



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

"Ανάπτυξη αλγορίθμου βασισμένου σε προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα (ANFIS) για τη βελτίωση της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών "

Ανθούλα Χ. Βασιλείου

Εξεταστική Επιτροπή:

Μιχάλης Γαλετάκης,
Διονύσιος Χριστόπουλος,
Χρήστος Ρούμπος,

Επίκουρος Καθηγητής (Επιβλέπων)
Αναπληρωτής Καθηγητής
Διδάκτωρ, Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός

Χανιά
Σεπτέμβριος, 2006

Πρόλογος

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα βελτίωσης της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών, με τη βοήθεια των προσαρμοστικών νευροασαφών συστημάτων συμπεράσματος (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems-ANFIS).

Η μέθοδος ελέγχου ποιότητας του λιγνίτη που χρησιμοποιείται στα ορυχεία είναι η συστηματική δειγματοληψία και η χημική ανάλυση. Η μέθοδος αυτή έχει αντικατασταθεί μερικώς από τα εν σειρά συστήματα ελέγχου ποιότητας, τα οποία πλεονεκτούν στο γεγονός ότι παρέχουν τη δυνατότητα συνεχούς παρακολούθησης της ποιότητας του λιγνίτη, σε σύντομο χρόνο και με ικανοποιητική ακρίβεια.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι εν σειρά αναλυτές, είναι ότι η ακρίβεια της μέτρησής τους εξαρτάται από τον τύπο του γαιάνθρακα που μετράται. Δηλαδή, γαιάνθρακες όπως ο λιγνίτης που παρουσιάζει έντονη και συχνή διακύμανση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του, καθιστά τη λειτουργία του αναλυτή δύσκολη. Ακόμα μια δυσκολία στην ομαλή λειτουργία του αναλυτή, είναι το μεταβαλλόμενο ύψος του στρώματος του γαιάνθρακα πάνω στη μεταφορική ταινία, ιδιαίτερα όταν είναι πολύ μεγάλο ($>60\text{cm}$) ή πολύ μικρό ($<15\text{cm}$). Στην περίπτωση αυτή, η ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της από το στρώμα του γαιάνθρακα, εξασθενεί σε βαθμό που επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της μέτρησης ή δεν παρουσιάζει μετρήσιμη απορρόφηση.

Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση του αναλυτή τέφρας διπλής ενέργειας ακτίνων γ (DUET-Dual Energy Transmission), ο οποίος αποτελεί τον συνηθέστερο τύπο και μελετάται στην εργασία αυτή, είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα αποτελεσματικό μοντέλο βαθμονόμησης, με σκοπό να συσχετίσει τις μετρούμενες εντάσεις των ακτινοβολιών, με την τέφρα. Στην εργασία αυτή, αναπτύχθηκαν τέσσερα προσαρμοστικά νευροασαφή συστήματα εξαγωγής συμπεράσματος (ANFIS), τα οποία δεν αντιμετωπίζουν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω και βελτιώνουν την καμπύλη βαθμονόμησης. Επίσης αναπτύχθηκαν και δύο νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks-ANN) με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αυτά των ANFIS.

Η παρούσα εργασία έχει την ακόλουθη διάρθρωση: Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στη σημασία του λιγνίτη ως ενεργειακού πόρου, ενώ στο δεύτερο αναφέρεται ο ποιοτικός έλεγχος του λιγνίτη με τη χρήση των εν σειρά αναλυτών τέφρας. Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται τα βασικά στοιχεία της ασαφούς λογικής και αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση και τη χρήση των προσαρμοστικών νευροασαφών συστημάτων. Στο τέταρτο παρουσιάζεται η ανάπτυξη των ANFIS για τη βελτίωση της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών και γίνεται εφαρμογή τους για την εκτίμηση της τέφρας με βάση τις μετρήσεις του on-line αναλυτή. Τα συστήματα ANFIS αναπτύχθηκαν με βάση το λογισμικό Matlab® (Fuzzy Toolbox) της Mathworks®. Στο κεφάλαιο πέντε παρουσιάζεται η ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή τους. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των ANFIS και των ANN. Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή, καθώς και προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης του μεταπτυχιακού μου διπλώματος, στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντά μου κ. Μ. Γαλετάκη, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος, για την ανάθεση, τη συνεργασία και την επιστημονική υποστήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Δ. Χριστόπουλο και τον Διδάκτορα, Μηχανικό Μεταλλείων-Μεταλλουργό κ. Χ. Ρούμπο, οι οποίοι δέχτηκαν να συμμετάσχουν στην εξεταστική επιτροπή και συνέβαλαν στη βελτίωση της εργασίας με τις υποδείξεις και παρατηρήσεις τους.

Ακόμα ευχαριστώ την οικογένειά μου, για την αγάπη και την αμέριστη υλική και ηθική συμπαράστασή της.

Χανιά, Σεπτέμβριος 2006

A.X. Βασιλείου

Αφιερωμένη

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

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	i
Κατάλογος Σχημάτων.....	vii
Κατάλογος Πινάκων.....	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η σημασία του λιγνίτη ως ενεργειακού πόρου.....	1
1.1 Έρευνα και εκμετάλλευση ελληνικών λιγνιτών.....	1
1.2 Κοιτασματολογικά και ποιοτικά στοιχεία των λιγνιτικών κοιτασμάτων της Μεγαλόπολης.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Χρήση εν σειρά αναλυτών τέφρας σε μονάδες παραγωγής ενέργειας.....	10
2.1 Τύποι on line αναλυτών τέφρας.....	12
2.2 Τρόποι εγκατάστασης των on line αναλυτών.....	24
2.3 Βαθμονόμηση και ρύθμιση της ακρίβειας των on line αναλυτών.....	25
2.4 Η έννοια της ακρίβειας ενός on line αναλυτή.....	26
2.5 On line αναλυτές μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας.....	27
2.5.1 Περιγραφή της συσκευής.....	27
2.5.2 Διαδικασία υπολογισμού της τέφρας.....	28
2.5.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Εισαγωγή στην ασαφή λογική, στα ασαφή συστήματα λήψης αποφάσεων και στα προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα.....	34
3.1 Εισαγωγή στην ασαφή λογική.....	34
3.1.1 Βασικές έννοιες και ορισμοί.....	36
3.1.2 Λογικοί τελεστές.....	37
3.1.3 Ιδιότητες και πράξεις ασαφών συνόλων.....	39
3.1.4 Γλωσσικές μεταβλητές.....	40
3.1.5 Συναρτήσεις συμμετοχής.....	41
3.1.6 Δομή συστήματος ασαφούς λογικής.....	43
3.1.6.1 Ασαφοποίηση.....	43
3.1.6.2 Εφαρμογή των λογικών τελεστών.....	43
3.1.6.3 Εφαρμογή της μεθόδου συνεπαγωγής.....	43
3.1.6.4 Άθροιση των εξόδων.....	44
3.1.6.5 Αποασαφοποίηση.....	44
3.1.7 Συνοπτική παρουσίαση του Fuzzy Toolbox της Matlab.....	49
3.2 Ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων (FIS).....	50

3.2.1 Ασαφή συστήματα τύπου Sugeno.....	51
3.3 Προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα (ANFIS).....	55
3.3.1 Αρχιτεκτονική του ANFIS.....	55
3.3.2 Εκπαίδευση του ANFIS.....	59
3.3.3 Περιορισμοί του ANFIS.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μεθοδολογία για τη βελτίωση της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών, βασισμένη σε προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα..	62
4.1 Εισαγωγή.....	62
4.2 Διαδικασία μέτρησης των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση.....	63
4.3 Παρουσίαση μεθοδολογίας.....	67
4.4 Ανάπτυξη και εφαρμογή των ANFIS.....	68
4.4.1 Σύστημα 1 ^ο [$A = f(I_{Am}, I_{Cs})$].....	70
4.4.2 Σύστημα 2 ^ο [$A = f(I_{Am}, I_{Cs}, \text{Position})$].....	72
4.4.3 Σύστημα 3 ^ο [$A = f(Q, I_{Cs})$].....	74
4.4.4 Σύστημα 4 ^ο [$A = f(Q, \text{Position})$].....	76
4.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναπτυχθέντων ANFIS και επιλογή των καλύτερων συστημάτων	77
4.6 Αναλυτική περιγραφή του 3 ^{ου} και 4 ^{ου} συστήματος.....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάπτυξη μοντέλου βασισμένου στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, για τη βελτίωση της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών.....	88
5.1 Γενικά στοιχεία για τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.....	88
5.2 Εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.....	92
5.3 Ανάπτυξη μοντέλου βαθμονόμησης του αναλυτή DUET βασισμένου στα ANN.....	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ANFIS με τα ANN και την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR).....	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα και προτάσεις.....	107
Βιβλιογραφία.....	110
Παράρτημα Α: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου των τεσσάρων ANFIS για 400 επαναλήψεις.....	116
Παράρτημα Β: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου (RMS) του 4^{ου} ANFIS σε σχέση με τις επαναλήψεις, κατά την εκπαίδευσή του, για διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής.....	119
Παράρτημα Γ: Κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab, για τα αναπτυχθέντα ANFIS.....	135

Κατάλογος Σχημάτων

1.1 Χάρτης των ορυχείων της Μεγαλόπολης.....	5
2.1 Διατάξεις των κύριων τύπων αναλυτών απευθείας παρακολούθησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του γαιάνθρακα.....	13
2.2 Φορητό σύστημα μέτρησης της φυσικής ραδιενέργειας του λιγνίτη.....	17
2.3 Το κοντέινερ στο οποίο βρίσκεται ο πρωτότυπος αναλυτής.....	21
2.4 Διάγραμμα που δείχνει τη θέση του αναλυτή και τα στάδια προετοιμασίας του γαιάνθρακα.....	23
2.5 Διάταξη των πηγών και των δεκτών ακτινοβολίας γ, ενός on line αναλυτή μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας.....	28
2.6 Αναλυτής μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας με 5 κανάλια – δέκτες της ακτινοβολίας γ.....	30
2.7 Εγκατεστημένα συστήματα on-line ποιοτικού ελέγχου του άνθρακα σε παγκόσμια κλίμακα (ποσοστά ανά μετρούμενη παράμετρο και εφαρμοζόμενη τεχνική μέτρησης).....	32
3.1 Χρήση των λογικών τελεστών στα ασαφή σύνολα.....	39
3.2 Η τριγωνική και η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής.....	41
3.3 Συναρτήσεις συμμετοχής καμπυλών Gauss.....	42
3.4 Συναρτήσεις συμμετοχής σιγμοειδών καμπυλών sigmf, dsigmf, psigmf...	42
3.5 Συναρτήσεις συμμετοχής zmf, pimf, smf.....	43
3.6 Η γενική δομή ενός συστήματος ασαφούς λογικής.....	47
3.7 Διάγραμμα ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων.....	51
3.8 Το πρώτου βαθμού ασαφές μοντέλο Sugeno.....	53
3.9 Λειτουργία ενός συστήματος Sugeno.....	54
3.10 (a) Ασαφές μοντέλο Sugeno πρώτου βαθμού δυο εισόδων με δυο κανόνες, (b) ισοδύναμο ANFIS.....	56
3.11 Η αρχιτεκτονική του ANFIS για το ασαφές μοντέλο Sugeno, όπου η κανονικοποίηση βαρών πραγματοποιείται στο τελευταίο επίπεδο.....	58
3.12 (a) Αρχιτεκτονική του ANFIS για το ασαφές μοντέλο Sugeno με δυο εισόδους και εννέα κανόνες (b) Χώρος εισόδου, χωρισμένος σε εννέα ασαφείς περιοχές	59
4.1 Δομή του 1 ^{ου} ANFIS.....	72

4.2 Δομή του 2 ^{ου} ANFIS.....	74
4.3 Δομή του 3 ^{ου} ANFIS.....	75
4.4 Δομή του 4 ^{ου} ANFIS.....	77
4.5 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [trimf 200,2-3]).....	79
4.6 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [trimf200,2-3]).....	80
4.7 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [trimf200,2-3]).....	80
4.8 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [gbellmf 200,2-2]).....	81
4.9 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gbellmf 200,2-2]).....	82
4.10 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gbellmf 200,2-2]).....	82
4.11 Διάγραμμα συσχέτισης $Ash_{\text{πραγματικό}}-Ash_{\text{υπολογισμένο}}$	83
4.12 Απόλυτο σφάλμα (%) σε συνάρτηση με την $Ash_{\text{πραγματική}}$ (%).....	86
4.13 Σφάλμα (e) (%) του αναλυτή σε συνάρτηση με την $Ash_{\text{πραγματική}}$ (%)	86
5.1 Σχηματική απεικόνιση της δομής ενός τεχνητού νευρώνα.....	91
5.2 Σχηματική απεικόνιση της επαναληπτικής διαδικασίας εκπαίδευσης ενός ANN.....	91
5.3 Δομή του νευρωνικού δικτύου.....	96
5.4 Σφάλματα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου (RMS) σε σχέση με τις επαναλήψεις.....	99
5.5 Διάγραμμα συσχέτισης σφάλματος (%) με την πραγματική τιμή της τέφρας (Ash_{lab}) (%).....	100
5.6 Συσχέτιση της $Ash_{\text{πραγματική}}(T)$ (%) - $Ash_{\text{υπολογιστική}}(A)$ (%)	100
6.1 Διάγραμμα κατανομής της τέφρας για το κάθε μοντέλο.....	106
B.1 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Dsigmf 200,2-3]).....	119
B.2 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Psigmf 200,2-3]).....	119
B.3 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Pimf 200,3-3]).....	120
B.4 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Trapmf 200,2-3]).....	120
B.5 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gbellmf 200,2-3]).....	120
B.6 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gaussmf 200,2-3]).....	121
B.7 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gauss2mf 200,2-3]).....	121

B.8 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Pimf 200,2-3]).....	121
B.9 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Trimf 200,3-3]).....	122
B.10 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Trapmf 200,3-3]).....	122
B.11 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gbellmf 200,3-3]).....	122
B.12 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gaussmf 200,3-3]).....	123
B.13 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gauss2mf 200,3-3]).....	123
B.14 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Dsigmf 200,3-3]).....	123
B.15 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Psigmf 200,3-3]).....	124
B.16 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [trapmf200,2-3]).....	124
B.17 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [trapmf200,2-3]).....	124
B.18 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [trapmf200,3-3]).....	125
B.19 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [trapmf200,3-3]).....	125
B.20 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [pimf200,3-3]).....	125
B.21 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [pimf200,3-3]).....	126
B.22 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gbell200,2-3]).....	126
B.23 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gbell200,2-3]).....	126
B.24 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gaussmf200,2-3]).....	127
B.25 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gaussmf200,2-3]).....	127
B.26 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gauss2mf200,2-3]).....	128
B.27 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gauss2mf200,2-3]).....	128
B.28 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [pimf200,2-3]).....	128
B.29 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [pimf200,2-3]).....	129
B.30 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [dsigmf200,2-3]).....	129

B.31 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [dsigmf200,2-3]).....	129
B.32 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [psigmf200,2-3]).....	130
B.33 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [psigmf200,2-3]).....	130
B.34 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [trimf200,3-3]).....	130
B.35 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [trimf200,3-3]).....	131
B.36 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gbell200,3-3]).....	131
B.37 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gbell200,3-3]).....	131
B.38 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gaussmf200,3-3]).....	132
B.39 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gaussmf200,3-3]).....	132
B.40 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gauss2mf200,3-3]).....	132
B.41 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gauss2mf200,3-3]).....	133
B.42 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [dsigmf200,3-3]).....	133
B.43 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [dsigmf200,3-3]).....	133
B.44 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [psigmf200,3-3]).....	134
B.45 Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [psigmf200,3-3]).....	134

Κατάλογος Πινάκων

1.1 Συμμετοχή των ενεργειακών πηγών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	3
1.2 Βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία του λιγνίτη που συναντάται στο κοιτάσμα της Μεγαλόπολης.....	6
1.3 Βασικές ποιοτικές παράμετροι του λιγνίτη που εξορύσσεται σε κάθε ορυχείο.....	7
1.4 Τα απομένοντα αποθέματα (από 1.1.2006) του κάθε ορυχείου σε παράθεση με τη σχέση εκμετάλλευσης και το βάθος σε κάθε ορυχείο.....	7
2.1 Σύγκριση ποιοτικού ελέγχου που πραγματοποιείται από το χημείο και από τον αναλυτή.....	12
2.2 Σύγκριση των δύο στοιχειακών on line αναλυτών.....	24
3.1 Λογικοί τελεστές AND, OR, NOT.....	37
3.2 Αντικατάσταση των λογικών τελεστών με τις συναρτήσεις $\min(A,B)$, $\max(A,B)$ και $1-A$	38
3.3 Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων Sugeno – Mamdani.....	54
4.1 Δεδομένα ανάπτυξης και εφαρμογής των ANFIS.....	65
4.2 Αριθμός δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των εκπαιδευμένων ANFIS.....	68
4.3 Τα διαφορετικά ANFIS που αναπτύχθηκαν με βάση τις εισόδους τους....	70
4.4 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 1 ^{ου} συστήματος.....	71
4.5 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 2 ^{ου} συστήματος.....	73
4.6 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 3 ^{ου} συστήματος.....	75
4.7 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 4 ^{ου} συστήματος.....	76
4.8 Πραγματικές και υπολογιστικές τιμές της τέφρας, σφάλμα (e) και απόλυτη τιμή του σφάλματος (e).....	84
5.1 Αριθμός δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των εκπαιδευμένων ANN.....	95
5.2 Αποτελέσματα από την εφαρμογή του QI _{CS} , όταν ο νευρώνας εξόδου είναι γραμμικός.....	97
5.3 Αποτελέσματα από την εφαρμογή του QI _{CS} , όταν ο νευρώνας εξόδου έχει τη μορφή logsig.....	97
5.4 Αποτελέσματα από την εφαρμογή του QP _{OS} , όταν ο νευρώνας εξόδου είναι γραμμικός.....	98
5.5 Αποτελέσματα από την εφαρμογή του QP _{OS} , όταν ο νευρώνας εξόδου έχει τη μορφή logsig.....	98
6.1 Αποτελέσματα υπολογισμού της τέφρας με τα ANFIS, την MLR, τα ANN και σύγκριση με τις πραγματικές τιμές.....	101
6.2 Αποτελέσματα εκπαίδευσης και επικύρωσης του ANFIS, του ANN και της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR).....	104
6.3 Στατιστικά στοιχεία τέφρας.....	105

A.1 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 1 ^{ου} συστήματος για 400 επαναλήψεις.....	116
A.2 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 2 ^{ου} συστήματος για 400 επαναλήψεις.....	117
A.3 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 3 ^{ου} συστήματος για 400 επαναλήψεις.....	117
A.4 Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 4 ^{ου} συστήματος για 400 επαναλήψεις.....	118

Κεφάλαιο 1

Η σημασία του λιγνίτη ως ενεργειακού πόρου

1.1 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 την Τεταρτογενή γεωλογική περίοδο. Τα σημαντικότερα κοιτάσματα αναπτύχθηκαν σε αβαθείς λίμνες και 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-δελταϊκά 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 – Ελασσόνας

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, Πεδίου Κομάνου και πεδίου Μαυροπηγής)
- Ορυχείο Πεδίου Καρδιάς – (Εκμεταλλεύσεις 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 στη Φλώρινα, συνολικής επένδυσης 150 εκ. ευρώ.

Η Ελλάδα παράγει ετησίως περίπου 70 εκατ. τόνους λιγνίτη. Σχεδόν όλος ο λιγνίτης, 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 δύο μονάδες που τροφοδοτούνται με λιγνίτη έχουν εγκατεστημένη ισχύ 5.289 MW. Οι σταθμοί αυτοί παρέχουν περίπου το 65% των αναγκών της Ελλάδας σε ηλεκτρική ενέργεια. Δεκαοκτώ σταθμοί με συνολική ισχύ 4.439 MW είναι εγκατεστημένοι στην ευρύτερη περιοχή της Πτολεμαΐδας–Αμυνταίου–Φλώρινας και τροφοδοτούνται από το απόθεμα των παρακείμενων ορυχείων Πτολεμαΐδας, Αμυνταίου και Φλώρινας. Οι εναπομείναντες τέσσερις σταθμοί, με συνολική ισχύ 850 MW, είναι εγκατεστημένοι στη Μεγαλόπολη (Παπανικολάου, 2003, ΔΕΗ).

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 παίζει 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, ΔΕΗ).

Έτος	Λιγνίτης		Φυσικό αέριο		Πετρέλαιο		Υδροηλεκτρικά		Αιολικά		Σύνολο	
	GWh	%	GWh	%	GWh	%	GWh	%	GWh	%	GWh	%
1994	26934	79.3		0.0	4190	12.34	2833	8.34		0.0	33957	99.98
1995	26180	75.4		0.0	4763	13.72	3768	10.86		0.0	34711	99.98
1996	26455	74.6		0.0	4524	12.76	4487	12.65		0.0	35466	100
1997	27710	76.9	215	0.60	4076	11.31	4048	11.23		0.0	36049	100
1998	29181	75.8	1616	4.20	3852	10.01	3841	9.98		0.0	38490	99.99
1999	29211	70.9	3700	8.98	3528	8.56	4781	11.60		0.0	41220	100
2000	30943	69.2	5596	12.51	4141	9.26	4062	9.08		0.0	44742	100
2001	32106	72.4	5801	13.07	3551	8.00	2668	6.01	249	0.56	44375	100
2002	31242	69.3	6730	14.93	3391	7.52	3381	7.50	326	0.72	45070	99.97
2003	31732	65.3	7642	15.74	3312	6.82	5234	10.78	641	1.32	48561	99.96
2004	32552	66.5	8080	16.50	2695	5.50	4922	10.05	710	1.45	48959	100
2005	32149	65.2	7685	15.58	3306	6.70	5419	10.99	767	1.55	49326	100

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

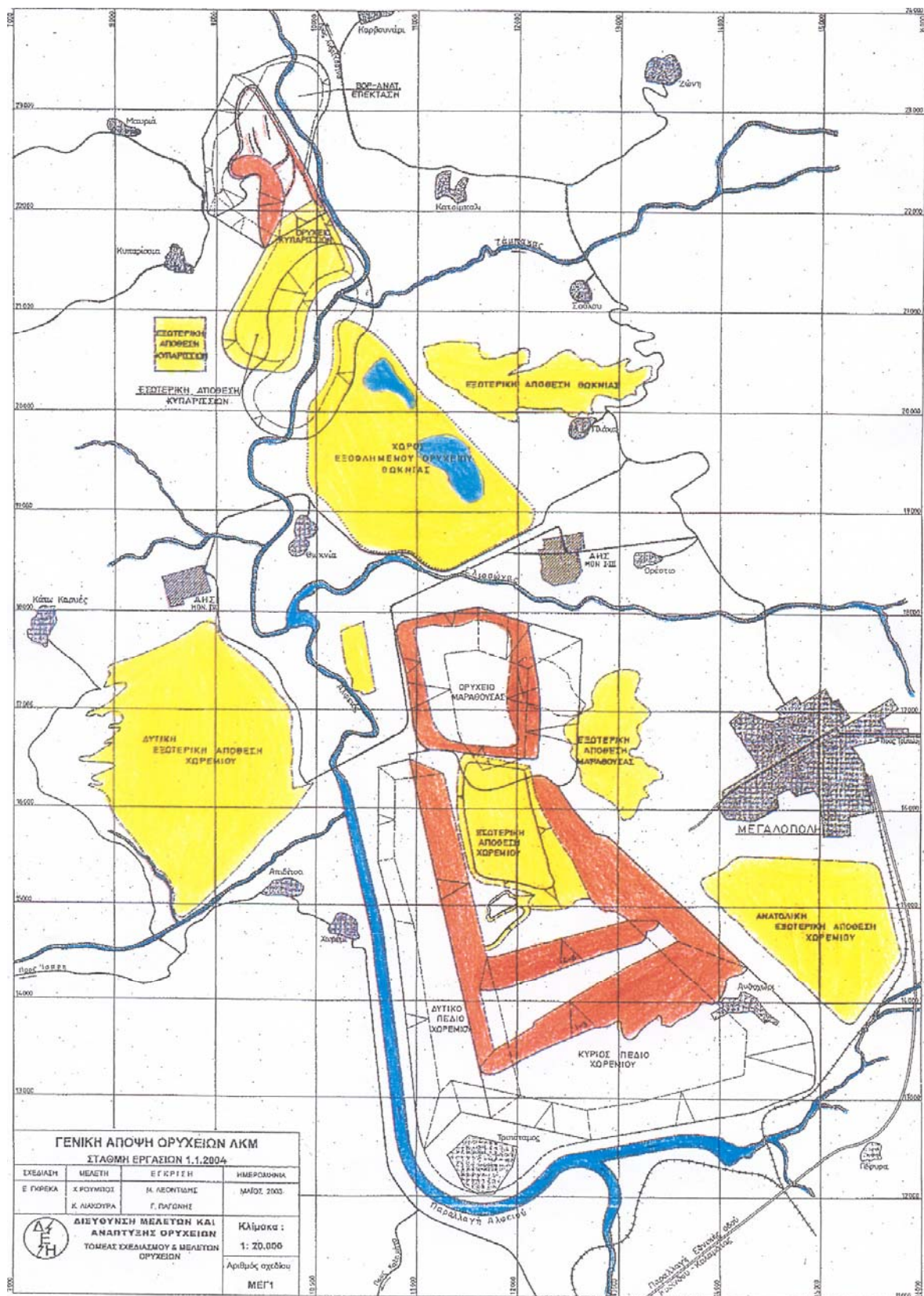
Λόγω της σπουδαιότητας και της σημασίας που έχει ο λιγνίτης για τη χώρα μας, απαιτείται η μελέτη της ποιότητας των αποθεμάτων του και η μέτρηση των ποιοτικών παραμέτρων του απολήψιμου λιγνίτη, με σκοπό τη σωστή αξιολόγησή του.

1.2 Κοιτασματολογικά και ποιοτικά στοιχεία των λιγνιτικών κοιτασμάτων της Μεγαλόπολης

Η περιοχή της Μεγαλόπολης μελετήθηκε για πρώτη φορά όσον αφορά τα στερεά καύσιμα το 1957. Τα ενθαρρυντικά στοιχεία που προέκυψαν, ώθησαν τη ΔΕΗ στην εκμετάλλευση του κοιτάσματος το 1970, μετά τη διαπίστωση βέβαιων αποθεμάτων της

τάξεως των $450 \cdot 10^6$ τόνων λιγνίτη. Το κοίτασμα του λιγνίτη εκτείνεται με τον κύριο άξονα του κατά τη διεύθυνση BN με μήκος περίπου 12 km. Το πλάτος του κοιτάσματος κυμαίνεται από 1 έως 2,5 km. Μια πρόχειρη οριοθέτηση του κοιτάσματος στο χάρτη, είναι από το νοτιότερο σημείο του το χωριό Τριπόταμο έως το βορειότερο σημείο του το χωριό Καρβουνάρι. Εκτός της περιοχής αυτής και σε μια περίμετρο τουλάχιστον 2 km δεν παρατηρείται κάποια άλλη γένεση κοιτάσματος, εκτός της περιοχής στα όρια του χωριού Καρύταινας, η οποία παρουσιάζει ένα μικρό κοίτασμα λιγνίτη.

Όσον αφορά τα κοιτάσματα λιγνίτη, επικρατεί η άποψη ότι στη λεκάνη Μεγαλόπολης υπήρξαν τρεις λίμνες μέσα στις οποίες πραγματοποιήθηκε η γένεση των επιμέρους κοιτασμάτων λιγνίτη. Το κοίτασμα της ευρύτερης περιοχής έχει χωριστεί σε τέσσερα τμήματα εκμετάλλευσης. Τα τμήματα αυτά είναι: 1) το τμήμα Χωρεμίου, 2) το τμήμα Μαραθούσας, 3) το τμήμα Κυπαρισίων και 4) το τμήμα Θωκνίας (το οποίο έχει εξαντληθεί). Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ο χάρτης με τα ορυχεία της Μεγαλόπολης.



Σχήμα 1.1: Χάρτης των ορυχείων της Μεγαλόπολης (ΔΕΗ).

Όσον αφορά το τμήμα του Χωρεμίου, είναι το μεγαλύτερο και σημαντικότερο τμήμα εκμετάλλευσης της ΔΕΗ. Τα περισσότερα αποθέματα λιγνίτη εμφανίζονται στην κατώτερη ζώνη, ενώ στην ανώτερη παρατηρείται έντονη διάβρωση και κατά συνέπεια έχει και τα λιγότερα αποθέματα. Το ολικό βάθος του κοιτάσματος κυμαίνεται από 60 έως 140 m. Το κοιτάσμα έχει διαιρεθεί εκ νέου σε δύο τμήματα, με βάση την διεύθυνση του ποταμού, το Ανατολικό και το Δυτικό Χωρέμι. Το Ανατολικό είναι σε πλήρη ανάπτυξη, ενώ στο Δυτικό η εκμετάλλευση είναι περιστασιακή.

Ο λιγνίτης, ο οποίος θεωρείται πλειστοκαινικός, χαρακτηρίζεται από το υψηλό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας (58-64%). Επίσης υψηλό θεωρείται και το ποσοστό περιεχόμενης τέφρας, σε αντίθεση με τη θερμαντική του ικανότητα, της οποίας ο μέσος όρος είναι 1014 kcal/kg. Μερικά ακόμα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του συγκεκριμένου λιγνίτη μακροσκοπικά, είναι η χαλαρή σύνδεση των κόκκων του και η σπογγώδης υφή. Επίσης, το χρώμα του είναι καστανό έως βαθύ καστανό και μελανό. Όσον αφορά τη σύστασή του, είναι αργιλούχος με χουμικά συστατικά. Επιπλέον, όταν ξηρανθεί, στην επιφάνειά του εμφανίζονται ρωγμές και στη συνέχεια σπάει σε μικρά τεμάχια. Το χρώμα του αλλάζει και γίνεται μελανό έως γκρι.

Τα δεδομένα για την ποιότητα από τη στοιχειακή ανάλυση, τη θερμογόνο δύναμη και το ποσοστό των πτητικών συστατικών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2. Όλες οι τιμές που αναφέρονται στον πίνακα αφορούν τη μέση τιμή.

Πίνακας 1.2: Βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία του λιγνίτη που συναντάται στο κοιτάσμα της Μεγαλόπολης

Στοιχειακή ανάλυση (%)		Θερμογόνος δύναμη επί ξηρού (kcal/kg)	
C	60	Κατώτερη	4640
H	5	Ανώτερη	6218
O	27	Πτητικά συστατικά (%)	63
S	6(0.75-7.85)	Ειδικό βάρος (t/m ³)	1.1-1.2
N	2	Ενεργειακή απόδοση (ton/kWh)	2.6

Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του λιγνίτη που εξάγονται με την προσεγγιστική ανάλυση δίνονται στον Πίνακα 1.3.

Πίνακας 1.3: Βασικές ποιοτικές παράμετροι του λιγνίτη που εξορύσσεται σε κάθε ορυχείο.

Ορυχείο	Υγρασία (%)	Τέφρα (%)	Θερμογόνος δύναμη (kcal /kgr)
Χωρέμι	60.3	14.5	1061
Μαραθούσα	58.4	17.8	995
Κυπαρίσσια	64.2	13.5	869

Γενικά, η ποιότητα του λιγνίτη που εξορύσσεται στα ορυχεία της περιοχής Μεγαλόπολης δεν είναι σταθερή και ομοιόμορφη, αλλά παρουσιάζει ανομοιογένεια, που σχετίζεται με τον τρόπο γένεσης του κοιτάσματος και τα ιδιόμορφα χαρακτηριστικά του (λεπτή στρωμάτωση, μεγάλος αριθμός λιγνιτικών στρωμάτων, τεχνολογία εξόρυξης κλπ.).

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε πεδίου του λιγνιτικού κέντρου Μεγαλόπολης, φαίνονται συνοπτικά στον Πίνακα 1.4. Είναι ευδιάκριτο από τα στοιχεία του πίνακα, ότι το σημαντικότερο προς εκμετάλλευση πεδίο είναι αυτό του Χωρεμίου. Έχει τα περισσότερα αποθέματα σε σχέση με τα άλλα πεδία και μια μέτρια σχέση εκμετάλλευσης. Το κοιτάσμα έχει χωριστεί σε έξι τομές, από τις οποίες στις τέσσερις πραγματοποιείται εκμετάλλευση. Ο κύριος εξοπλισμός εκσκαφής αποτελείται από πέντε καδοφόρους εκσκαφείς, εκ των οποίων οι δύο είναι ονομαστικής ικανότητας 2070 Fm³/h, ενώ οι υπόλοιποι 3 είναι 2800 Fm³/h.

Πίνακας 1.4: Τα απομένοντα αποθέματα (από 1.1.2006) του κάθε ορυχείου σε παράθεση με τη σχέση εκμετάλλευσης και το βάθος σε κάθε ορυχείο (ΔΕΗ).

Πεδίο	Αποθέματα λιγνίτη	Βάθος εκμετάλλευσης	Σχέση εκμετάλλευσης αγόνων-λιγνίτη
	(10 ⁶ τόνοι)	(m)	(m ³ / t)
Χωρεμίου	185	140	1.9
Μαραθούσας	69	150	3.2
Κυπαρισσίων	25	80	2.7

Η μορφολογία της περιοχής, το μικρό πάχος των υπερκείμενων στρωμάτων, καθώς και οικονομικοί λόγοι συνηγορούν στην επιλογή επιφανειακής μεθόδου εκμετάλλευσης. Ένας ακόμη παράγοντας που συνέβαλε στην συγκεκριμένη επιλογή, ήταν η ευρύτητα του πεδίου εφαρμογής της μεθόδου καθώς και η υπάρχουσα τεχνογνωσία. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζεται η Γερμανική συνεχής μέθοδος εξορύξεως με καδοφόρους εκσκαφείς και εκλεκτική απόληψη λιγνίτη και αγόνων υλικών.

Η μέθοδος εκσκαφής είναι η κατά μέτωπο προσβολή. Επιλέχθηκε λόγω του μεγάλου πάχους των στρωμάτων και διότι τα στρώματα αυτά εναλλάσσονται συχνά με άγονα υλικά. Η διακίνηση των εξορυσσόμενων υλικών πραγματοποιείται με σύστημα μεταφορικών ταινιών στις θέσεις απόθεσης λιγνίτη και στις θέσεις απόθεσης αγόνων. Είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται και συμπληρωματικός εξοπλισμός ασυνεχούς εξορύξης, όπως υδραυλικοί εκσκαφείς καδοφόρου πτύου, προωθητές γαιών και φορτωτές. Η μεταφορά του υλικού διενεργείται με φορτηγά αυτοκίνητα. Οι λόγοι της συμπληρωματικής εκμετάλλευσης μπορούν να αποδοθούν στην ανάγκη προετοιμασίας των αρχικών μετώπων των καδοφόρων εκσκαφών ή την υποβοήθηση κατά τη διάρκεια της εργασίας τους. Ένας ακόμα λόγος είναι η συμπληρωματική παραγωγή λιγνίτη. Τον εξοπλισμό και τη διεκπεραίωση του παραπάνω έργου, η ΔΕΗ τα εξασφαλίζει μέσω εργολαβιών.

Η εγκατάσταση του δικτύου ταινιοδρόμων, η κίνηση του καδοφόρου, καθώς και η δημιουργία δρόμων προσπέλασης για τις τομές, πραγματοποιείται με όρυξη κεκλιμένων τάφρων. Το ύψος των μετώπων εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του διατιθέμενου εξοπλισμού και από την ευστάθεια των πρανών. Για τα ορυχεία Μεγαλόπολης το μέσο ύψος μετώπου είναι περίπου 20m. Επίσης τα τελικά πρανή έχουν κλίση 1:1.5 και η γενική κλίση εκσκαφής είναι 1:3, με συντελεστή ασφαλείας $n = 1.13-1.2$, για τελικά βάθη εξορύξης έως 80m.

Τα υλικά που εξορύσσονται στο μέτωπο οδηγούνται στις μεταφορικές ταινίες που αναπτύσσονται κατά μήκος της κάθε τομής και από εκεί στις διευθυντικές ταινίες. Ανάλογα με το είδος του υλικού, λιγνίτης ή άγονο, το υλικό οδηγείται στους χώρους απόθεσης του ορυχείου. Όταν ολοκληρωθεί η εκσκαφή του μετώπου σε όλο το βάθος προσβολής του συγκροτήματος κατά μήκος της τομής, ακολουθεί η προώθηση του συγκροτήματος και η μετάθεση της μεταφορικής ταινίας ώστε να προσεγγίσει το νέο

μέτωπο. Η μετάθεση ανάλογα με την γεωμετρία του κοιτάσματος, μπορεί να είναι παράλληλη ή στροφική ως προς τον προηγούμενο άξονα της ταινίας και συνοδεύεται εάν απαιτείται από επιμήκυνση της αντίστοιχης διευθυντήριας ταινίας. Η μετάθεση γίνεται με την βοήθεια ειδικών προωθητών, οι οποίοι έλκουν τον ταινιόδρομο από τις σιδηροτροχιές πάνω στις οποίες εδράζεται. Για την ανάπτυξη επόμενης τομής, πρέπει να δημιουργηθεί όρυγμα τέτοιου πλάτους, ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια των πρανών των υπερκειμένων εκσκαφών.

Κεφάλαιο 2

Χρήση εν σειρά αναλυτών τέφρας σε μονάδες παραγωγής ενέργειας

Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων λιγνίτη από τη ΔΕΗ, καλύπτει περίπου το 67% της συνολικής παραγωγής σε ηλεκτρική ενέργεια στην Ελλάδα. Οι συνθήκες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε τέτοια κλίμακα, επιβάλλουν καλύτερη και συνεχή παρακολούθηση της διακύμανσης της ποιότητας του λιγνίτη. Η χρήση των εν σειρά (on line) αναλυτών καθίσταται επιβεβλημένη σε τέτοιες μονάδες παραγωγής ενέργειας, έτσι ώστε να συμμορφώνεται η ποιότητα του γαιάνθρακα που οδεύει προς καύση, με εκείνη που καθορίζεται από τις προδιαγραφές του καυστήρα. Οι on line αναλυτές τοποθετούνται πάνω στον ταινιόδρομο μεταφοράς του λιγνίτη και έχουν τη δυνατότητα εκτίμησης των ποιοτικών παραμέτρων του, σε χρόνο της τάξης των μερικών λεπτών (Παυλουδάκης, 1997). Οι συγκεκριμένοι αναλυτές παρέχουν τη δυνατότητα για συνεχή παρακολούθηση του καυσίμου, το οποίο προέρχεται απευθείας από το μέτωπο εξόρυξης και οδεύει προς αποθήκευση ή από την αποθήκευση και οδεύει προς καύση. Συμβάλλουν επίσης, στην καλύτερη διαχείριση των αποθεμάτων γαιάνθρακα, που χωρίζονται σε υψηλής, μέτριας και χαμηλής ποιότητας και με κατάλληλη μίξη προσδίδουν κατά την καύση τους το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας. Εκτός από τους παραπάνω πρωταρχικούς στόχους που επιτελούνται από την εγκατάσταση ενός τέτοιου αναλυτή, καλύπτονται και άλλοι σημαντικοί στόχοι όπως :

- Η σταθεροποίηση ή/ και αύξηση της ποιότητας του καυσίμου που οδεύει προς καύση.
- Η αύξηση της παραγωγικότητας του εργοστασίου παραγωγής ενέργειας.
- Η μείωση του κόστους παραγωγής της ενέργειας, μέσω της μείωσης της απώλειας γαιάνθρακα (η κακή ποιότητα που δεν πληροί τις προδιαγραφές του καυστήρα, εντοπίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια και σε σύντομο χρόνο, γεγονός που επιτρέπει την απόθεσή του σε χώρους αποθήκευσης για μετέπειτα αναβάθμισή του).

- Μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων (CO_2 και NO_x) της μονάδας παραγωγής, έτσι ώστε να υπάρχει συμμόρφωση με τα όρια που έχουν θεσπιστεί με την υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο.

Όσον αφορά τη σύγκριση των μετρήσεων των ποιοτικών χαρακτηριστικών των γαιανθράκων, που πραγματοποιούνται στο χημικό εργαστήριο και εκείνων από τους on line αναλυτές, υπάρχει μια σημαντική διαφορά όσον αφορά το μέγεθος δείγματος που μετράται. Οι αναλυτές καταγράφουν τα χαρακτηριστικά του στερεού καυσίμου σε ακατέργαστη μορφή, όπως ακριβώς αυτό εξέρχεται από τα μέτωπα της εκμετάλλευσης. Το δείγμα που χρησιμοποιείται για τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται στο χημείο, λαμβάνεται βάσει συγκεκριμένης μεθόδου και προκατασκευάζεται ανάλογα με τη διαδικασία ανάλυσης. Μια ακόμη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι, η δειγματοληψία κατά τις αναλύσεις στο χημείο γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ενώ για τους on line αναλυτές είναι μια συνεχής διαδικασία. Επίσης, οι αναλυτές καταγράφουν ένα φυσικό χαρακτηριστικό του γαιάνθρακα, ενώ τα χημικά εργαστήρια ένα χημικό χαρακτηριστικό του. Μια ακόμη διαφορά είναι στην ποσότητα του δείγματος που εξετάζεται με τον κάθε τρόπο. Οι αναλυτές μετρούν ένα πολύ μεγάλο ποσό γαιάνθρακα, γεγονός που βεβαιώνει ότι το δείγμα είναι αντιπροσωπευτικό του γαιάνθρακα που εξορύσσεται. Αντίθετα, τα δείγματα του χημείου είναι μικρές ποσότητες και από συγκεκριμένα σημεία, γεγονός που σημαίνει ότι δεν αντιπροσωπεύουν επακριβώς το γαιάνθρακα που εξορύσσεται, αλλά αποτελούν προσέγγισή του. Η ποιότητα της προσέγγισης εξαρτάται από τον τρόπο επιλογής των σημείων δειγματοληψίας, που για κάθε τομή και πεδίο ποικίλει. Η σύγκριση συγκεντρωτικά φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.2: Σύγκριση ποιοτικού ελέγχου που πραγματοποιείται από το χημείο και από τον αναλυτή.

Διαδικασία	Χημικό εργαστήριο	On line αναλυτές
Δειγματοληψία	Ανά τακτά χρονικά διαστήματα	Συνεχής
	Σε επιλεγμένα σημεία σε κάθε τομή του κάθε πεδίου εκμετάλλευσης	Από όλα τα σημεία του κάθε πεδίου εκμετάλλευσης
Μορφή δείγματος	Ποικίλουν ανάλογα με την ανάλυση που ακολουθεί	Όλα τα δείγματα είναι ίδιας μορφής
	Επεξεργασμένο	Ακατέργαστο
Ποσότητα δείγματος	Μικρές ποσότητες (500 - 1000gr)	Μεγάλες ποσότητες (1000 - 2500gr)
Μέτρηση	Χημικών χαρακτηριστικών του γαιάνθρακα	Φυσικών χαρακτηριστικών του γαιάνθρακα

2.1 Τύποι on line αναλυτών τέφρας

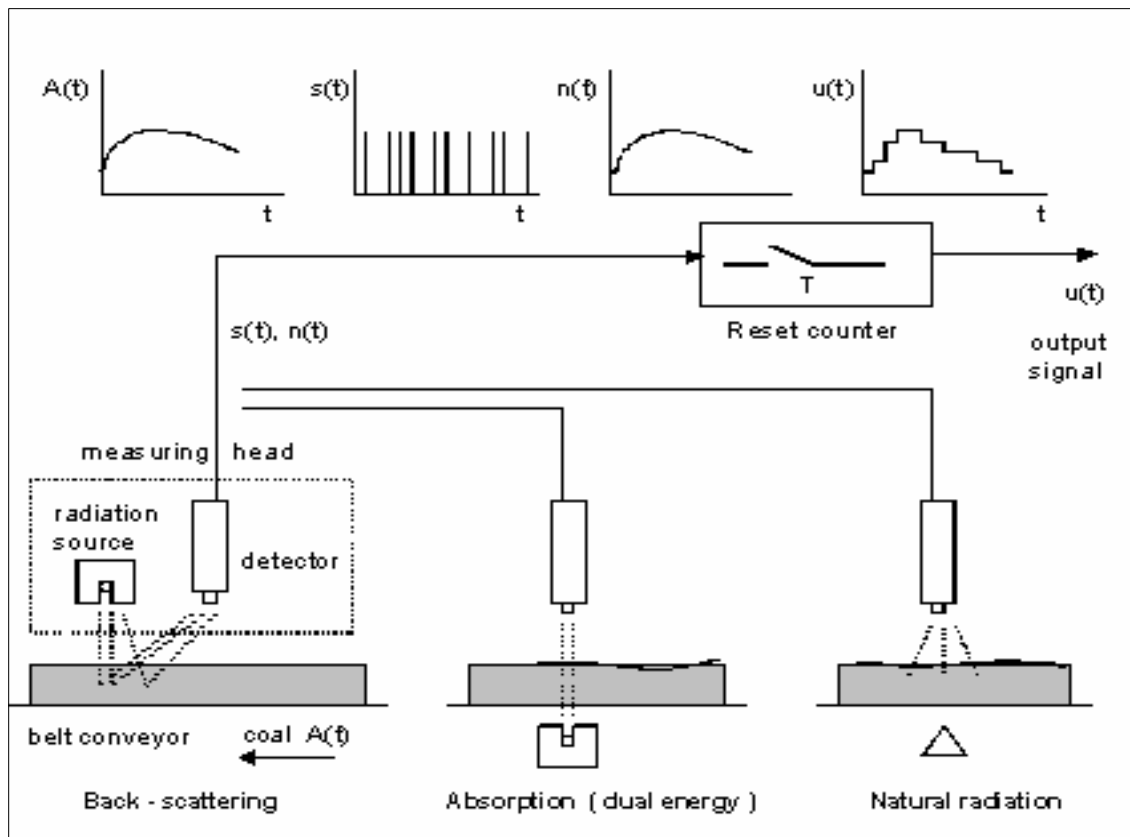
Οι συσκευές on line παρακολούθησης της ποιότητας των γαιανθράκων, χρησιμοποιούνται λόγω της ικανότητάς τους να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα του παραγόμενου γαιάνθρακα σε συνεχή βάση και σε συντομότερο διάστημα σε σχέση με τα αναλυτικά εργαστήρια. Ήδη πολλές εταιρίες κατασκευάζουν και εκμεταλλεύονται εμπορικά on line αναλυτές διαφόρων τύπων.

Οι αναλυτές αυτοί κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες :

- 1) Αναλυτές που παρακολουθούν τις διακυμάνσεις των κύριων ποιοτικών χαρακτηριστικών των γαιανθράκων, όπως είναι οι περιεκτικότητες σε τέφρα ή υγρασία.
- 2) Αναλυτές που μπορούν να πραγματοποιήσουν στοιχειακή ανάλυση των γαιανθράκων.

Πληροφορίες που συλλέγονται από τους αναλυτές των δύο παραπάνω κατηγοριών, χρησιμοποιούνται σήμερα σε πλήθος εφαρμογών πραγματικής κλίμακας, για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών εξόρυξης, εμπλουτισμού, καύσης και παραγωγής κωκ, επιτυγχάνοντας συνήθως χρόνους απόσβεσης μικρότερους από ένα έτος (IEA, 1994 & Michaelides, 1999 & Pongpirodom, 2000).

Στην πρώτη κατηγορία συμπεριλαμβάνονται οι αναλυτές μέτρησης φυσικής ραδιενέργειας, αναλυτές καταγραφής της σκέδασης των ακτίνων γ, αναλυτές μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας (στην κατηγορία αυτή ανήκει και ο υπό μελέτη αναλυτής). Οι τύποι των αναλυτών της πρώτης κατηγορίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1 (όπου $A(t)$ το ποσοστό τέφρας, $s(t)$ ο αριθμός των παλμών, $n(t)$ η ένταση των παλμών, $u(t)$ η μορφή του σήματος εξαγωγής και t είναι ο χρόνος).



Σχήμα 2.3: Διατάξεις των κύριων τύπων αναλυτών απευθείας παρακολούθησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του γαιάνθρακα.

