

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΥΦΥΟΥΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ
ΞΗΡΑΝΣΗ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την
απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

υπό

Ελευθέριου Ζ. Κυραλάκη

Χανιά
Μάρτιος 2006

© *Copyright υπό Ελευθέριου Ζ. Κυραλάκη*

Έτος: 2006

Η διατριβή του Ελευθέριου Ζ. Κυραλάκη, εγκρίνεται από τους Νικόλαο Τσουρβελούδη (επιβλέπων), Ηλία Κοσματόπουλο και Ιωάννη Νικολό.

1) Νικόλαος Τσουρβελούδης (επιβλέπων)

2) Ηλίας Κοσματόπουλος

3) Ιωάννης Νικολός

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με αφορμή την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα μου, Επίκουρο καθηγητή κ. Νίκο Τσουρβελούδη, για τις καθοδηγήσεις του, τις συμβουλές του και κυρίως για την εμπιστοσύνη που μου έχει δείξει όλο αυτόν τον καιρό που συνεργαζόμαστε.

Οφείλω ένα ευχαριστώ και στον λέκτορα κ. Ιωάννη Νικολό για τη βοήθεια που μου προσέφερε σε ότι του ζήτησα.

Ευχαριστώ επίσης τον κ. Ανδρέα Γεωργουσάκη, Γενικό Διευθυντή της Α.Β.Ε.Α., και τον κ. Βαγγέλη Σαριδάκη, ηλεκτρονικό, για την επικοινωνιακή συνεργασία που είχαμε.

Ευχαριστώ τους φίλους μου, Σάββα Πιπερίδη και Λευτέρη Δοϊτσίδα για τη βοήθεια και τη συμπαράσταση τους αλλά και για την άψογη συνεργασία που έχουμε έως τώρα.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, στους οποίους και αφιερώνω την εργασία αυτή, για την στήριξη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σύντομο Βιογραφικό.....	6
Περίληψη.....	7
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Περιγραφή του Προβλήματος.....	8
1.2 Συνεισφορά στην Επίλυση του Προβλήματος.....	9
1.3 Δομή της Εργασίας	9
2 Η ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ.....	10
2.1 Βασικά Χαρακτηριστικά της Ξήρανσης.....	10
2.1.1 Η Ξήρανση σε Περιστρεφόμενο Ξηραντήρα.....	12
2.2 Μεταφορά Θερμότητας στον Περιστρεφόμενο Ξηραντήρα.....	13
2.2.1 Μετάδοση Θερμότητας με Ακτινοβολία	14
2.2.2 Μετάδοση Θερμότητας από Θερμαινόμενη Επιφάνεια σε Συσσώρευση	14
2.2.3 Μετάδοση Θερμότητας Περιρρέουσας Σφαίρας	15
2.3 Περιγραφή της Διαδικασίας Παραγωγής Λαδιού από τον Ελαιοπυρήνα.....	16
3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ	18
3.1 Ασαφής Λογική [6]	18
3.2 Νευρωνικά Δίκτυα [7]	21
3.3 Νευρο-Ασαφή Συστήματα	24
3.3.1 Προσαρμοστικό Νεύρο-ασαφές Σύστημα – ANFIS [7]	24
3.3.1.1 Υβριδικός Αλγόριθμος Μάθησης	26
3.3.1.2 Ασαφή Συστήματα με Απλουστευμένους EAN-TOTE Ασαφείς Κανόνες.....	27
4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΑ	29
4.1 Βιβλιογραφία για Προβλήματα Ελέγχου Περιστρεφόμενων Ξηραντήρων ..	29
5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	32
5.1 Περιγραφή του Ξηραντηρίου.....	32
5.2 Καθορισμός των Μεταβλητών Ελέγχου του Συστήματος.....	34
5.3 Μοντελοποίηση του Φυσικού Συστήματος	35
5.3.1 Στατικό Μοντέλο Φυσικού Συστήματος.....	35
5.3.2 Δυναμικό Μοντέλο Φυσικού Συστήματος.....	37

5.4	Πειραματικές Διατάξεις στο Πραγματικό Σύστημα Ξήρανσης.....	40
5.5	Λογισμικό Απεικόνισης και Ελέγχου της Διαδικασίας Ξήρανσης του Ελαιοπυρήνα	43
6	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ	51
6.1	Δομή των Νευρο-Ασαφών Ελεγκτών που θα Χρησιμοποιηθούν στην Προσομοίωση του Συστήματος Ελέγχου [11], [12]	51
6.1.1	Διενέργεια Πειραμάτων	57
6.2	Δομή των Ασαφών Ελεγκτών Εκπαιδευμένων με Πραγματικά Δεδομένα ..	61
6.2.1	Διενέργεια Πειραμάτων με Πραγματικά Δεδομένα.....	64
7	ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	67
7.1	Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων από τη Χρήση Δεδομένων Προσομοίωσης	67
7.2	Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων από τη Χρήση Πραγματικών Δεδομένων.....	68
7.3	Μελλοντική Έρευνα	69
	Βιβλιογραφία.....	71

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ

Ο Κυραλάκης Ελευθέριος, του Ζαχαρία και της Ευαγγελίας, γεννήθηκε την 3^η Ιουνίου 1979 στο Τυμπάκι Ηρακλείου Κρήτης, όπου και μεγάλωσε. Αποφοίτησε από το Λύκειο Τυμπακίου το 1997. Το 1998 εισήχθη στη σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης και αποφοίτησε από αυτήν το 2003 με βαθμό 7,77. Τον Σεπτέμβριο του 2003 έγινε δεκτός στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης στον τομέα των Συστημάτων Παραγωγής. Με την εργασία αυτή ολοκληρώνει αυτόν τον κύκλο σπουδών του.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση συστήματος ελέγχου με χρήση μεθόδων υπολογιστικής νοημοσύνης. Ο έλεγχος εφαρμόζεται σε παραγωγική διαδικασία όπου πραγματοποιείται ξήρανση ελαιοπυρήνα. Κατά τη διαδικασία ο ελαιοπυρήνας εισέρχεται σε περιστρεφόμενο ξηραντήρα μέσα από τον οποίο διέρχονται θερμά αέρια. Τα αέρια σε συνδυασμό με την περιστροφή του ξηραντηρίου επιφέρουν την ξήρανση του.

Θα πραγματοποιηθούν δύο ομάδες πειραμάτων, μία με δεδομένα προσομοίωσης και μία με πραγματικά δεδομένα. Με τα δεδομένα προσομοίωσης θα κατασκευαστεί ένα νεύρο-ασαφές σύστημα ελέγχου και θα συγκριθούν οι επιδόσεις του με αυτές ενός απλού ασαφούς ελεγκτή. Τα πραγματικά δεδομένα αντλήθηκαν από την παραγωγική διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα και θα χρησιμοποιηθούν για να εκπαιδεύσουν ένα ασαφή ελεγκτή. Ο ελεγκτής αυτός θα συγκριθεί με τη 'χειροκίνητη' λειτουργία της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα. Τα πραγματικά δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν και σε ένα Προσαρμοστικό Νεύρο-ασαφές Σύστημα (ANFIS) που θα προσπαθήσει να προσεγγίσει το φυσικό σύστημα αντικαθιστώντας τις θεωρητικές εξισώσεις. Η συλλογή τους έγιναν με τη χρήση αισθητήρων που τοποθετήθηκαν σε καίρια σημεία της γραμμής παραγωγής. Οι αισθητήρες εξασφαλίζουν την παροχή ικανοποιητικών ενδείξεων για τη σχεδίαση και προσαρμογή του συστήματος ελέγχου. Η επιλογή των δεδομένων θα είναι τέτοια ώστε να αντιπροσωπεύουν όλες τις δυνατές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί η παραγωγική διαδικασία.

Η εργασία αυτή θα βασιστεί και θα εφαρμοστεί στην παραγωγική διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα της εταιρίας Α.Β.Ε.Α. στα Κεραμειά Χανίων.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ελαιόλαδο χωρίς καμία αμφιβολία είναι το βασικό εξαγωγίμο προϊόν της Ελλάδας. Αυτό που πιθανόν είναι άγνωστο σε πολλούς σήμερα είναι ότι λάδι δεν εξάγεται μόνο από τη σάρκα της ελιάς αλλά και από τον πυρήνα της (κουκούτσι). Το λάδι από τη σάρκα της ελιάς εξάγεται με τον παραδοσιακό τρόπο στα ελαιουργεία. Από την άλλη μεριά για να εξαχθεί το λάδι από τον ελαιοπυρήνα χρειάζεται να μεταφερθεί σε ειδικές εγκαταστάσεις όπου θα του γίνει περαιτέρω επεξεργασία. Οι εγκαταστάσεις αυτές ονομάζονται πυρηνελαιουργεία και ως βασική μονάδα τους έχουν το ξηραντήριο. Σε αυτό ο ελαιοπυρήνας ξηραίνεται μέχρι να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα υγρασίας (7-8%). Στη συνέχεια ο ξηραμένος ελαιοπυρήνας οδηγείται στην επόμενη φάση παραγωγής τελικών προϊόντων, δηλαδή στην φάση εμπλουτισμού του αποξηραμένου ελαιοπυρήνα με βενζόλιο για την παραγωγή λαδιού όλων των τύπων και ποιοτήτων.

Αυτή η εργασία ασχολείται αποκλειστικά με το ξηραντήριο του πυρηνελαιουργείου. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται σε αυτό είναι η περιστροφική ξήρανση, που είναι χωρίς αμφιβολία μια από τις παλαιότερες και πιο κοινές διαδικασίες στις βιομηχανίες που εφαρμόζουν την μέθοδο της ξήρανσης. Οι περιστροφικοί ξηραντήρες δεν είναι ούτε αξιόπιστοι ούτε εύκολοι στη λειτουργία τους, καθώς επίσης δεν είναι και φιλικόι προς το περιβάλλον. Για αυτό αποτελούσε και αποτελεί μια πρόκληση ο ορθός έλεγχος της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα.

1.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Η περιστροφική ξήρανση αποτελεί μία από τις πλέον πολύπλοκες διαδικασίες εξαιτίας των εξαιρετικά ευμετάβλητων συνθηκών που επικρατούν εντός του περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Οι γνώσεις για το τι συμβαίνει κάθε χρονική στιγμή εντός του κυλίνδρου είναι μηδαμινές. Ακόμη και σήμερα οι περιστροφικοί ξηραντήρες ελέγχονται χειροκίνητα, βασιζόμενοι στην εμπειρία του χειριστή. Αυτό έχει ως συνέπεια η διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα να πραγματοποιείται με μη αξιόπιστο τρόπο. Ο χειριστής βασιζόμενος στην εμπειρία του κάνει τις αναγκαίες ρυθμίσεις προκειμένου να εξελιχθεί η παραγωγική διαδικασία ομαλά. Οι παρεμβάσεις αυτές βασίζονται ολοκληρωτικά στην κρίση και στην εμπειρία του με συνέπεια αυτές να μην είναι πάντα οι πλέον κατάλληλες. Οι μη κατάλληλες παρεμβάσεις μπορεί να εγκυμονούν σοβαρούς κινδύνους δεδομένου ότι σε περίπτωση που η θερμοκρασία ανέβει σε πολύ υψηλά επίπεδα υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης του ξηραντηρίου. Πρέπει να ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας υπάρχει κίνδυνος οι εκπομπές βλαβερών ουσιών στην ατμόσφαιρα να αυξηθούν σημαντικά.

1.2 Συνεισφορά στην Επίλυση του Προβλήματος

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση συστήματος ευφυούς ελέγχου της παραγωγικής διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα. Χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα σε συνδυασμό με ασαφή λογική θα κατασκευαστεί ένα σύστημα ελέγχου που θα βασίζεται σε δεδομένα που έχουν εξαχθεί από τη διαδικασία. Έτσι θα επιτευχθεί ο βέλτιστος έλεγχος που θα έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη ποιότητα λαδιού. Η βέλτιστη ξήρανση σημαίνει και βέλτιστη ποιότητα εξερχόμενου από τον ελαιοπυρήνα λαδιού αφού η εξάρτηση που υπάρχει είναι άμεση. Πέρα από την ποιότητα θα βελτιωθεί και η παραγωγικότητα μιας και η τροφοδοσία του ελαιοπυρήνα θα ρυθμίζεται με βάση την υγρασία του εισερχόμενου αλλά και του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα. Τα οφέλη θα είναι σημαντικά και για το περιβάλλον αφού η βελτιστοποίηση της διαδικασίας θα έχει ως συνέπεια το περιορισμό της θερμοκρασίας των καυσαερίων που ελευθερώνονται στο περιβάλλον. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι θα εξαλειφθεί ο κίνδυνος πυρκαγιάς του ξηραντηρίου αφού όλες οι παράμετροι θα ελέγχονται κάθε στιγμή.

1.3 Δομή της Εργασίας

Η εργασία είναι δομημένη με τον ακόλουθο τρόπο.

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφεται η διαδικασία της ξήρανσης, οι τρόποι που μεταδίδεται η θερμότητα μέσα σε ένα περιστρεφόμενο ξηραντήρα και ολόκληρη η διαδικασία παραγωγής λαδιού από τον ελαιοπυρήνα.

Το κεφάλαιο 3 αναφέρεται στα μεθοδολογικά εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία. Αναφέρεται στην ασαφή λογική, στα νευρωνικά δίκτυα αλλά και στο συνδυασμό αυτών των δύο, τα νεύρο-ασαφή συστήματα.

Στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά στον έλεγχο περιστρεφόμενων ξηραντήρων.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η δομή του υπό μελέτη ξηραντηρίου. Αναλύονται οι μεταβλητές ελέγχου και μοντελοποιείται το φυσικό σύστημα της διαδικασίας ξήρανσης. Αναφέρονται επίσης οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στο πραγματικό σύστημα ξήρανσης και το λογισμικό ελέγχου και απεικόνισης που χρησιμοποιήθηκε.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται ένας διαχωρισμός μεταξύ των συστημάτων ελέγχου που δημιουργήθηκαν με δεδομένα προσομοίωσης και με πραγματικά δεδομένα. Διάφορα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και με τα δύο παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό.

Στο κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τους πειραματισμούς που πραγματοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 6 αλλά και η μελλοντική έρευνα που δύναται να πραγματοποιηθεί.

2 Η ΞΗΡΑΝΣΗ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ

2.1 Βασικά Χαρακτηριστικά της Ξήρανσης

Η διαδικασία της ξήρανσης αποτελεί μια βιομηχανική λειτουργία με μεγάλο ενδιαφέρον εξαιτίας της ευρείας εφαρμογής της στη βιομηχανία τροφίμων, στη γεωργία και στη μετάλλευση. Θεωρείται μία από τις πλέον απαιτητικές λειτουργίες από ενεργειακής απόψεως αλλά και μία από τις λιγότερο φιλικές στο περιβάλλον. Όλα αυτά σε μια εποχή όπου απαιτείται οικονομία στην ενέργεια αλλά και η χρήση ήπιων βιομηχανικών μεθόδων και λειτουργιών απέναντι στο περιβάλλον. Λύση σε αυτά τα προβλήματα μπορεί να δώσει η ανάπτυξη μοντέλων και συστημάτων ελέγχου της διαδικασίας ξήρανσης βελτιστοποιώντας τη λειτουργία της.

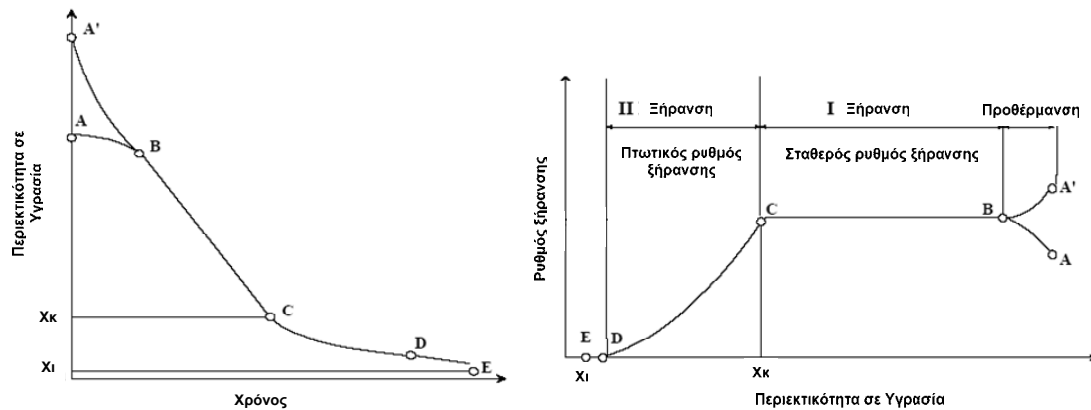
Κατά τη ξήρανση κάποιου στερεού λαμβάνουν χώρα δύο διαδικασίες που πραγματοποιούνται ταυτόχρονα [1]:

- Η θερμότητα μεταφέρεται στο στερεό από το μέσο που το περιβάλλει, συνήθως αυτό είναι αέρας.
- Η υγρασία μεταφέρεται εντός του στερεού, υπό μορφή υγρού και από την επιφάνεια του υπό μορφή ατμού.

Αν και η αφαίρεση υγρασίας με εξάτμιση από την επιφάνεια του στερεού προς το περιβάλλον είναι απαραίτητη για τη διαδικασία ξήρανσης, η γνώση για τα φαινόμενα ξήρανσης που πραγματοποιούνται εντός του στερεού βοηθούν στην κατανόηση και στο σχεδιασμό της διαδικασίας. Κατ' επέκταση δύναται να βελτιστοποιηθούν σημαντικοί παράγοντες ενός ξηραντηρίου καθώς και οι συνθήκες λειτουργίας του. Πολλές εργασίες έχουν εκπονηθεί με στόχο τη θεωρητική μοντελοποίηση της διαδικασίας ξήρανσης, καθώς και πολλοί μηχανισμοί ξήρανσης έχουν αναπτυχθεί για ποικιλία υλικών και συνθηκών ξήρανσης. Η βάση για αυτούς τους μηχανισμούς ξήρανσης είναι το γεγονός ότι η υγρασία μπορεί να μεταφερθεί εντός του υλικού είτε σε υγρή είτε σε αέρια φάση.

Παρόλο το μεγάλο αριθμό θεωρητικών μοντέλων που έχουν προταθεί για να περιγράψουν τα φαινόμενα ξήρανσης, η εφαρμογή τους σε πραγματικά προβλήματα είναι πολύ φτωχή. Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερη πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τα φαινόμενα αυτά αλλά και στην έλλειψη πειραματικής έρευνας που θα μπορούσε να φανερώσει τη συμπεριφορά τους σε βιομηχανικούς ξηραντήρες. Ακόμα και σήμερα το χάσμα που υπάρχει μεταξύ θεωρίας και πράξης είναι αρκετά μεγάλο στον τομέα αυτό.

Η πολυπλοκότητα των θεωρητικών μοντέλων για τη διαδικασία ξήρανσης έχει ως αποτέλεσμα οι περισσότεροι βιομηχανικοί ξηραντήρες να βασίζονται στην εξέταση εξωτερικών συνθηκών ξήρανσης. Σχεδιάζονται καμπύλες που αναπαριστούν την υγρασία στα υλικά ή το ρυθμό ξήρανσης σε συνάρτηση με το χρόνο. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται δύο γραφήματα που αναπαριστούν δύο τυπικές καμπύλες ξήρανσης.



Εικόνα 1: Η διακύμανση της υγρασίας του προς ξήρανση υλικού σε συνάρτηση με το χρόνο και ο ρυθμός ξήρανσης συναρτήσει της περιεκτικότητας σε υγρασία [2].

Στο πρώτο γράφημα αναπαριστάται η περιεκτικότητα του υλικού σε υγρασία σε συνάρτηση με το χρόνο. Στο δεύτερο γράφημα παρουσιάζεται ο ρυθμός ξήρανσης του υλικού συναρτήσει της περιεκτικότητας του σε υγρασία. Σύμφωνα με αυτά τα γραφήματα η διαδικασία ξήρανσης δύναται να χωριστεί σε τρία τμήματα: α) την προθέρμανση, β) μια περίοδο κατά την οποία ο ρυθμός ξήρανσης παραμένει σταθερός και γ) μια περίοδος όπου ο ρυθμός ξήρανσης είναι πτωτικός. Στο τμήμα A-B της καμπύλης (περίοδος προθέρμανσης) παρουσιάζεται μια μείωση της υγρασίας και μια αύξηση του ρυθμού ξήρανσης, όπως φαίνεται από το πρώτο και δεύτερο διάγραμμα αντίστοιχα. Κατά την περίοδο αυτή η θερμοκρασία του υγρού υλικού είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία ισορροπίας, με συνέπεια ο ρυθμός ξήρανσης να αυξάνεται μέχρι το υλικό να φτάσει την τιμή της θερμοκρασίας που ανταποκρίνεται στην γραμμή B-C. Για την ίδια περίοδο υφίσταται και μια δεύτερη καμπύλη A'-B που καλύπτει την περίπτωση η θερμοκρασία του υγρού υλικού να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία ισορροπίας. Όταν συμβαίνει αυτό ο ρυθμός ξήρανσης ελαττώνεται συναρτήσει της περιεκτικότητας του υλικού σε υγρασία. Συνήθως η αρχική περίοδος ξήρανσης που περιλαμβάνει την προθέρμανση είναι πολύ μικρή σε διάρκεια για αυτό και θεωρείται αμελητέα.

Κατά τη δεύτερη περίοδο, το τμήμα B-C της καμπύλης, παρατηρείται ότι η περιεκτικότητα σε υγρασία του υλικού μειώνεται γραμμικά σε συνάρτηση με το χρόνο. Η γραμμική αυτή μείωση της υγρασίας στο χρόνο αντιπροσωπεύεται από το σταθερό ρυθμό ξήρανσης που παρατηρείται στο σχετικό γράφημα. Η τιμή που παίρνει η υγρασία στο υλικό όταν η περιεκτικότητα παύει να μειώνεται γραμμικά και ξεκινάει η καμπύλη της τρίτης περιόδου C-D, ονομάζεται κρίσιμη x_k . Τότε ο ρυθμός ξήρανσης δεν είναι πλέον σταθερός αλλά μειώνεται. Η υγρασία θα μειώνεται ασυμπτωτικά στη μονάδα του χρόνου μέχρι να πάρει την τιμή ισορροπίας x_l .

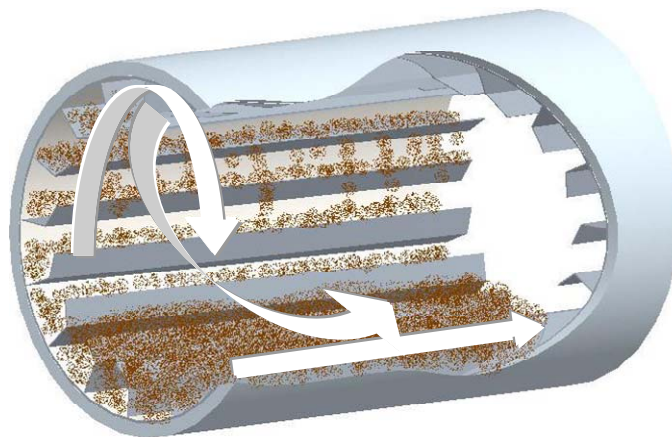
Η διαδικασία της ξήρανσης επηρεάζεται έντονα από διαφόρους εξωτερικούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία και η ταχύτητα των αερίων ξήρανσης, αλλά και από εσωτερικούς μηχανισμούς ξήρανσης του στερεού. Κατά την περίοδο ξήρανσης όπου ο ρυθμός είναι σταθερός η διαδικασία μπορεί να ελεγχθεί από τις εξωτερικές

συνθήκες, κάτι που δε συμβαίνει κατά την πτωτική περίοδο του ρυθμού όπου οι εσωτερικοί μηχανισμοί του υλικού διαδραματίζουν κυρίαρχο ρόλο.

2.1.1 Η Ξήρανση σε Περιστρεφόμενο Ξηραντήρα

Η ξήρανση σε περιστρεφόμενο κύλινδρο αποτελεί μια από τις παλαιότερες και πλέον διαδεδομένες μεθόδους ξήρανσης που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Μεγάλες ποσότητες μη εύθραυστου και ευαίσθητου σε υψηλές θερμοκρασίες υλικού, δύναται να ξηραθούν μέσα στους περιστρεφόμενους ξηραντήρες. Είναι κατασκευασμένοι από φύλα ατσαλιού, το σχήμα τους είναι κυλινδρικό και έχουν μια μικρή κλίση προς την κατεύθυνση που εξέρχεται το ξηραμένο υλικό. Η διάμετρος τους κυμαίνεται από 0,3 έως 5 μέτρα ενώ το μήκος τους από 5 έως 90 μέτρα. Οι περιστρεφόμενοι ξηραντήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη φορά κίνησης των αερίων ξήρανσης σε σχέση με τη φορά κίνησης του προς ξήρανση υλικού. Έτσι υπάρχουν δύο ειδών ξηραντήρες, οι άμεσοι και οι έμμεσοι όπου η φορά κίνησης των αερίων ξήρανσης είναι ίδια ή αντίθετη με τη φορά κίνησης του υλικού, αντίστοιχα.

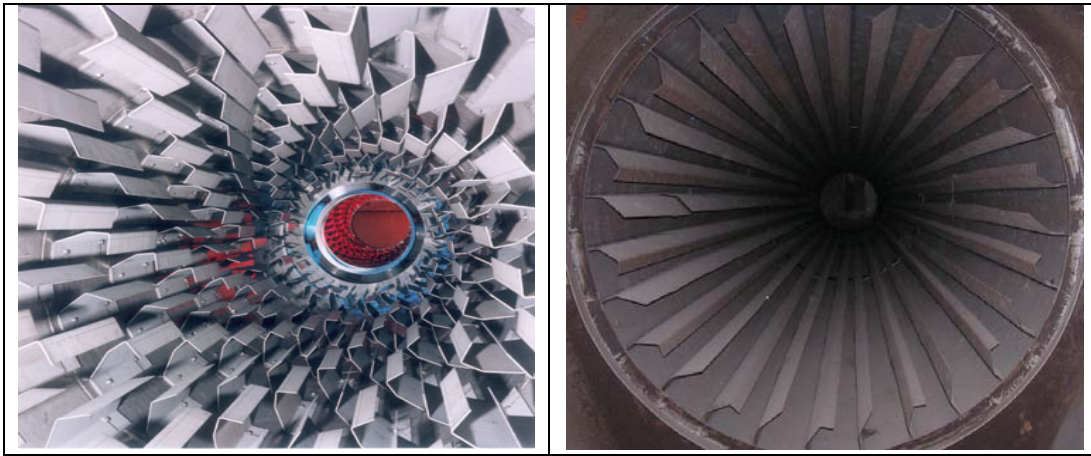
Στο εσωτερικό των περιστρεφόμενων ξηραντήρων βρίσκονται φτερά που ως σκοπό έχουν την ανάμιξη του προς ξήρανση υλικού έτσι ώστε να έρχεται σε επαφή με τα αέρια καύσης και να υπάρχει ομοιογένεια στη ξήρανση. Το σχήμα τους διαφέρει από ξηραντήρα σε ξηραντήρα και μπορεί να είτε σπειροειδή είτε ευθύγραμμα κατά μήκος του κυλίνδρου, Εικόνα 3. Πέρα από το σχήμα τους διαφορές υπάρχουν και στον αριθμό αλλά και στις διαστάσεις τους, παράγοντες που όλοι μαζί δύναται να επηρεάσουν ποικιλοτρόπως την απόδοση ενός περιστρεφόμενου ξηραντήρα. Τα φτερά εκτός από τη ανάμιξη που προκαλούν στο υλικό, χρησιμεύουν και για τη μεταφορά του εντός του κυλίνδρου. Η μεταφορά πραγματοποιείται με τρεις τρόπους, Εικόνα 2, α) κατά την ανύψωση του από τα φτερά, β) κατά την πτώση του από αυτά καθώς ο κύλινδρος περιστρέφεται και το υλικό βρίσκεται στον αέρα και γ) γλιστρώντας στο κατώτερο σημείο του ξηραντήρα προς την έξοδο.



Εικόνα 2: Τρόποι μεταφοράς του προς ξήρανση υλικού εντός περιστρεφόμενου κυλίνδρου με πτερύγια.

Για να μοντελοποιηθεί ένας περιστρεφόμενος ξηραντήρας χρειάζεται να ληφθούν υπόψη κάποιοι παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα τη διαδικασία ξήρανσης. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν το προς ξήρανση υλικό, την κατασκευή του κυλίνδρου αλλά και τις συνθήκες λειτουργίας του ξηραντηρίου. Αναλυτικά αυτοί είναι [3]:

- Οι φυσικές ιδιότητες του υλικού όπως το μέγεθος του, το σχήμα του, η πυκνότητα και η περιεκτικότητα του σε υγρασία.
- Η διάμετρος και το μήκος του κυλίνδρου καθώς και ο αριθμός των φτερών και η σχεδίαση τους.
- Η θερμοκρασία του υλικού και η τροφοδοσία του στο ξηραντήρα. Η ροή και η θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης. Η κλίση και η ταχύτητα περιστροφής του κυλίνδρου.



Εικόνα 3: Δύο διαφορετικές διαμορφώσεις των πτερυγίων που βρίσκονται εντός περιστρεφόμενου ξηραντήρα.

Το σύνολο των παραγόντων έχει επίδραση στην μεταφορά θερμότητας μέσα στο κύλινδρο και όλοι εκτός της θερμοκρασίας του υλικού και των αερίων, επιδρούν στη δυνατότητα φόρτωσης του κυλίνδρου και στο χρόνο παραμονής του υλικού εντός του. Η ποσότητα του υλικού που θα είναι φορτωμένος ο περιστρεφόμενος κύλινδρος διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο στη λειτουργία του ξηραντήρα και κατ' επέκταση στη διαδικασία ξήρανσης. Ένα μικρό φορτίο θα προκαλέσει μείωση στην παραγωγικότητα, ενώ ένα μεγάλο φορτίο θα δυσχεράνει τη διαδικασία μιας και τα φτερά δε θα δύνανται να πραγματοποιήσουν τέλεια ανάμιξη του υλικού. Η μη τέλεια ανάμιξη θα προκαλέσει ανομοιομορφία στη ξήρανση και η επιθυμητή περιεκτικότητα του υλικού σε υγρασία δε θα επιτευχθεί. Συνήθως το φορτίο ενός περιστρεφόμενου ξηραντήρα καταλαμβάνει σε όγκο το 3 έως 15% του συνολικού όγκου του κυλίνδρου για να υπάρχει μια ικανοποιητική λειτουργία [4].

