

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μοντελοποίηση και Έλεγχος Διαδικασίας  
Ξήρανσης Ελαιοπυρήνα

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ Ζ. ΚΥΡΑΛΑΚΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής  
ΝΙΚΟΣ ΤΣΟΥΡΒΕΛΟΥΔΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2003



## Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Νίκο Τσουρβελούδη, πρώτα από όλα, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και μου ανέθεσε την εργασία αυτή. Ήταν πολύ σημαντικό για μένα για το λόγο ότι με έφερε σε επαφή με ένα απολύτως ρεαλιστικό πρόβλημα και οι εμπειρίες που αποκόμισα είναι σίγουρο ότι θα με βοηθήσουν στο μέλλον. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω γιατί με έμαθε να αντιμετωπίζω και να ερευνώ λύσεις για προβλήματα που μέχρι πρότινος θεωρούσα εξαιρετικά δύσκολα ή άλυτα. Βέβαια και οι παρεμβάσεις του στην εργασία οφείλω να ομολογήσω ότι ήταν καθοριστικές για την εξέλιξη της.

Ευχαριστώ επίσης τον καθηγητή Νικολό Ιωάννη για την μεγάλη προθυμία που έδειξε να με βοηθήσει και για τις πολύτιμες συμβουλές του στην ανάπτυξη του φυσικού συστήματος της εργασίας.

Νιώθω ακόμα βαθύτατα υποχρεωμένος στον μηχανολόγο μηχανικό κύριο Στροφίλα Άρη, στον διευθυντή κύριο Γεωργουσάκη Ανδρέα και σε όλο το προσωπικό της εταιρίας Α.Β.Ε.Α για τις πολύτιμες πληροφορίες που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους μου Γιώργο Καλουτσάκη και Κώστα Κουτσούκο για την ηθική συμπαράσταση και τη συνεχή βοήθεια που μου παρείχαν.

Ευχαριστώ ακόμα τον υποψήφιο διδάκτωρ Δοϊτσίδα Λευτέρη ο οποίος ήταν δίπλα μου σε οποιοδήποτε πρόβλημα αντιμετώπισα στην εργασία αυτή. Τέλος ευχαριστώ για τη βοήθεια τους, τον Χ. Σπανουδάκη και τον Μ. Κοντίτση.

Χανιά, Ιούλιος 2003  
Ελευθέριος Ζ. Κυραλάκης

*Αφιερώνεται στην  
οικογένεια μου*

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>3</b>
1.1. Γενικά.....	3
1.2. Περιγραφή προβλήματος.....	3
1.3. Συνεισφορά στην επίλυση του προβλήματος.....	4
1.4. Δομής της εργασίας.....	5
<b>2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ.....</b>	<b>6</b>
2.1. Η Ξήρανση .....	6
2.2. Μεταφορά Θερμότητας .....	7
2.2.1. Μετάδοση Θερμότητας από Θερμαντική Επιφάνεια σε Μηχανικά Ανακατεμένες Συσσωρεύσεις .....	8
2.2.1.1. Υπολογισμός του συντελεστή Συναγωγής για μετάδοση θερμότητας από θερμαινόμενη επιφάνεια σε συσσώρευση .....	9
2.2.2. Μετάδοση Θερμότητας Περιρρέουσας Σφαίρας .....	14
2.2.2.1. Υπολογισμός του συντελεστή περιρρέουσας σφαίρας.....	14
2.3. Περιγραφή Μεθοδολογικών Εργαλείων .....	16
2.3.1. Ασαφής Λογική .....	17
2.3.1.1. Συναρτήσεις Συμμετοχής.....	17
2.3.1.2. Μορφή των Συναρτήσεων Συμμετοχής .....	18
2.3.1.3. Βάση Γνώσης.....	19
2.3.1.4. Η Συνεπαγωγή του Mamdani.....	19
2.3.1.5. Δομικά Στοιχεία ενός Ασαφούς Ελεγκτή .....	20
2.3.1.6. Από-ασαφοποίηση .....	20
2.3.1.7. Σχεδιασμός Ασαφούς Ελεγκτή .....	21
2.3.2. MATLAB .....	22
2.3.3. Τα m-files .....	22
2.3.4. Το περιβάλλον προσομοίωσης SIMULINK .....	23
2.4. Γιατί χρησιμοποιείται η Ασαφής Λογική .....	24

<b>2.5. Περιγραφή Λογισμικού Προσομοίωσης .....</b>	<b>25</b>
<b>3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ .....</b>	<b>32</b>
3.1. Ανάλυση του ξηραντηρίου .....	32
3.2. Δομικά στοιχεία του ξηραντηρίου – Η Λειτουργία τους .....	35
3.3. Ανάδειξη του προβλήματος .....	40
<b>4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....</b>	<b>42</b>
4.1. Ο Ασαφής Ελεγκτής .....	42
4.1.1. Καθορισμός των Μεταβλητών Εισόδου και της Διακύμανσής τους.....	42
4.1.2. Προτεραιότητα των Εισόδων .....	44
4.1.3. Καθορισμός των Μεταβλητών Εξόδου και της Διακύμανσής τους. ....	46
4.1.4. Συναρτήσεις Συμμετοχής των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του ελεγκτή.....	47
4.1.5. Δημιουργία των Κανόνων Ασαφούς Λογικής .....	50
4.2. Το Φυσικό Σύστημα .....	52
4.2.1. Υπολογισμός της εξίσωσης που αντιπροσωπεύει το Φυσικό Σύστημα...	53
4.2.2. Προσαρμογή των συντελεστών $\alpha_1$ και $\alpha_2$ στο συγκεκριμένο πρόβλημα.	56
4.3. Το Μοντέλο SIMULINK .....	59
4.3.1. Μοντελοποίηση στο SIMULINK της εξίσωσης του φυσικού συστήματος. .....	60
4.3.2. Μοντελοποίηση του συστήματος ελέγχου .....	65
<b>5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>68</b>
5.1. Γενικά.....	68
5.2. Προσομοιώσεις.....	68
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>90</b>

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. Γενικά

Η Α.Β.Ε.Α δραστηριοποιείται στον κλάδο προϊόντων ελιάς πάνω από ένα αιώνα. Η παραγωγική εμπειρία που έχει συσσωρευτεί στην εταιρεία είναι τεράστια. Το τμήμα του πυρηνελαιουργείου πρόσφατα εγκαταστάθηκε στη θέση Πόρτι Κεραμειών από την περιοχή της Νέας Χώρας Χανίων. Απαραίτητο τμήμα για τη λειτουργία του πυρηνελαιουργείου είναι το ξηραντήριο. Στόχος του ξηραντηρίου είναι η μείωση της υγρασίας της πρώτης ύλης (ελαιοπυρήνας υγρασίας 48-54%) και η παραγωγή ελαιοπυρήνα τελικής υγρασίας γύρω στο 8%. Ο τελευταίος χρησιμοποιείται άμεσα στην επόμενη φάση παραγωγής τελικών προϊόντων, δηλαδή στην φάση εμπλουτισμού του αποξηραμένου ελαιοπυρήνα με βενζόλιο για την παραγωγή λαδιού όλων των τύπων και ποιοτήτων.

Η περιστροφική ξήρανση, 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. Προκειμένου να προσαρμοστούν καλύτερα στις απαιτήσεις της σύγχρονης κοινωνίας σχετικά με τις προδιαγραφές ασφάλειας και τα περιβαλλοντικά οφέλη είναι μια ευκαιρία να βελτιωθεί και η λειτουργία τους και η αποδοτικότητά τους.

### 1.2. Περιγραφή προβλήματος

Οι γνώσεις που αφορούν στην περιστροφική ξήρανση είναι ελλιπείς, επειδή είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία. Ακόμη και σήμερα οι περιστροφικοί ξηραντήρες ελέγχονται χειροκίνητα, βασιζόμενοι στην εμπειρία του χειριστή. Αυτό έχει ως συνέπεια να γίνονται αρκετά σφάλματα στη διαδικασία. Ο χειριστής βασιζόμενος στην εμπειρία του κάνει τις αναγκαίες ρυθμίσεις προκειμένου να εξελιχθεί η παραγωγική διαδικασία ομαλά. Οι μετρήσεις που γίνονται κατά την ξήρανση

βασίζονται σε καταγραφείς θερμοκρασίας και στην ικανότητα του χειριστή να διακρίνει εμπειρικά αν ο ελαιοπυρήνας έχει την κατάλληλη υγρασία ή όχι έτσι ώστε να προβεί στις απαιτούμενες ενέργειες. Οι μοναδικές παρεμβάσεις τις οποίες μπορεί να κάνει ο χειριστής στην σημερινή παραγωγική διαδικασία είναι να μεταβάλει την παροχή πρώτης ύλης και να αυξομειώνει την θερμοκρασία των καυσαερίων με τα οποία γίνεται η ξήρανση του πυρήνα. Οι παρεμβάσεις αυτές βασίζονται ολοκληρωτικά στην κρίση και στην εμπειρία του κάθε χειριστή με συνέπεια αυτές να μην είναι πάντα οι πλέον κατάλληλες. Τα αποτελέσματα αυτών των μεταβολών αργούν να γίνουν εμφανή καθώς υπεισέρχεται μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου 25 λεπτά) μέχρι να σταθεροποιηθεί η παραγωγή και έτσι ένα τμήμα του ελαιοπυρήνα δεν ξηραίνεται σε ικανοποιητικό βαθμό. Σημαντικοί είναι και οι κίνδυνοι που υπάρχουν από την έλλειψη αυτοματοποίησης δεδομένου ότι σε περίπτωση μεγάλης παροχής πυρήνα υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης του, καθώς το ξηραντήριο δε θα μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της διαδικασίας. Ακόμα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας υπάρχει κίνδυνος οι εκπομπές βλαβερών ουσιών στην ατμόσφαιρα να αυξηθούν σημαντικά.

### **1.3. Συνεισφορά στην επίλυση του προβλήματος**

Αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η μελέτη αυτοματοποίησης της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα. Προτείνεται η ανάπτυξη συστήματος καταγραφής και ελέγχου της διαδικασίας ξήρανσης του ελαιοπυρήνα που βασίζεται σε πολλαπλούς αισθητήρες εγκατεστημένους σε νευραλγικά σημεία του ξηραντηρίου. Οι αισθητήρες αυτοί θα τροφοδοτούν διαρκώς με νέα δεδομένα την κεντρική μονάδα ελέγχου η οποία θα τα διαχειρίζεται και θα εκτελεί τις επιβεβλημένες ενέργειες έτσι ώστε η τελική υγρασία του πυρήνα, η οποία εξέρχεται του ξηραντηρίου, να κυμαίνεται κοντά στο 8% το οποίο είναι και το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Η κεντρική μονάδα ελέγχου σχεδιάστηκε ώστε να καταγράφει 1) την αρχική υγρασία του πυρήνα που εισέρχεται στο ξηραντήριο καθώς και 2) την τελική του υγρασία όταν αυτός εξέρχεται του ξηραντηρίου. Ο ελεγκτής επεξεργάζεται τα δεδομένα αυτά και επενεργεί σε δύο μεταβλητές του συστήματος: 1) την θερμοκρασία των καυσαερίων που βοηθούν στη ξήρανση του πυρήνα και 2) την ποσότητα του



πυρήνα που εισέρχεται στο ξηραντήριο σε κάποιο συγκεκριμένο χρόνο. Οι δύο πρώτες μεταβλητές, αρχική υγρασία του πυρήνα και τελική υγρασία του πυρήνα, αποτελούν τις εισόδους του ασαφούς ελεγκτή ενώ οι δύο επόμενες, θερμοκρασία των καυσαερίων ξήρανσης και εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα, τις εξόδους του.

Με τη δημιουργία του ελεγκτή, ο οποίος στηρίζεται σε ασαφείς κανόνες ελέγχου, θα πραγματοποιείται ένας πλήρης αυτοματοποιημένος έλεγχος της διαδικασίας ξήρανσης του πυρήνα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την εξάλειψη πολλών προβλημάτων που αντιμετωπίζει σήμερα η διαδικασία της ξήρανσης. Οι μετρήσεις θα γίνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια και οι αντιδράσεις του ελεγκτή θα είναι σαφώς ταχύτερες από αυτές του χειριστή. Έτσι αναμένεται καλύτερη ποιότητα ξηραμένου πυρήνα, εντός των προδιαγραφών υγρασίας που έχουν τεθεί έτσι ώστε η ποιότητα του πυρηνελαίου που προκύπτει να είναι βέλτιστη.

#### **1.4. Δομής της εργασίας**

Στη συνέχεια της εργασίας θα παρουσιαστούν τα μεθοδολογικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για να κατασκευαστεί το σύστημα ελέγχου του ξηραντηρίου. Θα γίνει ακόμα αναλυτική περιγραφή του προβλήματος που πρέπει να αντιμετωπιστεί καθώς επίσης και παρουσίαση του ξηραντηρίου με τα δομικά στοιχεία που το αποτελούν. Ακολούθως θα μοντελοποιηθεί το πρόβλημα σε περιβάλλον MATLAB και SIMULINK. Τέλος θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή του συστήματος ελέγχου ασαφούς λογικής στην διαδικασία ξήρανσης του πυρήνα μαζί με συμπεράσματα από την εφαρμογή των λύσεων που προτείνονται στην εργασία αυτή.

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ

### 2.1. Η Ξήρανση [1]

Η ξήρανση είναι μια λειτουργία μεγάλης εμπορικής σπουδαιότητας σε όλες τις βιομηχανικές εφαρμογές. Η σύγχρονη κοινωνία απαιτεί την καλύτερη ποιότητα των προϊόντων, βελτιωμένες πρακτικές ασφάλειας και διαδικασίες πιο φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς επίσης και υψηλότερη παραγωγικότητα, καλύτερη ενεργειακή αποδοτικότητα και μειωμένες υλικές απώλειες. Η ξήρανση με τη συνδρομή των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου μπορεί να επιτύχει όλους αυτούς τους στόχους.

Η ξήρανση είναι μια διαδικασία στην οποία ένα πτητικό υγρό αφαιρείται από ένα στερεό με εξάτμιση. Τα στερεά μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- ❑ Μη υγροσκοπικά τριχοειδή – πορώδη υλικά όπως ο πυρήνας του καρπού της ελιάς και η άμμος.
- ❑ Υγροσκοπικά πορώδη όπως ο άργιλος και το ξύλο.
- ❑ Κολλοειδή όπως το σαπούνι και η κόλλα.

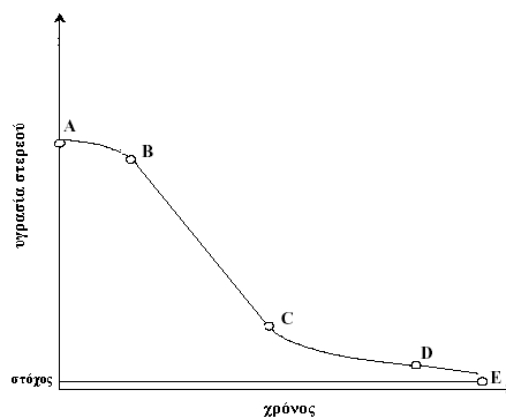
Στην πρώτη κατηγορία στερεών που εξετάζεται εδώ υπάρχει ένα σαφώς αναγνωρισμένο διάστημα πόρων που κατακλύζεται από το υγρό όταν τα στερεά είναι εντελώς διαποτισμένα ή από τον αέρα όταν είναι εντελώς ξηραμένα. Τα στερεά αυτά έχουν επίσης την ιδιότητα ότι δεν συρρικνώνονται κατά την ξήρανση.

Όταν ένα στερεό ξηραίνεται λαμβάνουν χώρα δύο βασικές διαδικασίες. Η θερμότητα μεταφέρεται στο στερεό από το περιβάλλον μέσο που συνήθως είναι ο αέρας και η υγρασία μεταφέρεται ως υγρό μέσα στο στερεό και όπως ο ατμός από την επιφάνειά του.