On line αναλυτές μέτρησης της φυσικής ραδιενέργειας

Οι αναλυτές που μετρούν τη φυσική ραδιενέργεια ακτίνων γ που εκπέμπεται από τον γαιάνθρακα, είναι τα πιο απλά συστήματα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Βασίζονται στην ακτινοβολία γ που εκπέμπουν το ουράνιο, το θόριο και το κάλιο, τα οποία περιέχονται στο γαιάνθρακα. Τα στοιχεία αυτά εμφανίζονται σε όλα τα πετρώματα σε διαφορετικές όμως ποσότητες, ανάλογα με τη γεωλογική τους ιστορία και την ορυκτολογική τους σύσταση. Άργιλοι και σχιστόλιθοι εκπέμπουν συνήθως περισσότερη ραδιενέργεια σε σχέση με τους ψαμμίτες και τους ασβεστολίθους, ενώ οι γαιάνθρακες εκπέμπουν πολύ λίγη (Mathew, 1990).

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο γεγονός ότι τα ανόργανα συστατικά του γαιάνθρακα εκπέμπουν ακτινοβολία γ πολύ υψηλής έντασης. Τα οργανικά συστατικά του γαιάνθρακα αντίθετα εκπέμπουν χαμηλής έντασης ακτινοβολία γ. Η μέτρηση της διαφοράς ενέργειας είναι ικανή να προσδώσει αρκετά ακριβείς μετρήσεις της περιεχόμενης τέφρας. Η ακρίβεια του συγκεκριμένου αναλυτή για τον γαιάνθρακα που εξέρχεται από το μέτωπο εκμετάλλευσης, είναι της τάξης του 2–3% και του 1% για λειοτριβιμένο καύσιμο.

Τα επιμέρους τμήματα των αναλυτών φυσικής ραδιενέργειας είναι ένας κύριος ανιχνευτής, ένας ταινιοζυγός, μια μικρή μονάδα διαχείρισης των δεδομένων της μέτρησης και ένας κύριος υπολογιστής με το λογισμικό επεξεργασίας. Ο ανιχνευτής αποτελείται από κρύσταλλο ιωδιούχου νατρίου με πρόσμιξη θαλίου. Μετά τον ανιχνευτή τοποθετείται ένας φωτοπολλαπλασιαστής. Ο πολλαπλασιαστής ενισχύει την απόκριση του ανιχνευτή, έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η ανάλυση των δεδομένων. Η όλη διάταξη βρίσκεται μέσα σε ένα κάλυμμα με επίστρωση μολύβδου, για να μη δέχεται ο ανιχνευτής άλλη ακτινοβολία από το περιβάλλον, εκτός του εξεταζόμενου γαιάνθρακα. Θα πρέπει να αναφερθεί επίσης, ότι είναι δυνατή η μεταβολή της ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας κατά ένα σημαντικό ποσό, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Η μεταβολή των καιρικών συνθηκών, έχει ως αποτέλεσμα να μεταβάλλεται σημαντικά το ποσό της συνολικής ακτινοβολίας, καθώς παρατηρείται το φαινόμενο της διάσπασης των θυγατρικών στοιχείων του ραδονίου και του θορίου (Mathew, 1990).

Όσον αφορά την εξίσωση που δίνει την περιεκτικότητα του γαιάνθρακα σε τέφρα, αυτή έχει την ακόλουθη μορφή:

$$A = a_1 M + \alpha_2 C_n + \alpha_3 M C_n \quad (\text{Wykes et al., 1989}) \quad (2.1)$$

όπου : A , η περιεκτικότητα σε τέφρα, σε kg/m.

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, σταθερές βαθμονόμησης του αναλυτή.

M , το ολικό φορτίο μάζας, σε kg/m.

C_n , ο αριθμός των σπινθηρισμών που καταγράφηκαν (αφού αφαιρεθούν οι σπινθηρισμοί της ακτινοβολίας του υποβάθρου).

Τα συστήματα αυτού του είδους, δεν είναι τα πιο ακριβή σε σχέση με τα συστήματα των άλλων τύπων. Τα πλεονεκτήματά τους είναι το χαμηλό κόστος τους και η απουσία εξωτερικής πηγής ραδιενεργού ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η ανάγκη λήψης ειδικής άδειας για κατοχή της πηγής, καθώς και η χρήση εξειδικευμένου προσωπικού για συντήρηση και επισκευές. Επίσης, ο συγκεκριμένου τύπου αναλυτής, έχει μικρές απαιτήσεις για υποστήριξη από ηλεκτρονικά βοηθητικά συστήματα (Taylor and Wykes, 1993 & Mathew, 1990)

Ένας από τους κυριότερους παράγοντες που συμβάλλουν στη δημιουργία σφαλμάτων στις μετρήσεις του αναλυτή είναι η ακρίβεια του ταινιοζυγού. Μια χαμηλή ακρίβεια στον ταινιοζυγό που δίνει για παράδειγμα σφάλμα 10% στη μέτρηση του βάρους, προκαλεί στον αναλυτή σφάλμα 1–2%. Ακόμα ένας παράγοντας, είναι η διαστρωμάτωση του γαιάνθρακα πάνω στη μεταφορική ταινία που δημιουργεί ανομοιογένεια και επηρεάζει τον αναλυτή. Αυτό συμβαίνει διότι, ενώ στο σημείο που η στρώση του υλικού στην ταινία έχει σημαντικό ύψος, ο αναλυτής καταγράφει υψηλότερη τιμή τέφρας. Στο σημείο που το υλικό πάνω στην ταινία έχει πολύ μικρό ύψος, η τιμή της τέφρας που μετρά ο αναλυτής είναι πολύ μικρότερη από αυτή που μετρά με σημαντικό ύψος υλικού στην ταινία. Λόγω της υψηλής ταχύτητας της μεταφορικής ταινίας, οι παλμοί που καταγράφει ο ανιχνευτής είναι πολύ κοντά ο ένας με τον άλλο. Με τον τρόπο αυτόν είναι δυνατό να επικαλύψουν οι υψηλοί παλμοί τους χαμηλούς, με αποτέλεσμα την εσφαλμένη μέτρηση. Επίσης, σφάλμα προκαλούν τα τεμάχια γαιάνθρακα με πολύ μεγάλη διάμετρο πάνω στη ταινία. Η ιδανική κοκκομετρία είναι έως 75mm, όμως αποδεκτό θεωρείται και μέγεθος έως 300mm. Τέλος, η πολύ μικρή ποσότητα που μπορεί να μεταφέρει μια ταινία είναι παράγοντας που δημιουργεί σφάλμα στη μέτρηση. Για ταινίες πλάτους 1m το κατώτερο ποσό είναι 25 kg/m, ενώ για ταινίες πλάτους 2m το κατώτερο όριο είναι 40 kg/m. Η διακύμανση της περιεκτικότητας σε σίδηρο, δεν επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις του αναλυτή.

Οι ιδανικές συνθήκες για την εγκατάσταση αναλυτών μέτρησης της φυσικής ραδιενέργειας των γαιανθράκων συνοψίζονται παρακάτω (Taylor & Wykes, 1993):

- περιεκτικότητα του γαιάνθρακα σε τέφρα μεγαλύτερη από 10%.
- φόρτιση της μεταφορικής ταινίας με ρυθμό μεγαλύτερο από 25 kg/m.
- ομοιογενής διαστρωμάτωση των υλικών πάνω στη μεταφορική ταινία.
- ύπαρξη περιορισμένων ποσοτήτων ψαμμίτη στην ανόργανη ύλη του γαιάνθρακα.
- ύπαρξη ταινιοζυγού με ακρίβεια 1% και με ικανότητα μέτρησης τόσο της μεταφερόμενης μάζας, όσο και της ταχύτητας κίνησης της ταινίας, τοποθετημένου σε απόσταση 200m από το σημείο τοποθέτησης του αναλυτή.
- ύπαρξη χώρου μήκους 3m, κατά μήκος της μεταφορικής ταινίας, για την τοποθέτηση του αναλυτή.
- τοποθέτηση του σημείου ελέγχου και διαχείρισης της ποιότητας του γαιάνθρακα, σε απόσταση μικρότερη από 1.5 km.

Περίπου 40 on line αναλυτές μέτρησης της φυσικής ραδιενέργειας είχαν εγκατασταθεί μέχρι το 1994 σε ορυχεία του Ηνωμένου Βασιλείου, είτε για την παρακολούθηση της ποιότητας του γαιάνθρακα που εξέρχεται από το ορυχείο, είτε για την παρακολούθηση της ποιότητας του ομογενοποιημένου καυσίμου. Αρκετά συστήματα του ίδιου τύπου, είναι επίσης εγκατεστημένα σε ορυχεία φαιάνθρακα της Αυστραλίας και της Πολωνίας (IEA, 1994 & Sikora et al., 1999).

Τέλος, άξιο αναφοράς είναι η ανάπτυξη ενός φορητού συστήματος μέτρησης της φυσικής ραδιενέργειας (Ash probe) που χρησιμοποιείται για μετρήσεις στις σωρούς απόθεσης του γαιάνθρακα. Η ακρίβειά του είναι, σύμφωνα με τους κατασκευαστές του, της τάξης του 0.5–1% (Taylor, 1999). Το σύστημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.4: Φορητό σύστημα μέτρησης της φυσικής ραδιενέργειας του λιγνίτη.

On line αναλυτές καταγραφής της σκέδασης των ακτίνων γ

Η πιο διαδεδομένη τεχνική προσδιορισμού της περιεκτικότητας του γαιάνθρακα σε τέφρα, είναι αυτή της σκέδασης των ακτίνων γ (γ-ray backscatter). Οι ακτίνες γ έχουν μεγαλύτερη διεισδυτική ικανότητα από τις ακτίνες X, που δοκιμάστηκαν πρώτες για τέτοιας διάταξης αναλυτές, με συνέπεια την καλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση. Ο συγκεκριμένος αναλυτής αντιμετωπίζει προβλήματα, λόγω της αυξομείωσης του ύψους του γαιάνθρακα πάνω στη μεταφορική ταινία, γεγονός που συνεπάγεται διαφορετική απόσταση από την πηγή ακτινοβολίας και τον δέκτη. Η διακύμανση αυτή του ύψους του γαιάνθρακα, προκαλεί σημαντικά σφάλματα στα αποτελέσματα που δίνει ο αναλυτής. Η εγκατάστασή του είναι προτιμότερο να πραγματοποιείται σε κάποια ταινία εκτροπής, όπου πριν τη διέλευση του γαιάνθρακα από τον αναλυτή θα προηγείται εξομάλυνση της επιφάνειάς του (Klein, 1993).

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι στοιχειακοί αναλυτές, οι οποίοι αποτελούν την τελευταία εξέλιξη όσον αφορά τα on line συστήματα ελέγχου ποιότητας του γαιάνθρακα. Οι αναλυτές αυτοί, πραγματοποιούν στοιχειακή ανάλυση πρώτα και έπειτα με έμμεσο τρόπο υπολογίζεται η περιεχόμενη τέφρα και η θερμογόνος δύναμη. Ο υπολογισμός της θερμογόνου δύναμης (Mj/kg) γίνεται με την εισαγωγή των τιμών της περιεκτικότητας στοιχείων όπως C, O, H και S σε έναν αλγόριθμο. Ο υπολογισμός της εμπεριεχόμενης τέφρας γίνεται με παρόμοιο τρόπο, αλλά χρησιμοποιούνται τα στοιχεία Si, Ca, Al, και Fe. Επίσης, η μέτρηση της περιεκτικότητας του S του γαιάνθρακα, βοηθά στον περιορισμό των εκπομπών SO₂ κατά την καύση του στις μονάδες παραγωγής ενέργειας. Τέλος, ο προσδιορισμός στοιχείων όπως το Na και Cl είναι πολύ σημαντικός, διότι προκαλούν πρόβλημα στον καυστήρα και στις σωληνώσεις του. Υπάρχουν δύο είδη αναλυτών αυτού του τύπου, οι αναλυτές τύπου PGNAA (prompt gamma neutron activation analysis) και οι αναλυτές που βασίζονται στη μέθοδο φθορισμομετρίας ακτίνων X.

Αναλυτές τύπου PGNAA (prompt gamma neutron activation analysis)

Οι αναλυτές αυτοί βασίζονται στην εκπομπή ακτινοβολίας γ από έναν πυρήνα ατόμου καθώς αυτός επιστρέφει από μια κατάσταση διέγερσης, στην κατάσταση ισορροπίας του. Ο πυρήνας έρχεται σε κατάσταση διέγερσης έπειτα από βομβαρδισμό του με νετρόνια που εκπέμπονται από ραδιενεργό ισότοπο. Μια πηγή ακτινοβολίας είναι το ²⁵²Cf που εκπέμπει νετρόνια με μέση ενέργεια 2 MeV. Έτσι, όταν ένα νετρόνιο προσκρούσει σε έναν πυρήνα ενός ατόμου που αποτελεί το γαιάνθρακα, απορροφάται από αυτόν. Ο συγκεκριμένος πυρήνας διεγείρεται και έπειτα εξέρχεται αυτής της κατάστασης εκπέμποντας σχεδόν στιγμιαία ακτινοβολία γ.

Ο βομβαρδισμός των νετρονίων έχει διαφορετική επίδραση σε κάθε στοιχείο του γαιάνθρακα. Οι διαφορές αυτές εμφανίζονται για δύο βασικούς παράγοντες :

- Κάποια στοιχεία έχουν την τάση να διεγείρονται ευκολότερα από κάποια άλλα. Το υδρογόνο, ο σίδηρος και το χλώριο διεγείρονται πολύ εύκολα, ενώ το θείο και τα περισσότερα στοιχεία της τέφρας δυσκολότερα. Αντίθετα, ο στοιχειακός άνθρακας και το οξυγόνο διεγείρονται ελάχιστα.

- Κάθε στοιχείο εκπέμπει, με γνωστή πιθανότητα, έναν καθορισμένο αριθμό ακτίνων γ , συγκεκριμένων ενεργειακών στάθμεων. Το ασβέστιο, για παράδειγμα, παράγει ακτίνες γ πολλών ενεργειακών στάθμεων και κυρίως στα 4.42 και 6.42 MeV.

Οι χαρακτηριστικές ακτινοβολίες γ του κάθε στοιχείου, που αποτελεί μέρος του γαιάνθρακα, συνθέτουν το αντιπροσωπευτικό φάσμα των ενεργειών τους. Ο ανιχνευτής που χρησιμοποιείται είναι από γερμάνιο και βισμούθιο (BGO detector–Bismuth Germanium Oxide), ο οποίος έχει τη δυνατότητα να διακρίνει τρία ευδιάκριτα ενεργειακά φάσματα ακτίνων γ . Οι κορυφές που εμφανίζονται στο φάσμα αυτό, δηλώνουν την παρουσία του κάθε στοιχείου και είναι ανάλογες της ποσότητάς του στο γαιάνθρακα.

Το γεγονός της μη διέγερσης του άνθρακα από τον βομβαρδισμό του με νετρόνια, δε σημαίνει ότι είναι δύσκολος ο προσδιορισμός του. Οι μεγάλες τιμές της συγκέντρωσής του σε όλα τα είδη γαιάνθρακα, καθιστά τον προσδιορισμό της ποσότητάς του απλό. Το μόνο στοιχείο που δεν μετράται άμεσα από το συγκεκριμένο αναλυτή είναι το οξυγόνο. Το γεγονός αυτό ισχύει τόσο στις on line εφαρμογές του συστήματος, όσο και στις εργαστηριακές εφαρμογές της μεθόδου (Reeves, 1995).

Οι συνήθεις αναλυτές PGNAΑ μπορούν να μετρήσουν τα στοιχεία C, H, S, N, Cl, Si, Al, Fe, Ti, Ca, K και Na. Χρησιμοποιώντας την περιεκτικότητα των στοιχείων και ορισμένους αλγορίθμους, είναι δυνατό να υπολογιστεί η περιεχόμενη τέφρα και η θερμογόνος δύναμη του υπό ανάλυση γαιάνθρακα. Ο χρόνος μέτρησης είναι περίπου 10min για ακρίβεια στον υπολογισμό της θερμογόνου δύναμης της τάξης των 174.45 kJ/kg. Όσον αφορά την ακρίβεια στον υπολογισμό της περιεχόμενης τέφρας, της υγρασίας και του θείου, είναι της τάξης του 0,4%, 0,2%, 0,04% αντίστοιχα. Όταν οι αναλυτές εφαρμόζονται σε ταινίες εκτροπής (by pass) η ακρίβεια εξαρτάται από τον τρόπο που εκτρέπεται η ταινία. Δηλαδή, το πόσο αντιπροσωπευτικό είναι το ποσό του γαιάνθρακα που εξέρχεται από την κύρια ταινία σε σχέση με το σύνολο του γαιάνθρακα που μεταφέρεται από αυτήν.

Ένα πρωτότυπο σύστημα on line ελέγχου ποιότητας έχει εξελιχθεί βασιζόμενο στην αρχή λειτουργίας του PGNAΑ στο πανεπιστήμιο του δυτικού Κεντάκι. Ο λόγος κατασκευής του ήταν να αυξηθεί η ικανότητα ανάλυσης, σε περισσότερους τόνους ανά ώρα γαιάνθρακα. Επίσης, ο συγκεκριμένος αναλυτής έχει τη δυνατότητα της αυτόματης

ρύθμισης των παραμέτρων του, για την εφαρμογή του σε συγκεκριμένου τύπου γαιάνθρακα. Ακόμα ένα πλεονεκτήματά του, είναι η ακριβέστερη μέτρηση του άνθρακα, του νατρίου και του οξυγόνου.

Μια σημαντική διαφορά με την PGNAA είναι στην πηγή εκπομπής νετρονίων. Στο πρότυπο, η πηγή είναι ένα παλλόμενο δευτέριο τρίτιο που παράγει ακτινοβολία νετρονίων ενέργειας 14 MeV. Η τεχνική που χρησιμοποιείται καλείται PFTNA (Pulsed Fast Thermal Neutron Analysis) και το πλεονέκτημά της είναι ότι χρησιμοποιεί και τις ταχείες και τις θερμικές αντιδράσεις των νετρονίων. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η ποικιλία των αντιδράσεων των νετρονίων και ξεχωρίζοντας τις ταχείες από τις θερμικές αντιδράσεις, είναι δυνατό να μετρηθούν περισσότερα στοιχεία και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η τεχνική αυτή, έχει αποδειχτεί ότι μετρά όλα τα κύρια και μη στοιχεία με ακρίβεια, καθώς και τα στοιχεία C, O και Na που είναι δύσκολο να προσδιοριστούν από πηγή ραδιοϊσοτόπου. Απαραίτητες προϋποθέσεις για τη σωστή λειτουργία του συστήματος είναι :

- Η παροχή μιας βάσης δεδομένων με τις εντάσεις των ακτινοβολιών γ, καθώς και ενός συνόλου με συντελεστές διόρθωσης, για να έχει τη δυνατότητα ο αναλυτής να προσαρμόζεται στις αλλαγές της σύστασης του γαιάνθρακα.
- Η μέτρηση με ακρίβεια των C και O στο χημικό εργαστήριο, ώστε να δοθεί στον αναλυτή μια τιμή της θερμογόνου δύναμης, η οποία θα είναι ανεξάρτητη από το ποσό του γαιάνθρακα που διέρχεται από τον αναλυτή.
- Η μέτρηση του στοιχείου Na σε μεγάλο εύρος δειγμάτων, έτσι ώστε η τιμή του να θεωρείται αντιπροσωπευτική.

Ο τρόπος μέτρησης των στοιχείων πραγματοποιείται με ροή του γαιάνθρακα, ο οποίος βομβαρδίζεται από νετρόνια που έχουν ενέργεια 14 MeV. Η ενέργεια αυτή μεταφέρεται στον γαιάνθρακα με παλμούς, οι οποίοι έχουν πλάτος μερικά msec και συχνότητα μερικών kHz. Τα υψηλής ενέργειας νετρόνια αλληλεπιδρούν με στοιχεία όπως C και O, τα οποία εκπέμπουν τη χαρακτηριστική τους ακτινοβολία γ. Μεταξύ των ενεργειακών παλμών των νετρονίων, τα γρήγορα νετρόνια χάνουν την ενέργειά τους στο γαιάνθρακα μέσω της διασποράς τους με τα ελαφριά στοιχεία, πράγμα που υποδεικνύει θερμικές αντιδράσεις σύλληψης νετρονίων. Τέτοιες αντιδράσεις μετρούν τα στοιχεία H, S και Cl. Για τη μέτρηση του Na πραγματοποιείται ενεργοποίηση των νετρονίων, τα

οποία παράγουν ισότοπα με χρόνο ημίσειας ζωής της τάξεως του δευτερολέπτου, δηλαδή μεγαλύτερο από αυτόν των νετρονίων που συμμετέχουν στις θερμικές και ταχείες αντιδράσεις σύλληψης. Οι παραπάνω τρόποι μέτρησης, δείχνουν ότι η εκπομπή ακτινοβολίας γ είναι συνέπεια τριών κατηγοριών αντιδράσεων, θερμική, ταχεία και ενεργοποιημένων νετρονίων. Οι ενέργειες των ακτινοβολιών κάθε κατηγορίας προβάλλονται σε διαφορετικά ενεργειακά φάσματα, με βάση το χρόνο διεξαγωγής των αντιδράσεων. Έτσι, μειώνεται δραστικά ο θόρυβος του υποβάθρου που συναντάται στα φάσματα που λαμβάνονται από πηγές ραδιοϊσοτόπων και καθιστούν δύσκολο τον προσδιορισμό των στοιχείων C και O.

Ο αναλυτής είναι τοποθετημένος σε ένα ρυμουλκούμενο κοντέϊνερ διαστάσεων 2,4*2,6*14,6m, στο οποίο η θερμοκρασία είναι ελεγχόμενη. Ο εσωτερικός του χώρος είναι χωρισμένος σε δύο μέρη (μπροστά και πίσω). Το μπροστά διαμέρισμα περιέχει το κυρίως τμήμα του αναλυτή, ενώ το πίσω διαμέρισμα περιέχει τον υπολογιστή και τους χειριστές του αναλυτή. Για την προστασία των χειριστών από την ραδιενέργεια τα δύο διαμερίσματα χωρίζονται με μια μικρή δεξαμενή νερού. Εισέρχεται επίσης ένας ανελκυστήρας κάδου (18m), που εισάγει το γαιάνθρακα στον αναλυτή. Για την εξαγωγή του είναι εγκατεστημένη μια μεταφορική ταινία 5m μήκους και 30cm πλάτους περίπου. Η απαίτηση σε ποσότητα του αναλυτή είναι 600kg και έχει ικανότητα μέτρησης γαιάνθρακα που η στρώση του δεν ξεπερνά τα 10cm ύψος. Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Το κοντέϊνερ στο οποίο βρίσκεται ο πρωτότυπος αναλυτής.

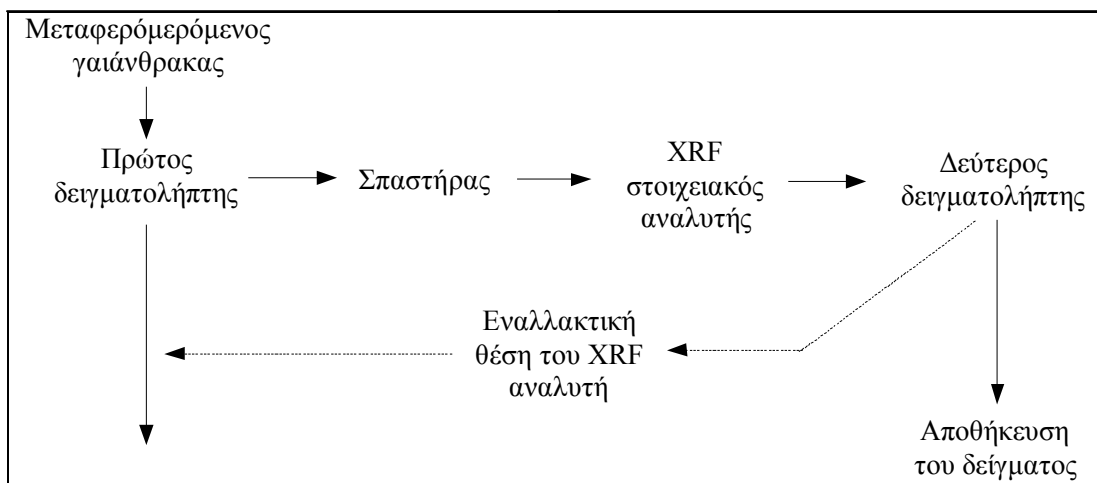
Το κόστος ενός αναλυτή τύπου PGNAΑ μαζί με το λογισμικό που συνοδεύεται είναι αρκετά υψηλό (450.000–850.000\$), γργονός που αποτελεί το σημαντικότερο μειονέκτημά του. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι τα υπόλοιπα on line συστήματα ελέγχου ποιότητας, έχουν κόστος έως και 80% μικρότερο (Reeves, 1995).

Εκτός από τον τομέα εξόρυξης και αξιοποίησης γαιανθράκων, η χρήση PGNAΑ αναλυτών είναι επίσης αρκετά διαδεδομένη και σε άλλους τομείς εκμετάλλευσης ορυκτών και ιδιαίτερα στον τομέα παραγωγής τσιμέντου (Maheshwari, 1997 & Regis, 1997). Αναλυτές PGNAΑ είναι εγκατεστημένοι και σε εργαστήρια, παρέχοντας τη δυνατότητα ανάλυσης ενός δείγματος μέσα σε χρονικό διάστημα 10min (Foster, 1997).

Αναλυτές τύπου φθορισμομετρίας ακτινών x (x-ray fluorescence)

Η αρχή λειτουργίας του αναλυτή, είναι παρόμοια με αυτή του αναλυτή PGNAΑ. Μόνο που εδώ για τη διέγερση των ατόμων των στοιχείων χρησιμοποιείται πηγή ακτίνων Χ. Η πρόσπτωση της ακτινοβολίας στο γαιάνθρακα, διεγείρει τα άτομά του και αυτά εκπέμπουν δευτερογενή ακτινοβολία (φθορισμός) ακτινών Χ, της οποίας το φάσμα είναι χαρακτηριστικό και καταγράφεται και αναλύεται. Ο αναλυτής αποτελείται από μια πηγή παραγωγής ακτίνων Χ, ένα φίλτρο πρωτογενούς ακτινοβολίας, έναν ευθυγραμμιστή, έναν αναλυτή κρύσταλλο και έναν ανιχνευτή. Επίσης, ο αναλυτής συνοδεύεται και από ένα ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης και καταγραφής.

Το φίλτρο πρωτογενούς ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για να βελτιώσει το λόγο της έντασης της ακτινοβολίας προς το θόρυβο του υποβάθρου. Συνήθως είναι ένα πολύ λεπτό (0.2mm) έλασμα Al ή Cu. Ο ευθυγραμμιστής αποτελείται από μια σειρά ελασμάτων που απέχουν μεταξύ τους 0.13 έως 1.3mm. Σκοπός του είναι η εκπεμπόμενη από το δείγμα ακτινοβολία να γίνει παράλληλη. Ο κρύσταλλος αναλυτής χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει την πολυχρωματική ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτόν, σε ξεχωριστές. Έτσι, η πρωτογενής ακτινοβολία Χ προσπίπτει στο γαιάνθρακα και αυτός εκπέμπει δευτερογενή ακτινοβολία ακτίνων Χ, η οποία ενισχύεται, ευθυγραμμίζεται, διαχωρίζεται και τέλος ανιχνεύεται από μια διάταξη ανίχνευσης. Η πηγή παράγει ακτινοβολία, της οποίας η ενέργεια είναι από 3 έως 20 keV. Επίσης ο ανιχνευτής αποτελείται από πυρίτιο.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα που δείχνει τη θέση του αναλυτή και τα στάδια προετοιμασίας του γαιάνθρακα.

Στις εφαρμογές για ανάλυση μέρους του διακινούμενου από την ταινία υλικού, ο αναλυτής τοποθετείται σε ταινία εκτροπής και όχι στην κύρια ταινία μεταφοράς γαιάνθρακα. Εάν το σύστημα δειγματοληψίας αποτελείται από ένα μηχανικό βραχίονα που σαρώνει τη μεταφορική ταινία κάθετα προς την κατεύθυνση κίνησής της, τότε ο αναλυτής τοποθετείται οπωσδήποτε μετά το σπαστήρα και πριν το δευτερεύοντα δειγματολήπτη. Διαφορετικά, η τοποθέτησή του γίνεται μετά το δεύτερο δειγματολήπτη. Σε κάθε περίπτωση όμως το συλλεγόμενο δείγμα πρέπει να θραύεται σε μέγεθος περίπου 10mm, έτσι ώστε να δημιουργείται μια ομοιόμορφη επιφάνεια δείγματος, η οποία θα οδηγηθεί προς ανάλυση. Η διάταξη του συστήματος του XRF αναλυτή, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Επίσης, είναι δυνατή η χρησιμοποίηση οποιουδήποτε συστήματος δειγματοληψίας, όπως για παράδειγμα ο δειγματολήπτης τύπου σφυριού και συστήματα συλλογής σκόνης. Ο μόνος περιορισμός που τίθεται στην επιλογή δειγματολήπτη, είναι το πόσο αντιπροσωπευτικό είναι το δείγμα που συλλέγεται. Τέλος, είναι εφικτή η πρόσθεση ενός συστήματος μέτρησης υγρασίας στη διάταξη του αναλυτή.

Υπάρχουν δύο κύρια προβλήματα στην εφαρμογή ενός τέτοιου τύπου αναλυτή. Το ένα είναι ο σχεδιασμός του ανιχνευτή, γεγονός που αφορά μόνο την κατασκευή και το δεύτερο είναι η δύσκολη αξιολόγηση του φάσματος, που λαμβάνεται από την ακτινοβολία του γαιάνθρακα. Δεδομένου ότι η ενέργεια της φασματικής γραμμής του

θείου είναι αρκετά χαμηλή, απορροφάται από το μικρό πάχος στρώματος. Μια παρενέργεια αυτού, είναι η διαφορετική απορρόφηση της ακτινοβολίας από τα στοιχεία του γαιάνθρακα να εξαρτάται από τη σύνθεσή του. Έτσι, το μέγεθος της κορυφής που σχηματίζεται στο φάσμα από το θείο, να μην εξαρτάται μόνο από το ποσοστό του θείου στο γαιάνθρακα, αλλά και από τη σύστασή του.

Μια σύντομη σύγκριση των παραμέτρων που μετρούν οι δύο τύποι στοιχειακών αναλυτών, PGNAΑ και XRF παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Σύγκριση των δύο στοιχειακών on line αναλυτών

Μετρήσεις	PGNAΑ	XRF
Έμμεση ανάλυση		
Υγρασία	✓	✓
Τέφρα	✓	✓
Θερμογόνος δύναμη	✓	✓
Στοιχειακή ανάλυση		
C	✓	
H	✓	
N	✓	
S	✓	✓
Cl	✓	✓
Si	✓	✓
Al	✓	✓
Fe	✓	✓
Ti	✓	✓
Ca	✓	✓
K	✓	✓

2.2 Τρόποι εγκατάστασης των on line αναλυτών

Ο τρόπος εγκατάστασης ενός on line αναλυτή εξαρτάται από τον τύπο του αναλυτή, από την κοκκομετρική κατανομή του εξεταζόμενου γαιάνθρακα και από την ποσότητά του (ρυθμός μεταφοράς). Διακρίνονται οι παρακάτω δύο περιπτώσεις:

- Εγκατάσταση του on line αναλυτή στην κύρια γραμμή μεταφοράς. Σε αυτή την περίπτωση, το σύνολο της ποσότητας του μεταφερόμενου γαιάνθρακα διέρχεται από τον αναλυτή.

- Εγκατάσταση του on line αναλυτή σε βοηθητική γραμμή μεταφοράς. Σε αυτή την περίπτωση, ένα ποσοστό του γαιάνθρακα εκτρέπεται από την κύρια γραμμή μεταφοράς με τη βοήθεια κατάλληλου μηχανισμού δειγματοληψίας και στη συνέχεια διέρχεται από τον αναλυτή, αφού πιθανόν υποστεί κάποια επεξεργασία (π.χ. θραύση).

2.3 Βαθμονόμηση και ρύθμιση της ακρίβειας των on line αναλυτών

Όλα τα συστήματα on line αναλύσεων βασίζονται στη μέτρηση κάποιων φυσικών χαρακτηριστικών του γαιάνθρακα, που συνδέονται με την περιεκτικότητα συγκεκριμένων συστατικών εντός αυτού. Για παράδειγμα, η περιεκτικότητα σε τέφρα συσχετίζεται με τον μέσο ατομικό αριθμό των συστατικών του γαιάνθρακα. Επειδή τα καύσιμα συστατικά του γαιάνθρακα έχουν μέσο ατομικό αριθμό περίπου 6 και τα ανόργανα στοιχεία της τέφρας έχουν μέσο ατομικό αριθμό περίπου 12, είναι φανερό ότι όσο πιο κοντά στο 12 βρίσκεται ο ατομικός αριθμός του εξεταζόμενου δείγματος, τόσο περισσότερη τέφρα αυτό περιέχει. Ο παραπάνω τρόπος λειτουργίας υποδηλώνει ότι ένας on line αναλυτής προτού τεθεί σε λειτουργία σε ένα συγκεκριμένο ορυχείο ή Ατμοηλεκτρικό Σταθμό (ΑΗΣ), πρέπει να γίνει κατάλληλη ρύθμιση για να προσδιοριστεί η σχέση που συνδέει τον μετρούμενο ατομικό αριθμό με την περιεκτικότητα σε τέφρα.

Στην περίπτωση on line αναλυτών που διεξάγουν στοιχειακές αναλύσεις, εμφανίζονται προβλήματα στην ανίχνευση ορισμένων στοιχείων, όπως το νάτριο, το μαγνήσιο και το φώσφορο, τα οποία βρίσκονται στο γαιάνθρακα σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Ο στοιχειακός άνθρακας δημιουργεί προβλήματα, λόγω της περιορισμένης τάσης του να έλκει νετρόνια. Το πρόβλημα αυτό συνήθως λύνεται λόγω της αυξημένης συγκέντρωσης στοιχειακού άνθρακα στο δείγμα. Τέλος, το οξυγόνο, όπως και στις εργαστηριακές αναλύσεις, είναι αδύνατο να προσδιοριστεί άμεσα και υπολογίζεται ως το υπόλοιπο της αφαίρεσης από τη μονάδα του αθροίσματος όλων των άλλων στοιχείων. Όλες οι προαναφερόμενες μετρητικές αδυναμίες των στοιχειακών αναλυτών, καθιστούν απαραίτητη τη χρήση υπολογιστή για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, προκειμένου να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα για τη τιμή της ζητούμενης ποιοτικής παραμέτρου. Για παράδειγμα, ο υπολογισμός της περιεκτικότητας

σε τέφρα γίνεται αναγκαστικά με υπολογισμούς που βασίζονται μόνο στα 6 μετρούμενα στοιχεία: πυρίτιο, αργίλιο, σίδηρος, ασβέστιο, κάλιο και τιτάνιο. Οι υπολογισμοί αυτοί συνήθως δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Προβλήματα παρατηρούνται σε περιπτώσεις γαιανθράκων χαμηλής ποιότητας, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλές και μεταβαλλόμενες συγκεντρώσεις των μη μετρήσιμων στοιχείων.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η σωστή απόδοση των on line αναλυτών όλων των τύπων, στηρίζεται:

- Στην ακρίβεια της μετρητικής διάταξης.
- Στη σωστή βαθμονόμηση των μετρητικών οργάνων και στον προσδιορισμό κατάλληλων αλγορίθμων υπολογισμού και διορθωτικών συντελεστών, που ενσωματώνονται στα ηλεκτρονικά συστήματα λειτουργίας των αναλυτών.

Το σύνολο των παραπάνω ρυθμίσεων αφορά αποκλειστικά μια και μοναδική ποιότητα γαιάνθρακα και δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε γαιάνθρακες με διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά (IEA,1994).

2.4 Η έννοια της ακρίβειας ενός on line αναλυτή

Η πιστότητα (accuracy) των μετρήσεων ενός on line αναλυτή καθορίζεται από δύο διακριτά μεγέθη: την απόκλιση (bias) και την ακρίβεια (precision). Επειδή η απόκλιση εξαρτάται από τη βαθμονόμηση του αναλυτή και θεωρητικά μπορεί να μηδενιστεί, στην πράξη η πιστότητα του αναλυτή είναι ίση με την ακρίβειά του.

Η ακρίβεια, με τη σειρά της, εξαρτάται από το χρόνο ανταπόκρισης του αναλυτή και προσδιορίζεται με βάση το Θεώρημα του Κεντρικού Ορίου (Central Limit Theorem), το οποίο για τους σκοπούς του συγκεκριμένου προβλήματος μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: η διακύμανση (variance) της μέσης τιμής n μετρήσεων είναι n φορές μικρότερη από τη διακύμανση των διακριτών μετρήσεων (Merks, 1985 & Ψώινος, 1989).

$$\text{var}(x) = \text{var}(x_0) / n \quad (2.2)$$

Όπου: $\text{var}(x)$, η διακύμανση των μέσων τιμών

$\text{var}(x_0)$, η διακύμανση των αρχικών τιμών και

n , ο αριθμός των μετρήσεων που συμπεριλαμβάνονται στις μέσες τιμές.

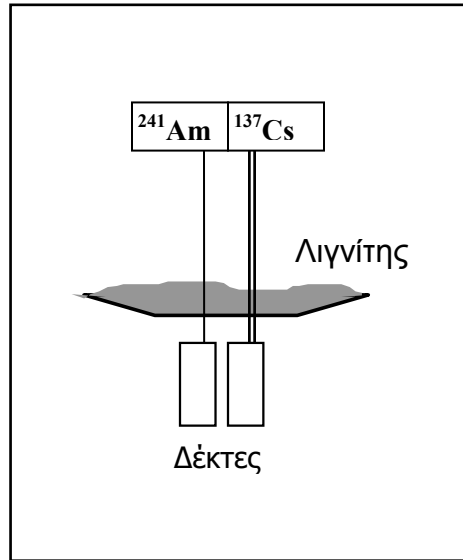
Τα παραπάνω σημαίνουν ότι όταν το χρονικό διάστημα που διαρκεί μια μέτρηση αυξάνει 4 φορές, η τυπική απόκλιση της χρονοσειράς των μετρήσεων μειώνεται στο μισό. Άρα, τα παρατηρούμενα σφάλματα των on line αναλυτών τείνουν να ελαττωθούν με την αύξηση του χρόνου ανταπόκρισης. Με άλλα λόγια, χαμηλή τυπική απόκλιση, για παράδειγμα της τάξης του 0.5%, μπορεί εύκολα να επιτευχθεί για τις μέσες μηνιαίες αναλύσεις περιεκτικότητας του λιγνίτη σε τέφρα, όχι όμως και για τις αναλύσεις δειγμάτων που λαμβάνονται με περίοδο 1min (IEA,1994).

Αντιστρέφοντας την παραπάνω λογική, ο διπλασιασμός της ενδογενούς ακρίβειας (intrinsic precision) ενός δείγματος γαιάνθρακα, η οποία μετριέται με τη βοήθεια του συντελεστή διακύμανσης (coefficient of variation), προϋποθέτει τον τετραπλασιασμό του αριθμού των πρωτογενών υπο-δειγμάτων (primary increments) που λαμβάνονται από τον κύριο όγκο του γαιάνθρακα (Merks, 1985).

2.5 On line αναλυτές μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας

2.5.1 Περιγραφή της συσκευής

Την τελευταία εξέλιξη στους αναλυτές ακτίνων γ, αποτελεί η τεχνική της μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας (dual energy g-ray transmission). Βασίζεται στη χρήση δύο πηγών εκπομπής ακτινοβολίας γ, οι οποίες έχουν μεγάλη διαφορά όσον αφορά την ενέργεια της ακτινοβολίας τους. Η υψηλής ενέργειας πηγή είναι της τάξης των 660 keV και αποτελείται από κέσιο (^{137}Cs). Η χαμηλής ενέργειας πηγή είναι της τάξης των 60 keV και αποτελείται από αμερίκιο (^{241}Am). Τοποθετούνται πάνω στη μεταφορική ταινία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5 (IEA, 1994 & Storer et al., 1999).



Σχήμα 2.5: Διάταξη των πηγών και των δεκτών ακτινοβολίας γ, ενός on line αναλυτή μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας (IEA, 1994).

2.5.2 Διαδικασία υπολογισμού της τέφρας

Η τεχνική αυτή, εκμεταλλεύεται το γεγονός της μείωσης της έντασης της ακτινοβολίας κατά τη διέλευσή της από τη μάζα του μεταφερόμενου γαιάνθρακα. Η μετάδοση της ακτινοβολίας του κεσίου εξαρτάται κυρίως από τη μάζα του μεταφερόμενου γαιάνθρακα. Η ακτινοβολία του αμερικίου εξαρτάται από τη μάζα του μεταφερόμενου γαιάνθρακα και από το ποσοστό της περιεχόμενης τέφρας. Αφού οι δύο ακτινοβολίες διαπεράσουν τη μάζα του μεταφερόμενου λιγνίτη, οι μειωμένες εντάσεις τους καταγράφονται ξεχωριστά από τον ανιχνευτή. Τα αποτελέσματα συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε δίνεται μια μέτρηση της περιεκτικότητας σε τέφρα, η οποία δεν εξαρτάται από το ύψος και τη μάζα του στρώματος γαιάνθρακα πάνω στην ταινία μεταφοράς (IEA, 1994 & Storer et al., 1999). Η εξίσωση που περιγράφει τη διαδικασία της διέλευσης των δύο ακτινοβολιών είναι (Bachmann and Kern, 1988):

$$I = I_0 e^{-\mu \rho h} \quad (2.3)$$

όπου : I , η ένταση της ακτινοβολίας μετά τη διέλευσή της από το γαιάνθρακα (cps),

I_0 , η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την πηγή (^{137}Cs , ^{241}Am), (cps),

μ , η σταθερά απορρόφησης της ακτινοβολίας,

ρ , η πυκνότητα του γαιάνθρακα (gr/m^3) και

h , το ύψος του στρώματος του γαιάνθρακα (cm).

Η σταθερά απορρόφησης μ της ακτινοβολίας, εξαρτάται από την ακτινοβολούμενη ενέργεια και από τη σύσταση του γαιάνθρακα. Η παραπάνω εξίσωση φανερώνει τον λόγο για τον οποίο η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα και από το ύψος που έχει ο γαιάνθρακας πάνω στη μεταφορική ταινία.

Η περιεχόμενη τέφρα A του γαιάνθρακα δίνεται από μια εξίσωση της μορφής:

$$A = \alpha \cdot Q + b \quad (2.4)$$

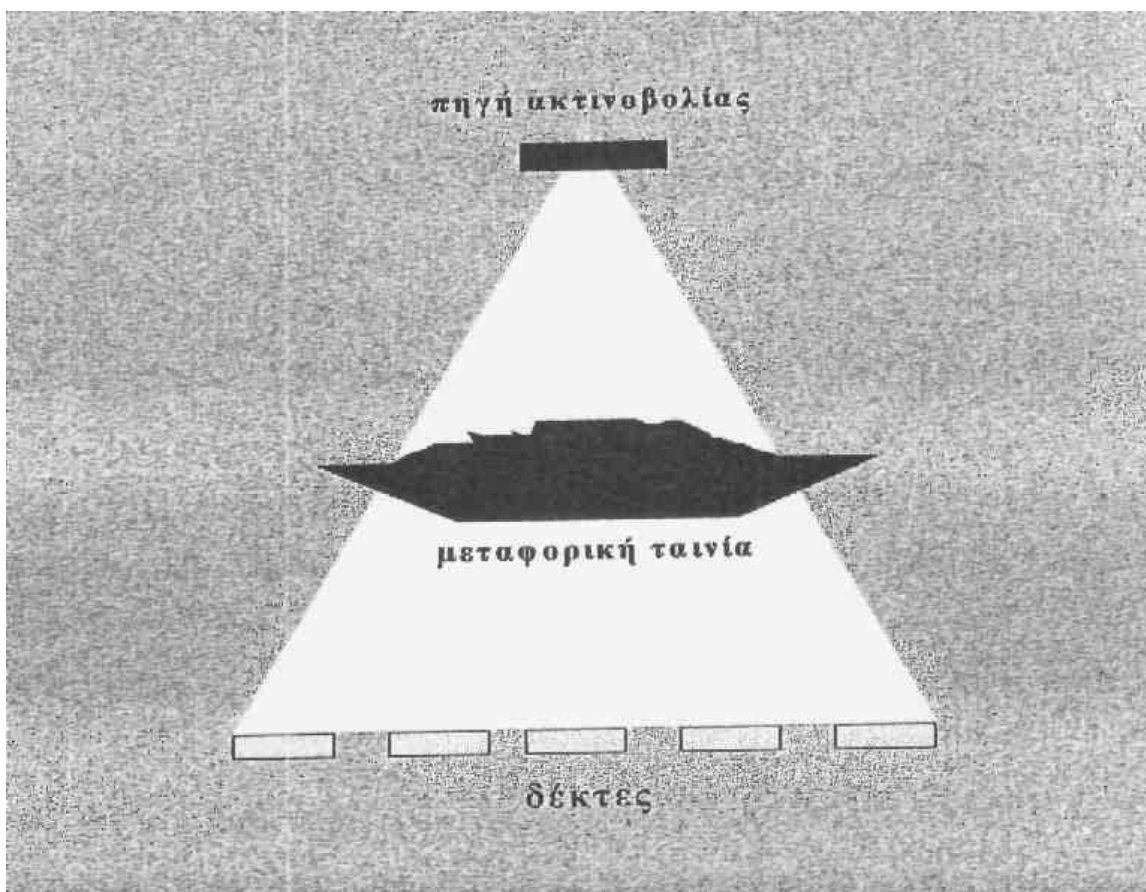
όπου: α , b οι σταθερές ρύθμισης του οργάνου και Q η παρακάτω παράσταση:

$$Q = \frac{\ln(I_o^{Am}) - \ln(I^{Am})}{\ln(I_o^{Cs}) - \ln(I^{Cs})} \quad (2.5)$$

όπου: I_o^{Am} , I_o^{Cs} οι εντάσεις των ακτινοβολιών των πηγών (cps) και

I^{Am} , I^{Cs} οι εντάσεις των ακτινοβολιών αφού διαπεράσουν το γαιάνθρακα (cps).

Μια βελτιωμένη έκδοση του παραπάνω συστήματος αποτελείται από μια συστοιχία πέντε καναλιών–δεκτών των ακτίνων γ (Σχήμα 2.6) και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου παρατηρούνται σημαντικές αλλαγές στην περιεκτικότητα της τέφρας κατά το πλάτος της μεταφορικής ταινίας.



Σχήμα 2.6: Αναλυτής μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας με 5 κανάλια-δέκτες της ακτινοβολίας γ (IEA,1994).

2.5.3 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Ένα πλεονέκτημα του συστήματος μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας, είναι η ευκολία εγκατάστασής του σε υπάρχουσες μεταφορικές διατάξεις. Επίσης, σημαντικά είναι η ικανοποιητική ακρίβεια σε συνθήκες παραγωγής, καθώς και ο σύντομος χρόνος των αναλύσεων. Τέλος, το χαμηλό επίπεδο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας που βρίσκεται στα επιτρεπτά όρια, καθώς και το αποδεκτό κόστος του αναλυτή είναι βασικά χαρακτηριστικά του.

Στα μειονεκτήματα του αναλυτή μετάδοσης ακτίνων γ διπλής ενέργειας, συγκαταλέγεται η δύσκολη έως αδύνατη εγκατάσταση του αναλυτή σε σύστημα μεταφορικών ταινιών στο οποίο η ταινία μεταφοράς δεν είναι ενιαίας ποιότητας. Αυτό είναι σύνηθες φαινόμενο σε ορυχεία τα οποία όταν η ταινία κοπεί ή καταστραφεί σε κάποιο σημείο της, συγκολλούν ένα άλλο κομμάτι και δεν την αντικαθιστούν ολόκληρη.

Η επιδιόρθωση αυτή πραγματοποιείται λόγω του υψηλού κόστους της ταινίας, αλλά και για λόγους ευκολίας της επισκευής. Οι μεταφορικές ταινίες ενισχύονται με σύρμα στο εσωτερικό τους για αυξημένη αντοχή. Όμως, το υλικό που αποτελείται το σύρμα ενίσχυσης ποικίλει από ταινία σε ταινία. Με τον τρόπο αυτόν, προκαλείται σημαντικό σφάλμα στη μέτρηση του αναλυτή, ο οποίος έχει ρυθμιστεί με έναν ενιαίο τύπο ταινίας.

