μετά από μια διαδικασία δοκιμής.

- οι κανόνες που είναι ένα σύνολο προτάσεων, συνδέουν το σύνολο των εισαγόμενων δεδομένων με τα αποτελέσματα. Καθορίζονται έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να μετατρέπει οποιαδήποτε εισερχόμενη τιμή σε κάποιο αποτέλεσμα, καλύπτοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς δεδομένων - αποτελεσμάτων. Είναι εκφρασμένοι σε σχέσεις της μορφής $EAN \dots TOTE \dots$ και μπορούν να πραγματοποιούν λογικές συνεπαγωγές, είτε με τον κανόνα ελαχίστου (min), είτε με τον κανόνα γινομένου (product). Αναφέρονται σε γλωσσικές μεταβλητές, είναι εκφρασμένοι σε φυσική γλώσσα και ως τέτοιοι είναι ιδιαίτερος χρήσιμοι. Οι κανόνες είναι αυτοί που καθορίζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την αξιοπιστία του συστήματος. Για τη δημιουργία των κανόνων, χρησιμοποιούνται και πάλι οι γνώσεις ενός εμπειρογνώμονα της υπό μελέτη διαδικασίας.
- τα δεδομένα, όπως εισάγονται ως αριθμητικές τιμές. Συνήθως γίνεται εξομάλυνση ή κανονικοποίηση.
- η ασαφοποίηση όπου οι τιμές των φυσικών μεταβλητών μετατρέπονται σε ασαφείς αριθμούς.
- ο μηχανισμός της απόφασης κατά τον οποίο αξιολογούνται όλοι οι κανόνες και μετά τη διαδικασία συνεπαγωγής, ανάλογα με το βαθμό εκπλήρωσης ή συμμετοχής του καθενός, το σύστημα βγάζει ένα συμπέρασμα.
- την αποασαφοποίηση κατά την οποία τα ασαφή σύνολα των εξόδων μετατρέπονται σε σαφή αποτελέσματα.

Μεταξύ των τριών τελευταίων διαδικασιών παρεμβάλλονται άλλοι δύο βοηθητικοί: η εφαρμογή των λογικών τελεστών και η συγκέντρωση των εξόδων όλων των κανόνων. Παρακάτω εξετάζονται πιο αναλυτικά οι βασικοί μηχανισμοί του συστήματος.

3.7.1 Ασαφοποίηση

Η ασαφοποίηση είναι η διαδικασία της μετατροπής των αρχικών δεδομένων σε ασαφείς αριθμούς, μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής. Τα δεδομένα είναι πάντα μια αριθμητική τιμή, περιορισμένη στο υπερσύνολο αναφοράς της εισαγόμενης μεταβλητής και η έξοδος είναι ένας ασαφής βαθμός συμμετοχής.

3.7.2 Εφαρμογή των λογικών τελεστών

Εάν ένας κανόνας έχει πάνω από ένα μέρος, εφαρμόζονται οι ασαφείς τελεστές για να καθορισθεί ένας αριθμός που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα για αυτόν τον κανόνα. Αυτός ο αριθμός εφαρμόζεται στη συνάρτηση εξόδου. Η είσοδος στον ασαφή τελεστή είναι δύο ή περισσότερες τιμές συμμετοχής από τις ασαφοποιημένες μεταβλητές εισόδου. Η έξοδος είναι μια τιμή αληθείας.

Το Fuzzy Toolbox της Matlab υποστηρίζει δύο μεθόδους για την AND λειτουργία: `min(minimum)` και `prod(product)` και δύο μεθόδους για την OR: `max(maximum)` και `probor(από το probabistic)`.

3.7.3 Εφαρμογή της μεθόδου συνεπαγωγής

Η μέθοδος της ασαφούς συνεπαγωγής (implication) μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ο σχηματισμός του αποτελέσματος (ενός ασαφούς συνόλου) βασιζόμενος στο αίτιο (έναν μοναδικό αριθμό). Η είσοδος για την διαδικασία συνεπαγωγής είναι ένα αριθμός που προέρχεται από τα αίτια, και η έξοδος είναι ένα ασαφές σύνολο. Η συνεπαγωγή εφαρμόζεται σε κάθε κανόνα.

Το Fuzzy Toolbox της Matlab υποστηρίζει δύο μεθόδους για την μέθοδο της συνεπαγωγής: `min(minimum)` και `prod(product)`.

3.7.4 Άθροιση των εξόδων

Η άθροιση (aggregation) των εξόδων είναι η διαδικασία του συνδυασμού όλων των ασαφών συνόλων που αντιπροσωπεύουν την έξοδο κάθε κανόνα, σε ένα και μόνο ασαφές σύνολο, ώστε να γίνει έπειτα η αποασαφοποίηση. Η άθροιση αυτή γίνεται μόνο μια φορά για κάθε κανόνα και δεν έχει σημασία η σειρά με την οποία γίνεται.

Τρεις ενσωματωμένες μέθοδοι υποστηρίζονται: `max(μέγιστο)`, `probor(από το probabistic)` και `sum(άθροιση της εξόδου από κάθε κανόνα)`.

3.7.5 Αποασαφοποίηση

Το τελευταίο μέρος ενός συστήματος ασαφούς λογικής είναι η αποασαφοποίηση (defuzzification) της ασαφούς εξόδου σε σαφή τιμή. Υπάρχουν διάφορες τε-

χνικές αποασαφοποίησης, αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει θεωρητική βάση για καμία από αυτές. Για τον έλεγχο των διαδικασιών, το βασικό κριτήριο επιλογής μιας κατάλληλης τεχνικής είναι η υπολογιστική απλότητα. Με βάση το κριτήριο της υπολογιστικής απλότητας έχουν προταθεί οι ακόλουθες τεχνικές:

1. Αποασαφοποίηση μεγίστου (maximum defuzzifier): επιλέγεται η τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο του συνόλου εξόδου με την μεγαλύτερη τιμή. Η μέθοδος δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ειδικά όταν υπάρχουν πολλαπλά τοπικά μέγιστα.
2. Αποασαφοποίηση με μέσο όρο των μεγίστων (mean of maximum-MOM defuzzifier): επιλέγεται ως τιμή ο μέσος όρος των τιμών των σημείων που παρουσιάζουν μέγιστο στο σύνολο εξόδου. Ορίζεται ως εξής (Yager and Zadeh, 1992):

$$z = \sum_{i=1}^L \frac{W_i}{L} \quad (3.12)$$

όπου W_i είναι η τιμή στην οποία η συνάρτηση συμμετοχής έχει τη μέγιστη τιμή και L το πλήθος των τιμών της γλωσσικής μεταβλητής. Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο ένα μέγιστο τότε η τεχνική αυτή είναι όμοια με την προηγούμενη. Αν όμως υπάρχει πλήθος τιμών με μέγιστη τιμή, τότε υπολογίζεται ο μέσος όρος κανονικά.

3. Αποασαφοποίηση κέντρου βάρους (center of gravity-COG defuzzifier): πρόκειται για την πιο πολύπλοκη υπολογιστικά μέθοδο, που επιλέγει σαν τιμή, την τιμή του σημείου που αποτελεί το κέντρο βάρους του σχήματος. Μπορεί να ορισθεί ως (Yager and Zadeh, 1992):

$$z = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_z(W_i) \cdot W_i}{\sum_{i=1}^N \mu_z(W_i)} \quad (3.13)$$

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι παρουσιάζει σχεδόν πάντα ομαλή συμπεριφορά ελέγχου. Η κύρια ιδέα της είναι να ληφθούν υπόψη οι κανόνες σύμφωνα με το βαθμό δυνατότητας εφαρμογής τους. Ένα μειονέκτημά της εί-

ναι ότι μπορεί με δυσκολία να δικαιολογηθεί σημασιολογικά. Επιπλέον, ο υπολογισμός της μπορεί να χρειαστεί περισσότερο χρόνο από απλούστερες μεθόδους (Kruse *et al.*, 1994). Η τεχνική αυτή δίνει θεωρητικά καλύτερα αποτελέσματα από τις άλλες.

3.8 Συνοπτική παρουσίαση του Fuzzy Toolbox της Matlab

Το Fuzzy Toolbox, είναι μια συλλογή λειτουργιών που στηρίζονται στο Matlab. Παρέχει τα εργαλεία για τη δημιουργία ασαφών συστημάτων συμπεράσματος στα πλαίσια του Matlab.

Υπάρχουν δύο τύποι ασαφών συστημάτων συμπεράσματος που μπορούν να αναπτυχθούν στο Fuzzy Toolbox: ο τύπος του Mamdani και ο τύπος του Sugeno. Αυτοί οι δύο τύποι συστημάτων συμπεράσματος διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό στον τρόπο που καθορίζονται τα αποτελέσματα.

Η ασαφής μέθοδος συμπεράσματος του Mamdani είναι η πιο συνηθισμένη. Η μέθοδος του Mamdani ήταν μεταξύ των πρώτων συστημάτων ελέγχου που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας την ασαφή θεωρία. Προτάθηκε το 1975 από τον Ebrahim Mamdani σαν μια προσπάθεια να ελεγχθεί ένας συνδυασμός μηχανών και λεβήτων ατμού, συνθέτοντας ένα σύνολο κανόνων ελέγχου που λαμβάνονται από πεπειραμένους χειριστές. Η προσπάθεια του Mamdani βασίστηκε σε μια εργασία του Lotfi Zadeh το 1973 για τους ασαφείς αλγόριθμους, για τα σύνθετα συστήματα και τις διαδικασίες απόφασης. Το συμπέρασμα του τύπου του Mamdani, αναμένει τις συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου να είναι ασαφή σύνολα. Μετά από τη διαδικασία της συνάθροισης, υπάρχει ένα ασαφή σύνολο για κάθε μεταβλητή εξόδου που χρειάζεται αποασαφοποίηση. Τα συστήματα τύπου Sugeno, χρησιμοποιούνται όταν οι συναρτήσεις συμμετοχής στην έξοδο του συστήματος είναι είτε γραμμικές, είτε σταθερές.

Το Fuzzy Toolbox της Matlab χρησιμοποιεί πέντε βασικά εργαλεία γραφικής διεπαφής με τον χρήστη (Graphical User Interface-GUI) για να δημιουργεί, να αλλάζει και να απεικονίζει τα ασαφή συστήματα: το Σύστημα Ασαφούς Συνεπαγωγής (Fuzzy Inference System-FIS Editor), τον Συντάκτη Συναρτήσεων Συμμετοχής (Membership Function Editor), τον Συντάκτη Κανόνων (Rule Editor), την Επισκόπηση Κανόνων (Rule Viewer) και την Επισκόπηση Επιφανειών (Surface Viewer).

- Ο FIS Editor χειρίζεται τις υψηλού επιπέδου αποφάσεις του συστήματος: όπως τον αριθμό των μεταβλητών εισόδου και εξόδου, την ονομασία τους, κτλ.
- Ο Membership Function Editor χρησιμοποιείται για να καθορισθούν οι μορφές όλων των συναρτήσεων συμμετοχής που σχετίζονται με κάθε μεταβλητή.
- Ο Rule Editor είναι για να δημιουργεί και να μετατρέπει τον κατάλογο των κανόνων που καθορίζουν το σύστημα.

Τα δύο τελευταία GUI δεν χρησιμοποιούνται άμεσα για τον καθορισμό ή την μετατροπή των συστατικών ενός ασαφούς συστήματος. Απεικονίζουν παραστατικά την δομή και λειτουργία του ασαφούς συστήματος και διευκολύνουν τον χρήστη να προβεί σε διορθώσεις–βελτιώσεις του συστήματος.

- Ο Rule Viewer είναι μια, βασισμένη στο Matlab, παρουσίαση ενός διαγράμματος ασαφούς συνεπαγωγής. Δείχνει ποιοι κανόνες είναι ενεργοποιημένοι (για συγκεκριμένες τιμές εισόδου) ή πως η μορφή της κάθε συνάρτησης συμμετοχής επηρεάζει τα αποτελέσματα.
- Το τελευταίο εργαλείο του Fuzzy Toolbox είναι ο Surface Viewer. Δείχνει πως η έξοδος εξαρτάται από μια είσοδο ή από δύο εισόδους.

Οι πέντε αυτοί μηχανισμοί GUI ανταλλάσσουν πληροφορίες. Για κάθε ασαφές σύστημα, ένας ή και όλοι μπορεί να είναι ανοιχτοί. Εάν περισσότεροι από ένας από αυτούς τους μηχανισμούς είναι ανοιχτοί, οι υπόλοιποι αναγνωρίζουν την ύπαρξη των άλλων και ανανεώνουν αν χρειάζεται τα σχετικά παράθυρα. Για παράδειγμα, αν αλλάξουν τα ονόματα των συναρτήσεων συμμετοχής στον Membership Function Editor, αυτές οι αλλαγές φαίνονται στον Rule Editor ή αν αλλάξει ένας κανόνας φαίνεται η αλλαγή της επιφάνειας εξόδου.

Επίσης, οι FIS Editor, Membership Function Editor και Rule Editor μπορούν όχι μόνο να διαβάζουν αλλά και να επιφέρουν αλλαγές στα δεδομένα του συστήματος, ενώ οι Rule Viewer και Surface Viewer δεν έχουν αυτή τη δυνατότητα.

Κεφάλαιο 4

Ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αξιολόγηση στοιχείων γεωτρήσεων με βάση την ασαφή λογική

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την αξιολόγηση στοιχείων γεωτρήσεων με βάση την ασαφή λογική. Παρουσιάζεται αναλυτικά το έμπειρο ασαφές σύστημα (FIS) που αναπτύχθηκε στο Fuzzy Toolbox της Matlab και αναλύεται η διαδικασία εκπαίδευσής του, που βασίζεται στην υπάρχουσα γνώση και εμπειρία από τις εκμεταλλεύσεις των λιγνιτικών κοιτασμάτων.

4.1 Ανάπτυξη του έμπειρου ασαφούς συστήματος για την αξιολόγηση των λιγνιτικών γεωτρήσεων

Όπως έχει προαναφερθεί, με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης, για να χαρακτηριστεί ένα λιγνιτικό στρώμα απολήψιμο, πρέπει να έχει πάχος μεγαλύτερο του ελάχιστου πάχους εκλεκτικής εξόρυξης (συνήθως 50cm για υπαίθρια εκμετάλλευση με καδοφόρους εκσκαφείς) και τέφρα επί ξηρού μικρότερη της ανώτερης επιτρεπόμενης (συνήθως 50%) (Αναστόπουλος και Κούκουζας, 1972). Όταν το πάχος είναι μεγαλύτερο του ορίου και το ποσοστό της περιεχόμενης τέφρας μικρότερη του ορίου, τότε το στρώμα χαρακτηρίζεται εκμεταλλεύσιμο. Αυτό όμως στην πράξη είναι αδύνατον να τηρηθεί, γιατί εμπλέκονται και άλλοι παράγοντες κατά την διαδικασία της εξόρυξης ενός λιγνιτικού στρώματος, όπως ο υποκειμενισμός και η εμπειρία του χειριστή, οι καιρικές συνθήκες και η πίεση για αυξημένη παραγωγή, οι οποίοι στην κλασσική μέθοδο αξιολόγησης θεωρούνται ευνοϊκοί και δεν λαμβάνονται υπόψη.