2.2 Μεταφορά Θερμότητας στον Περιστρεφόμενο Ξηραντήρα

Στους βιομηχανικούς ξηραντήρες η μεταφορά θερμότητας δύναται να πραγματοποιηθεί με τρεις μεθόδους: αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Σε κάθε

είδους ξηραντήρα υπάρχει μια βασική μέθοδος μεταφοράς θερμότητας χωρίς να αποκλείεται η ταυτόχρονη ύπαρξη και των άλλων δύο. Στον περιστρεφόμενο ξηραντήρα η κυρίαρχη μέθοδος μεταφοράς θερμότητας είναι η συναγωγή όπου έχουμε άμεση επαφή των αερίων ξήρανσης με το προς ξήρανση υλικό, ενώ ταυτόχρονα συμβάλλουν και οι άλλες δύο μέθοδοι σε μικρότερο ποσοστό.

2.2.1 Μετάδοση Θερμότητας με Ακτινοβολία

Κάθε σώμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία διαφορετική από 0 K εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία δημιουργείται με αλλαγές στην ενεργειακή κατάσταση των ηλεκτρονίων των ατόμων του σώματος. Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την ύπαρξη ύλης αντίθετα η μετάδοση πραγματοποιείται αποδοτικότερα σε κενό.

Η ακτινοβολία που εξέρχεται από την επιφάνεια ενός σώματος παράγεται στο εσωτερικό του και ο ρυθμός που η ενέργεια εξέρχεται από μοναδιαίο εμβαδόν της επιφάνειας καλείται πυκνότητα εκπεμπόμενης ακτινοβολίας E . Η τιμή της δίνεται από τη σχέση (1),

$$E_b = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (1)$$

όπου T_s η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας, σ η σταθερά των Stefan-Boltzman και ε η ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας, με τιμές από 0 έως 1 ανάλογα το υλικό και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας [4], [5].

2.2.2 Μετάδοση Θερμότητας από Θερμαινόμενη Επιφάνεια σε Συσσώρευση

Η μετάδοση θερμότητας από θερμαινόμενη επιφάνεια σε συσσώρευση πραγματοποιείται με το μηχανισμό της αγωγής θερμότητας. Η αγωγή θερμότητας αναφέρεται σε μακροσκοπικώς ακίνητα σώματα και συνδέεται με τη συναλλαγή ενέργειας σε μοριακό επίπεδο. Πρόκειται για μετάδοση ενέργειας από σώματα υψηλότερης σε σώματα χαμηλότερης ενέργειας.

Έστω ότι ένα αέριο μακροσκοπικά βρίσκεται σε ακινησία και ότι βρίσκεται μεταξύ δύο επιφανειών διαφορετικής θερμοκρασίας. Η υψηλότερη θερμοκρασία σε κάποιο σημείο του αερίου συνδέεται με υψηλότερη ενέργεια των σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά διαθέτοντας υψηλότερη ενέργεια τη μεταδίδουν στα γειτονικά τους σωματίδια τα οποία είναι χαμηλότερης ενέργειας μέσω των συγκρούσεων. Έτσι στην περίπτωση θερμοκρασιακής κλίσης στο εσωτερικό του αερίου υπάρχει μετάδοση ενέργειας από την περιοχή υψηλότερης θερμοκρασίας προς την περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η μετάδοση αυτή καλείται διάχυση ενέργειας.

Η μετάδοση θερμότητας με αγωγή περιγράφεται με το νόμο του Fourier. Έτσι αν θεωρηθεί επίπεδο σώμα ορισμένου πάχους στη μια πλευρά του οποίου επικρατεί θερμοκρασία T_1 και στην άλλη T_2 μικρότερη της T_1 , τότε ο ρυθμός μετάδοσης

θερμότητας κατά τη διεύθυνση x κάθετα στο επίπεδο του σώματος ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση,

$$\dot{q}_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Το μέγεθος αυτό ονομάζεται πυκνότητα ροής θερμότητας και μετριέται σε W/m^2 . Εκφράζει τη θερμική ενέργεια που περνά από μοναδιαία επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, εξαιτίας της θερμοκρασιακής διαφοράς. Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω σχέση οφείλεται στο γεγονός ότι η θερμότητα μεταδίδεται με φορά από μεγαλύτερες προς μικρότερες θερμοκρασίες. Ο συντελεστής k της σχέσης (2) ονομάζεται συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας και μετράται σε W/mK . Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από το υλικό που εφαρμόζεται η θερμοκρασιακή κλίση και μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία [4], [5].

2.2.3 Μετάδοση Θερμότητας Περιρρέουσας Σφαίρας

Η μετάδοση θερμότητας περιρρέουσας σφαίρας αναφέρεται στον μηχανισμό μετάδοσης θερμότητας με το μηχανισμό της συναγωγής. Η κύρια περιοχή εφαρμογής της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή είναι η μετάδοση από στερεή επιφάνεια προς κινούμενο ρευστό σε επαφή με την επιφάνεια ή το αντίθετο. Στην περίπτωση αυτή συνυπάρχουν δύο μηχανισμοί μετάδοσης ενέργειας. Ο πρώτος είναι η διάχυση ενέργειας και ο δεύτερος συνδέεται με τη μακροσκοπική κίνηση του ρευστού. Κατά την μακροσκοπική κίνηση του ρευστού τα σωματίδια του ρευστού μεταφέρουν μαζί με τη μάζα τους και τη θερμική ενέργεια που σχετίζεται με την τυχαία μεταφορική κίνηση τους, την εσωτερική περιστροφή τους και την ταλάντωση τους. Έτσι η συνολική μετάδοση θερμικής ενέργειας είναι το άθροισμα της μετάδοσης λόγω διάχυσης και της μετάδοσης λόγω της μεταφοράς της θερμικής ενέργειας των σωματιδίων μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ρευστού.

Στην περιοχή επαφής του ρευστού με τη στερεή επιφάνεια δημιουργείται το λεγόμενο οριακό στρώμα ταχύτητας. Εκεί οι ταχύτητες της ροής είναι πολύ μικρές με συνέπεια ο μηχανισμός της διάχυσης να είναι αυτός που επικρατεί. Μακριά από το στρώμα αυτό, όπου έχουν αυξηθεί οι ταχύτητες της ροής, επικρατεί η μετάδοση θερμότητας με μεταφορά. Ειδικά πάνω στο τοίχωμα του στερεού όπου η σχετική ταχύτητα ροής είναι μηδέν υφίσταται μόνο μετάδοση θερμότητας με διάχυση.

Η ροή που προκαλεί τη συναγωγή θερμότητας μπορεί να οφείλεται σε εξωτερικούς παράγοντες ή στην ίδια τη μετάδοση θερμότητας. Όταν οφείλεται στην ίδια τη μετάδοση θερμότητας έχουμε συναγωγή με φυσική κυκλοφορία εξαιτίας της μείωσης της πυκνότητας του αέρα που προκαλείται από τη θέρμανση του. Στην περίπτωση όπου η ροή του ρευστού συντηρείται από εξωτερικό αίτιο τότε η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με συναγωγή με εξαναγκασμένη κυκλοφορία. Μαζί με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία συνυπάρχει και φυσική κυκλοφορία εξαιτίας των αντωτικών δυνάμεων από τη μεταβολή των πυκνοτήτων με το πρώτο φαινόμενο να είναι πιο έντονο στις περισσότερες περιπτώσεις.

Η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή αναφέρεται στην εσωτερική θερμική ενέργεια του ρευστού που συνδέεται με τη θερμική του κίνηση. Αυτό συμβαίνει στις περισσότερες των περιπτώσεων, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις όπου η μετάδοση θερμότητας συνοδεύεται από αλλαγή φάσης με συνέπεια να περιλαμβάνεται σε αυτήν και η λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης. Στην περίπτωση αυτή η μετάδοση θερμότητας με συναγωγή είναι πολύ πιο έντονη από την απλή περίπτωση συναγωγής.

Η πυκνότητα ροής θερμότητας προκύπτει από το νόμο του Newton για τη συναγωγή, και είναι

$$\dot{q}_x'' = h(T_s - T_o), \quad (3)$$

όπου h ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή σε $W/(m^2 K)$. Η τιμή του εξαρτάται από το είδος της ροής, τη μορφή της επιφάνειας και τα θερμοδυναμικά – ρευστομηχανικά χαρακτηριστικά του ρευστού. T_s και T_o η θερμοκρασία του στερεού και του ρευστού αντίστοιχα [4], [5].

2.3 Περιγραφή της Διαδικασίας Παραγωγής Λαδιού από τον Ελαιοπυρήνα

Ο ελαιοπυρήνας συλλέγεται από τα ελαιουργεία μετά την επεξεργασία της ελιάς και την αφαίρεση του λαδιού από αυτήν. Το ποσοστό της υγρασίας του ελαιοπυρήνα σε αυτή τη φάση ανέρχεται στο 70 με 80%, ποσοστό πολύ υψηλό για περαιτέρω επεξεργασία του. Η υγρασία του ελαιοπυρήνα πρέπει να βρίσκεται από το 7 έως το 8% ώστε να είναι δυνατή η αφαίρεση του λαδιού που περιέχει.

Σε πρώτο στάδιο ο ελαιοπυρήνας προ ξηραίνεται σε περιστρεφόμενους ξηραντήρες μικρής κλίμακας, της τάξης των 10 μέτρων, για να ελαττωθεί η υγρασία του. Μετά την πρώτη αυτή επεξεργασία το ποσοστό υγρασίας στον ελαιοπυρήνα κυμαίνεται από 48 έως 54%. Στη συνέχεια ακολουθεί η κυρίως ξήρανση η οποία θα είναι αυτή που θα φέρει την υγρασία του ελαιοπυρήνα στην επιθυμητή τιμή. Το στάδιο αυτό της επεξεργασίας είναι και το βασικότερο αφού η ποιότητα αλλά και η ποσότητα του λαδιού που θα προκύψει από τον ελαιοπυρήνα εξαρτάται από το κατά πόσο έχει ξηραθεί σωστά. Εάν το ποσοστό υγρασίας του υπερβεί κατά πολύ το 8% τότε η ποσότητα του εξαγόμενου λαδιού είναι μειωμένη και η ποιότητα του από κακή έως και επικίνδυνη λόγω της κατακράτησης χημικών ουσιών. Σε αντίθετη περίπτωση που το ποσοστό υγρασίας του ελαιοπυρήνα πέσει σε χαμηλά επίπεδα τότε υπάρχει άμεσος κίνδυνος για εκδήλωση πυρκαγιάς στο ξηραντήριο.

Η κύρια ξήρανση του ελαιοπυρήνα λαμβάνει χώρα σε περιστρεφόμενους ξηραντήρες μεγάλης κλίμακας με μήκος που φθάνει τα 22 μέτρα. Η παραμονή του πυρήνα στο ξηραντήριο κυμαίνεται από 10 έως 15 λεπτά και εξαρτάται από την τροφοδοσία του πυρήνα και την ταχύτητα περιστροφής και την κλίση του ξηραντήρα. Η θερμοκρασία στην είσοδο του περιστρεφόμενου ξηραντήρα ανέρχεται στους 770 °K ενώ στην έξοδο στους 350 °K. Όλες οι παράμετροι στη βασική ξήρανση του

ελαιοπυρήνα ρυθμίζονται με σκοπό το ποσοστό υγρασίας του να βρίσκεται πολύ κοντά στην περιοχή 7 με 8%.

Ο ξηραμένος πλέον πυρήνας οδηγείται στο επόμενο στάδιο της κατεργασίας του που είναι η εκχύλιση. Σε αυτό το στάδιο ο ελαιοπυρήνας αναμειγνύεται με βενζόλιο υπό πίεση κι έτσι εξάγεται το λάδι. Αυτό που μένει, το πυρηνόξυλο, χρησιμοποιείται ως καύσιμη ύλη. Το μείγμα λαδιού και βενζολίου διαχωρίζεται και το βενζόλιο επαναχρησιμοποιείται ενώ το λάδι οδηγείται για εξουδετέρωση, αποχρωματισμό και απόσμιση.

Κατά την εξουδετέρωση απομακρύνονται διάφορες ουσίες από το προς επεξεργασία λάδι. Οι ουσίες αυτές είναι φωσφολιπίδια, πρωτεΐνες και άλλες ουσίες που είναι διαλυτές στο λάδι στην άνω μορφή τους αλλά αδιάλυτες στην ένωσή τους. Αυτή τους η ιδιαιτερότητα βοηθάει στην απομάκρυνση τους. Μέρος αυτών των ουσιών που παραμένουν στο λάδι απομακρύνονται με τη χρήση οξέος.

Στη διαδικασία του αποχρωματισμού γίνεται προσθήκη γαίας στο λάδι για να απομακρυνθούν φωσφολιπίδια, μέταλλα, σαπουνία και οξειδωτικά προϊόντα. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται σε τρία στάδια. Αρχικά αναμειγνύεται το λάδι με την αποχρωστική γαία. Στη συνέχεια το λάδι θερμαίνεται μέχρι τους 120 °C με τη βοήθεια ατμού σε συνθήκες κενού. Ταυτόχρονα το μίγμα λαδιού με γαία αναμειγνύεται και η ανάμιξη αυτή διαρκεί συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που φτάνει τα 20 λεπτά. Τέλος το μίγμα λαδιού και αποχρωστικής γαίας διέρχεται, για περίπου 20 λεπτά μέσα από ειδικό φίλτρο που συγκρατεί τη γαία η οποία διαχωρίζεται από το λάδι.

Κατά τη διαδικασία της απόσμισης απομακρύνονται οι οσμές από το λάδι, λιπαρά οξέα και διάφορα άλλα ανεπιθύμητα συστατικά έτσι ώστε να προκύψει ένα καθαρό και άοσμο λάδι. Το αποχρωματισμένο λάδι εισέρχεται σε δύο δοχεία υπό συνθήκες κενού όπου θερμαίνεται μέχρι τους 200 °C και ταυτόχρονα αναδεύεται. Για την ανάδευση του λαδιού διοχετεύεται υπέρθερμος ατμός από τον πυθμένα του δοχείου. Όλα τα ανεπιθύμητα πτητικά συστατικά απομακρύνονται μέσω της γραμμής αναρρόφησης που βρίσκεται στο πάνω μέρος των δοχείων. Μετά το πέρας της διαδικασίας απόσμισης το εξευγενισμένο πλέον λάδι, αφού ψυχθεί, συλλέγεται σε δεξαμενές για τη διάθεση του.

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

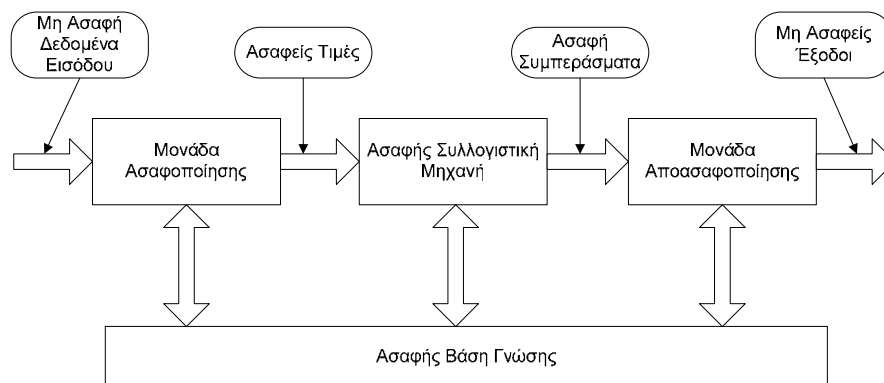
3.1 Ασαφής Λογική [6]

Η ασαφής λογική είναι μια γενίκευση της δυαδικής λογικής (Boolean logic). Είναι βασισμένη στη θεωρία του ασαφούς συνόλου και παρέχει ένα ακριβές πλαίσιο για την αντιπροσώπευση των μη ξεκάθαρων καταστάσεων. Η βασική δομή της ασαφούς λογικής, βασισμένη σε κανόνες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς διαφορετικούς τύπους εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένου του ελέγχου διεργασιών και της λήψης αποφάσεων.

Τα ασαφή συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των ευφύων συστημάτων και η γενική δομή τους περιλαμβάνει τέσσερις μονάδες (Εικόνα 4). Η πρώτη μονάδα είναι η βάση των ασαφών κανόνων ή αλλιώς η ασαφής βάση γνώσης. Περιέχει εκτός από τους ασαφείς κανόνες και ένα τμήμα βάσης αριθμητικών δεδομένων που απαιτούνται για τη διαδικασία εξαγωγής των αποτελεσμάτων. Οι κανόνες της βάσης γνώσης λαμβάνονται συνήθως από τους εμπειρογνώμονες και πολλές φορές από διαδικασίες προσομοίωσης και έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$R^I: \text{ΕΑΝ } x_I \text{ είναι } A_I^I \text{ ΚΑΙ...ΚΑΙ } x_n \text{ είναι } A_n^I \text{ ΤΟΤΕ } y \text{ είναι } B^I$$

όπου τα A_i^I και B^I είναι ασαφή σύνολα επί των $X_i \subset \mathfrak{R}$ και $Y \subset \mathfrak{R}$ αντίστοιχα και $x = [x_1, \dots, x_n]^T$, y είναι γλωσσικές μεταβλητές.



Εικόνα 4: Οι τέσσερις μονάδες που αποτελούν τη δομή των ασαφών συστημάτων.

Τη δεύτερη μονάδα αποτελεί η ασαφής συλλογιστική μηχανή που αποτελεί τον πυρήνα του ασαφούς συστήματος και περιέχει τη λογική λήψης αποφάσεων. Δύο μηχανισμοί ασαφούς συλλογισμού χρησιμοποιούνται, η μέθοδος Mamdani και η μέθοδος Takagi-Sugeno.

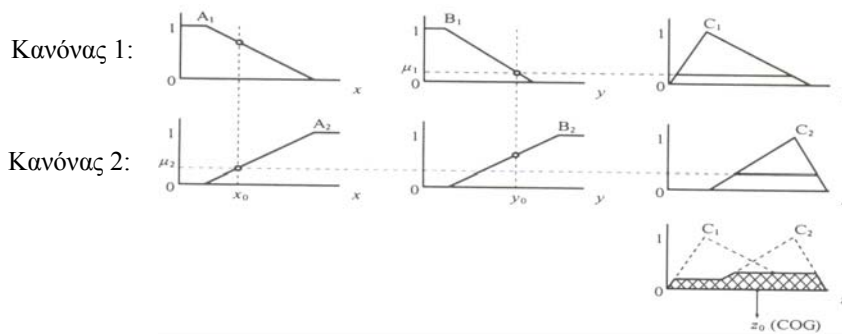
Για τη μέθοδο Mamdani θεωρούνται δύο κανόνες, με δύο μεταβλητές στο μέλος της υπόθεσης και μία μεταβλητή στο μέλος του συμπεράσματος:

Κανόνας 1: ΕΑΝ x είναι A_1 ΚΑΙ y είναι B_1 ΤΟΤΕ z είναι C_1

Κανόνας 2: ΕΑΝ x είναι A_2 ΚΑΙ y είναι B_2 ΤΟΤΕ z είναι C_2

όπου A_1, A_2, B_1, B_2, C_1 και C_2 είναι ασαφή σύνολα.

Η διαδικασία συλλογισμού φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Γραφική απεικόνιση της διαδικασίας συλλογισμού.

Εάν τα x_0 και y_0 είναι οι μεταβλητές εισόδου τότε η διαδικασία συλλογισμού ακολουθεί τα παρακάτω βήματα.

Βήμα 1:

Υπολογίζετε η προσαρμοστικότητα κάθε κανόνα για το ζεύγος εισόδου (x_0, y_0) .

$$\text{Κανόνας 1: } \mu_1 = \min\{\mu_{A_1}(x_0), \mu_{B_1}(y_0)\}$$

$$\text{Κανόνας 2: } \mu_2 = \min\{\mu_{A_2}(x_0), \mu_{B_2}(y_0)\}$$

Την ίδια μορφή έχουν και οι i κανόνες, όπου $\mu_{A_i}(x_0)$ και $\mu_{B_i}(y_0)$ είναι οι συναρτήσεις συμμετοχής των x_0 και y_0 στα ασαφή σύνολα A_i και B_i αντίστοιχα.

Βήμα 2:

Εφαρμόζεται η προσαρμοστικότητα που προκύπτει από το προηγούμενο βήμα στα ασαφή σύνολα του συμπερασματικού μέλους κάθε κανόνα για να εξαχθούν τα συμπεράσματα από τον κάθε ένα από αυτούς.

$$\text{Κανόνας 1: } \mu_{C_1}(x_0) = \min\{\mu_1, \mu_{C_1}(z)\} \quad \forall z \in \square$$

$$\text{Κανόνας 2: } \mu_{C_2}(x_0) = \min\{\mu_2, \mu_{C_2}(z)\} \quad \forall z \in \square$$

Βήμα 3:

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των κανόνων εξάγεται το τελικό αποτέλεσμα ως εξής.

$$\text{Ολικό αποτέλεσμα: } \mu_C(z) = \min\{\mu_{C_1}(z), \mu_{C_2}(z)\}$$

Ή για n κανόνες,

$$\text{Ολικό αποτέλεσμα: } \mu_C(z) = \min\{\mu_{C_1}(z), \mu_{C_2}(z), \dots, \mu_{C_n}(z)\}$$

Η μέθοδος Takagi-Sugeno είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για το χειρισμό πολύπλοκων προβλημάτων. Το πλεονέκτημα της σε σχέση με την άμεση μέθοδο ασαφούς συλλογισμού είναι ότι μειώνει σημαντικά τον αριθμό των κανόνων που χρειάζονται για την ασαφή μοντελοποίηση του συστήματος. Στη συλλογιστική Takagi-Sugeno το συμπέρασμα των κανόνων δίνεται με τη μορφή γραμμικών συναρτήσεων. Οι κανόνες έχουν τη μορφή:

$$\text{Κανόνας } i: \text{ΕΑΝ } x_1 \text{ είναι } A_1^i \text{ ΚΑΙ...ΚΑΙ } x_n \text{ είναι } A_n^i \text{ ΤΟΤΕ } y^i = c_0^i + c_1^i x_1 + \dots + c_n^i x_n \\ \text{με } i=1, 2, \dots, m$$

όπου m είναι ο ολικός αριθμός των κανόνων, x_k με $k=1,2,\dots,n$ είναι η k είσοδος, y^i είναι η έξοδος του κανόνα i , A_k^i είναι ασαφή σύνολα και c_k^i είναι οι παράμετροι της εξόδου.

Το ολικό συμπέρασμα του ασαφούς αυτού συστήματος δίνεται από τη μέση τιμή των εξόδων y^i με βάρη w^i έτσι:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m w^i y^i}{\sum_{i=1}^m w^i}, \quad (4)$$

όπου w^i είναι η προσαρμοστικότητα του αριστερού μέλους του κανόνα i ,

$$w^i = \prod_{k=1}^n \mu_{A_k^i}(x_k), \quad (5)$$

Εάν στην έξοδο των κανόνων χρησιμοποιείτε μόνο ο σταθερός όρος c_0^i τότε προκύπτει η 'απλοποιημένη συναρτησιακή συλλογιστική Takagi-Sugeno'. Έτσι:

Κανόνας i : ΕΑΝ x είναι A^i ΚΑΙ y είναι B^i ΤΟΤΕ $z=c^i$ $i=1,2,\dots,m$.

Στην περίπτωση αυτή το συμπέρασμα δίνεται από τη σχέση:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^m w^i z^i}{\sum_{i=1}^m w^i} = \frac{\sum_{i=1}^m w^i c^i}{\sum_{i=1}^m w^i}, \quad (6)$$

όπου $w^i = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}$.

Η συλλογιστική Takagi-Sugeno είναι πολύ απλή και οδηγεί σε ταχείς υπολογισμούς για αυτό και προτιμάται στην πράξη έναντι της άμεσης μεθόδου.

Την τρίτη μονάδα στην αρχιτεκτονική των ασαφών συστημάτων αποτελεί ο ασαφοποιητής που εκτελεί τις παρακάτω εργασίες:

- Μετράει τις μη ασαφείς τιμές των εισόδων του συστήματος.
- Απεικονίζει τις περιοχές μεταβολής των τιμών εισόδου σε κατάλληλα υπερσύνολα αναφοράς.
- Ασαφοποιεί τις εισερχόμενες τιμές των εισόδων, τις μετατρέπει σε ασαφή ή γλωσσική μορφή.

Ο αποασαφοποιητής αποτελεί την τελευταία μονάδα των ασαφών συστημάτων. Κατά τη διαδικασία της αποασαφοποίησης πραγματοποιείται μετατροπή ενός ασαφούς συνόλου B σε μια τιμή w_0 , που είναι και η έξοδος του ασαφούς συστήματος. Οι κυριότερες μέθοδοι αποασαφοποίησης είναι:

Η μέθοδος κέντρου βάρους, όπου η τιμή w_0 δίνεται από τη σχέση ,

$$w_0 = \frac{\sum_i w_i \mu_B(w_i)}{\sum_i \mu_B(w_i)} \quad (7)$$

Η μέθοδος μέσης τιμής των μεγίστων, όπου η τιμή w_0 δίνεται από τη σχέση , w_0 δίνεται από τη σχέση ,

$$w_0 = \frac{\sum_{j=1}^m w_j}{m}, \quad (8)$$

όπου w_j είναι η τιμή που αντιστοιχεί στο j μέγιστο της συνάρτησης συμμετοχής. Η μέθοδος του ύψους, όπου το w_0 υπολογίζεται ως μια μέση τιμή με βάρη h_i των αντιπροσωπευτικών σημείων w_i του B , δίνεται από τη σχέση,

$$w_0 = \frac{w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_n h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \quad (9)$$

3.2 Νευρωνικά Δίκτυα [7]

Τα νευρωνικά δίκτυα εκτελούν υπο-συμβολική επεξεργασία πληροφορίας που βασίζεται στη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και επικαλούνται την ιδέα της μοντελοποίησης του *μαύρου κουτιού* χρησιμοποιώντας μοντέλα του ανθρώπινου εγκεφάλου που εμπνέονται από τη βιολογία και τη νευροφυσιολογία.

Ένα προσαρμοστικό νευρωνικό δίκτυο είναι ένα πολυεπίπεδο δίκτυο εμπρόσθιας τροφοδότησης όπου κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει μια ειδική συνάρτηση στην οποία εισέρχονται τα σήματα που φτάνουν σε αυτόν. Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων. Η φύση της συνάρτησης του κάθε κόμβου μπορεί να διαφέρει και εξαρτάται από τη συνολική συνάρτηση εισόδου-εξόδου που το προσαρμοστικό δίκτυο καλείται να εκτελέσει. Για να αντικατοπτρίζονται οι διαφορετικές προσαρμοστικές δυνατότητες χρησιμοποιούνται κυκλικοί και τετραγωνικοί κόμβοι στο δίκτυο. Οι τετραγωνικοί κόμβοι είναι αυτοί που προσαρμόζονται, που έχουν παραμέτρους, ενώ οι κυκλικοί είναι οι αμετάβλητοι και δε διαθέτουν παραμέτρους. Οι παράμετροι του προσαρμοστικού δικτύου είναι η ένωση των συνόλων των παραμέτρων του κάθε προσαρμοστικού κόμβου. Αυτοί ανανεώνονται ανάλογα με τα δεδομένα εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται και τη διαδικασία εκπαίδευσης που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Αν υποθεθεί ότι ένα προσαρμοστικό δίκτυο έχει L επίπεδα και το k -οστό επίπεδο διαθέτει h κόμβους, τότε δύναται να δηλωθεί ο i κόμβος στο k επίπεδο ως (k,i) και η συνάρτηση του ως O_i^k . Καθώς η έξοδος του κόμβου εξαρτάται από τα εισερχόμενα σήματα και το σύνολο των παραμέτρων του, συνεπάγεται ότι:

$$O_i^k = O_i^k \left(O_1^{k-1}, \dots, O_{h(k-1)}^{k-1}, a, b, c, \dots \right), \quad (10)$$

όπου a, b, c, \dots οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τον κόμβο.

Αν τώρα δοθούν τα δεδομένα εκπαίδευσης και έχουν P καταχωρήσεις, δύναται να οριστεί η συνάρτηση σφάλματος για την p καταχώρηση ως το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων:

$$E_p = \sum_{m=1}^{h(L)} \left(T_{m,p} - O_{m,p}^L \right)^2, \quad (11)$$

όπου $T_{m,p}$ είναι το m -στό στοιχείο του p -στού επιθυμητού διανύσματος εξόδου, και $O_{m,p}^L$ είναι το m -στό στοιχείο του πραγματικού διανύσματος εξόδου που παράγεται από την παρουσίαση του p -στού διανύσματος εισόδου. Η ολική συνάρτηση σφάλματος είναι $E = \sum_{p=1}^P E_p$.