Η υγρασία στα πορώδη στερεά μπορεί να μεταφερθεί σύμφωνα με τη θεωρία της διάχυσης, της τριχοειδούς θεωρίας και της θεωρίας της συμπυκνωμένης εξάτμισης. Ο μηχανισμός ξήρανσης εξαρτάται από τη δομή του στερεού, την περιεκτικότητά του σε υγρασία και την θερμοκρασία και την πίεση στους πόρους του. Η θεωρία της διάχυσης υποθέτει ότι η υγρασία κινείται μέσα στο στερεό σε υγρή μορφή σαν αποτέλεσμα της διαφοράς συγκέντρωσης της υγρασίας μέσα σε αυτό, ενώ η τριχοειδής θεωρία υποθέτει ότι υγρό υπάρχει μόνο στα τριχοειδή αγγεία του στερεού

και ότι η ροή αυτού μέσα στα διάκενα και πάνω στην επιφάνεια γίνεται εξαιτίας της μοριακής έλξης υγρού και στερεού. Η θεωρία της συμπυκνωμένης εξάτμισης υποθέτει ότι η ροή της υγρασίας μέσα σε ένα στερεό πραγματοποιείται εξ ολοκλήρου στις αέριες φάσεις.

Στην εικόνα 2-1 που ακολουθεί φαίνεται η καμπύλη της υγρασίας του στερεού καθώς μειώνεται, σύμφωνα με τις προηγούμενες θεωρίες, σε σχέση με το χρόνο. Η καμπύλη A-B αναπαριστά την μείωση της υγρασίας κατά την διάρκεια της αρχικής περιόδου ξήρανσης, ενώ στη συνέχεια η υγρασία μειώνεται με ένα σταθερό ρυθμό. Τέλος από το σημείο C ξεκινά μία καμπύλη η οποία πλησιάζει ασυμπτωτικά το τελικό ποσοστό υγρασίας (στόχος).



Εικόνα 2-1 Καμπύλη Υγρασίας

## 2.2. Μεταφορά Θερμότητας

Η μετάδοση θερμότητας στον περιστρεφόμενο ξηραντήρα είναι ένα από τα βασικότερα, εάν όχι το βασικότερο, φαινόμενο που συμβαίνει. Διαδραματίζει πρωτεύουσας σημασίας ρόλο στην διαδικασία ξήρανσης του πυρήνα και για το λόγο αυτό θα πρέπει να αναλυθεί διεξοδικά.

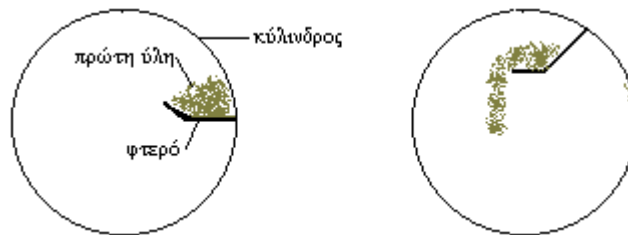
Στους περισσότερους ξηραντήρες η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται με περισσότερες από μία μεθόδους αλλά καθένας από αυτούς έχει μία με δύο επικρατούσες μεθόδους μεταφοράς θερμότητας. Στον περιστρεφόμενο ξηραντήρα, που μελετάται εδώ, οι κυρίαρχες μέθοδοι μεταφοράς θερμότητας είναι:

- Μετάδοση θερμότητας από θερμαντική επιφάνεια σε μηχανικά ανακατεμένες συσσωρεύσεις.

- Μετάδοση θερμότητας περιρρέουσας σφαίρας.

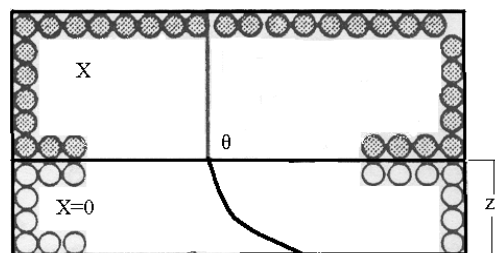
### 2.2.1. Μετάδοση Θερμότητας από Θερμαντική Επιφάνεια σε Μηχανικά Ανακατεμένες Συσσωρεύσεις [2]

Το προς ξήρανση στερεό βρίσκεται μέσα στον ξηραντήρα και ανακατεύεται, εξαιτίας της περιστροφής του κυλίνδρου και της ύπαρξης των φτερών μέσα σε αυτόν. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει κάποιος χρόνος που το στερεό βρίσκεται πάνω στα φτερά και ηρεμεί, για αυτό και ο χρόνος αυτός ονομάζεται χρόνος ηρεμίας. Στη διάρκεια κάθε νοητού χρόνου ηρεμίας, μέσα στη συσσώρευση εισέρχεται ένα οξύ μέτωπο ξήρανσης από τα φτερά που αποτελούν τη θερμαινόμενη επιφάνεια και στο τέλος αυτού πραγματοποιείται μια απότομη και ιδανική ανάμιξη της συσσώρευσης. Το βάθος διείσδυσης του μετώπου ξήρανσης εξαρτάται από την ένταση της λανθάνουσας πτώσης και επομένως αυξάνει προοδευτικά με την ξήρανση.



Σχέδιο 1 Κάθετη τομή του περιστρεφόμενου κυλίνδρου καθώς το στερεό βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας και πτώσης

Στην εικόνα 2-2 φαίνεται το μέγεθος  $X$  που είναι η ομοιόμορφα κατανεμημένη περιεκτικότητα της συσσώρευσης σε υγρασία στο μέτωπο της ξήρανσης,  $\theta$  η αντίστοιχη θερμοκρασία της συσσώρευσης και  $z_T$  η στιγμιαία θέση του μετώπου ξήρανσης.



Εικόνα 2-2 Μέτωπο Ξήρανσης Συσσώρευσης

### 2.2.1.1. Υπολογισμός του συντελεστή συναγωγής για μετάδοση θερμότητας από θερμαινόμενη επιφάνεια σε συσσώρευση

Ορίζουμε ως  $\alpha_1$  τον συντελεστή συναγωγής για μετάδοση θερμότητας από θερμαινόμενη επιφάνεια σε συσσώρευση σε μονάδες  $(W/m^2 \text{ } ^\circ K)$ . Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται σε αυτή την ενότητα. Έτσι ισχύει η σχέση:

$$\alpha_1 = \phi \alpha_w + \alpha_r \quad (1)$$

όπου

$\phi=0.8$ , ο βαθμός επικάλυψης για μονοδιασπαρμένες συσσωρεύσεις σφαιρικών σωματιδίων.

$\alpha_w$ : ο συντελεστής συναγωγής του τοιχώματος

$\alpha_r$ : ο συντελεστής συναγωγής ακτινοβολίας

Ισχύει επίσης η σχέση:

$$\alpha_r = 4C_w T^3$$

όπου

$$C_w = \frac{\sigma}{\left( \frac{1}{E_w} + \frac{1}{E_b} - 1 \right)}$$

Άρα

$$\alpha_r = 4 \left( \frac{\sigma}{\frac{1}{E_w} + \frac{1}{E_b} - 1} \right) T^3 \quad (2)$$

όπου

$\sigma$ : η σταθερά ακτινοβολίας σε  $\left( \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K^4} \right)$

$E_w$ : ο βαθμός εκπομπής τοιχώματος

$E_b$ : ο βαθμός εκπομπής συσσώρευσης

$T$ : η θερμοκρασία των καυσαερίων που κινούνται στον περιστρεφόμενο κύλινδρο

Ο συντελεστής συναγωγής  $\alpha_w$  του τοιχώματος είναι:

$$\alpha_w = 4 \frac{\lambda_g}{d} A \quad (3)$$

όπου τα  $A$ ,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  και  $x_5$  που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια είναι απλές σχέσεις που βοηθούν στον υπολογισμό της σχέσης (3).

και

$$\lambda_g : \text{ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε } \left( \frac{W}{m \text{ } ^\circ K} \right)$$

$d$  : η διάμετρος των σωματιδίων

και

$$A = \ln \left( 1 + x_1 \right) \left( 1 + \frac{1}{x_1} \right) - 1 \quad (4)$$

με

$$x_1 = \frac{d}{2 \left( 38 \frac{x_2 x_3 x_4}{P} + \delta \right)} \quad (5)$$

όπου

$P$  : η πίεση του αέρα σε Pa

$\delta$  : η επιφανειακή τραχύτητα του πυρήνα σε μέτρα

και

$$x_4 = \frac{\lambda_g}{2C_{p,g} - \frac{R}{M}}$$

όπου

$$C_{p,g} : \text{η ειδική θερμοχωρητικότητα του αερίου σε } \left( \frac{J}{Kgr \text{ } ^\circ K} \right)$$

$$R = 8.314 \text{ η παγκόσμια σταθερά αερίου σε } \left( \frac{J}{mol \text{ } ^\circ K} \right)$$

$$M : \text{η μοριακή μάζα του αερίου σε } \left( \frac{Kgr}{Kmol} \right)$$

και

$$x_3 = \sqrt{\left( 2\pi T \frac{R}{M} \right)}$$

όπου

$$\pi=3.14$$

$T$  : η θερμοκρασία των καυσαερίων που κινούνται στον περιστρεφόμενο κύλινδρο  
και

$$x_2 = 2 + 4 * 10^{x_5}$$

$$x_5 = 0.6 - \frac{\frac{1000}{T} + 1}{C}$$

με

$C=2.8$ , η χαρακτηριστική που εξαρτάται από τη μοριακή μάζα του αερίου

Άρα

$$x_2 = 2 + 4 * 10^{0.6 - \frac{\frac{1000}{T} + 1}{C}}$$

Αντικαθιστώντας τα  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  στην (5) προκύπτει:

$$x_1 = \frac{d}{2 \cdot 38 \cdot \left( \frac{2 + 4 * 10^{0.6 - \frac{\frac{1000}{T} + 1}{C}}}{P} \sqrt{\left( 2\pi T \frac{R}{M} \right) \frac{\lambda_g}{2C_{p,g} - \frac{R}{M}}} + \delta \right)} \quad (6)$$

Και με αντικατάσταση της σχέσης (6) στην (4) προκύπτει το  $A$ :

$$A = \ln \left[ 1 + \frac{d}{2 \left[ \frac{\left( 2 + 4 \cdot 10^{\frac{1000}{C} - 0.6} \right)^{\frac{1}{C} + 1}}{38} \sqrt{\left( 2\pi T \frac{R}{M} \right) \frac{\lambda_g}{2C_{p,g} - \frac{R}{M}} + \delta} \right]} \right] * \left[ \frac{\left( 2 + 4 \cdot 10^{\frac{1000}{C} - 0.6} \right)^{\frac{1}{C} + 1}}{38} \sqrt{\left( 2\pi T \frac{R}{M} \right) \frac{\lambda_g}{2C_{p,g} - \frac{R}{M}} + \delta} \right]^{-1} \quad (7)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (2), (3) και (7) στην (1) προκύπτει ο συντελεστής συναγωγής  $\alpha_1$  που είναι και το ζητούμενο αυτής της παραγράφου:



$$\alpha_1 = 4\phi \frac{\lambda_g}{d} \ln \left[ 1 + \frac{d}{2 \left[ \frac{2 + 4 \cdot 10^{0.6 - \frac{1000}{T} + 1}}{38} \sqrt{\left( 2\pi T \frac{R}{M} \right) \frac{\lambda_g}{2C_{p,g} - \frac{R}{M}} + \delta} \right]} \right]^* \cdot \left[ \frac{2 \left[ \frac{2 + 4 \cdot 10^{0.6 - \frac{1000}{T} + 1}}{38} \sqrt{\left( 2\pi T \frac{R}{M} \right) \frac{\lambda_g}{2C_{p,g} - \frac{R}{M}} + \delta} \right]}{1 + \frac{d}{2 \left[ \frac{2 + 4 \cdot 10^{0.6 - \frac{1000}{T} + 1}}{38} \sqrt{\left( 2\pi T \frac{R}{M} \right) \frac{\lambda_g}{2C_{p,g} - \frac{R}{M}} + \delta} \right]}} - 1 \right] + 4 \left( \frac{\sigma}{\frac{1}{E_w} + \frac{1}{E_b} - 1} \right) T^3$$

που μετριέται σε  $\left( \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K} \right)$  ή διαιρώντας τον με το 0.86 αλλάζουν οι μονάδες του και

τα watt μετατρέπονται σε kcal ανά ώρα:

$$\alpha_1 = \frac{\phi\alpha_w + \alpha_r}{0.86} \text{ σε } \left( \frac{Kcal}{hm^2 \text{ } ^\circ K} \right)$$

### 2.2.2. Μετάδοση Θερμότητας Περιρρέουσας Σφαίρας [2]

Η μεταφορά θερμότητας με τη μέθοδο της περιρρέουσας σφαίρας λαμβάνει χώρα κατά την πτώση από τα φτερά του προς ξήρανση στερεού καθώς ο ξηραντήρας περιστρέφεται. Κατά την περίοδο αυτή το στερεό, που οι κόκκοι του έχουν σφαιρική μορφή, δέχεται το θερμό ρεύμα αέρα που κινείται μέσα στον κύλινδρο κι έτσι μεταφέρεται η θερμότητα από τον θερμό αέρα στο στερεό. Η διάρκεια που συμβαίνει το φαινόμενο αυτό εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την διάρκεια της πτώσης του στερεού και κατά συνέπεια από τη διάμετρο του περιστρεφόμενου κυλίνδρου και τη διαμόρφωση των φτερών του.

Όπως παρουσιάζεται στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας αυτής η συνεισφορά του συντελεστή περιρρέουσας σφαίρας στη μετάδοση θερμότητας είναι κατά πολύ μικρότερη από αυτή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από θερμαινόμενη επιφάνεια που παρουσιάστηκε παραπάνω.

#### 2.2.2.1. Υπολογισμός του συντελεστή περιρρέουσας σφαίρας

Ο συντελεστής περιρρέουσας σφαίρας συμβολίζεται με  $\alpha_2$ , μετριέται σε μονάδες  $(W/m^2 \text{ } ^\circ K)$  και υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης του αδιάστατου αριθμού Nubelt που έχει τη μορφή:

$$N_u = \frac{\alpha_2 l}{\lambda_g}$$

ή

$$\alpha_2 = \frac{N_u \lambda_g}{l} \quad (8)$$

όπου

$N_u$  : ο αδιάστατος αριθμός Nubelt,

$\lambda_g$  : ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε  $\left( \frac{W}{m^{\circ}K} \right)$  και

$l$  : το εύρος περιρροής που για σφαίρα ισούται με τη διάμετρο της

όμως ισχύει και η σχέση

$$N_u = 0.56 \left[ \left( \frac{P_r}{0.846 + P_r} \right) R_a \right]^{\frac{1}{4}} + 2 \quad (9)$$

όπου

$P_r$  : ο αδιάστατος αριθμός Prandtl  $= n \frac{C_p}{\lambda_g}$

$n$  : το δυναμικό ιξώδες σε  $\left( \frac{Kgr}{msec} \right)$

$C_p$  : η ειδική θερμοχωρητικότητα  $\left( \frac{J}{Kgr^{\circ}K} \right)$  και

$R_a$  : ο αδιάστατος αριθμός Rayleigh

$$R_a = P_r G_r \quad (10)$$

έτσι αντικαθιστώντας τη σχέση (10) στην (9) προκύπτει ότι:

$$N_u = 0.56 \left[ \left( \frac{P_r}{0.846 + P_r} \right) P_r G_r \right]^{\frac{1}{4}} + 2 \quad (11)$$

όπου

$G_r$  : ο αδιάστατος αριθμός Grashof με

$$G_r = g \beta \Delta T \frac{l^3}{\nu^2} \quad (12)$$

και

$g=9.81$  σε  $\left( \frac{m}{sec^2} \right)$ ,

$\beta$ : ο συντελεστής κατ' όγκο θερμικής διαστολής και

$\nu$ : το κινηματικό ιξώδες  $\left( \frac{m^2}{sec} \right)$ .