Είναι γνωστό όμως, ότι απαραίτητη προϋπόθεση για την σωστή εξόρυξη ενός λιγνιτικού στρώματος είναι η πλαισίωση της εκμετάλλευσης με κατάλληλο και έμπειρο προσωπικό, έτσι ώστε η εξόρυξη να γίνεται με τέτοιο τρόπο που να μην υποβαθμίζεται η ποιότητά του λόγω συνεξόρυξης αγόνων στρωμάτων.

Επιπλέον, ο στόχος της παραγωγής, δηλαδή αν υπάρχει πίεση ή όχι για την εξασφάλιση της απαιτούμενης ποσότητας λιγνίτη, καθώς και οι συνθήκες εργασίας στα μέτωπα (μεγάλο ύψος μετώπων, καιρικές συνθήκες, ιδιόμορφη τεκτονική του κοιτάσματος, κ.ά.) καθιστούν πολλές φορές δύσκολη μακροσκοπικά, τη διάκριση ανάμεσα σε ένα λιγνιτικό στρώμα και σε μια ισχυρά αργιλομαργαϊκή ένστρωση και επιδρούν στην απόφαση για την εκλεκτική εξόρυξη ή όχι ενός λιγνιτικού στρώματος.

Με βάση τα παραπάνω το FIS που δημιουργήθηκε για την αξιολόγηση των λιγνιτικών γεωτρήσεων, αποτελείται από πέντε εισόδους και μια έξοδο, οι οποίες χρησιμοποιούν διάφορες συναρτήσεις συμμετοχής για να αποδώσουν το βαθμό συμμετοχής τους.

Οι δύο πρώτες εισοδοί του FIS σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του κοιτάσματος, ενώ οι υπόλοιπες τρεις με τη διαδικασία της εξόρυξης. Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες εισοδοί, γιατί είναι βασικές παράμετροι που επιδρούν καθοριστικά στην απόφαση απόληψης ή μη ενός λιγνιτικού στρώματος κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης.

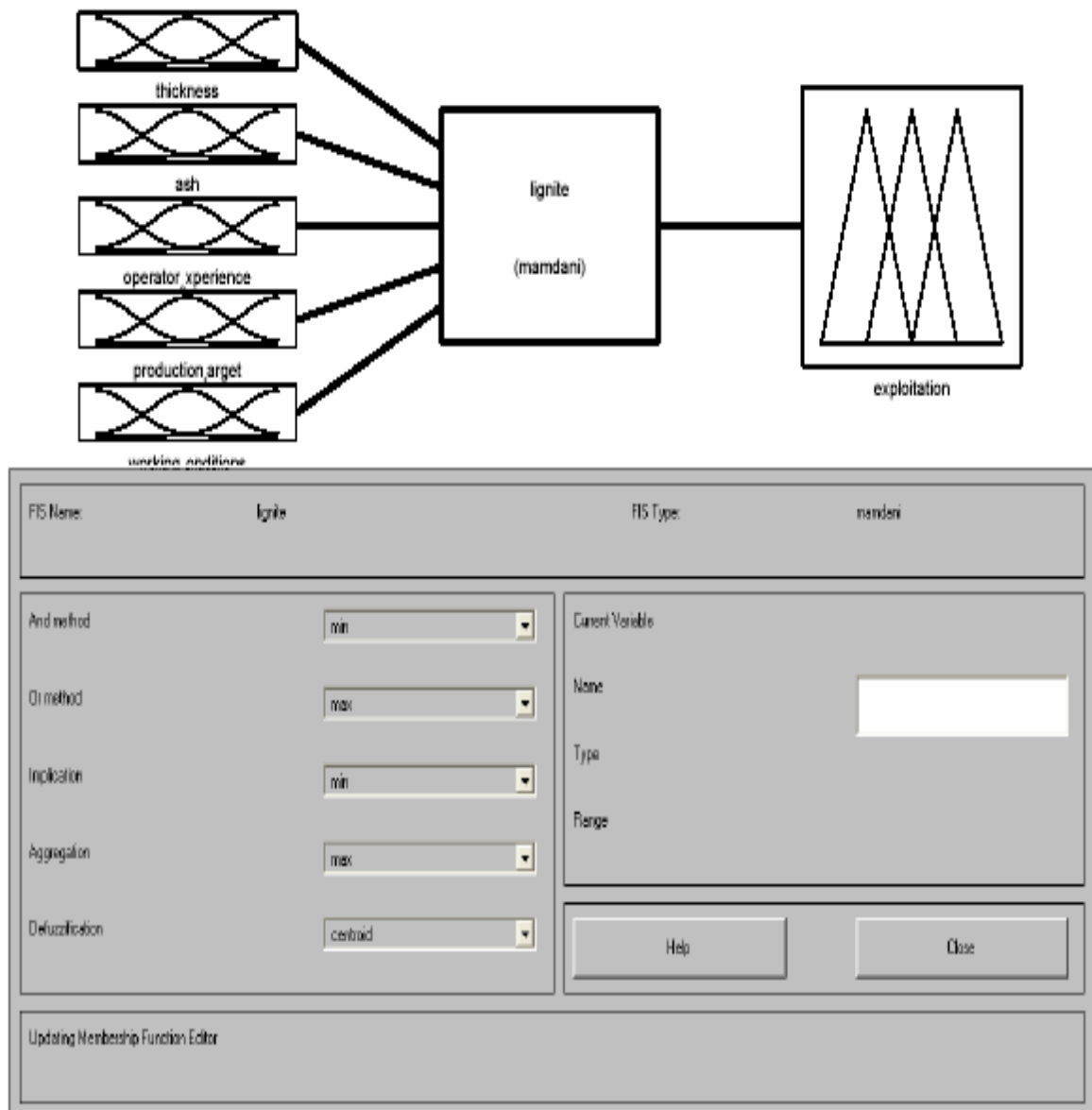
Οι πέντε εισοδοί του συστήματος που επιλέχθηκαν μετά από μελέτη-ανάλυση της διαδικασίας εξόρυξης των λιγνιτικών κοιτασμάτων είναι οι εξής:

- Το *πάχος* των λιγνιτικών κοιτασμάτων. Στο σύστημα αναφέρεται ως *thickness*.
- Η *τέφρα* των λιγνιτικών κοιτασμάτων. Στο σύστημα αναφέρεται ως *ash*.
- Η *εμπειρία του χειριστή*. Στο σύστημα αναφέρεται ως *operator_experience*.
- Ο *στόχος της παραγωγής*. Στο σύστημα αναφέρεται ως *production_target*.
- Οι *συνθήκες εργασίας*. Στο σύστημα αναφέρονται ως *working_conditions*.

Και η έξοδος είναι:

- Η *αποληψιμότητα* των λιγνιτικών κοιτασμάτων. Στο σύστημα αναφέρεται ως *exploitation*. Η έξοδος του συστήματος χαρακτηρίζει ένα λιγνιτικό στρώμα ως απολήψιμο με ένα αριθμό από 0 έως 1. Ο αριθμός αυτός εκφράζει την πιθανότητα απόληψης του λιγνιτικού στρώματος. Όσο πλησιέστερα στην τιμή 1 είναι η τιμή της αποληψιμότητας, τόσο πιθανότερη είναι η απόληψη του λιγνιτικού κοιτάσματος. Η πιθανότητα αυτή στο FIS λαμβάνει όλες τις πιθανές τιμές στο διάστημα [0,1], ενώ με την παραδοσιακή μεθοδολογία, λαμβάνει τις τιμές 0 για μη απολήψιμο λιγνιτικό στρώμα και 1 για απολήψιμο.

Στο σχήμα 4.1 δίνεται παραστατικά το έμπειρο ασαφές σύστημα που δημιουργήθηκε με τις πέντε εισόδους του και την μια έξοδο:



Σχήμα 4.1: Το έμπειρο ασαφές σύστημα με τις πέντε εισόδους του και την μια έξοδο.

Οι παράμετροι του FIS όσον αφορά τους κανόνες συνεπαγωγής, άθροισης και αποασαφοποίησης, είναι:

- για το αποτέλεσμα της λογικής πράξης ΚΑΙ (AND) έχει επιλεγεί η μικρότερη (min) από τις τιμές που συνδέει.

- για το αποτέλεσμα της λογικής πράξης Ή (OR) έχει επιλεγεί η μεγαλύτερη (max) από τις τιμές που συνδέει.
- για την πράξη της ασαφούς συνεπαγωγής (implication) έχει επιλεγεί η μικρότερη τιμή (min).
- για την πράξη της ασαφούς άθροισης (aggregation) έχει επιλεγεί η μεγαλύτερη τιμή (max).
- για την αποασαφοποίηση (defuzzification), δηλαδή τη διαδικασία εξαγωγής της τιμής εξόδου, έχει επιλεγεί η πιο διαδεδομένη μέθοδος: η κεντροβαρική (The center of area method).

Για τη δημιουργία του ασαφούς συστήματος συμπεράσματος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1, χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του Mamdani.

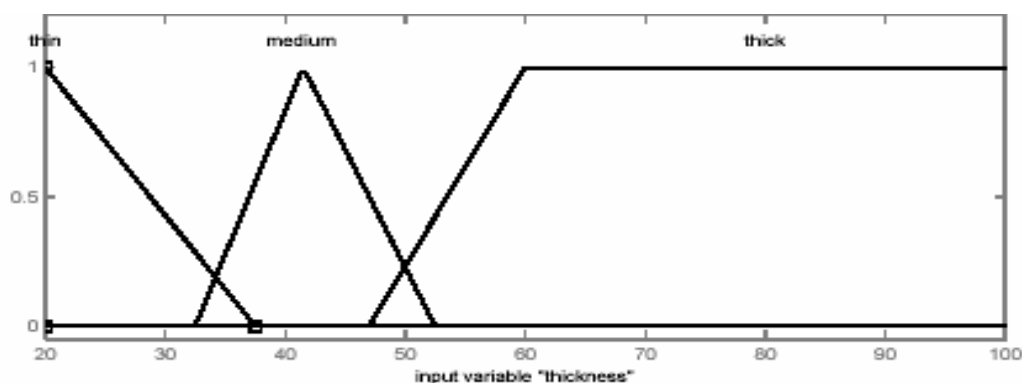
Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των εισόδων και της εξόδου του συστήματος:

Πάχος:

Για την είσοδο thickness, η οποία αναφέρεται στο πάχος των λιγνιτικών κοιτασμάτων, εξετάστηκαν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [20 100]. Για λιγνιτικά στρώματα με πάχος $> 100\text{cm}$ δεν υπάρχουν δυσκολίες εξόρυξης, ενώ για πάχος $< 20\text{cm}$ η εξόρυξή τους με καδοφόρους εκσκαφείς θεωρείται αδύνατη. Το διάστημα παχών 20-100cm χωρίστηκε σε τρία υποδιαστήματα με τον λεκτικό χαρακτηρισμό λεπτό, μεσαίο, μεγάλο. Ο χωρισμός στα υποδιαστήματα αυτά έγινε με βάση την επικρατούσα αντίληψη περί του πάχους του στρώματος, από το προσωπικό που εμπλέκεται στις διαδικασίες παραγωγής και ποιοτικού ελέγχου του κοιτάσματος. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις συναρτήσεις συμμετοχής (thin, medium, thick), εκ των οποίων οι δύο είναι τραπεζοειδείς και η μια τριγωνική, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2. Οι τραπεζοειδείς συναρτήσεις χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραπεζίου, ενώ η τριγωνική χαρακτηρίζεται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου. Έτσι το πάχος χαρακτηρίζεται ως thin (λεπτό), medium (μεσαίο), thick (μεγάλο).

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων είναι οι:

- thin [20 20 20 37,5]
- medium [32,5 41,5 52,5]
- thick [47 60 100 100]



Σχήμα 4.2: Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή thickness.

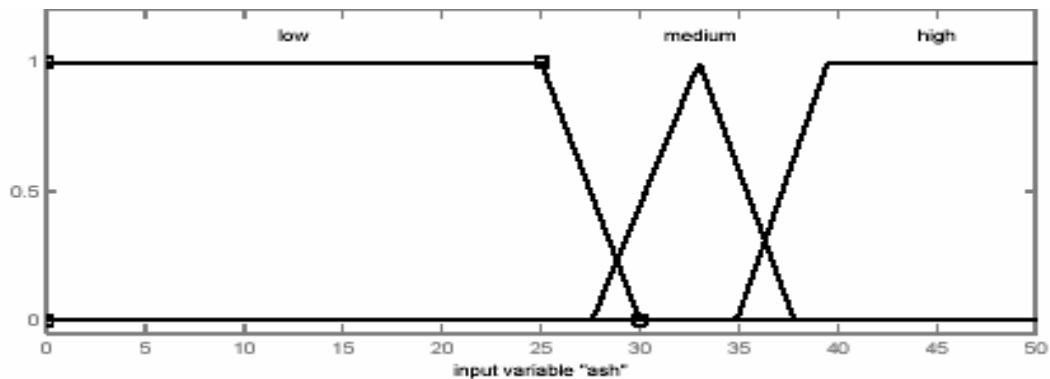
Στο σχήμα 4.2 στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές του πάχους του λιγνιτικού στρώματος και στον κάθετο άξονα ο βαθμός συμμετοχής κάθε τιμής. Έτσι σε κάθε τιμή του πάχους, αποδίδονται ένας ή περισσότεροι βαθμοί συμμετοχής, μεταξύ 0 και 1. Με αυτόν τον τρόπο αντιστοιχούμε τα αριθμητικά δεδομένα του πάχους σε ασαφείς αριθμούς. Για παράδειγμα για πάχος 50 cm, το λιγνιτικό στρώμα χαρακτηρίζεται ως μεσαίο (medium) με συντελεστή συμμετοχής 0,3 και ως μεγάλο (thick) με συντελεστή συμμετοχής πάλι 0,3.

Τέφρα:

Για την είσοδο ash, η οποία αναφέρεται στην περιεχόμενη τέφρα των λιγνιτικών κοιτασμάτων, εξετάστηκαν οι τιμές που κυμαίνονται στο διάστημα [0 50]. Το 50% περιεχόμενη τέφρα, θεωρείται το ανώτερο επιτρεπόμενο όριο. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις συναρτήσεις συμμετοχής (low, medium, high), εκ των οποίων οι δύο είναι τραπεζοειδείς και η μια τριγωνική, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3. Οι τραπεζοειδείς συναρτήσεις χαρακτηρίζονται από τέσσερις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και τις κορυφές του αντίστοιχου τραpezίου, ενώ η τριγωνική χαρακτηρίζεται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου. Έτσι η τέφρα χαρακτηρίζεται ως low (χαμηλή), medium (μεσαία), high (υψηλή).