Για να αναπτυχθεί μια διαδικασία μάθησης που θα υλοποιεί τη μέγιστη κατάβαση του E , αρχικά πρέπει να υπολογιστεί ο ρυθμός του σφάλματος $\frac{\partial E_p}{\partial O}$ για το p -στό δεδομένο και για την έξοδο του κάθε κόμβου O . Ο ρυθμός σφάλματος στον (L, i) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση:

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^L} = -2(T_{i,p} - O_{i,p}^L). \quad (12)$$

Για τον εσωτερικό κόμβο (k, i) ο ρυθμός σφάλματος εξάγεται από:

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^k} = \sum_{m=1}^{h(k+1)} \frac{\partial E_p}{\partial O_{m,p}^{k+1}} \frac{\partial O_{m,p}^{k+1}}{\partial O_{i,p}^k}, \text{ με } 1 \leq k \leq L-1. \quad (13)$$

Ορίζοντας a μια παράμετρο του προσαρμοστικού δικτύου, τότε,

$$\frac{\partial E_p}{\partial a} = \sum_{O^* \in S} \frac{\partial E_p}{\partial O^*} \frac{\partial O^*}{\partial a}, \quad (14)$$

όπου S είναι το σύνολο των κόμβων που η έξοδος του εξαρτάται από το a . Έτσι η συνάρτηση σφάλματος λαμβάνοντας υπόψη και το a γίνεται:

$$\frac{\partial E}{\partial a} = \sum_{p=1}^P \frac{\partial E_p}{\partial a} \quad (15)$$

Έτσι ο ανανεωμένος τύπος για τη γενική παράμετρο a γίνεται $\Delta a = -\eta \frac{\partial E}{\partial a}$ όπου η

είναι ο ρυθμός μάθησης και εκφράζεται ως $\eta = \frac{k}{\sqrt{\sum_a \left(\frac{\partial E}{\partial a}\right)^2}}$, όπου k το μέγεθος του

βήματος.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι μάθησης για τα προσαρμοστικά δίκτυα. Στην πρώτη, η ενημέρωση των παραμέτρων πραγματοποιείται αφού παρουσιαστεί το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης. Στη δεύτερη, οι παράμετροι ανανεώνονται αμέσως μόλις ένα ζευγάρι δεδομένων εισόδου-εξόδου παρουσιαστεί.

Για την πρώτη μέθοδο προτείνεται ένας υβριδικός κανόνας, που συνδυάζει τη μέθοδο κατάβασης και τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, για να αναγνωρίσει τις παραμέτρους. Εάν υποθεθεί ότι το προσαρμοστικό δίκτυο έχει μια έξοδο τότε ισχύει, $output = F(\vec{I}, S)$, με \vec{I} το σύνολο των μεταβλητών εισόδου και S το σύνολο των παραμέτρων. Αν υπάρχει συνάρτηση H τέτοια ώστε η σύνθετη συνάρτηση $H \circ F$ να είναι γραμμική σε μερικά από τα στοιχεία του S , τότε αυτά τα στοιχεία δύνανται να αναγνωριστούν από τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Συγκεκριμένα αν το σύνολο των παραμέτρων μπορεί να αποσυντεθεί σε δύο σύνολα $S = S_1 \otimes S_2$, έτσι

ώστε η $H \circ F$ να είναι γραμμική στα στοιχεία του S_2 , τότε εφαρμόζοντας την H στην $output = F(\vec{I}, S)$ προκύπτει η $H(output) = H \circ F(\vec{I}, S)$ που είναι γραμμική στα στοιχεία του S_2 . Δοσμένων των στοιχείων του S_1 , δύναται να τοποθετηθούν τα δεδομένα εκπαίδευσης P στην προηγούμενη εξίσωση και έτσι να προκύψει η παρακάτω εξίσωση πινάκων:

$$AX = B, \quad (16)$$

όπου X είναι ένα άγνωστο διάνυσμα του οποίου τα στοιχεία είναι παράμετροι στο S_2 . Αν $|S_2| = M$, τότε οι διαστάσεις του A , X και B είναι $P \times M$, $M \times 1$ και $P \times 1$, αντίστοιχα. Για να βρεθεί το X^* χρησιμοποιείται ο ψευδο-αντίστροφος του X :

$$X^* = (A^T A)^{-1} A^T B, \quad (17)$$

όπου A^T είναι ο ανάστροφος του A , ενώ ο $(A^T A)^{-1} A^T$ είναι ο ψευδο-αντίστροφος του A εάν και μόνο εάν ο $A^T A$ είναι αντιστρέψιμος. Επειδή η εξίσωση (17) απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό φόρτο, θα χρησιμοποιηθούν ακολουθίες για να υπολογιστεί η προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων του X . Αν η i -στή γραμμή - διάνυσμα του πίνακα A οριστεί σαν a_i^T και το i -στό στοιχείο του πίνακα B ως b_i^T , τότε το X μπορεί να υπολογιστεί επαναληπτικά χρησιμοποιώντας τους τύπους :

$$\left. \begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + S_{i+1} a_{i+1} (b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i) \\ S_{i+1} &= S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_{i+1}^T S_i}{1 + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}}, \quad i = 0, 1, \dots, P-1 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

όπου ο S_i καλείται πίνακας συνδιακύμανσης και η προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων X^* είναι ίση με X_P .

Τώρα δύναται να συνδυαστούν οι μέθοδοι μέγιστης κατάβασης και ελαχίστων τετραγώνων για να ενημερωθούν οι παράμετροι στο προσαρμοστικό νευρωνικό δίκτυο. Σε κάθε εποχή της υβριδικής διαδικασίας μάθησης εκτελούνται δύο εργασίες. Κατά την πρώτη, όλοι οι κόμβοι τροφοδοτούνται με τα δεδομένα εισόδου και υπολογίζεται από τον καθένα η έξοδος μέχρι να δημιουργηθούν οι πίνακες A και B της (16) και να προσδιοριστούν οι παράμετροι του S_2 από τις σχέσεις (18). Αφού γίνει αυτό συνεχίζεται η τροφοδοσία των σημάτων έως ότου υπολογιστεί η συνάρτηση σφάλματος. Κατά τη δεύτερη εργασία, οι ρυθμοί σφάλματος διαδίδονται από την έξοδο προς την είσοδο και οι παράμετροι του S_1 ενημερώνονται με τη μέθοδο της μέγιστης κατάβασης στην $\Delta a = -\eta \frac{\partial E}{\partial a}$.

Στη δεύτερη μέθοδο μάθησης, οι παράμετροι ενημερώνονται μετά από την εμφάνιση κάθε δεδομένου. Η μέθοδος αυτή είναι απαραίτητη για άμεση αναγνώριση δεδομένων σε συστήματα με μεταβαλλόμενες παραμέτρους. Για να τροποποιηθεί η πρώτη μέθοδος μάθησης ώστε οι παράμετροι να ενημερώνονται μετά από εμφάνιση κάθε δεδομένου, πρέπει η μέθοδος μέγιστης κατάβασης να βασιστεί στο E_p αντί στο E . Η ακολουθία των ελαχίστων τετραγώνων για να δώσει εκτίμηση για

μεταβαλλόμενα με το χρόνο χαρακτηριστικά εισερχόμενων δεδομένων, θα πρέπει να εξαλειφθούν οι επιδράσεις των παλιών δεδομένων καθώς νέα ζευγάρια δεδομένων γίνονται διαθέσιμα. Μια μέθοδος για αυτό είναι η χρήση της συνάρτησης τετραγωνικού σφάλματος σαν μια σταθμική έκδοση που δίνει υψηλότερα βάρη στα πλέον πρόσφατα ζεύγη δεδομένων. Έτσι προκύπτει η νέα τροποποιημένη ακολουθία:

$$\left. \begin{aligned} X_{i+1} &= X_i + S_{i+1}a_{i+1} \left(b_{i+1}^T - a_{i+1}^T X_i \right) \\ S_{i+1} &= \frac{1}{\lambda} \left[S_i - \frac{S_i a_{i+1} a_{i+1}^T S_i}{1 + a_{i+1}^T S_i a_{i+1}} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

όπου λ ένας όρος που οι τιμές του κυμαίνονται από 0 έως 1. Όσο πιο μικρή είναι η τιμή του λ τόσο πιο γρήγορα εξασθενούν οι επιδράσεις των παλαιών δεδομένων. Με τη χρήση όμως πολύ μικρών τιμές παρατηρείται αριθμητική αστάθεια και καλό είναι να αποφεύγονται.

3.3 Νευρο-Ασαφή Συστήματα

Τα συστήματα ασαφούς λογικής έχουν δύο βασικά μειονεκτήματα, α) δε διαθέτουν μια συγκεκριμένη μέθοδο για την εξαγωγή των ασαφών κανόνων από την ανθρώπινη εμπειρία και β) δε διαθέτουν ένα μηχανισμό που να ρυθμίζει τις συναρτήσεις συμμετοχής ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα εξόδου. Τα μειονεκτήματα αυτά εξαλείφονται αν χρησιμοποιηθούνε νευρωνικά δίκτυα για την καθοδήγηση της ασαφούς λογικής. Τα νευρωνικά δίκτυα δύνανται να εκπαιδευτούν να επιλέγουν τις συναρτήσεις συμμετοχής, όπως και τον αριθμό και τη μορφή των ασαφών κανόνων με αυτόματο τρόπο. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές με σχετικές διακυμάνσεις στη γενικότητα, απλότητα και εφαρμοσιμότητα τους. Η τεχνική που θα αναπτυχθεί παρακάτω είναι το προσαρμοστικό σύστημα νευρο-ασαφούς λογικής *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* - ANFIS.

3.3.1 Προσαρμοστικό Νεύρο-ασαφές Σύστημα – ANFIS [7]

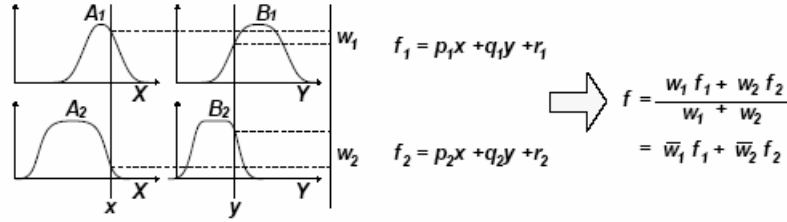
Το σύστημα ANFIS είναι μια πλατφόρμα προσαρμοστικών συστημάτων νευρο-ασαφούς λογικής. Η πλατφόρμα αυτή απεικονίζει τη λειτουργία του ασαφούς συστήματος σε ένα νευρωνικό δίκτυο που αποτελείται από πέντε επίπεδα και εκπαιδεύεται με τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης.

Έστω ένα ασαφές σύστημα δύο εισόδων x και y και μίας εξόδου z . Εάν υποθεθεί ότι η βάση γνώσης αποτελείται από δύο κανόνες της μορφής EAN-TOTE τύπου Takagi-Sugeno, αυτοί θα έχουν τη μορφή:

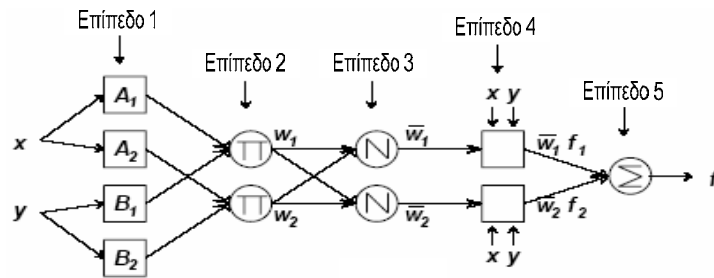
Κανόνας 1: EAN x είναι A_1 και y είναι B_1 TOTE $f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$

Κανόνας 2: EAN x είναι A_2 και y είναι B_2 TOTE $f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$

Ο συλλογιστικός μηχανισμός του ασαφούς μοντέλου για την περίπτωση αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 6, ενώ η αντίστοιχη δομή του ANFIS στην Εικόνα 7. Ακολουθεί και η ανάλυση του κάθε επιπέδου χωριστά.



Εικόνα 6: Ο συλλογιστικός μηχανισμός του ANFIS.



Εικόνα 7: Η δομή του Προσαρμοστικού Νεύρο-ασαφούς Συστήματος ANFIS.

Επίπεδο 1: Κάθε τετραγωνικός κόμβος σε αυτό το επίπεδο έχει συνάρτηση,

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), \quad (20)$$

όπου x είναι η είσοδος στον κόμβο i , και A_i μια γλωσσική ετικέτα. Ουσιαστικά O_i^1 είναι η συνάρτηση συμμετοχής της A_i και προσδιορίζει το βαθμό που η είσοδος x την ικανοποιεί.

Επίπεδο 2: Στο επίπεδο αυτό κάθε στρογγυλός κόμβος πολλαπλασιάζει τα εισερχόμενα σε αυτόν σήματα και παράγει ως έξοδο το γινόμενο τους. Η έξοδος αυτή προσδιορίζει και την ισχύ πυροδότησης του κάθε κανόνα Έτσι,

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2. \quad (21)$$

Επίπεδο 3: Σε αυτό το επίπεδο κάθε κόμβος υπολογίζει την κανονικοποιημένη ισχύ πυροδότησης του αντίστοιχου κανόνα. Δηλαδή,

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2. \quad (22)$$

Επίπεδο 4: Οι τετραγωνικοί κόμβοι i στο επίπεδο 4 αντιπροσωπεύουν τη συνάρτηση

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad (23)$$

όπου \bar{w}_i είναι η έξοδος από το επίπεδο 3 και p_i, q_i , και r_i κάποιες παράμετροι.

Επίπεδο 5: Ο μοναδικός κόμβος που υπάρχει σε αυτό το επίπεδο υπολογίζει τη συνολική έξοδο σαν άθροισμα των εισερχόμενων σε αυτόν σημάτων. Έτσι

$$O_1^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (24)$$

3.3.1.1 Υβριδικός Αλγόριθμος Μάθησης

Από τη δομή του ANFIS, που παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι φανερό ότι η συνολική έξοδος του μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική συνάρτηση των παραμέτρων p_i , q_i , και r_i . Έτσι η έξοδος f μπορεί να ξαναγραφτεί ως:

$$\begin{aligned} f &= \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \\ &= \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2 \\ &= (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2, \end{aligned} \quad (25)$$

η οποία είναι γραμμική στις συμπερασματικές παραμέτρους (p_i , q_i , r_i , p_2 , q_2 , και r_2). Έτσι:

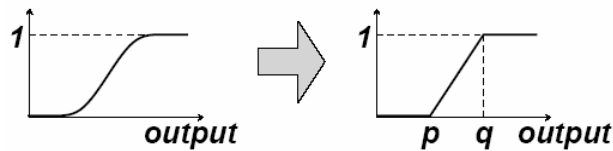
S = συνολικές παραμέτρων

S_1 = σύνολο αρχικών παραμέτρων

S_2 = σύνολο συμπερασματικών παραμέτρων

Οι $H(\square)$ και $F(\square\square)$ είναι η συνάρτηση αναγνώρισης και η συνάρτηση του ασαφούς συστήματος, αντίστοιχα. Έτσι η υβριδική μέθοδος μάθησης που αναπτύχθηκε προηγούμενα μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας. Ειδικότερα, τα συναρτησιακά σήματα προχωρούν με κατεύθυνση από την αρχή προς το τέλος μέχρι το επίπεδο 4 και οι συμπερασματικές παράμετροι αναγνωρίζονται με την προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων. Στη συνέχεια οι ρυθμοί σφάλματος μεταδίδονται με την αντίθετη κατεύθυνση και οι αρχικοί παράμετροι ενημερώνονται με τη μέθοδο μέγιστης κατάβασης.

Οι συμπερασματικές παράμετροι που αναγνωρίστηκαν είναι βέλτιστοι με την προϋπόθεση ότι οι αρχικές παράμετροι έμειναν αμετάβλητοι. Ανάλογα η υβριδική προσέγγιση είναι πολύ γρηγορότερη από την απλή μέθοδο μέγιστης κατάβασης και αξίζει τον κόπο να ελεγχθεί η πιθανότητα της αποσύνθεσης του συνόλου των παραμέτρων σύμφωνα με τη σχέση $S = S_1 \otimes S_2$. Για ANFIS τύπου-1 αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν η συνάρτηση συμμετοχής στο συμπερασματικό μέρος του κάθε κανόνα αντικατασταθεί από μια γραμμική προσέγγιση δύο παραμέτρων (Εικόνα 8). Σε αυτή την περίπτωση οι συμπερασματικές παράμετροι συνθέτουν το σύνολο S_2 και ο υβριδικός κανόνας μάθησης μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας.



Εικόνα 8: Γραμμική προσέγγιση δύο παραμέτρων.

Θα πρέπει να επισυμανθεί ότι η υπολογιστική πολυπλοκότητα στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων είναι υψηλότερη από αυτήν της μεθόδου μέγιστης κατάβασης. Υπάρχουν τέσσερις μέθοδοι ενημέρωσης των παραμέτρων και παρουσιάζονται παρακάτω σύμφωνα με την υπολογιστική τους πολυπλοκότητα:

- *Μέθοδος μέγιστης κατάβασης μόνο:* όλες οι παράμετροι ενημερώνονται με αυτή τη μέθοδο.
- *Μέθοδος μέγιστης κατάβασης σε συνδυασμό με μονής κατεύθυνσης μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων:* η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων εφαρμόζεται μόνο μια φορά στην αρχή για να ληφθούν οι αρχικές τιμές των συμπερασματικών παραμέτρων και μετά χρησιμοποιείται η μέγιστη κατάβαση για την ενημέρωση όλων των παραμέτρων.
- *Μέθοδος μέγιστης κατάβασης σε συνδυασμό με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων:* είναι ο προτεινόμενος κανόνας υβριδικής μάθησης.
- *Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων μόνο:* το ANFIS γραμμικοποιεί τις αρχικές παραμέτρους και ο αλγόριθμος Kalman ενημερώνει όλες τις παραμέτρους.

Η επιλογή της μεθόδου θα πρέπει να βασίζεται στο συνδυασμό υπολογιστικής πολυπλοκότητας και στην ποιότητα των αποτελεσμάτων.

Αν το μέγεθος των δεδομένων εισόδου-εξόδου είναι αρκετά μεγάλο, τότε η σωστή ρύθμιση των συναρτήσεων συμμετοχής είναι δυνατή και η εξάρτηση της από την ανθρώπινη εμπειρία είναι μικρή. Όταν το μέγεθος των δεδομένων εισόδου-εξόδου είναι μικρό τότε επιβάλλεται η χρήση και της ανθρώπινης εμπειρίας στη ρύθμιση των συναρτήσεων συμμετοχής γιατί πιθανόν τα δεδομένα να μη περιλαμβάνουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία.

3.3.1.2 Ασαφή Συστήματα με Απλουστευμένους EAN-TOTE Ασαφείς Κανόνες

Οι απλουστευμένοι EAN-TOTE ασαφείς κανόνες έχουν την ακόλουθη μορφή:

ΕΑΝ το x είναι μεγάλο ΚΑΙ το y είναι μικρό, ΤΟΤΕ το z είναι d .

όπου το d είναι μια σαφής τιμή. Επειδή η έξοδος z περιγράφεται από σαφή τιμή, οι κανόνες της μορφής EAN-TOTE μπορούν να χρησιμοποιήσουν και τους τρεις μηχανισμούς αιτιολόγησης. Με αυτούς τους απλουστευμένους EAN-TOTE ασαφείς κανόνες είναι δυνατό κάτω από προκαθορισμένες συνθήκες, το ασαφές σύστημα να έχει απεριόριστη ισχύ προσέγγισης μη γραμμικών συναρτήσεων σε ένα συμπαγές σύνολο. Αυτό δύναται να περιγραφεί εφαρμόζοντας το παρακάτω θεώρημα των Stone-Weierstrass.

Θεώρημα: Έστω το πεδίο ορισμού D ένα συμπαγές διάστημα N διαστάσεων, και F ένα σύνολο συνεχών συναρτήσεων στο D , που ικανοποιούν τα παρακάτω κριτήρια:

1. Η σταθερή συνάρτηση $f(x)=1$ ανήκει στο F .
2. Για κάθε δύο σημεία $x_1 \neq x_2$ του D , υπάρχει μία f στο F τέτοια ώστε $f(x_1) \neq f(x_2)$.
3. Αν f και g οποιεσδήποτε συναρτήσεις που ανήκουν στο F , τότε fg και $af+bg$ ανήκουν στο F για οποιουσδήποτε πραγματικούς αριθμούς a και b .

Τότε για κάθε $\varepsilon > 0$ και κάθε συνάρτηση στο $C(D)$, υπάρχει μια συνάρτηση f στο F τέτοια ώστε $|g(x) - f(x)| < \varepsilon$ για όλα τα $x \in D$.

Εφαρμόζοντας αυτό το θεώρημα στα ασαφή συστήματα, το πρώτο που πρέπει να επισημανθεί είναι ότι το πεδίο ορισμού που χρησιμοποιούνται είναι σχεδόν πάντα κλειστό και άρα συμπαγές. Για το πρώτο και δεύτερο κριτήριο είναι απλό να βρεθούν απλουστευμένα ασαφή συστήματα που να τα ικανοποιούν. Αυτό που απομένει είναι να εξεταστεί η ισχύς και του τρίτου κριτηρίου. Έστω δύο ασαφή συστήματα S και \tilde{S} με δύο κανόνες έκαστο. Η έξοδος του κάθε συστήματος δύναται να εκφραστεί ως:

$$\begin{aligned} S: z &= \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} \\ \tilde{S}: \tilde{z} &= \frac{\tilde{w}_1 \tilde{f}_1 + \tilde{w}_2 \tilde{f}_2}{\tilde{w}_1 + \tilde{w}_2} \end{aligned} \quad (26)$$

Τα $az + b\tilde{z}$ και $z\tilde{z}$ μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$\begin{aligned} az + b\tilde{z} &= a \frac{w_1 f_1 + w_2 f_2}{w_1 + w_2} + b \frac{\tilde{w}_1 \tilde{f}_1 + \tilde{w}_2 \tilde{f}_2}{\tilde{w}_1 + \tilde{w}_2} \\ &= \frac{w_1 \tilde{w}_1 (af_1 + b\tilde{f}_1) + w_1 \tilde{w}_2 (af_1 + b\tilde{f}_2) + w_2 \tilde{w}_1 (af_2 + b\tilde{f}_1) + w_2 \tilde{w}_2 (af_2 + b\tilde{f}_2)}{w_1 \tilde{w}_1 + w_1 \tilde{w}_2 + w_2 \tilde{w}_1 + w_2 \tilde{w}_2} \\ z\tilde{z} &= \frac{w_1 \tilde{w}_1 f_1 \tilde{f}_1 + w_1 \tilde{w}_2 f_1 \tilde{f}_2 + w_2 \tilde{w}_1 f_2 \tilde{f}_1 + w_2 \tilde{w}_2 f_2 \tilde{f}_2}{w_1 \tilde{w}_1 + w_1 \tilde{w}_2 + w_2 \tilde{w}_1 + w_2 \tilde{w}_2} \end{aligned} \quad (27)$$

Οι εξισώσεις (27) έχουν τον ίδιο τύπο με τις εξισώσεις (26). Προφανώς η δομή του ANFIS που υπολογίζει τα $az + b\tilde{z}$ και $z\tilde{z}$ είναι της ίδιας τάξης με αυτή των S και \tilde{S} εάν και μόνο εάν η τάξη των συναρτήσεων συμμετοχής παραμένει σταθερή μετά από πολλαπλασιασμό. Αυτό συμβαίνει αν οι συναρτήσεις συμμετοχής είναι της μορφής *bell*, γιατί πολλαπλασιάζοντας δύο τέτοιου είδους συναρτήσεις το αποτέλεσμα είναι πάλι *bell* συνάρτηση. Το ίδιο συμβαίνει και με τις Gaussian συναρτήσεις συμμετοχής.

Επιλέγοντας λοιπόν κατάλληλης τάξης συναρτήσεις συμμετοχής, το ANFIS με τους απλουστευμένους EAN-TOTE ασαφείς κανόνες ικανοποιεί τα τέσσερα κριτήρια του θεωρήματος. Συμπερασματικά, για κάθε $\varepsilon > 0$ και κάθε πραγματική συνάρτηση g , υπάρχει ένα ασαφές σύστημα S έτσι ώστε $|g(\bar{x}) - S(\bar{x})| < \varepsilon$ για όλα τα \bar{x} του συμπαγούς συνόλου.

4 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΞΗΡΑΝΤΗΡΑ

Ο έλεγχος της διαδικασίας ξήρανσης σε περιστρεφόμενο ξηραντήρα αποτελούσε, αποτελεί και θα αποτελεί και στο μέλλον μια πρόκληση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός των ιδιαίτερα ευμετάβλητων συνθηκών που επικρατούν εντός του ξηραντήρα και που είναι αυτές που δυσκολεύουν δραματικά την μοντελοποίηση του συστήματος. Η επιφάνεια του προς ξήρανση υλικού που βρίσκεται σε επαφή με το ξηραντήρα, η επιφάνεια του υλικού που δέχεται την θερμική ακτινοβολία και η ποσότητα του που βρίσκεται σε πτώση εντός του κυλίνδρου, δεχόμενη το θερμό ρεύμα αέρα, είναι κάποιες από τις μεταβλητές που μεταβάλλονται σε κάθε μονάδα του χρόνου. Γίνεται έτσι κατανοητό ότι η απόλυτα θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος είναι δύσκολη και με αμφίβολα αποτελέσματα. Δοκιμάστηκαν διάφορες μέθοδοι για τη μοντελοποίηση και τον έλεγχο της διαδικασίας ξήρανσης σε περιστρεφόμενο κύλινδρο και παρουσιάζονται στη συνέχεια.

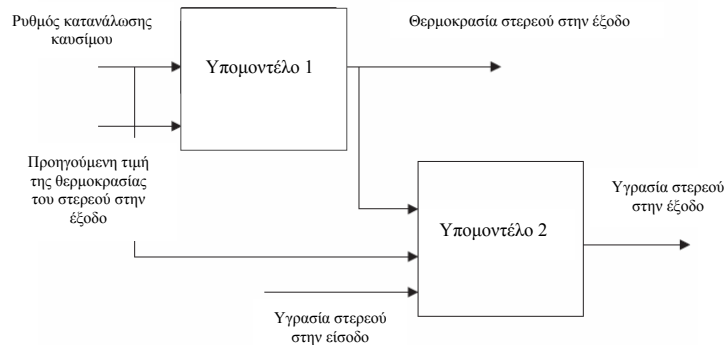
4.1 Βιβλιογραφία για Προβλήματα Ελέγχου Περιστρεφόμενων Ξηραντήρων

Η μέθοδος της ασαφούς λογικής έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα ελέγχου περιστρεφόμενων ξηραντήρων. Ένα ασαφές μοντέλο ελέγχου έχει αναπτυχθεί σε ένα πειραματικό περιστρεφόμενο ξηραντήρα για τη ξήρανση ασβέστη [8]. Ο ασβέστης εισέρχεται σε ένα περιστρεφόμενο κύλινδρο, μήκους 3 μέτρων και διαμέτρου 0,5 μέτρα, με ποσοστό υγρασίας 98%. Εντός του κυλίνδρου υπάρχουν 20 σπειροειδή φτερά που μεταφέρουν και αναταράσσουν τον ασβέστη. Η ροή του θερμού αέρα ξήρανσης διέρχεται από τον ξηραντήρα με τη συνδρομή ενός ανεμιστήρα που βρίσκεται στο τέλος του ενώ ως καύσιμη ύλη για τη θέρμανση των αερίων χρησιμοποιείται προπάνιο. Η θερμή αέρια μάζα οδηγείται σε έναν κυκλώνα όπου συλλέγεται η σκόνη.

Ως είσοδοι του ασαφούς μοντέλου που δημιουργήθηκε για τον έλεγχο του πειραματικού περιστρεφόμενου ξηραντήρα χρησιμοποιήθηκαν: α) η υγρασία του ασβέστη που εισέρχεται στο ξηραντήρα, β) ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου και γ) η τιμή της θερμοκρασίας του ασβέστη στην έξοδο την προηγούμενη χρονική στιγμή. Την έξοδο του μοντέλου αποτελεί η εκτιμώμενη τιμή της θερμοκρασίας του ασβέστη που εξέρχεται του κυλίνδρου. Το σφάλμα αυτής της μεταβλητής, τιμή που υπολογίζεται μείον την τιμή που μετράται, τείνει να ελαχιστοποιήσει το μοντέλο. Αν και το ασαφές μοντέλο που αναπτύχθηκε δίνει καλά αποτελέσματα με μια καλή συσχέτιση μεταξύ της πραγματικής εξόδου και της εξόδου του μοντέλου, το τελευταίο χρειάζεται περαιτέρω ανάπτυξη για τη βέλτιστη απόδοση του.

Στον ίδιο πειραματικό περιστρεφόμενο ξηραντήρα ασβέστη παρουσιάστηκαν και κάποιες άλλες προσεγγίσεις ελέγχου. Οι προσεγγίσεις αυτές αφορούν νεύρο-ασαφή έλεγχο και τεχνικές ασαφούς ομαδοποίησης [9]. Οι είσοδοι του ελεγκτή που αναπτύχθηκε είναι ίδιες με την προηγούμενη εργασία ενώ διαφορά υπάρχει στις

μεταβλητές εξόδου όπου πέρα από τη θερμοκρασία του υλικού κατά την έξοδο του από τον ξηραντήρα προστίθεται και η υγρασία του εξερχόμενου υλικού. Για την εκπαίδευση του νευρο-ασαφούς ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν περίπου 2000 δεδομένα εισόδου και εξόδου από τα οποία το 65% χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του ενώ το υπόλοιπο 35% για δοκιμή του.



Εικόνα 9: Η δομή του ελεγκτή, με το υπόμοντέλο 1 να βασίζεται αποκλειστικά σε ασαφή λογική ενώ στο υπόμοντέλο 2 να δοκιμάζονται νευρο-ασαφείς τεχνικές και τεχνικές ασαφούς ομαδοποίησης.