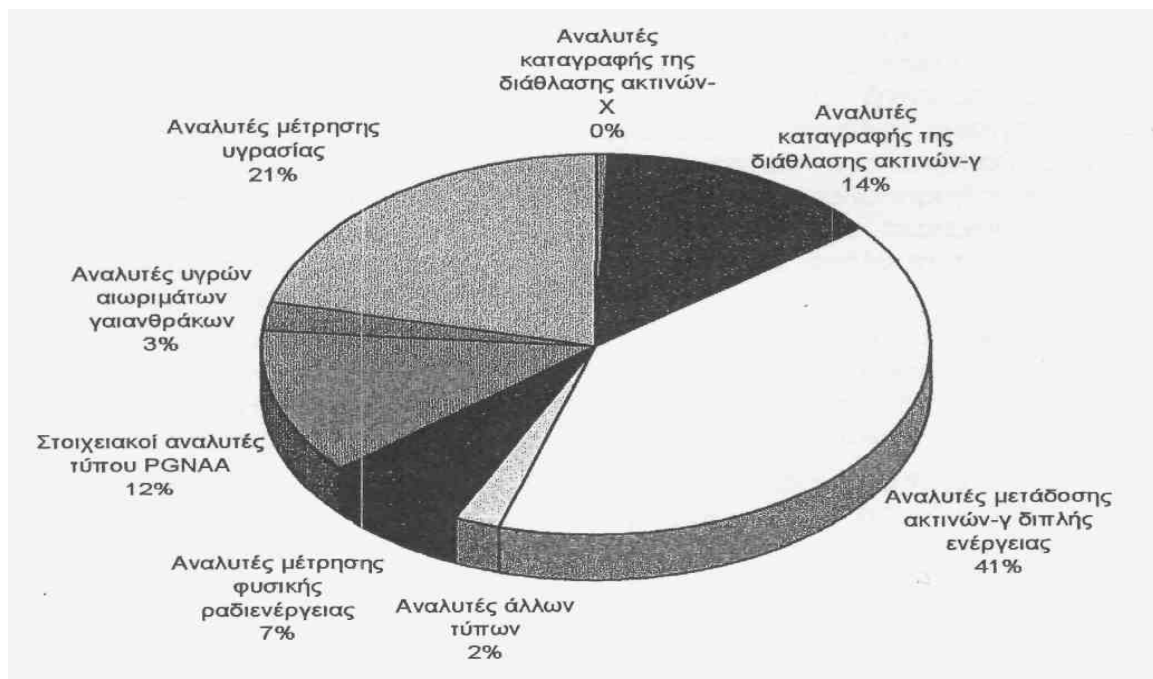
Ακόμα ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου αναλυτή, είναι ότι η ποιότητα της μέτρησής του εξαρτάται και από τον τύπο του γαιάνθρακα. Δηλαδή, γαιάνθρακες όπως ο λιγνίτης που παρουσιάζει μεγάλης κλίμακας διακύμανση στα ποιοτικά του χαρακτηριστικά, με μεγάλη συχνότητα εμφάνισης, καθιστά τη λειτουργία του αναλυτή δύσκολη. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος στις εκμεταλλεύσεις λιγνίτη, έχει αναπτυχθεί ειδικό σύστημα που μπορεί με ικανοποιητική αξιοπιστία να παρακολουθεί την ποιότητά του. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί πηγή ακτινών γ με ισχυρότερη ένταση ακτινοβολίας από τις συμβατικές εφαρμογές. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται καταγραφή υψηλότερων περιεκτικοτήτων σε τέφρα που τυχόν να εμφανίζονται στο λιγνίτη. Επίσης, το σύστημα αυτό καταγράφει ταχύτερα την διερχόμενη από τον λιγνίτη ακτινοβολία και διαθέτει επιλογή που απορρίπτει τις τιμές της περιεχόμενης τέφρας που δεν βρίσκονται μέσα στο πλαίσιο τιμών που έχει οριστεί κατά τη ρύθμιση του αναλυτή. Τέλος, δίνει τη δυνατότητα της παρακολούθησης της διακύμανσης της περιεκτικότητας της τέφρας σε σίδηρο.

Ακόμα μια δυσκολία στην εφαρμογή του αναλυτή, εμφανίζεται όταν το ύψος του στρώματος του γαιάνθρακα πάνω στη μεταφορική ταινία ξεπερνά τα 60cm. Στην περίπτωση αυτή, η ακτινοβολία κατά τη διέλευσή της από το στρώμα του γαιάνθρακα εξασθενεί σε βαθμό που επηρεάζει σημαντικά της ακρίβεια της μέτρησης. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται σε μεγάλου πλάτους μεταφορικές ταινίες, όταν αυτές για λόγους παραγωγής φορτώνονται υπερβολικά ή στις ταινίες που γεμίζουν τα σιλό των ατμοηλεκτρικών σταθμών. Η επίλυσή του πραγματοποιείται με τη μετακίνηση της πηγής και του ανιχνευτή στην άκρη της ταινίας.

Τα συστήματα αυτά μπορούν να προσαρμοστούν τόσο σε καδοφόρους εκσκαφείς, όσο και σε μεταφορικές ταινίες. Έξι συστήματα αυτού του τύπου έχουν εγκατασταθεί πάνω σε καδοφόρους εκσκαφείς λιγνιτορυχείου της ENDESA στη βορειο-δυτική Ισπανία, ενώ ένα έβδομο είναι τοποθετημένο στην έξοδο της αυλής του ορυχείου.

Το σύστημα αυτό καταγράφει τόσο την ποσότητα όσο και την ποιότητα του εξορυσσόμενου λιγνίτη. Οι αρχικές ρυθμίσεις του συστήματος έγιναν για ρυθμούς παραγωγής 400-600 t/h και περιεκτικότητες σε τέφρα που κυμαίνονται μεταξύ 10 και 90%. Το σύστημα αυτό λειτούργησε με επιτυχία, αφού προσδιορίστηκαν διαφορετικοί συντελεστές διόρθωσης για το κάθε λιγνιτικό στρώμα (IEA, 1994).

Το 1994 είχαν ήδη εγκατασταθεί σε ορυχεία και ατμοηλεκτρικούς σταθμούς σε όλο τον κόσμο περίπου 400 συστήματα ελέγχου της περιεκτικότητας του γαιάνθρακα σε τέφρα, που λειτουργούσαν με ακτίνες γ, από τα οποία περίπου 300 χρησιμοποιούσαν διπλή πηγή μετάδοσης των ακτίνων (Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Εγκατεστημένα συστήματα on-line ποιοτικού ελέγχου του άνθρακα σε παγκόσμια κλίμακα (ποσοστά ανά μετρούμενη παράμετρο και εφαρμοζόμενη τεχνική μέτρησης) (ISO, 1996).

Η τελευταία εξέλιξη των συστημάτων αυτού του είδους είναι η χρησιμοποίηση τεσσάρων πηγών ($2 \times {}^{241}\text{Am}$ & $2 \times {}^{127}\text{Cs}$), οι δύο στο κέντρο και οι άλλες δύο στην άκρη της ταινίας, καθώς και η χρησιμοποίηση των αντίστοιχων ανιχνευτών κάτω από τη μεταφορική ταινία.

Από όλα τα παραπάνω είναι φανερό ότι οι αναλυτές αντιμετωπίζουν προβλήματα στην ανάλυση άνθρακα όταν υπάρχει ετερογένεια στα μεγέθη και στην ποιότητα των

τεμαχιδίων, με αποτέλεσμα η σχέση Am/Cs-τέφρας να είναι πιο σύνθετη από τις απλές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να τη συσχετίσουν. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αναξιόπιστες μετρήσεις της τέφρας. Προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση των αναλυτών είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα αποτελεσματικότερο μοντέλο βαθμονόμησης για να συσχετίσει τα μεγέθη I_{Am} και I_{Cs} με την τέφρα. Μια τέτοια προσέγγιση αποτελεί η χρήση νευροασαφών συστημάτων για την ανάπτυξη μοντέλων βαθμονόμησης, όπου οι μετρούμενες εντάσεις από τις δύο πηγές ακτινοβολίας γ , συσχετίζονται με την τέφρα με μη γραμμικές μεθόδους.

Κεφάλαιο 3

Εισαγωγή στην ασαφή λογική, στα ασαφή συστήματα λήψης αποφάσεων και στα προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα.

3.1 Εισαγωγή στην ασαφή λογική

Τα θεμέλια της λογικής ως επιστήμης 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 γεγονός 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 υπό 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 Berkley 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 τις τεχνικές 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.

3.1.1 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.

Το γεγονός αυτό μπορεί να εκφρασθεί 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:

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

3.1.2 Λογικοί τελεστές

Ο ασαφής λογικός συλλογισμός είναι ένα υπερσύνολο της τυποποιημένης λογικής του Bool. Εάν κρατηθούν ασαφείς τιμές στα άκρα, 1 (απολύτως αληθής), και 0 (απολύτως ψευδής), ισχύουν οι τυποποιημένες λογικές διαδικασίες. Για παράδειγμα, εξετάζονται τα πρότυπα αλήθειας στον παρακάτω Πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1: Λογικοί τελεστές AND, OR, NOT.

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 θέμα βαθμού. Οι τιμές εισόδου μπορούν να είναι πραγματικοί αριθμοί μεταξύ 0 και 1. Η δήλωση A AND B, όπου το A και το B περιορίζονται στο διάστημα $[0,1]$, επιλύεται με τη χρη-

σιμοποίηση 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 3.2, είναι απολύτως αμετάβλητος από αυτήν την αντικατάσταση.

Πίνακας 3.2: Αντικατάσταση των λογικών τελεστών με τις συναρτήσεις $\min(A,B)$, $\max(A,B)$ και $1-A$.

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

AND

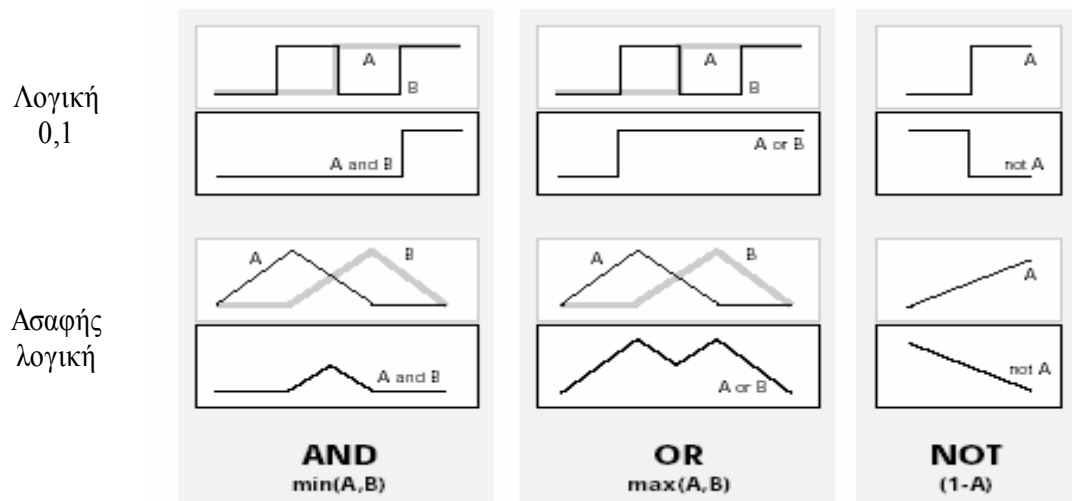
A	B	$\max(A,B)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

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 (Σχήμα 3.1) χρησιμοποιεί μια γραφική παράσταση για να παρουσιάσει τις ίδιες πληροφορίες. Στο σχήμα αυτό, ο πίνακας αλήθειας έχει απεικονισθεί με τη μορφή γραφικής παράστασης δύο ασαφών συνόλων μαζί, για να δημιουργήσει ένα ασαφές σύνολο. Το ανώτερο μέρος της εικόνας επιδεικνύει τις γραφικές παραστάσεις που αντιστοιχούν σε δύο τιμές αλήθειας, ενώ το κατώτερο 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.

3.1.3 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 \bar{A} (complement) 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 με την ακόλουθη συνάρτηση συμμετοχής:

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

6) Η τομή (intersection) δυο 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:

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

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

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

3.1.4 Γλωσσικές μεταβλητές

Οι τιμές μιας ασαφούς μεταβλητής (fuzzy variable) θεωρούνται όροι ασαφών συνόλων. Για παράδειγμα, το "Ύψος" μπορεί να θεωρηθεί ως μια ασαφής μεταβλητή που μπορεί να λάβει τιμές όπως χαμηλό, κανονικό, ψηλό και οι οποίες στη συνέχεια είναι δυνατόν να περιγραφούν εύκολα από ασαφή σύνολα. Μια ασαφής μεταβλητή δηλαδή, λαμβάνει 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 διαιρούνται στις ακόλουθες υποκατηγορίες:

- πρωτεύοντες όροι (primary terms): είναι όροι ασαφών συνόλων του υπερσυνόλου αναφοράς (π.χ. Ψηλό, Χαμηλό, Μέσο, Μικρό, Μηδέν).
- 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.

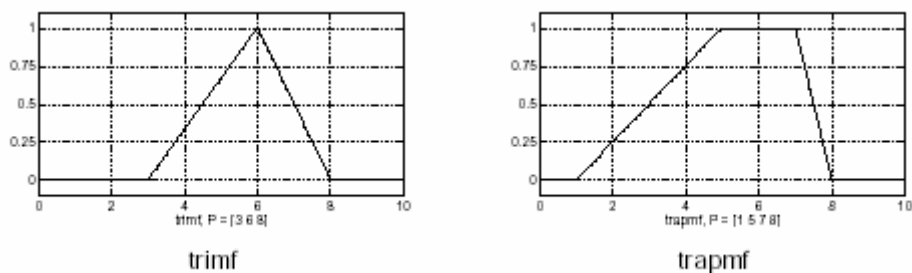
Τα γλωσσικά περιγράμματα χρησιμεύουν στη δημιουργία ενός ευρύτερου συνόλου γλωσσικών τιμών μιας γλωσσικής μεταβλητής από μια μικρότερη συλλογή πρωτευόντων όρων. Χρησιμοποιώντας το περίγραμμα πολύ σε συνδυασμό με τα συνδετικά ΟΧΙ, ΚΑΙ και τον πρωτεύοντα όρο μεγάλο, μπορούν να δημιουργηθούν τα

επιπλέον ασαφή σύνολα πολύ μεγάλο, πάρα πολύ μεγάλο, ΟΧΙ πολύ μεγάλο, μεγάλο ΚΑΙ ΟΧΙ πολύ μεγάλο, κλπ.

3.1.5 Συναρτήσεις συμμετοχής

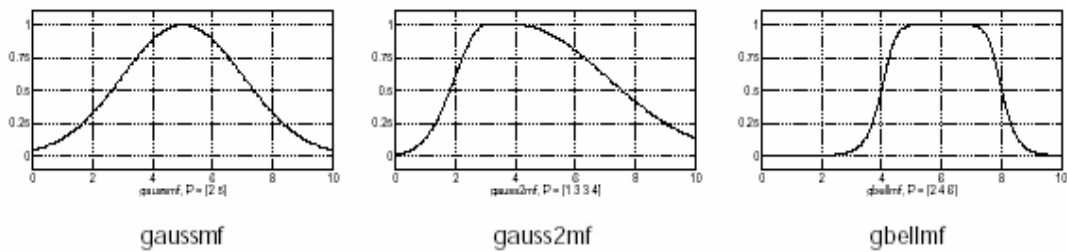
Μια συνάρτηση συμμετοχής (membership function) είναι μια καμπύλη που αντιστοιχεί κάθε σημείο της εισόδου, σε μια τιμή συμμετοχής (ή βαθμό συμμετοχής) μεταξύ 0 και 1.

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 Fuzzy Toolbox – Matlab της Mathworks® που χρησιμοποιήθηκε και είναι μια συλλογή τριών σημείων τα οποία διαμορφώνουν ένα τρίγωνο. Η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής, `trapmf`, έχει μια επίπεδη κορυφή και είναι ακριβώς μια περικομμένη καμπύλη τριγώνων (Σχήμα 3.2).



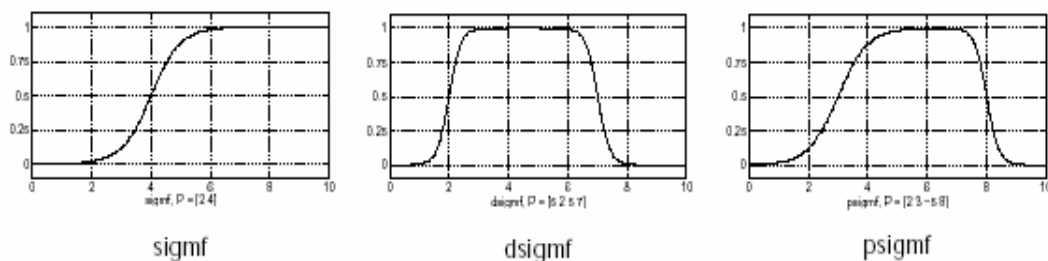
Σχήμα 3.2: Η τριγωνική και η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής (Fuzzy Toolbox της Matlab).

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 γκαουσσισιανή συνάρτηση συμμετοχής. Λόγω της ομαλότητάς τους, οι γκαουσσισιανές συναρτήσεις και η `gbell` είναι δημοφιλείς συναρτήσεις για τα ασαφή σύνολα (Σχήμα 3.3).



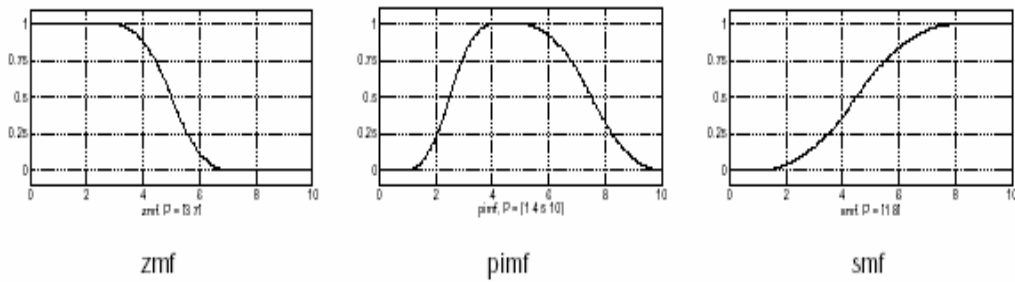
Σχήμα 3.3: Συναρτήσεις συμμετοχής καμπυλών Gauss (Fuzzy Toolbox της Matlab).

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 σιγμοειδείς συναρτήσεις. Έτσι, εκτός από τη βασική *sigmf*, υπάρχει επίσης η διαφορά μεταξύ σιγμοειδών συναρτήσεων, που ονομάζεται *dsigmf* και το γινόμενο από δύο σιγμοειδείς συναρτήσεις, που ονομάζεται *psigmf* (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4: Συναρτήσεις συμμετοχής σιγμοειδών καμπυλών *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 πολωνυμική καμπύλη, η οποία είναι ανοικτή αριστερά, η *rimf* είναι μηδέν στα δύο άκρα με μια άνοδο στη μέση και η *smf* είναι μια συνάρτηση που είναι ανοικτή δεξιά (Σχήμα 3.5).



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

3.1.6 Δομή συστήματος ασαφούς λογικής

3.1.6.1 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.

3.1.6.2 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 probabilistic).

3.1.6.3 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 ένας 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).

3.1.6.4 Αθροιση 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 probabilistic) και sum (άθροιση της εξόδου από κάθε κανόνα).

3.1.6.5 Αποασαφοποίηση

Το τελευταίο μέρος ενός συστήματος ασαφούς λογικής είναι η αποασαφοποίηση (defuzzification) της ασαφούς εξόδου σε σαφή τιμή. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές 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 ως τιμή, την τιμή του σημείου που αποτελεί το κέντρο βάρους της γραφικής παράστασης. 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 είναι ότι μπορεί με δυσκολία να δικαιολογηθεί σημασιολογικά. Επιπλέον, ο υπολογισμός μπορεί να χρειαστεί περισσότερο χρόνο από απλούστερες μεθόδους (Kruse et al., 1994). Η τεχνική αυτή δίνει θεωρητικά καλύτερα αποτελέσματα από τις άλλες.

Τα συστήματα ασαφούς συμπεράσματος, εφαρμόζονται επιτυχημένα εδώ και χρόνια σε τομείς όπως: ο αυτόματος έλεγχος, η κατηγοριοποίηση των δεδομένων, η ανάλυση των αποφάσεων, τα έμπειρα συστήματα και η τεχνητή όραση. Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα της προσέγγισης, μόνο λίγες εφαρμογές της ασαφούς λογικής στα προβλήματα της μεταλλευτικής βιομηχανίας έχουν αναφερθεί μέχρι σήμερα.

Βιβλιογραφικές εφαρμογές των FIS και ANFIS στη μεταλλευτική βιομηχανία, είναι οι εξής:

- 1) Ο Nguyen το 1985, μελέτησε μερικές εφαρμογές ασαφούς λογικής σε θέματα βραχομηχανικής και καθόρισε την ασάφεια της ταξινόμησης των πετρωμάτων.

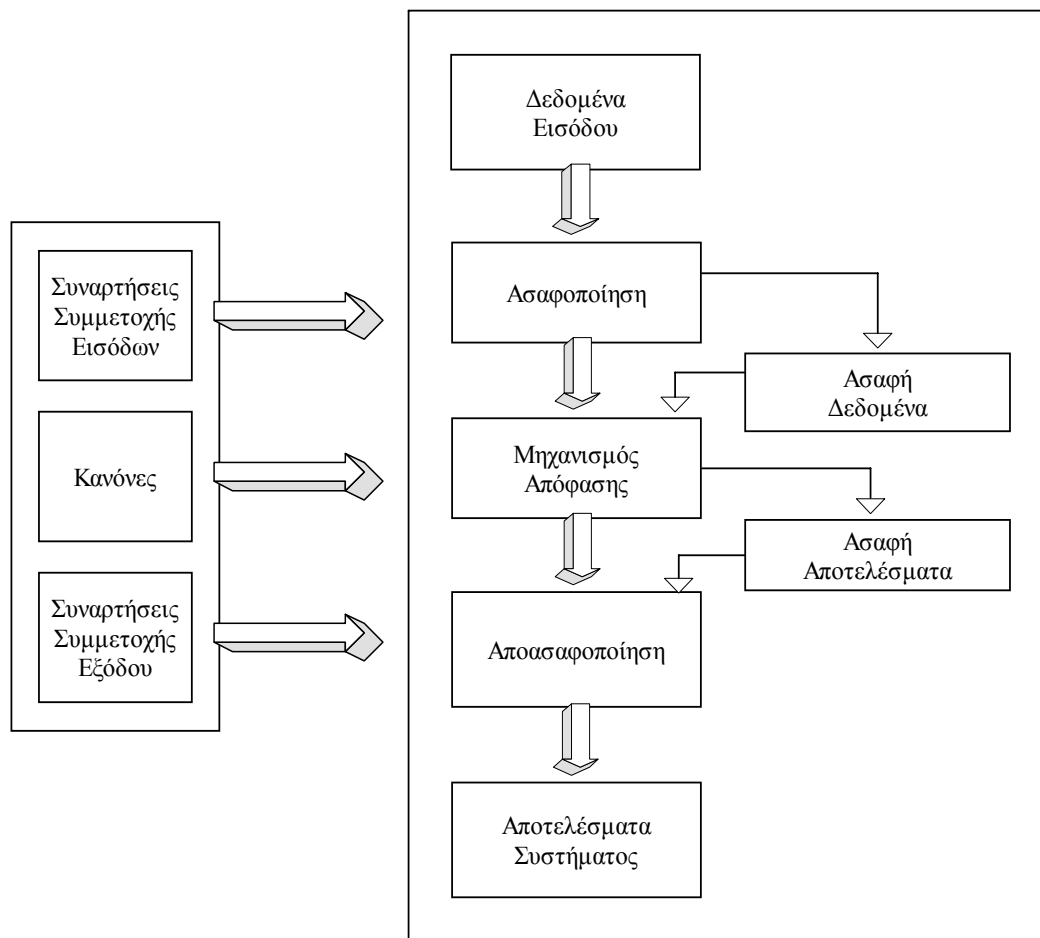
- 2) Ο Bandopadhyay το 1986, ανέπτυξε έναν ασαφή αλγόριθμο για να εξαγάγει χρήσεις του εδάφους και για τη λήψη απόφασης στην εκμετάλλευση μεταλλείων.
- 3) Οι Wright, Liu, Stanley, Chen και Fang το 1993, σε ένα άρθρο τους με τίτλο: "XRAYS: Ένα έμπειρο σύστημα για την ποιότητα των XRD αναλύσεων", ανέπτυξαν ένα ασαφές έμπειρο σύστημα που ονομάζεται XRAYS, για τον προσδιορισμό των μεταλλευμάτων μέσω των περιθλασιογραμμάτων ακτίνων X που είναι φιλικό προς τον χρήστη. Αν και το XRAYS σχεδιάστηκε κυρίως για τα ιζηματογενή πετρώματα, αυτό μπορεί να τροποποιηθεί χρησιμοποιώντας απλά ένα κατάλληλο αρχείο δεδομένων για την εκάστοτε περίπτωση. Για τη βελτίωση του XRAYS θα μπορούσαν να προστεθούν περισσότεροι κανόνες, αν είναι διαθέσιμες χημικές και άλλες πληροφορίες για τα δείγματα (Wright et al., 1993).
- 4) Οι Karr και Weck το 1996, σε ένα άρθρο τους με τίτλο: "Υπολογιστική μοντελοποίηση του μεταλλευτικού εξοπλισμού χρησιμοποιώντας ασαφή μαθηματικά", αναπτύσσουν ένα ασαφές μοντέλο με σκοπό να περιγράψουν τις σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών στα μεταλλευτικά συστήματα. Χρησιμοποιούνται δεδομένα από δύο συστήματα, από ένα κύκλωμα άλεσης και από έναν υδροκυκλώνα. Τα ασαφή μοντέλα, όπως αυτά που παρουσιάζονται για ένα κύκλωμα άλεσης και έναν υδροκυκλώνα, δεν απαιτούν τη θεώρηση ενός συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου, ενώ τα μοντέλα παλινδρόμησης απαιτούν συχνά να παρέχεται μια συγκεκριμένη πρότυπη εξίσωση. Επιπλέον, τα ασαφή μοντέλα είναι διαφανή και επιτρέπουν μέσω της επιθεώρησης των κανόνων και των επιφανειών απόκρισης να υπάρχει ένας καλύτερος έλεγχος στη λειτουργία του συστήματος, σε σχέση με τα νευρωνικά δίκτυα. Τα ασαφή μοντέλα μπορούν να παραχθούν σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, κάνοντάς τα δελεαστικά για χρήση σε συστήματα ελέγχου πραγματικού χρόνου (Karr and Weck, 1996).
- 5) Ο Bascetin το 1998, μελέτησε την εφαρμογή του ασαφούς γραμμικού προγραμματισμού για να λυθούν τα προβλήματα της εκλεκτικής εξόρυξης άνθρακα. Επίσης βασίστηκε σε συστήματα ασαφούς θεωρίας για την επιλογή ενός βέλτιστου συστήματος μεταφορών άνθρακα από το ορυχείο, στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (Kesimal και Bascetin, 2002).
- 6) Οι Kesimal και Bascetin το 2002, σε ένα άρθρο τους με τίτλο: "Εφαρμογή της ασαφούς πολλαπλής ταξινόμησης αποφάσεων στις εκμεταλλεύσεις μεταλλείου", παρουσίασαν δύο εφαρμογές που επεξηγούν την επιλογή εξοπλισμού στα επιφανειακά μεταλλεία και μεθόδου εξόρυξης στα υπόγεια μεταλλεία, σε ένα ασαφές

περιβάλλον. Από τις εφαρμογές αυτές διαπίστωσαν ότι, η βέλτιστη επιλογή εξοπλισμού σε ένα επιφανειακό μεταλλείο και η βέλτιστη επιλογή μεθόδου εξόρυξης σε ένα υπόγειο ορυχείο με τη χρήση της ασαφούς λογικής, είναι πιο πρακτική και οικονομικότερη σε σχέση με τις συμβατικές προσεγγίσεις.

7) Οι Wei, Wang και Zhou, το 2003, στο άρθρο τους με τίτλο: "Μελέτη για την κατάταξη των γρανιτών, με τη βοήθεια της ασαφούς λογικής, ανάλογα με τη συμπεριφορά τους κατά την κοπή" χρησιμοποίησαν τα ασαφή μαθηματικά για να επαληθεύσουν τη συνάρτηση εξάρτησης και την ασαφή σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε χαλαζία, του μεγέθους κόκκου χαλαζία, της σκληρότητας του πετρώματος και των παραμέτρων κοπής. Το ασαφές σύστημα κατάταξης είναι κατάλληλο για να αξιολογήσει την ικανότητα κοπής ενός γρανίτη (επιλογή κατάλληλου δίσκου κοπής και παραμέτρων λειτουργίας), βασισμένο μόνο στην πετρογραφική ανάλυση και στις μηχανικές του ιδιότητες (Wei et al., 2003).

Τα συστήματα ασαφούς επαγωγής αναφέρονται με πολλά ονόματα όπως: ασαφές σύστημα βασισμένο σε κανόνες (fuzzy-rule-based system), ασαφές έμπειρο σύστημα (fuzzy expert system), ασαφές μοντέλο (fuzzy model), ασαφής λογικός ελεγκτής (fuzzy logic controller) ή απλούστερα ασαφές σύστημα.

Η γενική δομή ενός συστήματος ασαφούς λογικής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6 και απαρτίζεται από τα ακόλουθα στοιχεία:



Σχήμα 3.6: Η γενική δομή ενός συστήματος ασαφούς λογικής.

- Τις ασαφείς μεταβλητές, τα ασαφή σύνολα και τις συναρτήσεις συμμετοχής τους. Το Fuzzy Toolbox της Matlab προσφέρει έναν αρκετά μεγάλο αριθμό συναρτήσεων συμμετοχής για τη 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 - σφάλματος.
- Τους κανόνες, που είναι ένα σύνολο προτάσεων, οι οποίες 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 ...TOTE... και μπορούν να πραγματοποιούν λογικές συνεπαγωγής, 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.
- Τη διαδικασία ασαφοποίησης, κατά την οποία οι τιμές των φυσικών μεταβλητών μετατρέπονται σε ασαφείς αριθμούς.
- Τον μηχανισμό εξαγωγής 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 εξάγει ένα συμπέρασμα.
- Την αποασαφοποίηση κατά την οποία τα ασαφή σύνολα των εξόδων μετατρέπονται σε σαφή αποτελέσματα.

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

3.1.7 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 στο περιβάλλον λειτουργίας του Matlab.

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 δημιουργεί και μετατρέπει τον κατάλογο των κανόνων που καθορίζουν το σύστημα.

Τα δύο τελευταία εργαλεία GUI δεν χρησιμοποιούνται άμεσα για τον καθορισμό ή την μετατροπή των συστατικών ενός ασαφούς συστήματος. Απεικονίζουν παραστατικά τη 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 τους κανόνες οι οποίοι είναι ενεργοποιημένοι (για συγκεκριμένες τιμές εισόδου) ή τον τρόπο με τον οποίο η μορφή της κάθε συνάρτησης συμμετοχής επηρεάζει τα αποτελέσματα.
- Το τελευταίο εργαλείο του Fuzzy Toolbox είναι ο Surface Viewer. Δείχνει τον τρόπο με τον οποίο 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 απαιτείται, 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.

3.2 Ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων (FIS)

Το σημαντικότερο εργαλείο μοντελοποίησης το οποίο βασίζεται στη θεωρία ασαφών συνόλων είναι το ασαφές σύστημα εξαγωγής συμπεράσματος (Fuzzy Inference System ή FIS). Τα FIS είναι η διαδικασία διατύπωσης και αντιστοίχισης εισαγόμενων δεδομένων, σε εξαγόμενα δεδομένα, κάνοντας χρήση ασαφούς λογικής.

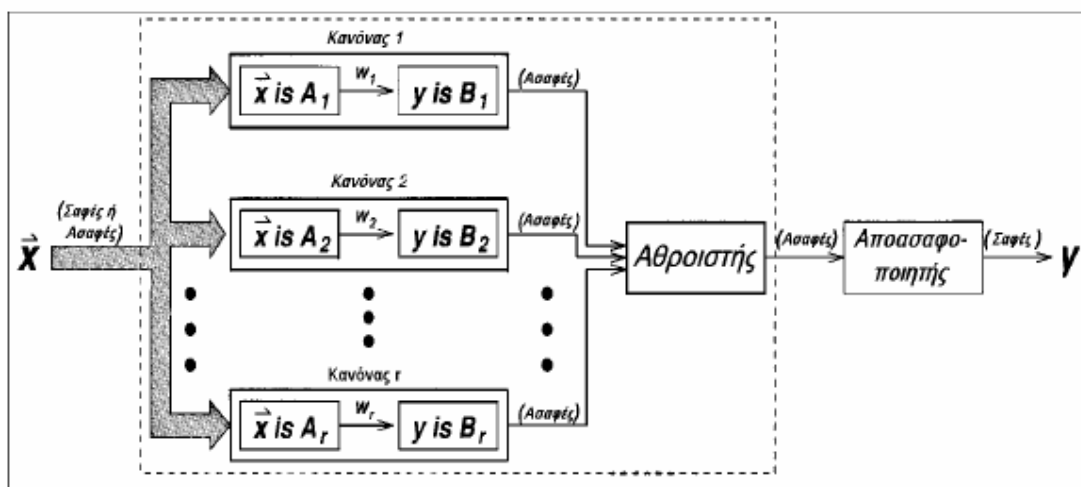
Υπάρχουν δύο τύποι ασαφών συστημάτων συμπεράσματος που μπορούν να αναπτυχθούν στο Fuzzy Toolbox: ο τύπος του Mamdani που πρωτοδιατυπώθηκε το 1975 από τον Ebrahim Mamdani και ο τύπος του Sugeno ή Takagi-Sugeno-Kang που παρουσιάστηκε το 1985. Αυτοί οι δύο τύποι συστημάτων συμπεράσματος διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό στον τρόπο με τον οποίο καθορίζονται τα αποτελέσματα.

Η βασική δομή ενός FIS αποτελείται από τρία μέρη:

- Μια βάση κανόνων, που περιέχει μια ομάδα ασαφών κανόνων.
- Μια βάση δεδομένων, που καθορίζει τις συναρτήσεις συμμετοχής οι οποίες χρησιμοποιούνται στους ασαφείς κανόνες.
- Τον μηχανισμό εξαγωγής συμπερασμάτων (reasoning mechanism), που εξάγει τα συμπεράσματα με βάση τους κανόνες και τα δεδομένα.

Ένα FIS μπορεί να λάβει είτε ασαφείς εισόδους, είτε σαφείς (συγκεκριμένες) με την μορφή ασαφών singletons, τα οποία είναι ασαφή σύνολα με ένα στοιχείο. Η έξοδος όμως που παράγει είναι πάντα ασαφή σύνολα. Μερικές φορές είναι αναγκαίο να είναι σαφής η έξοδος, ειδικά όταν το FIS χρησιμοποιείται ως ελεγκτής. Τότε χρειάζεται μια μέθοδος αποασαφοποίησης, για να εξαχθεί ένα σαφές αποτέλεσμα που αντιπροσωπεύει με τον καλύτερο τρόπο το ασαφές σύνολο.

Με σαφείς εισόδους και εξόδους, ένα FIS υλοποιεί μια μη γραμμική αντιστοίχιση, από τον χώρο εισόδου σε αυτόν της εξόδου, με έναν αριθμό κανόνων if-then, καθένας εκ των οποίων περιγράφει μια τοπική συμπεριφορά της αντιστοίχισης. Ειδικότερα, το μέρος των προϋποθέσεων ενός κανόνα προσδιορίζει μια ασαφή περιοχή στον χώρο εισόδου, ενώ αυτός των συμπερασμάτων προσδιορίζει την έξοδο σε μια ασαφή περιοχή.



Σχήμα 3.7 : Διάγραμμα απεικόνισης ενός ασαφούς συστήματος εξαγωγής

συμπερασμάτων.

Η μέθοδος του Mamdani ήταν μεταξύ των πρώτων συστημάτων ελέγχου που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας την ασαφή θεωρία. Προτάθηκε το 1975 από τον Ebrahim Mamdani ως 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 FIS τύπου Mamdani, αναμένει τις συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου να είναι ασαφή σύνολα. Έπειτα από τη διαδικασία της συνάθροισης, υπάρχει ένα ασαφές 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.

3.2.1 Ασαφή συστήματα τύπου Sugeno

Η μέθοδος ασαφούς συμπεράσματος Sugeno, ή Takagi-Sugeno-Kang πρωτοπαρουσιάστηκε το 1985. Είναι παρόμοια με τη μέθοδο Mamdani από πολλές απόψεις. Τα πρώτα δύο μέρη της διαδικασίας ασαφούς συμπεράσματος, η ασαφοποίηση των εισόδων και η εφαρμογή των ασαφών τελεστών, είναι ακριβώς τα ίδια. Η κύρια διαφορά του συστήματος τύπου Sugeno από το αντίστοιχο τύπου Mamdani, είναι ότι στο Sugeno οι συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου είναι είτε γραμμικές είτε μια σταθερά.

Ένας τυπικός ασαφής κανόνας σε ένα ασαφές μοντέλο Sugeno μηδενικού βαθμού έχει τη μορφή:

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = k$$

όπου A και B είναι ασαφή σύνολα των προϋποθέσεων, ενώ k είναι ένας σαφής αριθμός (σταθερά). Όταν η έξοδος κάθε κανόνα είναι μια σταθερά, η ομοιότητα με τη μέθοδο Mamdani είναι αξιοσημείωτη. Οι μόνες διακρίσεις είναι ότι όλες οι συναρτήσεις συμμετοχής στην έξοδο είναι διακριτές τιμές, και οι μέθοδοι επαγωγής και συνάθροισης είναι καθορισμένες και δεν μπορούν να αλλάξουν. Η μέθοδος επαγωγής είναι απλά πολλαπλασιασμός και η λειτουργία συνάθροισης περιλαμβάνει όλες τις διακριτές τιμές.

Το γενικότερο ασαφές μοντέλο Sugeno πρώτου βαθμού έχει κανόνες της μορφής:

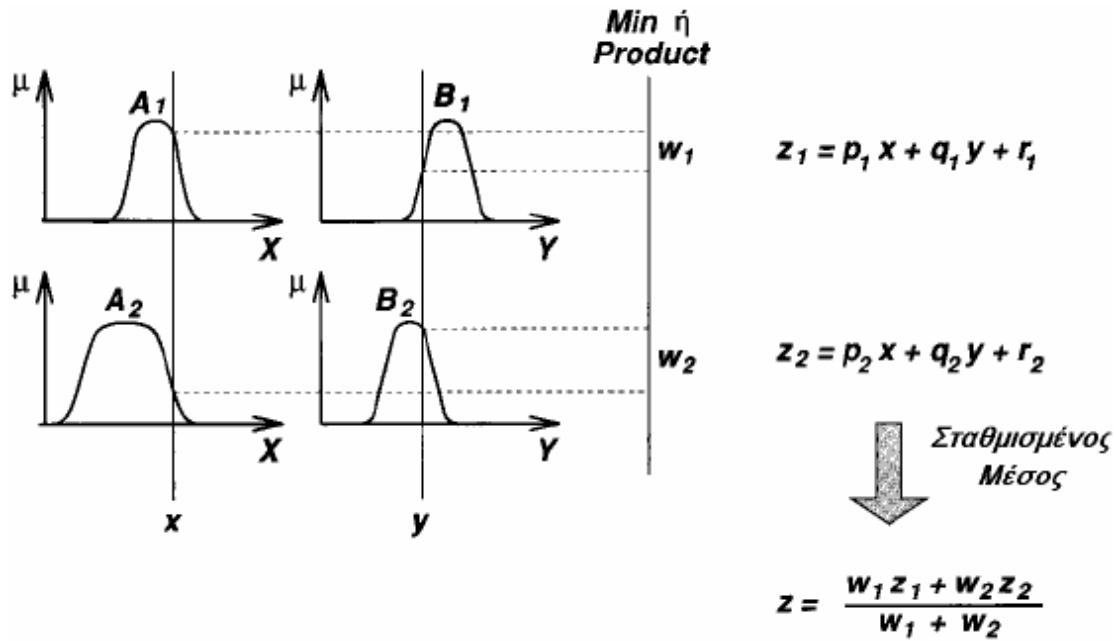
$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = px + qy + r$$

όπου A και B είναι ασαφή σύνολα των προϋποθέσεων, ενώ p , q και r είναι σταθερές. Ο ευκολότερος τρόπος να απεικονιστεί το σύστημα πρώτου βαθμού είναι να θεωρηθεί κάθε κανόνας ως καθορισμός της θέσης μιας "διακριτής τιμής". Δηλαδή οι διακριτές τιμές εξόδου μπορούν να κινηθούν γύρω σε μια γραμμική διαμόρφωση στο διάστημα εξόδου, ανάλογα με το τι είναι η είσοδος. Το γεγονός αυτό τείνει επίσης να καταστήσει το σύστημα πολύ σταθερό και αποτελεσματικό. Υψηλότερου βαθμού ασαφή μοντέλα Sugeno είναι δυνατά, αλλά εισάγουν σημαντική πολυπλοκότητα με μικρή προφανή βελτίωση. Τα συστήματα Sugeno λόγω του μικρότερου μεγέθους τους και της μεγαλύτερης υπολογιστικής αποτελεσματικότητας, σε σχέση με τα Mamdani, χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη προσαρμοζόμενων ασαφών υπολογιστικών μοντέλων. Τα ασαφή μοντέλα Sugeno των οποίων οι συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου είναι μεγαλύτερες από πρώτου βαθμού δεν υποστηρίζονται από την εργαλειοθήκη της ασαφούς λογικής (Fuzzy Toolbox της Matlab).

Σε πολλές περιπτώσεις, είναι περισσότερο αποτελεσματική η χρήση μεμονωμένων σημείων-αιχμών ως συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου, από ένα συνεχές καταναμημένο ασαφές σύνολο. Μια τέτοια αιχμή είναι γνωστή με τον αγγλικό όρο «συνάρτηση συμμετοχής εξόδου *singleton*» και θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ένα προαποσαφηνισμένο ασαφές σύνολο. Η συνάρτηση συμμετοχής ενός singleton είναι $\mu_A(x) = 1$.

Οι συναρτήσεις αυτές αυξάνουν την επάρκεια της διαδικασίας αποασαφοποίησης, διότι απλοποιούν ιδιαιτέρως τους απαιτούμενους υπολογισμούς, σε σχέση με την πιο γενική μέθοδο Mamdani, στην οποία υπολογίζεται το κέντρο μάζας μιας δισδιάστατης συνάρτησης. Αντί λοιπόν να υπολογίζεται το κέντρο μάζας, χρησιμοποιείται ο σταθμικός μέσος μερικών σημείων. Τα συστήματα Sugeno υποστηρίζουν αυτόν τον τύπο του μοντέλου.

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η διαδικασία της ασαφούς λογικής για ένα σύστημα Sugeno πρώτου βαθμού.



Σχήμα 3.8: Το πρώτου βαθμού ασαφές μοντέλο Sugeno (Jang et al., 1997).

Το επίπεδο εξόδου z_i κάθε κανόνα είναι σταθμισμένο με βάρη, ή αλλιώς με μια δύναμη πυροδότησης (βαθμός ενεργοποίησης) w_i για κάθε κανόνα (Fuzzy Toolbox της Matlab).

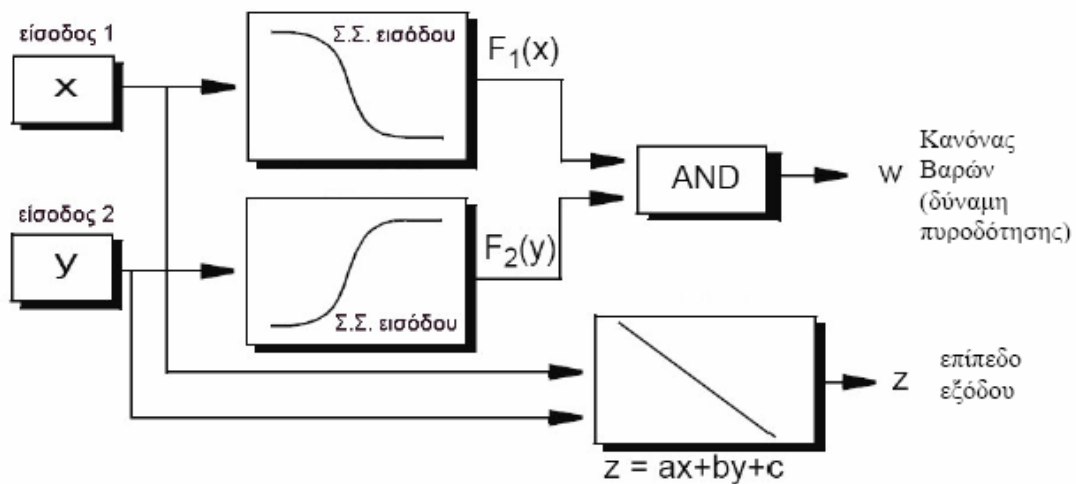
Για παράδειγμα, για τον τελεστή ΚΑΙ, με πρώτη είσοδο (x) και δεύτερη είσοδο (y), η δύναμη πυροδότησης είναι:

$$w_i = \text{πράξη ΚΑΙ } (F_1(x), F_2(x))$$

όπου $F_i(.)$ είναι οι συναρτήσεις συμμετοχής για τις εισόδους i ($i=1,2$). Η τελική έξοδος του συστήματος είναι ο σταθμισμένος μέσος όλων των εξόδων και δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Τελική έξοδος} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

Ακόμα ένα διάγραμμα το οποίο απεικονίζει την λειτουργία ενός Sugeno παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9



Σχήμα 3.9: Λειτουργία ενός συστήματος Sugeno (Fuzzy Toolbox της Matlab).

Στον παρακάτω Πίνακα 3.3, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα των μεθόδων Sugeno και Mamdani (Fuzzy Toolbox της Matlab).

Πίνακας 3.3: Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων Sugeno–Mamdani
ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SUGENO

Επαρκέστερα υπολογιστικά

Καλή λειτουργία για γραμμικές τεχνικές

Καλή λειτουργία για βελτιστοποίηση και προσαρμοστικές τεχνικές

Εγγυημένη συνέχεια της τελικής επιφάνειας που αποτελεί την λύση

Καλά προσαρμοσμένο στην μαθηματική ανάλυση

Πλεονεκτήματα της μεθόδου Mamdani

Είναι διαισθητικά

Έχουν πολύ μεγάλη αποδοχή

Ευπροσάρμοστα στον ανθρώπινο τρόπο εισαγωγής των δεδομένων εισόδου

3.3 Προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα (ANFIS)

Το προσαρμοζόμενο νευροασαφές σύστημα αποτελείται από πολλά επίπεδα, στα οποία αντιστοιχίζονται συγκεκριμένες συναρτήσεις επεξεργασίας των εισερχόμενων σημάτων. Κάθε επίπεδο αποτελείται από κόμβους οι οποίοι αντιπροσωπεύουν συναρτήσεις εξαρτώμενες από το εισερχόμενο σήμα (ή την εισερχόμενη τιμή) μόνο του ή σε συνδυασμό με παραμέτρους που βρίσκονται στον

κόμβο. Έτσι, για δύο διαδοχικά επίπεδα, η έξοδος ενός κόμβου που βρίσκεται στο πρώτο επίπεδο γίνεται εισερχόμενο σήμα για το ακόλουθο. Κόμβοι που απλά ενεργοποιούν συναρτήσεις του εισερχόμενου σήματος αναπαριστώνται από κυκλικά σχήματα, ενώ κόμβοι των οποίων το εξερχόμενο σήμα εξαρτάται προσθέτως από εγγενείς παραμέτρους αναπαριστώνται από τετράγωνα σχήματα. Σε κάθε δίκτυο, εφαρμόζονται αλγόριθμοι που προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροί του πρέπει να αλλάξουν ώστε να ελαχιστοποιηθεί ένα δεδομένο σφάλμα. Η διαδικασία αυτή λέγεται διαδικασία μάθησης ή εξάσκησης και οι σειριακοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τη βέλτιστη ρύθμιση των παραμέτρων καλούνται κανόνες μάθησης.