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων είναι οι:

- low [0 0 25 30]
- medium [27,6 33 37,8]
- high [34,9 39,5 50 50]



Σχήμα 4.3: Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή ash.

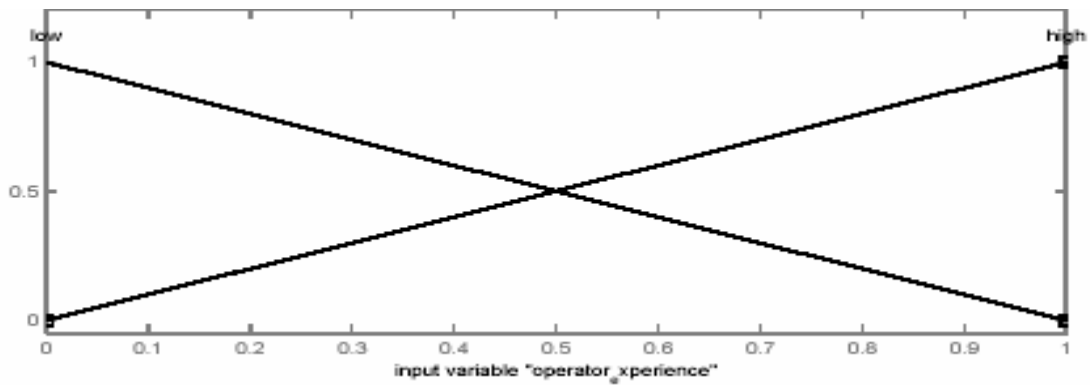
Από το σχήμα 4.3 παρατηρείται ότι, όταν η περιεχόμενη τέφρα είναι ίση με 37%, χαρακτηρίζεται ως μεσαία (medium) με συντελεστή συμμετοχής 0,4 και ως υψηλή (high) με συντελεστή συμμετοχής πάλι 0,4.

Εμπειρία του χειριστή:

Η είσοδος operator_experience, αναφέρεται στην εμπειρία του χειριστή. Θεωρήθηκε ότι οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα [0 1] και χρησιμοποιήθηκαν δύο συναρτήσεις συμμετοχής (low, high) και οι δύο τριγωνικές, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4. Οι συναρτήσεις αυτές χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου. Έτσι η εμπειρία του χειριστή χαρακτηρίζεται ως low (χαμηλή) ή high (υψηλή).

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων είναι οι:

- low [0 0 1]
- high [0 1 1]



Σχήμα 4.4: Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή operator_experience.

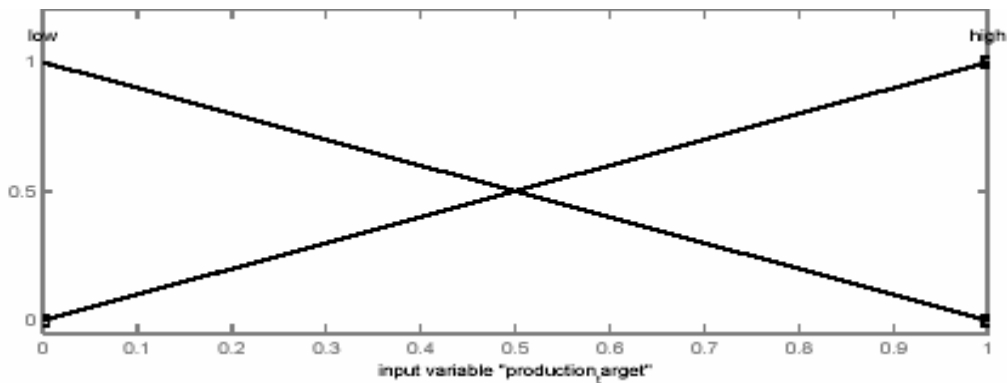
Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι όταν η εμπειρία του χειριστή είναι ίση με 0,8, χαρακτηρίζεται ως χαμηλή (low) με συντελεστή συμμετοχής 0,2 και ως υψηλή (high) με συντελεστή συμμετοχής 0,8.

Στόχος της παραγωγής:

Για την είσοδο production_target, η οποία αναφέρεται στον στόχο της παραγωγής, θεωρήθηκε ότι όλες οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα [0 1]. Χρησιμοποιήθηκαν δύο συναρτήσεις συμμετοχής (low, high) και οι δύο τριγωνικές, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.5. Οι συναρτήσεις αυτές χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου. Έτσι ο στόχος της παραγωγής χαρακτηρίζεται ως low (χαμηλός) ή high (υψηλός).

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων είναι οι:

- low [0 0 1]
- high [0 1 1]



Σχήμα 4.5: Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή production_target.

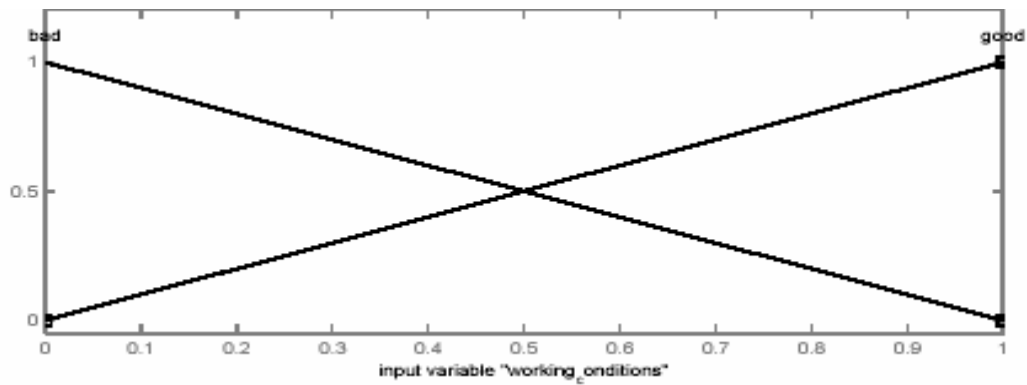
Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι όταν ο στόχος της παραγωγής είναι ίσος με 0,4, χαρακτηρίζεται ως χαμηλός (low) με συντελεστή συμμετοχής 0,6 και ως υψηλός (high) με συντελεστή συμμετοχής 0,4.

Συνθήκες εργασίας:

Για την είσοδο working_conditions, η οποία αναφέρεται στις συνθήκες εργασίας, θεωρήθηκε ότι όλες οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται στο διάστημα [0 1]. Χρησιμοποιήθηκαν δύο συναρτήσεις συμμετοχής (bad, good) και οι δύο τριγωνικές, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.6. Οι συναρτήσεις αυτές χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου. Έτσι οι συνθήκες εργασίας χαρακτηρίζονται ως bad (δυσμενείς) ή good (ευνοϊκές).

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων είναι οι:

- bad [0 0 1]
- good [0 1 1]



Σχήμα 4.6: Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή `working_conditions`.

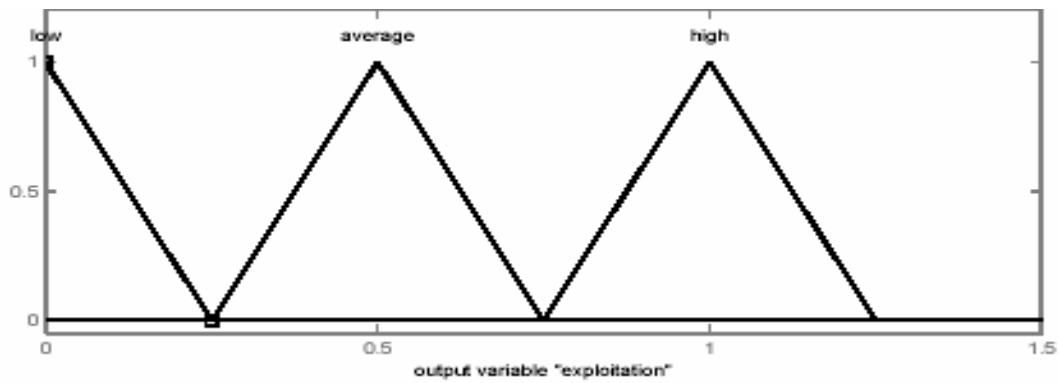
Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι όταν οι συνθήκες εργασίας είναι ίσες με 0,5, χαρακτηρίζονται ως δυσμενείς (`bad`) με συντελεστή συμμετοχής 0,5 και ως ευνοϊκές (`good`) με συντελεστή συμμετοχής πάλι 0,5.

Αποληψιμότητα:

Η έξοδος `exploitation` του συστήματος, αναφέρεται στο αν ένα λιγνιτικό κοιτάσμα είναι απολήψιμο ή όχι και λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0, 1,25]$. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις συναρτήσεις συμμετοχής (`low`, `average`, `high`) όλες τριγωνικές, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.7. Οι συναρτήσεις αυτές χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς που δείχνουν τα όρια και την κορυφή του αντίστοιχου τριγώνου. Έτσι η αποληψιμότητα χαρακτηρίζεται ως `low` (χαμηλή), `average` (μεσαία), `high` (υψηλή).

Οι τιμές αυτών των συναρτήσεων είναι οι:

- `low` $[-0,1 \ -0,001 \ 0,25]$
- `average` $[0,25 \ 0,5 \ 0,75]$
- `high` $[0,75 \ 1 \ 1,25]$

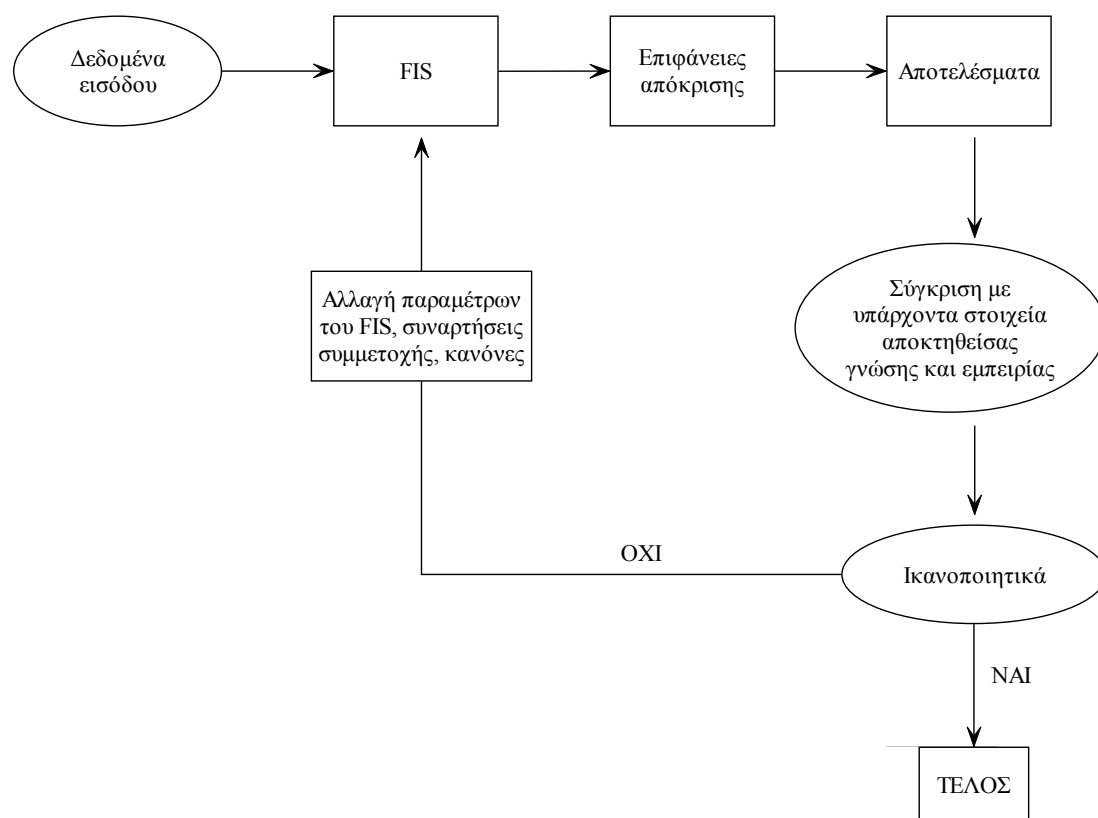


Σχήμα 4.7: Συναρτήσεις συμμετοχής για την μεταβλητή exploitation.

Από το σχήμα 4.7, παρατηρείται ότι η κορυφή του κάθε τριγώνου εκφράζει με την σειρά που φαίνονται παραπάνω, την χαμηλή, την μεσαία και την υψηλή αποληψιμότητα ενός λιγνιτικού στρώματος αντίστοιχα. Το κέντρο κάθε τριγώνου έχει καθοριστεί στις τιμές 0 για low, 0,5 για average και 1,0 για high. Η παραπάνω μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής της μεταβλητής exploitation υπαγορεύτηκε από την επιλεγείσα μέθοδο αποασαφοποίησης που είναι η κεντροβαρική. Έτσι για $\mu=1,0$ η μέγιστη τιμή της exploitation είναι 1,0. Η τιμή της exploitation όπως έχει καθοριστεί λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$, όπως οφείλει, αφού έχει οριστεί ως πιθανότητα απόληψης του λιγνιτικού στρώματος.

4.2 Εκπαίδευση του έμπειρου ασαφούς συστήματος

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται η εκπαίδευση του έμπειρου ασαφούς συστήματος:



Σχήμα 4.8: Εκπαίδευση του έμπειρου ασαφούς συστήματος.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8, τα δεδομένα εισόδου εισέρχονται στο έμπειρο ασαφές σύστημα και δημιουργούνται οι επιφάνειες απόκρισης, από τις οποίες προκύπτουν τα αποτελέσματα για την αποληψιμότητα ενός λιγνιτικού στρώματος. Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με υπάρχοντα στοιχεία εκμετάλλευσης και αν είναι ικανοποιητικά τελειώνει η διαδικασία αξιολόγησης. Αν δεν είναι ικανοποιητικά, γίνονται αλλαγές στις παραμέτρους του FIS, στις συναρτήσεις συμμετοχής και στους κανόνες και δημιουργείται ένα νέο FIS.