Στην ίδια εργασία παρουσιάστηκε και μια συγκριτική μελέτη των μεθόδων με προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στον πειραματικό περιστρεφόμενο ξηραντήρα. Το υπομοντέλο 1 (Εικόνα 9) βασίστηκε αποκλειστικά στην ασαφή λογική ενώ στο υπομοντέλο 2 δοκιμάστηκαν νευρο-ασαφής λογική και τεχνικές ασαφούς ομαδοποίησης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι ότι η νευρο-ασαφής μέθοδος πλεονεκτεί στην ακρίβεια της, ειδικότερα όταν συμπεριλαμβάνεται όλη η βάση γνώσης. Μειονεκτεί όταν ο αριθμός των εισόδων στο σύστημα είναι πολύ μεγάλος εξαιτίας του γεγονότος ότι το μέγεθος του μοντέλου αυξάνει δραματικά με άμεση συνέπεια την αύξηση του χρόνου ρύθμισης των παραμέτρων του. Από την άλλη μεριά οι τεχνικές ασαφούς ομαδοποίησης αποτελούν μια ακριβή μέθοδο μοντελοποίησης με μικρότερες απαιτήσεις στον αριθμό και στην ακρίβεια των δεδομένων εκπαίδευσης. Εφαρμόζονται πολύ καλά όταν οι αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής είναι δύσκολο να οριστούν και η ρύθμιση τους πραγματοποιείται αρκετά πιο γρήγορα. Παρόλα αυτά το μοντέλο ελέγχου επιβάλλεται να εφαρμοστεί σε ξηραντήρα πραγματικών διατάσεων για να φανεί η δυνατότητα προσαρμογής του και η ικανότητα ελέγχου της διαδικασίας.

Ένας αναλογικός ολοκληρωτικός ελεγκτής αναπτύχθηκε για τον έλεγχο ενός περιστρεφόμενου ξηραντήρα. Ο ελεγκτής αυτός χρησιμοποιήθηκε μόνος του αλλά και σε συνεργασία είτε με έναν ασαφή ελεγκτή είτε με έναν ελεγκτή βασιζόμενο σε νευρωνικά δίκτυα [10]. Ο απλός αναλογικός ολοκληρωτικός ελεγκτής βασίζεται στο σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής τιμής υγρασίας του εξερχόμενου στερεού και σε αυτήν που μετριέται. Εξαιτίας του γεγονότος ότι ο αναλογικός ολοκληρωτικός έλεγχος είναι πολύ συνηθισμένος στους χειριστές, είναι εύκολο χρησιμοποιηθεί σε έλεγχο μιας μεταβλητής για αυτό και χρησιμοποιείται ακόμα σε πολλούς περιστρεφόμενους ξηραντήρες.

Στον πρώτο υβριδικό ελεγκτή υπάρχει συνεργασία μεταξύ ασαφούς λογικής και αναλογικού ολοκληρωτικού ελέγχου. Σε αυτόν ο ασαφής ελεγκτής έχει τον εποπτικό ρόλο και καθορίζει τη μεταβολή που πρέπει να πραγματοποιηθεί στη ροή του καυσίμου. Η μεταβολή αυτή προστίθεται στην προηγούμενη επιθυμητή τιμή (τιμή στόχος) για τον αναλογικό ολοκληρωτικό ελεγκτή προκύπτοντας έτσι ο νέος στόχος – επιθυμητή τιμή. Ο ασαφής ελεγκτής περιέχει τρεις εισόδους, με τρεις τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής η κάθε μία, και μία έξοδο με πέντε τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι, παρά την απλή δομή του ελεγκτή, η απόδοση του είναι καλή.

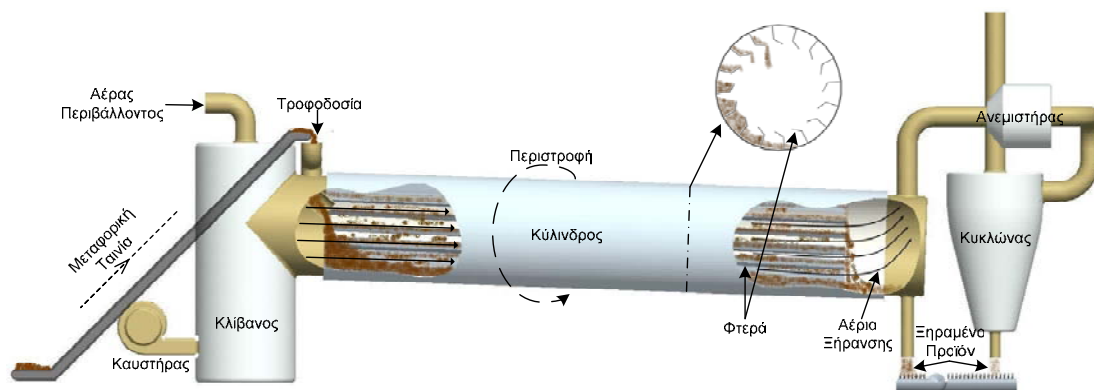
Στο δεύτερο υβριδικό ελεγκτή νευρωνικά δίκτυα συνεργάζονται με την τεχνική αναλογικού ολοκληρωτικού ελέγχου. Ο ελεγκτής που βασίζεται στα νευρωνικά δίκτυα έχει τον εποπτικό έλεγχο και καθορίζει την επιθυμητή τιμή για τον αναλογικό ολοκληρωτικό ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει την παροχή καυσίμου. Τα δεδομένα για την εκπαίδευση και τη δοκιμή του νευρωνικού δικτύου συλλέχθηκαν από τον πειραματικό περιστρεφόμενο ξηραντήρα και προσαρμόστηκε βασιζόμενος στην αντίστροφη μοντελοποίηση της διαδικασίας. Τα πειράματα έδειξαν ότι ο ελεγκτής αντιδρά στις διαταραχές προς τη σωστή κατεύθυνση. Επειδή όμως η εκπαίδευση απαιτεί πολλούς υπολογισμούς, ο σχεδιασμός του συμπεριλάμβανε μια συμβιβαστική λύση μεταξύ πολυπλοκότητας και απόδοσης ελέγχου.

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε και ένας ελεγκτής εμπρόσθιας και οπίσθιας τροφοδότησης βασισμένος σε μαθηματικό μοντέλο. Ο ελεγκτής πρόσθιας τροφοδότησης υπολογίζει την επιθυμητή τιμή για τον αναλογικό ολοκληρωτικό ελεγκτή βάσει της οποίας ρυθμίζει την παροχή καυσίμου. Ο ελεγκτής οπίσθιας τροφοδότησης βασίζεται στο σφάλμα μεταξύ της μετρήσιμης και της επιθυμητής τιμής της υγρασίας του ασβέστη στην έξοδο διορθώνοντας την παροχή καυσίμου εάν χρειάζεται. Αυτό το σύστημα ελέγχου λειτουργεί ικανοποιητικά εξαιτίας του γεγονότος ότι δύναται να αντιδρά στις διαταραχές πριν αυτές φτάσουν στη διαδικασία. Η κατασκευή του ελεγκτή πρόσθιας τροφοδότησης απαιτεί όχι μόνο την αναγνώριση και τη μέτρηση των διαταραχών αλλά και τη μοντελοποίηση της διαδικασίας με μαθηματικό μοντέλο πράγμα που είναι χρονοβόρο και πολύπλοκο. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν υπάρχει γενικό μοντέλο που να περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας και μάζας εντός περιστρεφόμενου ξηραντήρα.

5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

5.1 Περιγραφή του Ξηραντηρίου

Στόχος της λειτουργίας του ξηραντηρίου της Α.Β.Ε.Α. είναι να ελαττώσει το ποσοστό της υγρασίας του ελαιοπυρήνα από 45 με 55% όπου κυμαίνεται σε μια περιοχή κοντά στο 7 με 8%. Τα δομικά στοιχεία του ξηραντηρίου παρουσιάζονται στην Εικόνα 10. Ο ελαιοπυρήνας εισέρχεται στον περιστρεφόμενο κύλινδρο του ξηραντηρίου με τη βοήθεια μεταφορικής ταινίας, που δύναται να μεταφέρει έως και 20 τόνους πυρήνα ανά ώρα.



Εικόνα 10: Τα δομικά στοιχεία του ξηραντηρίου της ΑΒΕΑ.

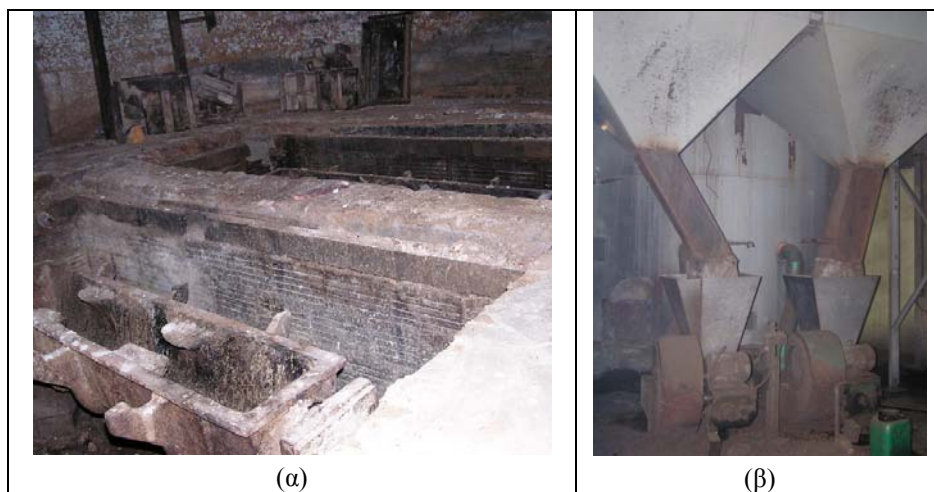
Το βασικότερο δομικό στοιχείο του ξηραντηρίου είναι ο περιστρεφόμενος κύλινδρος, μέσα στον οποίο πραγματοποιείται η διαδικασία της ξήρανσης. Είναι ένας από τους πιο κοινούς τύπους βιομηχανικού ξηραντήρα, είναι κατασκευασμένος από χάλυβα και χρησιμοποιείται με μια αρνητική εσωτερική πίεση έτσι ώστε να αποτρέπεται η διαφυγή σκόνης. Έχει μήκος 22 μέτρα και διάμετρο 2.5 μέτρα. Ο συγκεκριμένος ξηραντήρας θεωρείται άμεσος μιας και τα αέρια ξήρανσης έχουν την ίδια φορά με την κίνηση του προς ξήρανση στερεού. Στο εσωτερικό του βρίσκεται μια σειρά από 28 φτερά, πλάτους 0.25 μέτρων και μέσης απόστασης μεταξύ τους 0.2805 μέτρα, που αναταράζουν τον ελαιοπυρήνα προκειμένου να εξασφαλιστεί η επαφή τους με το θερμό ρεύμα αέρα και ταυτόχρονα να τον μεταφέρουν προς την έξοδο. Πέρα από τα φτερά στη μεταφορά του ελαιοπυρήνα προς την έξοδο βοηθάει και η μικρή κλίση της τάξης των 2 μοιρών που έχει ο κύλινδρος. Η διαμόρφωση των φτερών ποικίλει από ελικοειδή μορφή έως και ευθεία με την τελευταία να επικρατεί στον συγκεκριμένο κύλινδρο. Η επίδραση στην απόδοση του ξηραντήρα της επιλογής των χαρακτηριστικών των φτερών, όπως ο αριθμός τους, οι διαστάσεις τους και η μορφή τους, είναι πολύ σημαντική. Το μήκος των φτερών υπολογίζεται στα 21 μέτρα που σημαίνει ότι στο τελευταίο μέτρο του περιστρεφόμενου κυλίνδρου δεν υπάρχουν φτερά. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της σύνδεσης του ανεμιστήρα – απορροφητήρα στο τέλος του κυλίνδρου με συνέπεια να πρέπει στο σημείο αυτό ο ελαιοπυρήνας να

βρίσκεται στο κάτω μέρος του κυλίνδρου ώστε να μην απορροφηθεί και προκληθούν προβλήματα στη διαδικασία.



Εικόνα 11: α) Ο τρόπος εισαγωγής του ελαιοπυρήνα στον περιστρεφόμενο κύλινδρο, β) τα δύο ξηραντήρια της Α.Β.Ε.Α.

Τα αέρια ξήρανσης που διέρχονται του περιστρεφόμενου κυλίνδρου θερμαίνονται στον κλίβανο και η θερμοκρασία τους στην αρχή του δύναται να ανέλθει μέχρι και τους 600 °C. Σαν καύσιμη ύλη χρησιμοποιείται πυρηνόξυλο που είναι ένα από τα υποπροϊόντα της επεξεργασίας του ελαιοπυρήνα, είναι ο ελαιοπυρήνας απαλλαγμένος από το λάδι. Στο κάτω μέρος του κλιβάνου είναι συνδεδεμένοι δύο καυστήρες που παρέχουν συνολικά έως και 20000 κυβικά μέτρα την ώρα αέρα θερμοκρασίας από 1100 έως 1300 °C. Στον κλίβανο γίνεται και εισαγωγή αέρα περιβάλλοντος της τάξης των 60000 κυβικών μέτρων ανά ώρα για να ελαττωθεί η θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης.



Εικόνα 12: α) Το εσωτερικό του κλιβάνου και β) οι δύο καυστήρες.

Ο ανεμιστήρας παράγει τη δύναμη απορρόφησης που επιτρέπει τη διέλευση των καυσαερίων διαμέσου του περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Δημιουργεί το ρεύμα θερμού αέρα που ξηραίνει τον πυρήνα εναλλάσσοντας θερμότητα μεταξύ αυτού και του ελαιοπυρήνα. Για αυτό το λόγο η θερμοκρασία των εξερχόμενων του κυλίνδρου

αέριων ξήρανσης δεν ξεπερνάει τους 70 με 90 °C. Στην έξοδο, μαζί με τα καυσαέρια, απορροφώνται και ελαφρά σωματίδια αποξηραμένου πυρήνα και για το λόγο αυτό το αέριο ρεύμα προωθείται στον κυκλώνα. Ο τελευταίος αποτελεί ένα μηχανισμό απομάκρυνσης των σωματιδίων αυτών από το αέριο ρεύμα. Λειτουργεί ως ένας φυγοκεντρικός μηχανισμός μέσω του οποίου τα σωματίδια καθίζανουν και συλλέγονται στο κάτω μέρος του υπό μορφή σκόνης, ενώ ο καθαρός πλέον αέρας διαχέεται στο περιβάλλον από το επάνω μέρος της διάταξης.



Εικόνα 13: α) Ο απορροφητήρας του ξηραντηρίου και β) το σημείο σύνδεσής του με τον κύλινδρο ξήρανσης.

5.2 Καθορισμός των Μεταβλητών Ελέγχου του Συστήματος

Στις μεταβλητές ελέγχου του συστήματος περιλαμβάνονται οι μεταβλητές εισόδου και οι μεταβλητές εξόδου. Η επιλογή τους πραγματοποιήθηκε έχοντας ως κριτήριο την πλήρη επόπτευση της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα αλλά και τη δράση σε καίρια σημεία αυτής. Οι μεταβλητές ελέγχου είναι αυτές που εισέρχονται και εξέρχονται του ελεγκτή που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια και η πολυπλοκότητα αλλά και η αποδοτικότητα του εξαρτάται άμεσα από αυτές.

Οι μεταβλητές εισόδου είναι αυτές που θα παρέχουν όλη την απαραίτητη πληροφορία για την κατάσταση που βρίσκεται η διαδικασία ξήρανσης, σε κάθε χρονική στιγμή, στον ελεγκτή του συστήματος. Την πληροφορία αυτή καλείται να επεξεργαστεί ο ελεγκτής για να πάρει τις εκείνες αποφάσεις που θα οδηγήσουν το σύστημα στην ορθή λειτουργία που στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η διατήρηση του ποσοστού υγρασίας του ελαιοπυρήνα, που εξέρχεται του ξηραντηρίου, σε μια περιοχή κοντά στο 8%. Η πρώτη μεταβλητή εισόδου είναι η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής τιμής της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα από την τρέχουσα τιμή της. Στη συνέχεια αυτή θα αναφέρεται ως σφάλμα της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα. Η μεταβλητή αυτή θα προσδιορίζει στο σύστημα ελέγχου την απόσταση από το στόχο έτσι ώστε να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες από αυτό και

να μηδενιστεί το σφάλμα. Ως δεύτερη είσοδος ορίζεται το ποσοστό υγρασίας του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα. Δύναται να παίζει σημαντικό ρόλο στην λειτουργία του συστήματος αφού ένα υψηλό ποσοστό συνεπάγεται κατανάλωση μεγαλύτερης ενέργειας για να φτάσει η υγρασία του ελαιοπυρήνα στα επιθυμητά επίπεδα. Η τρίτη μεταβλητή εισόδου του συστήματος είναι η ποσότητα του ελαιοπυρήνα που εισέρχεται του ξηραντηρίου. Μια υπερβολικά μικρή εισερχόμενη ποσότητα οδηγεί σε μείωση της παραγωγής πράγμα που δεν είναι αποδεκτό. Από την άλλη μεριά μια μεγάλη ποσότητα δύναται να επιφέρει κορεσμό του περιστρεφόμενου κυλίνδρου με άμεσο κίνδυνο πυρκαγιάς ή στην πιο ανώδυνη περίπτωση μη σωστή ξήρανση του συνόλου του ελαιοπυρήνα. Η θερμοκρασία εντός του κυλίνδρου αποτελεί την τέταρτη είσοδο του συστήματος ελέγχου. Ουσιαστικά αυτή προσδιορίζει στο σύστημα την θερμοκρασιακή κατάσταση που επικρατεί και που καλείται να ξηράνει τον εισερχόμενο ελαιοπυρήνα.

Οι μεταβλητές εξόδου του ελεγκτή αποτελούν το μέσο επίδρασης στη διαδικασία ξήρανσης. Είναι αυτές που η κάθε μεταβολή τους οδηγεί σε αλλαγή των συνθηκών της διαδικασίας και δύνανται να επηρεάσουν το ποσοστό της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα. Οι τιμές που λαμβάνουν είναι άμεση συνέπεια της επεξεργασίας των δεδομένων των μεταβλητών εισόδου από τον ελεγκτή. Ως πρώτη μεταβλητή εξόδου ορίζεται η μεταβολή στη θερμοκρασία εντός του κυλίνδρου ενώ ως δεύτερη η μεταβολή στην εισερχόμενη ποσότητα ελαιοπυρήνα. Έχοντας ο ελεγκτής ως βάση τις τιμές τους τη συγκεκριμένη στιγμή και γνωρίζοντας το σφάλμα της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα αλλά και το ποσοστό της υγρασίας του ελαιοπυρήνα που εισέρχεται δίνει τις κατάλληλες μεταβολές που πρέπει να δεχτούν οι δύο μεταβλητές εξόδου. Έτσι επιτυγχάνεται ο στόχος της ορθής ξήρανσης.

5.3 Μοντελοποίηση του Φυσικού Συστήματος

Για την περιγραφή της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα στον περιστρεφόμενο ξηραντήρα αναπτύχθηκαν δύο μαθηματικά μοντέλα, ένα στατικό και ένα δυναμικό. Τα μοντέλα και ο τρόπος ανάπτυξης τους παρουσιάζονται στη συνέχεια.

5.3.1 Στατικό Μοντέλο Φυσικού Συστήματος

Η υγρασία του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα μπορεί να υπολογιστεί απλά ως:

$$x_i = 100(\text{βάρους νερού που απομένει} / \text{βάρους ξηραμένου προϊόντος}), \quad (28)$$

όπου, x_i είναι η υγρασία του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα.

Η (28) δύναται να αναπτυχθεί περαιτέρω αφού:

$$(\text{βάρους τελικού προϊόντος}) = (\text{ποσότητα ξηρού πυρήνα})(\text{Kgr/t}) + (\text{ποσότητα νερού που απομένει})(\text{Kgr/t}), \quad (29)$$

οπότε,

$$\begin{aligned} (\text{ποσότητα ξηρού πυρήνα}) &= (\text{ποσότητα πυρήνα}) - (\text{ποσότητα νερού που υπάρχει}) = \\ &= (1/60)[A(\text{χρόνος παραμονής}) - A(\text{χρόνος παραμονής})(x_\alpha/100)], \end{aligned} \quad (30)$$

όπου

A : η παροχή πυρήνα στον περιστρεφόμενο κύλινδρο σε (ton/hour),

x_α : η υγρασία του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα,

χρόνος παραμονής : χρόνος παραμονής του πυρήνα στον κύλινδρο σε min.

Η ποσότητα νερού που απομένει δύναται να γραφτεί:

$$\begin{aligned} (\text{ποσότητα νερού που απομένει})(\text{Kgr/t}) &= (\text{ποσότητα νερού που υπάρχει}) - (\text{ποσότητα} \\ &\text{νερού που εξατμίζεται}) = (1/60)A(\text{χρόνος παραμονής})(x_\alpha/100) - (1/617)(\text{διαθέσιμη} \\ &\text{θερμότητα για εξάτμιση}) \end{aligned} \quad (31)$$

Όμως,

$$\begin{aligned} (\text{διαθέσιμη θερμότητα για εξάτμιση})(\text{Kcal/t}) &= (\text{ωφέλιμο ποσό θερμότητας}) - (\text{δαπάνη} \\ &\text{για την άνοδο της θερμοκρασίας του πυρήνα}) = (\text{ποσό θερμότητας που} \\ &\text{εναλλάσσεται})(\text{συντελεστής απόδοσης}) - (1/60)2A(\text{χρόνος παραμονής}), \end{aligned} \quad (32)$$

Αλλά,

$$\begin{aligned} (\text{ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται}) &= (\text{ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται σε} \\ &\text{Kcal/h})(\text{χρόνος παραμονής})/60 = (k_1 a_1 + k_2 a_2)(\text{επιφάνεια εναλλαγής})(T-323) (\text{χρόνος} \\ &\text{παραμονής})/60, \end{aligned} \quad (33)$$

όπου η επιφάνεια εναλλαγής μετριέται σε m^2 και a_1 είναι ο συντελεστής αγωγής για μετάδοση θερμότητας από θερμαινόμενη επιφάνεια σε συσσωρευμένο υλικό και για μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, a_2 είναι ο συντελεστής συναγωγής περιρρέουσας σφαίρας και k_1, k_2 είναι οι συντελεστές συμμετοχής του καθενός από τους δύο συντελεστές μετάδοσης θερμότητας ($k_1 + k_2 = 1$).

Ισχύει ακόμα ότι:

$$\begin{aligned} (\text{επιφάνεια εναλλαγής}) &= (1/3)(\text{συντελεστής πληρότητας})(\text{μέσος αριθμός φτερών})(\text{μήκος} \\ &\text{φτερών}) \sqrt{\left[(\text{μέσο πλάτος φτερών})^2 + \left[\frac{1}{2}(\text{μέση απόσταση φτερών}) \right]^2 \right]}, \end{aligned} \quad (34)$$

με

$$(\text{μέση απόσταση φτερών}) = (\text{περίμετρος ξηραντηρίου})/(\text{μέσος αριθμός φτερών}) \quad (35)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (29) έως (35) στην (28) προκύπτει η σχέση (36).

$$x_t = 100 \left[\frac{c_1 A x_\alpha - c_2 (k_1 a_1 + k_2 a_2) (T - 323) + c_3 A}{c_4 A - c_2 (k_1 a_1 + k_2 a_2) (T - 323)} \right] \quad (36)$$

Όπου c_i ($i=1,2,3,4$) είναι σταθερές που σχετίζονται με τις φυσικές ιδιότητες του περιστρεφόμενου ξηραντήρα [5]. Η (36) δίνει την υγρασία του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα x_t σε συνάρτηση με την αρχική του υγρασία x_a , την ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα ελαιοπυρήνα A (ton/hour) στον περιστρεφόμενο κύλινδρο και την θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης T ($^{\circ}K$).

5.3.2 Δυναμικό Μοντέλο Φυσικού Συστήματος

Για τη δημιουργία του δυναμικού μοντέλου του φυσικού συστήματος αφετηρία είναι η γενική εξίσωση που παρουσιάζει την άμεση εξάρτηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας από τον χρόνο και την απόσταση [10]:

$$\frac{\partial x_i(l,t)}{\partial t} + v_i(t) \frac{\partial x_i(l,t)}{\partial l} = f(x_i, l, t) \quad (37)$$

όπου x είναι η υγρασία του ελαιοπυρήνα, l η γραμμική συντεταγμένη του ξηραντήρα, v η γραμμική ταχύτητα του ελαιοπυρήνα εντός του ξηραντήρα και t είναι ο χρόνος ξήρανσης. Οι δύο παράγοντες του αριστερού μέρους της εξίσωσης (37) αθροίζονται γιατί ο περιστρεφόμενος ξηραντήρας που μελετάται είναι άμεσος που σημαίνει ότι η φορά κίνησης του προς ξήρανση στερεού είναι ίδια με τη φορά των αερίων ξήρανσης. Στην αντίθετη περίπτωση μεταξύ των δύο μελών θα υπήρχε το πρόσημο πλιν.

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί δίνονται οι επεξηγήσεις των συμβόλων που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτή την ενότητα.

Πίνακας 1: Επεξηγήσεις των συμβόλων που χρησιμοποιούνται και οι μονάδες μέτρησης τους.

x_i	Θερμοκρασία ή η υγρασία του στερεού ή του αέρα	-
v_i	Γραμμική ταχύτητα του στερεού ή του αέρα	m/sec
l	Παράμετρος μήκους	m
t	Παράμετρος χρόνου	sec
C_g	Θερμοχωρητικότητα των απαερίων ξήρανσης	kJ/kg $^{\circ}K$
C_s	Θερμοχωρητικότητα του προς ξήρανση στερεού	kJ/kg $^{\circ}K$
F_g	Γραμμική πυκνότητα του αέρα ξήρανσης	kg/m
F_s	Γραμμική πυκνότητα του προς ξήρανση στερεού	kg/m
R_w	Ρυθμός ξήρανσης	1/sec
$T_{g,in}$	Θερμοκρασία απαερίων ξήρανσης στην είσοδο	$^{\circ}K$
$T_{g,out}$	Θερμοκρασία απαερίων ξήρανσης στην έξοδο	$^{\circ}K$
$T_{s,in}$	Θερμοκρασία του προς ξήρανση στερεού στην είσοδο	$^{\circ}K$
$T_{s,out}$	Θερμοκρασία του προς ξήρανση στερεού στην έξοδο	$^{\circ}K$
U_v	Συντελεστής ογκομετρικής μεταφοράς θερμότητας	kJ/m ³ $^{\circ}K$
V_v	Όγκος του ξηραντήρα ανά μονάδα μήκους	m ³ /m
$X_{s,in}$	Υγρασία του στερεού στην είσοδο	-
$X_{s,out}$	Υγρασία του στερεού στην έξοδο	-
v_g	Γραμμική ταχύτητα του αέρα ξήρανσης	m/s
v_s	Γραμμική ταχύτητα του προς ξήρανση στερεού	m/s

λ	Απαιτούμενη θερμότητα για εξάτμιση του νερού	kJ/kg
L	Μήκος του ξηραντήρα	m

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την μεταφορά μάζας και θερμότητας σε ένα άμεσο περιστρεφόμενο ξηραντήρα.

$$\frac{\partial X}{\partial t} + v_s \frac{\partial X}{\partial l} = -R_w \quad (38)$$

$$C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} + v_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial l} = \frac{U_v V_v}{F_s} (T_g - T_s) - \lambda R_w \quad (39)$$

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + v_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial l} = -\frac{U_v V_v}{F_g} (T_g - T_s) - \lambda \frac{F_s}{F_g} R_w \quad (40)$$

Οι εξισώσεις αυτές έχουν βασιστεί σε ορισμένες παραδοχές που είναι: α) ο συντελεστής ογκομετρικής μεταφοράς θερμότητας είναι σταθερός σε όλο το μήκος του ξηραντήρα, β) η θερμότητα που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού είναι σταθερή, γ) η γραμμική ταχύτητα των απαερίων ξήρανσης είναι σταθερή, δ) οι κόκκοι του προς ξήρανση στερεού είναι σταθερή, ε) δε πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, στ) οι απώλειες θερμότητας από τον περιστρεφόμενο ξηραντήρα είναι αμελητέες.

Στις τρεις προηγούμενες εξισώσεις (38), (39) και (40) αντικαθίσταται η συντεταγμένη του μήκους l , με L το ολικό μήκος του ξηραντήρα. Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{dX_{s,out}}{dt} + v_s \frac{(X_{s,out} - X_{s,in})}{L} = -R_w \quad (41)$$

$$C_s \frac{dT_{s,out}}{dt} + v_s C_s \frac{(T_{s,out} - T_{s,in})}{L} = \frac{U_v V_v}{F_s} (T_{g,out} - T_{s,out}) - \lambda R_w \quad (42)$$

$$C_g \frac{dT_{g,out}}{dt} + v_g C_g \frac{(T_{g,out} - T_{g,in})}{L} = -\frac{U_v V_v}{F_g} (T_{g,out} - T_{s,out}) - \lambda \frac{F_s}{F_g} R_w \quad (43)$$

Το μοντέλο είναι μη γραμμικό εξαιτίας της παραμέτρου R_w που αναπαριστά το ρυθμό ξήρανσης. Ο ρυθμός ξήρανσης υπολογίζεται ως:

$$R_w = k_1 X_s + k_2 T_s + k_3 T_g \quad (44)$$

όπου οι k_1 , k_2 , k_3 σταθερές που υπολογίζονται πειραματικά.