Το ANFIS είναι ένα προσαρμοζόμενο δίκτυο το οποίο λειτουργικά είναι ισοδύναμο με ένα ασαφές σύστημα τύπου Sugeno. Αυτή η προϋπόθεση περιορίζει τη δυνατότητα εξάσκησης των συστημάτων τύπου Mamdani, στα οποία η αποασαφοποίηση απαιτεί αρκετό χρόνο και μια συστηματική ρύθμιση των παραμέτρων θα ήταν δύσκολη. Παρά ταύτα, τα συστήματα αυτά μπορούν να αναχθούν σε συστήματα Sugeno, με την αντικατάσταση των ασαφών συνόλων που ορίζουν την εξερχόμενη μεταβλητή από πλήθος σταθερών τιμών (Jang J-S R., 1993).

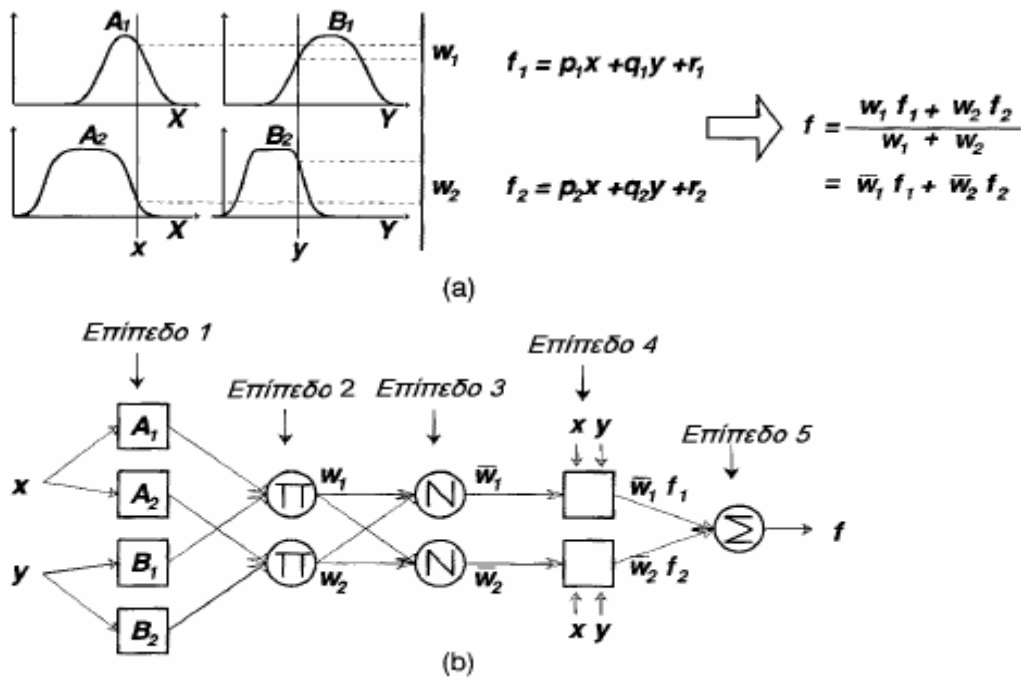
3.3.1 Αρχιτεκτονική του ANFIS

Για λόγους απλότητας θεωρείται ότι το υπό ανάλυση FIS έχει δυο εισόδους x και y και μια έξοδο z . Για ένα κοινό ασαφές μοντέλο Sugeno πρώτου βαθμού, ένα τυπικό σύνολο κανόνων με δυο ασαφείς κανόνες if-then είναι το παρακάτω:

Κανόνας 1^{ος}: if x is A_1 and y is B_1 , then $f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$

Κανόνας 2^{ος}: if x is A_2 and y is B_2 , then $f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$

Στο Σχήμα 3.10, παρουσιάζεται ένα ασαφές μοντέλο Sugeno πρώτου βαθμού, δυο εισόδων με δυο κανόνες και το ισοδύναμο ANFIS.



Σχήμα 3.10: (a) Ασαφές μοντέλο Sugeno πρώτου βαθμού δυο εισόδων με δυο κανόνες, (b) ισοδύναμο ANFIS (Jang et al., 1997).

Το Σχήμα 3.10(a) απεικονίζει τον συλλογιστικό μηχανισμό (reasoning) για αυτό το μοντέλο Sugeno. Η αντίστοιχη ισοδύναμη αρχιτεκτονική του ANFIS φαίνεται στο Σχήμα 3.10(b), όπου κόμβοι του ίδιου επιπέδου έχουν παρόμοιες συναρτήσεις όπως θα δειχθεί και στη συνέχεια (Η έξοδος του i -οστού κόμβου στο επίπεδο 1 δηλώνεται με $O_{1,i}$).

Επίπεδο 1: Κάθε κόμβος i σε αυτό το επίπεδο είναι ένας προσαρμοστικός κόμβος με συνάρτηση κόμβου:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \text{ για } i = 1, 2, \text{ ή}$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \text{ για } i = 3, 4,$$

όπου x (ή y) είναι η είσοδος στον κόμβο i και A_i (ή B_{i-2}) είναι η γλωσσική περιγραφική λέξη (όπως μικρός «small» ή μεγάλος «large») που σχετίζεται με αυτόν τον κόμβο. Δηλαδή $O_{1,i}$ είναι ο βαθμός συμμετοχής (membership grade) ενός ασαφούς συνόλου A ($=A_1, A_2, B_1$ ή B_2) και προσδιορίζει το βαθμό στον οποίο η δεδομένη είσοδος x (ή y) ανήκει στο A . Εδώ η συνάρτηση συμμετοχής για το A μπορεί να είναι οποιαδήποτε κατάλληλη παραμετρική συνάρτηση συμμετοχής (όπως π.χ. η γενικευμένη κωδωνοειδής:

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2bi}}, \text{ όπου } \{a_i, b_i, c_i\} \text{ είναι το σύνολο των παραμέτρων). Με την}$$

αλλαγή των τιμών αυτών των παραμέτρων τροποποιείται και η συνάρτηση αναλόγως, για αυτό και προκύπτουν διάφορες μορφές συναρτήσεων συμμετοχής για το ασαφές σύνολο A. Οι παράμετροι σε αυτό το επίπεδο αναφέρονται ως παράμετροι προϋποθέσεων (premise parameters).

Επίπεδο 2: Κάθε κόμβος σε αυτό το επίπεδο είναι ένας σταθερός κόμβος συμβολιζόμενος με Π , του οποίου η έξοδος είναι το γινόμενο όλων των εισερχόμενων σημάτων: $O_{2,i} = w_i = \mu_{Ai}(x)\mu_{Bi}(y)$, $i = 1,2$.

Κάθε έξοδος κόμβου αντιπροσωπεύει τη δύναμη πυροδότησης ενός κανόνα. Γενικά, κάθε τελεστής που εκτελεί ασαφή ΚΑΙ (AND) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συνάρτηση κόμβου σε αυτό το επίπεδο.

Επίπεδο 3: Κάθε κόμβος σε αυτό το επίπεδο είναι ένας σταθερός κόμβος (fixed node) συμβολιζόμενος με N. Ο i-οστός κόμβος υπολογίζει τον λόγο της δύναμης πυροδότησης του i-οστού κανόνα προς το σύνολο όλων των δυνάμεων πυροδότησης των κανόνων:

$$O_{3,i} = \overline{w_i} = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1,2.$$

Για ευκολία, οι έξοδοι σε αυτό το επίπεδο ονομάζονται κανονικοποιημένες δυνάμεις πυροδότησης.

Επίπεδο 4: Κάθε κόμβος i σε αυτό το επίπεδο είναι ένας προσαρμοστικός κόμβος με συνάρτηση κόμβου:

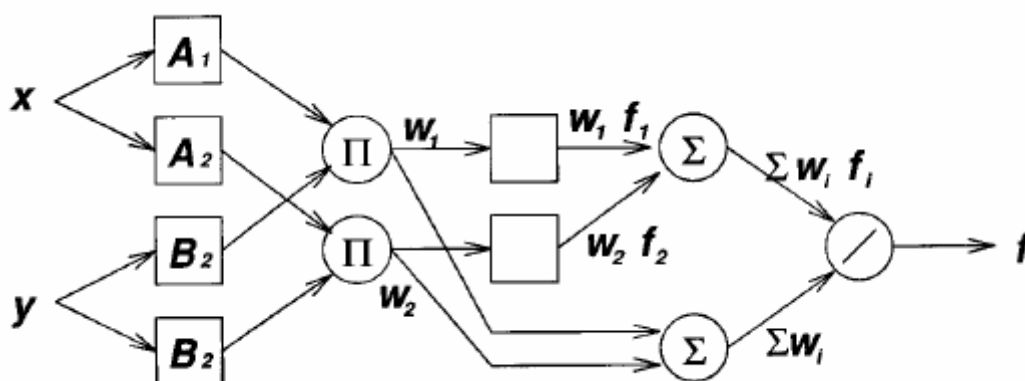
$$O_{4,i} = \overline{w_i} f_i = \overline{w_i} (p_i x + q_i y + r_i), \quad i = 1,2.$$

όπου $\overline{w_i}$ είναι μια κανονικοποιημένη δύναμη πυροδότησης από το επίπεδο 3 και $\{p_i, q_i, r_i\}$ είναι το σύνολο των παραμέτρων αυτού του κόμβου. Οι παράμετροι σε αυτό το επίπεδο αναφέρονται ως παράμετροι συμπερασμάτων (consequent parameters).

Επίπεδο 5: Ο μοναδικός κόμβος σε αυτό το επίπεδο είναι ένας σταθερός κόμβος συμβολιζόμενος με Σ , ο οποίος υπολογίζει την ολική έξοδο ως το άθροισμα όλων των εισερχόμενων σημάτων:

$$\text{Ολική έξοδος} = O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

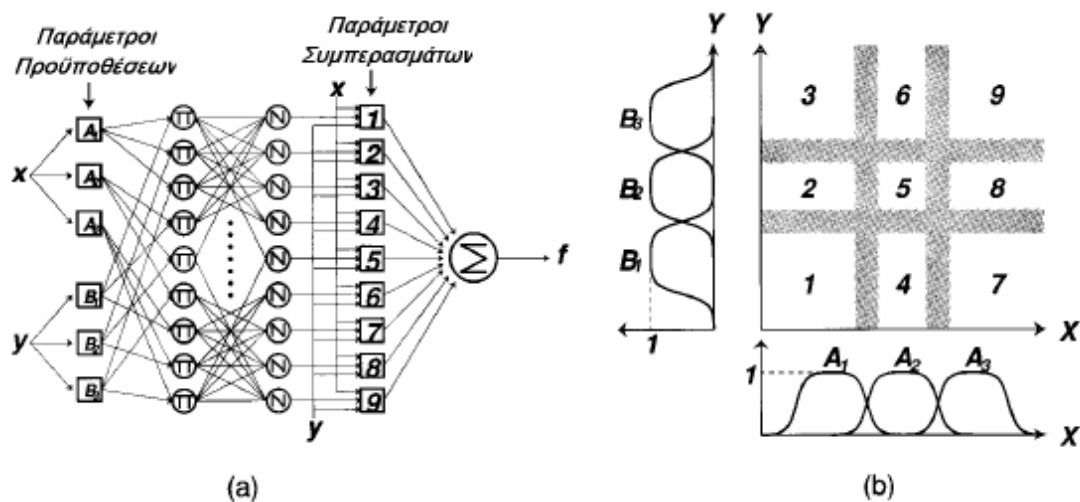
Το προσαρμοστικό αυτό δίκτυο είναι λειτουργικώς ισοδύναμο με το ασαφές μοντέλο Sugeno. Η δομή αυτού του προσαρμοστικού δικτύου δεν είναι μοναδική. Μπορούν να συνδυαστούν τα επίπεδα 3 και 4 για να αποκτηθεί ένα ισοδύναμο δίκτυο με τέσσερα μόνο επίπεδα. Με το ίδιο δείγμα μπορεί να πραγματοποιηθεί η κανονικοποίηση βαρών στο τελευταίο επίπεδο. Το Σχήμα 3.11 απεικονίζει ένα ANFIS αυτού του τύπου. Στην ακραία περίπτωση, μπορεί να συρρικνωθεί ακόμα και όλο το δίκτυο, σε έναν μόνο προσαρμοστικό κόμβο με το ίδιο σύνολο παραμέτρων. Προφανώς, η ανάθεση συναρτήσεων κόμβων και η σύνθεση του δικτύου είναι αυθαίρετες, εφόσον κάθε κόμβος και κάθε επίπεδο πραγματοποιούν λειτουργίες που είναι σημαντικές και έχουν την δυνατότητα να αποτελούνται από επιμέρους τμήματα.



Σχήμα 3.11: Η αρχιτεκτονική του ANFIS για το ασαφές μοντέλο Sugeno, όπου η κανονικοποίηση βαρών πραγματοποιείται στο τελευταίο επίπεδο (Jang et al., 1997).

Εκτός από το σύστημα τύπου Sugeno, μπορεί να κατασκευαστεί ANFIS και με το μοντέλο Mamdani. Προκύπτει όμως ένα περισσότερο περίπλοκο ANFIS σε σχέση με το Sugeno, που δεν σημαίνει ότι έχει και καλύτερες δυνατότητες εκπαίδευσης και υπολογισμού. Το Sugeno χρησιμοποιείται περισσότερο μιας και διακρίνεται για την διαφάνεια και την αποτελεσματικότητά του.

Στο Σχήμα 3.12 (a) παρουσιάζεται μια αρχιτεκτονική ANFIS που είναι ισοδύναμη με ένα ασαφές μοντέλο Sugeno πρώτου βαθμού δυο εισόδων και εννέα κανόνων, όπου σε κάθε είσοδο θεωρείται ότι αντιστοιχούν τρεις συναρτήσεις συμμετοχής. Το Σχήμα 3.12 (b) απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο ο δυο διαστάσεων χώρος εισόδου είναι χωρισμένος σε εννέα υπέρθετες (overlapping) ασαφείς περιοχές, εκ των οποίων, κάθε μια ελέγχεται από έναν ασαφή κανόνα if-then. Δηλαδή το μέρος των προϋποθέσεων ενός κανόνα προσδιορίζει μια ασαφή περιοχή, ενώ το μέρος των συμπερασμάτων προσδιορίζει την έξοδο μέσα στην περιοχή.



Σχήμα 3.12: (a) Αρχιτεκτονική του ANFIS για το ασαφές μοντέλο Sugeno με δυο εισόδους και εννέα κανόνες, (b) Χώρος εισόδου, χωρισμένος σε εννέα ασαφείς περιοχές (Jang et al., 1997).

3.3.2 Εκπαίδευση του ANFIS

Τα ANFIS πρόσθιας τροφοδότησης (feed forward) εκπαιδεύονται με τον αλγόριθμο της οπισθοδρόμης διάδοσης των σφαλμάτων (backpropagation of error), που επίσης ονομάζεται και γενικευμένος κανόνας του Δέλτα (generalized delta rule). Η εκπαίδευση επιτυγχάνεται με την παρουσίαση μιας αλληλουχίας διανυσμάτων εκπαίδευσης (training vectors), το καθένα από τα οποία είναι αντιστοιχισμένο με ένα διάνυσμα εξόδου. Επομένως, το κάθε διάνυσμα εκπαίδευσης αποτελεί τη διέγερση και το αντιστοιχισμένο διάνυσμα εξόδου την επιθυμητή απόκριση του ANFIS. Οι τιμές των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής μεταβάλλονται σύμφωνα με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης που ακολουθείται, με στόχο το διάνυσμα που παράγεται

στην έξοδο, να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερο στην επιθυμητή απόκριση. Ένα πέρασμα από όλα τα ζευγάρια διανυσμάτων εκπαίδευσης εισόδου και διανυσμάτων στόχων εξόδου, ονομάζεται εποχή (epochs) ή κύκλος επανάληψης. Σχεδόν πάντα χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός εποχών (επαναλήψεων) για την εκπαίδευση ενός ANFIS πρόσθιας τροφοδότησης, δηλαδή να επιτευχθεί η σύγκλιση του σφάλματος κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Το σφάλμα είναι μια συνάρτηση με μεταβλητές τις παραμέτρους των συναρτήσεων συμμετοχής και στόχος είναι η ελαχιστοποίησή του μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων. Συνηθέστερα εκφράζεται μέσω του αθροιστικού τετραγωνικού σφάλματος (Sum Square Error-SSE) ή μέσω του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Mean Square Error-MSE). Για παράδειγμα, αν α_k είναι η πραγματική τιμή ελέγχου και t_k η αντίστοιχη τιμή που υπολογίζεται από το ANFIS, τότε το MSE δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$MSE = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q e_k^2 = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q (t_k - \alpha_k)^2, \text{ για } k = 1, \dots, q \quad (3.14)$$

Το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά την εκπαίδευση των ANFIS, είναι το φαινόμενο της απομνημόνευσης των δεδομένων (overfitting). Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις, το μοντέλο έχει την ικανότητα να μαθαίνει τα δεδομένα εκπαίδευσης με σφάλμα που τείνει στο μηδέν, αλλά το σφάλμα γενίκευσής του είναι πάρα πολύ μεγάλο. Αυτό σημαίνει ότι η μάθηση αφορά στα συγκεκριμένα δεδομένα εκπαίδευσης και μόνο σε αυτά, γεγονός που καθιστά το μοντέλο ανεπαρκές για να χρησιμοποιηθεί για προβλέψεις με βάση άλλα δεδομένα εισαγωγής. Η εμφάνιση του γεγονότος αυτού οφείλεται, τις περισσότερες φορές, στη χρήση αρκετά πολύπλοκων συστημάτων.

Η προσέγγιση μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται από το ANFIS αποδίδει καλά, εάν τα δεδομένα εκπαίδευσης είναι πλήρως αντιπροσωπευτικά των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των δεδομένων που το εκπαιδευμένο ANFIS προορίζεται να μοντελοποιήσει. Σε πολλές περιπτώσεις τα δεδομένα εκπαίδευσης δεν μπορούν να είναι αντιπροσωπευτικά όλων των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των δεδομένων που θα παρουσιαστούν στο πρότυπο. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, μια άλλη διαδικασία, γνωστή ως πρότυπη επικύρωση, είναι απαραίτητη. Η πρότυπη επικύρωση είναι η διαδικασία από την οποία τα διανύσματα εισόδου από τα σύνολα δεδομένων εισόδου/ εξόδου στα οποία το πρότυπο δεν εκπαιδεύθηκε, παρουσιάζονται στο εκπαιδευμένο πρότυπο, για να εξεταστεί η ακρίβεια της πρόβλεψης.

3.3.3 Περιορισμοί του ANFIS

- Βασίζεται σε ένα FIS τύπου Sugeno
- Το FIS τύπου Sugeno πρέπει να είναι 0^{ου} ή 1^{ου} βαθμού
- Έχει μια έξοδο, που λαμβάνεται με τη μέθοδο αποασαφοποίησης σταθμισμένου μέσου. Όλες οι συναρτήσεις συμμετοχής εξόδου πρέπει να είναι ιδίου τύπου, είτε γραμμικές είτε σταθερές.
- Δεν επιτρέπει κοινή χρήση κανόνων. Διαφορετικοί κανόνες δεν μπορούν να έχουν την ίδια συνάρτηση συμμετοχής εξόδου.
- Απαιτείται ο καθορισμός βαρών σε κάθε κανόνα.
- Δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε συνάρτηση συμμετοχής, παρά μόνο προκαθορισμένες που επιβάλλουν οι ορισμοί του ANFIS (Fuzzy Toolbox της Matlab).

Κεφάλαιο 4

Μεθοδολογία για τη βελτίωση της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών, βασισμένη σε προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η μεθοδολογία για τη βελτίωση της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών, η οποία βασίζεται σε προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα (ANFIS). Αναπτύχθηκε ο σχετικός αλγόριθμος και υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab, κάνοντας χρήση της εργαλειοθήκης Fuzzy Logic Toolbox, που περιέχει όλα τα απαραίτητα εργαλεία για την ολοκληρωμένη ανάπτυξη και αναλυτική χρήση ενός ANFIS. Παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία και τα ANFIS που αναπτύχθηκαν με τη βοήθεια του Fuzzy Toolbox της Matlab.

4.1 Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός της ποιότητας του λιγνίτη σε πραγματικό χρόνο έχει επικρατήσει στα ορυχεία λιγνίτη και στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (Laurila, 1999). Αυτός ο προσδιορισμός, πραγματοποιείται με τους εν σειρά αναλυτές (on-line analysers), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της ποιότητας του λιγνίτη σύμφωνα με τις προδιαγραφές του σταθμού καύσης του ή της χρήσης του.

Για λιγνίτες που χρησιμοποιούνται για παραγωγή ενέργειας η ποιοτική παράμετρος που μετριέται πιο συχνά είναι η τέφρα. Αν και υπάρχουν διάφοροι τύποι αναλυτών τέφρας, ο πλέον δημοφιλής τύπος είναι ο αναλυτής μετάδοσης ακτίνων-γ διπλής ενέργειας (Dual Energy Transmission ή DUET). Οι αναλυτές αυτοί, έχουν δύο πηγές εκπομπής ακτινοβολίας γ, το ισότοπο του Αμερικού ^{241}Am και το ισότοπο του Κεσίου ^{137}Cs . Η αρχή λειτουργίας του DUET βασίζεται στο γεγονός της μείωσης της έντασης της ακτινοβολίας κατά τη διέλευσή της από τη μάζα του μεταφερόμενου γαιάνθρακα. Η μείωση των ακτίνων γάμα συσχετίζεται όχι μόνο με το πάχος του γαιάνθρακα, αλλά και με την περιεκτικότητά του σε τέφρα. Επομένως, οι περισσότεροι DUET αναλυτές χρησιμοποιούν την εξίσωση του νόμου του Beer, για την απορρόφηση ακτινοβολιών από ένα μέσο, για να συσχετίσουν τις εντάσεις των ακτίνων του Αμερικού και του Κεσίου με την τέφρα (Ganguli, 2001).

Το βασικό πρόβλημα με τους DUET στην ποιοτική ανάλυση του λιγνίτη, είναι το γεγονός ότι η ετερογένεια του μεγέθους των τεμαχιδίων του και η μεταβαλλόμενη σύσταση της τέφρας του, κάνουν τη σχέση των εντάσεων Am/Cs-τέφρας πιο σύνθετη από ότι προβλέπεται από τις απλές εξισώσεις που υπακούουν στον νόμο του Beer. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μη ακριβείς μετρήσεις τέφρας. Για να βελτιωθεί η ακρίβεια μέτρησης του DUET, ένας τρόπος είναι η βελτίωση της μεθόδου συσχέτισης των εντάσεων των μετρούμενων εντάσεων των ακτίνων-γ (Am και Cs) με την τέφρα με τη χρήση κατάλληλων μοντέλων. Τέτοια μοντέλα βαθμονόμησης είναι τα βασισμένα σε νευροασαφή έμπειρα συστήματα (ANFIS). Η χρήση ANFIS για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων είναι διαρκώς αυξανόμενη τα τελευταία χρόνια. Η εκτεταμένη αυτή χρήση οφείλεται κυρίως, στην ικανότητα που παρουσιάζουν τα εν λόγω συστήματα στην επίλυση προβλημάτων, όπου οι εμπλεκόμενες παράμετροι εισόδου (αίτια) είτε είναι μεγάλες σε αριθμό, είτε δεν είναι πλήρως κατανοητός ο τρόπος επίδρασής τους είτε, τέλος, δεν υπάρχουν συγκεκριμένοι γενικευμένοι κανόνες που να μοντελοποιούν με ακρίβεια τη συμπεριφορά τους στο τελικό αποτέλεσμα (Sietsma and Dow, 1991).

4.2 Διαδικασία μέτρησης των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση

Η λήψη των δειγμάτων λιγνίτη πραγματοποιήθηκε στο Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης και συγκεκριμένα στο πεδίο του Χωρεμίου. Οι τομές από τις οποίες ελήφθησαν τα δείγματα επιλέχθηκαν με κύριο κριτήριο την εκμεταλλευσιμότητα και τη δυνατότητα πρόσβασης και λήψης του δείγματος. Τα δείγματα ελήφθησαν από τρία σημεία σε κάθε τομή, με σκοπό να παρατηρηθεί η διακύμανση της ποιότητας του λιγνίτη κατά μήκος της τομής. Η δειγματοληψία ξεκινούσε στην κεφαλή περίπου της μεταφορικής ταινίας, στη μέση λαμβανόταν ακόμα ένα δείγμα και στην ουρά το τελευταίο. Το συνολικό βάρος του κάθε δείγματος ήταν περίπου 8,5 kg. Το κάθε δείγμα χωρίστηκε σε τέσσερα επιμέρους δείγματα που στο καθένα αυξανόταν το ποσοστό αγόνου, ξεκινώντας από "καθαρό" λιγνίτη. Το πρώτο επιμέρους δείγμα από τα τέσσερα στα οποία χωρίστηκε το αρχικό δείγμα είχε βάρος περίπου 2,2-2,3 kg και αποτελούνταν από λιγνίτη χωρίς να προστεθεί επιπλέον ποσότητα αγόνου (κωδικός δείγματος N₀ 0). Το δεύτερο δείγμα είχε το ίδιο βάρος με το πρώτο, μόνο που περιείχε 10% άγονο υλικό σε ποσοστό επί του συνόλου της μάζας του (κωδικός δείγματος N₀ 1). Τα επόμενα δύο δείγματα είχαν το ίδιο βάρος μόνο που το ποσοστό

αγόνου αυξανόταν σταδιακά και έφτασε το 40% (κωδικός δείγματος N_o 2 & N_o 3). Τα άγονα που χρησιμοποιήθηκαν ως πρόσμιξη ήταν αργιλικά, μαργαϊκά και ασβεστιτικά υλικά καθώς και σαπροπηλοί.

Η πρώτη δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε στην τέταρτη τομή του πεδίου του Χωρεμίου. Η ονομασία που έχει το δείγμα είναι E14/1 (όπου το E αντιστοιχεί στον εκσκαφέα και ο αριθμός 4 στην τομή). Η λήψη του δεύτερου δείγματος πραγματοποιήθηκε στην τρίτη τομή του ίδιου πεδίου. Η ονομασία του δείγματος είναι E13/1. Στην πέμπτη τομή δεν ελήφθηκε κάποιο δείγμα γιατί υπήρχε μεγάλη δυσκολία στην πρόσβαση στο σημείο που υπήρχε κάποια στρώση λιγνίτη (ήταν περίπου στα 20 m ύψος από το δάπεδο της τομής) και δε λειτουργούσε κάποιος εκσκαφέας εκεί. Το τρίτο δείγμα κατά σειρά ήταν από την έκτη τομή του πεδίου και η ονομασία του είναι E16/1. Εφόσον είχε ληφθεί η πρώτη σειρά δειγμάτων, η οποία πραγματοποιήθηκε με σκοπό να περιγράψει τα στρώματα λιγνίτη που απαντώνται στο πεδίο του Χωρεμίου, λήφθηκε η δεύτερη σειρά. Επίσης λήφθηκε και μια τρίτη σειρά δειγμάτων για να καλυφθεί το μεγάλο μήκος των τομών, καθώς επίσης και γιατί παρατηρήθηκε σημαντική διαφορά στη σύσταση του αγόνου υλικού.

Οι εργασίες που εκτελέστηκαν στο χημείο του ατμοηλεκτρικού σταθμού Μεγαλόπολης Β', ήταν η καύση του δείγματος και η λήψη της τέφρας του, η θερμιδομέτρησή του και ο υπολογισμός της περιεχόμενης υγρασίας. Το δείγμα στο χημείο υπέστη μια πρώτη θραύση, έτσι ώστε να μην υπάρχουν χονδρομερή κομμάτια λιγνίτη και αγόνου.

Με την βοήθεια του αναλυτή μετρήθηκαν οι εντάσεις των δύο πηγών ακτινοβολίας (I_{Am} , I_{Cs}), οι οποίες μετρούνται υπό τη μορφή του αριθμού των κρούσεων προς το χρόνο μέτρησης. Η διαδικασία της λήψης της μέτρησης ήταν απλή, όμως ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην τοποθέτηση του δείγματος ακριβώς κάτω από την οπή από την οποία εξέρχεται η ακτινοβολία. Επίσης κρίθηκε σκόπιμη η λήψη μέτρησης στα δείγματα σε διαφορετικά πάχη του λιγνίτη μέσα στο δοχείο που βρίσκεται. Η μέτρηση αυτή κατέστη δυνατή με την τοποθέτηση του δείγματος από την όρθια στην πλάγια θέση. Έτσι στη θέση 1 το πάχος του λιγνίτη είναι τουλάχιστον 10cm, στη θέση 2 είναι περίπου 8cm και στη θέση 3 είναι περίπου στα 5 με 6cm. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα παρατήρησης της μεταβολής της μέτρησης του αναλυτή κοντά στο όριο ανίχνευσής του. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου των τιμών λόγω του μεγαλύτερου πλήθους μετρήσεων, π.χ. μια μέτρηση στην οποία

το δείγμα δεν ήταν ακριβώς κάτω από την οπή γίνεται εύκολα αντιληπτή αφού υπάρχουν άλλες τρεις μετρήσεις του ίδιου δείγματος.

Οι μετρούμενες εντάσεις I_{Am} και I_{Cs} , χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της περιεχόμενης τέφρας a , εφαρμόζοντας την παρακάτω σχέση (Watt,1985):

$$a = \frac{Q\mu_{Cs} - \mu_{cw,Am}}{(\mu_{a,Am} - \mu_{cw,Am})} \quad (4.1)$$

Ο συντελεστής Q υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = \ln\left(\frac{I_{Am}}{I_{o,Am}}\right) / \ln\left(\frac{I_{Cs}}{I_{o,Cs}}\right) \quad (4.2)$$

όπου:

I_{Am} , I_{Cs} είναι οι μετρούμενες εντάσεις (cps)

$I_{o,Am}$, $I_{o,Cs}$ είναι οι εντάσεις όταν η ταινία είναι κενή (cps)

μ_{Cs} , $\mu_{cw,Cs}$, $\mu_{a,Cs}$, είναι οι συντελεστές απορρόφησης μάζας για την ακτινοβολία του κεσίου (^{137}Cs)

$\mu_{cw,Am}$, $\mu_{a,Am}$ είναι οι συντελεστές απορρόφησης μάζας για την ακτινοβολία του αμερικίου (^{241}Am)

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη και εφαρμογή των ANFIS, όπου το πάχος του λιγνίτη, αναφέρεται στη θέση του λιγνίτη μέσα στο δοχείο που βρίσκεται, όπου στη θέση 1 το πάχος του λιγνίτη είναι τουλάχιστον 10cm, στη θέση 2 είναι περίπου 8cm και στη θέση 3 είναι περίπου στα 5 με 6cm :

Πίνακας 4.1: Δεδομένα ανάπτυξης και εφαρμογής των ANFIS

Δείγμα	I_{Am} (cps)	I_{Cs} (cps)	Πάχος (θέση) (cm)	Q	Τέφρα (%)
E13-1-0	200.9	334.8	1	2.022945315	9.05
	372.2	471.95	2	2.20782114	9.05
	498.05	546	3	2.318451927	9.05
E13-1-1	237	383.7	1	2.198793506	15.83
	332	455.5	2	2.286523671	15.83
	404.6	504.6	3	2.388900803	15.83
E13-1-2	198.1	343.5	1	2.112134689	28.38
	248.4	393.9	2	2.216570583	28.38

E13-1-3	480.8	560.3	3	2.699291068	28.38
	272.3	404.3	1	2.15739597	32.82
	352.8	469.9	2	2.310942311	32.82
E13-2-0	366.7	488.1	3	2.437712935	32.82
	233.6	392.6	1	2.305903875	20.5
	316.8	459.1	2	2.430940154	20.5
E13-2-1	379	500.3	3	2.512571058	20.5
	167.9	312.5	1	2.070916948	22.99
	300	412	2	2.05661223	22.99
E13-2-2	652.8	639.2	3	3.120600132	22.99
	180.5	340	1	2.207414792	26.78
	292.8	439	2	2.37010213	26.78
E13-2-3	477.4	565.6	3	2.834450053	26.78
	234	407.2	1	2.450839972	28.36
	293.6	458.8	2	2.596486663	28.36
E13-3-0	486.3	578.1	3	3.033330704	28.36
	201.8	337.5	1	2.03850821	13.41
	288.4	410.8	2	2.116284792	13.41
E13-3-1	457.3	529.1	3	2.359023381	13.41
	258.3	393.9	1	2.151685937	17.29
	344.8	408.4	2	1.778901807	17.29
E14-1-0	428.8	522.8	3	2.472085528	17.29
	244.4	344.4	1	1.834502713	10.53
	279.5	396.3	2	2.041311489	10.53
E14-1-1	419.9	503.9	3	2.275334994	10.53
	257.3	392.8	1	2.148152413	15.63
	360.5	474.2	2	2.309647551	15.63
E14-1-2	449.9	530.7	3	2.436063598	15.63
	582.3	558.3	1	1.905720776	23.48
	233.8	351.5	2	1.948680366	23.48
E14-1-3	767	673	3	3.114331907	23.48
	705.1	625.8	1	2.093359907	28.87
	316.1	471.3	2	2.586920858	28.87
E14-2-1	581.9	596.6	3	2.584954055	28.87
	406.9	451.5	1	1.806531882	10.54
	317.1	451.6	2	2.342913421	10.54
E14-2-2	443.4	533.2	3	2.5228749	10.54
	404.4	450	1	1.806854172	15.56
	204.2	341.1	2	2.051648909	15.56
E14-2-3	524.4	549.2	3	2.177665629	15.56
	333	419.1	1	1.928499526	19.15
	264.3	409.8	2	2.262186052	19.15
E14-3-0	488.4	555.1	3	2.541726081	19.15
	343.4	452.9	1	2.185280527	16.37
	322.4	437.2	2	2.157179512	16.37
E14-3-1	483.7	545.6	3	2.418030019	16.37
	380.9	457	1	2.000266702	18.05
	317.8	446.1	2	2.278221928	18.05
E14-3-3	499.1	554.2	3	2.442849673	18.05
	283.8	409.5	1	2.132915209	24.08
	283.2	432.7	2	2.368286827	24.08
E16-1-0	624.7	606.6	3	2.420754196	24.08
	285.5	405.6	1	2.086875442	9.37

	438.5	514.4	2	2.286013593	9.37
	529.1	575	3	2.584044637	9.37
E16-1-2	220.9	378	1	2.256974962	18.29
	305.3	442.5	2	2.322807687	18.29
	522.2	573	3	2.602165816	18.29
E16-1-3	260.6	418.8	1	2.379079999	20.55
	229.1	378.6	2	2.205772422	20.55
	523.4	581.7	3	2.775923636	20.55
E16-2-0	243.8	378.6	1	2.108894381	11.03
	328.8	451.4	2	2.262945125	11.03
	454.5	526.3	3	2.338625123	11.03
E16-2-1	328.05	450	1	2.25282999	14.71
	266.4	421.5	2	2.366503073	14.71
	676	625.4	3	2.384791999	14.71
E16-2-2	498.9	526	1	2.036688775	22.1
	688.8	647	2	2.971354183	22.1
	584.2	619.3	3	3.202897071	22.1
E16-3-0	245.1	381.3	1	2.124123962	12.16
	243.1	370.6	2	2.045326567	12.16
	531.4	568.6	3	2.442655678	12.16
E16-3-1	238.4	384.2	1	2.193968655	13.7
	247.6	383.3	2	2.125655278	13.7
	474.4	542.9	3	2.444383373	13.7
E16-3-2	212.1	366.2	1	2.211173731	17.02
	210.8	357.2	2	2.141365405	17.02
	480.3	555.5	3	2.613490908	17.02

4.3 Παρουσίαση μεθοδολογίας

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η επιλογή των εισόδων των συστημάτων, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα την έξοδό τους, δηλαδή την τέφρα των λιγνιτικών κοιτασμάτων. Ως εισοδοί επιλέχθηκαν τα πρωτογενή στοιχεία, που είναι η ένταση της ακτινοβολίας του Αμερικού (I_{Am}), η ένταση της ακτινοβολίας του Κεσίου (I_{Cs}), το πάχος (position) του λιγνίτη μέσα στο δοχείο που βρίσκεται, και το μέγεθος Q, το οποίο εκφράζει το κλάσμα των λογαρίθμων των εντάσεων των δύο πηγών ακτινοβολίας. Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες εισοδοί, γιατί είναι οι βασικές παράμετροι που επιδρούν καθοριστικά στον υπολογισμό της περιεχόμενης τέφρας του λιγνίτη.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε διαμερισμός των εισόδων των συστημάτων και επιλογή των συναρτήσεων συμμετοχής τους. Δημιουργήθηκαν οι κανόνες των συστημάτων σύμφωνα με τις εισόδους και τους διαμερισμούς τους.

Κατόπιν συλλέχθηκαν τα δεδομένα των ANFIS, τα οποία εισάγονται κάθε φορά που πραγματοποιείται εφαρμογή τους. Τα δεδομένα του κάθε ANFIS, χωρίστηκαν σε δύο υποσύνολα (Πίνακας 4.2), από τα οποία το πρώτο περιλαμβάνει

τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση και το δεύτερο τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την επικύρωση του εκπαιδευμένου μοντέλου.

Πίνακας 4.2: Αριθμός δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των εκπαιδευμένων ANFIS.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ	48
Δεδομένα επικύρωσης	39
Σύνολο δεδομένων	87

Για την ανάπτυξη των ANFIS, χρησιμοποιήθηκε το FIS τύπου Sugeno πρώτου βαθμού. Η ρύθμιση των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής πραγματοποιήθηκε με την υβριδική μέθοδο, η οποία βασίζεται στα ελάχιστα τετράγωνα και στον αλγόριθμο οπισθόδρομης διάδοσης. Πραγματοποιήθηκε εκπαίδευση των συστημάτων για 200 και 400 επαναλήψεις (εποχές). Σχεδόν πάντα χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων για την εκπαίδευση ενός ANFIS, δηλαδή για να επιτευχθεί η σύγκλιση του σφάλματος κάτω από ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Επίσης, πραγματοποιήθηκε και έλεγχος των συστημάτων, με σκοπό να υπολογισθεί το μέσο σφάλμα ελέγχου και να συγκριθεί με το αντίστοιχο σφάλμα της εκπαίδευσης.

4.4 Ανάπτυξη και εφαρμογή των ANFIS

Αναπτύχθηκαν τέσσερα προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα, με διαφορετικές εισόδους το καθένα, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους και την επιλογή του συστήματος που δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Υπάρχουν δύο τεχνικές με τις οποίες παράγεται ένα FIS, η τεχνική του πλήρη διαμερισμού του χώρου (Grid partition), η οποία χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή και η τεχνική του επιλεκτικού διαχωρισμού (Subtractive Clustering), με τις οποίες δίνονται οι αρχικές τιμές στις παραμέτρους ενός FIS. Με την Grid partition μπορεί να επιλεγεί ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής και ο τύπος των συναρτήσεων συμμετοχής εισόδου και εξόδου. Υπάρχουν μόνο δύο επιλογές για τη συνάρτηση συμμετοχής εξόδου: είτε να είναι σταθερή, είτε γραμμική. Η Subtractive Clustering είναι ένας γρήγορος, ενός περάσματος, αλγόριθμος που υπολογίζει τον αριθμό των ομάδων σε ένα σύνολο στοιχείων. Είναι μια αποτελεσματική τεχνική για

μεγάλα σύνολα στοιχείων. Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι η Subtractive Clustering δίνει παρόμοια αποτελέσματα με την Grid partition.

Τα ANFIS που δημιουργήθηκαν, με τη χρήση του λογισμικού Matlab, μέσω της εργαλειοθήκης Fuzzy Logic Toolbox, προβλέπουν τις καταλληλότερες παραμέτρους των συναρτήσεων συμμετοχής. Πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές, αλλάζοντας τον αριθμό των επαναλήψεων, τον αριθμό των συναρτήσεων συμμετοχής και τον τύπο τους.

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν έγινε χρήση των εξής συναρτήσεων συμμετοχής: της τριγωνικής, της τραπεζοειδούς, της γκαουσσισιανής, της διπλής γκαουσσισιανής, της γενικευμένης κωδωνοειδούς, της διαφοράς σιγμοειδών, του γινομένου σιγμοειδών, καθώς και της π . Η αντιστοιχία συντομεύσεων και πλήρων ονομάτων των συναρτήσεων συμμετοχής, είναι οι παρακάτω:

- trimf = τριγωνική
- trapmf = τραπεζοειδής
- gbellmf = γενικευμένη κωδωνοειδής
- gaussmf = γκαουσσισιανή
- gauss2mf = διπλή γκαουσσισιανή
- pimf = π
- dsigmf = διαφορά σιγμοειδών
- psigmf = γινόμενο σιγμοειδών

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για 200 και 400 επαναλήψεις. Για τις επαναλήψεις από 400 και άνω, η βελτίωση ήταν είτε αμελητέα, είτε ανύπαρκτη, ενώ ο χρόνος που απαιτούνταν για την ολοκλήρωση του αλγορίθμου αυξανόταν υπερβολικά.

Τα τέσσερα διαφορετικά ANFIS που αναπτύχθηκαν με βάση τις εισόδους τους, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3:

Πίνακας 4.3: Τα διαφορετικά ANFIS που αναπτύχθηκαν με βάση τις εισόδους τους.

ANFIS	Είσοδοι	Έξοδος
1 ^ο	I_{Am} , I_{Cs}	Ash
2 ^ο	I_{Am} , I_{Cs} , Position	Ash
3 ^ο	Q, I_{Cs}	Ash
4 ^ο	Q, Position	Ash

Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά το κάθε ANFIS και δίνονται τα σφάλματα της εκπαίδευσής του, τα σφάλματα της επικύρωσής του (μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου-RMS), ο αριθμός των παραμέτρων του για τα διάφορα είδη συναρτήσεων συμμετοχής, καθώς και η δομή του.

4.4.1 Σύστημα 1^ο [$A = f(I_{Am}, I_{Cs})$]

Οι δύο είσοδοι αυτού του συστήματος, είναι οι εξής:

- Η ένταση της ακτινοβολίας του Αμερικίου. Στο σύστημα αναφέρεται ως I_{Am} .
- Η ένταση της ακτινοβολίας του Κεσίου. Στο σύστημα αναφέρεται ως I_{Cs} .

Η έξοδος είναι η τέφρα επί φυσικού των λιγνιτικών κοιτασμάτων. Στο σύστημα αναφέρεται ως Ash.

Στον Πίνακα 4.4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σφαλμάτων της εκπαίδευσης και του ελέγχου του συστήματος, για 200 επαναλήψεις, για διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής και για διαφορετικό αριθμό συναρτήσεων συμμετοχής (π.χ. ο όρος trimf 200,2-2 σημαίνει ότι χρησιμοποιήθηκε η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής, οι επαναλήψεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 200 και είναι δύο οι συναρτήσεις συμμετοχής σε κάθε μια από τις δύο εισόδους). Με έντονη γραφή παρουσιάζονται οι μικρότερες τιμές και με υπογράμμιση οι μεγαλύτερες. Επίσης παρουσιάζονται οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος για όλες τις συναρτήσεις συμμετοχής.

Πίνακας 4.4: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 1 ^{ου} συστήματος.			
Συναρτήσεις συμμετοχής	Σφάλματα εκπαίδευσης (%)	Σφάλματα επικύρωσης (μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου) (%)	Αριθμός παραμέτρων (βαθμοί ελευθερίας)
trimf 200,2-2	<u>5.752</u>	5.236	24
trapmf 200,2-2	5.314	6.857	28
gbellmf 200, 2-2	5.300	<u>7.257</u>	24
gaussmf 200,2-2	5.537	5.690	20

gauss2mf 200,2-2	5.296	6.849	28
pimf 200,2-2	5.408	7.088	28
dsigmf 200,2-2	5.250	6.688	28
psigmf 200, 2-2	5.249	6.633	28
trimf 200,3-3	5.022	6.753	45
trapmf 200,3-3	5.131	34.613	51
gbellmf 200, 3-3	4.862	11.315	45
gaussmf 200,3-3	4.955	10.364	39
gauss2mf 200,3-3	<u>5.204</u>	15.436	51
pimf 200,3-3	5.179	<u>156.184</u>	51
dsigmf 200,3-3	5.102	13.943	51
psigmf 200, 3-3	5.139	15.093	51

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου (RMS) υπολογίζεται από τη σχέση:

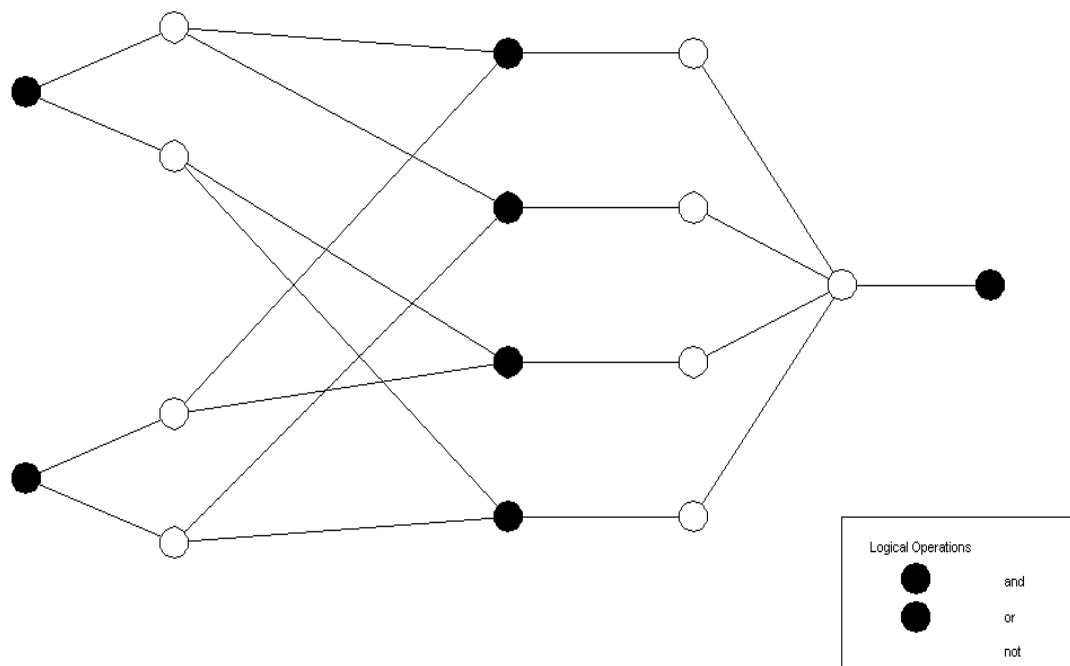
$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{\text{υπολογιστικό}} - x_{\text{πραγματικό}})^2}{n}} \quad (4.3)$$

όπου: $x_{\text{υπολογιστικό}}$, είναι οι υπολογισθείσες τιμές

$x_{\text{πραγματικό}}$, είναι οι πραγματικές τιμές και

n , είναι ο αριθμός των μετρήσεων

Στο Σχήμα 4.1, στο οποίο παρουσιάζεται η δομή του ANFIS, παρατηρείται ότι αυτό έχει 2 εισόδους, 2 συναρτήσεις συμμετοχής σε κάθε μια είσοδο, 4 κανόνες και 4 συναρτήσεις συμμετοχής στην έξοδο.



Σχήμα 4.1: Δομή του 1^{ου} ANFIS.

4.4.2 Σύστημα 2^ο [$A = f(I_{Am}, I_{Cs}, \text{Position})$]

Το σύστημα αυτό έχει τρεις εισόδους, οι οποίες είναι οι εξής:

- Η ένταση της ακτινοβολίας του Αμερικίου. Στο σύστημα αναφέρεται ως I_{Am} .
- Η ένταση της ακτινοβολίας του Κεσίου. Στο σύστημα αναφέρεται ως I_{Cs} .
- Το πάχος του λιγνίτη. Στο σύστημα αναφέρεται ως position. Στη θέση 1 το πάχος του λιγνίτη είναι τουλάχιστον 10cm, στη θέση 2 είναι περίπου 8cm και στη θέση 3 είναι περίπου στα 5 με 6cm.