Με αντικατάσταση της σχέσης (12) στην προηγούμενη σχέση (11) προκύπτει:

$$N_u = 0.56 \left[ \left( \frac{P_r}{0.846 + P_r} \right) P_r g \beta \Delta T \frac{l^3}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{4}} + 2 \quad (13)$$

όπου

$\Delta T$ : η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των καυσαερίων και της πρώτης ύλης

και

$T$ : η θερμοκρασία των καυσαερίων που κινούνται στον περιστρεφόμενο κύλινδρο

έτσι με αντικατάσταση της σχέσης (13) στην σχέση (8) προκύπτει ο συντελεστής περιρρέουσας σφαίρας,  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_g}{l} \left[ 0.56 \left[ \left( \frac{P_r}{0.846 + P_r} \right) P_r g \beta \Delta T \frac{l^3}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{4}} + 2 \right]$$

που μετριέται σε  $\left( \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right)$  ή διαιρώντας τον  $\alpha_2$  με το 0.86 έχουμε αλλαγή στις

μονάδες, από watt σε Kcal ανά ώρα:

$$\alpha_2 = \frac{1}{0.86} \frac{\lambda_g N_u}{l} \text{ σε } \left( \frac{Kcal}{h \cdot m^2 \cdot ^\circ K} \right)$$

### 2.3. Περιγραφή Μεθοδολογικών Εργαλείων

Για να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα της διαδικασίας ξήρανσης του πυρήνα, να δημιουργηθεί ο ελεγκτής που θα ελέγχει το σύστημα και τελικά να προσομοιωθεί με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια θα χρησιμοποιηθούν κάποια μεθοδολογικά εργαλεία. Τα εργαλεία αυτά είναι:

1. Η Θεωρία Ασαφούς Λογικής και ειδικότερα ο Ασαφής Έλεγχος
2. Το λογισμικό MATLAB και
3. Το περιβάλλον προσομοίωσης SIMULINK της MATLAB

### 2.3.1. Ασαφής Λογική [3]

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.

Η ασαφής λογική επιτρέπει, σε ένα βαθμό, τη σχέση μεταξύ των ασαφών συνόλων έτσι μπορεί κάτι να είναι μερικώς αληθές και ταυτόχρονα μερικώς ψευδές αφού δύναται να είναι μέλος σε δύο ή και περισσότερα ασαφή σύνολα ταυτόχρονα.

#### 2.3.1.1. Συναρτήσεις Συμμετοχής

Οι συναρτήσεις συμμετοχής είναι καμπύλες που καθορίζουν πώς κάθε σημείο στο διάστημα εισαγωγής απεικονίζεται σε μια τιμή της συνάρτησης μεταξύ του 0 και του 1. Εάν  $X$  είναι το υπερσύνολο αναφοράς με επιμέρους στοιχεία  $x$ , τότε  $X=\{x\}$ . Ένα ασαφές σύνολο  $A$  του υπερσυνόλου αναφοράς  $X$  μπορεί να εκφραστεί συμβολικά ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών:

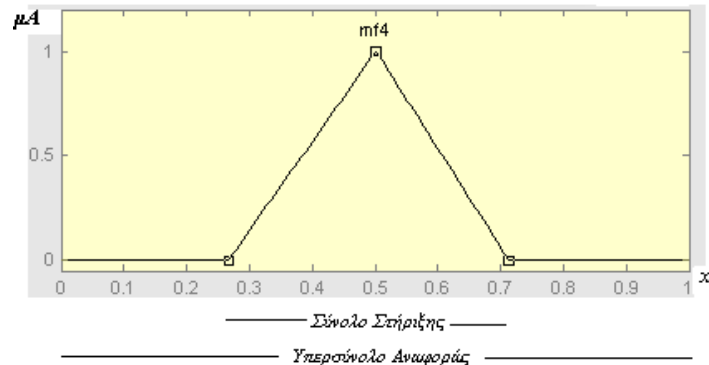
$$A = \int \{ \mu_A(x)/x \} \text{ ή } \sum \{ \mu_A(x)/x \} \text{ για } x \in X$$

για τη συνεχή και τη διακριτή περίπτωση αντιστοίχως. Εδώ  $\mu_A(x)$  καλείται η συνάρτηση συμμετοχής (membership function) του  $x$  στο σύνολο  $A$  και είναι μια απεικόνιση από το υπερσύνολο αναφοράς  $X$  στο κλειστό διάστημα  $[0,1]$ . Η συνάρτηση συμμετοχής υποδεικνύει το βαθμό κατά τον οποίο το σύνολο  $x$  ανήκει στο σύνολο  $A$ , δηλαδή

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

Τα σύμβολα  $\int$  και  $\sum$  εκφράζουν το 'σύνολο' και δεν έχουν καμία σχέση με το κλασικό ολοκλήρωμα ή άθροισμα.

Το σύνολο στήριξης ενός ασαφούς συνόλου  $A$  είναι το σύνολο των στοιχείων του υπερσυνόλου αναφοράς  $X$  για το οποίο  $\mu_A(x) > 0$ . Ένα ασαφές σύνολο μπορεί να θεωρηθεί ως μια απεικόνιση του συνόλου στήριξης στο κλειστό διάστημα  $[0,1]$ .

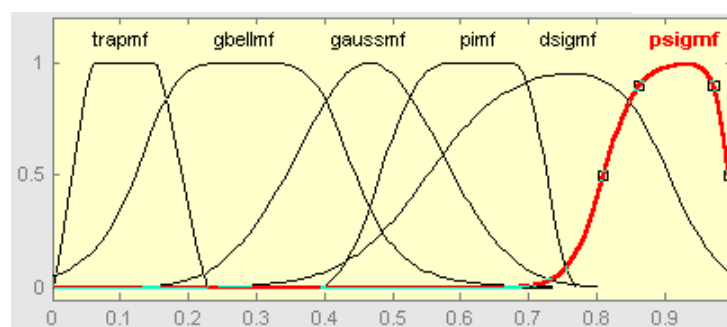


Εικόνα 2-3 Τριγωνική Συνάρτηση Συμμετοχής

### 2.3.1.2. Μορφή των Συναρτήσεων Συμμετοχής

Υπάρχουν αρκετοί τύποι συναρτήσεων συμμετοχής που βασίζονται σε βασικές συναρτήσεις όπως γραμμικές, Gaussian, σιγμοειδής και τετραγωνικές και κυβικές πολυωνυμικές καμπύλες. Οι απλούστερες συναρτήσεις συμμετοχής είναι αυτές που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας ευθείες γραμμές. Από αυτές η πιο απλή είναι η τριγωνική και ακολουθεί η τραπεζοειδής. Η πρώτη αποτελείται από τρία σημεία που δημιουργούν ένα τρίγωνο ενώ η δεύτερη από τέσσερα που δημιουργούν ένα τραπέζιο. Στην τραπεζοειδή συνάρτηση υπάρχει ένα ευθύγραμμο τμήμα, η μικρή βάση του τραπεζίου, στο οποίο η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής ισούται με ένα.

Στην εικόνα 2-4 που έπεται παρουσιάζονται διάφοροι τύποι συναρτήσεων συμμετοχής.



Εικόνα 2-4 Διάφοροι τύποι Συναρτήσεων Συμμετοχής

### 2.3.1.3. Βάση Γνώσης

Για τον έλεγχο διεργασιών με ασαφείς ελεγκτές απαιτείται ένα σύνολο γλωσσικών κανόνων. Οι κανόνες αυτοί είναι όμοιοι με αυτούς με τους οποίους εκπαιδεύονται και στη συνέχεια εφαρμόζουν οι χειριστές διεργασιών στην πράξη. Το σύνολο των κανόνων αποτελεί τη βάση γνώσης (rule base) του ελεγκτή. Φυσικό είναι να μην είναι γνωστοί όλοι οι κανόνες που είναι απαραίτητοι για να αντιμετωπίσουν όλες τις πιθανές καταστάσεις της ελεγχόμενης διαδικασίας. Συνεπώς ζητείται κάποια τεχνική ικανή να συμπεραίνει αποφάσεις από ελλιπή στοιχεία, όπως ακριβώς κάνει ένας άνθρωπος χειριστής. Η ασαφής λογική είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική για την εξεύρεση αποφάσεων κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Η γνώση για τον έλεγχο μιας διεργασίας συνήθως καθορίζεται από ένα σύνολο κανόνων της μορφής 'ΕΑΝ (αίτιο) ΤΟΤΕ (συμπέρασμα)' ή ΕΑΝ Α ΤΟΤΕ Β. Η τελευταία αποτελεί μια ασαφή εξαρτημένη δήλωση η οποία περιγράφει την εξάρτηση μιας γλωσσικής μεταβλητής από μία άλλη.

Οι τιμές μιας ασαφούς μεταβλητής μπορούν να θεωρηθούν ετικέτες ασαφών συνόλων. Έτσι, για παράδειγμα, η ασαφής μεταβλητή 'θερμοκρασία' σε κάποιο σημείο μιας βιομηχανικής διαδικασίας μπορεί να πάρει γλωσσικές τιμές κανονική, χαμηλή, μέση, υψηλή και πολύ υψηλή. Οι γλωσσικές τιμές αυτές μπορούν να περιγραφούν με ασαφή σύνολα.

### 2.3.1.4. Η Συνεπαγωγή του Mamdani

Η συνεπαγωγή του Mamdani χρησιμοποιεί τον τελεστή min και ορίζεται ως:

$$R_{\text{mamdani}} = A \times B$$

όπου Α, Β ασαφή σύνολα. Στο χώρο των συναρτήσεων συμμετοχής η συνεπαγωγή Mamdani είναι:

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

Ο συνδυασμός Ν εξαρτημένων σχέσεων γίνεται με το συνδετικό Ή, δηλαδή

$$R^N = \vee_k R^k \text{ όπου } k=1,2,\dots,N \text{ και}$$

$$\mu_R^N(x, y) = \vee_k (\mu_A^k(x) \wedge \mu_B^k(y))$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απλουστευμένη συνεπαγωγή του Mamdani άνοιξε το δρόμο για την ευρύτερη διάδοση της ασαφούς λογικής στις βιομηχανικές εφαρμογές.

### 2.3.1.5. Δομικά Στοιχεία ενός Ασαφούς Ελεγκτή

Τα απαραίτητα δομικά στοιχεία ενός ασαφούς ελεγκτή, βασισμένου σε κανόνες, είναι τα εξής:

- Η *βάση γνώσης* στην οποία είναι καταχωρημένη η κωδικοποιημένη γνώση (οι κανόνες ελέγχου) για τον έλεγχο της διαδικασίας.
- Τα *ασαφή σύνολα* που είναι καταχωρημένα είτε σε αναλυτική είτε σε διακριτή μορφή σε ειδικό αρχείο. Ο μηχανισμός συμπερασμού χρησιμοποιεί τα σύνολα αυτά για να αποδώσει τις πράξεις ελέγχου στη διαδικασία.
- Τον *ασαφοποιητή* όπου οι φυσικές μεταβλητές της διαδικασίας μετατρέπονται στη γλώσσα των ασαφών συνόλων.
- Το *μηχανισμό συμπεράσματος* όπου συμπεραίνονται οι αποφάσεις ελέγχου βάσει των διαθέσιμων κανόνων σε μορφή ασαφών συνόλων.
- Τον *από-ασαφοποιητή* όπου τα ασαφή σύνολα των εξόδων του ελεγκτή μετατρέπονται σε σαφείς δράσεις ελέγχου προς μετάδοση στους ενεργοποιητές της διαδικασίας μέσω των τοπικών μονάδων ελέγχου.

### 2.3.1.6. Από-ασαφοποίηση

Η από-ασαφοποίηση αποτελεί ένα σημαντικό κομμάτι του ελεγκτή και για το λόγο αυτό θα αναλυθεί πιο διεξοδικά. Κατά το στάδιο αυτό πραγματοποιείται η από-ασαφοποίηση της ασαφούς εξόδου σε σαφή τιμή. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές από-ασαφοποίησης. Η πλέον διαδεδομένη τεχνική, σε προβλήματα ελέγχου, και αυτή που χρησιμοποιείται στον συγκεκριμένο ελεγκτή είναι η *από-ασαφοποίηση κεντρώου*.

Στην τεχνική αυτή υπολογίζεται το κέντρο του εμβαδού της σύνθετης συνάρτησης συμμετοχής της εξόδου  $\mu_Y(y)$ , η οποία και θεωρείται ως το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή η σαφής τιμή της εξόδου.

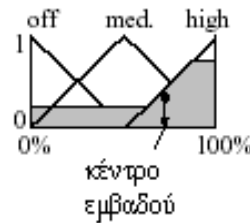
Εδώ:



$$\hat{y} = \frac{\int_S y \mu_Y(y) dy}{\int_S \mu_Y(y) dy}$$

όπου  $S$  είναι το σύνολο στήριξης της συνάρτησης  $\mu_Y(y)$ .

Στην εικόνα 2-5 παρουσιάζεται η λειτουργία της τεχνικής από-ασαφοποίησης κεντρώου.



Εικόνα 2-5 Από-ασαφοποίηση κεντρώου

Η μέθοδος αυτή συνηθίζεται στον ασαφή έλεγχο διεργασιών λόγω των λογικών αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

### 2.3.1.7. Σχεδιασμός Ασαφούς Ελεγκτή

Ο σχεδιασμός ενός ασαφούς ελεγκτή γίνεται σε πέντε βήματα:

- Στο πρώτο βήμα προσδιορίζεται το πρόβλημα. Συνήθως αυτό δεν είναι ένα μαθηματικό μοντέλο, απλά καθορίζεται πως θα πρέπει να λειτουργήσει το σύστημα που ελέγχεται.
- Καθορισμός όλων των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του συστήματος καθώς και της διακύμανσης τους.
- Καθορισμός των συναρτήσεων συμμετοχής για κάθε μεταβλητή εισόδου και εξόδου του συστήματος.
- Καθορισμός τελεστών λογικών πράξεων.
- Επιλογή μεθόδου από-ασαφοποίησης.

### 2.3.2. MATLAB [4]

Το λογισμικό πακέτο MATLAB (το όνομα προήλθε από τις λέξεις Matrix Laboratory) λειτουργεί ως διερμηνέας εντολών (command interpreter), που δίνονται μέσω του παραθύρου εντολών της (MATLAB command window). Οι εντολές αυτές μπορεί να είναι:

1. Ορισμοί μεταβλητών και πράξεις.
2. Κλήση ενσωματωμένων συναρτήσεων της MATLAB και των εγκατεστημένων εργαλειοθηκών της (toolboxes).
3. Κλήση συναρτήσεων (functions) ή αρχείων εντολών MATLAB που κατασκευάζονται από τους χρήστες με τη μορφή m-file.

Η ευρεία χρήση της MATLAB οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην επεκτασιμότητα της μέσω των διάφορων εργαλειοθηκών, κάθε μια από τις οποίες περιέχει ένα αριθμό συναρτήσεων για ένα συγκεκριμένο αντικείμενο. Η δομή των υπάρχοντων στοιχείων σε μια εγκατάσταση MATLAB παρουσιάζεται εκτελώντας την εντολή *help*.

Στη MATLAB τα βασικά στοιχεία δεδομένων δημιουργούν ένα πίνακα ο οποίος δε απαιτεί διαστασιολόγηση. Αυτό βοηθάει στην επίλυση πολλών τεχνικών υπολογιστικών προβλημάτων, και ιδιαίτερα εκείνων που περιέχουν διανύσματα και πολλαπλασιασμούς.