Το γραμμικοποιημένο μοντέλο στη γενική του μορφή μπορεί να γραφεί ως:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (45)$$

$$y = Cx \quad (46)$$

όπου

$$x = \begin{bmatrix} X_{s,out} \\ T_{s,out} \\ T_{g,out} \end{bmatrix} \text{ οι καταστάσεις του συστήματος και } u = \begin{bmatrix} T_{g,in} \\ T_{s,in} \\ X_{s,in} \\ v_s \\ F_g \\ F_s \end{bmatrix} \text{ οι είσοδοι του, με}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

όπου

$$a_{11} = -\left(\frac{1}{L}\bar{v}_s + k_1\right), a_{12} = -k_2, a_{13} = -k_3, a_{21} = -\frac{\lambda k_1}{C_s}, a_{22} = -\left(\frac{1}{L}\bar{v}_s + \frac{U_v V_v}{C_s \bar{F}_s} + \frac{\lambda k_2}{C_s}\right)$$

$$a_{23} = \frac{U_v V_v}{C_s \bar{F}_s} - \frac{\lambda k_3}{C_s}, a_{31} = -\frac{\lambda \bar{F}_s}{C_g \bar{F}_g} k_1, a_{32} = \frac{U_v V_v}{C_g \bar{F}_g} - \frac{\lambda \bar{F}_s}{C_g \bar{F}_g} k_2,$$

$$a_{33} = -\left(\frac{1}{L}\bar{v}_g + \frac{U_v V_v}{C_g \bar{F}_g} + \frac{\lambda \bar{F}_s}{C_g \bar{F}_g} k_3\right)$$

και

$$b_{11} = b_{12} = b_{15} = b_{16} = b_{21} = b_{23} = b_{25} = b_{32} = b_{33} = b_{34} = 0$$

$$b_{13} = \frac{1}{L}\bar{v}_s, b_{14} = -\frac{1}{L}(\bar{X}_{s,out} - \bar{X}_{s,in}), b_{22} = \frac{1}{L}\bar{v}_s, b_{24} = -\frac{1}{L}(\bar{T}_{s,out} - \bar{T}_{s,in}),$$

$$b_{26} = -\frac{U_v V_v}{C_s \bar{F}_s^2}(\bar{T}_{g,out} - \bar{T}_{s,out}), b_{31} = \frac{1}{L}\bar{v}_s,$$

$$b_{35} = (\bar{T}_{g,out} - \bar{T}_{s,out})\frac{U_v V_v}{C_g \bar{F}_g^2} + \frac{\lambda \bar{F}_s}{C_g \bar{F}_g^2}(k_1 \bar{X}_{s,out} + k_2 \bar{T}_{s,out} + k_3 \bar{T}_{g,out}),$$

$$b_{36} = -\frac{\lambda}{C_g \bar{F}_g}(k_1 \bar{X}_{s,out} + k_2 \bar{T}_{s,out} + k_3 \bar{T}_{g,out})$$

Το γενικευμένο μοντέλο προσαρμόστηκε στο ξηραντήριο της ΑΒΕΑ και στην προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου. Η νέα μορφή των μεταβλητών και των παραμέτρων έχει ως εξής:

$$x = \begin{bmatrix} X_{s,out} \\ T_{g,out} \end{bmatrix} \text{ και } u = \begin{bmatrix} T_{g,in} \\ X_{s,in} \\ F_s \end{bmatrix}$$

Από το διάνυμα κατάστασης του συστήματος x αφαιρέθηκε η μεταβλητή $T_{s,out}$ που συμβολίζει τη θερμοκρασία του προς ξήρανση στερεού στην έξοδο σε ($^{\circ}K$). Η μεταβλητή αυτή για το συγκεκριμένο πρόβλημα δεν αποτελεί κρίσιμη παράμετρο του συστήματος ελέγχου. Η πληροφορία που θα μπορούσε να δώσει στο σύστημα

καλύπτεται από την πληροφορία που δίνει η μεταβλητή $T_{g,out}$ (θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης στην έξοδο σε $^{\circ}K$).

Από το διάνυσμα των εισόδων του συστήματος u αφαιρέθηκαν οι μεταβλητές: η $T_{s,in}$ (θερμοκρασία του προς ξήρανση στερεού στην είσοδο σε $^{\circ}K$), η v_s (γραμμική ταχύτητα του προς ξήρανση στερεού σε m/s) και η F_g (γραμμική πυκνότητα του αέρα ξήρανσης σε kg/m). Η πρώτη μεταβλητή αφαιρέθηκε από το δυναμικό μοντέλο του φυσικού συστήματος γιατί οι μεταβολές στην τιμή της κρίνεται ότι δε μπορούν να επηρεάσουν το σύστημα ελέγχου. Ουσιαστικά η $T_{s,in}$ δίνει την θερμοκρασία του εισερχόμενου στο ξηραντήριο ελαιοπυρήνα που ισούται με την εκάστοτε θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Θερμοκρασία της οποίας οι μεταβολές δεν είναι μεγάλες εξαιτίας του προστατευόμενου χώρου αποθήκευσης του πυρήνα. Η δεύτερη μεταβλητή, η γραμμική ταχύτητα του προς ξήρανση στερεού (v_s), παραμένει σταθερή για αυτό και αφαιρείται ενώ αυτή που μεταβάλλεται είναι η ποσότητα του ελαιοπυρήνα ανά μέτρο. Η τελευταία μεταβλητή, η γραμμική πυκνότητα του αέρα ξήρανσης (F_g), αφαιρείται από το διάνυσμα εισόδου u του δυναμικού μοντέλου γιατί η τιμή της παραμένει πάντα σταθερή αφού η ροή του αέρα εντός του περιστρεφόμενου κυλίνδρου ξήρανσης δε μεταβάλλεται.

Από τα δύο διανύσματα x και u γίνεται κατανοητό ότι το σύστημα ελέγχου αποτελείται από τρεις εισόδους (το διάνυσμα u έχει διαστάσεις 3×1) και δύο εξόδους (το διάνυσμα x έχει διαστάσεις 2×1). Έτσι οι πίνακες A , B και C , είναι

$$A = \begin{bmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{21} & b_{23} & b_{26} \\ b_{31} & b_{33} & b_{36} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}$$

με

$$a_{21} = -\frac{\lambda k_1}{C_s}, a_{23} = \frac{U_v V_v}{C_s \bar{F}_s} - \frac{\lambda k_3}{C_s}, a_{31} = -\frac{\lambda \bar{F}_s}{C_g \bar{F}_g} k_1, a_{33} = -\left(\frac{1}{L} \bar{v}_g + \frac{U_v V_v}{C_g \bar{F}_g} + \frac{\lambda \bar{F}_s}{C_g \bar{F}_g} k_3 \right)$$

και

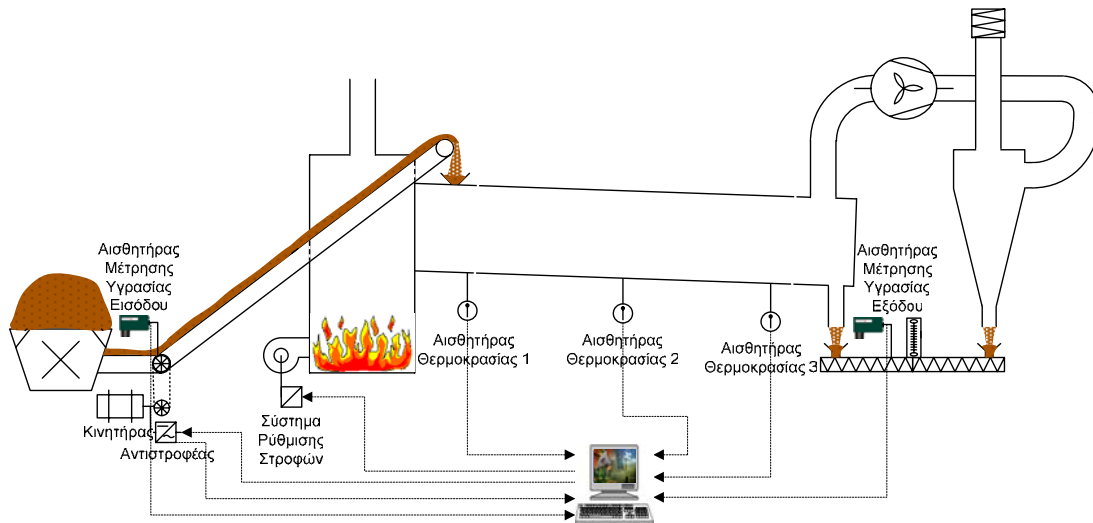
$$b_{21} = b_{23} = b_{33} = 0, b_{26} = -\frac{U_v V_v}{C_s \bar{F}_s^2} (\bar{T}_{g,out} - \bar{T}_{s,out}), b_{31} = \frac{1}{L} \bar{v}_s \text{ και}$$

$$b_{36} = -\frac{\lambda}{C_g \bar{F}_g} (k_1 \bar{X}_{s,out} + k_2 \bar{T}_{s,out} + k_3 \bar{T}_{g,out})$$

5.4 Πειραματικές Διατάξεις στο Πραγματικό Σύστημα Ξήρανσης

Για τον έλεγχο της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα τοποθετήθηκαν σε καίρια σημεία της ειδικά αισθητήρια και επενεργητές (Εικόνα 14). Τα αισθητήρια συλλέγουν όλες τις χρήσιμες πληροφορίες της διαδικασίας και τις οδηγούν στο σύστημα ελέγχου για επεξεργασία. Οι επενεργητές καλούνται να εκτελέσουν τις εντολές που θα λάβουν από το σύστημα ελέγχου, μετά την επεξεργασία των

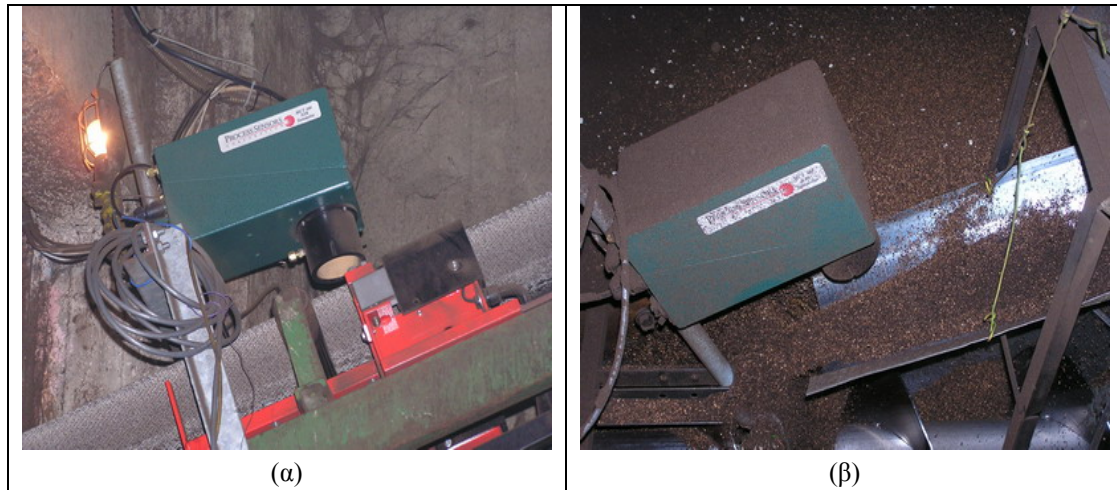
δεδομένων, και με το τρόπο αυτό να επηρεάσουν τη διαδικασία οδηγώντας την έτσι προς το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Εικόνα 14: Τα σημεία σύνδεσης των αισθητηρίων και των επενεργητών.

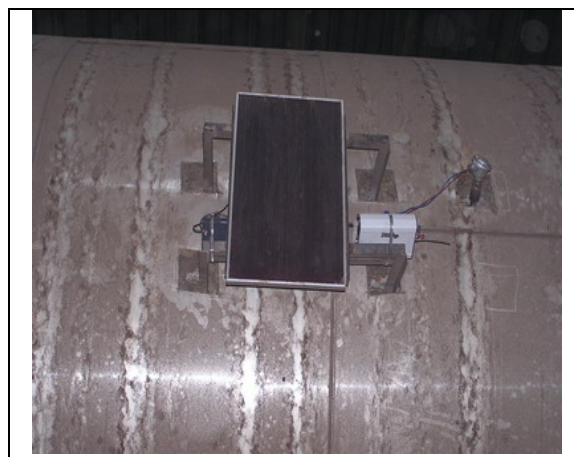
Στην ταινία μεταφοράς του ελαιοπυρήνα, από το σημείο αποθήκευσης στον περιστρεφόμενο ξηραντήρα, τοποθετήθηκε ένας αισθητήρας υπερύθρων, Εικόνα 15α, για τη μέτρηση της υγρασίας του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα. Ο αισθητήρας αυτός είναι το μοντέλο *MCT-300* της εταιρείας *PROCESS SENSORS*. Έχει τη δυνατότητα να μετράει την υγρασία κινούμενου σε μεταφορική ταινία δείγματος δίχως να έρχεται σε επαφή με αυτό και να στέλνει τις μετρήσεις του σε πραγματικό χρόνο στο σύστημα ελέγχου. Ένα ίδιο υγρόμετρο τοποθετήθηκε και στην έξοδο του κυλίνδρου ξήρανσης, Εικόνα 15β, ώστε να λαμβάνεται και η τελική τιμή της υγρασίας του. Και οι δύο αυτές τιμές είναι πολύ σημαντικές παράμετροι για το σύστημα ελέγχου. Η πρώτη παρουσιάζει στο σύστημα το μέγεθος της υγρασίας του εισερχόμενου πυρήνα έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες στο ξηραντήριο. Η δεύτερη δίνει στο σύστημα ελέγχου το σφάλμα της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα με αποτέλεσμα να μπορεί να ελεγχθεί αν έχει επιτευχθεί ο στόχος, αν και κατά πόσο διαφέρει η τρέχουσα τιμή υγρασίας από αυτόν και αν έχει την τάση να πλησιάσει τον στόχο ή να απομακρυνθεί από αυτόν.

Για τον υπολογισμό της ποσότητας του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα στον περιστρεφόμενο ξηραντήρα, εγκαταστάθηκε στην ταινία μεταφοράς ένα σύστημα μέτρησης του βάρους του. Το σύστημα αυτό προέρχεται από την εταιρεία *SIEMENS* και ανήκει στη σειρά *Siemens Milltronics MUS*. Δύναται να υπολογίζει το βάρος του ελαιοπυρήνα που βρίσκεται πάνω στη μεταφορική ταινία σε κάθε χρονική στιγμή, με μεγάλη ακρίβεια, και να το αποστέλλει σε πραγματικό χρόνο στη μονάδα ελέγχου.



Εικόνα 15: α) Αισθητήριο Υγρασίας τοποθετημένο στην είσοδο και β) στην έξοδο του συστήματος ξήρανσης.

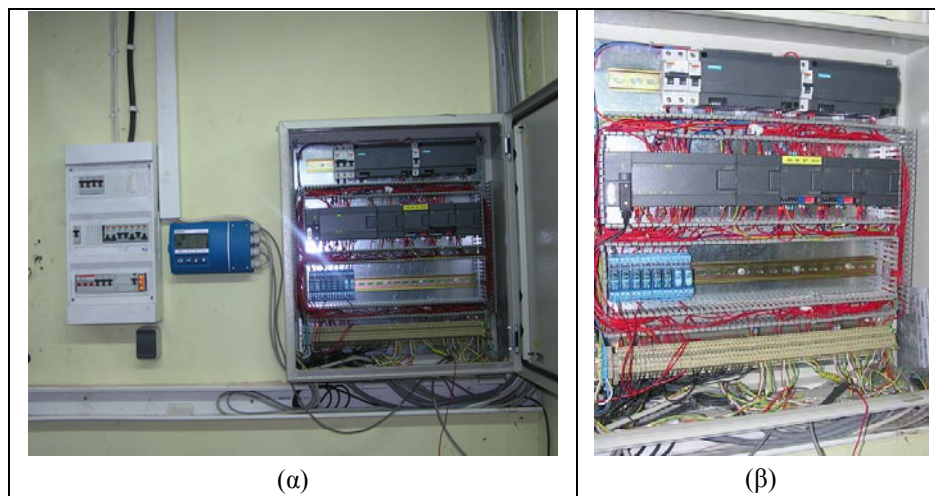
Ένα σύστημα αισθητηρίων θερμοκρασίας τοποθετήθηκε πριν, πάνω και μετά τον περιστρεφόμενο κύλινδρο έτσι ώστε σε κάθε χρονική στιγμή της διαδικασίας ξήρανσης το σύστημα ελέγχου να ενημερώνεται για τις τιμές θερμοκρασίας που υφίστανται μέσα στον περιστρεφόμενο κύλινδρο ξήρανσης. Τα αισθητήρια θερμοκρασίας που χρησιμοποιούνται είναι τύπου *NiCr-Ni* με δυνατότητα μέτρησης θερμοκρασιών έως και 1000 °C. Η λειτουργία τους βασίζεται στο ηλεκτρικό ρεύμα και μπορούν να αποστείλουν στη μονάδα ελέγχου από 4 έως και 20 mA ανάλογα με τη θερμοκρασία που δέχονται. Τα θερμοστοιχεία που βρίσκονται πριν και μετά τον περιστρεφόμενο κύλινδρο στέλνουν τα δεδομένα τους ενσύρματα σε αντίθεση με το θερμοστοιχείο που βρίσκεται πάνω στον κύλινδρο. Σε αυτό έχει συνδεθεί μια μονάδα ασύρματης επικοινωνίας (πομπός) που επικοινωνεί με ένα σταθμό βάσης (δέκτης) και τα δεδομένα στέλνονται ασύρματα ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία του παρά την περιστροφή του κυλίνδρου. Τη φόρτιση της μπαταρίας του πομπού έχει αναλάβει μία φωτοβολταϊκή επιφάνεια (Εικόνα 16).



Εικόνα 16: Θερμοστοιχείο τοποθετημένο πάνω στον περιστρεφόμενο κύλινδρο συνδεδεμένο με πομπό ασύρματης μετάδοσης δεδομένων.

Οι τρόποι δράσης στη διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα είναι δύο, η μεταβολή της θερμοκρασίας των αερίων ξήρανσης και η μεταβολή στην εισερχόμενη ποσότητα του ελαιοπυρήνα. Δύο είναι και οι επενεργητές που χρησιμοποιούνται στο σύστημα ελέγχου. Για τη μεταβολή της εισερχόμενης ποσότητας χρησιμοποιείται ο αντιστροφέας (inverter) *Micromaster 420* της *SIEMENS*. Είναι τοποθετημένος στον κοχλία που τροφοδοτεί την μεταφορική ταινία με ελαιοπυρήνα και ρυθμίζει την ταχύτητα περιστροφής του. Με τον τρόπο αυτό ρυθμίζεται η παροχή ελαιοπυρήνα στον περιστρεφόμενο ξηραντήρα. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας πραγματοποιείται με το δεύτερο επενεργητή, ένα σύστημα μεταβολής των στροφών που έχει τοποθετηθεί στους δύο ανεμιστήρες (blowers) που βρίσκονται στον κλίβανο του ξηραντηρίου. Οι δύο αυτοί ανεμιστήρες τροφοδοτούν τον κύλινδρο με αέρα και ανάλογα με την ένταση λειτουργίας τους αυξάνεται και μειώνεται η θερμοκρασία στον περιστρεφόμενο ξηραντήρα.

Όλα τα σήματα που προέρχονται από τα αισθητήρια καταλήγουν σε κάρτες εισόδου-εξόδου και στον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή (PLC) της σειράς *S7-200* της *SIEMENS*. Από εκεί ξεκινάνε και τα σήματα για τους επενεργητές. Το λογισμικό ελέγχου και απεικόνισης που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη μονάδα ελέγχου είναι το *SIMATIC WinCC flexible 2004 SP1 Advanced* επίσης της *SIEMENS*.

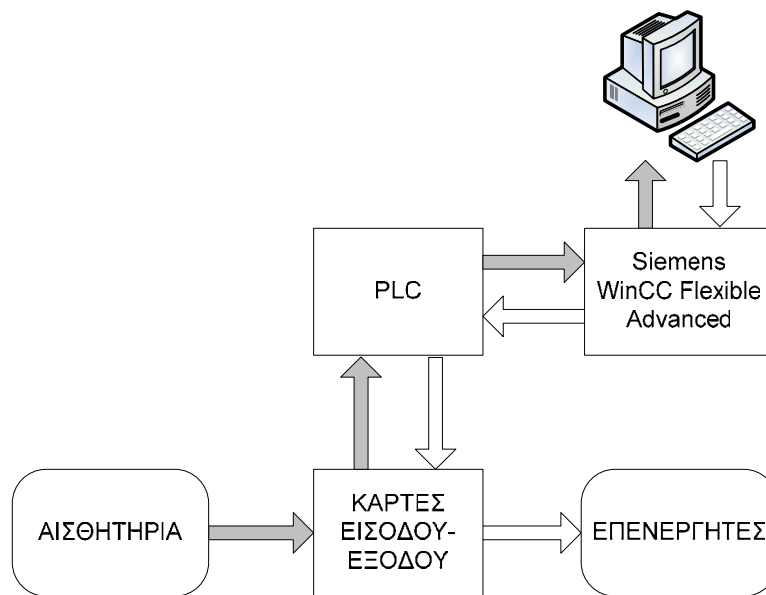


Εικόνα 17: α) Ο πίνακας ελέγχου με τον ηλεκτρολογικό πίνακα και β) τα PLC και οι κάρτες συλλογής δεδομένων εντός του πίνακα ελέγχου.

5.5 Λογισμικό Απεικόνισης και Ελέγχου της Διαδικασίας Ξήρανσης του Ελαιοπυρήνα

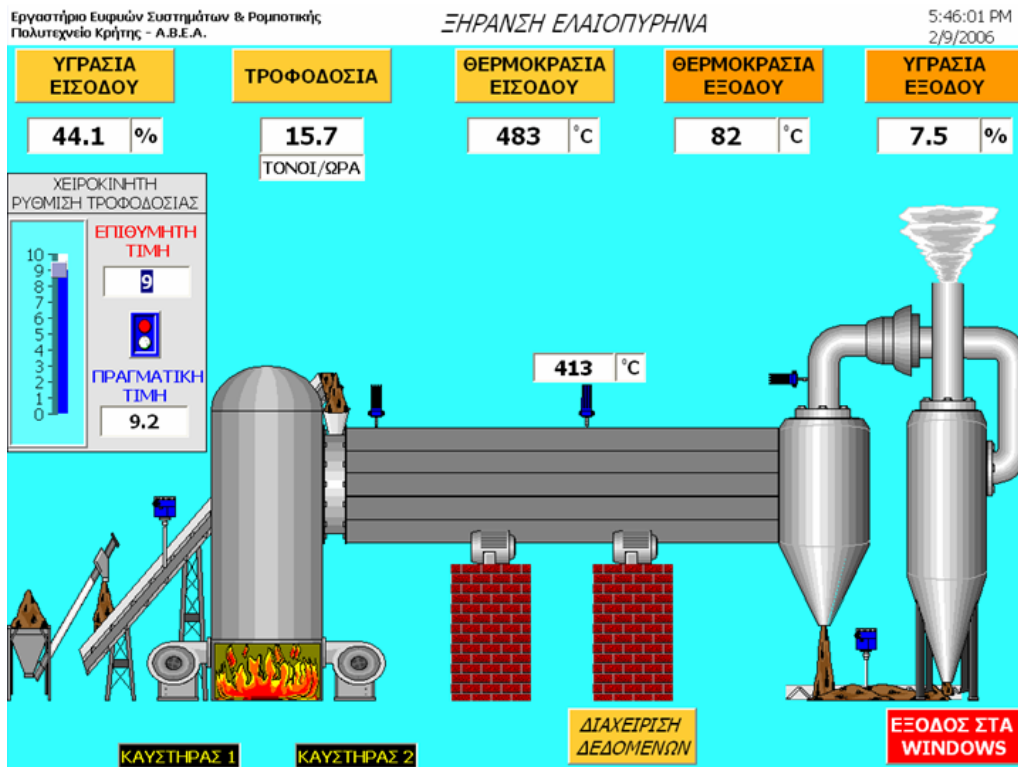
Τα σήματα που στέλνονται από τα αισθητήρια, που τοποθετήθηκαν στο ξηραντήριο, είναι ηλεκτρικό ρεύμα σε mA. Για να γίνονται αυτά κατανοητά από τον εκάστοτε χρήστη του συστήματος θα πρέπει στην οθόνη του υπολογιστή να μετατρέπονται σε μεγέθη που μετρώνται στις αντίστοιχες μονάδες της παραμέτρου

που καταγράφουνε. Έτσι η θερμοκρασία θα πρέπει να παρουσιάζεται σε $^{\circ}\text{C}$, η εισερχόμενη ποσότητα ελαιοπυρήνα (τροφοδοσία) σε *τόνους/ώρα*, και η υγρασία σε επί τοις εκατό ποσοστό. Για να γίνει αυτό, συνεργάζεται το λογισμικό προγραμματισμού του PLC μαζί με το λογισμικό *WinCC flexible Advanced* και δημιουργούν μια αντιστοίχιση μεταξύ των σημάτων ρεύματος που στέλνουν τα αισθητήρια και των αντίστοιχων θερμοκρασιών, ή ποσοστών υγρασίας ή τόνων/ώρα. Στην Εικόνα 18 που ακολουθεί παρουσιάζεται η διαδρομή των σημάτων από τα αισθητήρια προς τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και η αντίστροφη πορεία από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή προς τους επενεργητές.



Εικόνα 18: Δομικό διάγραμμα συσκευών ελέγχου.

Στην Εικόνα 19 φαίνεται ο τρόπος που παρουσιάζεται στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή η διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα. Παρουσιάζεται γραφικά το ξηραντήριο με όλα τα δομικά του στοιχεία όπως αυτό υφίσταται στις εγκαταστάσεις της Α.Β.Ε.Α. στα Χανιά. Ταυτόχρονα παρουσιάζονται στο χρήστη και όλα τα σήματα που φτάνουν από τα αισθητήρια που έχουν τοποθετηθεί, η υγρασία εισόδου και εξόδου, η θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης στην είσοδο, στη μέση και στην έξοδο του περιστρεφόμενου κυλίνδρου και η τροφοδοσία ελαιοπυρήνα. Κάθε αισθητήριο αντιστοιχίζεται με μεταβλητή με διάφορες παραμέτρους ώστε να ρυθμίζεται η κλίμακα, η ακρίβεια σε δεκαδικά ψηφία που πιθανόν να χρειάζεται, το είδος του αριθμού (ακέραιος, πραγματικός, κ.α.) και άλλα στοιχεία της κάθε μεταβλητής.

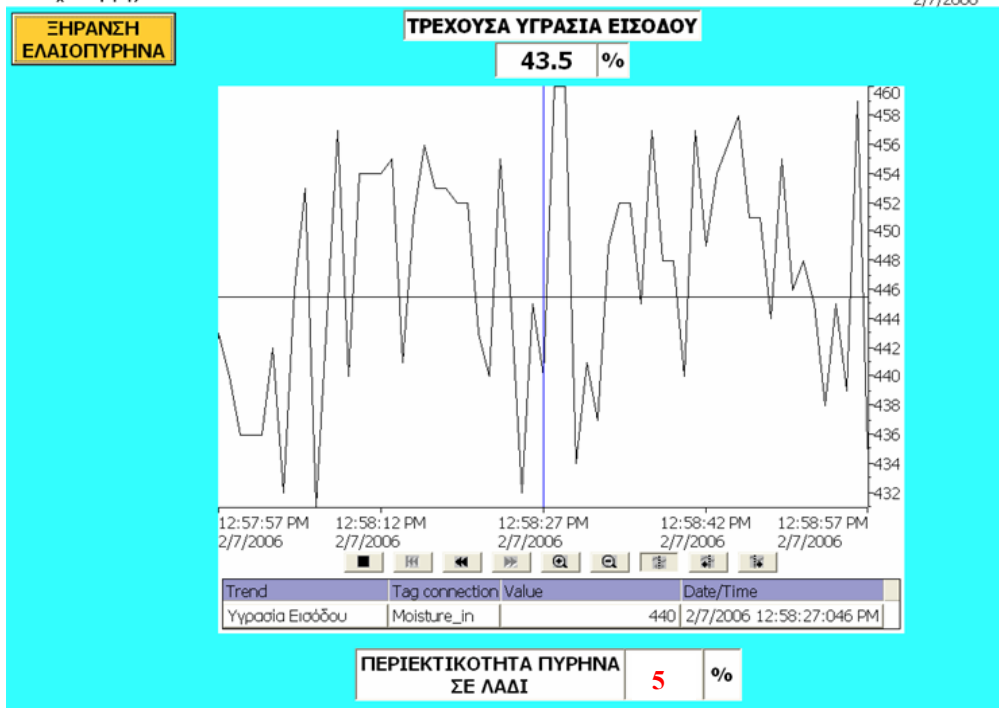


Εικόνα 19: Το κεντρικό παράθυρο επικοινωνίας του χρήστη με το σύστημα ελέγχου.

Τα πλαίσια (πλήκτρα – κουμπιά) “ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ”, “ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ”, “ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ”, “ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ” και “ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ” οδηγούν το χρήστη σε διαφορετικά παράθυρα μέσω των οποίων μπορεί να παρατηρήσει την εξέλιξη της εκάστοτε μεταβλητής στη διάρκεια του χρόνου. Στην Εικόνα 20 παρουσιάζονται τα στοιχεία της μεταβλητής “ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ” όπου φαίνεται η τρέχουσα τιμή της υγρασίας του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα αλλά και το διάγραμμα της διακύμανσης της στη μονάδα του χρόνου. Ο χρόνος αυτός μπορεί να καθοριστεί και κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως και όλο το εικοσιτετράωρο. Πέρα από την υγρασία του ελαιοπυρήνα μετράται ταυτόχρονα από τον αισθητήρα υπερύθρων και η ποσότητα λαδιού που περιέχεται σε αυτόν. Το πλαίσιο - κουμπί “ΞΗΡΑΝΣΗ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ” οδηγεί κάθε φορά το χρήστη πίσω στην κεντρική εικόνα.