Η έξοδος είναι η τέφρα επί φυσικού του λιγνίτη. Στο σύστημα αναφέρεται ως Ash.

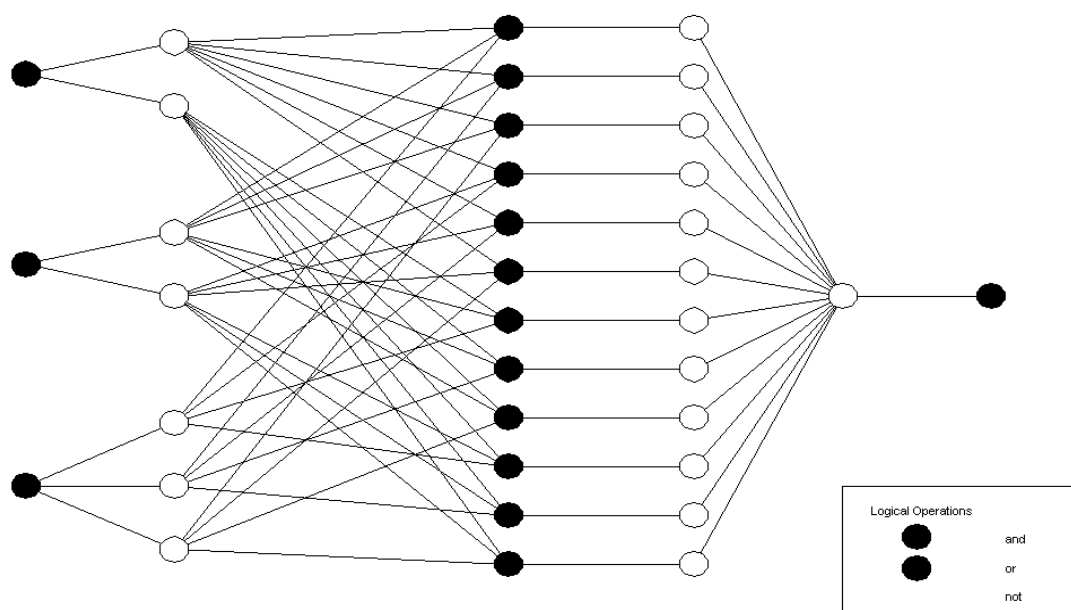
Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σφαλμάτων της εκπαίδευσης και του ελέγχου του συστήματος, για 200 επαναλήψεις, για διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής και για διαφορετικό αριθμό συναρτήσεων συμμετοχής. (π.χ. ο όρος trapmf 200,2-2-3 σημαίνει ότι χρησιμοποιήθηκε η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής, οι επαναλήψεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι 200 και είναι δύο οι συναρτήσεις συμμετοχής στην πρώτη και στη δεύτερη είσοδο και τρεις στην τρίτη). Με έντονη γραφή παρουσιάζονται οι μικρότερες τιμές και με υπογράμμιση οι μεγαλύτερες. Επίσης παρουσιάζονται οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος για όλες τις συναρτήσεις συμμετοχής.

Πίνακας 4.5: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 2^{ου} συστήματος.

Συναρτήσεις συμμετοχής	Σφάλματα εκπαίδευσης (%)	Σφάλματα επικύρωσης (μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου) (%)	Αριθμός παραμέτρων (βαθμοί ελευθερίας)
trimf 200,2-2-3	4.736	54.538	69
trapmf 200,2-2-3	4.241	4965.614	76
gbellmf 200,2-2-3	3.941	819.691	69
gaussmf 200,2-2-3	3.956	538.987	62
gauss2mf 200,2-2-3	4.367	3798.827	76
pimf 200,2-2-3	4.164	<u>69731.412</u>	76
dsigmf 200,2-2-3	4.347	7000.690	76
psigmf 200,2-2-3	<u>5.611</u>	7272.545	76
trimf 200,3-3-3	<u>3.931</u>	41.085	135
trapmf 200,3-3-3	3.258	221.138	144
gbellmf 200,3-3-3	1.414	<u>218392.588</u>	135
gaussmf 200,3-3-3	1.480	60189.994	126
gauss2mf 200,3-3-3	2.473	20895.999	144
pimf 200,3-3-3	3.217	303.752	144
dsigmf 200,3-3-3	2.603	2144.867	144
psigmf 200,3-3-3	2.675	2148.229	144

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται το φαινόμενο της υπερεκπαίδευσης (overtraining ή overfitting) του ANFIS. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του συστήματος gbellmf 200,3-3-3, που ενώ το σφάλμα της εκπαίδευσης είναι πολύ μικρό (1,4138), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου είναι πάρα πολύ υψηλό (218392,5875). Τα μεγάλα σφάλματα παρατηρούνται όταν υπάρχει αυξημένος αριθμός συναρτήσεων συμμετοχής, οπότε ο αριθμός των παραμέτρων του συστήματος (βαθμοί ελευθερίας) αυξάνει πολύ και μπορεί να υπερβεί τον αριθμό των δεδομένων εκπαίδευσης.

Στο σχήμα 4.2, στο οποίο παρουσιάζεται η δομή του ANFIS, παρατηρείται ότι αυτό έχει 3 εισόδους, 2 συναρτήσεις συμμετοχής στην πρώτη και δεύτερη είσοδο και τρεις στην τρίτη, 12 κανόνες και 12 συναρτήσεις συμμετοχής στην έξοδο.



Σχήμα 4.2: Δομή του 2^{ου} ANFIS.

4.4.3 Σύστημα 3^ο [$A = f(Q, I_{Cs})$]

Οι δύο είσοδοι που επιλέχθηκαν για αυτό το σύστημα, είναι οι εξής:

- Το κλάσμα των λογαρίθμων των λόγων των εντάσεων των δύο πηγών ακτινοβολίας. Στο σύστημα αναφέρεται ως Q.
- Η ένταση της ακτινοβολίας του Κεσίου. Στο σύστημα αναφέρεται ως I_{Cs} .

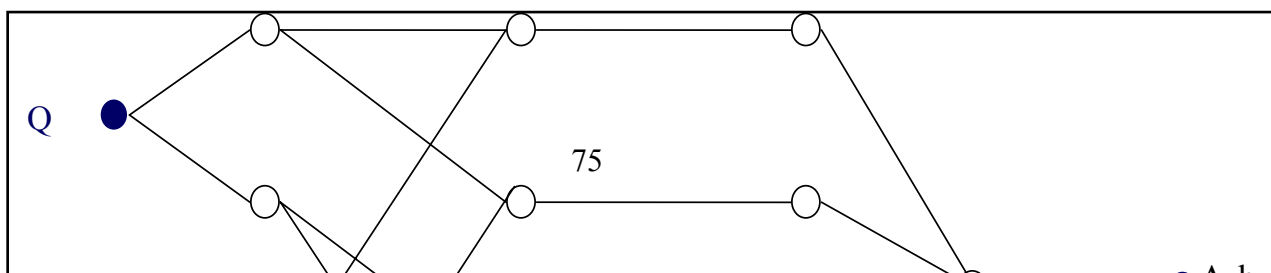
Η έξοδος είναι η τέφρα επί φυσικού των λιγνιτικών κοιτασμάτων. Στο σύστημα αναφέρεται ως Ash.

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σφαλμάτων της εκπαίδευσης και του ελέγχου του συστήματος, για 200 επαναλήψεις, για διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής και για διαφορετικό αριθμό συναρτήσεων συμμετοχής. (π.χ. ο όρος gbellmf 200,3-3 σημαίνει ότι χρησιμοποιήθηκε η γενικευμένη κωδωνοειδής συνάρτηση συμμετοχής, οι επαναλήψεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι 200 και είναι τρεις οι συναρτήσεις συμμετοχής σε κάθε μια από τις δύο εισόδους). Με έντονη γραφή παρουσιάζονται οι μικρότερες τιμές και με υπογράμμιση οι μεγαλύτερες. Επίσης παρουσιάζονται οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος για όλες τις συναρτήσεις συμμετοχής.

Πίνακας 4.6: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 3^{ου} συστήματος.

Συναρτήσεις συμμετοχής	Σφάλματα εκπαίδευσης (%)	Σφάλματα επικύρωσης (μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου) (%)	Αριθμός παραμέτρων (βαθμοί ελευθερίας)
trimf 200,2-2	<u>5.802</u>	5.046	24
trapmf 200,2-2	5.502	5.611	28
gbellmf 200,2-2	5.387	6.228	24
gaussmf 200,2-2	5.462	6.068	20
gauss2mf 200,2-2	5.420	6.119	28
pimf 200,2-2	5.293	<u>6.269</u>	28
dsigmf 200,2-2	5.331	5.569	28
psigmf 200,2-2	5.331	5.569	28
trimf 200,3-3	4.857	9.257	45
trapmf 200,3-3	5.027	11.989	51
gbellmf 200,3-3	4.824	26.456	45
gaussmf 200,3-3	4.850	8.331	39
gauss2mf 200,3-3	4.870	<u>39.200</u>	51
pimf 200,3-3	<u>5.037</u>	14.496	51
dsigmf 200,3-3	4.743	8.474	51
psigmf 200,3-3	4.740	7.088	51

Στο Σχήμα 4.3, στο οποίο παρουσιάζεται η δομή του ANFIS, παρατηρείται ότι αυτό έχει 2 εισόδους, 2 συναρτήσεις συμμετοχής σε κάθε μια είσοδο, 4 κανόνες και 4 συναρτήσεις συμμετοχής στην έξοδο.



Σχήμα 4.3: Δομή του 3^{ου} ANFIS.

4.4.4 Σύστημα 4^ο [$A = f(Q, \text{Position})$]

Οι δύο είσοδοι του συστήματος, είναι οι εξής:

- Το κλάσμα των λογαρίθμων των λόγων των εντάσεων των δύο πηγών ακτινοβολίας. Στο σύστημα αναφέρεται ως Q.
- Το πάχος του λιγνίτη. Στο σύστημα αναφέρεται ως position. Στη θέση 1 το πάχος του λιγνίτη είναι τουλάχιστον 10cm, στη θέση 2 είναι περίπου 8cm και στη θέση 3 είναι περίπου στα 5 με 6cm.

Η έξοδος είναι η τέφρα επί φυσικού των λιγνιτικών κοιτασμάτων. Στο σύστημα αναφέρεται ως Ash.

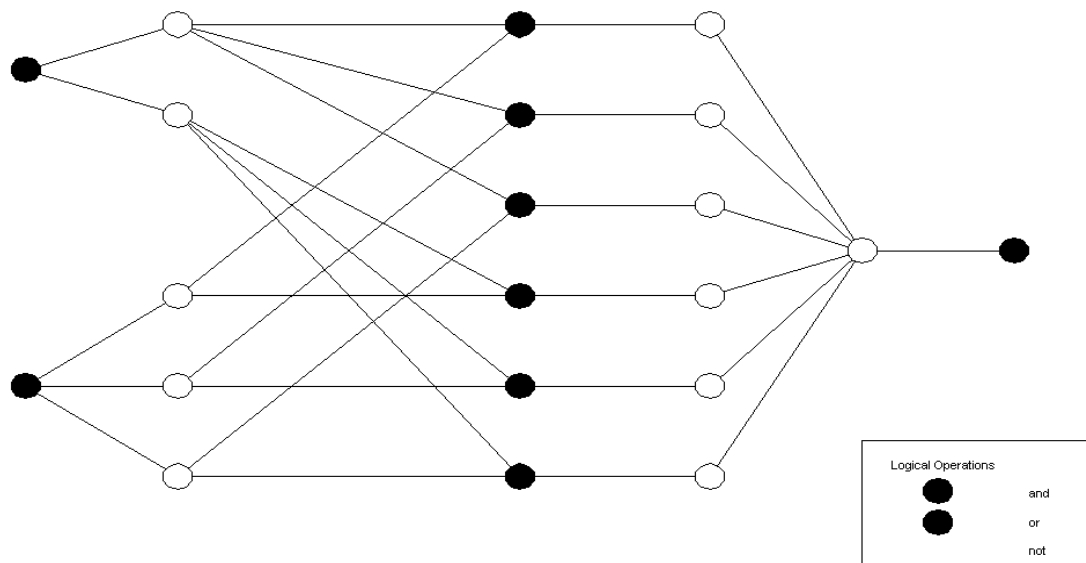
Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σφαλμάτων της εκπαίδευσης και του ελέγχου του συστήματος, για 200 επαναλήψεις, για διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής και για διαφορετικό αριθμό συναρτήσεων συμμετοχής. (π.χ. ο όρος gaussmf 200,2-3 σημαίνει ότι χρησιμοποιήθηκε η γκαουσσσιανή συνάρτηση συμμετοχής, οι επαναλήψεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι 200 και είναι δύο οι συναρτήσεις συμμετοχής στην πρώτη είσοδο και τρεις στη δεύτερη). Με έντονη γραφή παρουσιάζονται οι μικρότερες τιμές και με υπογράμμιση οι μεγαλύτερες. Επίσης παρουσιάζονται οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος για όλες τις συναρτήσεις συμμετοχής.

Πίνακας 4.7: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 4^{ου} συστήματος.

Συναρτήσεις συμμετοχής	Σφάλματα εκπαίδευσης (%)	Σφάλματα επικύρωσης (μέσο τετραγωνικό	Αριθμός παραμέτρων (βαθμοί
---------------------------	--------------------------------	---	----------------------------------

		σφάλμα ελέγχου) (%)	ελευθερίας)
trimf 200,2-3	<u>5.935</u>	<u>8.086</u>	33
trapmf 200,2-3	5.878	5.950	38
gbellmf 200,2-3	5.851	6.557	33
gaussmf 200,2-3	5.830	6.457	28
gauss2mf 200,2-3	5.772	6.387	38
pimf 200,2-3	5.849	6.112	38
dsigmf 200,2-3	5.858	6.160	38
psigmf 200,2-3	5.858	6.160	38
trimf 200,3-3	5.629	<u>24.407</u>	45
trapmf 200,3-3	<u>5.854</u>	6.890	51
gbellmf 200,3-3	5.436	7.918	45
gaussmf 200,3-3	5.331	8.008	39
gauss2mf 200,3-3	5.544	20.009	51
pimf 200,3-3	5.793	7.247	51
dsigmf 200,3-3	5.643	17.969	51
psigmf 200,3-3	5.643	17.968	51

Στο Σχήμα 4.4, στο οποίο παρουσιάζεται η δομή του ANFIS, παρατηρείται ότι αυτό έχει 2 εισόδους, 2 συναρτήσεις συμμετοχής στην πρώτη και τρεις στην δεύτερη, 6 κανόνες και 6 συναρτήσεις συμμετοχής στην έξοδο.



Σχήμα 4.4: Δομή του 4^{ου} ANFIS.

4.5 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναπτυχθέντων ANFIS και επιλογή των καλύτερων συστημάτων

Για να θεωρηθεί ένα σύστημα κατάλληλο, θα πρέπει τα σφάλματα της εκπαίδευσης και του ελέγχου του να είναι παραπλήσια. Από τα παραπάνω τέσσερα συστήματα, τα μικρότερα σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου, εμφανίζονται στο 3^ο και 4^ο σύστημα. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής των εισόδων των συστημάτων, αυξάνονται και τα σφάλματα ελέγχου, ενώ τα σφάλματα εκπαίδευσης μειώνονται. Επιπλέον, τα σφάλματα ελέγχου είναι μεγαλύτερα από τα σφάλματα της εκπαίδευσης, σε όλα τα συστήματα. Αν αυξηθούν ή μειωθούν οι επαναλήψεις, δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές στα σφάλματα των συστημάτων. Τα αποτελέσματα των σφαλμάτων της εκπαίδευσης και του ελέγχου των συστημάτων για 400 επαναλήψεις, παρουσιάζονται στο παράρτημα Α.

4.6 Αναλυτική περιγραφή του 3^{ου} και 4^{ου} συστήματος

Η προσέγγιση μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται από το ANFIS υποθέτει μια παραμετρική δομή μοντέλου και ένα σύνολο δεδομένων εισόδου/ εξόδου σε μια μορφή που θα είναι χρησιμοποιήσιμη από το ANFIS για την εκπαίδευση. Αυτός ο τύπος μοντελοποίησης αποδίδει καλά, εάν τα στοιχεία εκπαίδευσης είναι πλήρως αντιπροσωπευτικά των χαρακτηριστικών των στοιχείων που το εκπαιδευμένο ANFIS προορίζεται να μοντελοποιήσει. Σε πολλές περιπτώσεις τα δεδομένα εκπαίδευσης δεν μπορούν να είναι αντιπροσωπευτικά όλων των χαρακτηριστικών των δεδομένων που θα παρουσιαστούν στο μοντέλο. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα μια άλλη διαδικασία γνωστή ως επικύρωση είναι απαραίτητη. Η επικύρωση είναι η διαδικασία με την οποία τα διανύσματα εισόδου από τα σύνολα δεδομένων εισόδου/ εξόδου στα οποία το μοντέλο δεν εκπαιδεύθηκε, παρουσιάζονται στο εκπαιδευμένο μοντέλο, για να εξεταστεί η ακρίβεια της πρόβλεψης.

Περιγραφή του 4^{ου} συστήματος

Το σύστημα αρχικά σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας το ασαφές σύστημα συμπεράσματος του Sugeno. Είναι ένα σύστημα δύο εισόδων–μιας εξόδου. Οι μεταβλητές εισόδου είναι το Q και το position και η τέφρα (Ash) λαμβάνεται ως μεταβλητή εξόδου. Επιλέχθηκαν διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής οι οποίες έπειτα αθροίζονται για να δημιουργηθούν οι ασαφείς IF–THEN κανόνες. Ο

συνολικός αριθμός των κανόνων είναι 6 και χρησιμοποιήθηκε ο σταθμισμένος μέσος ως μέθοδος αποασαφοποίησης. Η ρύθμιση των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής (εκπαίδευση), εκτελέστηκε με την υβριδική μέθοδο που βασίζεται στα ελάχιστα τετράγωνα και στον αλγόριθμο οπισθόδρομης διάδοσης.

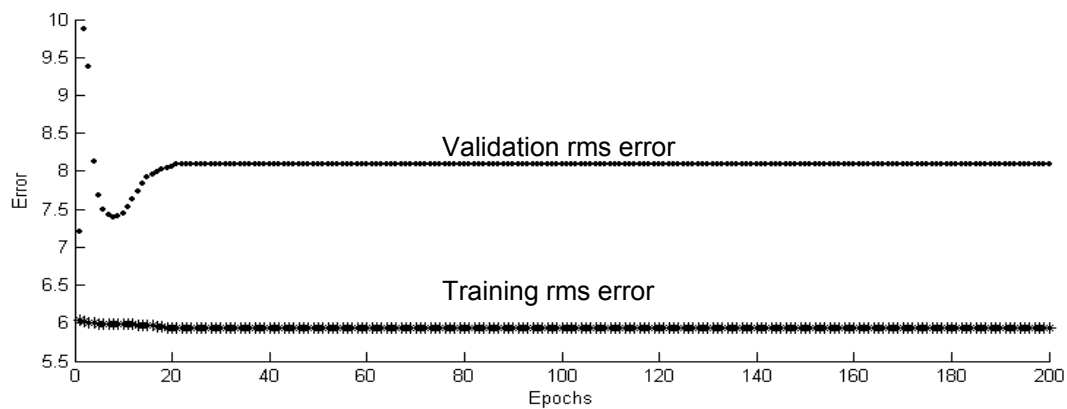
Όπως έχει προαναφερθεί, οι κανόνες είναι ένα σύνολο προτάσεων, οι οποίες συνδέουν το σύνολο των εισαγόμενων δεδομένων με τα αποτελέσματα. Οι κανόνες είναι αυτοί που καθορίζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και την αξιοπιστία του συστήματος. Για το ANFIS που μελετάται, το οποίο αποτελείται από δύο εισόδους με δύο και τρεις συναρτήσεις συμμετοχής για την καθεμία, με τη σειρά που αναφέρονται παραπάνω, οι κανόνες που αναπτύχθηκαν είναι οι ακόλουθοι 6 (2x3):

1. If Q is in1mf1 and Position is in2mf1 then Ash is out1mf1
2. If Q is in1mf1 and Position is in2mf2 then Ash is out1mf2
3. If Q is in1mf1 and Position is in2mf3 then Ash is out1mf3
4. If Q is in1mf2 and Position is in2mf1 then Ash is out1mf4
5. If Q is in1mf2 and Position is in2mf2 then Ash is out1mf5
6. If Q is in1mf2 and Position is in2mf3 then Ash is out1mf6

Μετά την κατασκευή του ασαφούς συστήματος, οι παράμετροι του μοντέλου βελτιστοποιούνται χρησιμοποιώντας το ANFIS. Η δομή του δικτύου αποτελείται από 21 κόμβους. Ο υβριδικός κανόνας εκμάθησης χρησιμοποιείται για να εκπαιδεύσει το μοντέλο σύμφωνα με τα ζευγάρια δεδομένων εισόδου/ εξόδου. Από τα συνολικά 87 σύνολα δεδομένων εισόδου/ εξόδου, τα 48 δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου. Το μοντέλο εκπαιδεύθηκε για 200 επαναλήψεις με μέγεθος βημάτων 0.01 και ανοχή λάθους 0%, Για την επικύρωση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 39 δεδομένα, με σκοπό τον έλεγχο του.

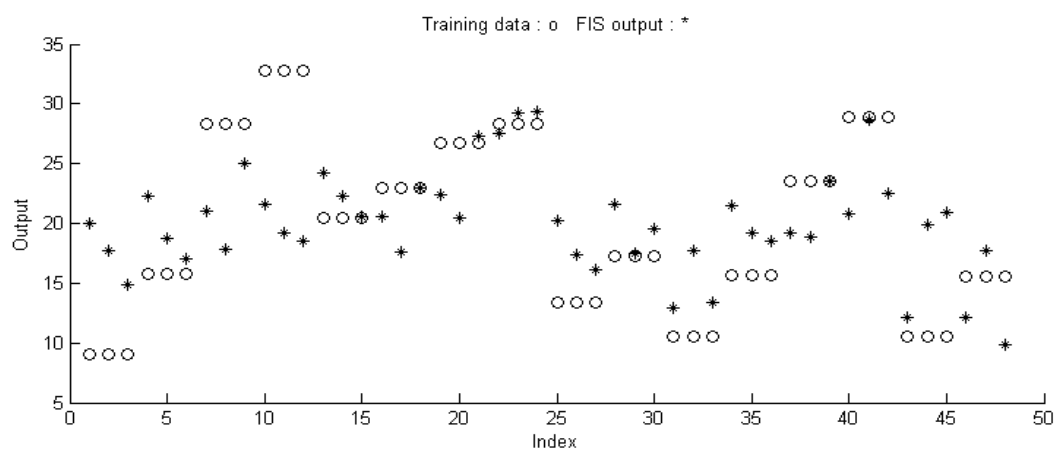
Στο Σχήμα 4.5, παρουσιάζονται τα σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 4^{ου} ANFIS σε σχέση με τις επαναλήψεις, κατά την εκπαίδευσή του, για την τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής (τα αντίστοιχα σφάλματα για τις υπόλοιπες συναρτήσεις συμμετοχής, παρουσιάζονται στο παράρτημα Β). Για να αποφευχθεί η υπερεκπαίδευση του αναπτυχθέντος ANFIS κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της πρόωρης διακοπής της εκπαίδευσης. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η εκπαίδευση σταματάει όταν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου (validation error) αρχίζει να αυξάνει, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι το σφάλμα εκπαίδευσης μπορεί να ακολουθεί πτωτική πορεία. Για παράδειγμα στο Σχήμα 4.5

έπειτα από 10 περιόδους εκπαίδευσης (επανάληψεις), το λάθος ελέγχου αρχίζει να αυξάνει και συνεπώς η εκπαίδευση σταματάει στην επανάληψη 10.

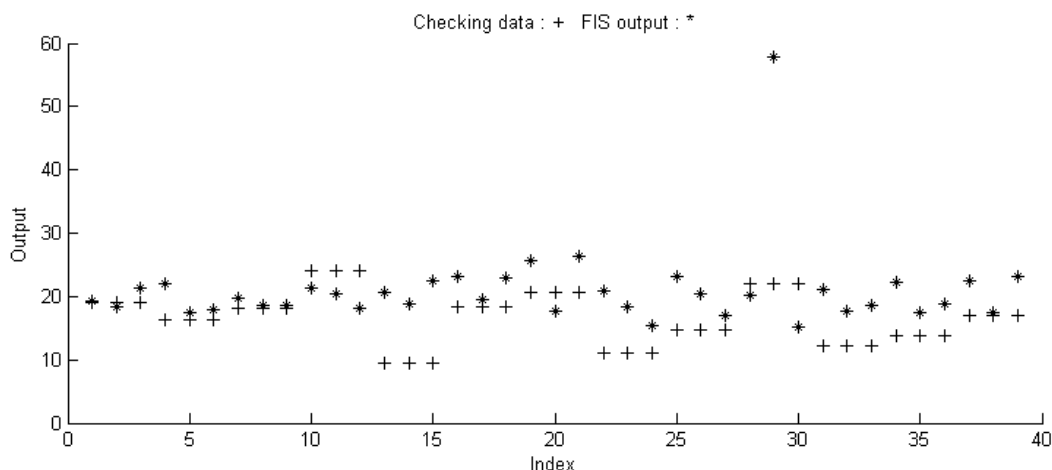


Σχήμα 4.5: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [trimf 200,2-3]).

Στα Σχήματα 4.6 και 4.7, παρουσιάζονται οι τιμές που υπολογίζει το ANFIS, που εκπαιδεύθηκε, τόσο για τα δεδομένα εκπαίδευσης όσο και για αυτά του ελέγχου, για την τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής (τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις υπόλοιπες συναρτήσεις συμμετοχής παρουσιάζονται στο παράρτημα Β).



Σχήμα 4.6: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [trimf200,2-3]).



Σχήμα 4.7: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [trimf200,2-3]).

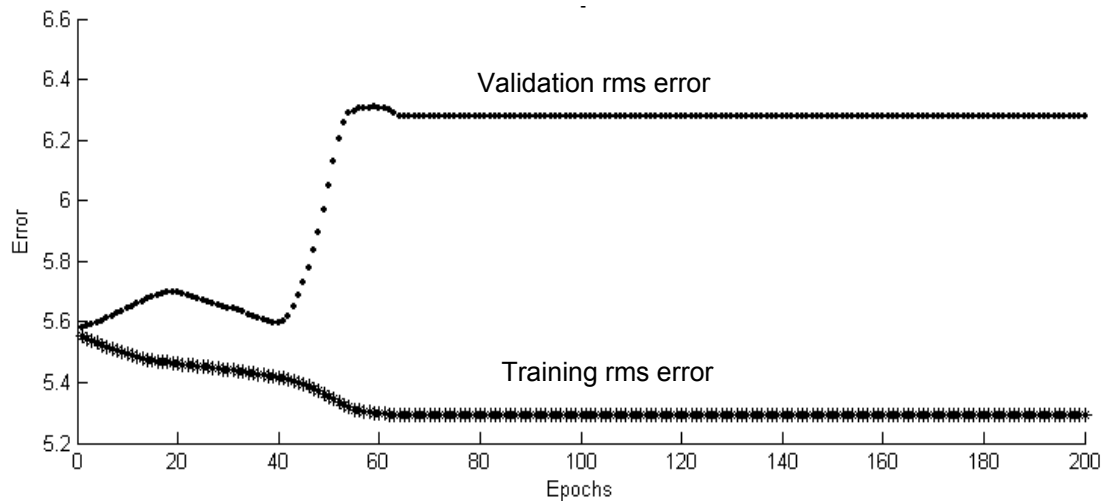
Περιγραφή του 3^{ου} συστήματος

Το σύστημα σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας το ασαφές σύστημα συμπεράσματος του Sugeno. Είναι ένα σύστημα δύο εισόδων–μιας εξόδου. Οι μεταβλητές εισόδου είναι το Q και το I_{CS} και η τέφρα (Ash) λαμβάνεται ως μεταβλητή εξόδου. Επιλέχτηκαν διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής οι οποίες έπειτα αθροίζονται για να δημιουργηθούν οι ασαφείς IF–THEN κανόνες. Ο συνολικός αριθμός των κανόνων είναι 4 και χρησιμοποιήθηκε ο σταθμισμένος μέσος ως μέθοδος αποασαφοποίησης. Η ρύθμιση των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής (εκπαίδευση), εκτελέστηκε με την υβριδική μέθοδο που βασίζεται στα ελάχιστα τετράγωνα και στον αλγόριθμο οπισθόδρομης διάδοσης.

Μετά από την κατασκευή του ασαφούς συστήματος, οι παράμετροι του μοντέλου βελτιστοποιούνται χρησιμοποιώντας το ANFIS. Η δομή του δικτύου αποτελείται από 16 κόμβους. Ο υβριδικός κανόνας εκμάθησης χρησιμοποιείται για να εκπαιδεύσει το μοντέλο σύμφωνα με τα ζευγάρια δεδομένων εισόδου/ εξόδου. Από τα συνολικά 87 σύνολα δεδομένων εισόδου/ εξόδου, τα 48 δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου. Το μοντέλο εκπαιδεύθηκε για 200 επαναλήψεις με μέγεθος βημάτων 0.01 και ανοχή λάθους 0%, Για την επικύρωση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 39 δεδομένα, με σκοπό τον έλεγχο του.

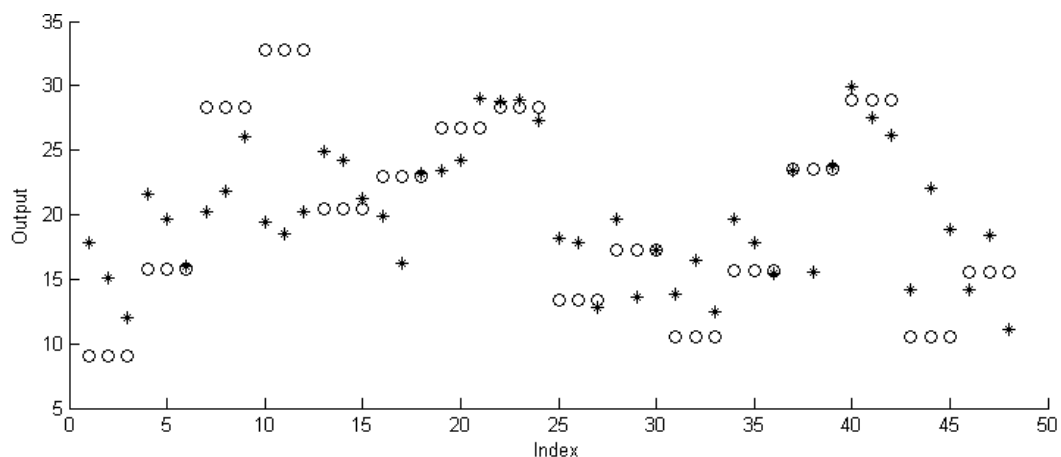
Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται τα σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 3^{ου} ANFIS σε σχέση με τις επαναλήψεις, κατά την εκπαίδευσή του, για την γενικευμένη κωδωνοειδή συνάρτηση συμμετοχής. Για να αποφευχθεί η υπερεκπαίδευση του αναπτυχθέντος ANFIS κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, χρησιμοποιήθηκε η

μέθοδος της πρόωρης διακοπής της εκπαίδευσης. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η εκπαίδευση σταματάει όταν το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου (validation error) αρχίζει να αυξάνει, ανεξάρτητα από το γεγονός ότι το σφάλμα εκπαίδευσης μπορεί να ακολουθεί πτωτική πορεία. Για παράδειγμα στο Σχήμα 4.8 μετά από 40 περιόδους εκπαίδευσης (επαναλήψεις), το λάθος ελέγχου αρχίζει να αυξάνει και συνεπώς η εκπαίδευση σταματάει στην επανάληψη 40.

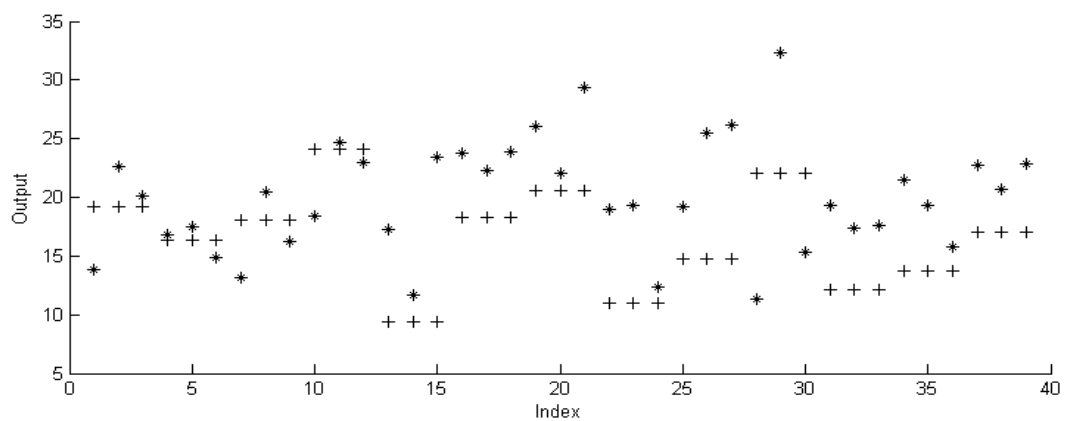


Σχήμα 4.8: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [gbellmf 200,2-2]).

Στα Σχήματα 4.9-4.10, παρουσιάζονται οι τιμές που υπολογίζει το ANFIS, που εκπαιδεύθηκε, τόσο για τα δεδομένα εκπαίδευσης όσο και για αυτά του ελέγχου, για την γενικευμένη κωδωνοειδή συνάρτηση συμμετοχής:

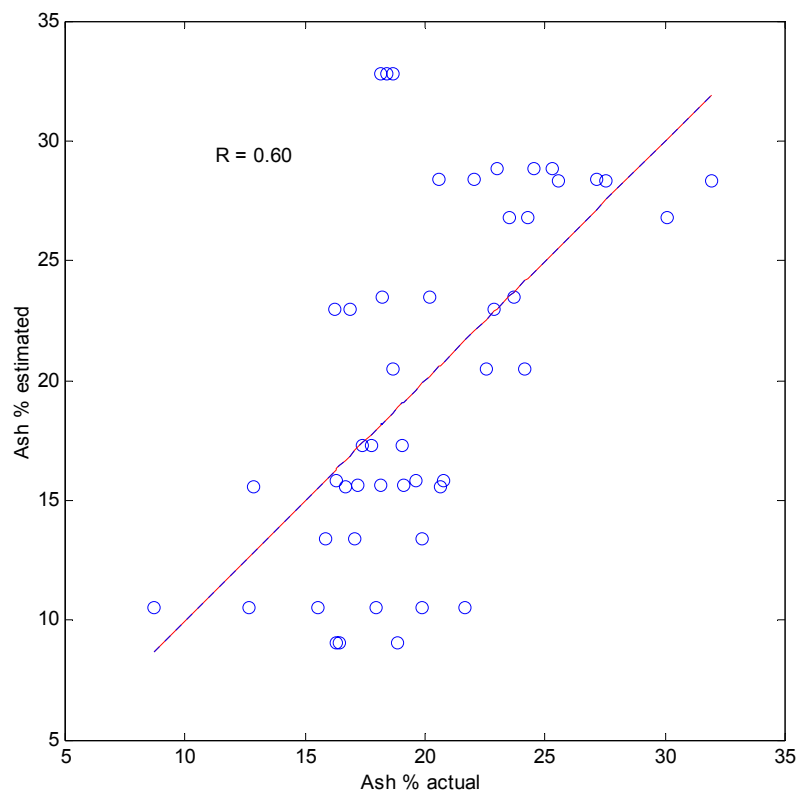


Σχήμα 4.9: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gbellmf 200,2-2]).



Σχήμα 4.10: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gbellmf 200,2-2]).

Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται το διάγραμμα συσχέτισης των πραγματικών τιμών της τέφρας ($Ash_{\text{πραγματική}}$) όπως μετρήθηκαν από το εργαστήριο και εκείνων που μετρήθηκαν από τον αναλυτή ($Ash_{\text{υπολογιστικό}}$).



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα συσχέτισης $Ash_{\text{πραγματικό}}$ - $Ash_{\text{υπολογισμένο}}$.

Ο συντελεστής συσχέτισης (R) υπολογίστηκε σε 0.6, τιμή που θεωρείται σχετικά χαμηλή. Τιμές μεγαλύτερες από 0.85 είναι συνήθως επιθυμητές για ένα

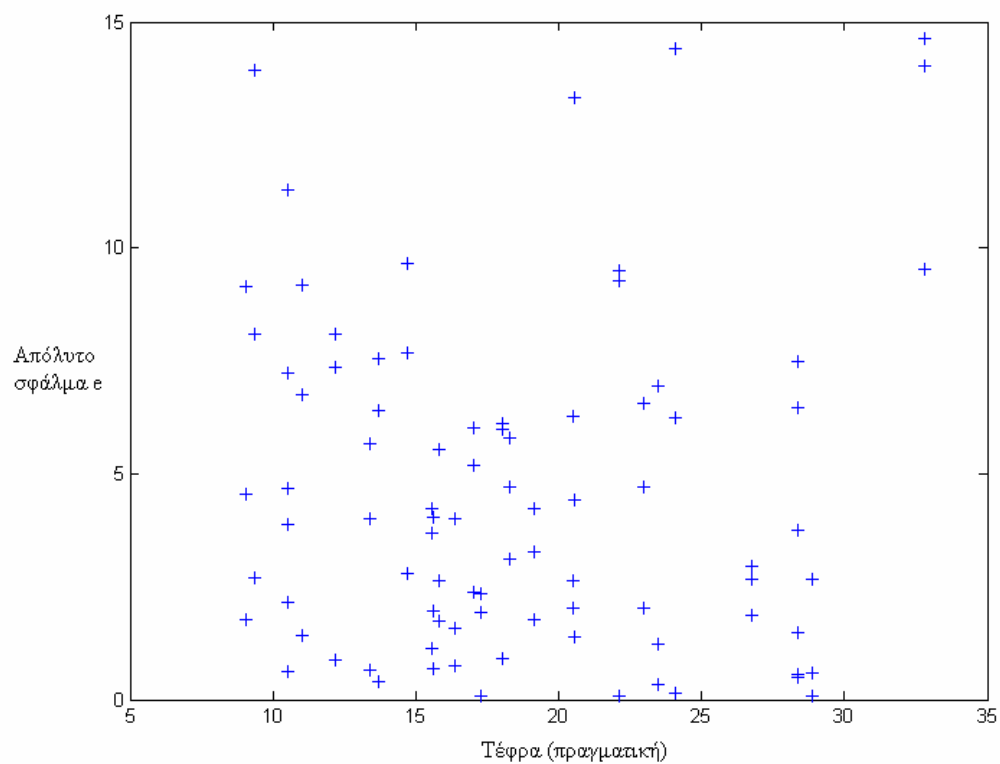
αποτελεσματικό μοντέλο βαθμονόμησης. Επομένως, παρά το γεγονός ότι υπάρχει μια σημαντική βελτίωση στο σφάλμα εκτίμησης που επιτυγχάνεται από το ANFIS, το λάθος εκτίμησης είναι ακόμα απαράδεκτο για τον έλεγχο πραγματικού χρόνου της ποιότητας λιγνίτη σε βραχυπρόθεσμη βάση.

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι πραγματικές και οι υπολογιστικές τιμές της τέφρας, το σφάλμα (e) και η απόλυτη τιμή του σφάλματος (e). Με βάση αυτές τις τιμές στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται το διάγραμμα συσχέτισης της απόλυτης τιμής του σφάλματος (e) του αναλυτή με την $Ash_{\text{πραγματική}}$ και στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται το σφάλμα (e) του αναλυτή σε συνάρτηση με την $Ash_{\text{πραγματική}}$.

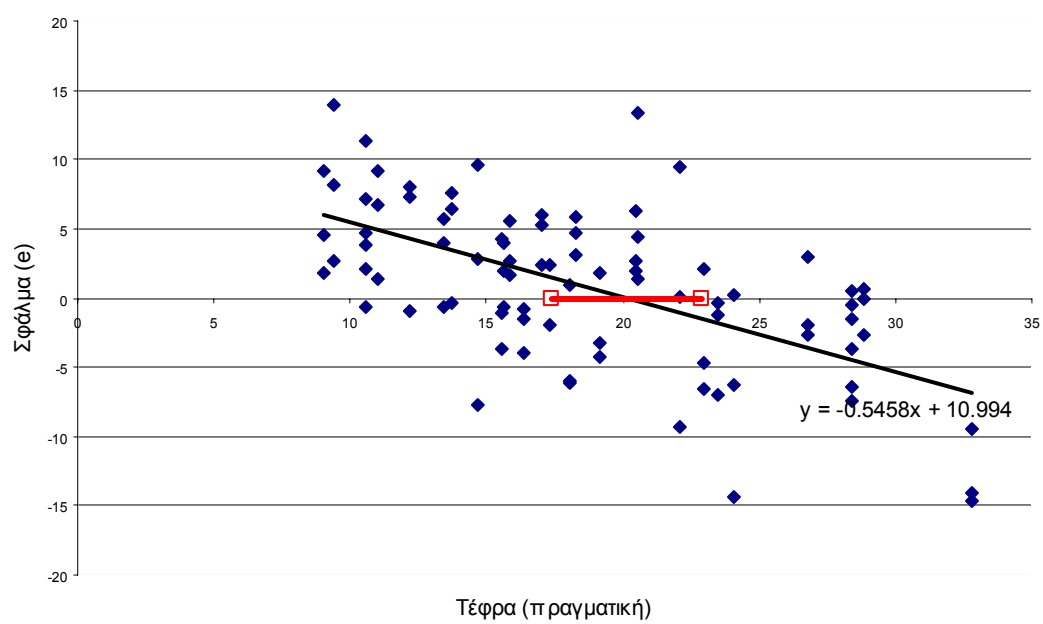
Πίνακας 4.8: Πραγματικές και υπολογιστικές τιμές της τέφρας, σφάλμα (e) και απόλυτη τιμή του σφάλματος (e).

$Ash_{\text{πραγματική}}$ (%)	$Ash_{\text{υπολογιστική}}$ (ANFIS) (%)	Σφάλμα (e) (%)	Απόλυτη τιμή σφάλματος (e) (%)
19.15	14.911	-4.239	4.239
19.15	20.927	1.777	1.777
19.15	15.892	-3.258	3.258
16.37	14.806	-1.564	1.564
16.37	15.608	-0.762	0.762
16.37	12.37	-4	4
18.05	11.933	-6.117	6.117
18.05	18.96	0.91	0.91
18.05	12.059	-5.991	5.991
24.08	17.841	-6.239	6.239
24.08	24.225	0.145	0.145
24.08	9.6674	-14.4126	14.4126
9.37	17.475	8.105	8.105
9.37	12.065	2.695	2.695
9.37	23.304	13.934	13.934
18.29	22.984	4.694	4.694
18.29	21.393	3.103	3.103
18.29	24.088	5.798	5.798
20.55	24.957	4.407	4.407
20.55	21.927	1.377	1.377
20.55	33.88	13.33	13.33
11.03	20.19	9.16	9.16
11.03	17.794	6.764	6.764
11.03	12.457	1.427	1.427
14.71	17.498	2.788	2.788
14.71	24.366	9.656	9.656
14.71	7.0476	-7.6624	7.6624
22.1	12.818	-9.282	9.282
22.1	22.17	0.07	0.07
22.1	31.595	9.495	9.495
12.16	20.239	8.079	8.079
12.16	19.518	7.358	7.358

12.16	11.284	-0.876	0.876
13.7	21.242	7.542	7.542
13.7	20.102	6.402	6.402
13.7	13.291	-0.409	0.409
17.02	23.048	6.028	6.028
17.02	22.22	5.2	5.2
17.02	19.394	2.374	2.374
9.05	18.182	9.132	9.132
9.05	13.611	4.561	4.561
9.05	10.819	1.769	1.769
15.83	21.375	5.545	5.545
15.83	18.477	2.647	2.647
15.83	17.557	1.727	1.727
28.38	21.905	-6.475	6.475
28.38	20.906	-7.474	7.474
28.38	24.643	-3.737	3.737
32.82	18.799	-14.021	14.021
32.82	18.175	-14.645	14.645
32.82	23.303	-9.517	9.517
20.5	23.123	2.623	2.623
20.5	26.758	6.258	6.258
20.5	22.52	2.02	2.02
22.99	18.295	-4.695	4.695
22.99	16.429	-6.561	6.561
22.99	25.024	2.034	2.034
26.78	24.902	-1.878	1.878
26.78	24.11	-2.67	2.67
26.78	29.74	2.96	2.96
28.36	27.811	-0.549	0.549
28.36	28.842	0.482	0.482
28.36	26.883	-1.477	1.477
13.41	19.068	5.658	5.658
13.41	17.419	4.009	4.009
13.41	12.758	-0.652	0.652
17.29	19.634	2.344	2.344
17.29	15.345	-1.945	1.945
17.29	17.203	-0.087	0.087
10.53	9.9173	-0.6127	0.6127
10.53	17.746	7.216	7.216
10.53	12.685	2.155	2.155
15.63	19.669	4.039	4.039
15.63	17.595	1.965	1.965
15.63	14.929	-0.701	0.701
23.48	23.153	-0.327	0.327
23.48	16.526	-6.954	6.954
23.48	22.266	-1.214	1.214
28.87	29.462	0.592	0.592
28.87	26.208	-2.662	2.662
28.87	28.786	-0.084	0.084
10.54	14.414	3.874	3.874
10.54	21.813	11.273	11.273
10.54	15.216	4.676	4.676
15.56	14.415	-1.145	1.145
15.56	19.779	4.219	4.219
15.56	11.867	-3.693	3.693



Σχήμα 4.12: Απόλυτο σφάλμα (%) σε συνάρτηση με την $Ash_{\text{πραγματική}}$ (%)



Σχήμα 4.13: Σφάλμα (ε) (%) του αναλυτή σε συνάρτηση με την $Ash_{\text{πραγματική}}$ (%).

Από τα Σχήματα 4.12 και 4.13, παρατηρείται ότι τα σφάλματα της μέτρησης του αναλυτή βρίσκονται σε συγκεκριμένες περιοχές τιμών (ακραίες τιμές τέφρας). Στις περιοχές ακραίων τιμών το σφάλμα είναι μεγάλο και στις ενδιάμεσες είναι κατά πολύ μικρότερο. Αν θεωρηθεί ως αποδεκτό σφάλμα, το σφάλμα της τάξεως του ± 1.5 , η κόκκινη γραμμή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.13 εμφανίζει την περιοχή των τιμών της τέφρας, για τις οποίες το σφάλμα του αναλυτή θεωρείται αποδεκτό. Παρατηρείται γραμμική συσχέτιση μεταξύ του σφάλματος και της τέφρας.

Κεφάλαιο 5

Ανάπτυξη μοντέλου βασισμένου στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, για τη βελτίωση της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται η μεθοδολογία για τη βελτίωση της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών, η οποία βασίζεται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks ή ANN). Η πρόκληση για εφαρμογή νευρωνικών δικτύων, προέρχεται από το γεγονός ότι αυτά αποτελούν μη γραμμικά συστήματα που επιδέχονται εκπαίδευση, είναι δυναμικά προσαρμοζόμενα και δεν απαιτούν απλοποιήσεις και παραδοχές για την εφαρμογή τους. Η ανάπτυξη των ANN πραγματοποιήθηκε με σκοπό την σύγκρισή τους με τα ANFIS. Παρουσιάζονται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, τα ANN που αναπτύχθηκαν στην εργασία αυτή και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή τους.