### 2.3.3. Τα m-files [4]

Εκτός από την εκτέλεση εντολών και την κλήση ενσωματωμένων συναρτήσεων μέσω του παραθύρου εντολών της, η MATLAB παρέχει τη δυνατότητα κλήσης συναρτήσεων και αρχείων εντολών που κατασκευάζονται από το χρήστη. Οι *συναρτήσεις* (functions) και τα *αρχεία εντολών* (scripts) είναι αρχεία κειμένου τα οποία περιέχουν κώδικα MATLAB και χαρακτηρίζονται ως *m-files*, καθώς τα ονόματά τους έχουν την κατάληξη *.m*.

- Τα αρχεία εντολών δεν δέχονται ορίσματα εισόδου και δεν επιστρέφουν ορίσματα εξόδου. Χρησιμοποιούν δεδομένα (μεταβλητές) του χώρου εργασίας.

- Οι συναρτήσεις δέχονται ορίσματα εισόδου και επιστρέφουν ορίσματα εξόδου (όπως και οι ενσωματωμένες συναρτήσεις της MATLAB). Οι μεταβλητές που ορίζονται εντός μιας συνάρτησης είναι *τοπικές* (γνωστές μόνο στη συνάρτηση και όχι στο χώρο εργασίας).

Στο πρόβλημα της μοντελοποίησης της διαδικασίας ξήρανσης του πυρήνα τα m-files θα χρησιμοποιηθούν μόνο σαν αρχεία εντολών. Όταν καλείται ένα αρχείο εντολών από το παράθυρο εντολών της MATLAB, εκτελούνται οι εντολές που περιέχονται στο αρχείο. Οι εντολές αυτές μπορεί να είναι ορισμοί μεταβλητών, πράξεις, και κλήσεις ενσωματωμένων συναρτήσεων ή συναρτήσεων που έχουν κατασκευαστεί από το χρήστη. Η κλήση ενός αρχείου εντολών γίνεται δίνοντας στο παράθυρο εντολών το όνομα του χωρίς την κατάληξη *.m*.

Τα αρχεία εντολών μπορούν να χρησιμοποιούν υπάρχοντα δεδομένα (μεταβλητές) του χώρου εργασίας, ή μπορούν να δημιουργούν και να χρησιμοποιούν νέες μεταβλητές. Παρ' όλο που τα αρχεία εντολών δεν επιστρέφουν ορίσματα εξόδου όπως οι συναρτήσεις, οποιεσδήποτε μεταβλητές που δημιουργούνται από αυτά παραμένουν στο χώρο εργασίας και είναι έτσι διαθέσιμες για περαιτέρω χρήση.

#### 2.3.4. Το περιβάλλον προσομοίωσης SIMULINK [4]

Το SIMULINK επιτρέπει τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση δυναμικών συστημάτων. Υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα, μοντελοποιημένα σε συνεχή ή διακριτό χρόνο, ή ακόμα και υβριδικά συστήματα (εν μέρει μοντελοποιημένα σε συνεχή και εν μέρει σε διακριτό χρόνο). Υποστηρίζονται ακόμα συστήματα με τμηματικά διαφορετικούς χρόνους δειγματοληψίας.

Για τη μοντελοποίηση, το SIMULINK παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) που επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων ως δομικών διαγραμμάτων. Το SIMULINK περιλαμβάνει ένα πλήθος βιβλιοθηκών δομικών στοιχείων (blocks), τα βασικότερα από τα οποία είναι οι πηγές (sources), τα στοιχεία «απορρόφησης» (sinks), τα συνεχή γραμμικά στοιχεία, τα μη γραμμικά στοιχεία και τα στοιχεία σημάτων και συστημάτων. Είναι επίσης δυνατή η τροποποίηση και η δημιουργία νέων δομικών στοιχείων από το χρήστη.

Τα μοντέλα SIMULINK είναι ιεραρχικά (ένα μοντέλο μπορεί να περιέχει δομικά στοιχεία που περιέχουν με τη σειρά τους άλλα δομικά στοιχεία), έτσι μπορούν να παρουσιαστούν σε διάφορα επίπεδα. Ένα σύστημα που έχει ιεραρχική δομή μπορεί να παρουσιαστεί αρχικά σε υψηλό επίπεδο ως ένα σύνολο διασυνδεδεμένων υποσυστημάτων, κάθε ένα από τα οποία μοντελοποιείται ως ένα δομικό στοιχείο. Ο χρήστης μπορεί να κατέβει σε χαμηλότερα επίπεδα ώστε να δει αυξανόμενους βαθμούς λεπτομέρειας.

Μετά τη δημιουργία ενός μοντέλου, είναι δυνατή η προσομοίωση του, χρησιμοποιώντας μια από τις διάφορες μεθόδους ολοκλήρωσης που παρέχει το SIMULINK. Χρησιμοποιώντας παλμογράφους (scopes) και άλλα δομικά στοιχεία απεικόνισης, είναι δυνατή η παρακολούθηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης καθώς αυτή εξελίσσεται. Επιπλέον, είναι δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο χώρο εργασίας της MATLAB για περαιτέρω επεξεργασία. Είναι ακόμα δυνατή η χρήση του SIMULINK για προσομοίωση αλλά και έλεγχο συστημάτων σε πραγματικό χρόνο, μέσω της εργαλειοθήκης πραγματικού χρόνου (Real Time Workshop).


## 2.4. Γιατί χρησιμοποιείται η Ασαφής Λογική [5]

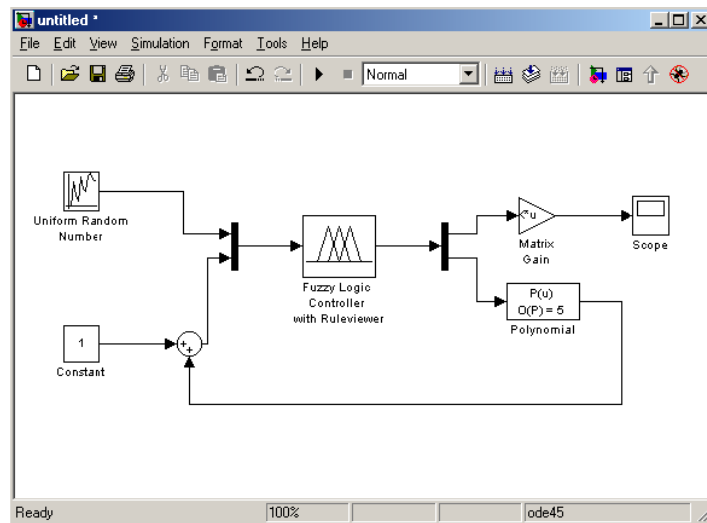
Η θεωρία της Ασαφούς Λογικής έχει κάποια πλεονεκτήματα, σε σχέση με άλλες μεθόδους, τα οποία την καθιστούν την πλέον κατάλληλη για την επίλυση ενός προβλήματος όπως αυτό με το οποίο καταπιάνεται η παρούσα εργασία. Μερικά από τα πλεονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η ασαφής λογική εννοιολογικά είναι εύκολο να γίνει κατανοητή. Οι μαθηματικές αρχές που βρίσκονται πίσω από αυτήν είναι ιδιαίτερα απλές.
- Είναι πολύ ευέλικτη με αποτέλεσμα όταν επιβάλλεται να γίνουν κάποιες αλλαγές στο σύστημα να μην ξεκινάει από τον σχεδιασμό.
- Είναι ανεκτική σε ανακριβή δεδομένα. Τα πάντα είναι ανακριβή εάν ελεγχθούν από κοντά και ακόμα περισσότερο εάν επιθεωρηθούν προσεκτικά. Η ασαφής λογική προσαρμόζει αυτή την αντίληψη μέσα στην διαδικασία.

- Μπορεί να μοντελοποιήσει μη γραμμικές συναρτήσεις αυθαίρετης πολυπλοκότητας. Ένα ασαφές σύστημα δύναται να ταιριάζει κάθε σύνολο δεδομένων εισόδου – εξόδου.
- Η ασαφής λογική μπορεί να στηριχτεί στην κορυφαία εμπειρία των ειδικών, που ήδη κατανοούν το σύστημα.
- Δύναται να συνεργαστεί με τα συμβατικά συστήματα ελέγχου. Τα ασαφή συστήματα σε πολλές περιπτώσεις τα συμπληρώνουν και κάνουν την υλοποίηση τους απλούστερη.
- Βασίζεται στη φυσική γλώσσα, που αποτελεί και τη βάση για την ανθρώπινη επικοινωνία.
- Αυξάνει το βαθμό αυτοματοποίησης που σε πολλές περιπτώσεις βιομηχανικών διεργασιών είναι περιορισμένος.
- Είναι οικονομικότερο να αναπτυχθεί ένας ασαφής ελεγκτής από οποιοδήποτε άλλο ελεγκτή που κάνει την ίδια εργασία.

## 2.5. Περιγραφή Λογισμικού Προσομοίωσης [4]

Η προσομοίωση του προβλήματος θα βασιστεί στο περιβάλλον του SIMULINK. Τα μοντέλα δυναμικών συστημάτων που κατασκευάζονται με το SIMULINK αποθηκεύονται ως αρχεία με την κατάληξη *.mdl*. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο ή να ανοιχθεί ένα αποθηκευμένο μοντέλο, στο παράθυρο εντολών της MATLAB επιλέγεται το εικονίδιο το οποίο ανοίγει τις βιβλιοθήκες του SIMULINK. Από το παράθυρο των βιβλιοθηκών μπορεί να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο επιλέγοντας το εικονίδιο . Ένα απλό τυπικό μοντέλο του simulink φαίνεται στο σχήμα 2-6.

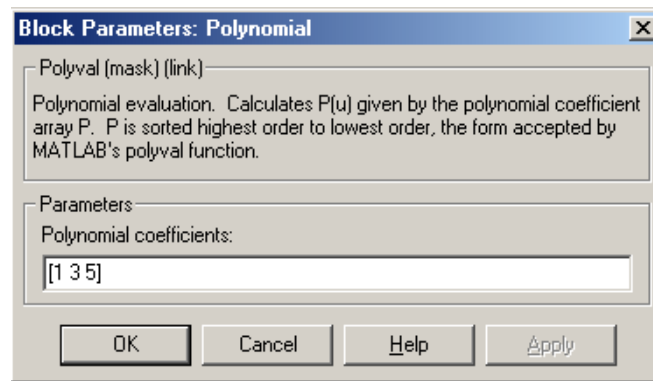


Εικόνα 2-6 Τυπικό Μοντέλο simulink

Τα βασικά δομικά στοιχεία του μοντέλου του παραδείγματος είναι, οι δύο είσοδοι του (μία σταθερά ‘constant’ και μία μεταβλητών τιμών ‘uniform random number’), ο ασαφής ελεγκτής ‘fuzzy logic controller with rule viewer’, ένας πολλαπλασιασμός με μία σταθερά ‘matrix gain’, ένας παλμογράφος ‘scope’, ένα πολυώνυμο ‘polynomial’ και ένα άθροισμα ‘sum’.

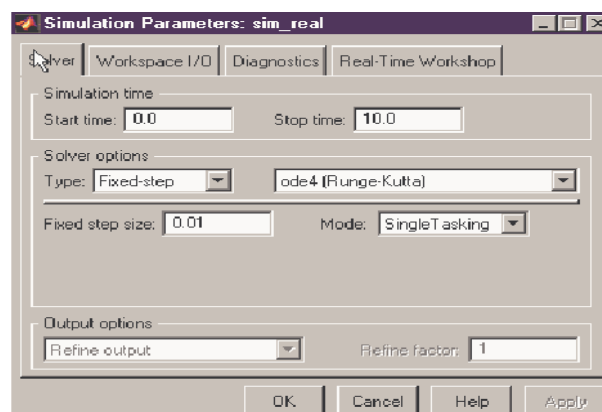
Κάθε ένα από τα δομικά στοιχεία των βιβλιοθηκών του SIMULINK χαρακτηρίζεται από ορισμένες παραμέτρους. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών μπορούν να καθοριστούν επιλέγοντας το εκάστοτε δομικό στοιχείο, οπότε ανοίγει ένα παράθυρο διαλόγου, όπως αυτό που φαίνεται στο σχήμα 2-7 και αφορά το πολυώνυμο.

Με τις τιμές [1 3 5] συμβολίζεται το πολυώνυμο  $x^2+3x+5$ . Άρα ο πρώτος όρος στην αγκύλη μας δίνει τον συντελεστή του όρου του πολυωνύμου που είναι υψωμένος στην μεγαλύτερη δύναμη και συνεχίζει με τους συντελεστές των υπολοίπων όρων από αυτόν που είναι υψωμένος στη μεγαλύτερη δύναμη μέχρι τη μικρότερη.



Εικόνα 2-7 Παράθυρο Παραμέτρων Πολυωνύμου

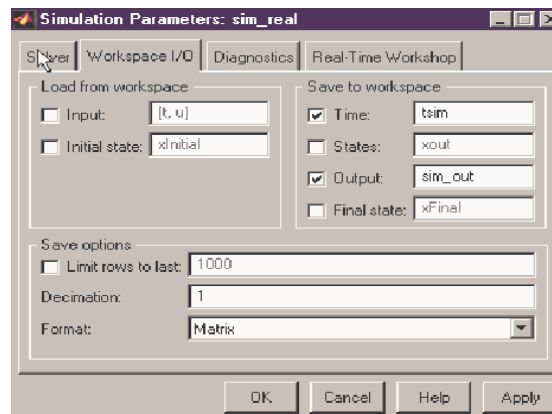
Μετά τον καθορισμό όλων των απαιτούμενων παραμέτρων για τα δομικά στοιχεία που περιλαμβάνονται στο μοντέλο, πρέπει να καθοριστούν οι παράμετροι της προσομοίωσης. Αυτό είναι δυνατό μέσω του μενού “Simulation” του παραθύρου του μοντέλου. Επιλέγοντας το μενού “Parameters...” εμφανίζεται το παράθυρο που φαίνεται στο σχήμα 2-8:



Εικόνα 2-8 Παράθυρο Παραμέτρων Προσομοίωσης



Μέσω της καρτέλας “Solver” καθορίζονται ο χρόνος έναρξης και λήξης της προσομοίωσης (σε δευτερόλεπτα), η μέθοδος ολοκλήρωσης που θα χρησιμοποιηθεί και ανάλογα με αυτήν οι απαιτούμενες παράμετροι. Μέσω της καρτέλας “Workspace I/O”, που παρουσιάζεται στο σχήμα 2-9, είναι δυνατή η επικοινωνία με το χώρο εργασίας της MATLAB. Πιο αναλυτικά:

- Μέσω των επιλογών “Load from workspace” καθορίζεται αν το μοντέλο θα δεχτεί είσοδο ή κάποια αρχική κατάσταση μέσω μεταβλητών του χώρου εργασίας (δεν έχει επιλεγεί κάτι τέτοιο στο συγκεκριμένο μοντέλο).





**Εικόνα 2-9 Παράθυρο Επιλογών για το workspace**

- ❑ Μέσω των επιλογών “Save to workspace” καθορίζονται οι έξοδοι προς το χώρο εργασίας. Στο συγκεκριμένο μοντέλο έχει επιλεγεί η αποθήκευση στο χώρο εργασίας του χρόνου προσομοίωσης (διάνυσμα με τις χρονικές στιγμές της ολοκλήρωσης) ως μεταβλητή *tsim* και των εξόδων του μοντέλου ως μεταβλητή *sim\_out* (οι τιμές των τριών σημάτων που οδηγούνται στα sink blocks κατά τις χρονικές στιγμές της ολοκλήρωσης).
- ❑ Μέσω των επιλογών “Save options” καθορίζονται ορισμένες επιλογές για την αποθήκευση μεταβλητών στο χώρο εργασίας. Η επιλογή του “Limit rows to last:” έχει ως αποτέλεσμα την αποθήκευση μόνο του αριθμού των τελευταίων βημάτων της ολοκλήρωσης που εμφανίζεται στο παράθυρο (εξ’ ορισμού 1000).