Όπως έχει προαναφερθεί, οι κανόνες είναι μια λίστα από προτάσεις οι οποίες συνδέουν το σύνολο των εισαγόμενων δεδομένων με τα αποτελέσματα. Είναι εκφρασμένοι σε σχέσεις της μορφής *EAN ...TOTE...* και αναφέρονται σε γλωσσικές μεταβλητές. Οι κανόνες είναι αυτοί που καθορίζουν την ακρίβεια των αποτελε-

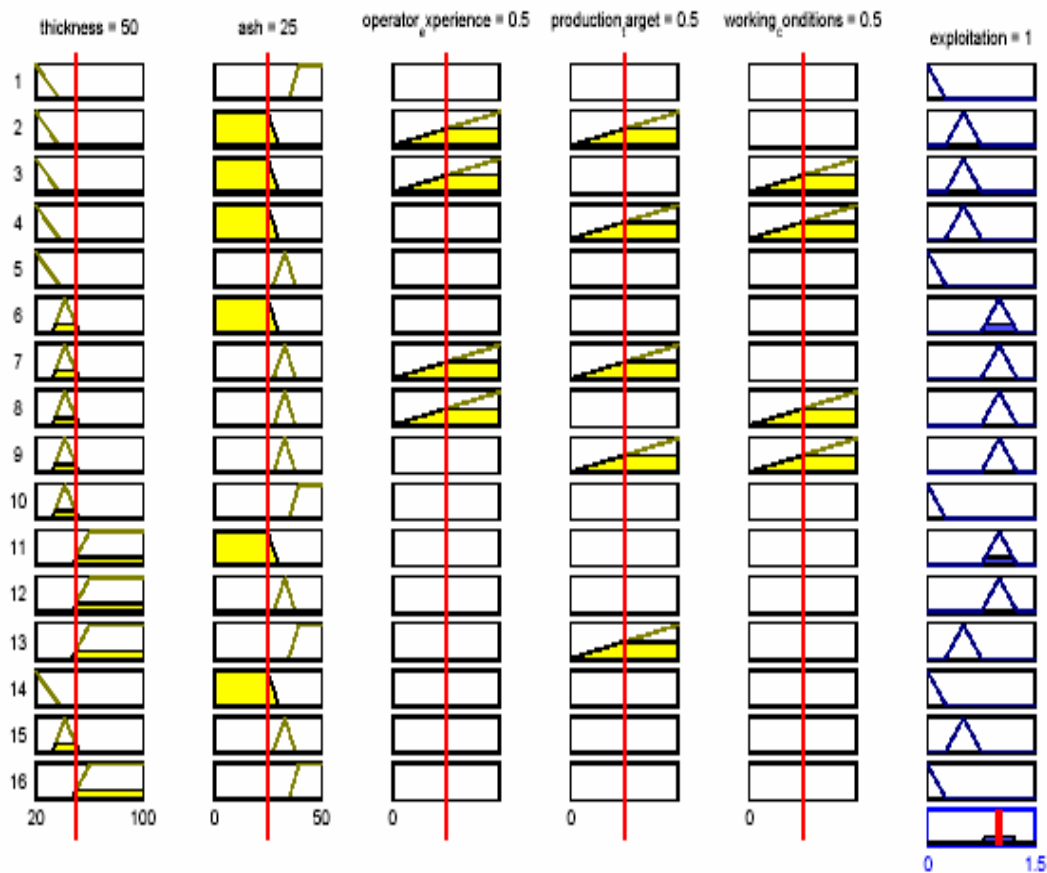
σμάτων και την αξιοπιστία του συστήματος.

Για το έμπειρο ασαφές σύστημα που αναπτύχθηκε, το οποίο αποτελείται από πέντε εισόδους με τρεις, τρεις, δύο, δύο και δύο συναρτήσεις συμμετοχής για την καθεμία, με τη σειρά που αναφέρονται παραπάνω, οι κανόνες που θα κάλυπταν όλες τις περιπτώσεις είναι 72 στον αριθμό ($3*3*2*2*2$). Από αυτόν τον αριθμό αφαιρέθηκαν εκείνοι που λόγω της φυσικής σημασίας των μεγεθών δεν ανταποκρίνονται σε υπαρκτές περιπτώσεις. Μετά από συνεχείς δοκιμές του συστήματος και λαμβάνοντας υπόψη τις γνώσεις από συστήματα εξόρυξης, οι κανόνες που επιλέχθηκαν είναι οι ακόλουθοι 16:

1. Εάν *thickness* είναι thin και *ash* είναι high, τότε *exploitation* είναι low.
Για παράδειγμα, εάν το πάχος ενός λιγνιτικού στρώματος είναι 20cm (λεπτό) και η περιεχόμενη τέφρα του είναι 40% (υψηλή), τότε η αποληψιμότητα είναι 0,1 (χαμηλή).
2. Εάν *thickness* είναι thin και *ash* είναι low και *operator experience* είναι high και *production target* είναι high, τότε *exploitation* είναι average.
3. Εάν *thickness* είναι thin και *ash* είναι low και *operator experience* είναι high και *working conditions* είναι good, τότε *exploitation* είναι average.
4. Εάν *thickness* είναι thin και *ash* είναι low και *production target* είναι high και *working conditions* είναι good, τότε *exploitation* είναι average.
5. Εάν *thickness* είναι thin και *ash* είναι medium, τότε *exploitation* είναι low.
6. Εάν *thickness* είναι medium και *ash* είναι low, τότε *exploitation* είναι high.
7. Εάν *thickness* είναι medium και *ash* είναι medium και *operator experience* είναι high και *production target* είναι high, τότε *exploitation* είναι high.
8. Εάν *thickness* είναι medium και *ash* είναι medium και *operator experience* είναι high και *working conditions* είναι good, τότε *exploitation* είναι high.
9. Εάν *thickness* είναι medium και *ash* είναι medium και *production target* είναι high και *working conditions* είναι good, τότε *exploitation* είναι high.
10. Εάν *thickness* είναι medium και *ash* είναι high, τότε *exploitation* είναι low.
11. Εάν *thickness* είναι thick και *ash* είναι low, τότε *exploitation* είναι high.
12. Εάν *thickness* είναι thick και *ash* είναι medium, τότε *exploitation* είναι high.
13. Εάν *thickness* είναι thick και *ash* είναι high και *production target* είναι high, τότε *exploitation* είναι average.
14. Εάν *thickness* είναι thin και *ash* είναι low, τότε *exploitation* είναι low.

15. Εάν *thickness* είναι medium και *ash* είναι medium, τότε *exploitation* είναι average.
16. Εάν *thickness* είναι thick και *ash* είναι high, τότε *exploitation* είναι low.

Στο σχήμα 4.9, παρουσιάζεται το διάγραμμα της ασαφούς συνεπαγωγής. Δείχνει ποιοι κανόνες είναι ενεργοποιημένοι (για συγκεκριμένες τιμές των δεδομένων εισόδου) ή πως η μορφή της κάθε συνάρτησης συμμετοχής επηρεάζει τα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ασαφούς συνεπαγωγής.

- Κάθε γραμμή του διαγράμματος αντιπροσωπεύει έναν κανόνα (εδώ υπάρχουν 16).
- Το κίτρινο χρώμα δείχνει πως η μεταβλητή εισόδου χρησιμοποιείται στους κανόνες, ενώ το μπλε χρώμα δείχνει πως η μεταβλητή εξόδου χρησιμοποιείται στους κανόνες.

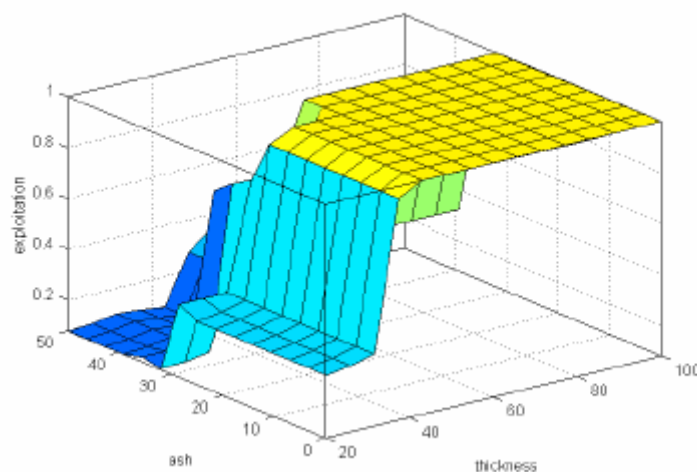
- Σε κάθε κανόνα εφαρμόζεται η μέθοδος της συνεπαγωγής, στη συνέχεια η άθροιση των εξόδων (στο παραπάνω σχήμα είναι το τελευταίο ορθογώνιο της έκτης στήλης) και τέλος η μέθοδος της αποασαφοποίησης, όπου εξάγεται το τελικό αποτέλεσμα (η αποασαφοποιημένη τιμή εξόδου παρουσιάζεται με την έντονη κόκκινη γραμμή στο ορθογώνιο της άθροισης).

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα για πάχος λιγνιτικού στρώματος ίσο με 50cm, για περιεχόμενη τέφρα ίση με 25%, για εμπειρία χειριστή ίση με 0,5, για στόχο παραγωγής ίσο με 0,5 και για συνθήκες εργασίας ίσες με 0,5, η αποληψιμότητα είναι ίση με 1.

4.3 Επιφάνειες Απόκρισης

Ένα από τα εργαλεία του Fuzzy Toolbox της Matlab, ο surface viewer, έχει τη δυνατότητα να κατασκευάζει τις επιφάνειες απόκρισης του συστήματος ανά δύο εισόδους σε σχέση με την έξοδο του FIS. Δείχνει παραστατικά υπό μορφή ισοτίμων καμπυλών πως η έξοδος εξαρτάται από κάθε μια είσοδο ή από δύο εισόδους ταυτόχρονα.

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες επιφάνειες απόκρισης ανά δύο εισόδους σε σχέση με την έξοδο, που είναι πάντα η αποληψιμότητα.

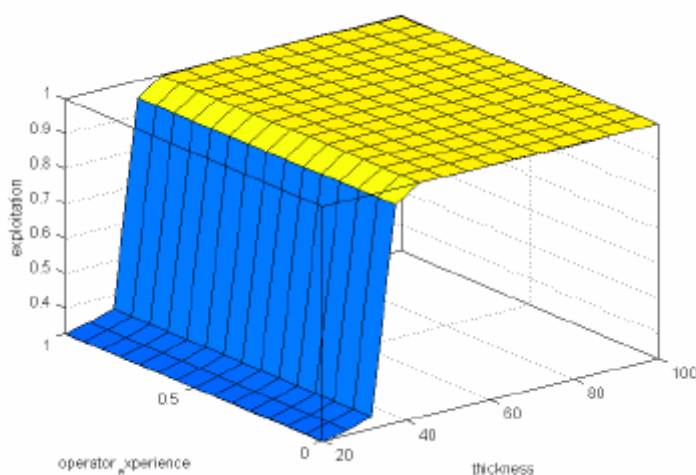


Σχήμα 4.10: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και την περιεκτικότητα σε τέφρα.

Το σχήμα 4.10 είναι μια τρισδιάστατη επιφάνεια που συνδέει τις εισόδους του πάχους και της τέφρας με την έξοδο, την αποληψιμότητα. Οι τιμές των υπολοίπων

παραμέτρων είναι ίσες με 0,5. Το σκούρο μπλε χρώμα αντιπροσωπεύει τις μικρές τιμές της αποληψιμότητας, ενώ το κίτρινο τις μεγάλες. Τα άλλα χρώματα αντιπροσωπεύουν τις ενδιάμεσες τιμές της. Παρατηρούμε ότι, όσο αυξάνεται το πάχος και ελαττώνεται η περιεχόμενη τέφρα ενός λιγνιτικού στρώματος, μεταβάλλονται τα χρώματα και η αποληψιμότητα αυξάνεται σταδιακά προσεγγίζοντας το κίτρινο χρώμα, των υψηλών τιμών αποληψιμότητας. Για παράδειγμα, για πάχος λιγνιτικού στρώματος 20 cm (λεπτό) και τέφρα 50% (υψηλή), η αποληψιμότητα έχει την μικρότερη τιμή της (το μηδέν), ενώ για πάχος 100cm (μεγάλο) και τέφρα 10% (χαμηλή), η αποληψιμότητα παίρνει την μέγιστη τιμή της (τη μονάδα).

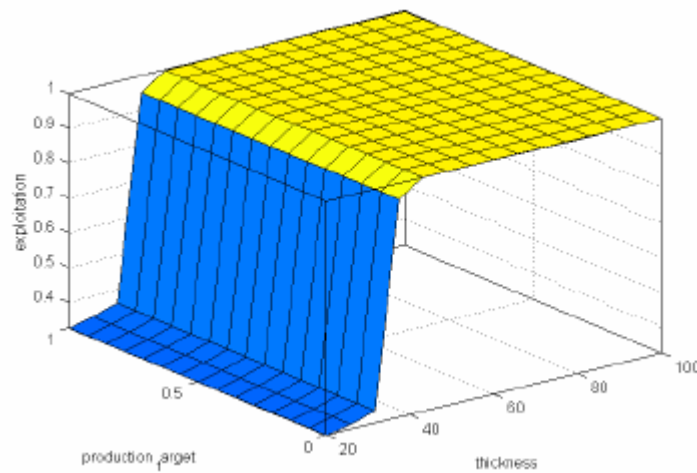
Στο σχήμα 4.11 παριστάνεται η επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και την εμπειρία του χειριστή. Η περιεκτικότητα σε τέφρα είναι ίση με 25% και οι συνθήκες εργασίας και ο στόχος της παραγωγής είναι ίσοι με 0,5. Είναι φανερό ότι, όσο αυξάνεται η εμπειρία του χειριστή, αυξάνεται και η αποληψιμότητα του λιγνιτικού στρώματος.



Σχήμα 4.11: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και την εμπειρία του χειριστή.

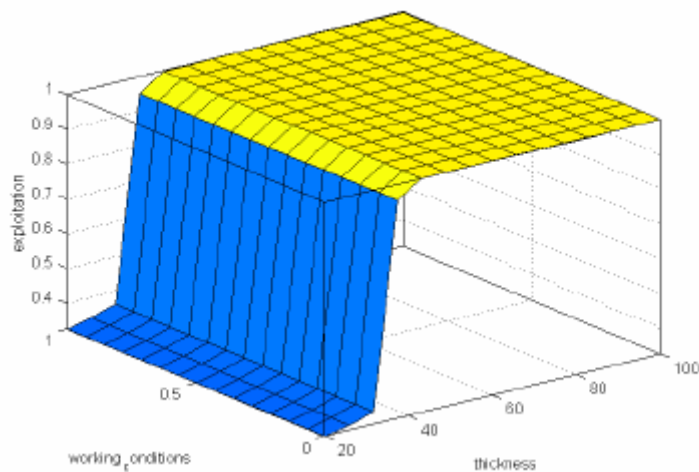
Στο σχήμα, 4.12, παριστάνεται η επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τον στόχο της παραγωγής. Η περιεκτικότητα σε τέφρα είναι ίση με 25% και οι συνθήκες εργασίας και η εμπειρία του χειριστή είναι ίσες με 0,5. Παρατηρείται ότι στα λεπτά κυρίως στρώματα (με πάχη από 20cm έως 30cm περίπου), ο στόχος της παραγωγής επηρεάζει πολύ την αποληψιμότητα. Έτσι, όταν παίρνει τιμές κοντά στο

μηδέν, η αποληψιμότητα είναι φτωχή, ενώ όταν παίρνει την μέγιστη τιμή του (τη μονάδα), η αποληψιμότητα είναι μεσαία.