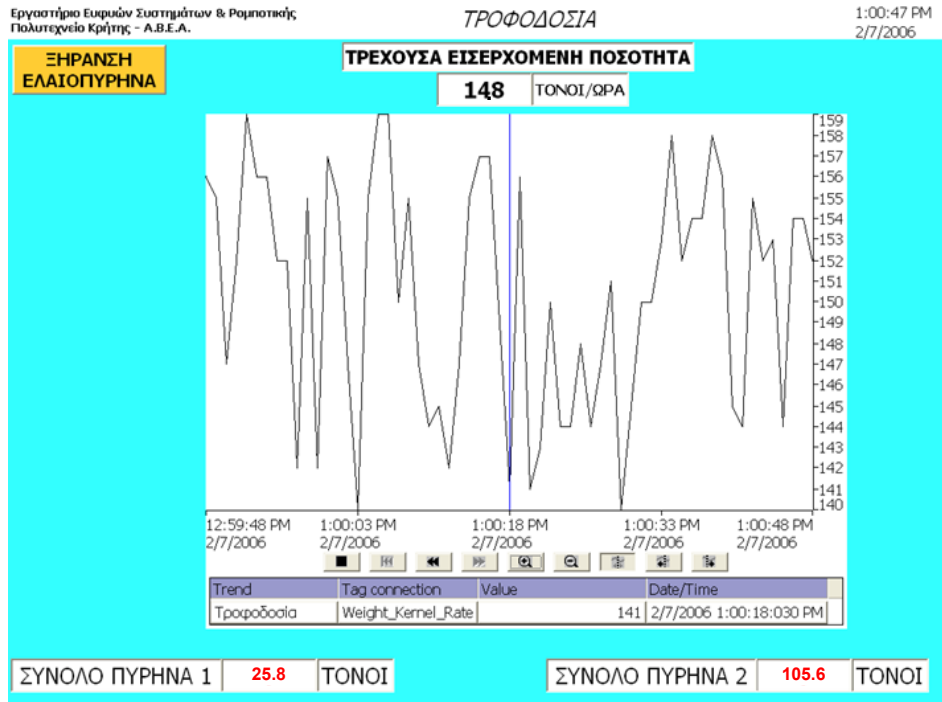
Εργαστήριο Ευφυών Συστημάτων & Ρομποτικής
Πολυτεχνείο Κρήτης - Α.Β.Ε.Α.

ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ

12:58:57 PM
2/7/2006

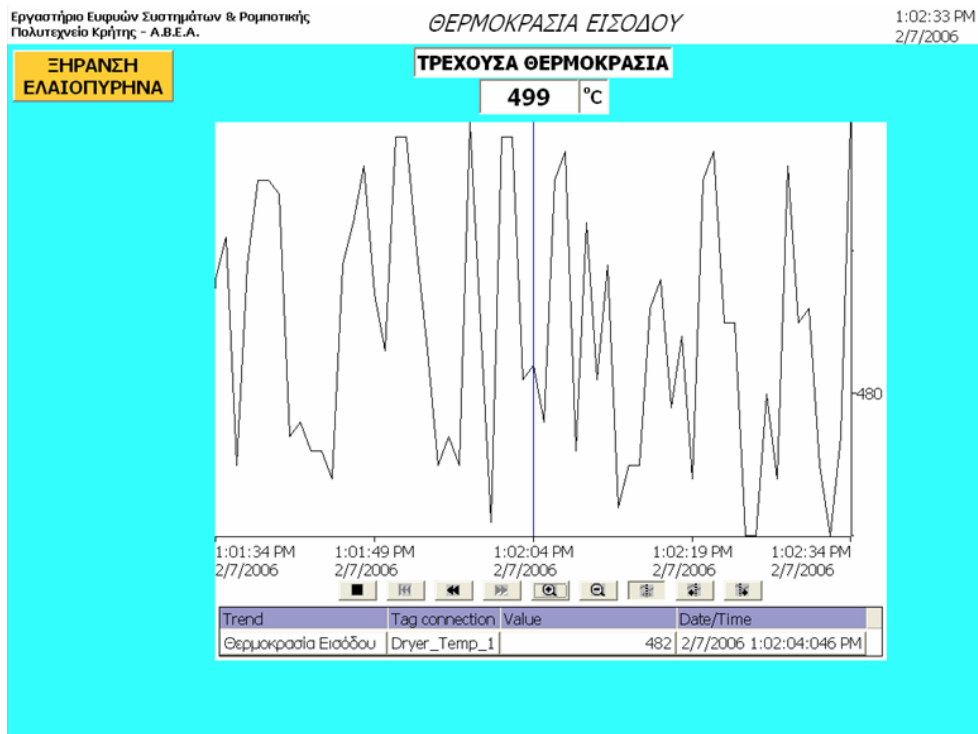
Εικόνα 20: Το παράθυρο καταγραφής της μεταβλητής "ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ".

Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται στοιχεία από την εισερχόμενη ποσότητα ελαιοπυρήνα εντός του ξηραντηρίου. Φαίνεται ο τρέχων ρυθμός εισόδου σε τόνους ανά ώρα καθώς και η διακύμανση του στο χρόνο. Στο κάτω μέρος υπάρχουν και δύο άθροιστές που δίνουν το μερικό (σύνολο πυρήνα 1) και το συνολικό (σύνολο πυρήνα 2) άθροισμα της ποσότητας που έχει εισέλθει στο ξηραντήριο. Ως μερικό άθροισμα ορίζεται η ημερήσια συνολική ποσότητα ενώ ως ολικό άθροισμα η ποσότητα που έχει εισέλθει σε όλη τη περίοδο λειτουργίας.



Εικόνα 21: Το παράθυρο της μεταβλητής *“ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ”* με τη διακύμανση της στο χρόνο και το συνολικό και μερικό άθροισμα.

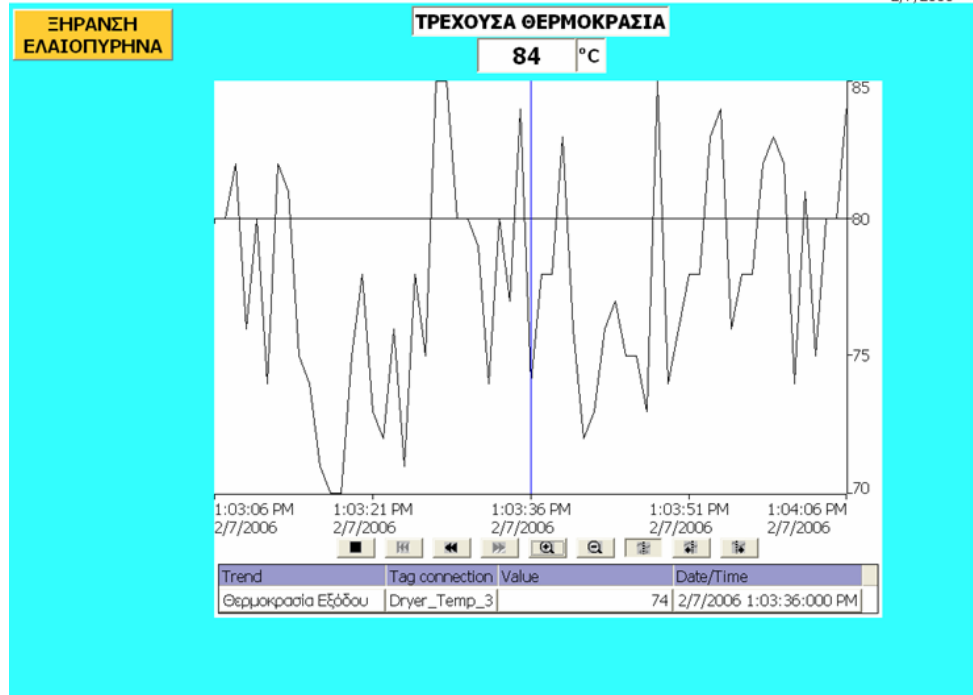
Στις Εικόνες 22, 23 και 24 φαίνονται τα παράθυρα απεικόνισης για τη θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης στην είσοδο και στην έξοδο του περιστρεφόμενου κυλίνδρου και για την υγρασία του ελαιοπυρήνα καθώς εξέρχεται της διαδικασίας ξήρανσης. Πέρα από τις τρέχουσες τιμές για τη κάθε μία από αυτές τις μεταβλητές εμφανίζονται και τα διαγράμματα της διακύμανσης τους.



Εικόνα 22: Το παράθυρο της μεταβλητής *“ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ”*.

Εργαστήριο Ευκρίων Συστημάτων & Ρομποτικής
Πολυτεχνείο Κρήτης - Α.Β.Ε.Α.

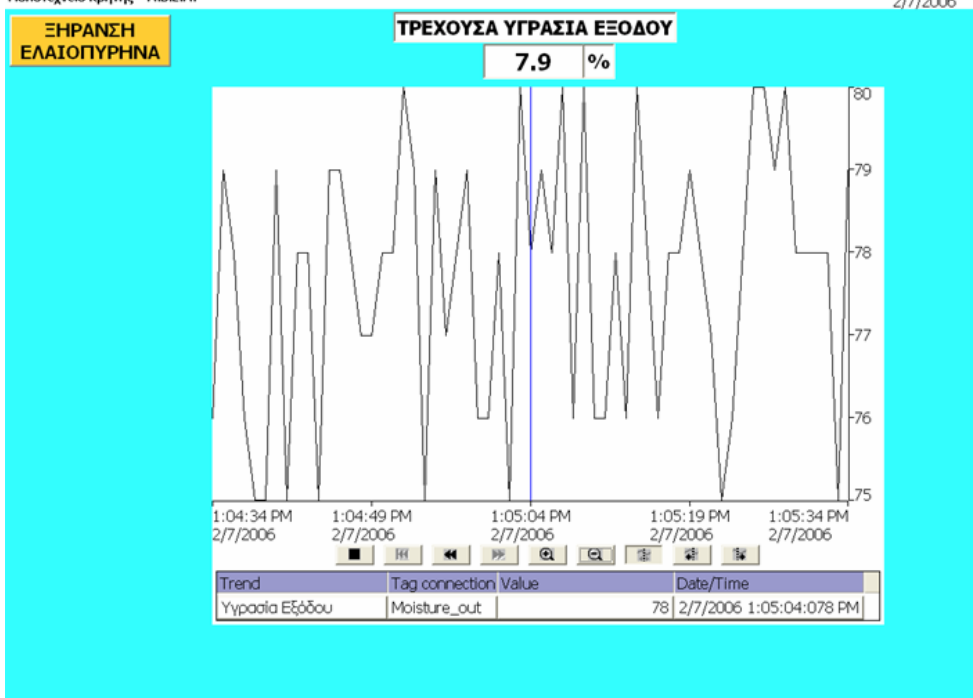
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ

1:04:05 PM
2/7/2006

Εικόνα 23: Το παράθυρο της μεταβλητής "ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ".

Εργαστήριο Ευκρίων Συστημάτων & Ρομποτικής
Πολυτεχνείο Κρήτης - Α.Β.Ε.Α.

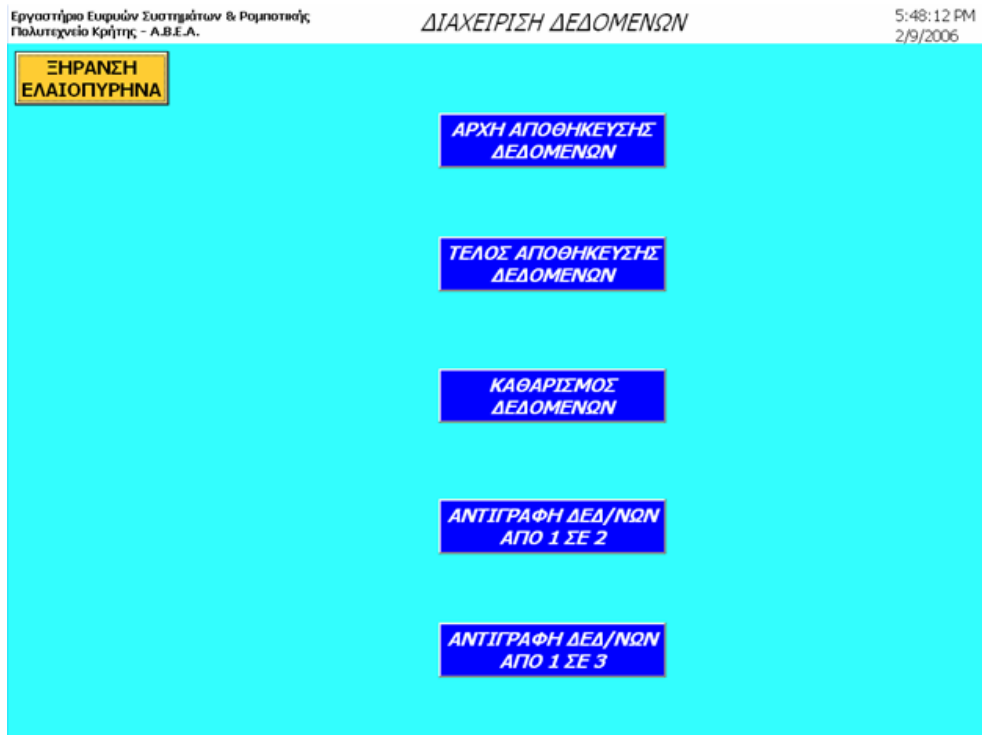
ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ

1:05:34 PM
2/7/2006

Εικόνα 24: Το παράθυρο της μεταβλητής "ΥΓΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ".

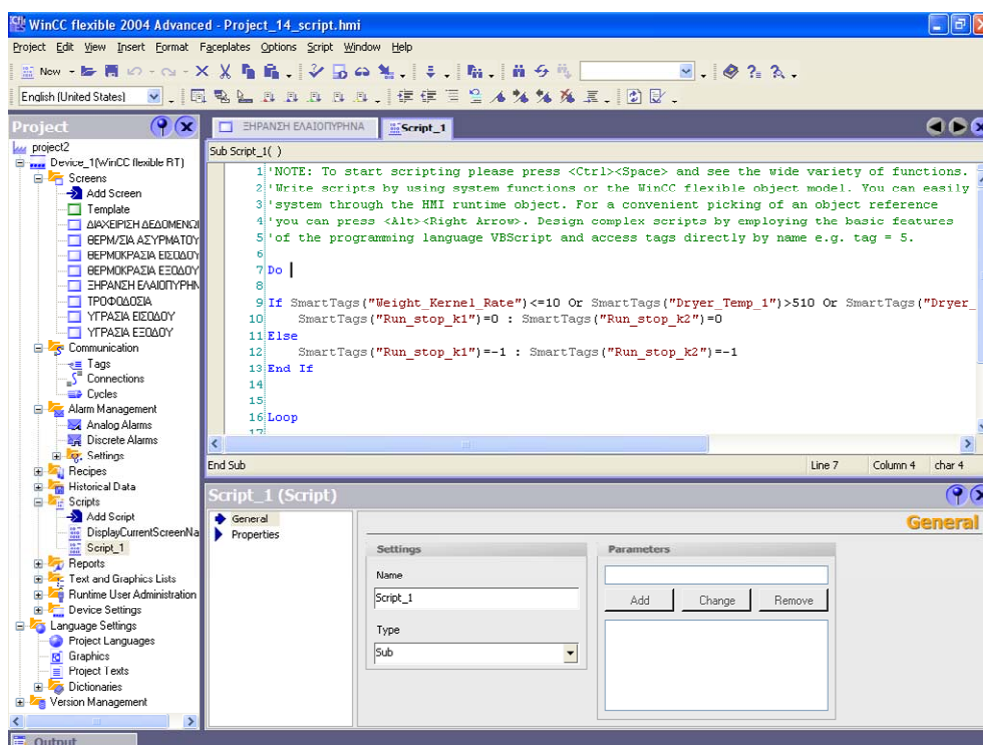
Η καταγραφή δεδομένων, πέρα από τον έλεγχο της ορθής εξέλιξης της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα, προσφέρει και τα δεδομένα που απαιτούνται για να εκπαιδευτούν ασαφείς και νευρο-ασαφείς ελεγκτές. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε αρχείο excel στο σκληρό δίσκο του ηλεκτρονικού υπολογιστή και

είναι διαθέσιμα για οποιαδήποτε χρήση. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε το παράθυρο **“ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ”** που παρουσιάζεται στην Εικόνα 25. Από εκεί ο χρήστης δύναται να δώσει εντολή ώστε να αρχίσει η καταγραφή των δεδομένων ή να σταματήσει αντίστοιχα. Η αποθήκευση των δεδομένων μπορεί να γίνει σε τρία διαφορετικά αρχεία και η αντιγραφή τους από το πρώτο στο δεύτερο ή στο τρίτο πραγματοποιείται με το πάτημα των δύο τελευταίων κουμπιών αντίστοιχα. Υπάρχει και το κουμπί **“ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ”** που χρησιμεύει στη διαγραφή των υπαρχόντων δεδομένων από το πρώτο αρχείο.



Εικόνα 25: Το παράθυρο καταγραφής και διαχείρισης των δεδομένων.

Το λογισμικό *WinCC flexible Advanced* πέρα από την απεικόνιση του συστήματος που προσφέρει, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να δημιουργήσει και τον ελεγκτή του συστήματος μέσα από αυτό. Ο προγραμματισμός γίνεται σε γλώσσα *Visual Basic Script (VBS)* και δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να διαχειριστεί όλες τις διαθέσιμες μεταβλητές. Ο κώδικας που δημιουργείται δέχεται ως εισόδους τα δεδομένα από τα αισθητήρια και αφού τα επεξεργαστεί δίνει τις κατάλληλες εντολές στο Προγραμματιζόμενο Λογικό Ελεγκτή (PLC) για τα μεταφερθούν από αυτόν τα αντίστοιχα *mA* ρεύματος ή το λογικό 1 ή 0 στους επενεργητές. Ο κώδικας αυτός μπορεί να ενεργοποιείται όποτε επιθυμήσει ο χρήστης ή εναλλακτικά μπορεί να ενεργοποιείται άμεσα με την εκκίνηση του προγράμματος. Έτσι μπορεί να υπάρχει εναλλακτικά χειροκίνητη και αυτόματη λειτουργία της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα.

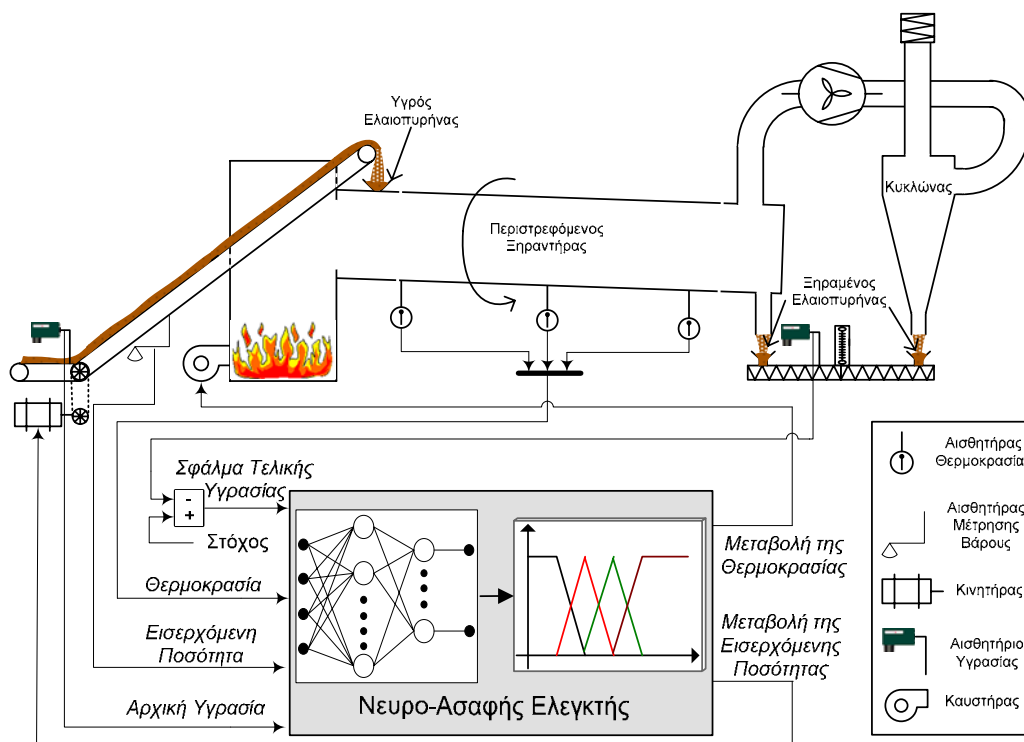


Εικόνα 26: Δημιουργία ενός προγράμματος ελέγχου στο *WinCC flexible Advanced*.

6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ

6.1 Δομή των Νευρο-Ασαφών Ελεγκτών που θα Χρησιμοποιηθούν στην Προσομοίωση του Συστήματος Ελέγχου [11], [12]

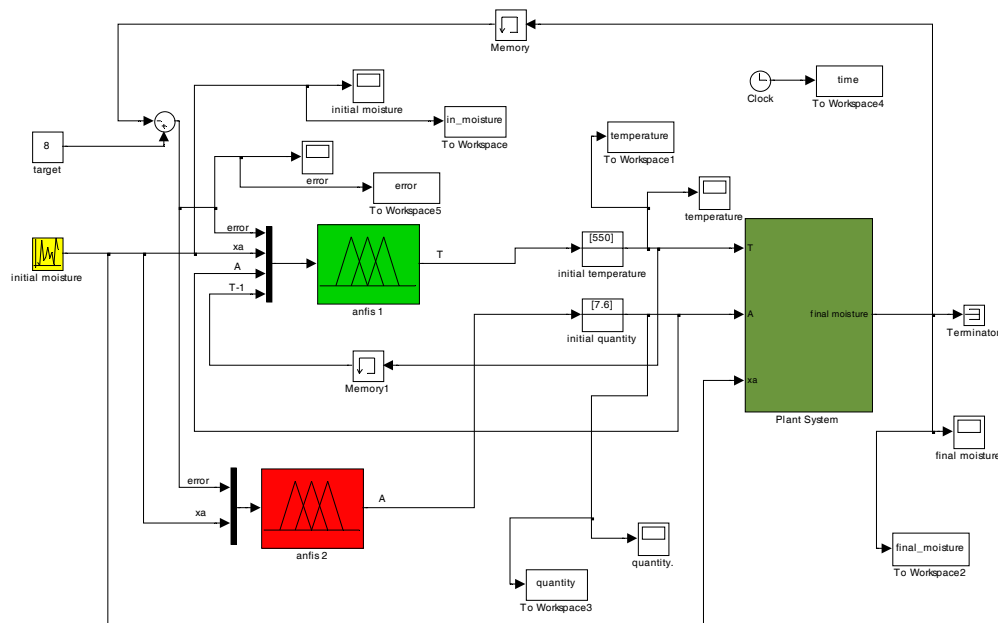
Η ορθή επιλογή των συναρτήσεων συμμετοχής είναι χωρίς αμφιβολία ένα κρίσιμο ζήτημα και παίζει καταλυτικό ρόλο στην επιτυχία των εφαρμογών του ασαφούς ελέγχου. Στους απλούς ασαφείς ελεγκτές οι συναρτήσεις συμμετοχής επιλέγονται και ρυθμίζονται εμπειρικά με τη χρήση της μεθόδου δοκιμής και σφάλματος. Εδώ θα χρησιμοποιηθεί μια γνωστή μέθοδος για τη ρύθμιση των συναρτήσεων συμμετοχής που βασίζεται στο προσαρμοστικό νευρο-ασαφές σύστημα (ANFIS). Οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου και η σχεδίαση του συστήματος ελέγχου παρουσιάζεται στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27: Μεταβλητές εισόδου και εξόδου του νευρο-ασαφούς ελεγκτή.

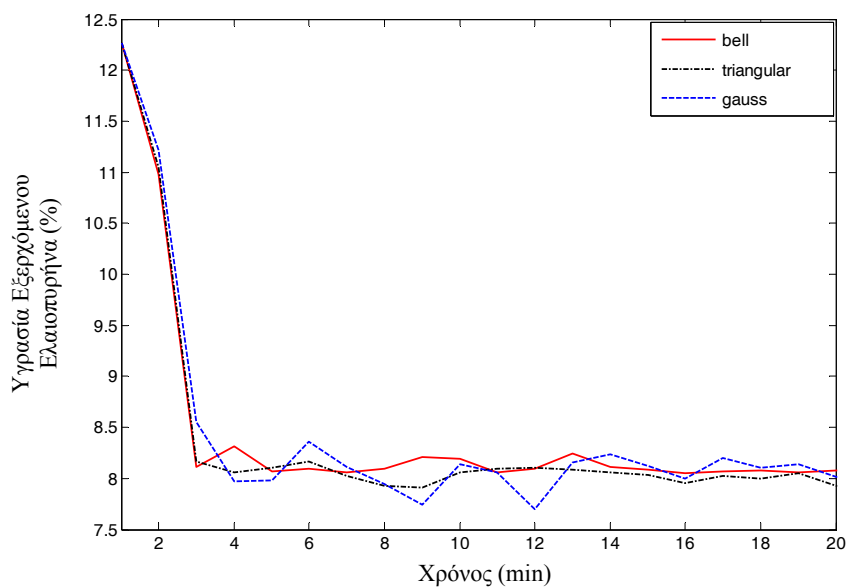
Οι νευρο-ασαφείς ελεγκτές δοκιμάστηκαν χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά είδη συναρτήσεων συμμετοχής. Η εκπαίδευση όλων τους πραγματοποιήθηκε με το ίδιο σύνολο δεδομένων εισόδων-εξόδων και διήρκεσε τον ίδιο αριθμό εποχών. Ίδιος είναι και ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής που χρησιμοποιήθηκαν σε όλους τους ελεγκτές ενώ τα είδη που δοκιμάστηκαν είναι μορφής: α) Bell, β) Triangular και γ) Gauss. Η απόδοση του ελεγκτή όσο αφορά την επίτευξη ενός ποσοστού υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα από 7 έως 8% αλλά και η σταθερότητα του σε μικρό-

μεταβολές των παραμέτρων του συστήματος θα είναι οι παράγοντες που θα κρίνουν τη μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής που θα επιλεγθούν. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στη *Simulink* της *MATLAB*, και η δομή του συστήματος ελέγχου παρουσιάζεται στην Εικόνα 28.

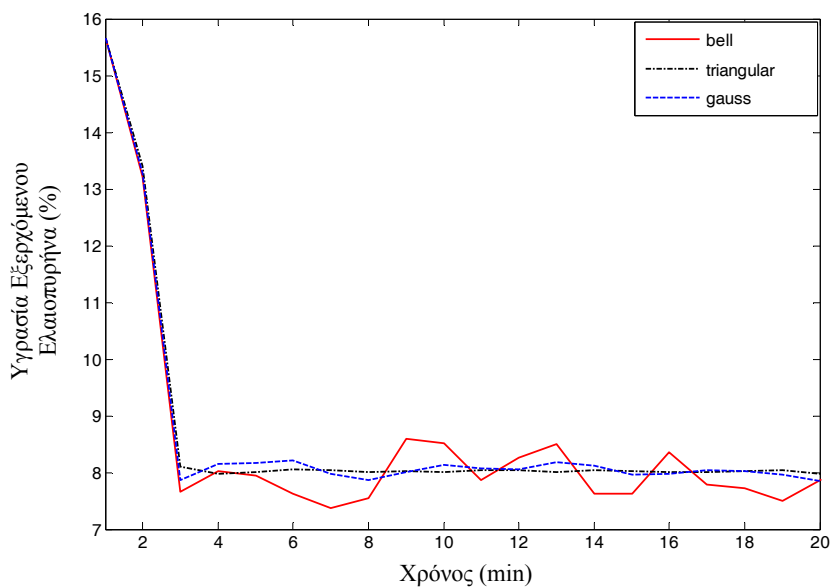


Εικόνα 28: Η διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα με τους νέυρο-ασαφείς ελεγκτές στο περιβάλλον *Simulink* της *MATLAB*.

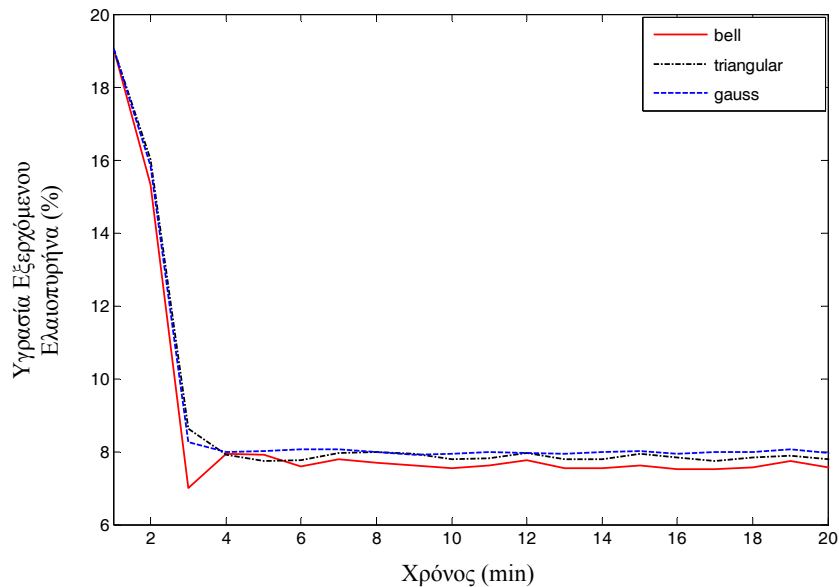
Πραγματοποιήθηκαν δύο σύνολα πειραμάτων με διαφορετικές αρχικές συνθήκες υγρασίας του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα. Στο πρώτο πείραμα οι αρχικές συνθήκες του συστήματος είναι: Μέση θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης $500\text{ }^{\circ}\text{K}$ και ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα ελαιοπυρήνα ίση με 6 τόνους/ώρα. Η υγρασία του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα προκύπτει με τη χρήση τριών νέυρο-ασαφών ελεγκτών με διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής ο καθένας. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε για τρεις διακυμάνσεις της αρχικής υγρασίας: α) 48-50%, β) 50-52% και γ) 52-54%, και η τελική υγρασία φαίνεται στις Εικόνες 29, 30 και 31.



Εικόνα 29: Διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για τους τρεις τύπους συναρτήσεων συμμετοχής και για αρχική υγρασία από 48-50%.



Εικόνα 30: Διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για αρχική υγρασία από 50-52%.