Μετά και τον καθορισμό των παραμέτρων της προσομοίωσης είναι δυνατή η εκτέλεση της. Αυτό μπορεί να γίνει είτε από το μενού “Simulation”, όπου επιλέγεται “Start”, είτε επιλέγοντας το εικονίδιο . Η προσομοίωση σταματάει μόλις ο χρόνος φτάσει την τιμή που είχε τεθεί στην παράμετρο “Stop time”. Μπορεί να διακοπεί η προσομοίωση αν επιλεγεί το “Stop” από το μενού “Simulation” ή αν επιλεχθεί το εικονίδιο  (όταν δεν τρέχει η προσομοίωση είναι απενεργοποιημένο).

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο simulink εξ’ αρχής, η διαδικασία είναι η ακόλουθη:



- ❑ Γίνεται κλικ στο εικονίδιο  του παραθύρου των βιβλιοθηκών, οπότε ανοίγει ένα παράθυρο νέου μοντέλου (untitled).
- ❑ Εισάγονται τα επιθυμητά δομικά στοιχεία από τις κατάλληλες βιβλιοθήκες επιλέγοντας τα με το ποντίκι και τραβώντας τα απ' ευθείας στο παράθυρο του νέου μοντέλου (τα περιεχόμενα μιας βιβλιοθήκης εμφανίζονται επιλέγοντας το εικονίδιο ).
- ❑ Πραγματοποιούνται οι κατάλληλες διασυνδέσεις από την έξοδο ενός δομικού στοιχείου στην είσοδο του άλλου.
- ❑ Καθορίζονται οι παράμετροι των δομικών στοιχείων και της προσομοίωσης.
- ❑ Αποθηκεύεται το μοντέλο μέσω του μενού "File".

Μπορεί να διαγραφεί, να αντιγραφεί, ή να κοπεί και να επικολληθεί ένα δομικό στοιχείο ή συνδέσεις -αφού πρώτα επιλεγούν με το ποντίκι.

Στον πίνακα που ακολουθεί περιγράφονται ορισμένα από τα βασικά δομικά στοιχεία των βιβλιοθηκών του simulink.

**Πίνακας 1 Δομικά στοιχεία βιβλιοθηκών simulink**

<b>Βιβλιοθήκη</b>	<b>Δομικό στοιχείο</b>	<b>Λειτουργία</b>
<b>Sources</b> - περιέχει μπλοκ τα οποία είναι <i>πηγές σημάτων</i> (δεν έχουν είσοδο, παράγουν ως έξοδο ένα σήμα)	Constant	Σταθερά
	Step	Βηματική συνάρτηση
	Ramp	Συνάρτηση αναρρίχησης
	Pulse generator	Γεννήτρια παλμών
	Random number	Γεννήτρια τυχαίου σήματος (κανονική κατανομή)
	Sine wave	Γεννήτρια ημιτόνου
	Signal generator	Γεννήτρια σημάτων (παράγει διάφορες κυματομορφές)
<b>Sinks</b> - περιέχει μπλοκ τα οποία είναι <i>στοιχεία «απορρόφησης»</i> σημάτων (δεν έχουν έξοδο, δέχονται μόνο είσοδο)	Display	Οθόνη απεικόνισης τιμών
	Scope	Παλμογράφος
	Stop Simulation	Τερματισμός προσομοίωσης
	To Workspace	Αποθήκευση στο χώρο εργασίας
<b>Continuous</b> - περιέχει μπλοκ για τη μοντελοποίηση <i>γραμμικών συστημάτων συνεχούς χρόνου</i>	Derivative	Παραγωγή
	Integrator	Ολοκλήρωση
	State space	Μοντέλο συστήματος στο χώρο κατάστασης
	Transfer function	Μοντέλο συστήματος συνάρτησης μεταφοράς
	Zero-pole	Μοντέλο συστήματος πόλων – μηδενικών
<b>Nonlinear</b> - περιέχει μπλοκ που μοντελοποιούν <i>μη γραμμικά στοιχεία</i>	Saturation	Στοιχείο κόρου
	Manual Switch	Χειροκίνητος διακόπτης
	Switch	Διακόπτης
	Quantizer	Κβαντιστής σήματος

<b>Math</b> - Περιέχει μπλοκ που μοντελοποιούν μαθηματικές πράξεις και συναρτήσεις	Abs	Απόλυτη τιμή
	Gain	πολλαπλασιασμός
	Math function	Διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις
	Matrix Gain	Πίνακας κερδών
	MinMax	Ελάχιστο ή μέγιστο
	Product	Πολλαπλασιασμός ή διαίρεση
	Rounding Function	Συνάρτηση στρογγύλευσης
	Sign	Εύρεση προσήμου
	Slider gain	Μεταβλητός πολλαπλασιασμός
	Sum	Άθροιση ή αφαίρεση
<b>Signals and Systems</b> - Περιέχει στοιχεία διασύνδεσης σημάτων και συστημάτων	Trigonometric function	Τριγωνομετρικές συναρτήσεις
	In1	Θύρα εισόδου υποσυστήματος ή μοντέλου
	Demux	Αποπλέκτης σημάτων
	Mux	Πολυπλέκτης σημάτων
	Terminator	Τερματισμός ασύνδετων σημάτων (δέχεται μόνο είσοδο)
<b>Control Systems Toolbox</b> - Περιέχει στοιχεία μοντελοποίησης συστημάτων ελέγχου	Out1	Θύρα εξόδου υποσυστήματος ή μοντέλου
	LTI System	Μοντελοποίηση γραμμικού χρονικά αναλλοίωτου συστήματος με διάφορους τρόπους (μέσω συνάρτησης μεταφοράς, στο χώρο κατάστασης, αναπαράσταση πόλων – μηδενικών)

### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

#### 3.1. Ανάλυση του ξηραντηρίου

Στόχος της λειτουργίας του ξηραντηρίου είναι να ελαττώσει το ποσοστό της υγρασίας του πυρήνα στο 8%. Η αρχική υγρασία του πυρήνα, όπως αυτή φτάνει στην Α.Β.Ε.Α από τα ελαιουργεία, κυμαίνεται γύρω στο 70%. Η υγρασία αυτή θεωρείται εξαιρετικά υψηλή και το ξηραντήριο είναι αδύνατο να αντεπεξέλθει στο στόχο που είναι η μείωση αυτής στο 8%. Για το λόγο αυτό στις εγκαταστάσεις Α.Β.Ε.Α υπάρχει και ένα δεύτερο ξηραντήριο μικρότερων διαστάσεων και μικρότερης απόδοσης, που όμως η λειτουργία είναι παρόμοια με του βασικού, το οποίο χρησιμοποιείται για μία πρώτη μείωση της υγρασίας του πυρήνα. Κατά την έξοδο του από το ξηραντήριο αυτό ο πυρήνας συγκεντρώνεται σε ένα ειδικό αποθηκευτικό χώρο. Η υγρασία του στο χώρο αυτό κυμαίνεται μεταξύ του 48 και 54%, ένα ικανοποιητικό ποσοστό έτσι ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει το κυρίως ξηραντήριο, του οποίου η λειτουργία περιγράφεται και μοντελοποιείται στη συνέχεια.

Το επόμενο βήμα στη διαδικασία ξήρανσης είναι η εισαγωγή του πυρήνα από τον αποθηκευτικό χώρο στον περιστρεφόμενο κύλινδρο του βασικού ξηραντηρίου. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια μίας μεταφορικής ταινίας η οποία μεταφέρει τον προς ξήρανση πυρήνα στην είσοδο του κυλίνδρου. Η υγρασία της πρώτης ύλης μειώνεται κατά τη διάρκεια που αυτή βρίσκεται στον περιστρεφόμενο κύλινδρο, με τη συνδρομή των θερμών καυσαερίων που κινούνται μέσα σε αυτόν. Τα καυσαέρια αυτά προέρχονται από την καύση πυρηνόξυλου τα οποία μαζί με την προσθήκη μεγάλης ποσότητας αέρα περιβάλλοντος εισάγονται στον κύλινδρο. Η κίνηση του θερμού αυτού μείγματος αερίων εξασφαλίζεται από την ύπαρξη ενός ανεμιστήρα-απορροφητήρα που υπάρχει στο τέλος του περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Εξαιτίας της περιστροφής του κυλίνδρου, του θερμού ρεύματος αέρα που υπάρχει σε αυτόν αλλά και τις μικρής κλίσης του (σχεδόν 2 μοίρες) προς την έξοδο, ο πυρήνας κινείται προς την έξοδο του κυλίνδρου ενώ ταυτόχρονα ξηραίνεται. Ο ξηραμένος πυρήνας λαμβάνεται από το τέλος του κυλίνδρου και μεταφέρεται με ειδικό μηχανισμό για

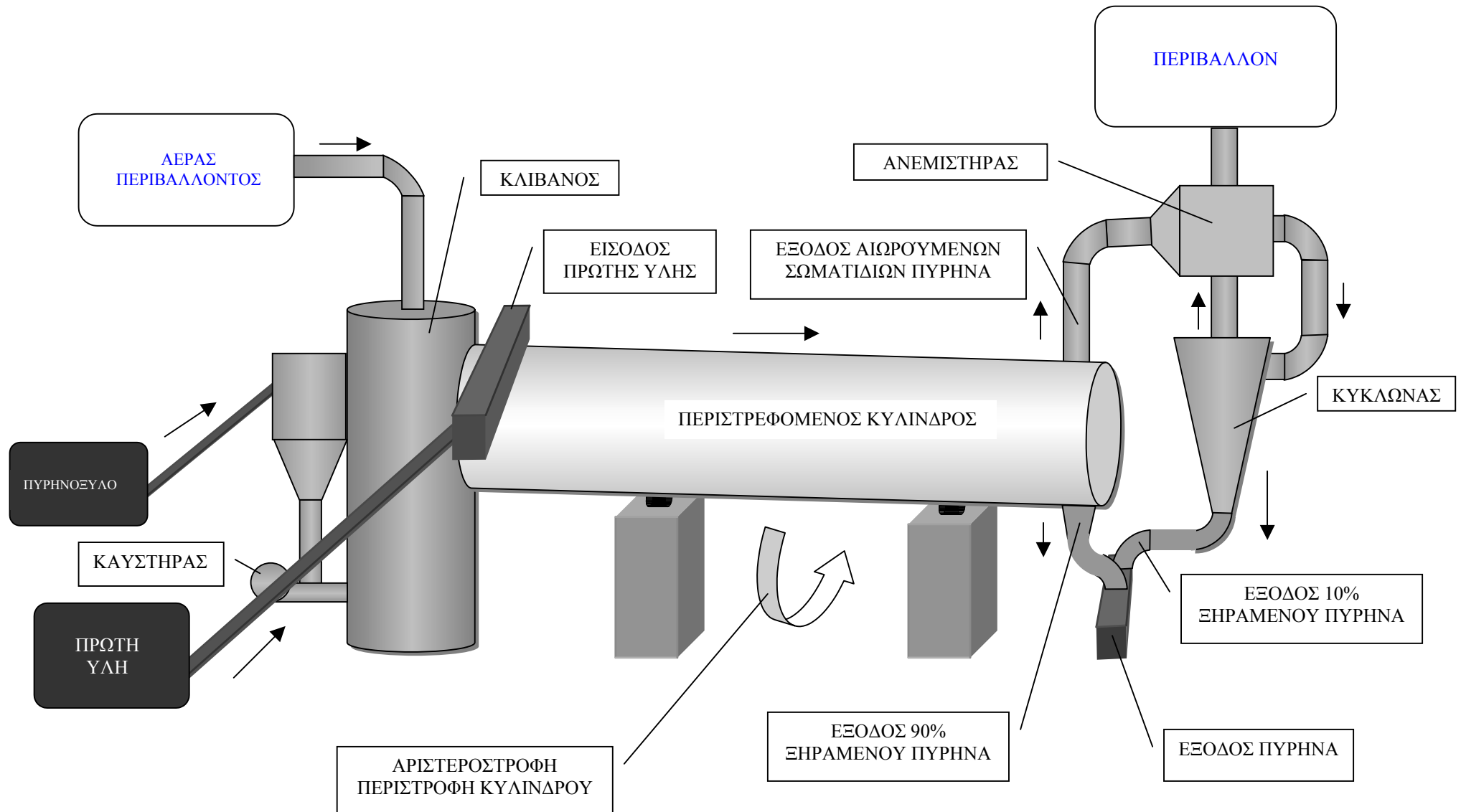
περαιτέρω επεξεργασία, ώστε να παραχθεί το πυρηνέλαιο και τα άλλα προϊόντα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3-1.



**Εικόνα 3-1 Έξοδος Τελικού Πυρήνα**

Ο απορροφητήρας, που συνδέεται με το τέλος του κυλίνδρου, απορροφά αέρα μέσα από αυτόν έτσι ώστε να διατηρείται το θερμό ρεύμα. Όμως μαζί με τον αέρα απορροφά και σκόνη πυρήνα η οποία αιωρείται εξαιτίας της περιστροφής του κυλίνδρου. Η σκόνη αυτή για περιβαλλοντολογικούς αλλά και οικονομικούς λόγους δε μπορεί να διοχετευθεί στο περιβάλλον για αυτό και το μείγμα που απορροφάται καταλήγει σε μία διάταξη που ονομάζεται κυκλώνας. Μέσα σε αυτόν διαχωρίζεται το μείγμα και ο πυρήνας λαμβάνεται από το κάτω μέρος της διάταξης υπό μορφή σκόνης ενώ ο καθαρός πλέον αέρας διοχετεύεται στο περιβάλλον από το επάνω μέρος της διάταξης. Αναλογικά μπορούμε να σημειώσουμε ότι από τον κυκλώνα λαμβάνεται το 10% της συνολικής ποσότητας ξηραμένου πυρήνα ενώ το υπόλοιπο 90% απευθείας από τον περιστρεφόμενο κύλινδρο.

Τα δομικά μέρη και η λειτουργία του ξηραντηρίου παρουσιάζονται στο σχήμα 2.



Σχέδιο 2 Δομικά Μέρη και Λειτουργία Ξηραντηρίου

### 3.2. Δομικά στοιχεία του ξηραντηρίου – Η Λειτουργία τους

Η διάταξη του ξηραντηρίου αποτελείται από κάποια επιμέρους δομικά στοιχεία που το καθένα έχει το ρόλο του στη διαδικασία ξήρανσης του πυρήνα. Στον αποθηκευτικό χώρο όπου βρίσκεται η πρώτη ύλη υπάρχει ένας μηχανισμός που εναποθέτει την πρώτη ύλη πάνω στη μεταφορική ταινία. Η ταινία αυτή, που παρουσιάζεται στην εικόνα 3-2, οδηγεί τον προς ξήρανση πυρήνα στην είσοδο του περιστρεφόμενου κλιβάνου η οποία βρίσκεται στο επάνω μέρος του. Η δυνατότητα μεταφοράς που έχει είναι έως και 11.5 τόνους πυρήνα την ώρα και μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με την ταχύτητα που κινείται.



Εικόνα 3-2 Μηχανισμός Εναπόθεσης Πρώτης Ύλης στην Μεταφορική Ταινία

Σημαντικό ρόλο στην διαδικασία ξήρανσης έχει ο κλίβανο που έχει σχήμα ορθού κυλίνδρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2, και συνδέεται με την αρχή του οριζόντιου περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Στο κάτω μέρος του κλιβάνου είναι συνδεδεμένοι δύο καυστήρες οι οποίοι με την καύση πυρηνόξυλου, εικόνα 3-3 και 3-4, παρέχουν στον κλίβανο συνολικά 20000 κυβικά μέτρα την ώρα αέρα θερμοκρασίας από 1100 έως 1300 βαθμούς Κελσίου. Από το επάνω μέρος της διάταξης γίνεται εισαγωγή αέρα περιβάλλοντος της τάξης των 60000 κυβικών μέτρων ανά ώρα με θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το μείγμα αυτό αερίων αποτελεί τα καυσαέρια που εισέρχονται στον περιστρεφόμενο κύλινδρο και ξηραίνουν τον πυρήνα. Η θερμοκρασία τους μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τη διάρκεια που δουλεύει ο καυστήρας, που έχει τη δυνατότητα να διακόπτεται και να ξεκινάει εκ νέου την λειτουργία του.