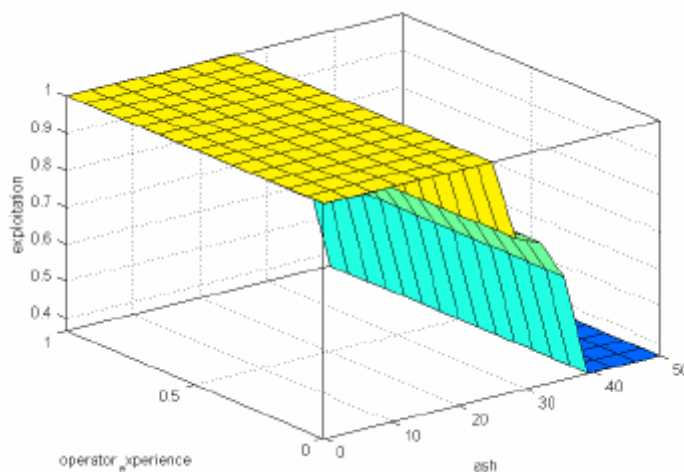
Σχήμα 4.12: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τον στόχο της παραγωγής.

Στο σχήμα 4.13, παριστάνεται η επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τις συνθήκες εργασίας. Η περιεκτικότητα σε τέφρα είναι ίση με 25%, ενώ η εμπειρία του χειριστή και ο στόχος της παραγωγής είναι ίσοι με 0,5. Όσο οι συνθήκες εργασίας γίνονται πιο ευνοϊκές, αυξάνεται η αποληψιμότητα του λιγνιτικού στρώματος.



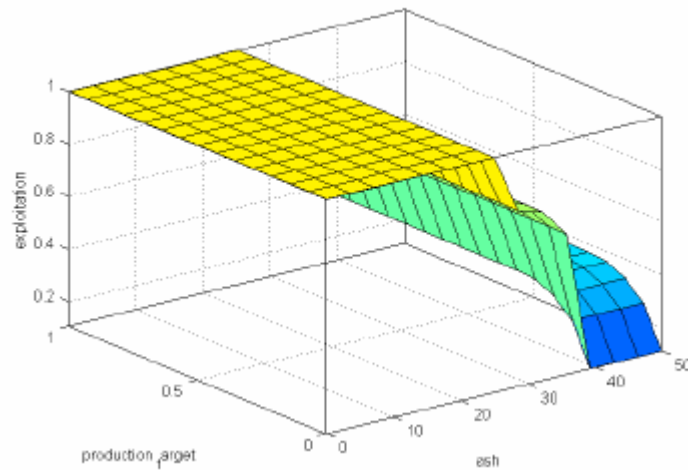
Σχήμα 4.13: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τις συνθήκες εργασίας.

Το σχήμα 4.14, παριστάνει την επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και την εμπειρία του χειριστή. Το πάχος είναι ίσο με 50cm, ενώ ο στόχος της παραγωγής και οι συνθήκες εργασίας είναι ίσοι με 0,5. Όταν η περιεχόμενη τέφρα είναι χαμηλή, η εμπειρία του χειριστή δεν επηρεάζει πολύ την αποληψιμότητα.



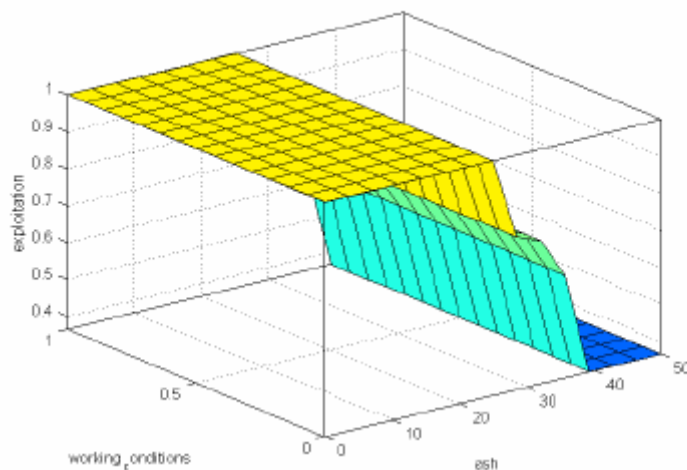
Σχήμα 4.14: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και την εμπειρία του χειριστή.

Στο σχήμα 4.15, παρουσιάζεται η επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τον στόχο της παραγωγής. Το πάχος είναι ίσο με 50cm, ενώ η εμπειρία του χειριστή και οι συνθήκες εργασίας είναι ίσες με 0,5. Όταν η περιεχόμενη τέφρα είναι χαμηλή, ο στόχος της παραγωγής δεν επηρεάζει την αποληψιμότητα, ενώ όταν η τέφρα παίρνει μεγάλες τιμές, τότε ο στόχος της παραγωγής επηρεάζει.



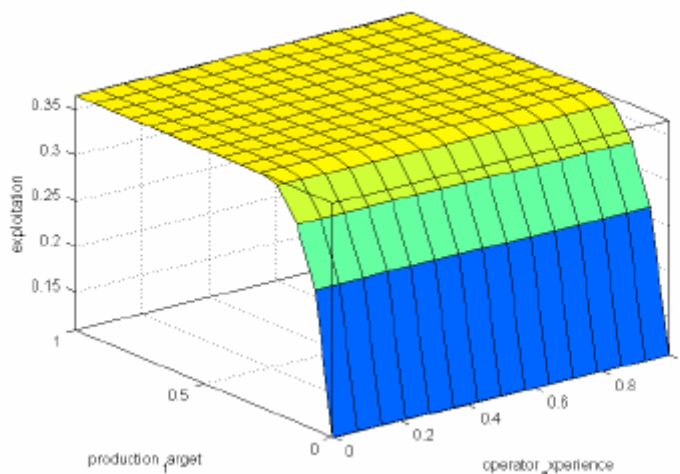
Σχήμα 4.15: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τον στόχο της παραγωγής.

Στο σχήμα 4.16, παρουσιάζεται η επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τις συνθήκες εργασίας. Το πάχος είναι ίσο με 50 cm, ενώ η εμπειρία του χειριστή και ο στόχος της παραγωγής είναι ίσοι με 0,5. Όταν η περιεχόμενη τέφρα είναι χαμηλή, οι συνθήκες εργασίας δεν επηρεάζουν την αποληψιμότητα, ενώ όταν η τέφρα παίρνει μεγάλες τιμές, τότε επηρεάζουν.



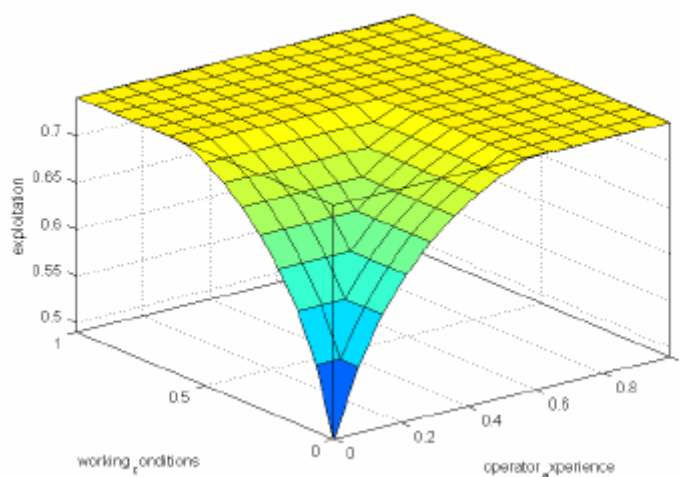
Σχήμα 4.16: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τις συνθήκες εργασίας.

Στο σχήμα 4.17, παρουσιάζεται η επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τον στόχο της παραγωγής. Το πάχος είναι ίσο με 50cm, η τέφρα ίση με 50% και οι συνθήκες εργασίας ίσες με 0,5.



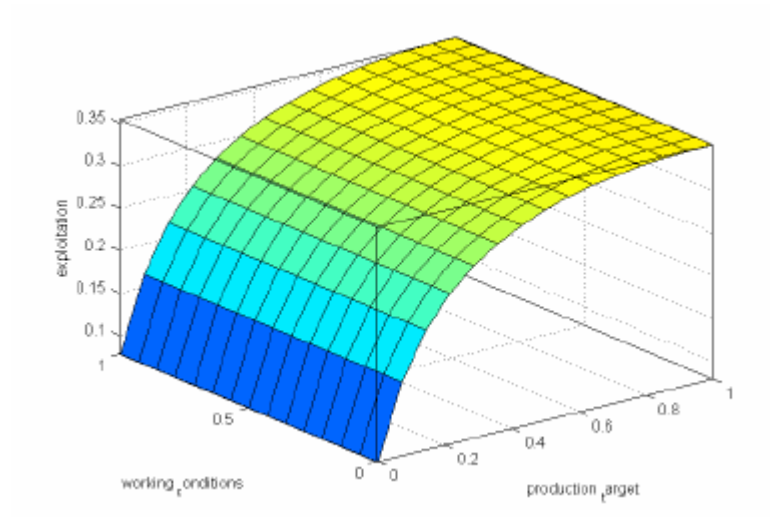
Σχήμα 4.17: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τον στόχο της παραγωγής.

Στο σχήμα 4.18, παρουσιάζεται η επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τις συνθήκες εργασίας. Το πάχος είναι ίσο με 40cm, η τέφρα ίση με 35% και ο στόχος της παραγωγής ίσος με 1.



Σχήμα 4.18: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τις συνθήκες εργασίας.

Στο σχήμα 4.19, παρουσιάζεται η επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με τον στόχο της παραγωγής και τις συνθήκες εργασίας. Το πάχος είναι ίσο με 60cm, η τέφρα ίση με 50% και η εμπειρία του χειριστή ίση με 1.

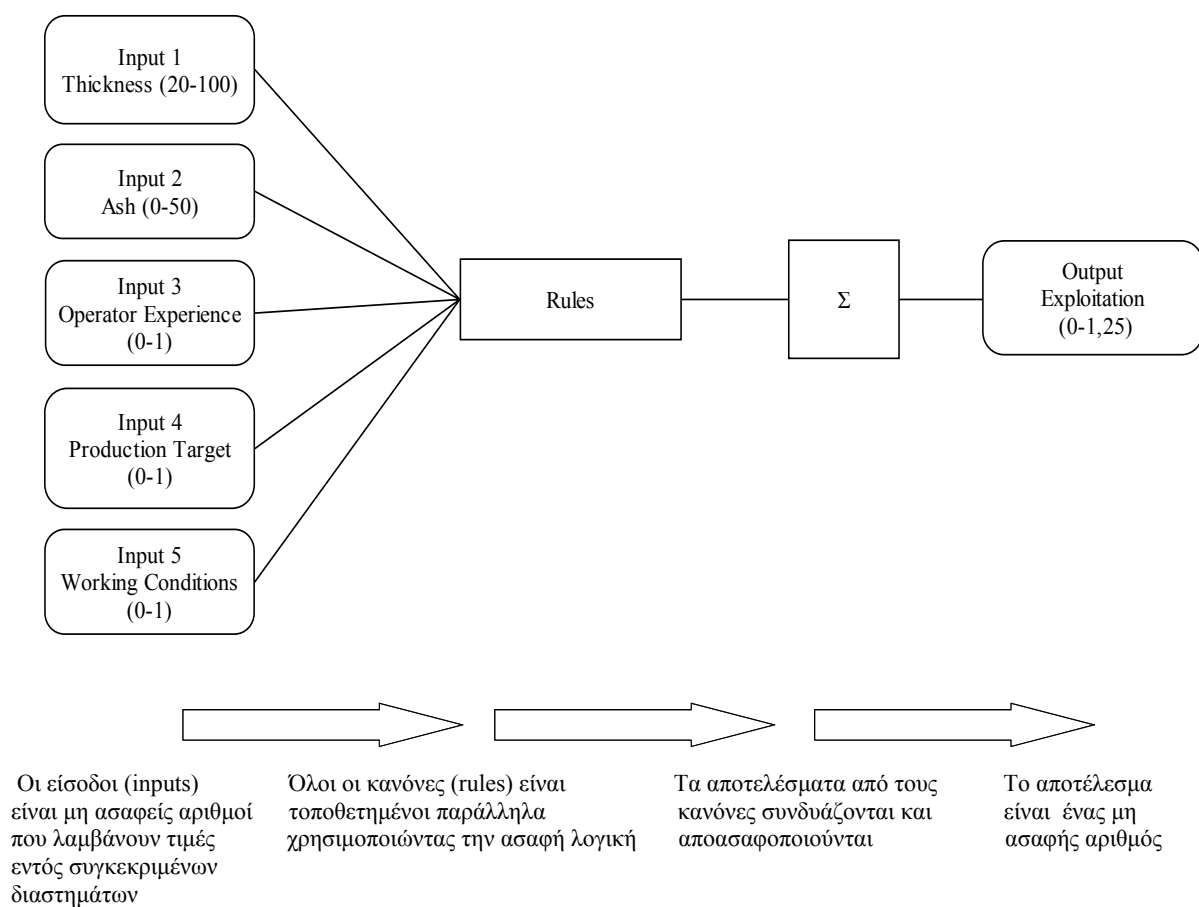


Σχήμα 4.19: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με τον στόχο της παραγωγής και τις συνθήκες εργασίας.

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογή του έμπειρου ασαφούς συστήματος

Στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται εφαρμογή του αναπτυχθέντος FIS για τυπικές περιπτώσεις συνδυασμών ποιότητας, γεωμετρικών χαρακτηριστικών και συνθηκών εκμετάλλευσης. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν σε σχέση με την συμβατική μεθοδολογία και γίνεται μια εκτίμηση του ποσοστού των αποθεμάτων στο λιγνιτικό κέντρο Δυτικής Μακεδονίας, που η αξιολόγησή της έχει υψηλό ποσοστό αβεβαιότητας. Στο σχήμα 5.1, παρουσιάζεται η βασική δομή του ασαφούς συστήματος που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 5.1: Η βασική δομή του ασαφούς συστήματος (5 inputs, 1 output, 16 rules).