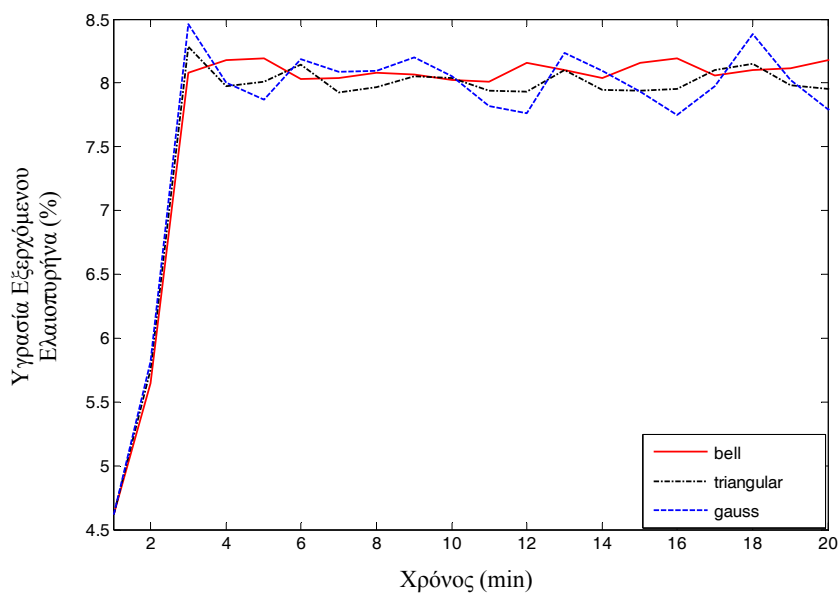
Εικόνα 31: Διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για αρχική υγρασία από 52-54%.

Στον Πίνακα 2 συνοψίζονται τα στατιστικά αποτελέσματα από το πρώτο σύνολο πειραμάτων που έγινε. Παρουσιάζονται το μέσο σφάλμα ελέγχου και η διακύμανση του σφάλματος για τις συγκεκριμένες αρχικές συνθήκες, για όλες τις διακυμάνσεις της αρχικής υγρασίας και για τους τρεις τύπους συναρτήσεων συμμετοχής που δοκιμάστηκαν.

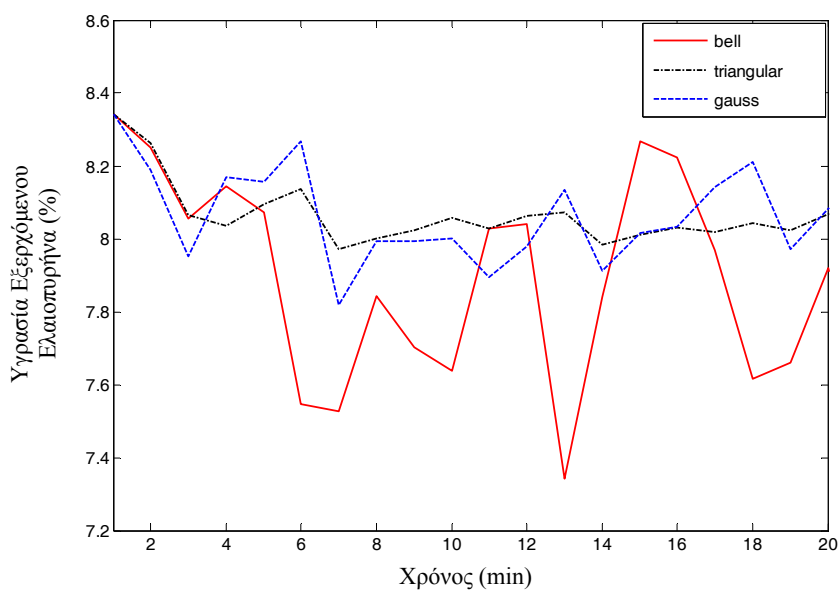
Πίνακας 2: Στατιστικά αποτελέσματα από το πρώτο σύνολο πειραμάτων, για αρχική θερμοκρασία 500 °K και τροφοδοσία 6 τόνων ανά ώρα.

Τύποι Συναρτήσεων Συμμετοχής	Αρχική Υγρασία 48-50%		Αρχική Υγρασία 50-52%		Αρχική Υγρασία 52-54%	
	Μέσο Σφάλμα	Διακύμανση	Μέσο Σφάλμα	Διακύμανση	Μέσο Σφάλμα	Διακύμανση
Bell	0.116	0.0054	-0.09	0.145	-0.348	0.0177
Triangular	0.04	0.0056	0.024	0.00084	-0.15	0.0074
Gauss	0.06	0.0274	0.034	0.0125	-0.017	0.002

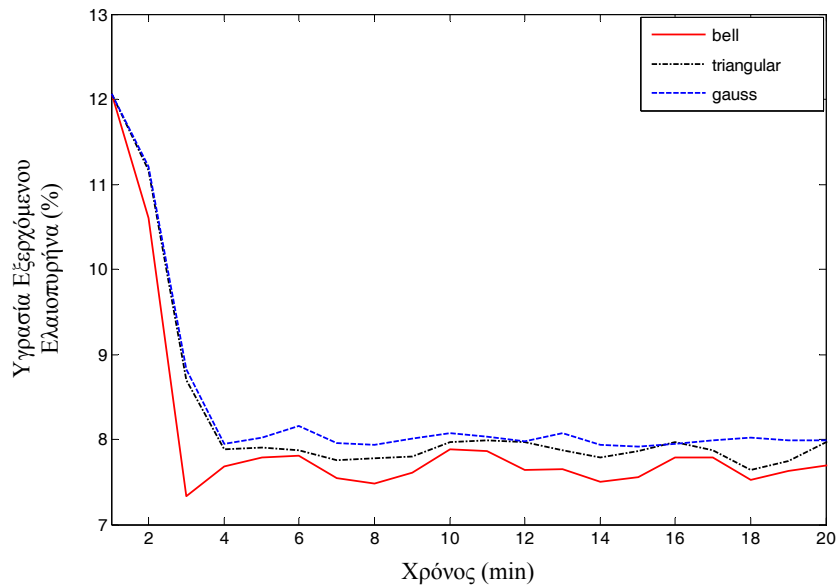
Στο δεύτερο σύνολο πειραμάτων οι αρχικές συνθήκες είναι: Μέση θερμοκρασία 550 °K και τροφοδοσία 7.5 τόνοι/ώρα. Για αυτές τις αρχικές συνθήκες του συστήματος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για όλο το φάσμα αρχικών υγρασιών του ελαιοπυρήνα. Δοκιμάστηκαν νεύρο-ασαφείς ελεγκτές χρησιμοποιώντας και τους τρεις τύπους συναρτήσεων συμμετοχής που δοκιμάστηκαν και στο προηγούμενο σύνολο πειραμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 32, 33 και 34 για διακυμάνσεις αρχικής υγρασίας από 48-50%, 50-52% και 52-54% αντίστοιχα.



Εικόνα 32: Διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για αρχικές συνθήκες θερμοκρασίας 550 °K και τροφοδοσίας 7.5 τόνοι/ώρα και για αρχική υγρασία από 48-50%.



Εικόνα 33: Διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για αρχική υγρασία από 50-52%.



Εικόνα 34: Διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για αρχική υγρασία από 52-54%.

Τα στατιστικά στοιχεία, το μέσο σφάλμα ελέγχου και η διακύμανση του σφάλματος, για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στο δεύτερο σύνολο πειραμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Στατιστικά αποτελέσματα από το δεύτερο σύνολο πειραμάτων, για αρχική θερμοκρασία 550 °K και τροφοδοσία 7.5 τόνων ανά ώρα.

Τύποι Συναρτήσεων Συμμετοχής	Αρχική Υγρασία 48-50%		Αρχική Υγρασία 50-52%		Αρχική Υγρασία 52-54%	
	Μέσο Σφάλμα	Διακύμανση	Μέσο Σφάλμα	Διακύμανση	Μέσο Σφάλμα	Διακύμανση
Bell	0.1	0.004	-0.142	0.07	-0.335	0.0177
Triangular	0.006	0.0059	0.04	0.0016	-0.1	0.009
Gauss	0.015	0.0329	0.05	0.0146	0.0001	0.0038

Από τα πειράματα και τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα: α) Ο χρόνος που χρειάζεται ο ελεγκτής για να φέρει το σύστημα στην επιθυμητή κατάσταση είναι σχεδόν ο ίδιος για όλες τις περιπτώσεις, β) Η χρήση των τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής από τον νεύρο-ασαφή ελεγκτή αποφέρει λιγότερες διακυμάνσεις στην έξοδο σε σχέση με τους άλλους τύπους συναρτήσεων συμμετοχής. Στις περισσότερες των περιπτώσεων αυτός ο ελεγκτής έχει καλύτερη απόδοση από τους άλλους. Γι αυτό και επιλέχθηκε ο τριγωνικός τύπος συναρτήσεων συμμετοχής για να χρησιμοποιηθεί στον νεύρο-ασαφή ελεγκτή.

6.1.1 Διενέργεια Πειραμάτων

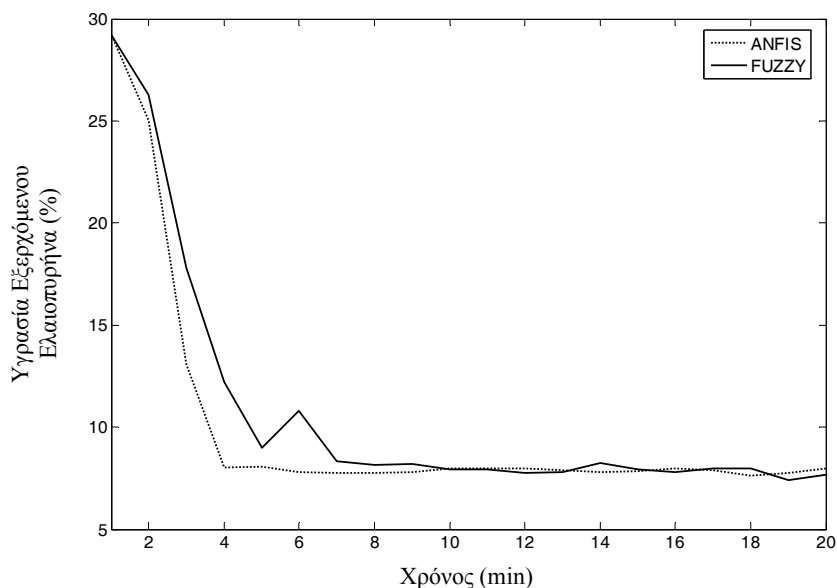
Η απόδοση του νεύρο-ασαφούς ελεγκτή, στη διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα, συγκρίθηκε με την απόδοση ενός απλού ασαφούς ελεγκτή που είχε αναπτυχθεί για τον έλεγχο της ίδιας διαδικασίας [14]. Ο ασαφής ελεγκτής αναπτύχθηκε εμπειρικά ενώ ο νεύρο-ασαφής βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα ενώ και στις δύο περιπτώσεις το φυσικό σύστημα περιγράφηκε από την εξίσωση (36). Οι συναρτήσεις συμμετοχής που χρησιμοποιήθηκαν και εδώ είναι τριγωνικές.

Πραγματοποιήθηκαν δύο σύνολα πειραμάτων, με τρία πειράματα στο κάθε σύνολο. Οι συνθήκες του κάθε πειράματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Οι συνθήκες που πραγματοποιήθηκε το κάθε πείραμα.

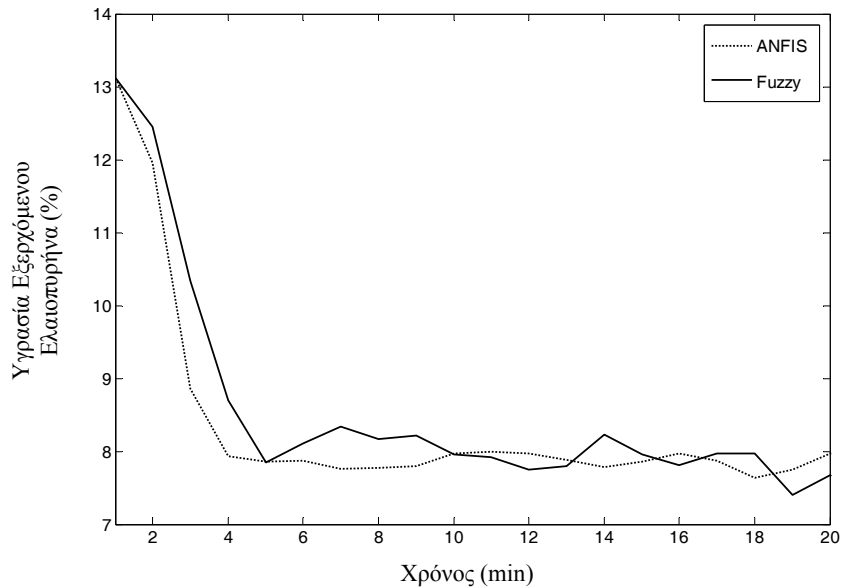
Αριθμός Πειράματος	Αρχική Θερμοκρασία Αερίων Ξήρανσης (°K)	Τροφοδοσία (τόνοι ανά ώρα)	Αρχική Υγρασία (%)
Πείραμα 1	515	8.1	52-54
Πείραμα 2	550	7.6	52-54
Πείραμα 3	500	8.5	52-54
Πείραμα 4	550	8	48-50
Πείραμα 5	550	8	50-52
Πείραμα 6	550	8	52-54

Στο πρώτο η διακύμανση της αρχικής υγρασίας του ελαιοπυρήνα, κατά την είσοδο του στο ξηραντήριο, παρέμεινε ίδια και αυτό που μεταβαλλόταν σε κάθε πείραμα ήταν οι αρχικές συνθήκες. Στο **πείραμα 1** η θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης είναι 515 °K και η τροφοδοσία ελαιοπυρήνα είναι 8.1 τόνοι/ώρα. Στην Εικόνα 35 φαίνεται η διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα χρησιμοποιώντας τον ασαφή ελεγκτή (FUZZY) και τον νεύρο-ασαφή (ANFIS).



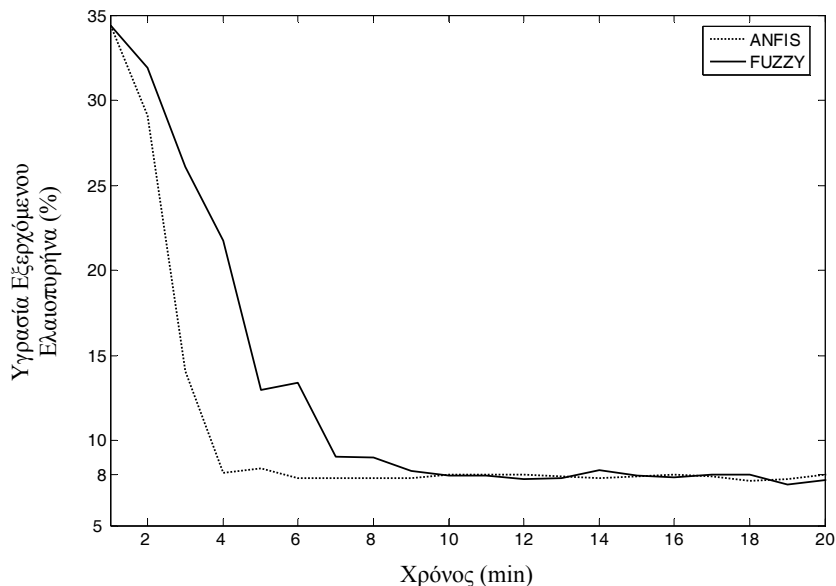
Εικόνα 35: Η διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα κατά το πείραμα 1 με τη χρήση του ασαφούς και του νεύρο-ασαφούς ελεγκτή.

Στο **πείραμα 2** του πρώτου συνόλου, με την ίδια διακύμανση της αρχικής υγρασίας του ελαιοπυρήνα, οι αρχικές συνθήκες γίνονται: Θερμοκρασία αερίων ξήρανσης ίση με $550\text{ }^{\circ}\text{K}$ και τροφοδοσία ίση με 7.6 τόνοι/ώρα . Τα αποτελέσματα των δύο ελεγκτών φαίνονται στην Εικόνα 36.



Εικόνα 36: Η διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα κατά το πείραμα 2.

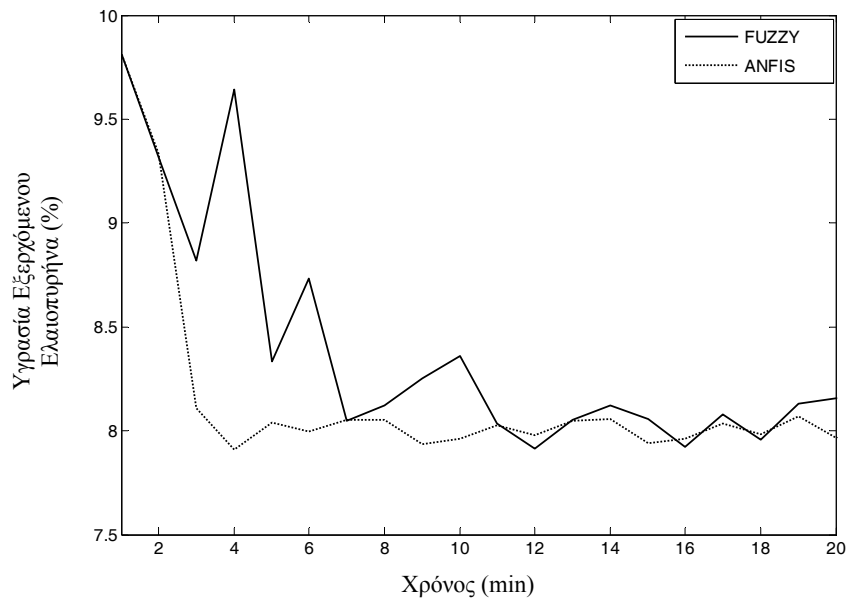
Οι αρχικές συνθήκες για το **πείραμα 3** είναι: Θερμοκρασία αερίων ξήρανσης ίση με $500\text{ }^{\circ}\text{K}$ και τροφοδοσία ελαιοπυρήνα ίση με 8.5 τόνοι/ώρα . Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται η διακύμανση της τελικής υγρασίας για τις νέες αρχικές συνθήκες.



Εικόνα 37: Η διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα κατά το πείραμα 3.

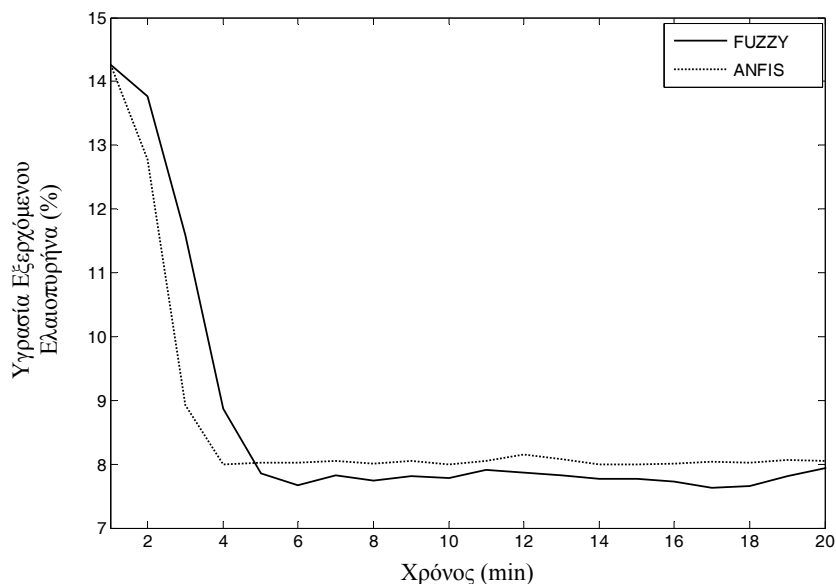
Στο δεύτερο σύνολο πειραμάτων οι αρχικές συνθήκες παρέμειναν σταθερές ενώ μεταβαλλόταν η διακύμανση της υγρασίας του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα. Στο **πείραμα 4** κυμαίνεται τυχαία από 48 έως 50%. Στην Εικόνα 38 παρουσιάζεται η

απόκριση του συστήματος ξήρανσης με τη χρήση του ασαφούς ελεγκτή, από τη μία, και του νεύρο-ασαφούς από την άλλη.



Εικόνα 38: Διακύμανση υγρασίας εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για το πείραμα 4 με την αρχική υγρασία να κυμαίνεται από 48-50%.

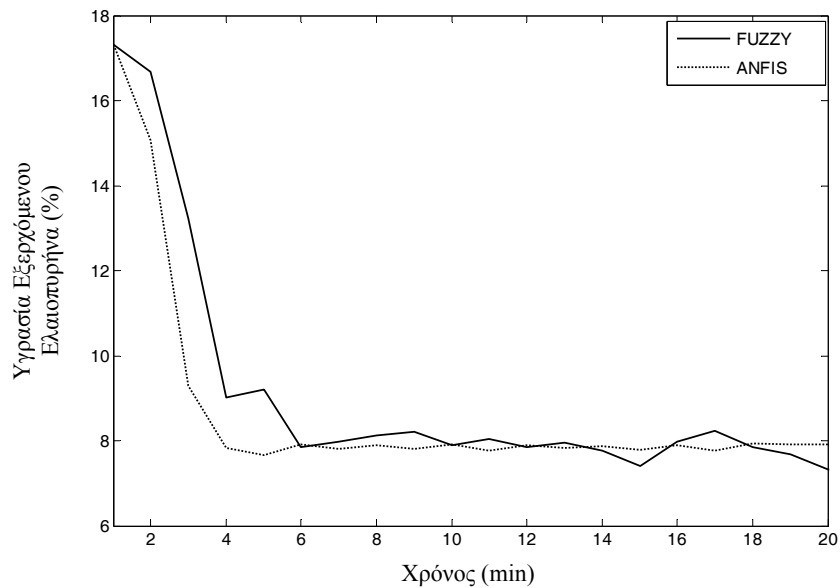
Στο **πείραμα 5** η υγρασία του εισερχόμενου στο ξηραντήριο ελαιοπυρήνα λαμβάνει τυχαίες τιμές από 50% έως και 52%. Οι επιδράσεις των δύο ελεγκτών φαίνονται στην Εικόνα 39.



Εικόνα 39 Διακύμανση υγρασίας εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για το πείραμα 5.

Το ποσοστό υγρασίας του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα, στο **πείραμα 6**, κυμαίνεται μεταξύ 52 και 54%. Η απόκριση του ασαφούς και του νεύρο-ασαφούς ελεγκτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 40, ενώ στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα

ελέγχου αλλά και η διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για τα τρία προηγούμενα πειράματα.

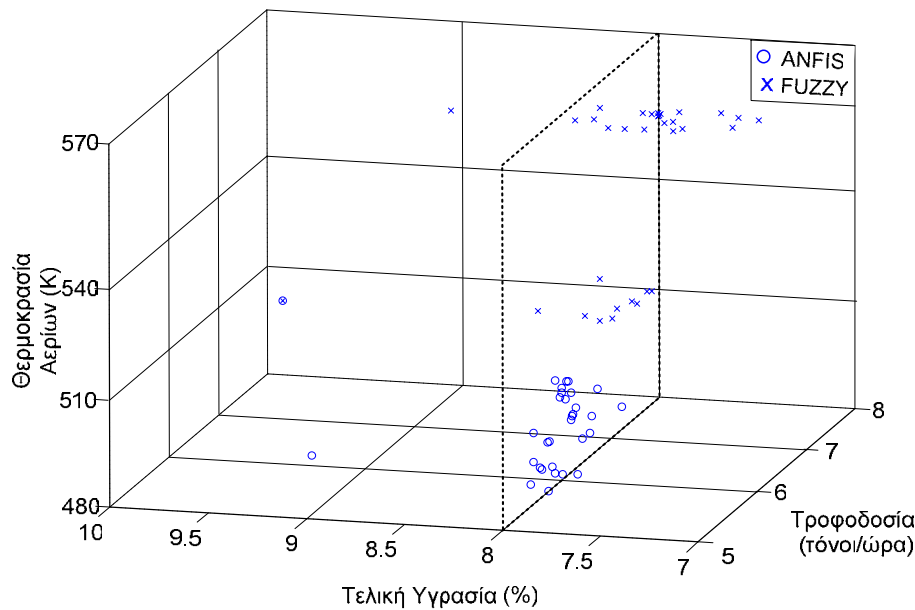


Εικόνα 40: Διακύμανση υγρασίας εξερχόμενου ελαιοπυρήνα για το πείραμα 6.

Πίνακας 5: Απόδοση ελέγχου από δύο διαφορετικούς ελεγκτές σε διάφορα φάσματα της αρχικής υγρασίας και με αρχικές συνθήκες: θερμοκρασία αερίων ξήρανσης ίση με 550 °K και τροφοδοσία ελαιοπυρήνα ίση με 8 τόνους/ώρα.

Αρχική Υγρασία	FUZZY		ANFIS	
	Μέσο Σφάλμα	Διακύμανση	Μέσο Σφάλμα	Διακύμανση
48-50%	0.086	0.015	0.007	0.003
50-52%	-0.213	0.0077	0.029	0.0003
52-54%	-0.099	0.0465	-0.149	0.0048

Ένα διαφορετικό πείραμα πραγματοποιήθηκε για να φανούν οι διαφορετικές προσεγγίσεις των δύο ελεγκτών, όσο αφορά θερμοκρασία και την τροφοδοσία, στη διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα. Οι δύο ελεγκτές δοκιμάστηκαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες, αρχικής θερμοκρασίας αερίων ίση με 520 °K, τροφοδοσίας ίση με 6 τόνους/ώρα και την ίδια διακύμανση υγρασίας εισερχόμενου ελαιοπυρήνα από 52 έως 54%. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 41.

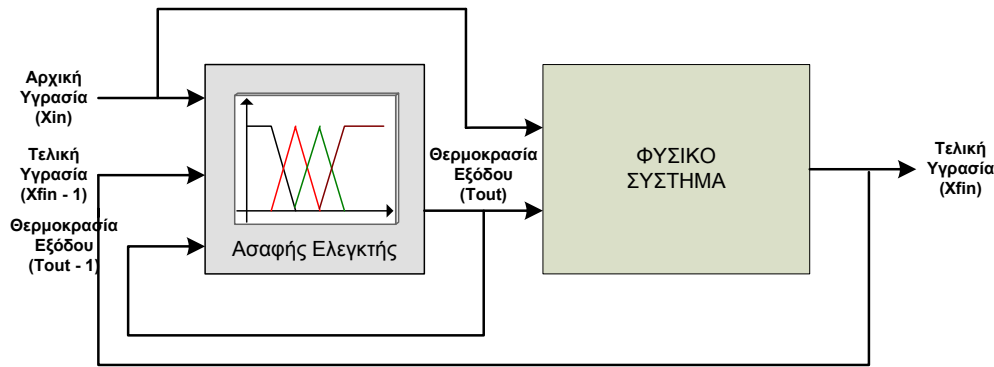


Εικόνα 41: Διακύμανση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα σε συνδυασμό με τις τιμές της θερμοκρασία αερίων και της τροφοδοσίας που προκύπτουν από τη χρήση των δύο ελεγκτών.

6.2 Δομή των Ασαφών Ελεγκτών Εκπαιδευμένων με Πραγματικά Δεδομένα

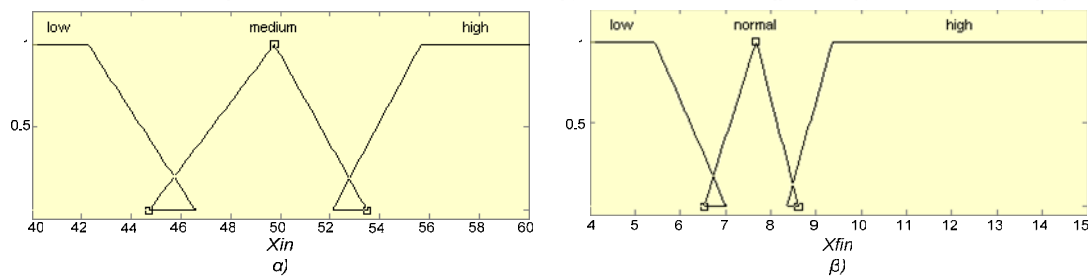
Με τη συνδρομή του εξοπλισμού που έχει τοποθετηθεί στο ξηραντήριο των εγκαταστάσεων της Α.Β.Ε.Α. συλλέχθηκαν πραγματικά δεδομένα λειτουργίας του. Τα δεδομένα αυτά εμπεριέχουν όλες τις μεταβλητές ελέγχου σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας του ξηραντηρίου. Με αυτά θα εκπαιδευτεί ένας ασαφής ελεγκτής και η απόδοση του, όσο αφορά την υγρασία του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα, θα συγκριθεί με τη 'χειροκίνητη' λειτουργία του ξηραντηρίου.

Η δομή του συστήματος ελέγχου παρουσιάζεται στην Εικόνα 42. Οι είσοδοι του ασαφούς ελεγκτή είναι τρεις α) Η αρχική υγρασία του ελαιοπυρήνα που εισέρχεται στο ξηραντήριο, β) Η τρέχουσα υγρασία που έχει καθώς εξέρχεται του ξηραντηρίου (τελική υγρασία) και γ) Η τρέχουσα θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης στην έξοδο του ξηραντηρίου (θερμοκρασία εξόδου). Ως έξοδος του ασαφούς ελεγκτή ορίζεται η θερμοκρασία των αερίων στην έξοδο που πρέπει να υφίσταται για να επιτευχθεί το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας στον ελαιοπυρήνα, αφού είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους που επιδρούν στην τελική υγρασία. Βάζοντας στον ελεγκτή τη μεταβλητή αυτή, έμμεσα εισέρχεται και άλλη μία που είναι η θερμοκρασία στην είσοδο του ξηραντηρίου η οποία διαδραματίζει ρόλο ρυθμιστή για τη θερμοκρασία εξόδου.

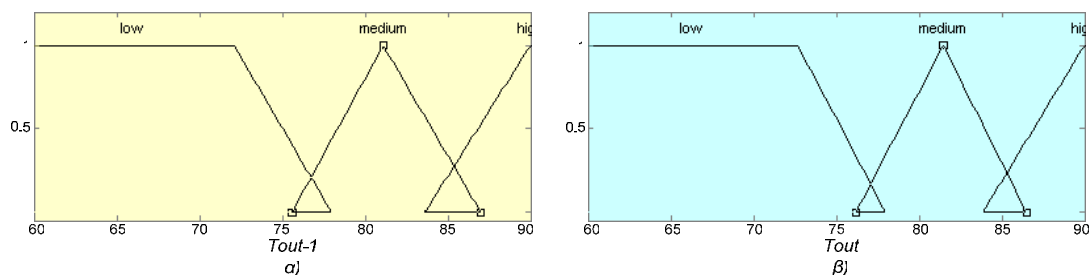


Εικόνα 42: Δομή του συστήματος ελέγχου.