**Εικόνα 3-3 Καυστήρας**



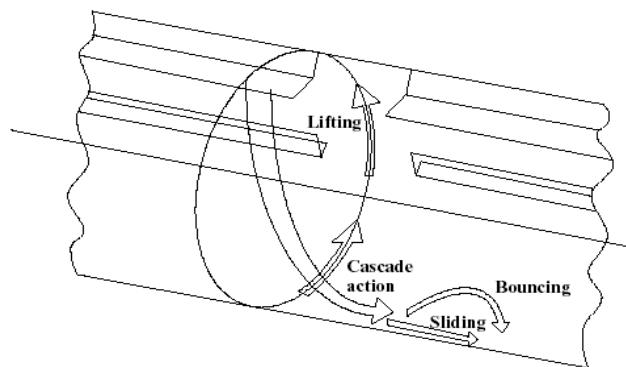
**Εικόνα 3-4 Εισαγωγή Πυρηνόξυλου στον καυστήρα και ένωση του με Κλίβανο**

Ο οριζόντιος περιστρεφόμενος κύλινδρος αποτελεί την πρωτεύουσας σημασίας διάταξη όσο αφορά στην διαδικασία ξήρανσης του πυρήνα. Ο περιστροφικός ξηραντήρας είναι ένας από τους πιο κοινούς τύπους βιομηχανικού ξηραντήρα και κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα. Χρησιμοποιείται συνήθως με μια αρνητική εσωτερική πίεση έτσι ώστε να αποτραπεί η διαφυγή σκόνης. Ανάλογα με τον τρόπο που έρχονται σε επαφή τα καυσάεργια ξήρανσης με τα στερεά που βρίσκονται μέσα σε αυτόν, ένας ξηραντήρας μπορεί να θεωρηθεί άμεσος ή έμμεσος, όταν το ρεύμα αέρα έχει την ίδια φορά με την κίνηση των προς ξήρανση στερεών ή αντίθετη.



Μια σειρά φτερών διαφόρων μορφών κατασκευάζονται μέσα στον κύλινδρο για να αναταράξει τα στερεά προκειμένου να εξασφαλιστεί η επαφή τους με το θερμό ρεύμα αέρα. Αυτές οι διαμορφώσεις φτερών ποικίλλουν από ελικοειδή μορφή έως ευθεία. Η επίδραση στην απόδοση του ξηραντήρα της επιλογής φτερών στον κύλινδρο, όπως ο αριθμός φτερών που θα έχει, οι διαστάσεις τους και η μορφή τους, είναι πολύ σημαντική.

Ένας περιστροφικός ξηραντήρας έχει δύο ευδιάκριτες λειτουργίες, μεταφέρει τον πυρήνα και ταυτόχρονα αφαιρεί την υγρασία του. Η μεταφορά γίνεται κατά την ανύψωση του (lifting), κατά την πτώση του (cascade action), γλιστρώντας (sliding) και αναπηδώντας (bouncing), όπως φαίνεται στην εικόνα 3-5. Δεδομένου ότι ο ξηραντήρας περιστρέφεται, ο πυρήνας ανυψώνεται από τα φτερά για μια ορισμένη απόσταση γύρω από τον κύλινδρο και δέχεται το θερμό ρεύμα αέρα και κατά τη ανύψωση του αλλά και κατά την απότομη πτώση του. Το μεγαλύτερο ποσό θερμότητας εναλλάσσεται αυτή τη στιγμή, δεδομένου ότι τα στερεά χρειάζονται στενή επαφή με το αέριο. Η ενέργεια που παίρνει ο πυρήνας κατά την ανύψωση του αλλά και κατά την πτώση του είναι επίσης εν μέρει αρμόδια για τη μεταφορά του μέσω του κυλίνδρου.



**Εικόνα 3-5 Τρόποι Μεταφοράς Πυρήνα στον Περιστρεφόμενο Κύλινδρο**

Οι παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στη μοντελοποίηση ενός περιστροφικού ξηραντήρα μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

- Οι φυσικές ιδιότητες των στερεών όπως το μέγεθος των μορίων, η μορφή τους, η πυκνότητα και η υγρασία τους.
- Οι μεταβλητές του ξηραντηρίου όπως η διάμετρος και το μήκος του κυλίνδρου, η σχεδίαση και ο αριθμός των φτερών.

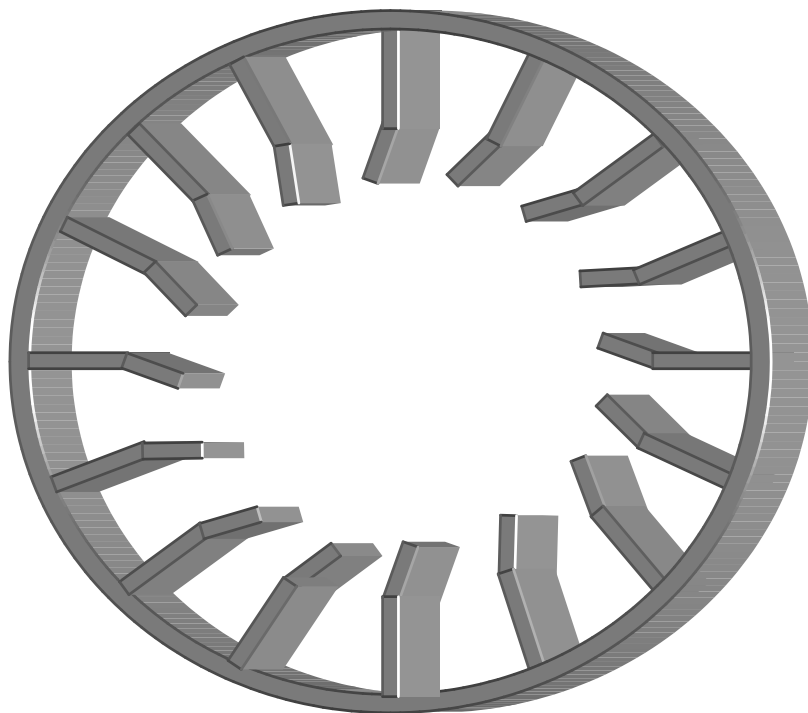
- Οι συνθήκες λειτουργίας όπως η ροή και η θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης, η ροή τροφοδοσίας πυρήνα και η θερμοκρασία του, η κλίση και η ταχύτητα περιστροφής του κυλίνδρου.

Όλοι οι ανωτέρω παράγοντες έχουν επιπτώσεις στην μετάδοση θερμότητας στον κύλινδρο, και όλοι εκτός από τη θερμοκρασία ξήρανσης των στερεών και τη θερμοκρασία του πυρήνα έχουν μια επίδραση στο χρόνο μετάβασης του προς ξήρανση στερεού στον κύλινδρο. Ο ρυθμός τροφοδοσίας πυρήνα στον κύλινδρο έχει μεγάλη επίδραση στη λειτουργία του ξηραντήρα, καθώς ένας υπερβολικά χαμηλός ρυθμός θα μειώσει το ποσοστό παραγωγής ενώ ένας υπερβολικά μεγάλος θα αυξήσει την ισχύ που απαιτείται για να γυρίσει ο ξηραντήρας και τελικά η επιθυμητή περιεκτικότητα υγρασίας του πυρήνα δεν θα επιτευχθεί.

Ο συγκεκριμένος κύλινδρος που μελετάται, του οποίου η εσωτερική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 3, έχει μία μικρή κλίση περίπου 2 μοιρών προς την έξοδο του έτσι ώστε να διευκολύνεται η κίνηση του πυρήνα που βρίσκεται μέσα σε αυτόν και περιστρέφεται από ειδικούς μηχανισμούς με μια ταχύτητα της τάξεως των 3.5 στροφών το λεπτό. Το ολικό μήκος του ανέρχεται στα 22 μέτρα ενώ η διάμετρος του στα 2.5 μέτρα. Μέσα του υπάρχουν 28 φτερά που έχουν μια ελαφρώς ελικοειδή μορφή που επίσης εξυπηρετεί την κίνηση του πυρήνα. Η μέση απόσταση μεταξύ των φτερών υπολογίζεται στα 0.2805 μέτρα ενώ το μέσο πλάτος τους στα 0.25 μέτρα. 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 και θα πρέπει έως τότε όλος ο πυρήνας να βρίσκεται στο κάτω μέρος του κυλίνδρου γιατί διαφορετικά θα απορροφούσε μια μεγάλη ποσότητα πυρήνα γεγονός που θα προκαλούσε προβλήματα στη διαδικασία.



**Εικόνα 3-6 Οι δύο Περιστροφικοί Ξηραντήρες**



**Σχέδιο 3 Εσωτερική Διάταξη, Τομή του Κυλίνδρου**

Ο ανεμιστήρας παράγει τη δύναμη απορρόφησης που επιτρέπει το πέρασμα των καυσαερίων διαμέσου του περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Δημιουργεί το ρεύμα θερμού αέρα που ξηραίνει τον πυρήνα. 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 καθιζάνουν και συλλέγονται στο κάτω μέρος του υπό μορφή σκόνης, ενώ το καθαρό πλέον ρεύμα αέρα διαχέεται στο περιβάλλον από το επάνω μέρος της διάταξης.



**Εικόνα 3-7 Σύνδεση Ανεμιστήρων με τους Περιστροφικούς Ξηραντήρες**

### 3.3. Ανάδειξη του προβλήματος

Ο έλεγχος ενός περιστροφικού ξηραντήρα είναι δύσκολος εξαιτίας της σχετικά μακροχρόνιας παραμονής του πυρήνα σε αυτόν, γεγονός που σημαίνει ότι οι τυχαίες αλλαγές στις μεταβλητές εισόδου μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία για τις μακριές περιόδους χρόνου προτού να απεικονιστούν στις μεταβλητές εξόδου. Για να αποφευχθούν τέτοιες διαταραχές θα εφαρμοστεί η ασαφής λογική που προσφέρει ελκυστικές λύσεις για τη βελτίωση του ελέγχου ξήρανσης του πυρήνα. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί την εμπειρία, τη γνώση και ιστορικά στοιχεία, που είναι εύκολα διαθέσιμα. Οι στόχοι αυτής της εργασίας είναι:

1. **Βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος.** Η διαδικασία θα βασίζεται σε μετρήσεις ακριβείας και όχι μόνο στην εμπειρία του χειριστή. Θα γίνονται οι αναγκαίες δράσεις οι οποίες θα εξασφαλίζουν την καλύτερη ποιότητα του τελικού προϊόντος. Ταυτόχρονα με την συνεχή παρακολούθηση της διαδικασίας αποφεύγεται ο κίνδυνος ανάφλεξης του πυρήνα καθώς όλες οι αναγκαίες ενέργειες θα γίνονται προληπτικά και θα αποφεύγονται ακραίες καταστάσεις. Αναμενόμενη βελτίωση της τάξης του 25 έως και 50%.
2. **Αύξηση της παραγόμενης ποσότητας.** Αναμένεται σημαντική μείωση των χρόνων που το ξηραντήριο βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, θα ελαχιστοποιηθούν οι ποσότητες του πυρήνα που δε ξηραινόντουσαν σωστά λόγω λανθασμένων χειρισμών και καθυστερήσεων στην ανταπόκριση των μηχανισμών.
3. **Περιβαλλοντικά οφέλη.** Η σωστότερη λειτουργία του ξηραντηρίου θα έχει ως αποτέλεσμα την εισαγωγή κατάλληλης ποσότητας πρώτης ύλης με συνέπεια την εισαγωγή μικρότερου αριθμού αιωρούμενων σωματιδίων, καλύτερη λειτουργία του κυκλώνα και άρα μικρότερη εκπομπή βλαβερών ουσιών προς το περιβάλλον.
4. **Βελτίωση συνθηκών εργασίας.** Οι συνθήκες εργασίας αναμένεται να βελτιωθούν σημαντικά από την εφαρμογή στο μέλλον της μελέτης αυτοματοποίησης, καθώς ο χειριστής θα κάθεται σε ένα προστατευόμενο περιβάλλον και θα παρακολουθεί την παραγωγική διαδικασία μέσω ενός τερματικού δίχως να διατρέχει κίνδυνο. Ακόμα θα περιοριστεί η πιθανότητα

ανθρωπίνου λάθους, καθώς όλες οι ενδείξεις θα παίρνονται ηλεκτρονικά και δε θα βασίζονται στην εμπειρία του χειριστή.

## 4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

### 4.1. Ο Ασαφής Ελεγκτής

Ο ασαφής ελεγκτής που θα δημιουργηθεί θα χρησιμοποιεί την συνεπαγωγή Mamdani και θα έχει ως στόχο τον έλεγχο της διαδικασίας ξήρανσης του πυρήνα. Θα έχει ως εισόδους και εξόδους μεταβλητές που διαδραματίζουν καταλυτικό ρόλο στην όλη διαδικασία. Οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου θα συσχετίζονται μεταξύ τους με κανόνες της μορφής ‘ΕΑΝ... ΤΟΤΕ...’ που αποτελούν και τη βάση γνώσης του ελεγκτή. Οι τιμές που θα παίρνουν οι μεταβλητές εξόδου θα είναι τέτοιες ώστε να επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα που είναι το ποσοστό υγρασίας του πυρήνα, που εξέρχεται του ξηραντηρίου, να κυμαίνεται κοντά στο 8%.

#### 4.1.1. Καθορισμός των Μεταβλητών Εισόδου και της Διακύμανσής τους

Ο ασαφής ελεγκτής που θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της διαδικασίας ξήρανσης του πυρήνα έχει δύο εισόδους.

Ως πρώτη είσοδος του ασαφούς ελεγκτή λαμβάνεται το *σφάλμα της υγρασίας του τελικού πυρήνα* ( $dx$ ) που προκύπτει από την αφαίρεση της υγρασίας του πυρήνα, μετά από όλες τις κατεργασίες ξήρανσης που έγιναν στην πρώτη ύλη, από το ποσοστό υγρασίας που αποτελεί τον στόχο και είναι το 8%. Το επίπεδο του σφάλματος αυτού, μαζί με τις άλλες εισόδους που επηρεάζουν το σύστημα, θα καθορίσει ποιες θα είναι οι αντιδράσεις του συστήματος έτσι ώστε το τελικό προϊόν να βρίσκεται στα επιθυμητά επίπεδα υγρασίας.

Το *σφάλμα της υγρασίας του τελικού πυρήνα* ( $dx$ ) μπορεί να χωριστεί στα εξής επίπεδα:

- *Επικίνδυνα υψηλό*, που κυμαίνεται από -45 έως -28,1%.
- *Υψηλό*, που κυμαίνεται από -29 έως -17,2%.
- *Σχετικά υψηλό*, που κυμαίνεται από -23,5 έως -4,07%.
- *Ιδανικό*, που κυμαίνεται από -5,214 έως 1,6%.

- *Χαμηλό*, που κυμαίνεται από 1,5 έως 7,5% και
- *Σχετικά χαμηλό*, που κυμαίνεται από 7,4 έως 8%.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι οι διακυμάνσεις των ασαφών συνόλων καθώς επίσης και οι συγκαλύψεις που υφίστανται μεταξύ τους, σε αυτή τη μεταβλητή εισόδου αλλά και σε όλες τις υπόλοιπες που θα παρουσιαστούν παρακάτω, έχουν μελετηθεί πειραματικά. Έχουν γίνει πολλές προσομοιώσεις στο τελικό μοντέλο του συστήματος και έχει προκύψει ότι αυτές οι διακυμάνσεις και οι συγκαλύψεις των ασαφών συνόλων δίνουν ένα αρκετά ικανοποιητικό αποτέλεσμα όσο αφορά την επίτευξη του τελικού στόχου και την ομαλή συμπεριφορά του συστήματος.