5.1 Εφαρμογή του έμπειρου ασαφούς συστήματος

Στην κλασσική μέθοδο αξιολόγησης, απολήψιμο λιγνιτικό στρώμα χαρακτηρίζεται εκείνο που έχει πάχος μεγαλύτερο του ελάχιστου πάχους εκλεκτικής εξόρυξης (συνήθως 50cm για υπαίθρια εκμετάλλευση με καδοφόρους εκσκαφείς) και τέφρα επί ξηρού μικρότερη της ανώτερης επιτρεπόμενης (συνήθως 50%) (Αναστόπουλος και Κούκουζας, 1972). Με αυτή τη μέθοδο η αξιολόγηση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις παραμέτρους που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του λιγνιτικού στρώματος, ενώ οι άλλες παράμετροι που σχετίζονται με τη διαδικασία της εξόρυξης, όπως η εμπειρία του χειριστή, ο στόχος της παραγωγής και οι συνθήκες εργασίας στα μέτωπα, θεωρούνται ευνοϊκές.

Όταν γίνεται αξιολόγηση με την χρήση της ασαφούς λογικής, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι παραπάνω παράμετροι και επιδρούν καθοριστικά στην απόφαση απόληψης ή μη ενός λιγνιτικού στρώματος. Όταν μεταβάλλονται οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων, μεταβάλλεται και η αποληψιμότητα.

Παρακάτω πραγματοποιείται αξιολόγηση ενός λιγνιτικού στρώματος με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης και με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος. Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων, με σκοπό να παρουσιαστεί η μεταβολή της αποληψιμότητας.

Στον πίνακα 5.1, παρουσιάζεται η αξιολόγηση ενός λιγνιτικού στρώματος με την κλασσική μέθοδο. Όπως προαναφέρθηκε, στη μέθοδο αυτή οι παράμετροι που σχετίζονται με τη διαδικασία εξόρυξης θεωρούνται ευνοϊκοί. Έτσι η εμπειρία του χειριστή θεωρείται υψηλή (έχει πάντα την τιμή 1), ο στόχος της παραγωγής θεωρείται χαμηλός (έχει πάντα την τιμή 0) και οι συνθήκες εργασίας θεωρούνται ευνοϊκές (έχουν πάντα την τιμή 1). Όταν το λιγνιτικό στρώμα θεωρείται απολήψιμο, η αποληψιμότητα έχει την τιμή 1, ενώ όταν δεν θεωρείται απολήψιμο, έχει την τιμή 0.

Πίνακας 5.1: Αξιολόγηση ενός λιγνιτικού στρώματος με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης, όταν οι παράμετροι που σχετίζονται με τη διαδικασία εξόρυξης θεωρούνται ευνοϊκοί.

Thickness (cm)	Exploitation για Ash = 25 %	Exploitation για Ash = 35 %	Exploitation για Ash = 45 %	Exploitation για Ash = 50 %
20	0	0	0	0
30	0	0	0	0
40	0	0	0	0
50	1	1	1	1
60	1	1	1	1

Στον πίνακα, 5.2, παρουσιάζεται η αξιολόγηση ενός λιγνιτικού στρώματος με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Γίνεται εφαρμογή του FIS για διάφορες τιμές των παραμέτρων *operator_experience*, *production_target* και *working_conditions*. Όταν οι συνθήκες εξόρυξης είναι ευνοϊκές ή μέτριες, οι πιθανότητες απώλειας του λιγνιτικού στρώματος είναι μεγαλύτερες από ότι όταν είναι δυσμενείς.

Πίνακας 5.2: Αξιολόγηση ενός λιγνιτικού στρώματος με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος, για διάφορες τιμές των παραμέτρων *operator_experience*, *production_target* και *working_conditions*.

Thick- ness (cm)	Operator experience	Production target	Working conditions	Exploit. για Ash = 25 %	Exploit. για Ash = 35 %	Exploit. για Ash = 45 %	Exploit. για Ash = 50 %
20	1	0	1	0,4	0,1	0,1	0,1
20	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1
20	0,5	0,5	0,5	0,3	0,1	0,1	0,1
30	1	0	1	0,4	0,1	0,1	0,1
30	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1
30	0,5	0,5	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1
40	1	0	1	1	0,7	0,1	0,1
40	0	0	0	1	0,5	0,1	0,1

40	0,5	0,5	0,5	1	0,7	0,1	0,1
50	1	0	1	1	0,7	0,1	0,1
50	0	0	0	1	0,7	0,1	0,1
50	0,5	0,5	0,5	1	0,7	0,4	0,4
60	1	0	1	1	1	0,1	0,1
60	0	0	0	1	1	0,1	0,1
60	0,5	0,5	0,5	1	1	0,3	0,3

Στον παρακάτω πίνακα 5.3, με τη βοήθεια των πινάκων 5.1 και 5.2, γίνεται σύγκριση των δύο μεθόδων αξιολόγησης, για την περίπτωση εκείνη που οι παράμετροι που σχετίζονται με τη διαδικασία της εξόρυξης θεωρούνται ευνοϊκοί, δηλαδή όταν $operator_experience = 1$, $production_target = 0$ και $working_conditions = 1$.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση των δύο μεθόδων αξιολόγησης όταν $operator_experience = 1$, $production_target = 0$ και $working_conditions = 1$.

Thick- ness (cm)	Exploitation για Ash = 25 %		Exploitation για Ash = 35 %		Exploitation για Ash = 45 %		Exploitation για Ash = 50 %	
	Κλασσική μέθοδος αξιολόγη- σης	Μέθοδος αξιολόγησης με τη χρήση του FIS	Κλασσική μέθοδος αξιολόγη- σης	Μέθοδος αξιολόγησης με τη χρήση του FIS	Κλασσική μέθοδος αξιολόγη- σης	Μέθοδος αξιολόγησης με τη χρήση του FIS	Κλασσική μέθοδος αξιολόγη- σης	Μέθοδος αξιολόγησης με τη χρήση του FIS
20	0	0,4	0	0,1	0	0,1	0	0,1
30	0	0,4	0	0,1	0	0,1	0	0,1
40	0	1	0	0,7	0	0,1	0	0,1
50	1	1	1	0,7	1	0,1	1	0,1
60	1	1	1	1	1	0,1	1	0,1

Από τον πίνακα 5.3, παρατηρείται ότι:

- Αν ένα λιγνιτικό στρώμα είναι λεπτό και η περιεχόμενη τέφρα του είναι χαμηλή, με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης θεωρείται μη απολήψιμο, ενώ αν αξιολογηθεί με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος θεωρείται απολήψιμο, με πιθανότητα απόληψης 40%.

- Αν ένα λιγνιτικό στρώμα είναι μεσαίου πάχους και η περιεχόμενη τέφρα του είναι χαμηλή, με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης θεωρείται μη απολήψιμο, ενώ αν αξιολογηθεί με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος θεωρείται απολήψιμο, με πιθανότητα απόληψης 100%.
- Αν ένα λιγνιτικό στρώμα είναι μεσαίου πάχους και η περιεχόμενη τέφρα του είναι μεσαία, με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης θεωρείται μη απολήψιμο, ενώ αν αξιολογηθεί με την χρήση του FIS θεωρείται απολήψιμο, με πιθανότητα απόληψης 70%.
- Αν ένα λιγνιτικό στρώμα είναι μεγάλου πάχους και η περιεχόμενη τέφρα του είναι υψηλή, με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης θεωρείται απολήψιμο, ενώ αν αξιολογηθεί με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος θεωρείται απολήψιμο, με πιθανότητα απόληψης 10%, που είναι πολύ μικρή.

Για τους υπόλοιπους συνδυασμούς πάχους και περιεχόμενης τέφρας και οι δύο μέθοδοι δίνουν ισοδύναμα αποτελέσματα για την αποληψιμότητα.

5.2 Κρίσιμη περιοχή αποληψιμότητας

Κρίσιμη περιοχή για την αποληψιμότητα ενός λιγνιτικού στρώματος, θεωρείται η περιοχή εκείνη, στην οποία επικρατεί αβεβαιότητα ως προς την εκτίμηση της αποληψιμότητάς του. Όπως φαίνεται στον πίνακα 5.2, όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες εξόρυξης, για το ίδιο πάχος και περιεχόμενη τέφρα, σε κάποιες περιπτώσεις μεταβάλλεται η αποληψιμότητα του λιγνιτικού στρώματος. Κρίσιμη είναι η περιοχή όπου το πάχος ενός λιγνιτικού στρώματος είναι λεπτό μέχρι σχετικά μεγάλο (δηλαδή για τιμές πάχους από 20cm έως 60cm) και για περιεκτικότητα σε τέφρα από χαμηλή έως υψηλή (δηλαδή για τιμές περιεχόμενης τέφρας από 25% έως 45%). Στον πίνακα 5.4, παρουσιάζονται οι πιθανότητες απόληψης ενός λιγνιτικού στρώματος σε διάφορες περιοχές.

Πίνακας 5.4: Περιοχές εκτίμησης της αποληψιμότητας ενός λιγνιτικού στρώματος.

	<i>Χαμηλή Τέφρα(%)</i> (21 – 30)	<i>Μεσαία Τέφρα(%)</i> (27,6 – 37,8)	<i>Υψηλή Τέφρα(%)</i> (34,9 – 50)
<i>Λεπτό Πάχος</i> (<i>cm</i>) (20 – 37,5)	Σχετικά χαμηλή πιθανότητα απόληψης	Χαμηλή πιθανότητα απόληψης	Πολύ χαμηλή πιθανότητα απόληψης
<i>Μεσαίο Πάχος</i> (<i>cm</i>) (32,5 – 52,5)	Υψηλή πιθανότητα απόληψης	Σχετικά χαμηλή πιθανότητα απόληψης	Χαμηλή πιθανότητα απόληψης
<i>Μεγάλο Πάχος</i> (<i>cm</i>) (47 – 100)	Πολύ υψηλή πιθανότητα απόληψης	Υψηλή πιθανότητα απόληψης	Χαμηλή πιθανότητα απόληψης

Από τον πίνακα 5.4 και 5.2 παρατηρείται ότι:

- Όταν το πάχος ενός λιγνιτικού στρώματος είναι λεπτό και η περιεχόμενη τέφρα του είναι χαμηλή, όταν οι συνθήκες εξόρυξης είναι ευνοϊκές ή μέτριες η πιθανότητα απόληψής του είναι της τάξης του 30-40%, ενώ όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς είναι της τάξης του 10%.
- Όταν το πάχος ενός λιγνιτικού στρώματος είναι μεσαίο και η περιεχόμενη τέφρα του είναι μεσαία, όταν οι συνθήκες εξόρυξης είναι ευνοϊκές ή μέτριες η πιθανότητα απόληψής του είναι της τάξης του 70%, ενώ όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς είναι της τάξης του 50%.
- Όταν το πάχος ενός λιγνιτικού στρώματος είναι μεγάλο και η περιεχόμενη τέφρα του είναι υψηλή, όταν οι συνθήκες εξόρυξης είναι ευνοϊκές ή μέτριες η πιθανότητα απόληψής του είναι της τάξης του 30%, ενώ όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς είναι της τάξης του 10%.

5.3 Ποσοστό αποθέματος στην κρίσιμη περιοχή

Σημαντικός είναι ο υπολογισμός του ποσοστού του αποθέματος ενός λιγνιτικού στρώματος στην κρίσιμη περιοχή, για να φανεί αν αυτή η ποσότητα είναι μεγάλη σε σχέση με το συνολικό απόθεμα.

Παρακάτω υπολογίζεται το ποσοστό του αποθέματος ενός λιγνιτικού στρώματος στην κρίσιμη περιοχή.

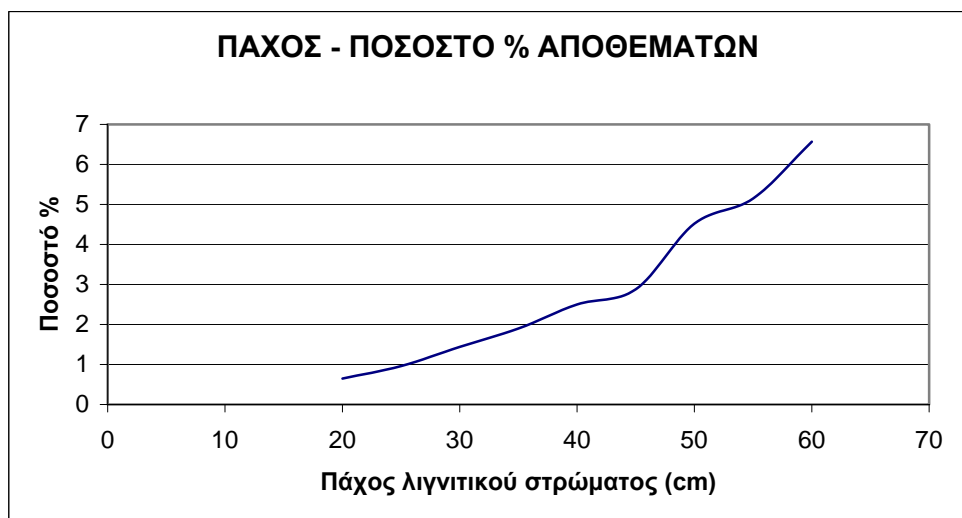
Ο πίνακας 5.5, παρουσιάζει τα αποθέματα λιγνίτη σε σχέση με το πάχος των αντίστοιχων στρωμάτων.

Πίνακας 5.5: Κατανομή αποθεμάτων κατά πάχη λιγνιτικών στρωμάτων (Γαλετάκης, 1996).