5.1 Γενικά στοιχεία για τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι μη γραμμικά δυναμικά συστήματα, που αποτελούνται από απλά στοιχεία, συνδεδεμένα παράλληλα, αποκαλούμενα ως τεχνητοί νευρώνες. Η λειτουργία των τεχνητών νευρώνων εμπνέεται από τα βιολογικά νευρικά συστήματα. Οι νευρώνες οργανώνονται σε ιεραρχικά στρώματα, με την έξοδο ενός κόμβου να χρησιμεύει ως είσοδο στον άλλο. Ο τρόπος με τον οποίο οι νευρώνες διασυνδέονται και ο αριθμός και το είδος των επιπέδων σε ένα δίκτυο είναι αποτέλεσμα των ποικίλων τύπων των ANN (Galetakis et al., 2002).

Τα νευρωνικά δίκτυα επιδεικνύουν μια σειρά από πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους (αριθμητικές και μη), γεγονός που τα καθιστά σημαντικά εργαλεία για την αντιμετώπιση μιας πληθώρας προβλημάτων. Στον κλασικό προγραμματισμό, το πρόβλημα και ο τρόπος επίλυσής του πρέπει να περιγραφούν ρητά μέσω αναλυτικών μαθηματικών σχέσεων. Στα νευρωνικά δίκτυα, το μόνο που χρειάζεται να γίνει, είναι η συλλογή δεδομένων που θα έχουν τη μορφή αιτίου-αποτελέσματος και τα οποία θα εισαχθούν στο νευρωνικό δίκτυο για να γίνει η εκπαίδευσή του. Από τη στιγμή εκείνη το νευρωνικό δίκτυο είναι σε θέση να "ανακαλύψει" τις συσχετίσεις

που υπάρχουν στα δεδομένα και να τις "μάθει" με την κατάλληλη μεταβολή των συντελεστών βαρύτητας του. Έτσι, είναι σε θέση να εκπαιδευτεί με βάση τα υπάρχοντα δεδομένα και στη συνέχεια να κάνει προβλέψεις (Sietsma, 1991).

Η λειτουργία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων στηρίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

- Η επεξεργασία της πληροφορίας γίνεται σε ένα πλήθος νευρώνων, οι οποίοι έχουν εισόδους και εξόδους των σημάτων.
- Η ένωση των νευρώνων γίνεται μέσω συνδέσεων (connection links), κάθε μια από τις οποίες έχει αντιστοιχισμένο ένα συντελεστή βαρύτητας (weight), ο οποίος πολλαπλασιάζει το σήμα.
- Κάθε νευρώνας εφαρμόζει μια συνάρτηση στο σήμα που λαμβάνει, για να καθορίσει το σήμα που θα εκπέμψει. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται συνάρτηση ενεργοποίησης και είναι συνήθως μη γραμμική, συνηθέστερα σιγμοειδής.

Στην ουσία, οι συντελεστές βαρύτητας είναι τα σημεία στα οποία αποθηκεύονται οι πληροφορίες που χρησιμοποιεί το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, για να περιγράψει και να επιλύσει το πρόβλημα που του τίθεται. Όπως ισχύει και στο βιολογικό ανάλογο στο οποίο η "βαρύτητα" κάθε σύναψης διαφέρει και μπορεί να μεταβληθεί, αντίστοιχα συμβαίνει και για τους συντελεστές βαρύτητας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να εκπαιδευθεί για να εκτελέσει μια ιδιαίτερη λειτουργία με τη ρύθμιση των τιμών των συνδέσεων μεταξύ των στοιχείων. Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν εκπαιδευθεί για να εκτελούν σύνθετες λειτουργίες σε διάφορους τομείς εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων αναγνώρισης, προσδιορισμού, ταξινόμησης, ομιλίας, εικόνας και ελέγχου. Μεταξύ των διαφόρων τύπων ANN, τα πολυστρωματικά εμπροσθόδρομης τροφοδοσίας μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν την οπισθόδρομη διάδοση ως μέθοδο εκμάθησης, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για προβλήματα πρόβλεψης και εκτίμησης (Schalkoff, 1992).

Για την κατανόηση της λειτουργίας των ANN θεωρούμε ένα ANN που αποτελείται από ένα επίπεδο εισόδου με k κόμβους, ένα ενδιάμεσο επίπεδο με l κόμβους και ένα επίπεδο εξόδου με έναν κόμβο. Κάθε κόμβος j του ενδιάμεσου επιπέδου λαμβάνει ένα σήμα από το επίπεδο εισόδου (Σχήμα 5.1). Αυτό το σήμα, I_j , μπορεί να εκφραστεί ως:

$$I_j = \sum W_{ij} X_i, \quad i = 1, \dots, k, \quad (5.1)$$

όπου X_i είναι το σήμα από τον κόμβο εισόδου i και W_{ij} είναι η δύναμη της σύνδεσης μεταξύ του κόμβου εισόδου i και του ενδιαμέσου επιπέδου κόμβου j (επίσης καλείται και βάρος). Το σήμα εισόδου μετασχηματίζεται στο σήμα εξόδου του κρυμμένου επιπέδου κόμβου j χρησιμοποιώντας μια από τις διάφορες συναρτήσεις μετατροπής $f(x)$. Η πιο κοινή συνάρτηση μετατροπής είναι η σιγμοειδής, η οποία είναι μια συνεχής, μη φθίνουσα συνάρτηση, που παράγει τιμές μεταξύ 0 και +1. Το σήμα εξόδου, O_j , του κρυμμένου επιπέδου κόμβου j που χρησιμοποιεί τη σιγμοειδή συνάρτηση μετατροπής είναι:

$$O_j = \frac{1}{1 + e^{-I_j}} \quad (5.2)$$

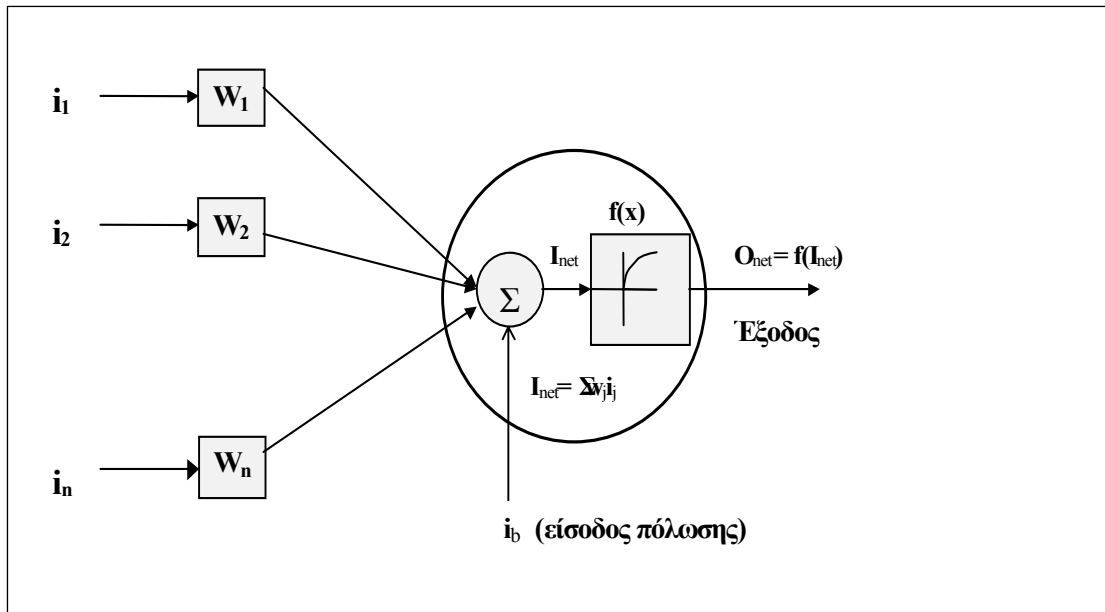
Ο κόμβος εξόδου δέχεται, ως είσοδό του, το άθροισμα των σημάτων από τους κρυμμένους κόμβους επιπέδου και το ομαλοποιεί χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση μετατροπής.

Συνοπτικά, ο νευρώνας λαμβάνει ένα ή περισσότερα σήματα (είσοδος), διεγείρεται (ενεργοποίηση) και αποστέλλει το αποτέλεσμα (έξοδος) στους άλλους νευρώνες, με τους οποίους είναι συνδεδεμένος με τις συνάψεις. Κάθε σύναψη χαρακτηρίζεται με ένα συντελεστή w_i , που δείχνει πόσο ισχυρά συνδεδεμένοι είναι οι δύο νευρώνες. Ο νευρώνας εκτελεί δύο βασικές λειτουργίες:

- Αρχικά αθροίζει τις επιμέρους εισόδους (i_1, i_2, \dots, i_n) , που λαμβάνει χρησιμοποιώντας τους συντελεστές w_i και υπολογίζει τη συνολική είσοδο $I_{\text{net}} = \sum w_j i_j$ για $j=1$ έως n .
- Χρησιμοποιεί στη συνέχεια μια κατάλληλη συνάρτηση $f(x)$, που ονομάζεται συνάρτηση διέγερσης (activation function), για να υπολογίσει την έξοδο:

$$O_{\text{net}} = f(I_{\text{net}})$$

Για τη βελτίωση της απόδοσης των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιείται μια επιπρόσθετη είσοδος πόλωσης (bias). Στο Σχήμα 5.1 δίνεται παραστατικά η δομή και ο τρόπος λειτουργίας ενός τεχνητού νευρώνα.



Σχήμα 5.1: Σχηματική απεικόνιση της δομής ενός τεχνητού νευρώνα (Rumelhart et al., 1986).

Η τελική έξοδος συγκρίνεται με την επιθυμητή τιμή από το σύνολο εκπαίδευσης. Το λάθος υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής και της πραγματικής εξόδου. Αυτό το λάθος διαδίδεται προς τα πίσω μέσω του δικτύου και οι αλλαγές του βάρους γίνονται σε κάθε σημείο σύμφωνα με έναν αλγόριθμο, για να ελαχιστοποιηθεί το λάθος (Σχήμα 5.2).



Σχήμα 5.2: Σχηματική απεικόνιση της επαναληπτικής διαδικασίας εκπαίδευσης ενός ANN (Rumelhart et al., 1986).

Η διαδικασία τροποποίησης των βαρών στα σύνολα εισόδου και επιθυμητών εξόδων καλείται εκμάθηση. Η εκπαίδευση ενός δικτύου περιλαμβάνει αυτήν την επαναληπτική διαδικασία έως ότου το λάθος είτε συγκλίνει σε ένα προκαθορισμένο κατώτατο όριο, είτε σταθεροποιείται (Rumelhart et al., 1986). Σε αυτό το σημείο τα δεδομένα εισόδου που ποτέ δεν φαίνονται από το ANN, μπορούν να παρουσιαστούν για να παρατηρηθεί η έξοδος που παράγεται.

Για προστασία από τη χρησιμοποίηση πάρα πολλών νευρώνων και την υπερεκπαίδευση, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος έγκαιρης διακοπής της εκπαίδευσης (Caruana et al, 2000). Ο αλγόριθμος αυτός απαιτεί την διαίρεση των υπαρχόντων δεδομένων σε τρία υποσύνολα: της εκπαίδευσης, του ελέγχου της εκπαίδευσης και του ελέγχου της γενίκευσης.

Όπως γίνεται φανερό και από το προηγούμενο παράδειγμα (Σχήμα 5.1), το κάθε νευρωνικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από τρία στοιχεία:

- Τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι νευρώνες μεταξύ τους, ο οποίος ονομάζεται αρχιτεκτονική του δικτύου (network architecture). Αποτελεί ίσως το πιο σημαντικό γνώρισμα ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου γιατί ανάλογα με αυτόν, καθορίζονται και οι δυνατότητές του.
- Τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για να καθορίζονται οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας στις συνδέσεις, η οποία ονομάζεται αλγόριθμος εκπαίδευσης (training algorithm).
- Τον τύπο της χρησιμοποιούμενης συνάρτησης ενεργοποίησης.

5.2 Εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Η εκπαίδευση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι όμοια με αυτή των ANFIS. Στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μεταβάλλονται οι συντελεστές βαρύτητας και το σφάλμα είναι μια συνάρτηση με μεταβλητές τους συντελεστές βαρύτητας και στόχος είναι η ελαχιστοποίησή του μεταβάλλοντας τις τιμές αυτών των συντελεστών.

Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους είναι αυτός των Levenberg-Marquardt, μια προσέγγιση η οποία χρησιμοποιεί τεχνικές αριθμητικής βελτιστοποίησης για την ταχύτερη εκτέλεση των απαιτούμενων πράξεων, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική μείωση του υπολογιστικού φορτίου και σε πολύ γρήγορη εκπαίδευση (Demuth and Beale, 1994).

Το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κατά την εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, είναι το φαινόμενο της απομνημόνευσης των δεδομένων (overfitting). Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις, το μοντέλο έχει την ικανότητα να μαθαίνει τα δεδομένα εκπαίδευσης με σφάλμα που τείνει στο μηδέν, αλλά το σφάλμα γενίκευσής του είναι πάρα πολύ μεγάλο. Η παρατήρηση αυτή σημαίνει ότι η μάθηση αναφέρεται στα συγκεκριμένα δεδομένα εκπαίδευσης και μόνο σε αυτά, γεγονός που καθιστά το μοντέλο ανεπαρκές για να χρησιμοποιηθεί για προβλέψεις με βάση άλλα δεδομένα εισαγωγής. Η εμφάνιση του γεγονότος αυτού οφείλεται, τις περισσότερες φορές, στη χρήση αρκετά πολύπλοκων αρχιτεκτονικών με μεγάλο αριθμό νευρώνων. Δυστυχώς, δεν υπάρχουν κανόνες που να υπαγορεύουν το πλήθος των ενδιάμεσων επιπέδων και το πλήθος των νευρώνων που κάθε ένα από αυτά πρέπει να περιέχει και επομένως, ο χρήστης θα πρέπει να εμπλακεί σε μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος έως την εύρεση της αρχιτεκτονικής με την καλύτερη συμπεριφορά. Η παραπάνω διαδικασία απαιτεί αρκετό χρόνο και βασίζεται κυρίως στην εμπειρία του χρήστη τόσο στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα όσο και στο εξεταζόμενο φαινόμενο.

Το γεγονός αυτό επιβαρύνεται και από το γεγονός ότι δεν υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοιχία ανάμεσα στο εξεταζόμενο πρόβλημα και στη δομή της αρχιτεκτονικής του μοντέλου τεχνητού νευρωνικού δικτύου, δηλαδή μπορεί να υπάρχουν περισσότερα από ένα μοντέλα με διαφορετική αρχιτεκτονική το καθένα που να αποδίδουν το ίδιο καλά. Η σχέση που συνδέει τη δομή ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου και την πολυπλοκότητα του εξεταζόμενου προβλήματος είναι πολύ δύσκολο να περιγραφεί γιατί εξαρτάται από ένα πολύ μεγάλο πλήθος παραγόντων. Ενδεικτικά και μόνο αναφέρονται, η χρήση δυαδικών ή δεκαδικών τιμών στις εισόδους, η ύπαρξη ή όχι θορύβου στα δεδομένα εκπαίδευσης και το είδος των χρησιμοποιούμενων συναρτήσεων ενεργοποίησης. Η σημασία των παραπάνω μάλιστα, μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και τις επιλογές που γίνονται κατά τη φάση ανάπτυξης του μοντέλου (Sarle, 1997). Γενικά πάντως, ισχύει ότι όσο πολυπλοκότερη είναι η συνάρτηση που πρέπει να προσεγγιστεί (ύπαρξη πολλών διαφορετικών τοπικών ακροτάτων, αλλαγών καμπυλότητας, ασυνεχειών, κ.λ.π.) τόσο μεγαλύτερο πρέπει να είναι και το μέγεθος του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μοντελοποίηση αυτών των μη-γραμμικοτήτων.

5.3 Ανάπτυξη μοντέλου βαθμονόμησης του αναλυτή DUET βασισμένου στα ANN

Για την συσχέτιση των μετρούμενων εντάσεων I_{Cs} και I_{Am} του on line αναλυτή τέφρας τύπου DUET, αναπτύχθηκαν ANN εμπρόσθιας διάδοσης, πλήρως διασυνδεδεμένα με ένα ενδιάμεσο επίπεδο και εκπαιδεύτηκαν με την μέθοδο της οπισθοδρόμης διάδοσης του σφάλματος. Οι τιμές των I_{Cs} και I_{Am} ή ο λόγος Q και η παράμετρος Pos που σχετίζεται με το πάχος του λιγνίτη στη μεταφορική ταινία, λαμβάνονται από τους εν σειρά αναλυτές, δίνονται στα δίκτυα ως είσοδοι, και ζητείται να υπολογιστεί η τέφρα. Επομένως, ο αριθμός των νευρώνων εισόδου καθορίζεται από τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών, ενώ η έξοδος αποτελείται από έναν νευρώνα. Ο αριθμός των νευρώνων στο ενδιάμεσο επίπεδο καθορίζεται κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης. Για την αρχική εκτίμηση του αριθμού των νευρώνων στο ενδιάμεσο επίπεδο χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση (Ganguli, 2001 & Caruana et al., 2000):

$$Neurons_{default} = \frac{\frac{1}{2}(N_{inputs} + N_{outputs}) + \sqrt{N_{train}}}{N_{hiddenlayers}} \quad (5.3)$$

όπου $Neurons_{default}$, N_{inputs} , $N_{outputs}$, N_{train} και $N_{hidden layers}$, είναι ο προτεινόμενος αρχικός αριθμός νευρώνων σε κάθε ενδιάμεσο στρώμα, ο αριθμός εισόδων, εξόδων, το μέγεθος του συνόλου εκπαίδευσης και τα ενδιάμεσα στρώματα αντίστοιχα. Η απόφαση για την προσθήκη ενός νέου νευρώνα βασίζεται στη μελέτη της αλλαγής της μέσης τετραγωνικής ρίζας του σφάλματος (RMS) με το χρόνο εκπαίδευσης.

Ανάπτυξη και εφαρμογή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Με σκοπό τη βελτίωση της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων για τον έλεγχο της ποιότητας λιγνιτών, αναπτύχθηκαν δύο τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εμπροσθοδρόμης διάδοσης, με διαφορετικές εισόδους το καθένα, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αυτά των ANFIS.

Το πρώτο ANN, που ονομάζεται QI_{Cs} , έχει ως εισόδους το κλάσμα των λογαρίθμων των εντάσεων των δύο πηγών ακτινοβολίας (Q) και την ένταση της ακτινοβολίας του Κεσίου (I_{Cs}). Το δεύτερο ANN, που ονομάζεται $QPos$, έχει ως

εισόδους το κλάσμα των λογαρίθμων των εντάσεων των δύο πηγών ακτινοβολίας (Q) και το πάχος του λιγνίτη (position). Επιλέχθηκαν οι συγκεκριμένες είσοδοι, γιατί είναι βασικές παράμετροι που επιδρούν καθοριστικά στον υπολογισμό της περιεχόμενης τέφρας του λιγνίτη. Και τα δύο ANN έχουν ως έξοδο, την περιεχόμενη τέφρα (Ash) του λιγνίτη.

Τα δεδομένα του κάθε ANN, χωρίστηκαν σε τρία υποσύνολα (Πίνακας 5.1), από τα οποία το πρώτο περιλαμβάνει τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του ANN, το δεύτερο τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και το τρίτο τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ικανότητας γενίκευσης (πρόβλεψης) του εκπαιδευμένου μοντέλου. Τα δεδομένα του υποσυνόλου ελέγχου, είναι στην ουσία άγνωστα δεδομένα για το μοντέλο αφού δεν χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευσή του.

Πίνακας 5.1: Αριθμός δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των εκπαιδευμένων ANN.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ	44
Δεδομένα ελέγχου	22
Δεδομένα ελέγχου γενίκευσης	21
Σύνολο δεδομένων	87

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα δημιουργήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού Matlab, μέσω της εργαλειοθήκης νευρωνικών δικτύων (Neural Network Toolbox) που διαθέτει. Με τη χρήση του συγκεκριμένου λογισμικού, γίνεται ο προγραμματισμός του κώδικα των νευρωνικών δικτύων και επιλέγονται η αρχιτεκτονική που θα ακολουθηθεί, οι συναρτήσεις ενεργοποίησης καθώς και ο αλγόριθμος εκπαίδευσης. Η ακρίβεια των γενικεύσεων των εκπαιδευμένων ANN, αξιολογείται με βάση το σχετικό σφάλμα ανάμεσα στην προβλεπόμενη και στην πραγματική τιμή της τέφρας.

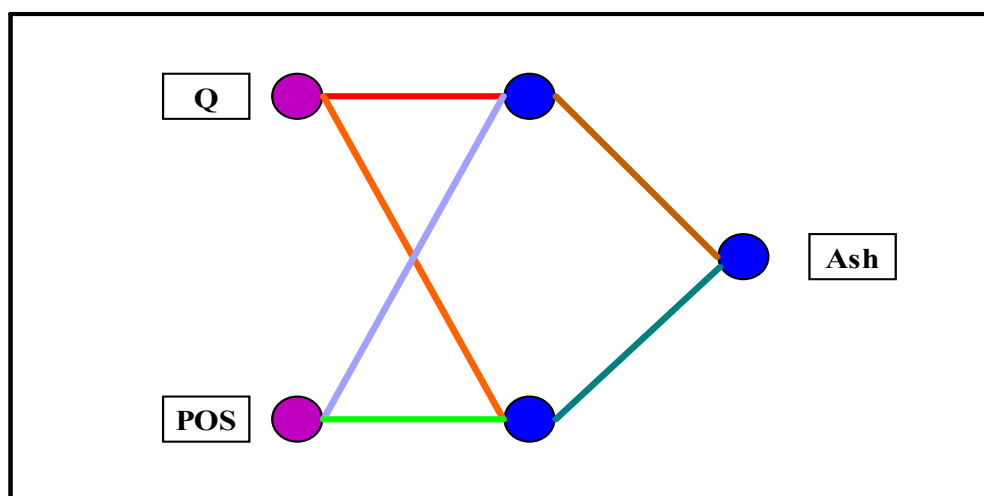
Πραγματοποιήθηκαν διάφορες δοκιμές, αλλάζοντας τον αριθμό των νευρώνων των εσωτερικών επιπέδων, τη μορφή του νευρώνα εξόδου και τον αλγόριθμο εκπαίδευσης του δικτύου των δύο συστημάτων, με σκοπό να βρεθεί ο συνδυασμός που δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Η εντολή σε περιβάλλον εργασίας Matlab:

```
net = newff(minmax(ptr),[2 1],{'tansig' 'purelin'},'trainlm')
```

δημιουργεί ένα δίκτυο με 2 κρυμμένους νευρώνες και 1 νευρώνα εξόδου. Οι κρυμμένοι νευρώνες είναι της μορφής tansig (συνάρτηση ενεργοποίησης), ο νευρώνας εξόδου είναι γραμμικός (purelin) και χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος εκπαίδευσης trainlm (αλγόριθμος εκπαίδευσης Levenberg-Marquardt).

Κατά την έναρξη της εκπαίδευσης, χρησιμοποιήθηκε ένα εσωτερικό επίπεδο με 2 νευρώνες, ενώ στη συνέχεια ο αρχικός αριθμός των νευρώνων του εσωτερικού επιπέδου αυξήθηκε τελικά σε 4. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η δομή του νευρωνικού δικτύου.



Σχήμα 5.3: Δομή του νευρωνικού δικτύου.

Στους παρακάτω Πίνακες 5.2-5.5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των δύο ANN, όπου με R συμβολίζεται ο συντελεστής συσχέτισης, ο οποίος αποτελεί μία παράμετρο που συνδυάζεται με τη γραφική απεικόνιση της συσχέτισης των μετρήσεων του on-line αναλυτή και των πραγματικών τιμών της τέφρας. Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης κυμαίνεται από -1 έως 1, με την τιμή 1 να αντιστοιχεί σε απόλυτα θετική συσχέτιση, την τιμή 0 σε ελάχιστη συσχέτιση και την τιμή -1 σε απόλυτα αρνητική συσχέτιση. Με $RMSE$ συμβολίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα από την εφαρμογή του QI_{CS}, όταν ο νευρώνας εξόδου είναι γραμμικός

(NET = NEWFF(MINMAX(PTR),[3 1],{'TANSIG' 'PURELIN'},'TRAIN...')

<i>Αλγόριθμος εκπαίδευσης</i>	<i>R</i>	<i>RMSE</i>
trainlm	0.453	5.760
trainbfg	0.478	5.570
trainrp	0.468	5.758
(net = newff(minmax(ptr),[2 1],{'tansig' 'purelin'},'train...')		
trainlm	0.495	5.674
trainbfg	0.314	6.089
trainrp	0.258	6.132
(net = newff(minmax(ptr),[4 1],{'tansig' 'purelin'},'train...')		
trainlm	0.491	5.624
trainbfg	0.554	5.389
trainrp	0.481	5.619

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα από την εφαρμογή του QI_{CS}, όταν ο νευρώνας εξόδου έχει τη μορφή logsig.

(NET = NEWFF(MINMAX(PTR),[3 1],{'TANSIG' 'LOGSIG'},'TRAIN...')

<i>Αλγόριθμος εκπαίδευσης</i>	<i>R</i>	<i>RMSE</i>
trainlm	0.481	5.804
trainbfg	0.351	6.042
trainrp	0.453	5.855
(net = newff(minmax(ptr),[2 1],{'tansig' 'logsig'},'train...')		
trainlm	0.138	6.305
trainbfg	0.491	5.788
trainrp	0.456	5.814
(net = newff(minmax(ptr),[4 1],{'tansig' 'logsig'},'train...')		
trainlm	0.392	5.992
trainbfg	0.175	6.258
trainrp	0.487	5.802

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα από την εφαρμογή του QP_{OS}, όταν ο νευρώνας εξόδου είναι γραμμικός.

(NET = NEWFF(MINMAX(PTR),[3 1],{'TANSIG' 'PURELIN'},'TRAIN...')

<i>Αλγόριθμος εκπαίδευσης</i>	<i>R</i>	<i>RMSE</i>
trainlm	0.400	5.855
trainbfg	0.323	6.217
trainrp	0.359	6.028
(net = newff(minmax(ptr),[2 1],{'tansig' 'purelin'},'train...')		
trainlm	0.352	6.025
trainbfg	0.231	6.412
trainrp	0.29	6.136
(net = newff(minmax(ptr),[4 1],{'tansig' 'purelin'},'train...')		
trainlm	0.437	5.716
trainbfg	0.379	5.918
trainrp	0.422	5.760

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα από την εφαρμογή του QP_{OS}, όταν ο νευρώνας εξόδου έχει τη μορφή logsig.

(NET = NEWFF(MINMAX(PTR),[3 1],{'TANSIG' 'LOGSIG'},'TRAIN...')

<i>Αλγόριθμος εκπαίδευσης</i>	<i>R</i>	<i>RMSE</i>
trainlm	0.408	5.905
trainbfg	0.421	5.854
trainrp	0.387	5.986
(net = newff(minmax(ptr),[2 1],{'tansig' 'logsig'},'train...')		
trainlm	0.347	6.111
trainbfg	0.055	6.334
trainrp	0.374	5.958
(net = newff(minmax(ptr),[4 1],{'tansig' 'logsig'},'train...')		
trainlm	0.422	5.907
trainbfg	0.303	6.141
trainrp	0.421	5.834

Από τους παραπάνω πίνακες, παρατηρείται ότι και τα δύο ANN, δίνουν παρόμοια αποτελέσματα και ότι με τη μεταβολή του αριθμού των κρυμμένων νευρώνων, ή της μορφής του νευρώνα εξόδου ή του αλγορίθμου εκπαίδευσης, τα αποτελέσματα είναι σχεδόν ίδια.

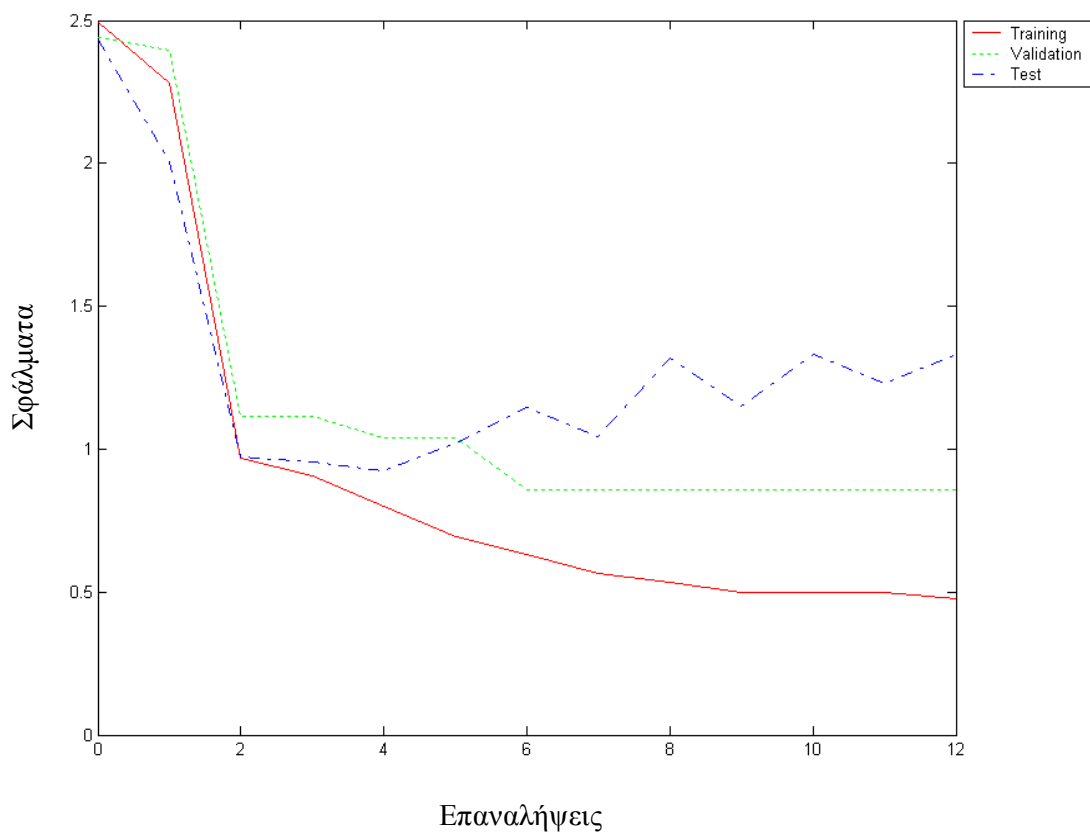
Η χρήση εξελιγμένων μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, όπως τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα σε τέτοιου είδους προβλήματα, μπορεί να δώσει αξιόπιστες λύσεις και να συμβάλει στην προσπάθεια της καλύτερης μοντελοποίησής τους. Τα πλεονεκτήματα που διαθέτει το εκπαιδευμένο μοντέλο, είναι:

- Αποτελεί ένα ευέλικτο σύστημα, γιατί μπορεί να ενημερώνεται με καινούρια στοιχεία εύκολα και να αυξάνει το βαθμό ακρίβειάς του.

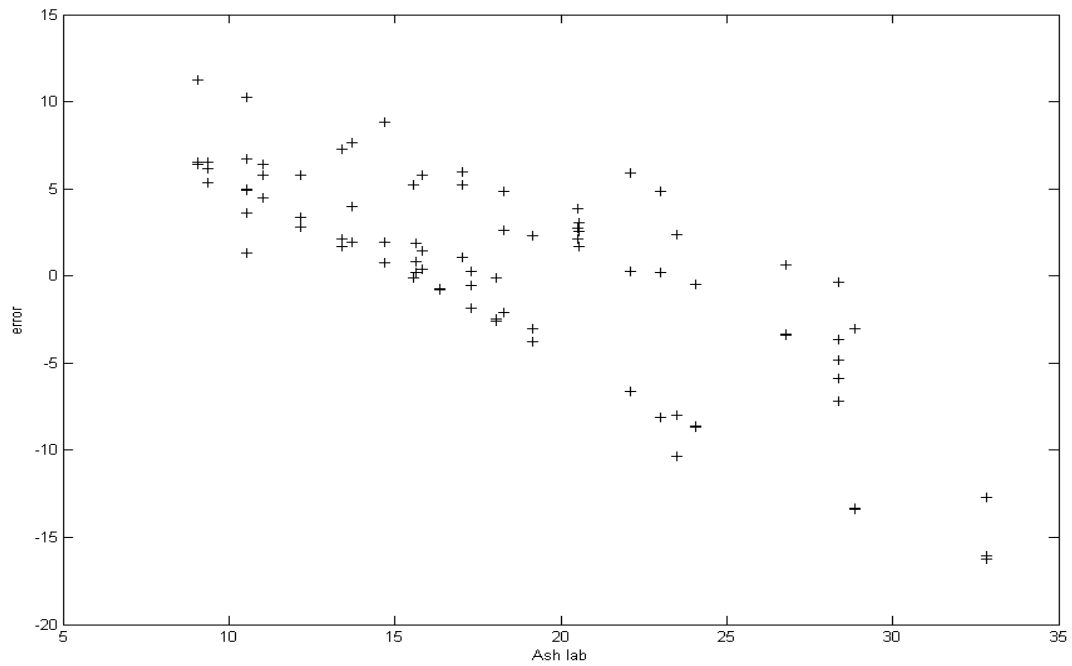
- Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να παράγει προβλέψεις ταχύτατα.

Οι κρίσιμοι τομείς στους οποίους μπορούν να υπάρξουν σημαντικές βελτιώσεις στην ανάπτυξη ενός νευρωνικού δικτύου είναι η διαδικασία μάθησης και ο τρόπος εύρεσης της βέλτιστης αρχιτεκτονικής του.

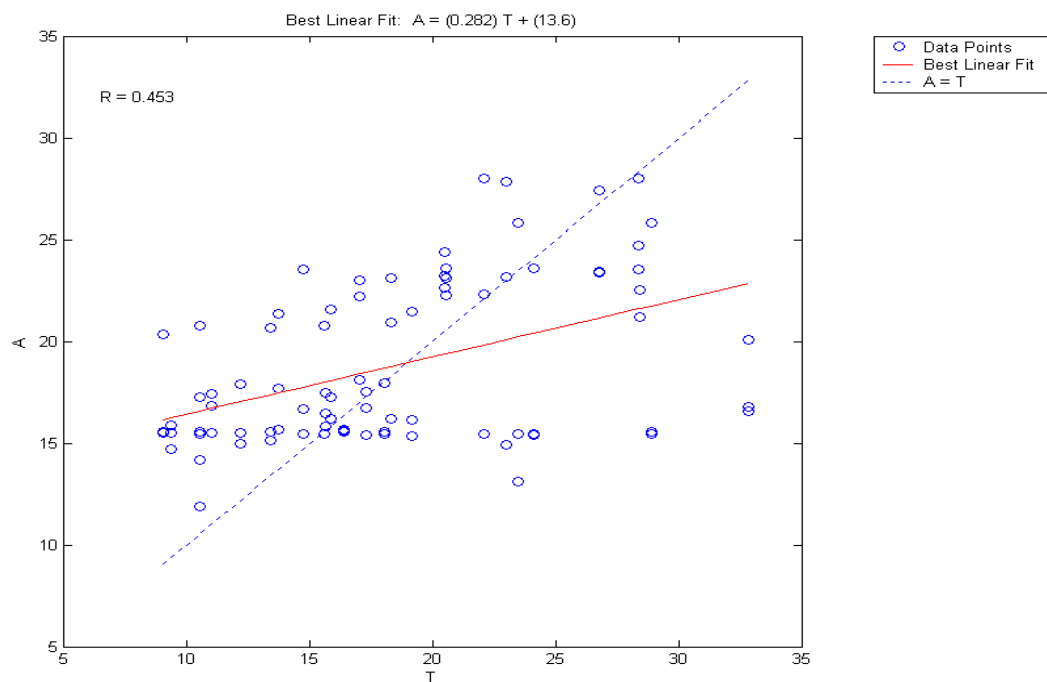
Στα Σχήματα 5.4-5.6, παρουσιάζονται τα σφάλματα της εκπαίδευσης, της επικύρωσης και του ελέγχου σε σχέση με τις επαναλήψεις, το σφάλμα σε σχέση με την τέφρα του εργαστηρίου και η συσχέτιση της $Ash_{\text{πραγματική}}-Ash_{\text{υπολογιστική}}$, για το ANN με εισόδους Q, I_{Cs} :



Σχήμα 5.4: Σφάλματα εκπαίδευσης, επικύρωσης και ελέγχου (RMS) σε σχέση με τις επαναλήψεις



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα συσχέτισης σφάλματος (%) με την πραγματική τιμή της τέφρας (Ash_{lab}) (%).



Σχήμα 5.6: Συσχέτιση της $Ash_{πραγματική}(T)$ (%) - $Ash_{υπολογιστική}(A)$ (%)

Ο συντελεστής συσχέτισης (R) μεταξύ των υπολογιζόμενων και των πραγματικών τιμών, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, είναι χαμηλός και ίσος με 0.453. Αυτή η τιμή υποδηλώνει μέτρια συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων του ANN και των πραγματικών τιμών.

Κεφάλαιο 6

Σύγκριση των αποτελεσμάτων των ANFIS με τα ANN και την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR)

Στο κεφάλαιο αυτό συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των ANFIS σε σχέση με τα ANN και την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (Multiple Linear Regression ή MLR). Όπως προαναφέρθηκε από τα τέσσερα ANFIS που αναπτύχθηκαν, τα καλύτερα αποτελέσματα αποκτήθηκαν με το 3^ο (Q, I_{Cs}, Ash) και 4^ο (Q, position, Ash) σύστημα. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τα νευρωνικά δίκτυα και την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση για το 3^ο ANFIS (Q, I_{Cs}, Ash).

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού της τέφρας με τα τρία μοντέλα βαθμονόμησης (ANFIS, MLR, ANN) σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές της. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του ANFIS είναι πιο κοντά στις πραγματικές τιμές, γεγονός που φανερώνει ότι το ANFIS έχει κατανοήσει καλύτερα τη σχέση που συνδέει την τέφρα με τις παραμέτρους Q, I_{Cs}.

Πίνακας 6.1 : Αποτελέσματα υπολογισμού της τέφρας με τα ANFIS, την MLR, τα ANN και σύγκριση με τις πραγματικές τιμές.

A/A	Πραγματική τιμή (%)	Υπολογισθείσα τιμή από το ANFIS (%)	Υπολογισθείσα τιμή από την MLR (%)	Υπολογισθείσα τιμή από τα ANN (%)
1	19.15	14.911	18.545	20.326
2	19.15	20.927	19.849	15.574
3	19.15	15.892	19.416	15.485
4	16.37	14.806	19.125	21.587
5	16.37	15.608	20.916	17.262
6	16.37	12.37	19.364	16.21
7	18.05	11.933	20.513	22.515
8	18.05	18.96	22.325	21.187
9	18.05	12.059	18.681	22.512
10	24.08	17.841	19.197	16.545
11	24.08	24.225	16.341	16.764
12	24.08	9.6674	19.172	20.087
13	9.37	17.475	14.346	23.236
14	9.37	12.065	15.539	24.364
15	9.37	23.304	14.64	22.616
16	18.29	22.984	14.663	23.188
17	18.29	21.393	16.407	14.896
18	18.29	24.088	18.801	27.866
19	20.55	24.957	16.706	23.389
20	20.55	21.927	18.787	23.456

21	20.55	33.88	18.33	27.398
22	11.03	20.19	20.565	23.56
23	11.03	17.794	21.382	24.716
24	11.03	12.457	18.924	27.981
25	14.71	17.498	19.584	20.687
26	14.71	24.366	16.211	15.111
27	14.71	7.0476	19.057	15.547
28	22.1	12.818	19.79	17.538
29	22.1	22.17	20.213	15.416
30	22.1	31.595	18.369	16.741
31	12.16	20.239	19.884	11.87
32	12.16	19.518	19.913	14.17
33	12.16	11.284	19.966	15.536
34	13.7	21.242	21.431	17.494
35	13.7	20.102	17.913	16.438
36	13.7	13.291	21.021	15.826
37	17.02	23.048	23.261	15.476
38	17.02	22.22	18.587	13.108
39	17.02	19.394	14.895	25.835
40	9.05	18.182	17.948	15.476
41	9.05	13.611	19.896	25.826
42	9.05	10.819	17.508	15.571
43	15.83	21.375	22.993	15.474
44	15.83	18.477	20.557	20.764
45	15.83	17.557	18.78	17.279
46	28.38	21.905	20.21	15.473
47	28.38	20.906	18.695	20.778
48	28.38	24.643	19.915	15.476
49	32.82	18.799	21.083	15.349
50	32.82	18.175	19.113	21.48
51	32.82	23.303	20.453	16.125
52	20.5	23.123	19.993	15.639
53	20.5	26.758	19.677	15.586
54	20.5	22.52	21.208	15.56
55	22.99	18.295	24.951	15.466
56	22.99	16.429	18.326	17.936
57	22.99	25.024	19.048	15.556
58	26.78	24.902	19.56	15.41
59	26.78	24.11	19.06	23.569
60	26.78	29.74	20.375	15.477
61	28.36	27.811	23.076	14.721
62	28.36	28.842	21.128	15.513
63	28.36	26.883	21.796	15.894
64	13.41	19.068	26.699	23.116
65	13.41	17.419	24.499	20.931
66	13.41	12.758	26.53	16.18
67	17.29	19.634	19.727	23.615
68	17.29	15.345	21.057	22.257
69	17.29	17.203	19.131	23.121
70	10.53	9.9173	20.556	17.425
71	10.53	17.746	26.191	16.843
72	10.53	12.685	21.343	15.53

73	15.63	19.669	21.482	16.658
74	15.63	17.595	17.465	23.551
75	15.63	14.929	21.405	15.476
76	23.48	23.153	20.164	15.476
77	23.48	16.526	20.326	22.336
78	23.48	22.266	19.401	28.001
79	28.87	29.462	21.613	17.919
80	28.87	26.208	21.839	14.976
81	28.87	28.786	23.643	15.505
82	10.54	14.414	19.538	21.344
83	10.54	21.813	18.76	17.662
84	10.54	15.216	27.866	15.657
85	15.56	14.415	20.136	22.984
86	15.56	19.779	20.49	22.223
87	15.56	11.867	22.192	18.09

Στον Πίνακα 6.2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης και της επικύρωσης για το μοντέλο βαθμονόμησης που βασίζεται στα ANFIS. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο και από τα συνηθισμένα μοντέλα βαθμονόμησης, που βασίζονται σε μεθόδους πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR).

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα εκπαίδευσης και επικύρωσης του ANFIS, του ANN και της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR).

Μέθοδος Βαθμονόμησης	ANFIS	MLR	ANN
Αλγόριθμος εκπαίδευσης	Υβριδικός	Ελάχιστα τετράγωνα	Levenberg-Marquardt
Ρυθμός εκμάθησης	0.01		
Επαναλήψεις	200		200
Κανόνες για κάθε είσοδο	4		
Αριθμός μετρήσεων	87	87	87
Αριθμός μετρήσεων στην εκπαίδευση	48	48	44
Αριθμός μετρήσεων στην επικύρωση	39	39	21
Αριθμός μετρήσεων στον έλεγχο			22
Σφάλμα εκπαίδευσης (rms) στις μεμονωμένες μετρήσεις	5.42	6.98	5,76
Σφάλμα επικύρωσης (rms) στις μεμονωμένες μετρήσεις	5.63	6.72	
Σφάλμα για τη μέση τιμή	0.90	1.50	0.32
Τυπική απόκλιση στις μεμονωμένες μετρήσεις	5.46	2.53	3.97
Συντελεστής συσχέτισης	0.60	0.38	0.45

Τα λάθη επικύρωσης και εκπαίδευσης για το ANFIS είναι σχεδόν ίδια και κατά 22.5% μικρότερα από τα αντίστοιχα λάθη της MLR. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι το ANFIS αποδίδει εξίσου και στο σύνολο εκπαίδευσης και επικύρωσης. Δείχνει επίσης ότι το μοντέλο ANFIS έχει εκπαιδευθεί κατάλληλα (η υπερεκπαίδευση έχει αποφευχθεί με τη χρησιμοποίηση της τεχνικής πρόωρου σταματήματος) και παρουσιάζει σταθερότητα η οποία είναι επιθυμητή στη βαθμονόμηση.

Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των υπολογιζόμενων και πραγματικών τιμών είναι 0.6. Αυτή η τιμή, ακόμη και αν είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή που λαμβάνεται από την MLR (0.38) και από το ANN (0.45), είναι σχετικά χαμηλή. Τιμές μεγαλύτερες από 0.85 είναι συνήθως επιθυμητές για ένα αποδοτικό μοντέλο βαθμονόμησης. Τα ανωτέρω αποτελέσματα δείχνουν ότι, ακόμα και αν επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση από το ANFIS, το λάθος εκτίμησης είναι ακόμα απορριπτικό για τον έλεγχο πραγματικού χρόνου της ποιότητας λιγνίτη σε βραχυπρόθεσμη βάση. Αφ' ετέρου, οι μέσες τιμές των πραγματικών και προβλεπόμενων τιμών τέφρας είναι

κοντά (το λάθος των μέσων τιμών είναι 0.90). Αυτό δείχνει ότι, ακόμη και αν οι μεμονωμένες προβλέψεις (μαζικά δείγματα 60kg λιγνίτη κάθε ένα) είναι αναξιόπιστες, οι προβλέψεις κατά μέσο όρο, όπως για μια παραγωγή μιας ώρας, είναι σημαντικά καλύτερες. Αυτή η δυνατότητα πρέπει να εξεταστεί περαιτέρω με τη δημιουργία ενός νέου συνόλου στοιχείων βασισμένου στη δυναμική δειγματοληψία και χρησιμοποιώντας μεγάλα χρονικά διαστήματα μέτρησης για τον DUET.

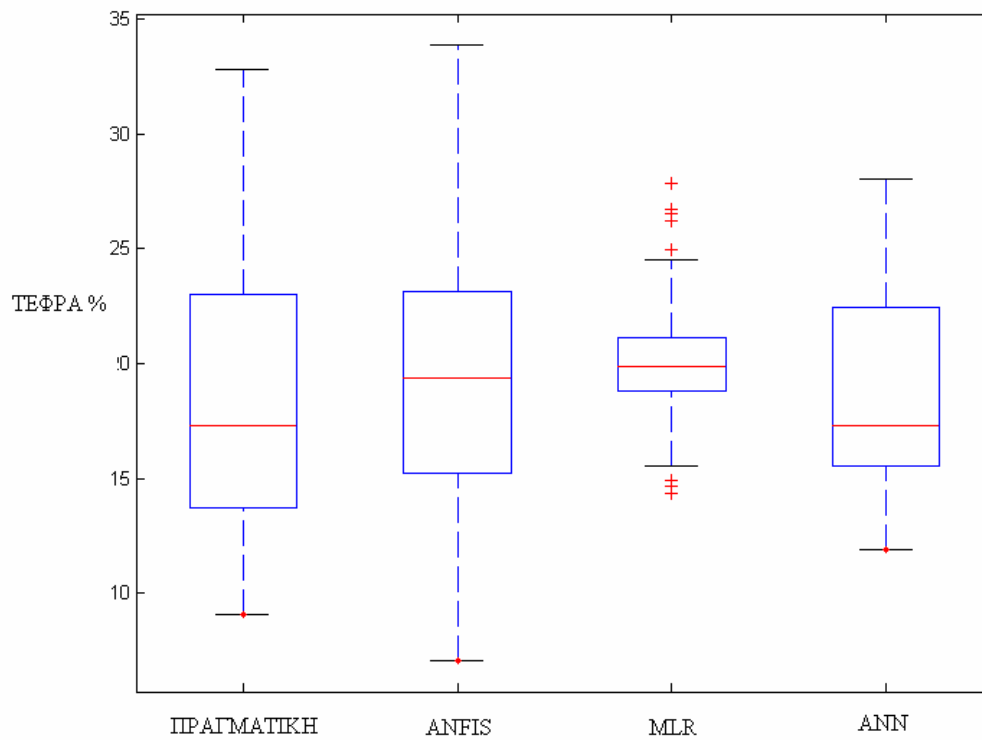
Συγκρίνοντας τα ANFIS με τα ANN παρατηρείται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του ANFIS από το ANN, είναι ότι το ANFIS είναι "διαφανές" στο χρήστη, ενώ το ANN λειτουργεί όπως ένα "μαύρο κουτί". Γι' αυτόν τον λόγο, το ANFIS μπορεί να τροποποιηθεί και να προσαρμοστεί ευκολότερα από το ANN. Και τα δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιτυχώς για την πρόβλεψη των παραμέτρων ποιότητας του λιγνίτη σε σχέση με άλλες μεθόδους.

Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή), για την πραγματική τέφρα και την τέφρα που υπολογίζεται από το ANFIS, την MLR και το ANN. Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του ANFIS είναι πιο κοντά στα πραγματικά δεδομένα, σε σχέση με τα αποτελέσματα των δύο άλλων μοντέλων.

Πίνακας 6.3: Στατιστικά στοιχεία τέφρας.				
	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΕΦΡΑ (%)	ΤΕΦΡΑ ANFIS (%)	ΤΕΦΡΑ MLR (%)	ΤΕΦΡΑ ANN (%)
Μέση τιμή (m)	18.50	19.40	20.00	18.82
Τυπική απόκλιση (s)	6.45	5.46	2.53	3.97
Ελάχιστη τιμή (min)	9.05	7.05	14.35	11.87
Μέγιστη τιμή (max)	32.82	33.88	27.87	28.00

Στο Σχήμα 6.1 παριστάνεται η κατανομή των τιμών της τέφρας του κάθε μοντέλου (ANFIS, MLR, ANN). Στο ορθογώνιο που φαίνεται για κάθε μοντέλο βρίσκεται το 50% των τιμών της τέφρας του. Στα δύο άκρα εκτείνεται μια γραμμή η οποία έχει μήκος 1,5 φορές το ενδοτεταρτημοριακό εύρος και συμβολίζει τα όρια

πέραν των οποίων οι τιμές που συναντώνται θεωρούνται ακραίες. Παρατηρείται ότι το μοντέλο της MLR, αποδίδει τιμές τέφρας σε ένα στενό πεδίο σε σχέση με τα άλλα μοντέλα, δεν αποδίδει σωστά το εύρος των πραγματικών τιμών της τέφρας.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα κατανομής της τέφρας για το κάθε μοντέλο.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα και προτάσεις

Στην εργασία αυτή, εξετάστηκε η δυνατότητα βελτίωσης της λειτουργίας των εν σειρά συστημάτων ελέγχου ποιότητας λιγνιτών, μέσω της ανάπτυξης βελτιωμένων τεχνικών βαθμονόμησης του αναλυτή, που βασίζονται στα νευροασαφή έμπειρα συστήματα τύπου Sugeno. Αναπτύχθηκαν τέσσερα διαφορετικά προσαρμοζόμενα νευροασαφή συστήματα (ANFIS), χρησιμοποιώντας ως εισόδους τις πρωτογενείς μετρήσεις ή παράγωγα αυτών, λαμβάνοντας υπ' όψιν το νόμο του Beer's που διέπει το φυσικό φαινόμενο απορρόφησης ακτινοβολίας από την ύλη.

Πραγματοποιήθηκε εφαρμογή των αναπτυχθέντων ANFIS, μεταβάλλοντας τον αριθμό και το είδος των συναρτήσεων συμμετοχής τους και τον αριθμό των επαναλήψεων. Από την εφαρμογή τους προέκυψε ότι από τα τέσσερα συστήματα, τα μικρότερα σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου, εμφανίζονται στο 3^ο και 4^ο σύστημα, τα οποία έχουν ως εισόδους τον λόγο των λογαρίθμων των σχετικών εντάσεων (Q) και την ένταση της ακτινοβολίας του Cs, και τον λόγο των λογαρίθμων των σχετικών εντάσεων (Q) και το πάχος του λιγνίτη (position), αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής των εισόδων, αυξάνεται και το σφάλμα ελέγχου, ενώ το σφάλμα εκπαίδευσης μειώνεται (φαινόμενο υπερεκπαίδευσης). Αν αυξηθούν ή μειωθούν οι επαναλήψεις δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές στα σφάλματα των συστημάτων. Για την αποφυγή του φαινομένου της υπερεκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές πρόωρης διακοπής βασισμένες στην παρακολούθηση της εξέλιξης του σφάλματος για τα δεδομένα που απαρτίζουν το σύνολο επικύρωσης.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν δύο τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN), με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με αυτά των ANFIS. Επίσης πραγματοποιήθηκε σύγκριση και με την πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση (MLR).

Παρατηρήθηκε ότι τα λάθη επικύρωσης και εκπαίδευσης για το ANFIS είναι σχεδόν ίδια και κατά 22.5% μικρότερα από τα αντίστοιχα λάθη της MLR. Αυτό σημαίνει ότι το ANFIS αποδίδει εξίσου στο σύνολο εκπαίδευσης και στο σύνολο επικύρωσης. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι το μοντέλο βαθμονόμησης που αναπτύχθηκε με βάση τα ANFIS έχει εκπαιδευθεί κατάλληλα (η υπερεκπαίδευση έχει αποφευχθεί) και παρουσιάζει σταθερότητα που είναι επιθυμητή στη βαθμονόμηση.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι τα αποτελέσματα του ANFIS είναι πιο κοντά στις πραγματικές τιμές της τέφρας σε σχέση με τα συνήθη μοντέλα βαθμονόμησης που βασίζονται στη πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση, γεγονός που φανερώνει ότι το ANFIS έχει κατανοήσει καλύτερα τη σχέση που συνδέει την τέφρα με τις παραμέτρους Q και I_{CS} .

Από το διάγραμμα συσχέτισης της απόλυτης τιμής του σφάλματος του αναλυτή με την τιμή της τέφρας, παρατηρήθηκε ότι τα μεγαλύτερα σφάλματα μέτρησης του αναλυτή εντοπίζονται στις περιοχές των ακραίων τιμών της τέφρας, σε χαμηλές και υψηλές τιμές. Στις περιοχές ακραίων τιμών το σφάλμα είναι μεγάλο και στις ενδιάμεσες είναι κατά πολύ μικρότερο. Παρατηρήθηκε γραμμική συσχέτιση μεταξύ του σφάλματος και της τέφρας.

Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των υπολογιζόμενων και πραγματικών τιμών για το ANFIS, είναι 0.6. Αυτή η τιμή, ακόμη και αν είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή που λαμβάνεται από την MLR (0.38) και από το ANN (0.45), είναι σχετική χαμηλή. Τιμές μεγαλύτερες από 0.85 είναι συνήθως επιθυμητές για ένα αποδοτικό μοντέλο βαθμονόμησης. Τα ανωτέρω αποτελέσματα δείχνουν ότι, ακόμα και αν επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση από το ANFIS, το λάθος μέτρησης του αναλυτή DUET για την τέφρα δεν είναι αποδεκτό για τον έλεγχο της ποιότητας του λιγνίτη σε πραγματικό χρόνο και σε βραχυπρόθεσμη βάση. Το σφάλμα μέτρησης όμως της μέσης τέφρας για το σύνολο των δειγμάτων είναι σημαντικά μικρότερο (0.90). Αυτό φανερώνει ότι, αν και οι μεμονωμένες μετρήσεις (δείγματα 60kg λιγνίτη το κάθε ένα) δεν έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια οι μετρήσεις για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα όπως για παραγωγή μιας ώρας ή και μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος, αναμένεται να είναι σημαντικά καλύτερες. Προϋπόθεση για να ισχύει βεβαίως κάτι τέτοιο είναι η διακύμανση των τιμών της τέφρας εντός του χρονικού αυτού διαστήματος να είναι παραπλήσια με εκείνη των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση.

Για την περαιτέρω βελτίωση της λειτουργίας των on-line αναλυτών, προτείνονται τα παρακάτω:

- Συλλογή περισσότερων δειγμάτων από όλα τα μέτωπα των ορυχείων του Λιγνιτικού Κέντρου Μεγαλόπολης, για να γίνει αντιπροσωπευτικότερο το σύνολο των δεδομένων της εκπαίδευσης.
- Εκτέλεση δυναμικών μετρήσεων με τον DUET σε κινούμενη ταινία και λήψη δειγμάτων με αυτόματο δειγματολήπτη για διάφορα χρονικά διαστήματα. Με

τη διαδικασία αυτή θα μπορέσει να γίνει η συσχέτιση της ακρίβειας της μέτρησης σε σχέση με το χρονικό διάστημα παραγωγής.

- Διερεύνηση της δυνατότητας ταυτόχρονης χρήσης δύο αναλυτών DUET (ένας στο κέντρο της ταινίας και ένας στην άκρη) για την μέτρηση της τέφρας. Σε μια τέτοια περίπτωση το αντίστοιχο μοντέλο βαθμονόμησης βασισμένο στα ANFIS θα περιλαμβάνει περισσότερες εισόδους (όπως Q_1 , Q_2 , I_{1Cs} , I_{2Cs}) και αναμένεται να δώσει ακριβέστερες μετρήσεις.

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Bachmann, C., H. Kern, (1988), "Operating experience on radiometric ash analysis using the transmission process at the General Blumenthal and Walsum collieries", *Aufbereitungs Technik / Mineral Processing*, No.11, pp. 648-653.
2. Caruana, R., S. Lawrence and C.L. Giles, (2000), "Overfitting in Neural Networks: Backpropagation, Conjugate Gradient and Early Stopping", *Neural Information Processing Systems*, Denver, CO, November 28-30.
3. Demuth, H. and M. Beale, (1994), "Neural Network Toolbox User's Guide", The Mathworks Inc.
4. Driankov, D., H. Hellendoorn and M. Reinfrank, (1993), "An Introduction to Fuzzy Control", Springer United States of America.
5. Foster, S.J., (1997), *FastLab® test results / US Coal*, © Gamma-Metrics, San Diego, CA.
6. Galetakis, M., K. Theodoridis and O. Kouridou, (2002) , "Lignite Quality Using Artificial Neural Networks (ANN) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS)".
7. Ganguli, (2001), "A Critical Review of Analyzers", *Mineral Resources Engineering*, Vol. 10, No. 4 (December), pp. 435-445.
8. Harris, C.J., C.G. Moore and M. Brown, (1993), "Intelligent Control, Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets", World Scientific Publishing, Singapore.
9. IEA Coal Research, (1994), "On-line analysis of coal: symposium review",

International symposium on on-line analysis of coal, Vienna, October 1993, IEAPER/13.

10. ISO – International Standards Organisation, (1996), "Solid mineral fuels – Evaluation of the measurement performance of on-line analysers", Committee Draft, ISO / CD 15239.
11. Jang, J.-S. R., C.-T. Sun and E. Mizutani, (1997), "Neuro-Fuzzy and Soft Computing, A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence", Prentice Hall.
12. Jang, J-S R., (1993), "ANFIS: Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System", IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, Vol. 23, No 3, pp 665-685.
13. Karr, C.L. and B. Weck, (1996), "Computer Modelling of Mineral Processing Equipment Using Fuzzy Mathematics", Minerals Engineering, Vol. 9, No. 2, pp. 183-194.
14. Kesimal, A. and A. Bascetin, (2002), "Application of Fuzzy Multiple Attribute Decision Making in Mining Operations", Mineral Resources Engineering, Vol.11, No.1, 59-72.
15. Klein, A., (1993), "Moisture and ash monitoring of coal", Journal of Coal Quality, April – September 1993, Vol.12, No.2-3, pp. 108-113.
16. Kruse, R., J. Gebhardt and F. Klawonn, (1994), "Foundations of Fuzzy Systems", Published by John Wiley & Sons Ltd, England.
17. Laurila, M., (1999), "On-Line Analysis Of Coal", Proceedings, Coal Prep '99, Lexington, KY, pp. 151-160.

18. Maheshwari, G.K., (1997), "On-line elemental analysis of raw materials in India", International Cement Review, April 1997.
19. Mathew, P.J., (1990), "On-stream coal ash analysis based on natural gamma-ray activity", International Symposium on Nuclear Techniques in the Exploration and Exploitation of Energy and Mineral Resources, Vienna, 5-8 June 1990.
20. Matlab, Fuzzy Logic Toolbox User's Guide, The Mathworks, Inc., version 2, copyright 1995-1998.
21. Merks, J.W., (1985), "Sampling and Weighing of Bulk Solids", Trans Tech Publication-Series of Bulk Materials Handling, ISBN 0-87849-053-1.
22. Michaelides, X., (1999), "Successful On-line Physical and Chemical Analysis of Coal", International Workshop on Dissemination of New Technologies for Coal Quality Control and Homogenisation, Athens, Sept 30 & Oct 1, 1999.
23. 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.
24. Pongpirodom, P., (2000), "On-line analysis for coal blending at Mae Moh Mine", Thailand, Stacking – Blending – Reclaiming B/2000, The Best of Powder Handling & Processing Bulk Solid Handling Series, Trans Tech Publications, pp.121-124.
25. Reeves, Robert, (1995), "Automated blending with on-line coal analyzers – An update", © Gamma-Metrics, San Diego, CA.
26. Reeves, Robert, (1995), "Preparation plant control with on-line coal analyzers", © Gamma-Metrics, San Diego, CA.
27. Regis, S.A., (1997), "Performance evaluation of an on-line PGNAa cross-belt

- analyzer", 39th IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference, Hershey, PA, April 20-24, 1997.
28. Rumelhart, D., G. Hinton and R. Williams, (1986), "Learning internal representations by error propagation", *Parallel distributed processing*, Vol. 1, MIT Press, pp. 318-362.
 29. Sarle, W.S., (1997), "Neural Network FAQs, Part 3: Generalization.
<ftp://ftp.sas.com/pub/neural/FAQ.html>."
 30. Schalkoff, R., (1992), "Pattern Recognition, Statistical, Structural and Neural Approaches", John Wiley and Sons, Inc.
 31. Sietsma, J. and J.F. Dow, (1991), "Creating artificial neural networks that generalize", *Neural Networks*, No. 4, pp. 67-79.
 32. Sikora, T., B. Czerw and M. Kryca, (1999), "The Natural Gamma Technique for On-Line Coal Quality Monitoring – Three Years Experience in Poland", *International Workshop on Dissemination of New Technologies for Coal Quality Control and Homogenisation*, Athens, Sept 30 & Oct 1, 1999.
 33. Storer, P., P. Rockmanovic and K. Smith, (1999), "On-line Analysis of Lignite using Prompt Gamma Neutron Activation, Natural Gamma Radiation or Dual Energy Gamma Transmission", *International Workshop on Dissemination of New Technologies for Coal Quality Control and Homogenisation*, Athens, Sept 30 & Oct 1, 1999.
 34. Taylor, P.M., (1999), "The Ash Probe – A New Instrument for the in-situ Measurement of the Ash Content of Coal Piles – From Development Commercial Exploitation", *International Workshop on Dissemination of New Technologies for Coal Quality Control and Homogenisation*, Athens, Sept 30 & Oct 1, 1999.
 35. Taylor, P.M. and J.S. Wykes, (1993), "The natural gamma technique for on-

- line coal quality monitoring – five years field experience in the United Kingdom", *Journal of Coal Quality*, Vol.12, No.2-3, April-September 1993, pp.43-51.
36. Watt J S. and Steffner E J., (1985), "Dual Energy Gamma-Ray Transmission Techniques Applied to On – Line Analysis in the Coal and Mineral Industries", CSIRO Division of Mineral Engineering, Lucas Heights Research Laboratories, Private Mail Bag 7, Sutherland, NSW 2232, Australia, Vol 36, N_o 11, pp 867-877.
 37. Wei, X., C.Y. Wang and Z.H. Zhou, (2003), "Study on the Fuzzy Ranking of Granite Sawability", *Journal of Materials Processing Technology* 139, 277-280.
 38. Wright, D., C.L. Liu, D. Stanley, H.C. Chen and J.H. Fang, (1993), "XRays: A Fuzzy Expert System for Qualitative XRD Analysis", *Computers and Geosciences*, Vol.19, N_o 10, pp. 1429-1443.
 39. Wykes, J.S., J.D. Hocldy, I. Adsley, G.M. Croke and G.J. Haines, (1989), "On-line monitoring of the ash content of stone/coal loads using natural radiation", *Nucl. Geophys.*, Vol.3, No.3, pp.203-215.
 40. 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. Παπανικολάου, Κ., (2003), "Κοιτασματολογία Ενεργειακών Πόρων" (Κοιτασματολογία Γαιανθράκων), Σημειώσεις Μαθήματος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
3. Παυλουδάκης, Φ., (1997), "Νέες Τεχνολογίες Ποιοτικού Ελέγχου του Άνθρακα – Η σημασία της εφαρμογής τους για τους ελληνικούς λιγνίτες", Καινοτομία, Έρευνα & Τεχνολογία, Τεύχος 6, σελ. 9–12, ISSN 1106 – 9066.
4. Ψωινός, Δ.Π., (1989), "Εφαρμοσμένη Στατιστική", 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Παράρτημα Α:

Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου των τεσσάρων ANFIS για 400 επαναλήψεις

Στους Πίνακες Α.1-Α.4 του παραρτήματος παρουσιάζονται τα σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου των τεσσάρων ANFIS για 400 επαναλήψεις και οι βαθμοί ελευθερίας των συστημάτων για όλες τις συναρτήσεις συμμετοχής.

Πίνακας Α.1: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 1^{ου} συστήματος για 400 επαναλήψεις

Συναρτήσεις συμμετοχής	Σφάλματα εκπαίδευσης (%)	Σφάλματα επικύρωσης (μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου) (%)	Αριθμός παραμέτρων (βαθμοί ελευθερίας)
trimf 400,2-2	5.736	5.342	24
trapmf 400,2-2	5.311	6.857	28
gbellmf 400, 2-2	5.267	7.257	24
gaussmf 400,2-2	5.531	5.690	20
gauss2mf 400,2-2	5.288	6.961	28
pimf 400,2-2	5.392	7.195	28
dsigmf 400,2-2	5.250	6.688	28
psigmf 400, 2-2	5.249	6.633	28
trimf 400,3-3	5.022	6.753	45
trapmf 400,3-3	5.122	34.377	51
gbellmf 400, 3-3	4.862	11.315	45
gaussmf 400,3-3	4.955	10.364	39
gauss2mf 400,3-3	5.204	15.436	51
pimf 400,3-3	5.179	156.184	51
dsigmf 400,3-3	5.102	13.943	51
psigmf 400, 3-3	5.139	15.093	51

Πίνακας Α.2: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 2^{ου} συστήματος για 400 επαναλήψεις

Συναρτήσεις συμμετοχής	Σφάλματα εκπαίδευσης (%)	Σφάλματα επικύρωσης (μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου) (%)	Αριθμός παραμέτρων (βαθμοί ελευθερίας)
trimf 400,2-2-3	4.732	52.754	69
trapmf 400,2-2-3	4.237	4906.662	76
gbellmf 400,2-2-3	3.941	819.691	69
gaussmf 400,2-2-3	3.950	555.380	62
gauss2mf 400,2-2-3	4.367	3798.827	76
pimf 400,2-2-3	4.157	60253.417	76
dsigmf 400,2-2-3	4.347	7000.690	76
psigmf 400,2-2-3	5.611	7272.545	76
trimf 400,3-3-3	3.931	41.085	135
trapmf 400,3-3-3	3.258	221.138	144
gbellmf 400,3-3-3	1.414	218392.588	135
gaussmf 400,3-3-3	1.480	60189.994	126
gauss2mf 400,3-3-3	2.473	20895.999	144
pimf 400,3-3-3	3.217	303.752	144
dsigmf 400,3-3-3	2.603	2144.867	144
psigmf 400,3-3-3	2.675	2148.229	144

Πίνακας Α.3: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 3^{ου} συστήματος για 400 επαναλήψεις

Συναρτήσεις συμμετοχής	Σφάλματα εκπαίδευσης (%)	Σφάλματα επικύρωσης (μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου) (%)	Αριθμός παραμέτρων (βαθμοί ελευθερίας)
trimf 400,2-2	5.802	5.046	24
trapmf 400,2-2	5.502	5.611	28
gbellmf 400,2-2	5.324	6.119	24
gaussmf 400,2-2	5.462	6.068	20
gauss2mf 400,2-2	5.420	6.119	28
pimf 400,2-2	5.293	6.269	28
dsigmf 400,2-2	5.331	5.569	28
psigmf 400,2-2	5.331	5.569	28
trimf 400,3-3	4.857	9.257	45
trapmf 400,3-3	5.027	11.989	51
gbellmf 400,3-3	4.824	26.456	45

gaussmf 400,3-3	4.850	8.331	39
gauss2mf 400,3-3	4.870	39.200	51
pimf 400,3-3	5.037	14.496	51
dsigmf 400,3-3	4.743	8.474	51
psigmf 400,3-3	4.740	7.088	51

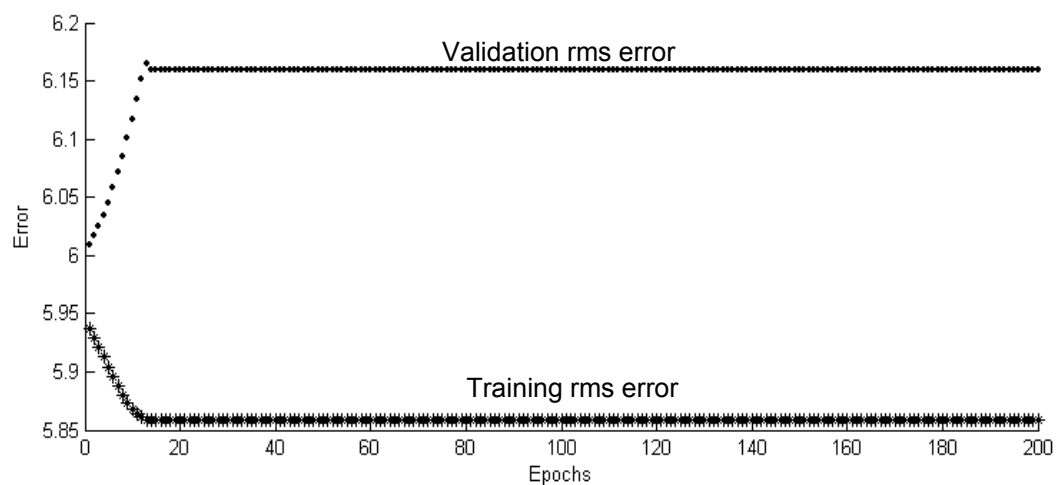
Πίνακας Α.4: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 4^{ου} συστήματος για 400 επαναλήψεις

Συναρτήσεις συμμετοχής	Σφάλματα εκπαίδευσης (%)	Σφάλματα επικύρωσης (μέσο τετραγωνικό σφάλμα ελέγχου) (%)	Αριθμός παραμέτρων (βαθμοί ελευθερίας)
trimf 400,2-3	5.9354	8.0859	33
trapmf 400,2-3	5.8779	5.9501	38
gbellmf 400,2-3	5.8512	6.5574	33
gaussmf 400,2-3	5.8302	6.4572	28
gauss2mf 400,2-3	5.7719	6.3874	38
pimf 400,2-3	5.8488	6.1125	38
dsigmf 400,2-3	5.8585	6.1598	38
psigmf 400,2-3	5.8585	6.1598	38
trimf 400,3-3	5.6294	24.4074	45
trapmf 400,3-3	5.8541	6.8896	51
gbellmf 400,3-3	5.4361	7.9182	45
gaussmf 400,3-3	5.3311	8.0082	39
gauss2mf 400,3-3	5.5435	20.0091	51
pimf 400,3-3	5.7927	7.2468	51
dsigmf 400,3-3	5.6429	17.9686	51
psigmf 400,3-3	5.6429	17.9681	51

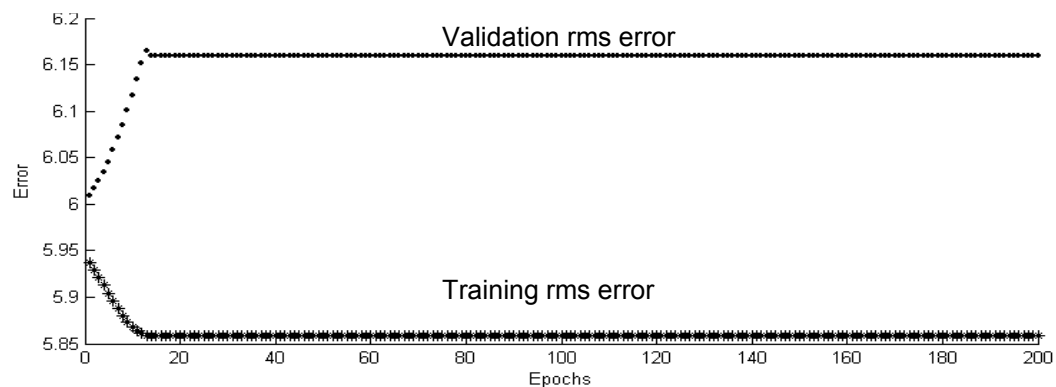
Παράρτημα Β:

Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου (RMS) του 4^{ου} ANFIS σε σχέση με τις επαναλήψεις, κατά την εκπαίδευσή του, για διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής

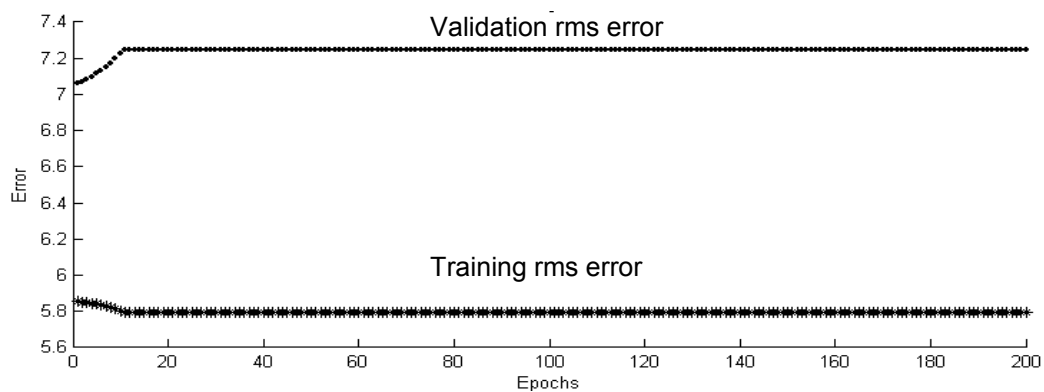
Στα Σχήματα B.1-B.15, παρουσιάζονται τα σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου του 4^{ου} ANFIS σε σχέση με τις επαναλήψεις, κατά την εκπαίδευσή του, για διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής:



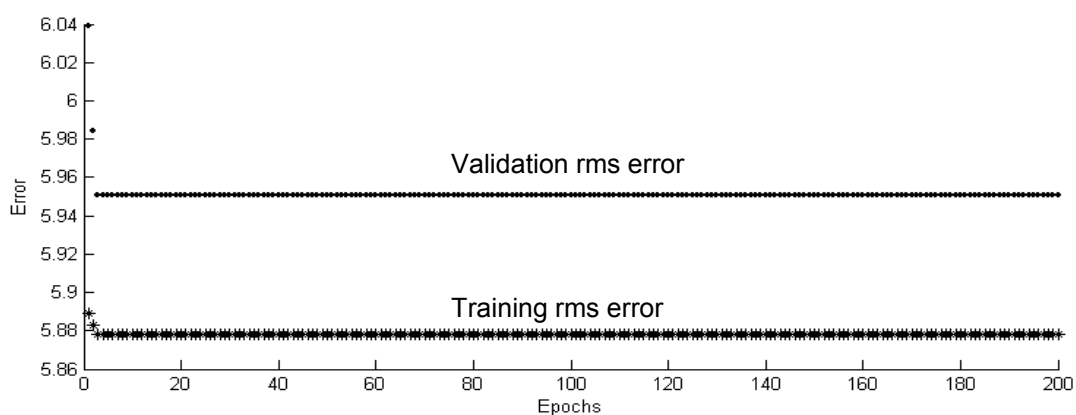
Σχήμα B.1: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Dsigmf 200,2-3]).



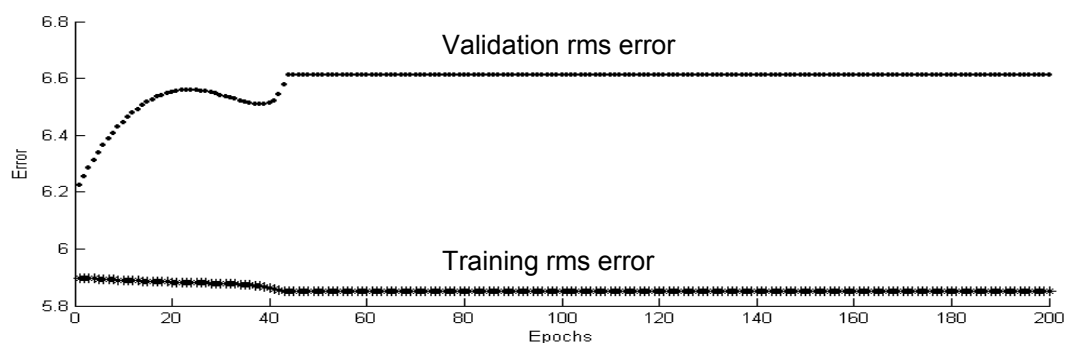
Σχήμα B.2: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Psigmf 200,2-3]).



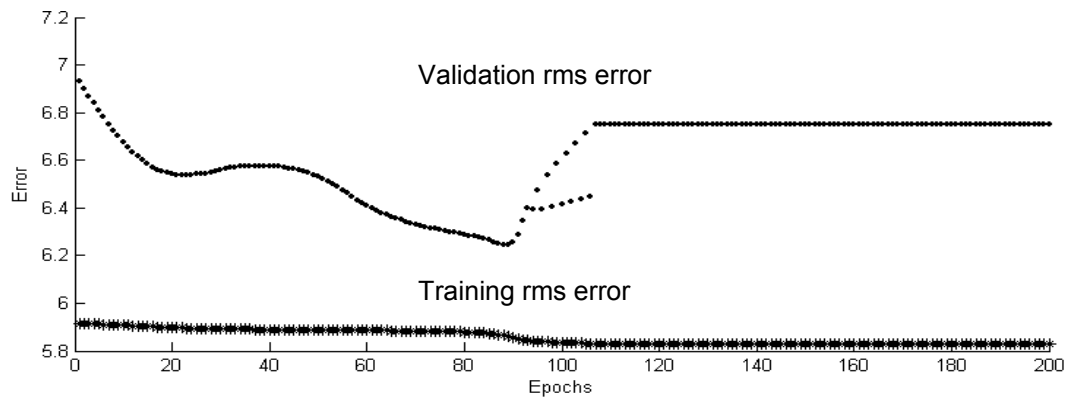
Σχήμα Β.3: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Pimf 200,3-3]).



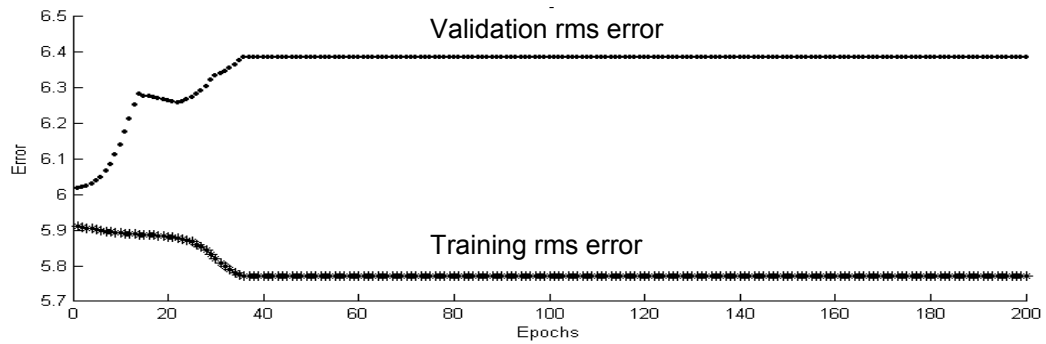
Σχήμα Β.4: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Trapmf 200,2-3]).



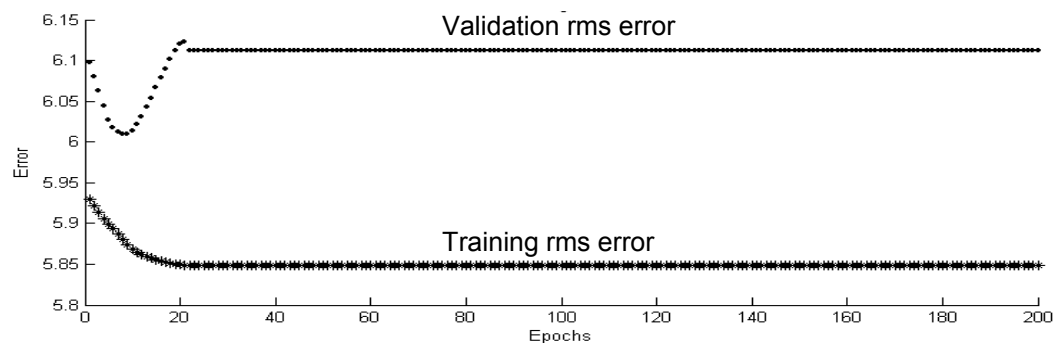
Σχήμα Β.5: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gbellmf 200,2-3]).



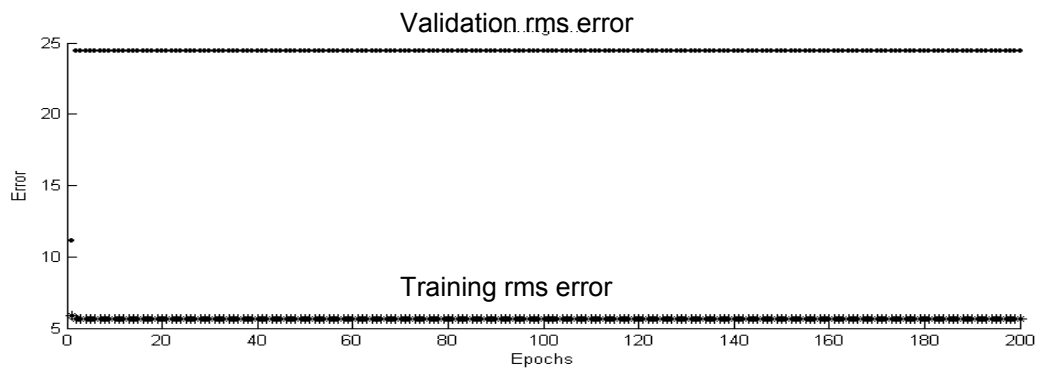
Σχήμα Β.6: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gaussmf 200,2-3]).



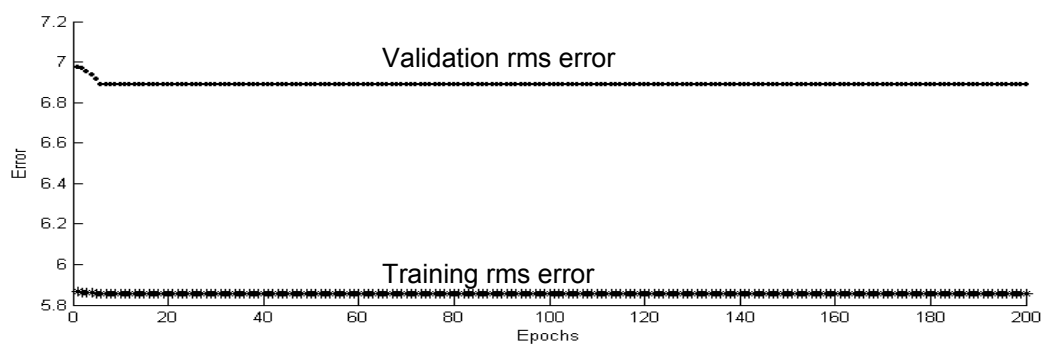
Σχήμα Β.7: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gauss2mf 200,2-3]).



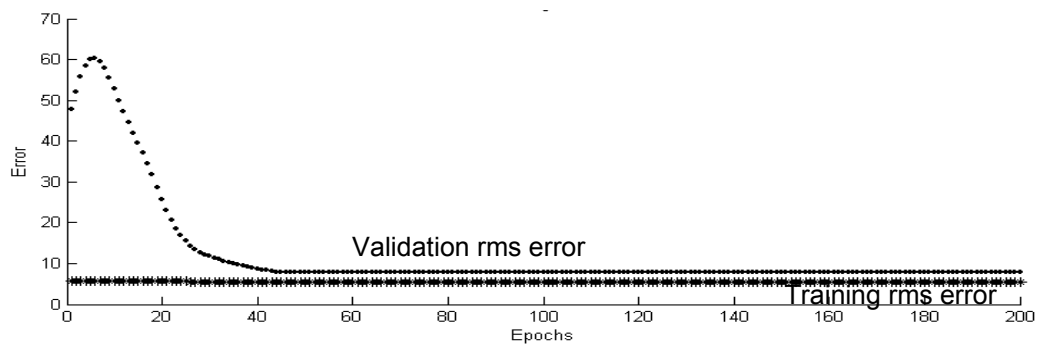
Σχήμα Β.8: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Pimf 200,2-3]).



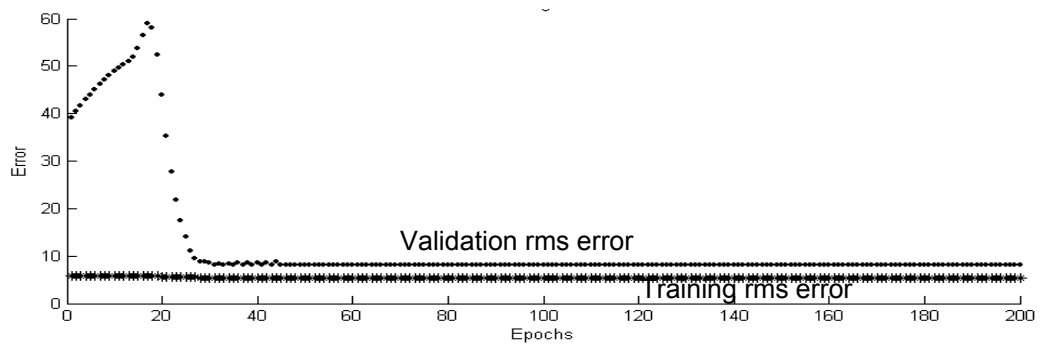
Σχήμα Β.9: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Trimf 200,3-3]).



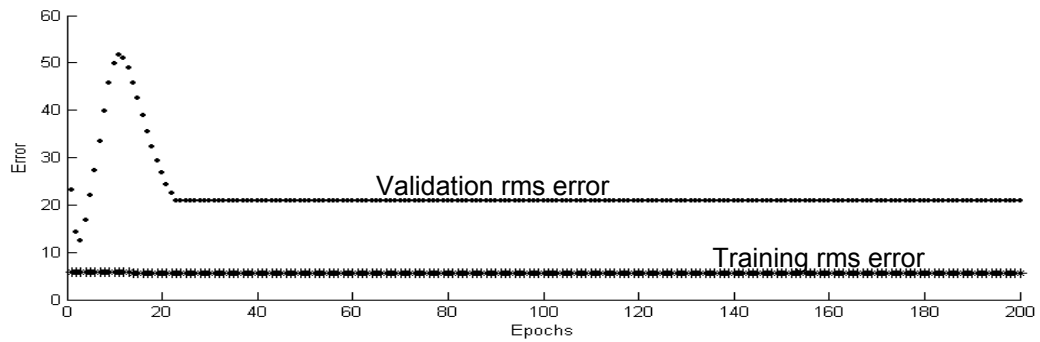
Σχήμα Β.10: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Trapmf 200,3-3]).



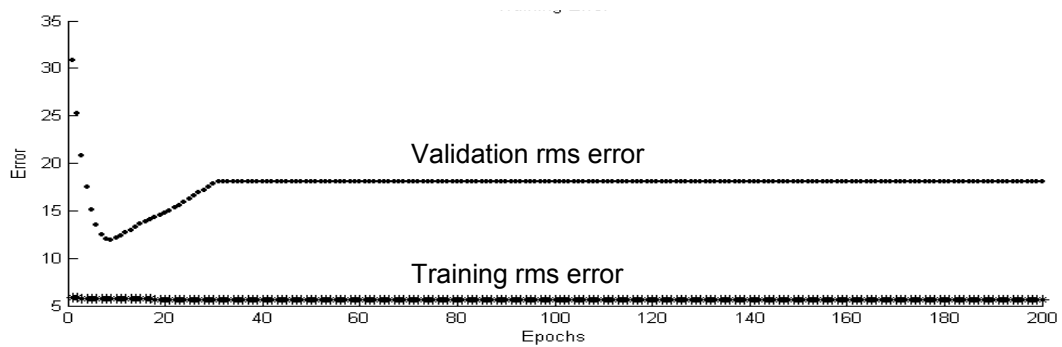
Σχήμα Β.11: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gbellmf 200,3-3]).



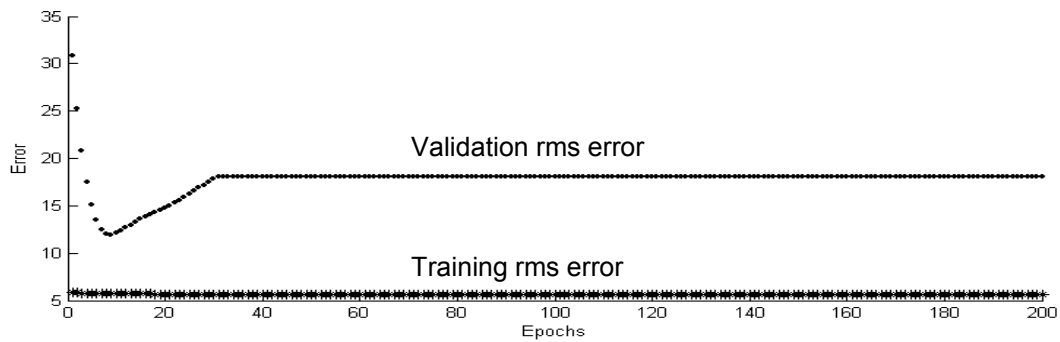
Σχήμα Β.12: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gaussmf 200,3-3]).



Σχήμα Β.13: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Gauss2mf 200,3-3]).

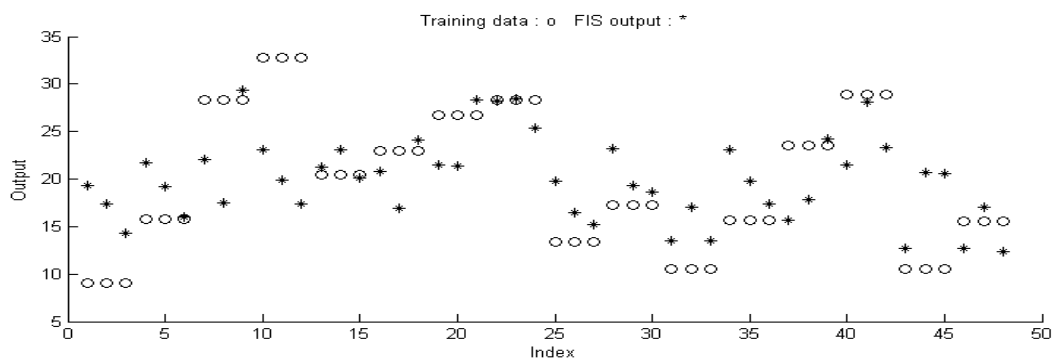


Σχήμα Β.14: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Dsigmf 200,3-3]).

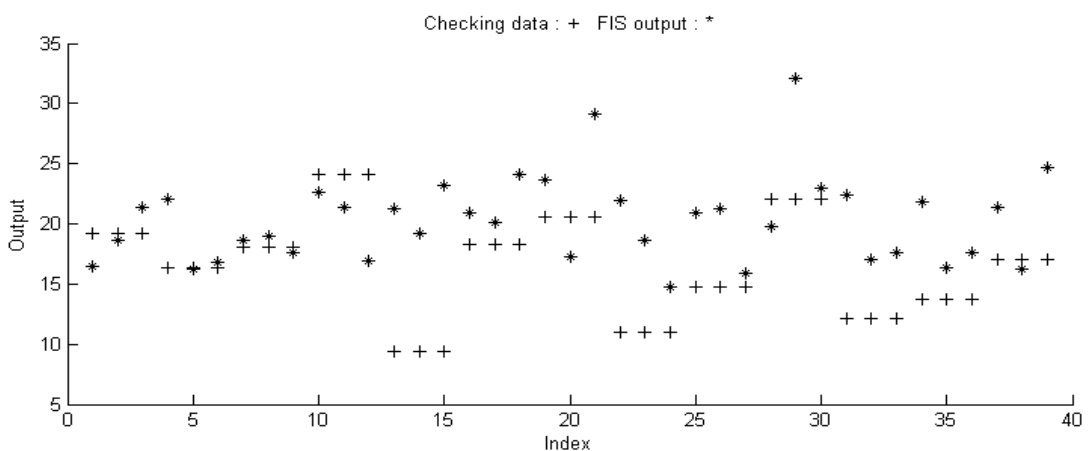


Σχήμα B.15: Σφάλματα εκπαίδευσης και ελέγχου κατά την εκπαίδευση (παράμετροι ANFIS [Psigmf 200,3-3]).

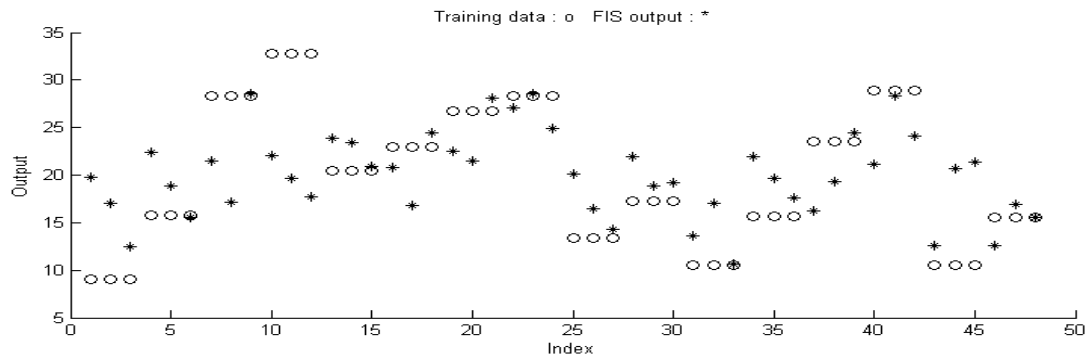
Στα Σχήματα B.16-B.45 παρουσιάζονται οι τιμές της τέφρας που υπολογίστηκαν ($Ash_{\text{υπολογιστικό}}$) από τον DUET με βάση τα μοντέλα βαθμονόμησης βασισμένα στα ANFIS (οι τιμές, σημειώνονται με +) και οι εργαστηριακά μετρηθείσες τιμές της τέφρας (οι τιμές, σημειώνονται με ο):



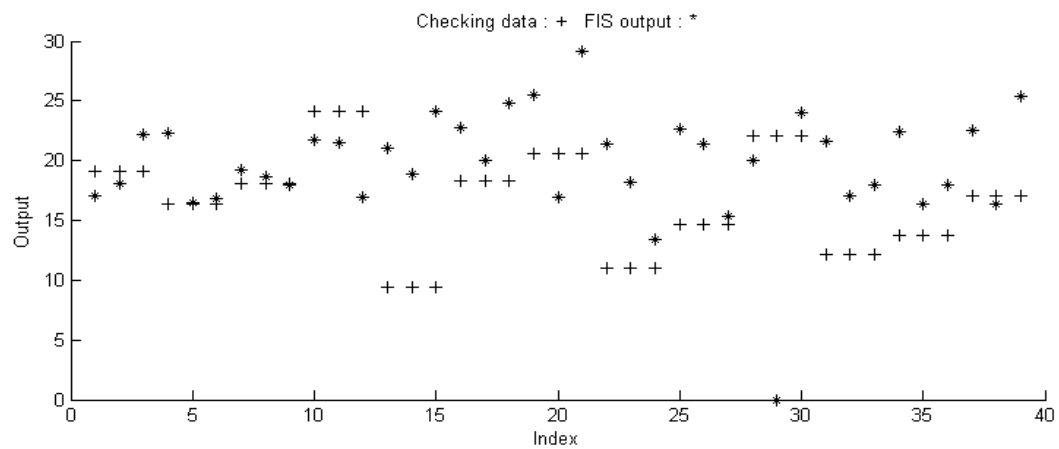
Σχήμα B.16: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [trapmf200,2-3]).