Η δεύτερη είσοδος του συστήματος είναι η *υγρασία της πρώτης ύλης* ( $x_a$ ), η οποία προωθείται για ξήρανση στον περιστρεφόμενο κύλινδρο και το ποσοστό της κυμαίνεται μεταξύ 47,5% και 54,5%. Η υγρασία αυτή επηρεάζει άμεσα το σύστημα αφού όσο υψηλότερη είναι τόσο περισσότερη θερμότητα χρειάζεται να απορροφήσει έτσι ώστε να φτάσει ο πυρήνας στα επιθυμητά επίπεδα υγρασίας.

Η πρώτη ύλη που μπαίνει στον κύλινδρο προέρχεται από ανάμιξη δύο ειδών πυρήνα, ενός πρώτου με πολύ χαμηλό ποσοστό υγρασίας και ενός δεύτερου με πολύ υψηλό ποσοστό υγρασίας.

Έτσι μπορεί να χωριστεί το ποσοστό *υγρασίας της πρώτης ύλης* ( $x_a$ ) σε τρία επίπεδα:

- *Χαμηλό*, που κυμαίνεται από 47,5 έως 49,97%. Εδώ το ποσοστό ανάμιξης του πρώτου πυρήνα με τη χαμηλή υγρασία είναι μεγαλύτερο από αυτό του δεύτερου με την υψηλή υγρασία.
- *Μέτριο*, που κυμαίνεται από 49,2 έως 52,5%.
- *Υψηλό*, που κυμαίνεται από 52,12 έως 54,5%. Σε αυτή την περίπτωση συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο της πρώτης περίπτωσης, δηλαδή το ποσοστό ανάμιξης του πρώτου πυρήνα με τη χαμηλή υγρασία είναι μικρότερο από αυτό του δεύτερου με την υψηλή υγρασία.

Για τη συγκεκριμένη μεταβλητή εισόδου αξίζει να αναφερθεί ότι όταν μπουν δύο ίσες ποσότητες πρώτης ύλης στον κύλινδρο για ξήρανση οι οποίες έχουν διαφορετική υγρασία, η διαφορά του θερμικού φορτίου που θα πρέπει να δεχτούν για

να φτάσει ο πυρήνας στα επιθυμητά επίπεδα υγρασίας δεν είναι ποσοστιαία ίση με τη διαφορά της υγρασίας των πρώτων υλών. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί ως εξής:

Έστω ότι στον κύλινδρο μπαίνει μια ποσότητα πρώτης ύλης  $A$  με ποσοστό υγρασίας 48% και μια άλλη ίση ποσότητα πρώτης ύλης  $A'$  με ποσοστό υγρασίας 52%. Αν η επιθυμητή υγρασία του τελικού προϊόντος είναι 8% τότε η ποσότητα του τελικού πυρήνα που θα πάρουμε είναι για την πρώτη περίπτωση

$$T_1 = A \times \frac{100 - 48}{100 - 8} = A \times \frac{52}{92}$$

και η ποσότητα νερού που θα πρέπει να αφαιρεθεί ισούται με

$$N_1 = A - A \times \frac{52}{92} = A \times \frac{40}{92}$$

Για τη δεύτερη περίπτωση η ποσότητα του τελικού πυρήνα που θα πάρουμε ισούται με

$$T_2 = A' \times \frac{100 - 52}{100 - 8} = A' \times \frac{48}{92}$$

και η ποσότητα νερού που θα πρέπει να αφαιρεθεί σε αυτή την περίπτωση ισούται με

$$N_2 = A' - A' \times \frac{48}{92} = A' \times \frac{44}{92}$$

Παρατηρείται ότι στη δεύτερη περίπτωση η υγρασία της πρώτης ύλης είναι αυξημένη κατά 8,33% ενώ το νερό (η υγρασία) που θα πρέπει να αφαιρεθεί είναι αυξημένο κατά 10% (δεδομένου ότι  $A=A'$ ). Άρα η αύξηση της υγρασίας της πρώτης ύλης δεν συνεπάγεται ίση αύξηση του θερμικού φορτίου που θα πρέπει να δεχτεί αυτή για να φτάσουμε σε ένα ίδιο επίπεδο υγρασίας του τελικού πυρήνα (8%).

#### 4.1.2. Προτεραιότητα των Εισόδων

Η μεταβλητή εισόδου με τη μεγαλύτερη βαρύτητα στο σύστημα είναι *το σφάλμα της υγρασίας του τελικού πυρήνα ( $dx$ )*, υγρασία που άλλωστε είναι και η επιδίωξη του συστήματος. Όταν η υγρασία του τελικού πυρήνα βρίσκεται μεταξύ 10% και 12% ή 5% και 7% ο πυρήνας είναι προβληματικός για το λόγο ότι δεν γίνεται καλή εκχύλιση. Αυτό συμβαίνει διότι το εξάνιο με το οποίο αναμιγνύεται ο τελικός πυρήνας, κατά την κατεργασία του για την παραγωγή λαδιού, δεν κατορθώνει να διεισδύσει μέσα σε όλο τον πυρήνα λόγω της υψηλής υγρασίας του κι έτσι η ποσότητα λαδιού που λαμβάνεται είναι μικρή και η ποιότητα του όχι και τόσο καλή.



Όταν η υγρασία του πυρήνα είναι πολύ υψηλή ( $>12\%$ ) τότε το εξάνιο εγκλωβίζεται μέσα στον πυρήνα και δεν μπορεί να αφαιρεθεί γεγονός που τον καθιστά εξαιρετικά επικίνδυνο για λόγους υγείας. Ενώ όταν η υγρασία του είναι πολύ χαμηλή ( $<5\%$ ) τότε υπάρχει μεγάλος κίνδυνος ανάφλεξης εξαιτίας της μεγάλης ξηρότητας του.

Η υγρασία του τελικού πυρήνα θα καταμετράτε με τη χρήση ενός υγρασιόμετρου, που θα είναι τοποθετημένο στην περιοχή συλλογής του πυρήνα μετά την κατεργασία ξήρανσης του. Ανάλογα με την τιμή της θα δίνεται η κατάλληλη εντολή στον ελεγκτή ώστε να πραγματοποιηθούν όλες οι αναγκαίες μεταβολές στο σύστημα έτσι ώστε να πάρουμε το επιθυμητό επίπεδο υγρασίας του πυρήνα.

Για τη δεύτερη μεταβλητή εισόδου, *την υγρασία της πρώτης ύλης ( $x_a$ )*, θα πρέπει να αναφερθεί μια πολύ σημαντική λεπτομέρεια που μπορεί να δράσει καταλυτικά στο σύστημα. Το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να ενημερώνεται για την υγρασία της πρώτης ύλης που δέχεται πριν αυτή μπει στη διαδικασία εισαγωγής της στον περιστρεφόμενο κύλινδρο και όχι κατά τη διάρκεια της εισαγωγής της. Αυτό γιατί υπάρχει μια καθυστέρηση προσαρμογής του συστήματος στις νέες συνθήκες. Για παράδειγμα εάν το σύστημα είναι προσαρμοσμένο να δουλεύει για πρώτη ύλη που έχει υγρασία  $48\%$  και ξαφνικά μπει πρώτη ύλη υγρασίας  $52\%$  τότε είναι πολύ πιθανό το σύστημα να παράγει αρκετά λεπτά πυρήνα μη αποδεκτής υγρασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί η θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης που βρίσκονται στον περιστρεφόμενο κύλινδρο δεν αρκεί για να ξηράνει την πρώτη ύλη όσο απαιτείται και έως ότου αυτή ανέβει, αφού πάρει εντολή από τον ελεγκτή, θα έχει παραχθεί τελικό προϊόν μη αποδεκτής ποιότητας. Γι' αυτό το σύστημα θα πρέπει να ενημερώνεται έγκαιρα έτσι ώστε να ρυθμίζονται όλες οι παράμετροι του συστήματος, η ποσότητα της πρώτης ύλης που εισέρχεται καθώς και η θερμοκρασία του θερμού αέρα, ώστε να είναι έτοιμο αυτό να επεξεργαστεί τη νέας υγρασίας πρώτη ύλη παράγοντας ένα τελικό προϊόν με αποδεκτό επίπεδο υγρασίας.

#### 4.1.3. Καθορισμός των Μεταβλητών Εξόδου και της Διακύμανσης τους

Ο ασαφής ελεγκτής έχει δύο μεταβλητές εξόδου που μεταβάλλονται σύμφωνα με τις τιμές που λαμβάνουν οι είσοδοι του συστήματος και ως στόχο τους έχουν τη βέλτιστη ξήρανση του πυρήνα.

Ως πρώτη έξοδος του συστήματος λαμβάνεται η *θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης* ( $T$ ) που εισέρχεται στον περιστρεφόμενο κύλινδρο και που αποτελεί τα απαέρια ξήρανσης του πυρήνα. Ο θερμός αυτός αέρας αποτελείται από ένα ποσοστό καυσαερίων και ένα ποσοστό αέρα περιβάλλοντος. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ποσοστό καυσαερίων είναι πάντα μικρότερο από αυτό του αέρα περιβάλλοντος, σχεδόν το ένα τρίτο αυτού. Με τις τωρινές συνθήκες λειτουργίας της ΑΒΕΑ ο όγκος του αέρα περιβάλλοντος που εισέρχεται στον κύλινδρο ανέρχεται περίπου στα 60000 m<sup>3</sup>/h ενώ ο όγκος των καυσαερίων γύρω στα 20000 m<sup>3</sup>/h.

Η *θερμοκρασία του αέρα ξήρανσης* ( $T$ ) μπορεί να χωριστεί στα επόμενα επίπεδα:

- *Πολύ Χαμηλή*, με διακύμανση από 350 έως 423,2 °K.
- *Χαμηλή*, με διακύμανση από 372,3 έως 469,3 °K.
- *Σχετικά Χαμηλή*, με διακύμανση από 411,6 έως 525 °K.
- *Μεσαία*, με διακύμανση από 465,5 έως 561,7 °K.
- *Σχετικά Υψηλή*, με διακύμανση από 548,2 έως 597,2 °K.
- *Υψηλή*, με διακύμανση από 504 έως 607 °K.
- *Πολύ υψηλή*, με διακύμανση από 435,3 έως 650 °K.

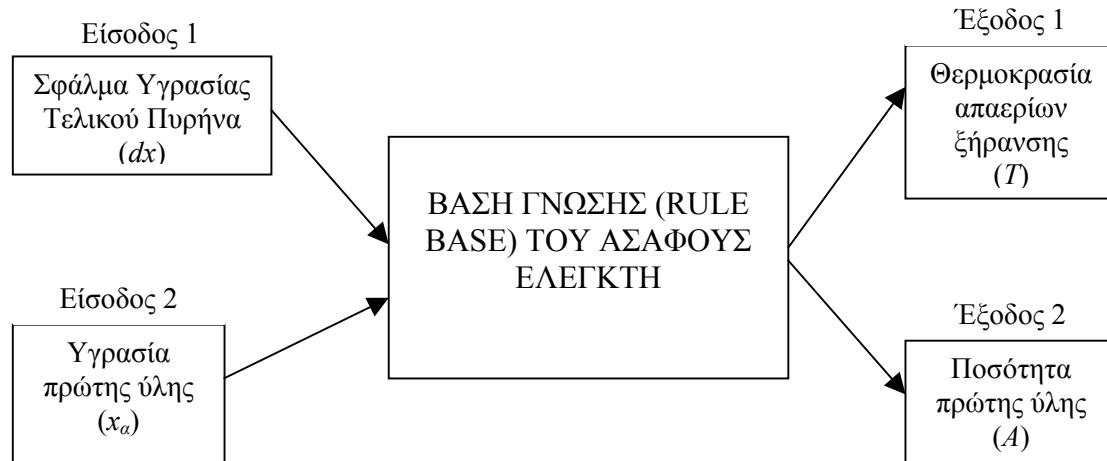
Η δεύτερη έξοδος του ασαφούς ελεγκτή είναι η *ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πρώτης ύλης* ( $A$ ) στον κύλινδρο, η οποία επηρεάζει άμεσα την υγρασία του τελικού προϊόντος. Όσο περισσότερη πρώτη ύλη μπαίνει στον κύλινδρο τόσο περισσότερη θερμότητα χρειάζεται αυτή για να φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο υγρασίας.

Η διαβάθμιση της *ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας πρώτης ύλης* ( $A$ ) στον ξηραντήρα είναι:

- *Πολύ Χαμηλή*, με διακύμανση από 0,5 έως 2,45 ton/h.
- *Χαμηλή*, με διακύμανση από 0,6458 έως 4,656 ton/h.
- *Σχετικά Χαμηλή*, με διακύμανση από 2,19 έως 6,13 ton/h.
- *Μεσαία*, με διακύμανση από 4,1 έως 8,2 ton/h.
- *Σχετικά Υψηλή*, με διακύμανση από 5,74 έως 9,42 ton/h.

- *Υψηλή*, με διακύμανση από 5,838 έως 10,95 ton/h.
- *Πολύ Υψηλή*, με διακύμανση από 10,68 έως 12 ton/h.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η δομή του ασαφούς ελεγκτή με τις εισόδους και τις εξόδους του.

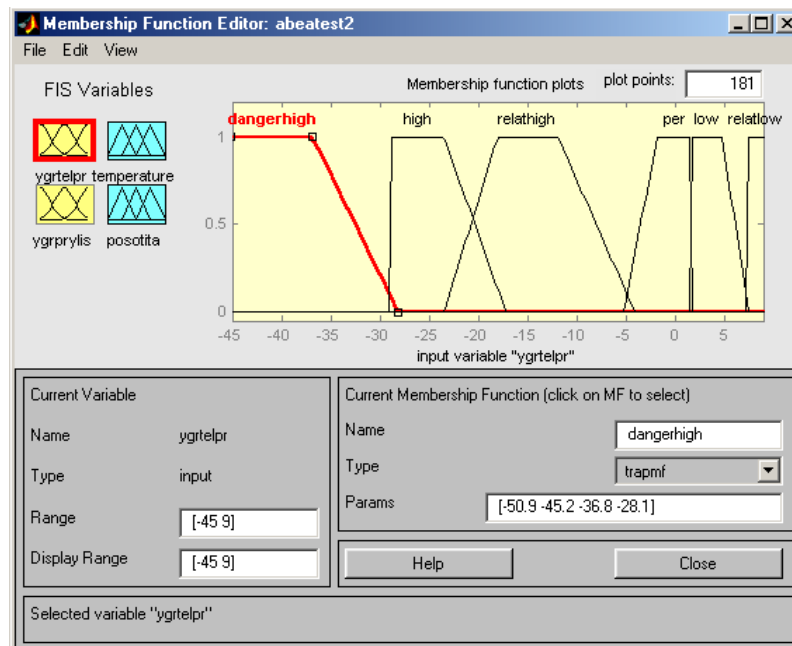


Σχέδιο 4 Η Δομή του Ασαφούς Ελεγκτή

#### 4.1.4. Συναρτήσεις Συμμετοχής των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του ελεγκτή

Σε αυτή την ενότητα θα καθοριστούν οι συναρτήσεις συμμετοχής για κάθε μεταβλητή εισόδου και εξόδου του συστήματος. Θα φανούν τα σχήματα των συναρτήσεων συμμετοχής, τα σύνολα στήριξης της κάθε μίας και πώς κατανέμονται αυτά στο υπερσύνολο αναφοράς καθώς και οι συγκαλύψεις που υπάρχουν μεταξύ τους.