Πάχος στρώματος σε (cm)	Ποσοστό στρωμάτων μικρότερο από	Αριθμός στρωμάτων κλάσης	Μέσο πά- χος σε (cm)	Ποσοστό αποθέματος κλάσης	Ποσοστό αποθέματος μικρότερο από
	0				
10	2.62	1	5	0.08	0.08
15	4.78	1	12.5	0.16	0.23
20	8.94	1	17.5	0.42	0.65
25	11.35	1	22.5	0.31	0.96
30	14.42	1	27.5	0.48	1.44
35	16.87	1	32.5	0.46	1.90
40	19.66	1	37.5	0.60	2.50
45	21.2	0	42.5	0.38	2.88
50	27.22	2	47.5	1.64	4.52
55	29.3	1	52.5	0.63	5.15
60	33.62	1	57.5	1.43	6.57
65	35.41	1	62.5	0.64	7.22
70	38.57	1	67.5	1.22	8.44
75	40.48	1	72.5	0.80	9.24
80	43.93	1	77.5	1.54	10.77
85	45.68	1	82.5	0.83	11.60
90	47.88	1	87.5	1.11	12.71
95	49.17	0	92.5	0.69	13.39
100	53.87	1	97.5	2.63	16.02
110	56.82	1	105	1.78	17.80
130	61.38	1	120	3.14	20.94

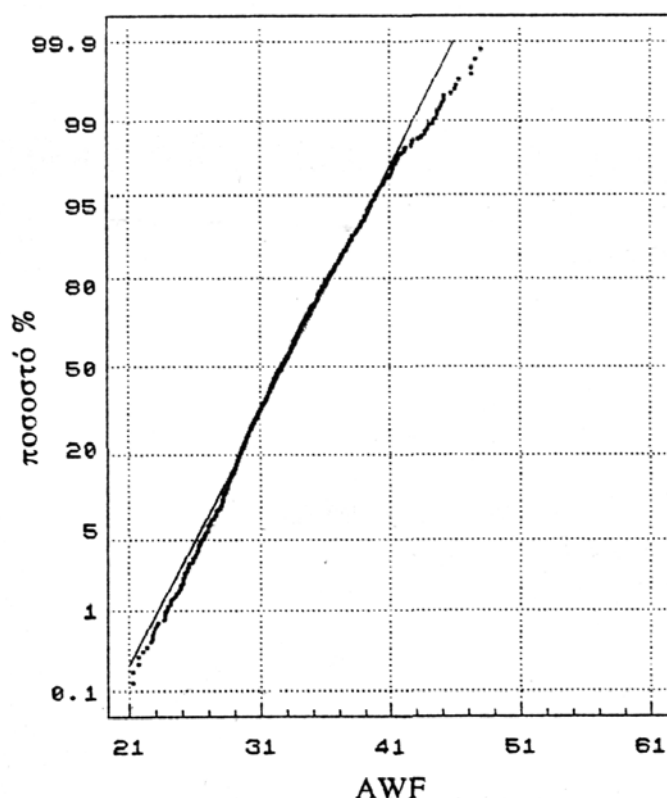
150	66.58	2	140	4.18	25.13
175	71.2	1	162.5	4.31	29.44
200	75.98	1	187.5	5.15	34.58
250	82.54	2	225	8.48	43.06
300	85.87	1	275	5.26	48.32
400	90.31	1	350	8.92	57.24
500	93.27	1	450	7.65	64.89
600	95.05	1	550	5.62	70.51
700	96.43	0	650	5.15	75.66
>700	100	1		24.34	100.00

Από τις τιμές του παραπάνω πίνακα, κατασκευάζεται η καμπύλη κατανομής του πάχους ενός λιγνιτικού στρώματος, σχήμα 5.2, που θεωρείται κρίσιμο ($\leq 60\text{cm}$) με το ποσοστό των αποθεμάτων του.



Σχήμα 5.2: Καμπύλη κατανομής του πάχους ενός λιγνιτικού στρώματος με το ποσοστό των αποθεμάτων του.

Στο σχήμα 5.3, παρουσιάζεται η καμπύλη κατανομής της περιεχόμενης τέφρας των λιγνιτικών στρωμάτων σε σχέση με το ποσοστό των αποθεμάτων τους.



Σχήμα 5.3: Κατανομή της περιεχόμενης τέφρας των λιγνιτικών στρωμάτων σε διάγραμμα κανονικής κατανομής για την περιοχή του Λιγνιτικού Κέντρου Δυτικής Μακεδονίας (Γαλετάκης, 1996).

Από τα σχήματα 5.2 και 5.3 υπολογίζεται το ποσοστό του αποθέματος λιγνίτη που υπάρχει στην κρίσιμη περιοχή:

- Από την καμπύλη του πάχους προκύπτει ότι το ποσοστό του αποθέματος λιγνίτη που υπάρχει στην κρίσιμη περιοχή (για τιμές πάχους από 20cm έως 60cm) είναι: $6,57 \% - 0,65 \% = 5,92 \%$.
- Από την καμπύλη της περιεχόμενης τέφρας προκύπτει ότι το ποσοστό του αποθέματος λιγνίτη που υπάρχει στην κρίσιμη περιοχή (για τιμές περιεχόμενης τέφρας από 25% έως 45%) είναι: $99,7 \% - 4 \% = 95,7 \%$.
- Επομένως το συνολικό ποσοστό αποθέματος του λιγνίτη στην κρίσιμη περιοχή είναι: $0,0592 * 0,957 = 0,057$, δηλαδή $5,7 \%$, που είναι περίπου 154 εκατ. τόνοι λιγνίτη, ποσότητα αρκετά μεγάλη, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας είναι 2,7 δισ. τόνοι.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και προτάσεις

Στην εργασία αυτή εξετάστηκε η δυνατότητα αξιολόγησης των λιγνιτικών γεωτρήσεων πολυστρωματικών κοιτασμάτων, όπως αυτά που αναπτύσσονται στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας, με την εφαρμογή της ασαφούς λογικής. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ένα έμπειρο ασαφές σύστημα, για να ενσωματώσει την υπάρχουσα γνώση και εμπειρία που έχει αποκτηθεί από την εκμετάλλευση των ελληνικών λιγνιτών, με στόχο την ακριβέστερη αξιολόγησή τους. Το FIS αποτελείται από πέντε εισόδους και μια έξοδο. Ως εισοδοί του συστήματος επιλέχθηκαν το πάχος ενός λιγνιτικού στρώματος, η περιεχόμενη τέφρα του, η εμπειρία του χειριστή, ο στόχος της παραγωγής και οι συνθήκες εργασίας. Επιλέχθηκαν οι παραπάνω εισοδοί, γιατί είναι βασικές παράμετροι που επιδρούν καθοριστικά στην απόφαση απόληψης ή μη ενός λιγνιτικού στρώματος κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης. Ως έξοδος του συστήματος επιλέχθηκε η πιθανότητα απόληψής του.

Στη συνέχεια έγινε εφαρμογή του FIS, με σκοπό την αξιολόγηση λιγνιτικών στρωμάτων, μεταβάλλοντας τις τιμές ορισμένων από τις παραπάνω παραμέτρους και κρατώντας τις υπόλοιπες σταθερές. Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω παραμέτρους και όχι μόνο το πάχος τους και την περιεχόμενη τέφρα τους, όπως γίνεται με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης. Από την αξιολόγηση αυτή προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Όταν το πάχος ενός λιγνιτικού στρώματος είναι λεπτό και η περιεχόμενη τέφρα του είναι χαμηλή, τότε αν οι συνθήκες εξόρυξης είναι ευνοϊκές ή μέτριες η πιθανότητα απόληψής του είναι της τάξης του 30-40%, ενώ όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς είναι της τάξης του 10%.
- Όταν το πάχος ενός λιγνιτικού στρώματος είναι μεσαίο και η περιεχόμενη τέφρα του είναι μεσαία, τότε αν οι συνθήκες εξόρυξης είναι ευνοϊκές ή μέτριες η πιθανότητα απόληψής του είναι της τάξης του 70%, ενώ όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς είναι της τάξης του 50%.
- Όταν το πάχος ενός λιγνιτικού στρώματος είναι μεγάλο και η περιεχόμενη τέφρα του είναι υψηλή, τότε αν οι συνθήκες εξόρυξης είναι ευνοϊκές ή μέτριες η

πιθανότητα απόληψής του είναι της τάξης του 30%, ενώ όταν οι συνθήκες είναι δυσμενείς είναι της τάξης του 10%.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση των δύο μεθόδων αξιολόγησης, της κλασσικής μεθόδου και της αξιολόγησης με τη χρήση του FIS, για την περίπτωση που οι παράμετροι που σχετίζονται με τη διαδικασία της εξόρυξης θεωρούνται ευνοϊκοί. Από την σύγκριση των δύο μεθόδων αξιολόγησης διαπιστώθηκε ότι:

- Αν ένα λιγνιτικό στρώμα είναι λεπτό και η περιεχόμενη τέφρα του είναι χαμηλή, με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης θεωρείται μη απολήψιμο, ενώ αν αξιολογηθεί με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος θεωρείται απολήψιμο, με πιθανότητα απόληψης 40%.
- Αν ένα λιγνιτικό στρώμα είναι μεσαίου πάχους και η περιεχόμενη τέφρα του είναι χαμηλή, με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης θεωρείται μη απολήψιμο, ενώ αν αξιολογηθεί με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος θεωρείται απολήψιμο, με πιθανότητα απόληψης 100%.
- Αν ένα λιγνιτικό στρώμα είναι μεσαίου πάχους και η περιεχόμενη τέφρα του είναι μεσαία, με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης θεωρείται μη απολήψιμο, ενώ αν αξιολογηθεί με την χρήση του FIS θεωρείται απολήψιμο, με πιθανότητα απόληψης 70%.
- Αν ένα λιγνιτικό στρώμα είναι μεγάλου πάχους και η περιεχόμενη τέφρα του είναι υψηλή, με την κλασσική μέθοδο αξιολόγησης θεωρείται απολήψιμο, ενώ αν αξιολογηθεί με την χρήση του έμπειρου ασαφούς συστήματος θεωρείται απολήψιμο, με πιθανότητα απόληψης 10%, που είναι πολύ μικρή.

Για τους υπόλοιπους συνδυασμούς πάχους και περιεχόμενης τέφρας και οι δύο μέθοδοι δίνουν ισοδύναμα αποτελέσματα για την αποληψιμότητα.

Το ποσοστό του αποθέματος για το οποίο οι δύο μέθοδοι δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα είναι της τάξης του 5,7% που αντιστοιχεί σε 154 εκατ. τόνους λιγνίτη.

Για τη βελτίωση της ακρίβειας του FIS που αναπτύχθηκε, προτείνεται να δημιουργηθούν περισσότερα υποδιαστήματα στις τιμές των εισόδων με σκοπό να αυξηθεί η ευαισθησία του συστήματος. θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής, όπως οι συναρτήσεις συμμετοχής του Gauss και οι σιγμοειδείς. Επίσης θα μπορούσαν να προστεθούν νέοι κανόνες ή να γίνουν αλλαγές των

συντελεστών βαρύτητας των κανόνων. Θα μπορούσαν να προστεθούν νέες εισοδοι στο FIS, όπως ο τύπος και οι ιδιότητες του υπερκείμενου και υποκείμενου στρώματος, που μπορεί να οδηγήσει σε ακριβέστερα αποτελέσματα. Τέλος, θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα έμπειρο ασαφές σύστημα για την εκλεκτική απόρριψη στείρου στρώματος και να ενσωματωθούν τα FIS στο υπάρχον σύστημα αξιολόγησης λιγνιτικών κοιτασμάτων.

Βιβλιογραφία

Διεθνής βιβλιογραφία

1. Driankov, D., H. Hellendoorn and M. Reinfrank, (1993), "An Introduction to Fuzzy Control", Springer, United States of America.
2. Fytikas, M., P. Dalambakis, V. Karkoulas and D. Medrinos, (1995), "Geothermal exploration and development activities in Greece during 1990 to 1994", Inter. Symp. Geoth., Florence, Italy.
3. Harris, C. J., C. G. Moore and M. Brown, (1993), "Intelligent Control, Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets", World Scientific Publishing, Singapore.
4. Kesimal, A. and A. Bascetin, (2002), "Application of Fuzzy Multiple Attribute Decision Making in Mining Operations", Mineral Resources Engineering, Vol.11, No.1, (2002), 59-72.
5. Koukouzas, G., (1995), Coal reserves of Greece: Present and Future. Meeting on the "Future of lignite in Greece. Its relation into the ever increasing demands of electric power". Ptolemais, 1st and 2nd of April, 1995, P.10.
6. Kruse, R., J. Gebhardt and F. Klawonn, (1994), " Foundations of Fuzzy Systems", Published by John Wiley & Sons Ltd, England.
7. Matlab, Fuzzy Logic Toolbox User's Guide , The Mathworks, Inc., version 2, copyright 1995-1998.
8. Pavloudakis, F., Z. Agioutantis and C. Kavouridis, (2003), "Stockpile homogenisation possibilities of the lignite produced from the mines of Ptolemais area", Greece, Bulk Solids Handling, 23(1), pp. 22-26.

9. Pergamalis, Ph., (1993), "Occurrence of radioactive minerals in Greece. Results of the last 40 years in exploration and its perspective", Special Publication of the Geol.Soc. of Greece, v. 2, pp 231-238.
10. Yager, R.R. and L.A. Zadeh, (1992), "An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems", Kluwer Academic Publishers, United States of America.

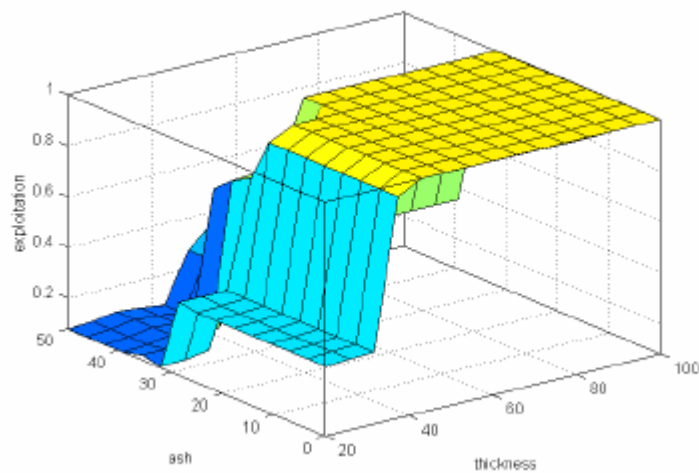
Ελληνική βιβλιογραφία

1. Αναστόπουλος, Ι. και Κ. Κούκουζας, (1972), "Γεωλογική και κοιτασματολογική μελέτη νοτίου τμήματος λιγνιτοφόρου λεκάνης Πτολεμαίδος", Γεωλογική και Γεωφυσική μελέτη του Ινστιτούτου Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους, τόμος XIV, Νο 1, Αθήνα.
2. Γαλετάκης, Μ., (1996), "Προσδιορισμός της ποιότητας λιγνίτη που εξορύσσεται με τη συνεχή μέθοδο εκμετάλλευσης από πολυστρωματικά κοιτάσματα", Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. Καραμαλίκης, Ν., (1992), "Μοντελοποίηση λιγνιτικών κοιτασμάτων με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή", Ορυκτός Πλούτος, τεύχος 76, σελ.39-50.
4. Κούκουζας, Κ., Φώσκολος, Α. και Κώτης, Θ., (1996), "Οι Ενεργειακοί Πόροι της Ελλάδας και το Μέλλον του Ελληνικού Λιγνίτη".
5. Παπανικολάου, Κ., (2003), "Κοιτασματολογία Ενεργειακών Πόρων" (Κοιτασματολογία Γαιανθράκων), Σημειώσεις Μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