Στον ασαφή ελεγκτή χρησιμοποιήθηκαν τρεις συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε μία από τις εισόδους και για την έξοδο. Για τις μεταβλητές εισόδου *Αρχική Υγρασία* (X_{in}) και *Τελική Υγρασία* (X_{fin}), οι δύο συναρτήσεις συμμετοχής είναι τραπεζοειδής (*Low* και *High*) ενώ η τρίτη τριγωνικού τύπου (*Medium* και *Normal* αντίστοιχα) (Εικόνα 43). Για τη μεταβλητή εισόδου *Τρέχουσα Θερμοκρασία Εξόδου* (T_{out-1}) και τη μεταβλητή εξόδου *Θερμοκρασία Εξόδου* (T_{out}) χρησιμοποιήθηκαν δύο τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής (*Medium* και *High*) και μία τραπεζοειδής (*Low*) (Εικόνα 44). Η μορφή όλων των συναρτήσεων συμμετοχής εξήλθε ευρετικά από μελέτη των πραγματικών δεδομένων της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα.



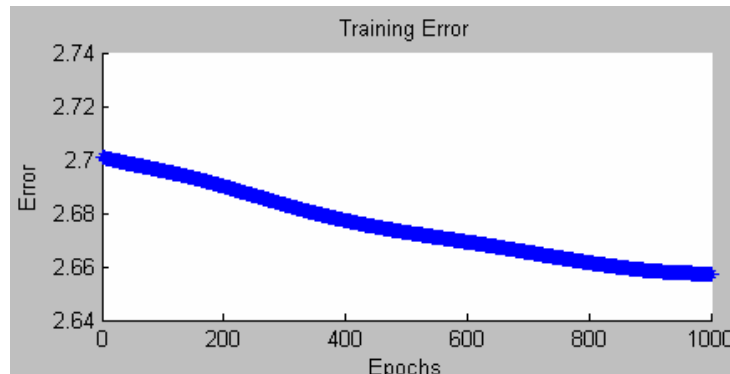
Εικόνα 43: Οι συναρτήσεις συμμετοχής για τις μεταβλητές εισόδου α) *Αρχική Υγρασία* και για την β) *Τελική Υγρασία*.



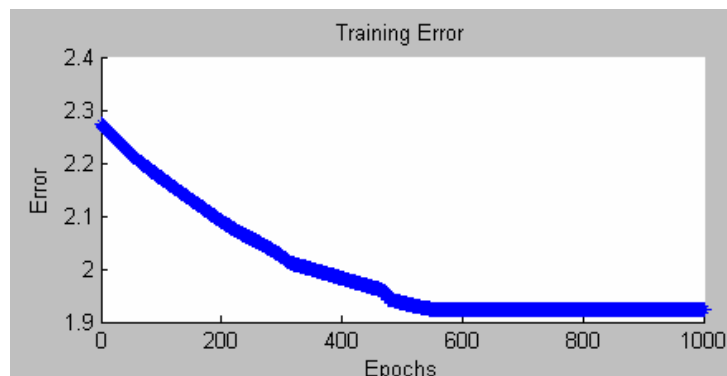
Εικόνα 44: Οι συναρτήσεις συμμετοχής για τη μεταβλητή εισόδου α) *Τρέχουσα Θερμοκρασία Εξόδου* και β) τη μεταβλητή εξόδου *Θερμοκρασία Εξόδου*.

Πέραν του ελεγκτή υπάρχει και το φυσικό σύστημα η ύπαρξη του οποίου χρειάζεται για να γίνουν οι κατάλληλες προσομοιώσεις. Σε αυτή την περίπτωση δε χρησιμοποιήθηκαν εξισώσεις που αντιπροσωπεύουν τη διαδικασία, αλλά χρησιμοποιήθηκε το Προσαρμοστικό Νεύρο-ασαφές Σύστημα (ANFIS). Χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να προσεγγίσει όσο το δυνατό πιο αξιόπιστα την κατάσταση που επικρατεί εντός του περιστρεφόμενου κυλίνδρου και κατ' επέκταση

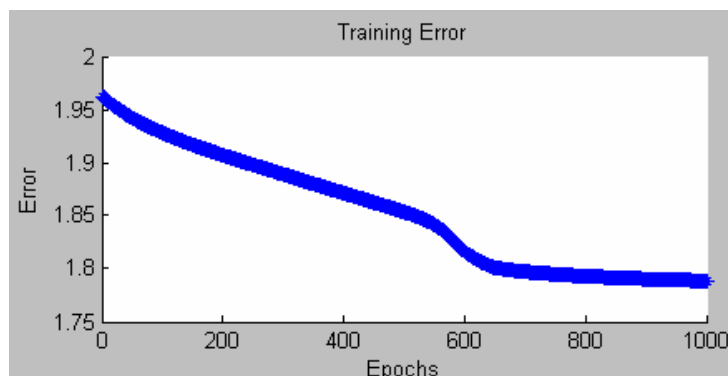
τη διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα. Το ANFIS έχει δύο εισόδους, την αρχική υγρασία και την θερμοκρασία εξόδου, και μία έξοδο, την τελική υγρασία του ελαιοπυρήνα. Για να προσεγγίσει όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματική κατάσταση που επικρατεί, εκπαιδεύτηκε με πάνω από 1000 ζεύγη πραγματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν από τους αισθητήρες και τους επενεργητές. Στο ANFIS δοκιμάστηκαν διάφοροι τύποι και αριθμοί συναρτήσεων συμμετοχής με σκοπό το σφάλμα προσαρμογής να φτάσει στο ελάχιστο δυνατό. Όλα τα πειράματα έγιναν με τα ίδια δεδομένα και για τον ίδιο αριθμό εποχών. Μερικά από τα πειράματα φαίνονται στις Εικόνες 45, 46 και 47.



Εικόνα 45: Διακύμανση του σφάλματος για 4 τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής σε κάθε είσοδο.

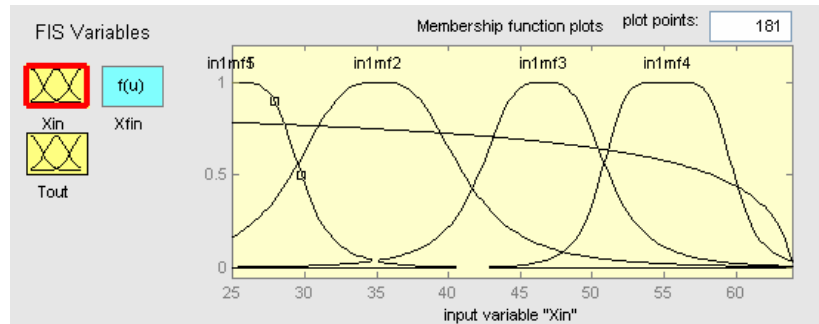


Εικόνα 46: Διακύμανση του σφάλματος για 4 γκαουσιανές συναρτήσεις συμμετοχής σε κάθε είσοδο.

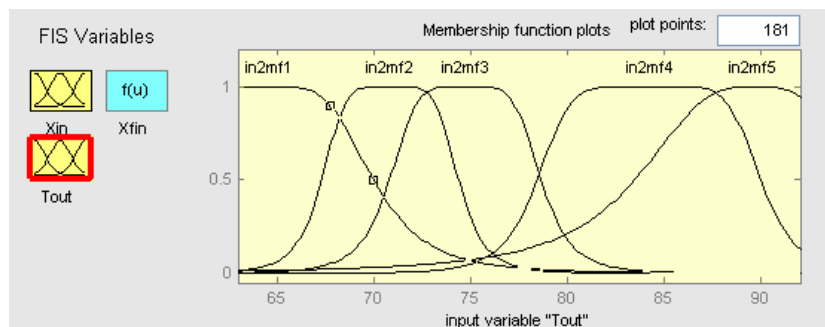


Εικόνα 47: Διακύμανση του σφάλματος για 5 γκαουσιανές συναρτήσεις συμμετοχής σε κάθε είσοδο.

Μετά από σειρά πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκε το ANFIS που χρησιμοποιεί σε κάθε είσοδο 5 γκαουσιανές συναρτήσεις συμμετοχής (Εικόνα 32). Με αυτό προσεγγίζεται το φυσικό σύστημα με σφάλμα 1.7 %. Το σφάλμα αυτό δύναται να μειωθεί με νέες συλλογές δεδομένων που πιθανών να καλύπτουν περισσότερες καταστάσεις της διαδικασίας ξήρανσης. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η μορφή που πήραν οι συναρτήσεις συμμετοχής μετά την εκπαίδευση τους από τα πραγματικά δεδομένα και το ANFIS.



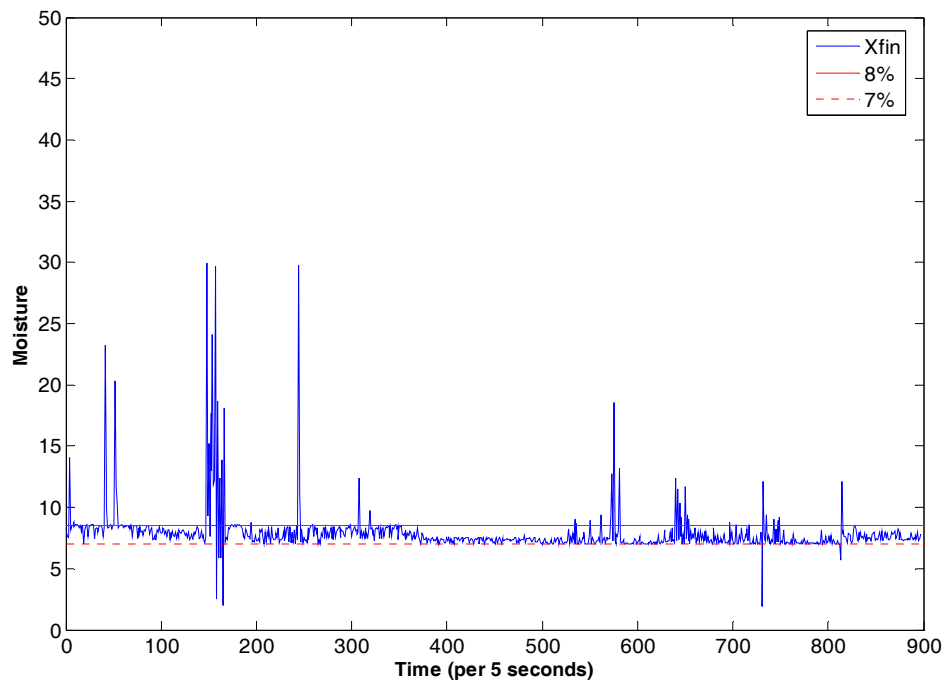
Εικόνα 48: Η μορφή που απέκτησαν οι συναρτήσεις συμμετοχής της μεταβλητής *Υγρασία Εισόδου (Xin)* μετά την εκπαίδευση.



Εικόνα 49: Η μορφή που απέκτησαν οι συναρτήσεις συμμετοχής της μεταβλητής *Θερμοκρασία Εξόδου (Tout)* μετά την εκπαίδευση.

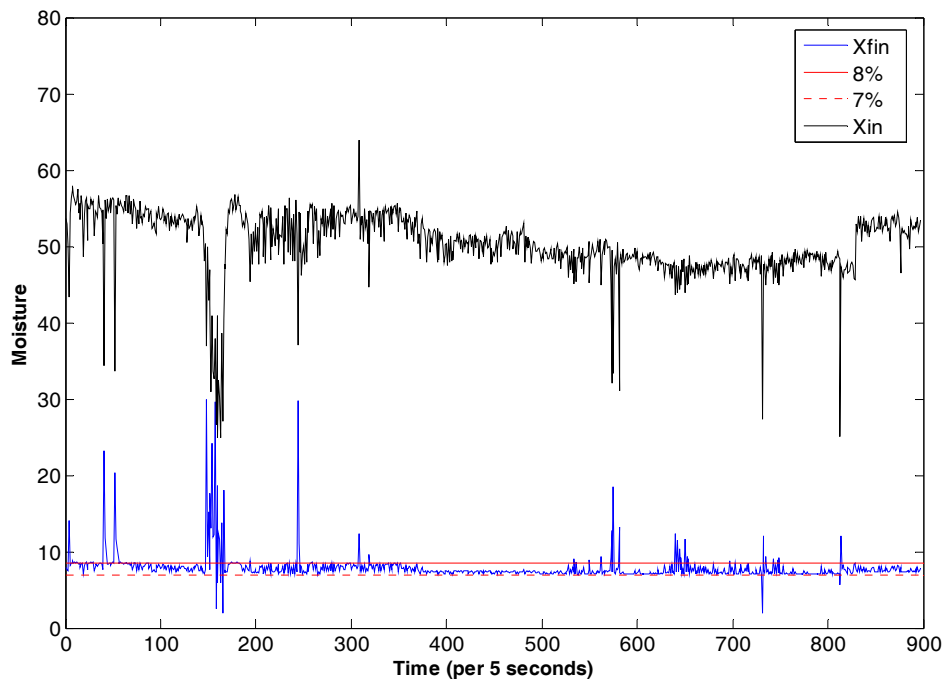
6.2.1 Διενέργεια Πειραμάτων με Πραγματικά Δεδομένα

Η απόδοση του ασαφούς ελεγκτή, που δημιουργήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, θα ελεγχθεί έχοντας ως κριτήριο την τελική υγρασία του ξηραμένου ελαιοπυρήνα. Το επιτρεπτό ποσοστό υγρασίας που πρέπει να εμπεριέχεται στον ελαιοπυρήνα κυμαίνεται μεταξύ 7 έως 8%. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση είναι πραγματικά και η διακύμανση της τελικής υγρασίας του ελαιοπυρήνα για αυτά φαίνεται στην Εικόνα 50. Στον άξονα του χρόνου, σε αυτό το γράφημα, η κάθε μονάδα αντιστοιχεί σε 5 δευτερόλεπτα, ενώ με την κόκκινη γραμμή προσδιορίζεται το πάνω επιτρεπτό όριο και με τη διακεκομμένη το κάτω επιτρεπτό όριο.

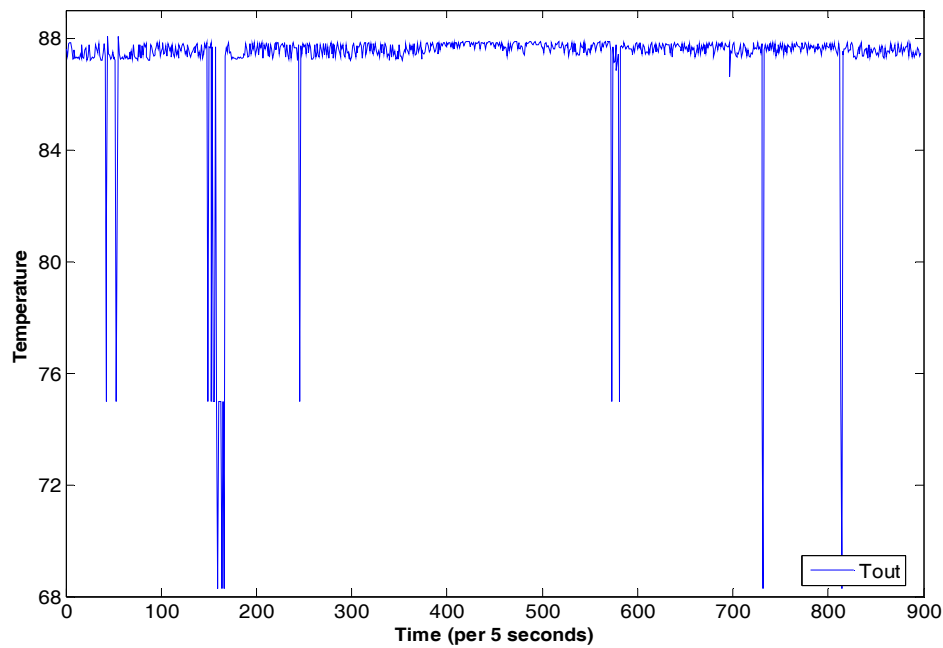


Εικόνα 50: Η διακύμανση της τελικής υγρασίας όπως αυτή προκύπτει από τον ασαφή ελεγκτή.

Για να φανεί η συσχέτιση μεταξύ αρχικής και τελικής υγρασίας θα πρέπει να εμφανιστούν μαζί. Έτσι στην Εικόνα 51 παρουσιάζεται η διακύμανση της τελικής υγρασίας μαζί με την αρχική υγρασία του ελαιοπυρήνα που έμπαινε κάθε χρονική στιγμή.

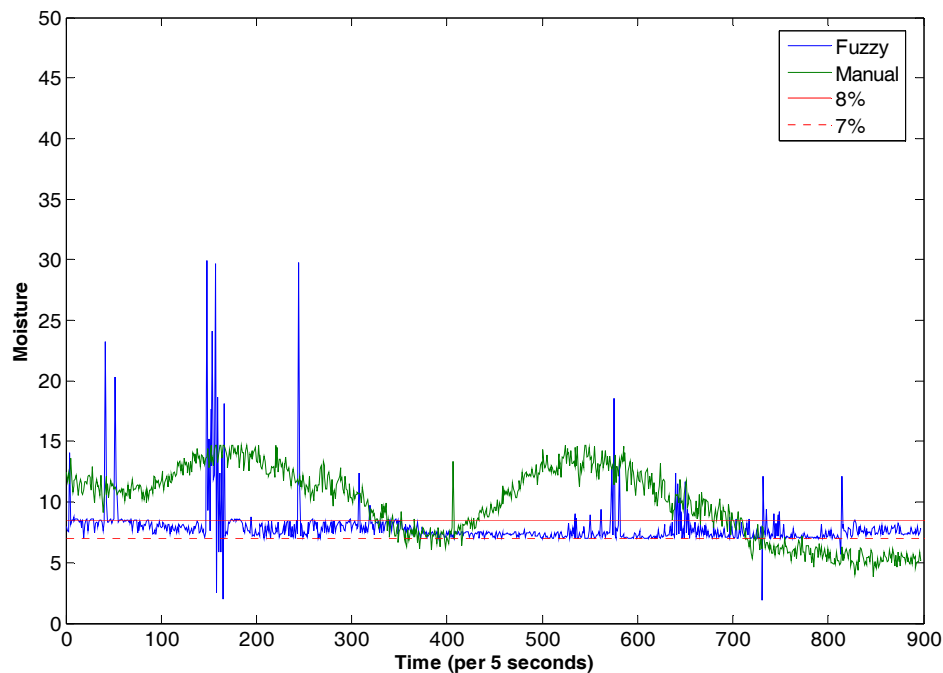


Εικόνα 51: Η Τελική (X_{fin}) και Αρχική (X_{in}) Υγρασία.



Εικόνα 52: Η θερμοκρασία εξόδου όπως προκύπτει από τον ασαφή ελεγκτή.

Καθώς γινόταν η καταγραφή των δεδομένων, η διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα πραγματοποιούνταν 'χειροκίνητα' από τους χειριστές. Έτσι έχει καταγραφεί ο τρόπος που κυμαινόταν το ποσοστό υγρασίας στον εξερχόμενο ελαιοπυρήνα. Αυτός παρουσιάζεται στην Εικόνα 53 συγκριτικά με το αποτέλεσμα που προέκυψε από τον ασαφή ελεγκτή.



Εικόνα 53: Η διακύμανση της τελικής υγρασίας από τη χρήση ασαφούς ελεγκτή και από 'χειροκίνητη' λειτουργία.

7 ΣΥΖΗΤΗΣΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία θα χωριστούν σε δύο ενότητες. Στη πρώτη ενότητα θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν, κάνοντας χρήση μόνο δεδομένων προσομοίωσης. Στη δεύτερη ενότητα θα αναφερθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας αποκλειστικά πραγματικά δεδομένα.

7.1 Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων από τη Χρήση Δεδομένων Προσομοίωσης

Ξεκινώντας από την Εικόνα 41 της παραγράφου 6.1, φαίνεται ότι οι τιμές της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα, όταν χρησιμοποιείται ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής, καλύπτουν μια περιοχή πολύ κοντά στην περιοχή 7 με 8% με μια μικρή διασπορά. Από την άλλη μεριά, με τη χρήση του απλού ασαφούς ελεγκτή η τελική υγρασία έχει μια μεγαλύτερη διασπορά γύρω από αυτή την περιοχή. Θα πρέπει να τονιστεί ότι και οι δύο ελεγκτές δοκιμάστηκαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες, αρχικής θερμοκρασίας αερίων ίση με 520 °K, τροφοδοσίας ίση με 6 *τόνους/ώρα* και την ίδια διακύμανση υγρασίας εισερχόμενου ελαιοπυρήνα από 52 έως 54%. Επιπλέον παρατηρείται ότι ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής επιτυγχάνει το στόχο του με συνδυασμό χαμηλών θερμοκρασιών αερίων και σχετικά χαμηλών ρυθμών εισερχόμενου ελαιοπυρήνα στο ξηραντήριο. Σε αντίθεση με τον ασαφή ελεγκτή που για να επιτύχει τελική υγρασία στην περιοχή 7 με 8% συνδυάζει υψηλότερες θερμοκρασίες και υψηλότερους ρυθμούς τροφοδοσίας ελαιοπυρήνα. Η συμπεριφορά του ασαφούς ελεγκτή δύναται να φανεί χρήσιμη σε περιόδους ανάγκης υψηλής παραγωγής με συνέπεια όμως την υψηλή ενεργειακή κατανάλωση εξαιτίας της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών και τη μη σωστή ξήρανση του ελαιοπυρήνα.

Κάποιες επιπλέον παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν βασιζόμενες στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην παράγραφο 6.1 παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1. Το μέσο σφάλμα της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα που προκύπτει από τη χρήση του νεύρο-ασαφούς ελεγκτή είναι μικρότερο στα δύο από τα τρία πειράματα που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3. Γενικότερα η απλή ασαφής προσέγγιση δίνει καλύτερα αποτελέσματα όταν η αρχική υγρασία είναι υψηλή, κυμαίνεται δηλαδή στην περιοχή μεταξύ 52 και 54%. Παρόλα αυτά αν και το μέσο σφάλμα σε αυτή την περιοχή είναι μικρότερο η διακύμανση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που δίνει ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής. Αυτό αποδεικνύει ότι ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής έχει μια πιο σταθερή συμπεριφορά σε όλο το φάσμα υγρασίας του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα.
2. Το γεγονός ότι ο νεύρο-ασαφής ελεγκτής προήλθε από το ANFIS, με εκπαίδευση από δεδομένα, δύναται να αποτελεί ένα μειονέκτημα του για

τη μοντελοποίηση της διαδικασίας ξήρανσης. Υπάρχει η περίπτωση να μην καλυφθούν όλες οι πιθανές συνθήκες λειτουργίας. Από την άλλη μεριά ο ασαφής ελεγκτής δύναται να καλύψει πιο ρεαλιστικές περιπτώσεις.

7.2 Συμπεράσματα Αποτελεσμάτων από τη Χρήση Πραγματικών Δεδομένων

Φτάνοντας στα πειράματα της παραγράφου 6.2 και ξεκινώντας από την Εικόνα 50 παρατηρείται ότι ο ασαφής ελεγκτής αντιδρά αρκετά καλά με αποτέλεσμα η τελική υγρασία του ελαιοπυρήνα να βρίσκεται συνεχώς εντός της επιτρεπόμενης περιοχής. Υπάρχουν όμως και στιγμές όπου η τελική υγρασία ανεβαίνει σε πολύ υψηλές τιμές ή, σε λιγότερες περιπτώσεις, πέφτει σε πολύ μικρές με ένα ιδιαίτερα ‘νευρικό’ τρόπο.

Το φαινόμενο αυτό δύναται να εξηγηθεί από τις Εικόνες 51 και 52, όπου παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της τελικής και της αρχικής υγρασίας και η θερμοκρασία εξόδου όπως προκύπτει από τον ασαφή ελεγκτή καθ’ όλη τη διάρκεια του πειράματος. Στην Εικόνα 51 φαίνεται ότι οι απότομες άνοδοι και κάθοδοι της τελικής υγρασίας ακολουθούν σε αυτά τα σημεία τη διακύμανση της αρχικής υγρασίας. Φαίνεται ότι μια μεγάλη πτώση της υγρασίας του εισερχόμενου ελαιοπυρήνα οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα. Αυτό εξηγείται από την Εικόνα 52 όπου στα χρονικά αυτά σημεία ο ελεγκτής έχει δώσει εντολή για πτώση της θερμοκρασίας εξόδου αφού ανίχνευσε ότι εισέρχεται στο ξηραντήριο πολύ ξηρός ελαιοπυρήνας. Έτσι το σύστημα οδηγείται σε μια προσωρινή εξαγωγή ελαιοπυρήνα με αυξημένη υγρασία που στη συνέχεια διορθώνεται.

Μια διαφορετική εξήγηση που μπορεί να δοθεί για τις έντονες διακυμάνσεις της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία είναι οι συνθήκες εκπαίδευσης του ANFIS. Το ANFIS εκπαιδεύτηκε, για να προσομοιώσει το φυσικό σύστημα, από πραγματικά δεδομένα που εξήλθαν από τη διαδικασία. Είναι λογικό στα δεδομένα αυτά να εμπεριέχεται και θόρυβος οπότε και η εκπαίδευση του ANFIS να μην πραγματοποιήθηκε σωστά. Ή ένα άλλο ενδεχόμενο είναι, η εκπαίδευση του ANFIS να μην έγινε σωστά εξαιτίας των λίγων δεδομένων που αντλήθηκαν σε συνθήκες λειτουργίας με εισερχόμενο ελαιοπυρήνα πολύ χαμηλής υγρασίας. Η πλειονότητα των δεδομένων αφορούσε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας του ξηραντηρίου. Έτσι η εκπαίδευση δε κατόρθωσε να προσεγγίσει επιτυχώς καταστάσεις πέραν αυτών, λόγω έλλειψης δεδομένων.

Στην Εικόνα 53 γίνεται η σύγκριση μεταξύ του ασαφούς ελεγκτή και της ‘χειροκίνητης’ λειτουργίας του ξηραντηρίου. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν όταν τον έλεγχο έχει ο ασαφής ελεγκτής είναι κατά πολύ καλύτερα από αυτά που προκύπτουν όταν η διαδικασία πραγματοποιείται ‘χειροκίνητα’, για τα συγκεκριμένα

δεδομένα που πραγματοποιήθηκε το πείραμα. Το πείραμα χρειάστηκε 75 λεπτά για να ολοκληρωθεί όπου στα 53 από αυτά, ποσοστό 71.6%, ο ασαφής ελεγκτής κατόρθωσε να διατηρήσει την υγρασία του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα εντός της περιοχής 7 έως 8%. Από την άλλη μεριά με τη 'χειροκίνητη' λειτουργία το ποσοστό της υγρασίας του εξερχόμενου ελαιοπυρήνα διατηρήθηκε στην επιτρεπτή περιοχή μόνο κατά 10 λεπτά, ποσοστό 13.3%.

7.3 Μελλοντική Έρευνα

Με την ύπαρξη πραγματικών δεδομένων ανοίγεται ο δρόμος της περαιτέρω ανάπτυξης των ασαφών ελεγκτών που θα χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία ξήρανσης του ελαιοπυρήνα. Δίνεται πλέον η δυνατότητα της δοκιμής των ελεγκτών στο πραγματικό σύστημα και εξαλείφεται η εξάρτηση, που υπήρχε έως τώρα, από τη μοντελοποίηση του φυσικού συστήματος και όλες τις δυσκολίες που συνεπάγονται αυτού. Η βελτιστοποίηση των ελεγκτών θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων και νευρωνικών δικτύων και θα δίνεται κάθε φορά η δυνατότητα της δοκιμής τους ώστε τα συμπεράσματα που θα προκύπτουν να είναι όσο το δυνατό πιο αξιόπιστα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Van Brakel J., *Mass transfer in convective drying*, Hemisphere Publishing, Washington, USA, 1980.
- [2] Strumillo C., Kudra T., *Drying: Principles, Applications and Design*, Gordon and Breach Science Publishers, Montreaux, 1986.
- [3] Kelly J. J., *Rotary drying*, Handbook of Industrial Drying, Marcel Dekker Inc., New York, 1995.
- [4] Ιωάννης Κ. Νικολός, *Μετάδοσης Θερμότητας*, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2002.
- [5] F. Incropera, D. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley, 4th edition, 1996.
- [6] Σ. Τζαφέστας, *Υπολογιστική Νοημοσύνη, Τόμος Α: Μεθοδολογίες*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2002.
- [7] J-S. R. Jang, C-T. Sun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing, A computational approach to learning and machine intelligence*, Prentice Hall, 1997.
- [8] J. Koskinen, L. Yliniemi, K. Leiviska, "Fuzzy Modeling of a Pilot Plant Rotary Dryer", *IEEE International Conference on Control*, 1998.
- [9] L. Yliniemi, J. Koskinen, K. Leiviska, "Data-driven Fuzzy Modeling of a Rotary Dryer", *International Journal of Systems Science*, Vol. 34, pp. 819-836, 2003.
- [10] L. Yliniemi, *Advanced Control of a Rotary Dryer*, PhD Thesis, Acta Universitas Ouluensis, 1999.
- [11] N.C. Tsourveloudis, L. Kiralakis, "Rotary Drying of Olive Stones: Fuzzy Modeling and Control", *WSEAS Transactions on Systems*, Issue 12, Vol. 4, pp. 2361-2368, 2005.
- [12] L. Kiralakis, N.C. Tsourveloudis, "Modeling and Optimization of Olive Stone Drying process", *Proceedings of the WSEAS International MultiConference on Dynamical Systems and Control*, Venice, Italy, November 2-4, 2005.
- [13] Ελευθέριος Ζ. Κυραλάκης, *Μοντελοποίηση και Έλεγχος Διαδικασίας Ξήρανσης Ελαιοπυρήνα*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2003