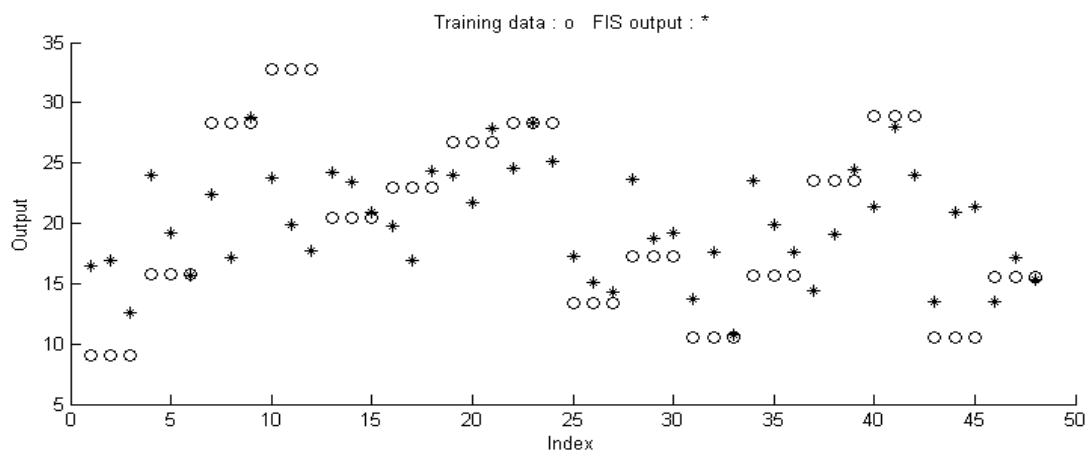
Σχήμα B.17: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [trapmf200,2-3]).



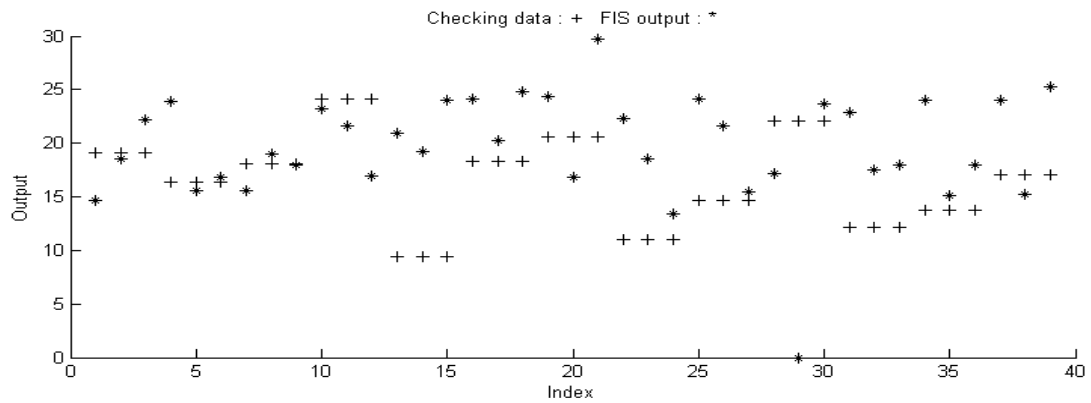
Σχήμα Β.18: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [trapmf200,3-3]).



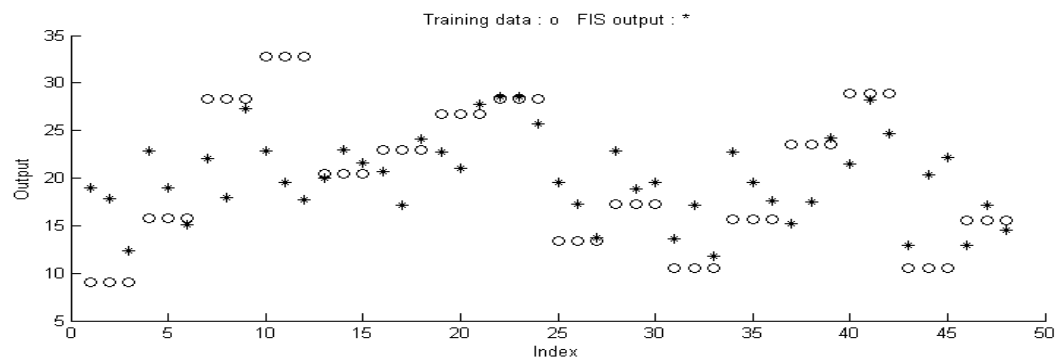
Σχήμα Β.19: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [trapmf200,3-3]).



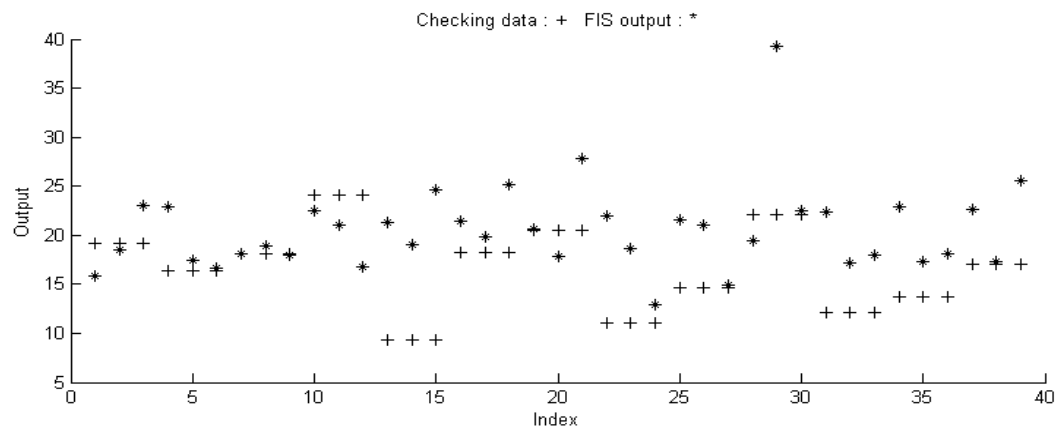
Σχήμα Β.20: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [pimf200,3-3]).



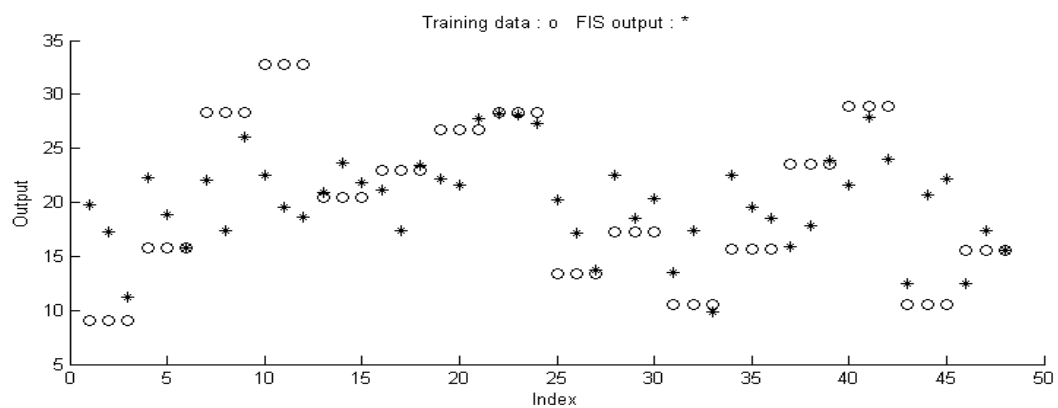
Σχήμα B.21: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [pimf200,3-3]).



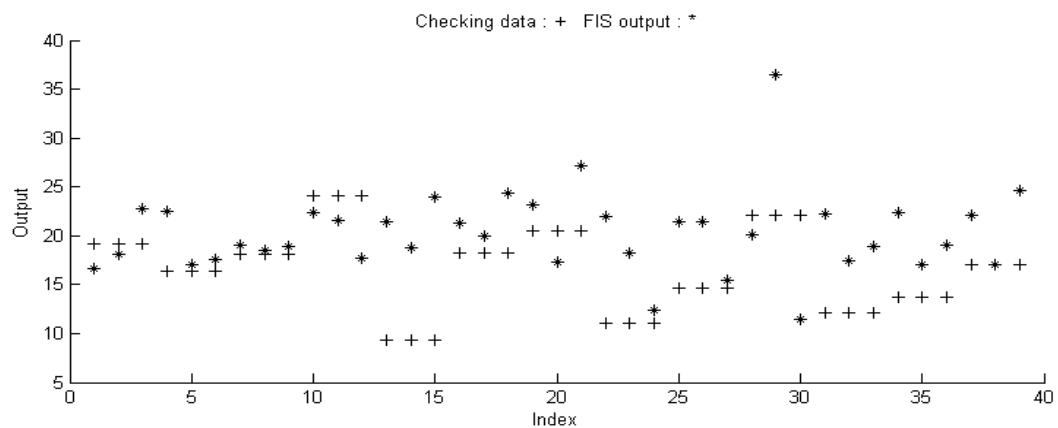
Σχήμα B.22: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gbell200,2-3]).



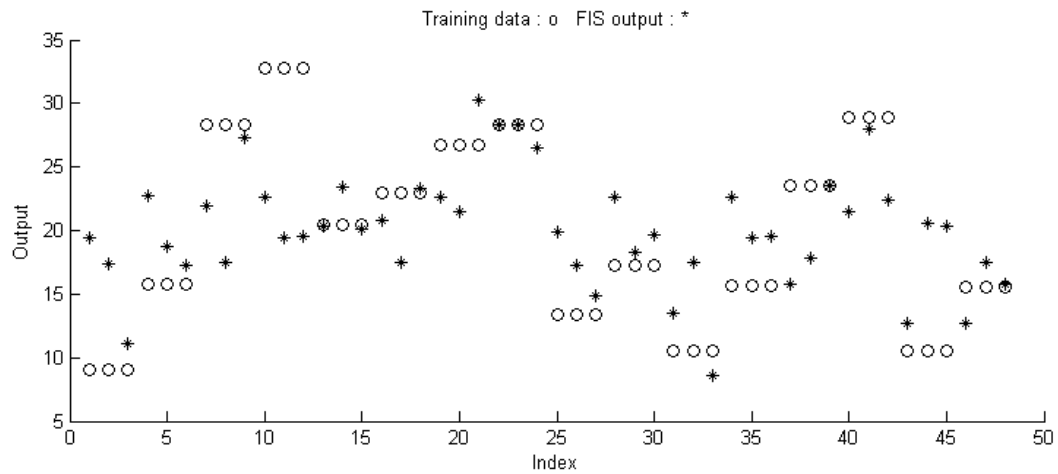
Σχήμα B.23: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gbell200,2-3]).



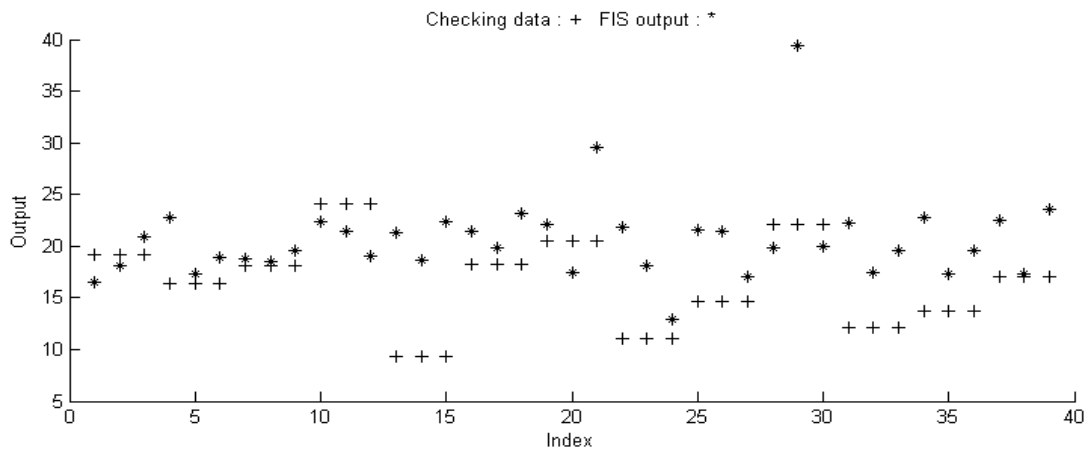
Σχήμα Β.24: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gaussmf200,2-3]).



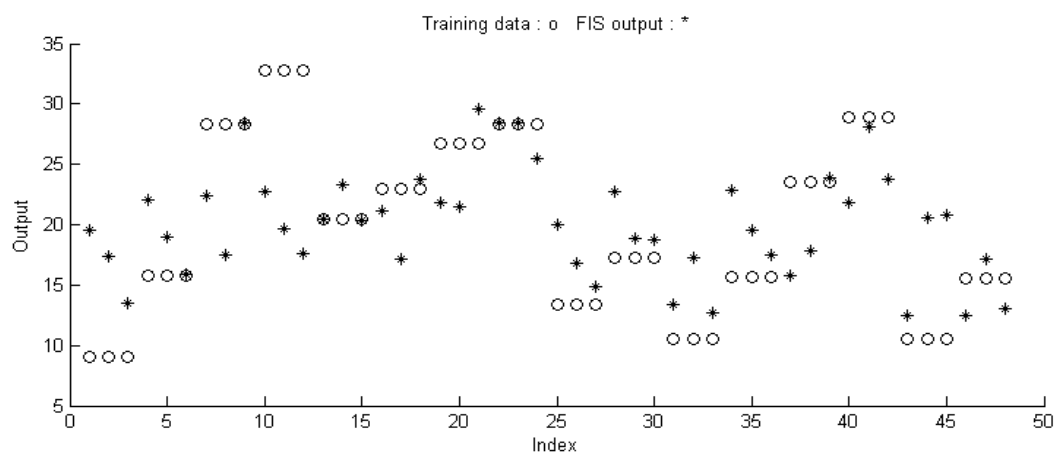
Σχήμα Β.25: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gaussmf200,2-3]).



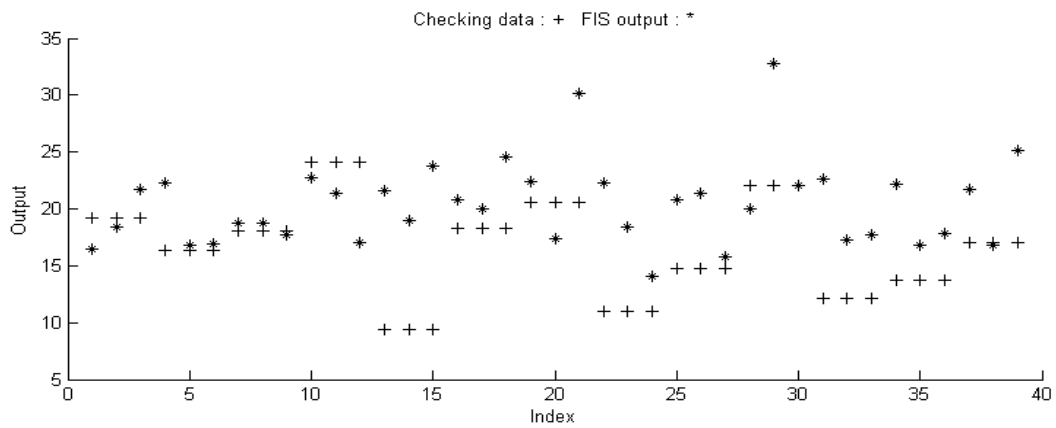
Σχήμα Β.26: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gauss2mf200,2-3]).



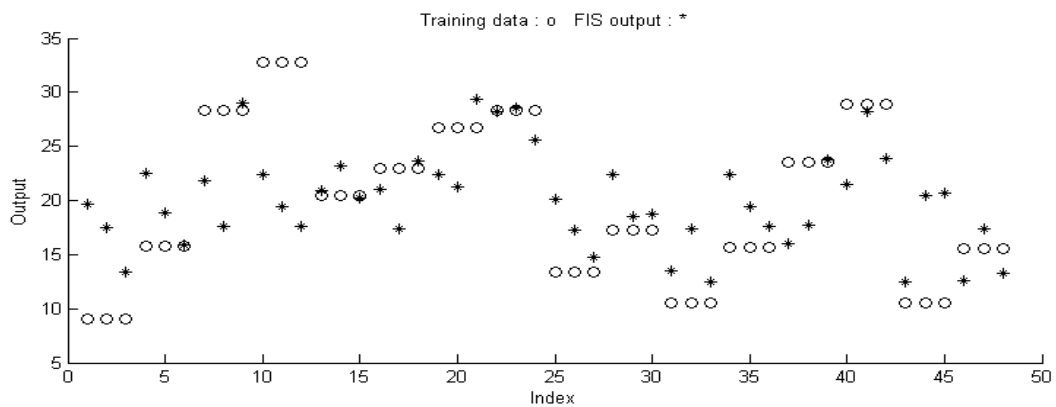
Σχήμα Β.27: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gauss2mf200,2-3]).



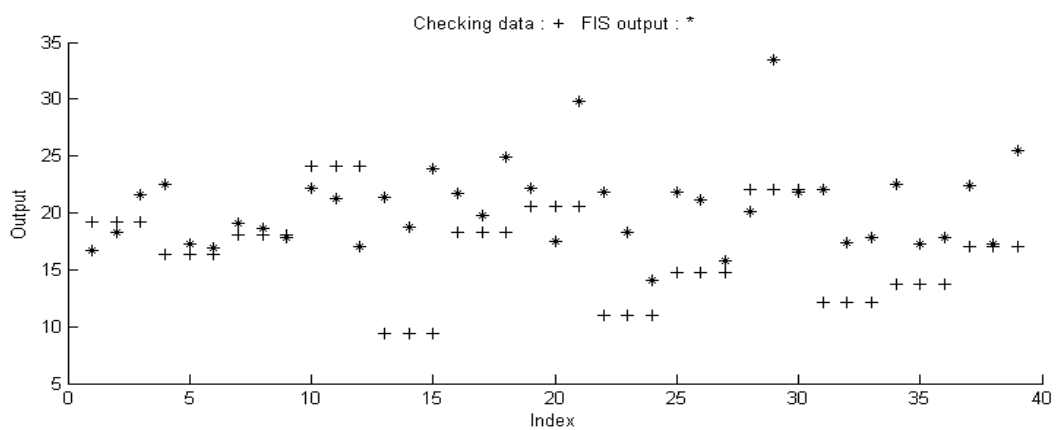
Σχήμα Β.28: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [pimf200,2-3]).



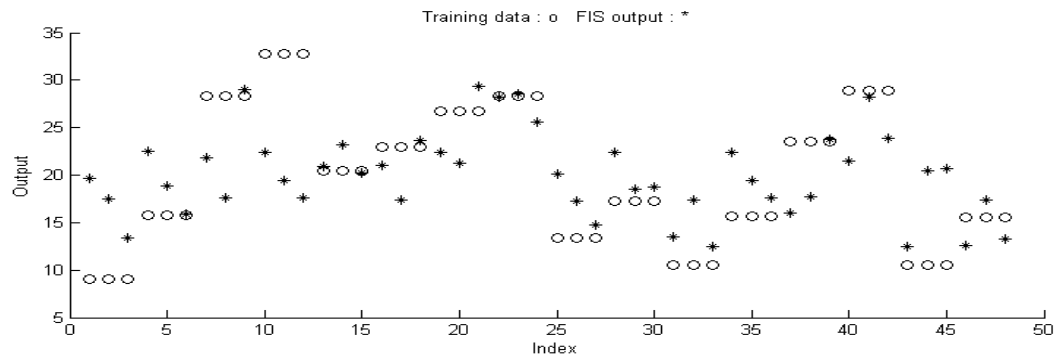
Σχήμα Β.29: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [pimf200,2-3]).



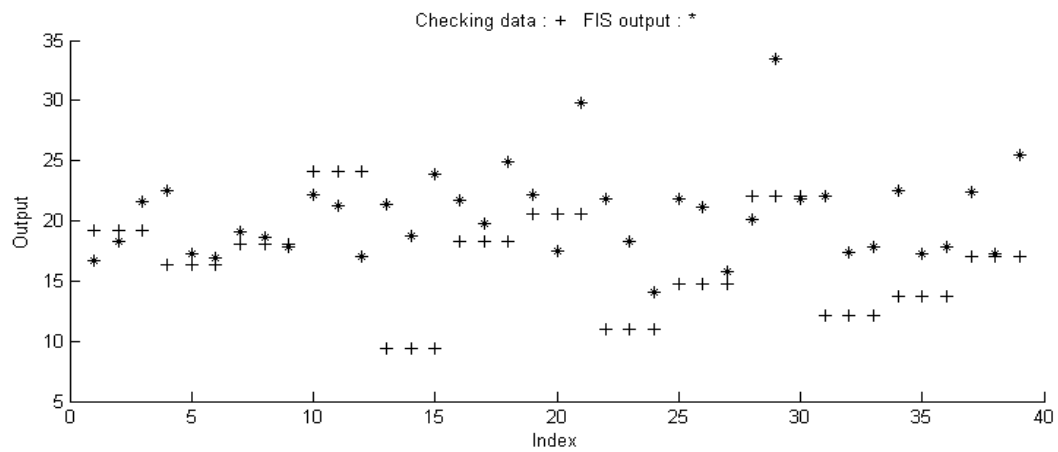
Σχήμα Β.30: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [dsigmf200,2-3]).



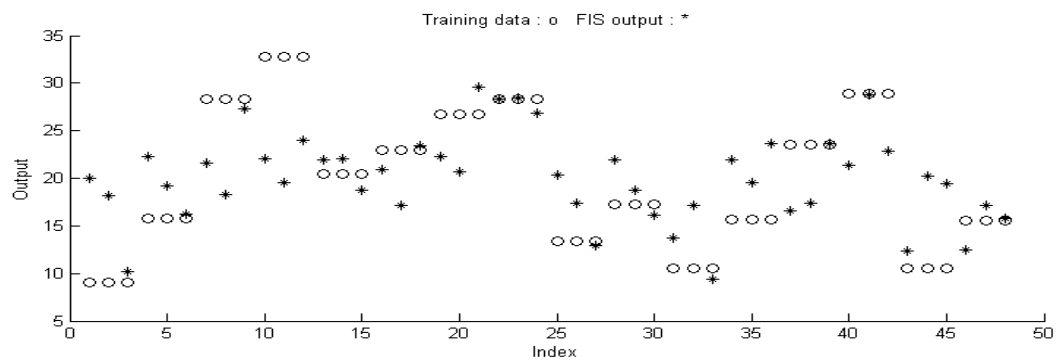
Σχήμα Β.31: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [dsigmf200,2-3]).



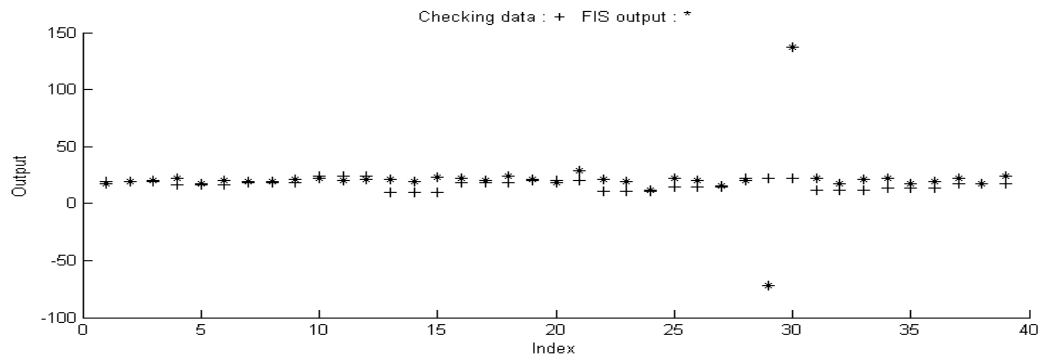
Σχήμα B.32: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [psigmf200,2-3]).



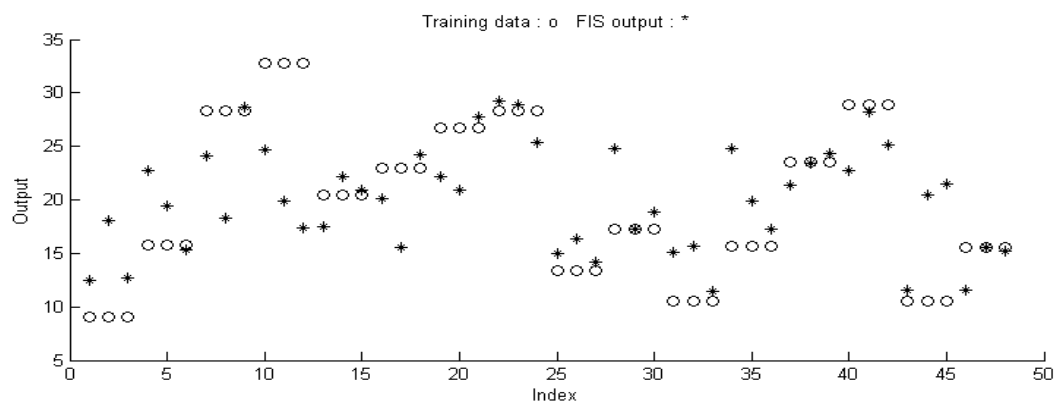
Σχήμα B.33: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [psigmf200,2-3]).



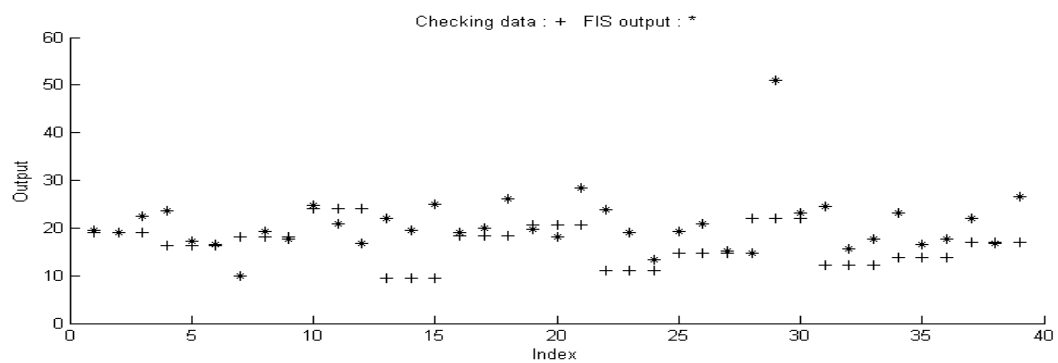
Σχήμα B.34: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [trimf200,3-3]).



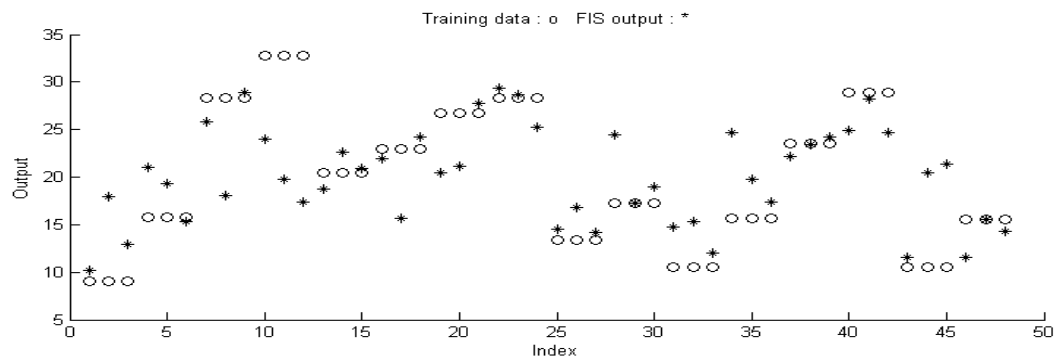
Σχήμα B.35: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [trimf200,3-3]).



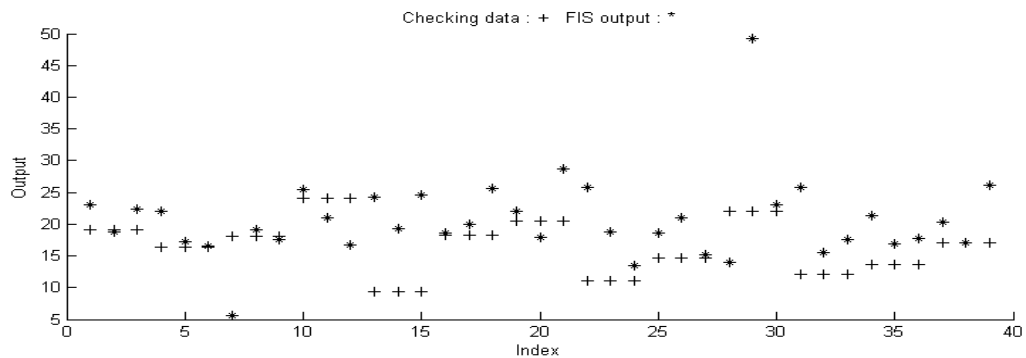
Σχήμα B.36: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gbell200,3-3]).



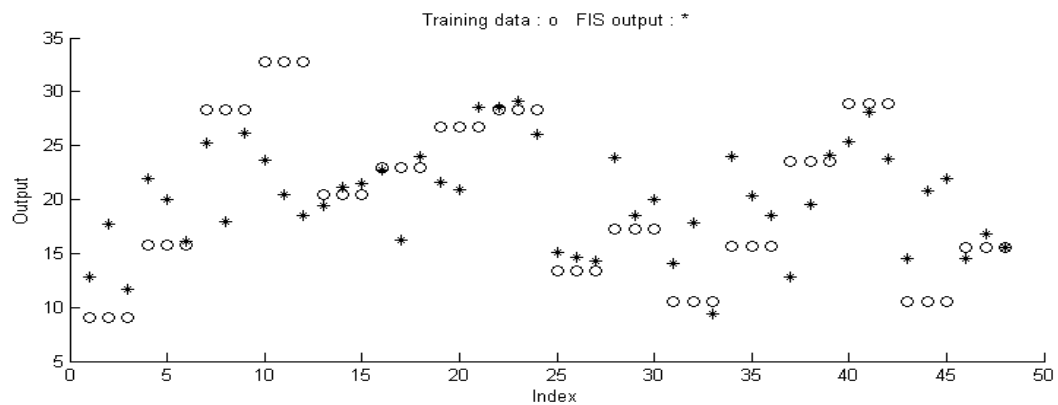
Σχήμα B.37: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gbell200,3-3]).



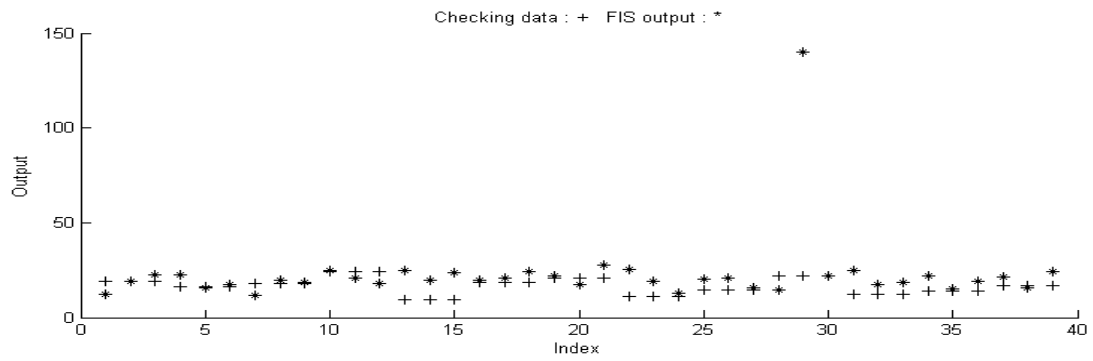
Σχήμα B.38: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gaussmf200,3-3]).



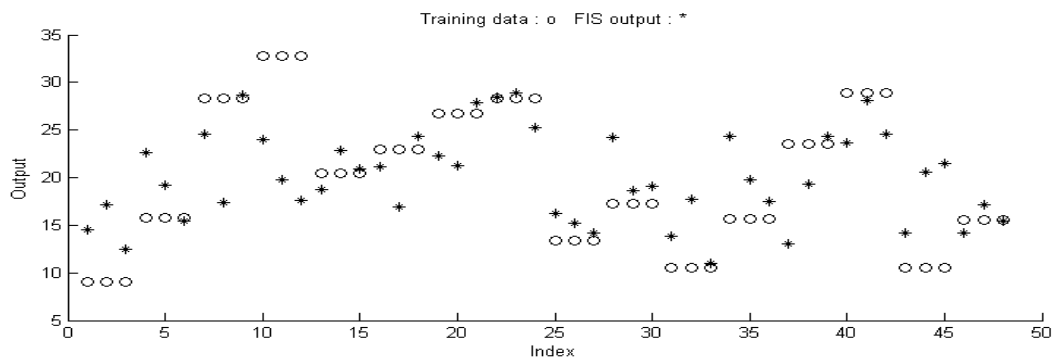
Σχήμα B.39: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gaussmf200,3-3]).



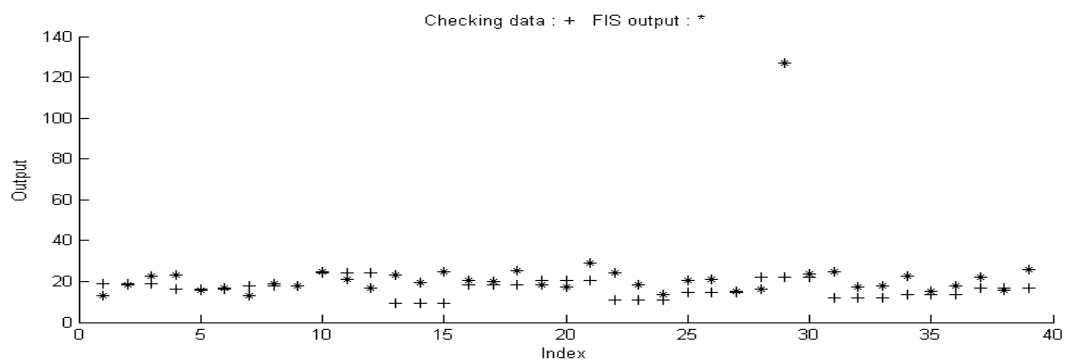
Σχήμα B.40: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [gauss2mf200,3-3]).



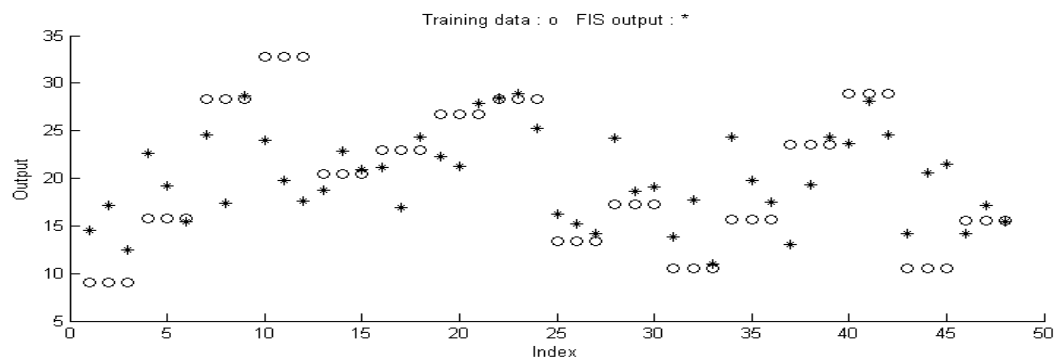
Σχήμα Β.41: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [gauss2mf200,3-3]).



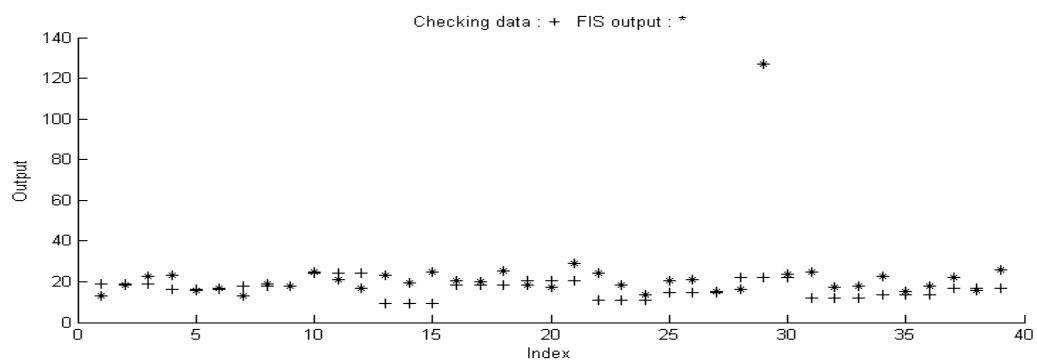
Σχήμα Β.42: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [dsigmf200,3-3]).



Σχήμα Β.43: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [dsigmf200,3-3]).



Σχήμα Β.44: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα εκπαίδευσης (παράμετροι ANFIS: [psigmf200,3-3]).



Σχήμα Β.45: Υπολογισθείσες και πραγματικές τιμές της τέφρας για τα δεδομένα ελέγχου (παράμετροι ANFIS: [psigmf200,3-3]).

Παράρτημα Γ:

Κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab, για τα αναπτυχθέντα ANFIS

Σύστημα 1° [A = f(I_{Am}, I_{Cs})]

```
a = readfis
```

```
a =  
    name: 'sugeno 1 anthi'  
    type: 'sugeno'  
    andMethod: 'prod'  
    orMethod: 'probor'  
    defuzzMethod: 'wtaver'  
    impMethod: 'min'  
    aggMethod: 'max'  
    input: [1x2 struct]  
    output: [1x1 struct]  
    rule: [1x4 struct]
```

```
getfis(a)  
    Name      = sugeno 1 anthi  
    Type      = sugeno  
    NumInputs = 2  
    InLabels  =  
        IAm  
        ICs  
    NumOutputs = 1  
    OutLabels =  
        Ash  
    NumRules = 4  
    AndMethod = prod  
    OrMethod  = probor  
    ImpMethod = min  
    AggMethod = max  
    DefuzzMethod = wtaver
```

```
showfis(a)  
1.  Name      sugeno 1 anthi  
2.  Type      sugeno  
3.  Inputs/Outputs [2 1]  
4.  NumInputMFs [2 2]  
5.  NumOutputMFs 4  
6.  NumRules    4  
7.  AndMethod   prod  
8.  OrMethod    probor  
9.  ImpMethod    min
```

10.	AggMethod	max
11.	DefuzzMethod	wtaver
12.	InLabels	IAm
13.		ICs
14.	OutLabels	Ash
15.	InRange	[100 800]
16.		[300 700]
17.	OutRange	[0 1]
18.	InMFLLabels	in1mf1
19.		in1mf2
20.		in2mf1
21.		in2mf2
22.	OutMFLLabels	out1mf1
23.		out1mf2
24.		out1mf3
25.		out1mf4
26.	InMFTypes	trimf
27.		trimf
28.		trimf
29.		trimf
30.	OutMFTypes	linear
31.		linear
32.		linear
33.		linear
34.	InMFParams	[-180 106 795 0]
35.		[93.5 812 836 0]
36.		[140 300 699 0]
37.		[297 704 709 0]
38.	OutMFParams	[0 0 0 0]
39.		[0 0 0.5 0]
40.		[0 0 1 0]
41.		[0 0 0 0]
42.	Rule Antecedent	[1 1]
43.		[1 2]
44.		[2 1]
45.		[2 2]
42.	Rule Consequent	1
43.		2
44.		3
45.		4
42.	Rule Weigth	1
43.		1
44.		1
45.		1
42.	Rule Connection	1
43.		1
44.		1
45.		1

Σύστημα 2° [A = f(I_{Am}, I_{Cs}, Position)]

```
a = readfis
```

```
a =
        name: 'sugeno 3 eisodoi'
        type: 'sugeno'
    andMethod: 'prod'
    orMethod: 'probor'
defuzzMethod: 'wtaver'
    impMethod: 'min'
    aggMethod: 'max'
        input: [1x3 struct]
        output: [1x1 struct]
        rule: [1x12 struct]
```

```
getfis(a)
    Name      = sugeno 3 eisodoi
    Type      = sugeno
    NumInputs = 3
    InLabels  =
        IAm
        ICs
        Position
    NumOutputs = 1
    OutLabels =
        Ash
    NumRules = 12
    AndMethod = prod
    OrMethod  = probor
    ImpMethod = min
    AggMethod = max
    DefuzzMethod = wtaver
```

```
showfis(a)
1. Name      sugeno 3 eisodoi
2. Type      sugeno
3. Inputs/Outputs [3 1]
4. NumInputMFs [2 2 3]
5. NumOutputMFs 12
6. NumRules     12
7. AndMethod    prod
8. OrMethod     probor
9. ImpMethod    min
10. AggMethod   max
11. DefuzzMethod wtaver
12. InLabels    IAm
13.             ICs
```

14.	Position
15. OutLabels	Ash
16. InRange	[100 800]
17.	[300 700]
18.	[1 3]
19. OutRange	[0 1]
20. InMFLabels	in1mf1
21.	in1mf2
22.	in2mf1
23.	in2mf2
24.	in3mf1
25.	in3mf2
26.	in3mf3
27. OutMFLabels	out1mf1
28.	out1mf2
29.	out1mf3
30.	out1mf4
31.	out1mf5
32.	out1mf6
33.	out1mf7
34.	out1mf8
35.	out1mf9
36.	out1mf10
37.	out1mf11
38.	out1mf12
39. InMFTypes	trimf
40.	trimf
41.	trimf
42.	trimf
43.	trimf
44.	trimf
45.	trimf
46. OutMFTypes	linear
47.	linear
48.	linear
49.	linear
50.	linear
51.	linear
52.	linear
53.	linear
54.	linear
55.	linear
56.	linear
57.	linear
58. InMFParams	[-180 106.5 795 0]
59.	[93.5 812 836 0]
60.	[140 300 699.5 0]
61.	[297 703.7 709 0]
62.	[1 1 2.003 0]
63.	[1.2 2 2.807 0]
64.	[2 3 3 0]

65.	OutMFParams	[0 0 0 0]
66.		[0 0 0 0.5]
67.		[0 0 0 1]
68.		[0 0 0 0]
69.		[0 0 0 0.125]
70.		[0 0 0 0.25]
71.		[0 0 0 0.375]
72.		[0 0 0 0.5]
73.		[0 0 0 0.625]
74.		[0 0 0 0.75]
75.		[0 0 0 0.875]
76.		[0 0 0 1]
77.	Rule Antecedent	[1 1 1]
78.		[1 1 2]
79.		[1 1 3]
80.		[1 2 1]
81.		[1 2 2]
82.		[1 2 3]
83.		[2 1 1]
84.		[2 1 2]
85.		[2 1 3]
86.		[2 2 1]
87.		[2 2 2]
88.		[2 2 3]
77.	Rule Consequent	1
78.		2
79.		3
80.		4
81.		5
82.		6
83.		7
84.		8
85.		9
86.		10
87.		11
88.		12
77.	Rule Weigth	1
78.		1
79.		1
80.		1
81.		1
82.		1
83.		1
84.		1
85.		1
86.		1
87.		1
88.		1
77.	Rule Connection	1
78.		1
79.		1

80.	1
81.	1
82.	1
83.	1
84.	1
85.	1
86.	1
87.	1
88.	1

Σύστημα 3° [A = f(Q, ICs)]

```
a = readfis
```

```
a =
        name: '2eisodoi, Q,ICs'
        type: 'sugeno'
    andMethod: 'prod'
    orMethod: 'probor'
defuzzMethod: 'wtaver'
    impMethod: 'min'
    aggMethod: 'max'
        input: [1x2 struct]
        output: [1x1 struct]
        rule: [1x4 struct]
```

```
getfis(a)
    Name          = 2eisodoi, Q,ICs
    Type          = sugeno
    NumInputs     = 2
    InLabels      =
        Q
        ICs
    NumOutputs    = 1
    OutLabels     =
        Ash
    NumRules      = 4
    AndMethod     = prod
    OrMethod      = probor
    ImpMethod     = min
    AggMethod     = max
    DefuzzMethod  = wtaver
```

```
showfis(a)
1.  Name          2eisodoi, Q,ICs
2.  Type          sugeno
3.  Inputs/Outputs [2 1]
4.  NumInputMFs   [2 2]
5.  NumOutputMFs  4
6.  NumRules      4
7.  AndMethod     prod
8.  OrMethod      probor
9.  ImpMethod     min
10. AggMethod     max
11. DefuzzMethod  wtaver
12. InLabels      Q
13.               ICs
14. OutLabels     Ash
```

15.	InRange	[1.5 3.5]
16.		[300 700]
17.	OutRange	[0 1]
18.	InMFLabels	in1mf1
19.		in1mf2
20.		in2mf1
21.		in2mf2
22.	OutMFLabels	out1mf1
23.		out1mf2
24.		out1mf3
25.		out1mf4
26.	InMFTypes	trimf
27.		trimf
28.		trimf
29.		trimf
30.	OutMFTypes	linear
31.		linear
32.		linear
33.		linear
34.	InMFParams	[1.5 1.503 3.5 0]
35.		[1.503 3.5 3.5 0]
36.		[301 302 699.5 0]
37.		[301 698 699 0]
38.	OutMFParams	[0 0 0 0]
39.		[0 0 0.5 0]
40.		[0 0 1 0]
41.		[0 0 0.5 0]
42.	Rule Antecedent	[1 1]
43.		[1 2]
44.		[2 1]
45.		[2 2]
42.	Rule Consequent	1
43.		2
44.		3
45.		4
42.	Rule Weigth	1
43.		1
44.		1
45.		1
42.	Rule Connection	1
43.		1
44.		1
45.		1

Σύστημα 4° [A = f (Q, Position)]

```
a = readfis
```

```
a =
```

```
        name: 'Sugeno gia Q,Position'
        type: 'sugeno'
    andMethod: 'prod'
    orMethod: 'probor'
defuzzMethod: 'wtaver'
    impMethod: 'min'
    aggMethod: 'max'
        input: [1x2 struct]
        output: [1x1 struct]
        rule: [1x6 struct]
```

```
getfis(a)
```

```
    Name      = Sugeno gia Q,Position
    Type       = sugeno
    NumInputs  = 2
    InLabels   =
        Q
        Position
    NumOutputs = 1
    OutLabels  =
        Ash
    NumRules   = 6
    AndMethod  = prod
    OrMethod   = probor
    ImpMethod  = min
    AggMethod  = max
    DefuzzMethod = wtaver
```

```
showfis(a)
```

```
1.  Name      Sugeno gia Q,Position
2.  Type       sugeno
3.  Inputs/Outputs [2 1]
4.  NumInputMFs [2 3]
5.  NumOutputMFs 6
6.  NumRules    6
7.  AndMethod   prod
8.  OrMethod    probor
9.  ImpMethod   min
10. AggMethod   max
11. DefuzzMethod wtaver
12. InLabels    Q
13.             Position
14. OutLabels   Ash
```

15.	InRange	[1.5 3.5]
16.		[1 3]
17.	OutRange	[0 1]
18.	InMFLabels	in1mf1
19.		in1mf2
20.		in2mf1
21.		in2mf2
22.		in2mf3
23.	OutMFLabels	out1mf1
24.		out1mf2
25.		out1mf3
26.		out1mf4
27.		out1mf5
28.		out1mf6
29.	InMFTypes	trimf
30.		trimf
31.		trapmf
32.		trapmf
33.		trapmf
34.	OutMFTypes	linear
35.		linear
36.		linear
37.		linear
38.		linear
39.		linear
40.	InMFParams	[1.5 1.5 3.5 0]
41.		[1.5 3.5 3.5 0]
42.		[1 1 1.595 1.6]
43.		[1.6 1.6 2.4 2.4]
44.		[2.4 2.4 2.997 3]
45.	OutMFParams	[0 0 0 0]
46.		[0 0 0.5 0]
47.		[0 0 1 0]
48.		[0 0 0 0]
49.		[0 0 0.5 0]
50.		[0 0 1 0]
51.	Rule Antecedent	[1 1]
52.		[1 2]
53.		[1 3]
54.		[2 1]
55.		[2 2]
56.		[2 3]
51.	Rule Consequent	1
52.		2
53.		3
54.		4
55.		5
56.		6
51.	Rule Weigth	1
52.		1
53.		1

54.	1
55.	1
56.	1
51. Rule Connection	1
52.	1
53.	1
54.	1
55.	1
56.	1