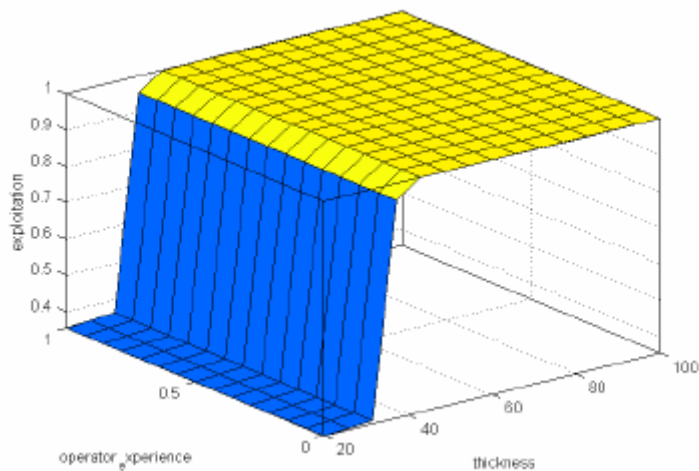
Παράρτημα Α:

Επιφάνειες απόκρισης

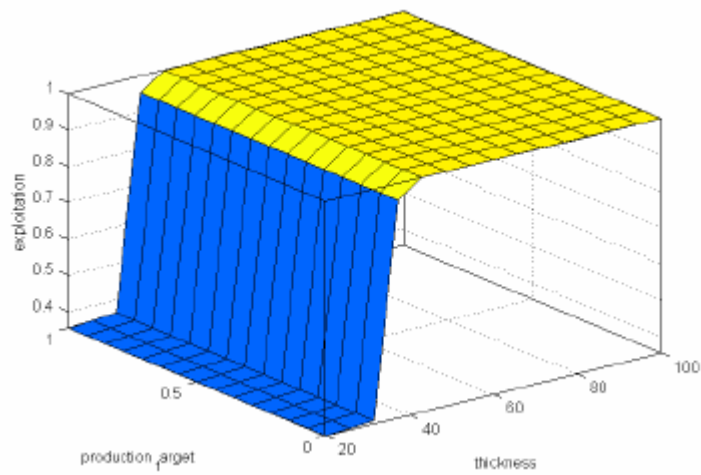
Στα σχήματα Α.1–Α.10 του παραρτήματος παρουσιάζονται οι επιφάνειες απόκρισης ανά δύο εισόδους σε σχέση με την έξοδο, που είναι πάντα η αποληψιμότητα. Στα σχήματα Α.1-Α.7 οι τιμές των εισόδων είναι: *thickness*=50cm, *ash*=25%, *operator_experience*=1, *production_target*=1, *working_conditions*=1.



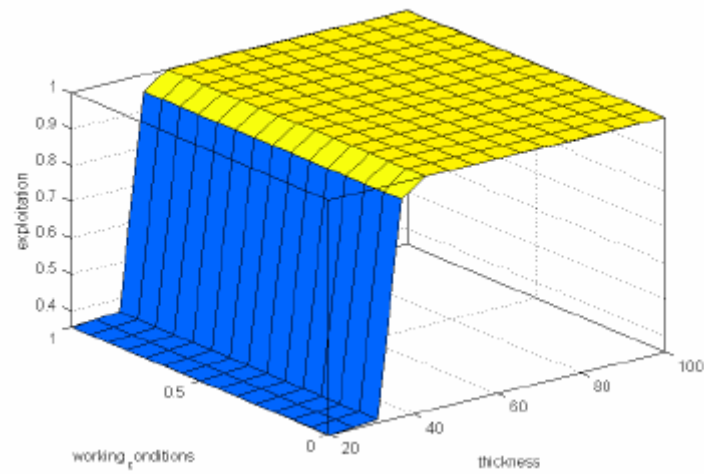
Σχήμα Α.1: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και την περιεκτικότητα σε τέφρα.



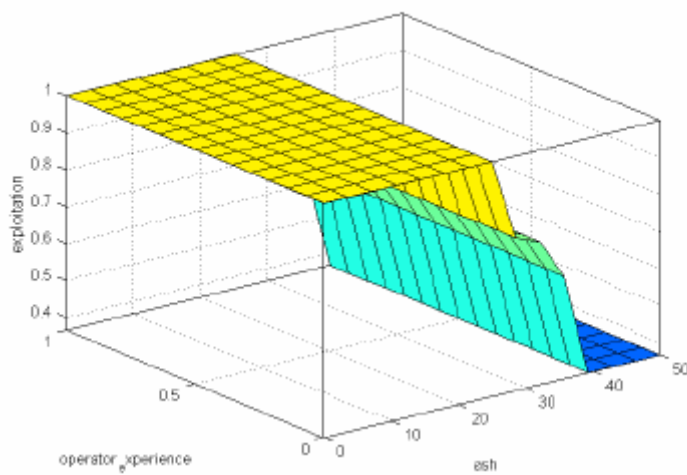
Σχήμα Α.2: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και την εμπειρία του χειριστή.



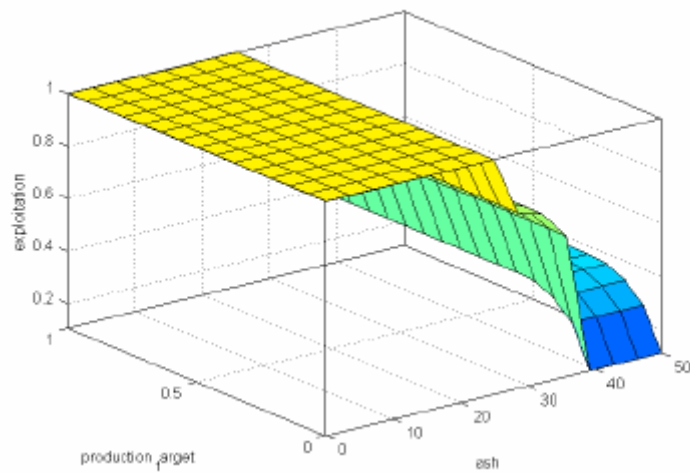
Σχήμα Α.3: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τον στόχο της παραγωγής.



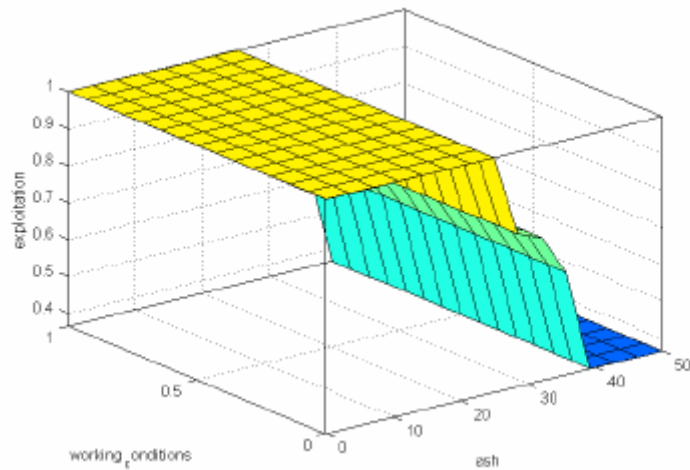
Σχήμα Α.4: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με το πάχος και τις συνθήκες εργασίας.



Σχήμα Α.5: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και την εμπειρία του χειριστή.

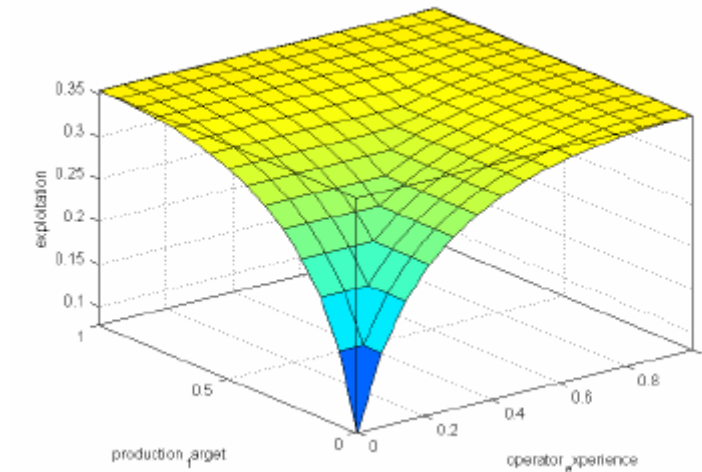


Σχήμα Α.6: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τον στόχο της παραγωγής.



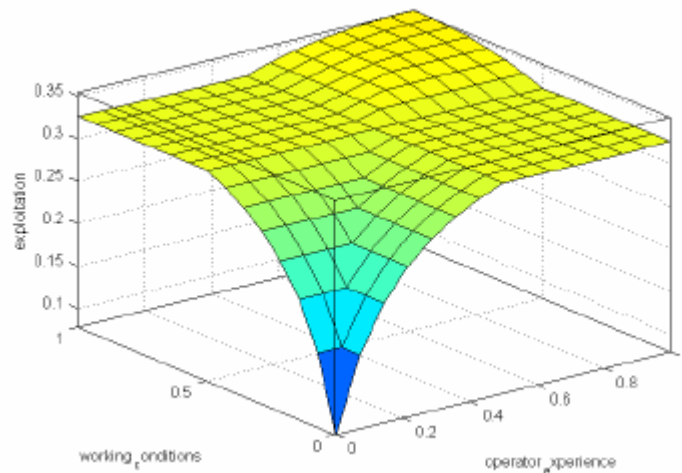
Σχήμα Α.7: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τέφρα και τις συνθήκες εργασίας.

Στο σχήμα Α.8 οι τιμές των εισόδων είναι: *thickness*=20cm, *ash*=25% και *working_conditions*=1.



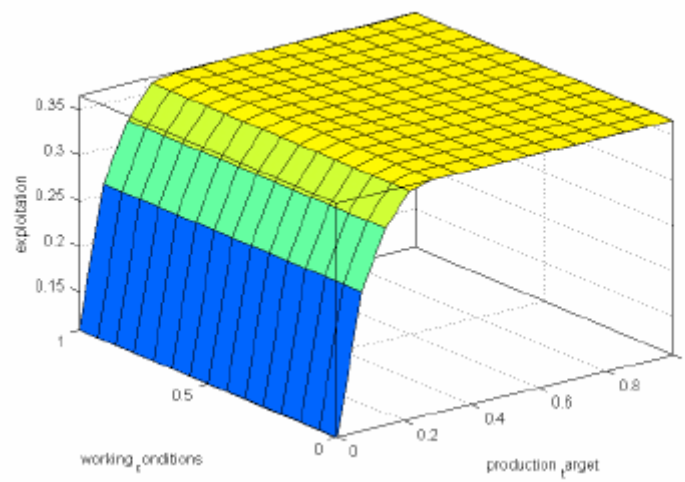
Σχήμα Α.8: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τον στόχο της παραγωγής.

Στο σχήμα Α.9 οι τιμές των εισόδων είναι: *thickness*=20cm, *ash*=25% και *production_target*=0,5.



Σχήμα Α.9: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με την εμπειρία του χειριστή και τις συνθήκες εργασίας.

Στο σχήμα Α.10 οι τιμές των εισόδων είναι: *thickness*=50cm, *ash*=40% και *operator_experience*=1



Σχήμα Α.10: Επιφάνεια απόκρισης σε σχέση με τον στόχο της παραγωγής και τις συνθήκες εργασίας.

Παράρτημα Β:

Ο κώδικας του έμπειρου ασαφούς συστήματος σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab

```
a = readfis

a =

name: 'lignite'
type: 'mamdani'
andMethod: 'min'
orMethod: 'max'
defuzzMethod: 'centroid'
impMethod: 'min'
aggMethod: 'max'
input: [1x5 struct]
output: [1x1 struct]
rule: [1x16 struct]


getfis(a)
Name      = lignite
Type      = mamdani
NumInputs = 5
InLabels  =
           thickness
           ash
           operator_experience
           production_target
           working_conditions
NumOutputs = 1
OutLabels =
           exploitation
NumRules = 16
AndMethod = min
OrMethod  = max
ImpMethod = min
AggMethod = max
DefuzzMethod = centroid
```



```

showfis(a)
1.  Name           lignite
2.  Type           mamdani
3.  Inputs/Outputs [5 1]
4.  NumInputMFs    [3 3 2 2 2]
5.  NumOutputMFs   3
6.  NumRules       16
7.  AndMethod      min
8.  OrMethod       max
9.  ImpMethod      min
10. AggMethod      max
11. DefuzzMethod   centroid
12. InLabels       thickness
13.                ash
14.                operator_experience
15.                production_target
16.                working_conditions
17. OutLabels       exploitation
18. InRange        [20 100]
19.                [0 50]
20.                [0 1]
21.                [0 1]
22.                [0 1]
23. OutRange       [0 1.5]
24. InMFLabels     thin
25.                medium
26.                thick
27.                low
28.                medium
29.                high
30.                low
31.                high
32.                low
33.                high
34.                bad
35.                good
36. OutMFLabels     low
37.                average
38.                high
39. InMFTypes       trapmf
40.                trimf
41.                trapmf
42.                trapmf
43.                trimf
44.                trapmf
45.                trimf
46.                trimf
47.                trimf
48.                trimf
49.                trimf
50.                trimf

```

51.	OutMFTypes	trimf
52.		trimf
53.		trimf
54.	InMFParams	[20 20 20 37.5]
55.		[32.5 41.5 52.5 0]
56.		[47 60 100 100]
57.		[0 0 25 30]
58.		[27.6 33 37.8 0]
59.		[34.9 39.5 50 50]
60.		[0 0 1 0]
61.		[0 1 1 0]
62.		[0 0 1 0]
63.		[0 1 1 0]
64.		[0 0 1 0]
65.		[0 1 1 0]
66.	OutMFParams	[-0.1 -0.001 0.25 0]
67.		[0.25 0.5 0.75 0]
68.		[0.75 1 1.25 0]
69.	Rule Antecedent	[1 3 0 0 0]
70.		[1 1 2 2 0]
71.		[1 1 2 0 2]
72.		[1 1 0 2 2]
73.		[1 2 0 0 0]
74.		[2 1 0 0 0]
75.		[2 2 2 2 0]
76.		[2 2 2 0 2]
77.		[2 2 0 2 2]
78.		[2 3 0 0 0]
79.		[3 1 0 0 0]
80.		[3 2 0 0 0]
81.		[3 3 0 2 0]
82.		[1 1 0 0 0]
83.		[2 2 0 0 0]
84.		[3 3 0 0 0]
69.	Rule Consequent	1
70.		2
71.		2
72.		2
73.		1
74.		3
75.		3
76.		3
77.		3
78.		1
79.		3
80.		3
81.		2
82.		1
83.		2
84.		1
69.	Rule Weigth	1

70.	1
71.	1
72.	1
73.	1
74.	1
75.	1
76.	1
77.	1
78.	1
79.	1
80.	1
81.	1
82.	1
83.	1
84.	1
69. Rule Connection	1
70.	1
71.	1
72.	1
73.	1
74.	1
75.	1
76.	1
77.	1
78.	1
79.	1
80.	1
81.	1
82.	1
83.	1
84.	1