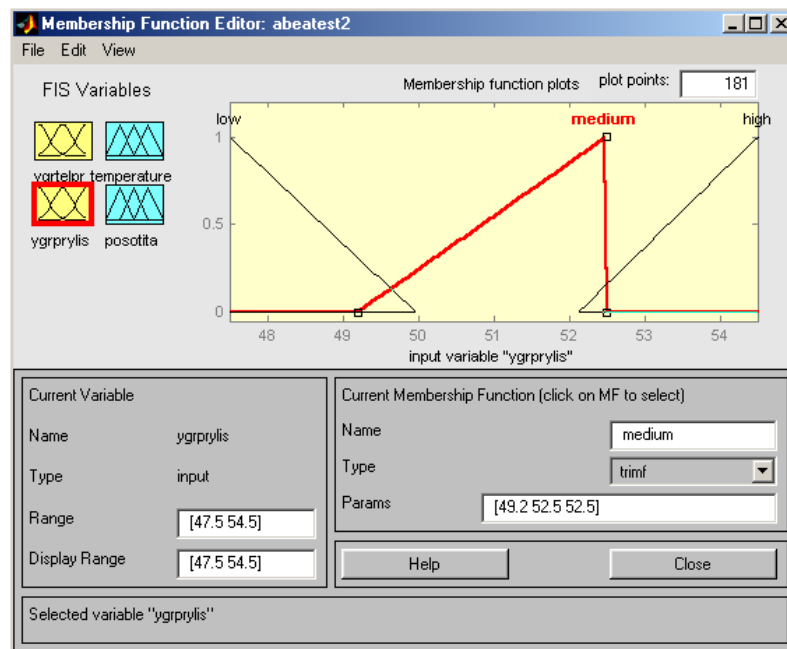
Ξεκινώντας από την πρώτη μεταβλητή εισόδου, το σφάλμα της υγρασίας του τελικού πυρήνα ( $dx$ ), παρουσιάζονται στην εικόνα 4-1 οι συναρτήσεις συμμετοχής της.



Εικόνα 4-1 Συναρτήσεις Συμμετοχής για το Σφάλμα Υγρασίας Τελικού Πυρήνα ( $dx$ )

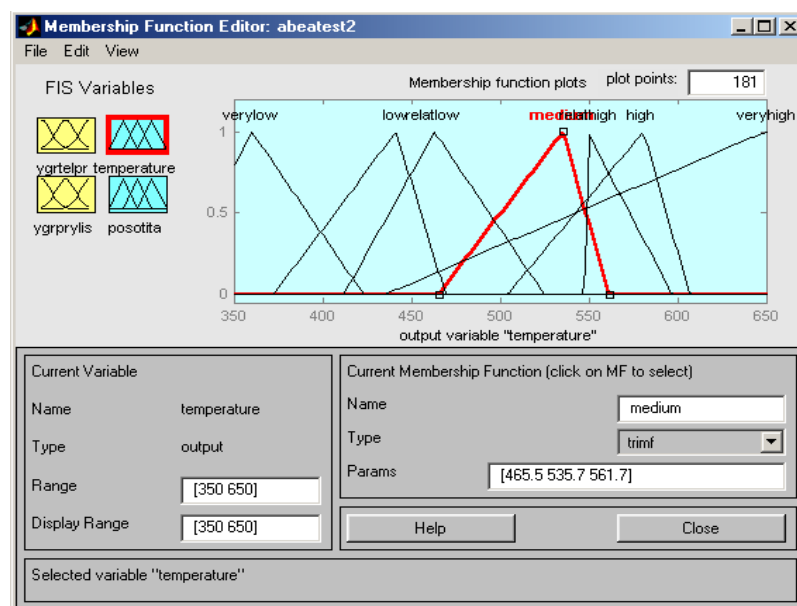
Στον ελεγκτή το σφάλμα της υγρασίας του τελικού πυρήνα ( $dx$ ) καλείται 'ygrtelpr' όπως φαίνεται και στο σχήμα. Η πρώτη αυτή μεταβλητή εισόδου αποτελείται από έξι συναρτήσεις συμμετοχής, που όλες έχουν τραπεζοειδή μορφή. Το σχήμα του τραπέζιου για τη κάθε μία είναι ξεχωριστό όπως επίσης και οι συγκαλύψεις μεταξύ τους είναι διαφορετικές. Αυτά έχουν προέλθει από πειραματισμούς και δοκιμές πάνω στο σύστημα έτσι ώστε η λειτουργία του να είναι η επιθυμητή.

Ακολουθεί η δεύτερη μεταβλητή εισόδου, η υγρασία της πρώτης ύλης ( $x_a$ ), που στον ελεγκτή εμφανίζεται σαν 'ygrprylis'. Αποτελείται από τρεις συναρτήσεις συμμετοχής που όλες έχουν τριγωνική μορφή. Πιο συγκεκριμένα η μορφή των συναρτήσεων είναι ορθογώνια τρίγωνα που σημαίνει για τη συνάρτηση συμμετοχής 'low' ότι παίρνει τη μέγιστη τιμή της για υγρασία πρώτης ύλης ίση με 47,5% και από εκεί και πέρα μειώνεται. Για την 'medium' όσο ανεβαίνει η αρχική υγρασία αυξάνει η τιμή της έως ότου φτάσει στο 52,5% που παίρνει τη μέγιστη τιμή ενώ η τιμή της 'high' αυξάνει μέχρι την τιμή 54,5% που μεγιστοποιείται και παίρνει την τιμή 1. Αυτά φαίνονται καλύτερα στο παράθυρο της εικόνας 4-2.



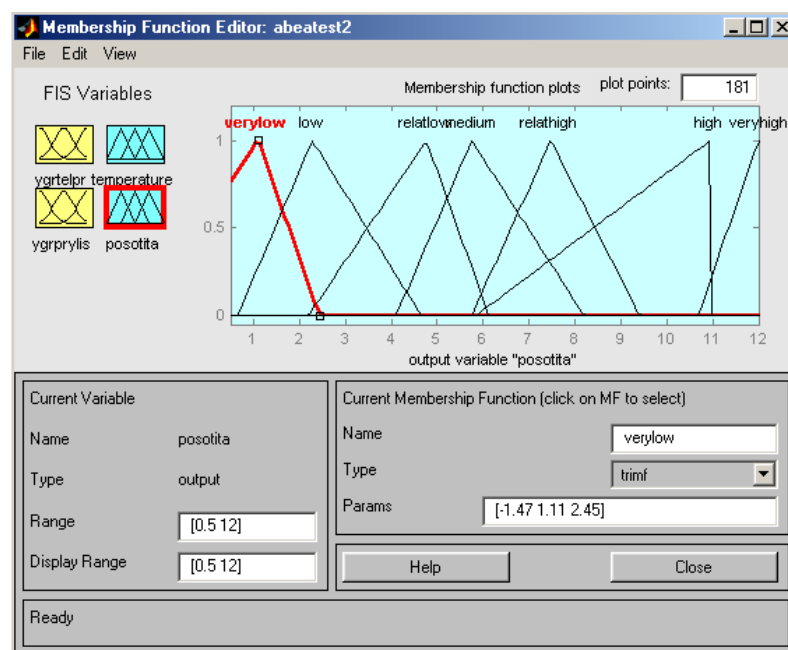
Εικόνα 4-2 Συναρτήσεις Συμμετοχής της Αρχικής Υγρασίας του Πυρήνα ( $x_a$ )

Η πρώτη έξοδος του συστήματος, η θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης ( $T$ ), εμφανίζεται στον ελεγκτή ως 'temperature'. Αποτελείται από επτά συναρτήσεις συμμετοχής που όλες έχουν τριγωνική μορφή. Η μορφή του κάθε τριγώνου εξαρτάται από τη θέση της επιθυμητής μέγιστης τιμής της συνάρτησης συμμετοχής. Οι συναρτήσεις συμμετοχής αυτής της εξόδου φαίνονται στην εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-3 Συναρτήσεις Συμμετοχής της Θερμοκρασίας των Απαερίων Ξήρανσης ( $T$ )

Η δεύτερη έξοδος του συστήματος, η ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πρώτης ύλης (Α) στον ξηραντήρα, εμφανίζεται στον ασαφή ελεγκτή σαν 'posotita'. Αποτελείται, όπως και η προηγούμενη έξοδος, από επτά συναρτήσεις συμμετοχής τριγωνικής μορφής. Οι μορφές των τριγώνων σχεδιάζονται με γνώμονα την τιμή της ποσότητας που η εκάστοτε συνάρτηση πρέπει να παίρνει τη μέγιστη τιμή της και τον τρόπο που πρέπει να κατανέμονται οι διάφορες τιμές της συνάρτησης στο σύνολο στήριξης της. Στην εικόνα 4-4 φαίνονται οι συναρτήσεις συμμετοχής της δεύτερης εξόδου.



Εικόνα 4-4 Συναρτήσεις Συμμετοχής της ανά ώρα Εισερχόμενης Ποσότητας Πυρήνα (Α)

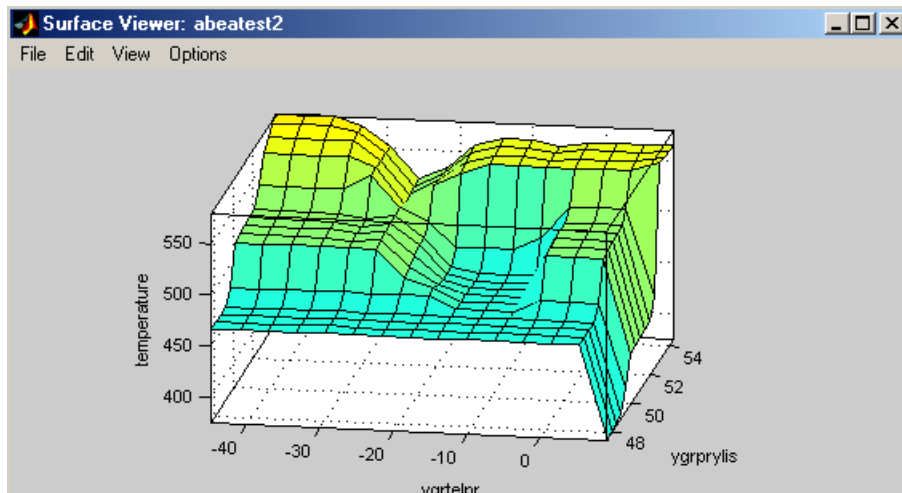
#### 4.1.5. Δημιουργία των Κανόνων Ασαφούς Λογικής

Οι κανόνες της μορφής 'IF... THEN...' αποτελούν τη βάση γνώσης του ασαφούς ελεγκτή. Είναι αυτοί που περιγράφουν την εξάρτηση που υπάρχει μεταξύ των δύο εισόδων του συστήματος, σφάλμα υγρασίας τελικού προϊόντος ( $dx$ ) και υγρασία πρώτης ύλης ( $x_a$ ), και των δύο εξόδων του συστήματος, θερμοκρασία απαερίων ξήρανσης ( $T$ ) και ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πρώτης ύλης ( $A$ ). Οι κανόνες που χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο ελεγκτή φαίνονται στον πίνακα 2 που ακολουθεί.

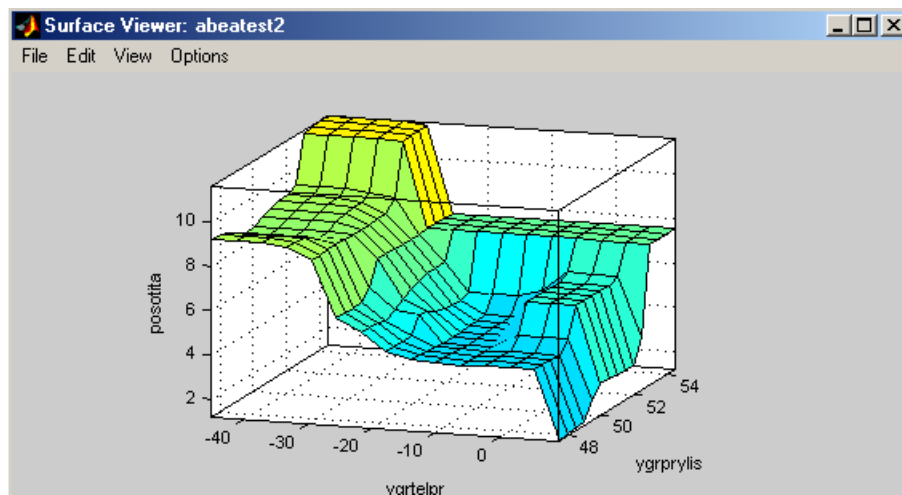
Πίνακας 2 Κανόνες Ασαφούς Λογικής

	IF	AND	THEN	AND
	σφάλμα υγρασίας τελικού προϊόντος	υγρασία πρώτης ύλης	θερμοκρασία απαερίων ξήρανσης	ποσότητα πρώτης ύλης
1	επικίνδυνα υψηλό	υψηλή	πολύ υψηλή	πολύ υψηλή
2	επικίνδυνα υψηλό	μέτρια	μεσαία	υψηλή
3	επικίνδυνα υψηλό	χαμηλή	σχετικά χαμηλή	υψηλή
4	υψηλό	υψηλή	μεσαία	σχετικά υψηλή
5	υψηλό	μέτρια	μεσαία	σχετικά υψηλή
6	υψηλό	χαμηλή	σχετικά χαμηλή	μεσαία
7	σχετικά υψηλό	υψηλή	υψηλή	σχετικά υψηλή
8	σχετικά υψηλό	μέτρια	σχετικά χαμηλή	σχετικά χαμηλή
9	σχετικά υψηλό	χαμηλή	σχετικά χαμηλή	σχετικά χαμηλή
10	ιδανικό	υψηλή	υψηλή	σχετικά υψηλή
11	ιδανικό	μέτρια	μεσαία	μεσαία
12	ιδανικό	χαμηλή	σχετικά χαμηλή	σχετικά χαμηλή
13	χαμηλό	υψηλή	υψηλή	σχετικά υψηλή
14	χαμηλό	μέτρια	μεσαία	μεσαία
15	χαμηλό	χαμηλή	σχετικά χαμηλή	σχετικά χαμηλή
16	σχετικά χαμηλό	υψηλή	σχετικά υψηλή	σχετικά υψηλή
17	σχετικά χαμηλό	μέτρια	χαμηλή	χαμηλή
18	σχετικά χαμηλό	χαμηλή	πολύ χαμηλή	πολύ χαμηλή

Η εξάρτηση που υπάρχει μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου του ασαφούς ελεγκτή, η οποία περιγράφεται από τους προηγούμενους κανόνες, παρουσιάζονται στα παράθυρα των εικόνων 4-5 και 4-6.



Εικόνα 4-5 Εξάρτηση της θερμοκρασίας ( $T$ ) από τις δύο εισόδους



Εικόνα 4-6 Εξάρτηση της ποσότητας ( $A$ ) από τις δύο εισόδους

## 4.2. Το Φυσικό Σύστημα

Στόχος αυτής της ενότητας είναι να παρουσιάσει μία εξίσωση που θα προσομοιώνει, όσο το δυνατό καλύτερα, το πραγματικό σύστημα. Η εξίσωση αυτή θα δείχνει πως μεταβάλλεται και πως επηρεάζεται η υγρασία του πυρήνα όταν κάποια από τις παρακάτω παραμέτρους μεταβάλλεται:

- Η θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης ( $T$ ).
- Η ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα ( $A$ ) στον ξηραντήρα και
- Η αρχική υγρασία του πυρήνα ( $x_a$ ).



Οι παράμετροι αυτές αποτελούν τις μεταβλητές που περιέχονται στην εξίσωση και για διάφορες τιμές τους θα λαμβάνονται κάποια ποσοστά υγρασίας του πυρήνα από την εξίσωση.

#### 4.2.1. Υπολογισμός της εξίσωσης που αντιπροσωπεύει το Φυσικό Σύστημα

Πριν την μαθηματική μοντελοποίηση του φυσικού συστήματος είναι απαραίτητο να παρουσιαστούν κάποια δεδομένα του συγκεκριμένου ξηραντηρίου που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτήν. Τα δεδομένα αυτά είναι:

- Διάμετρος ξηραντηρίου = 2,5 m
- Μέσος αριθμός φτερών = 28
- Περίμετρος ξηραντηρίου = 7,85 m
- Μέση απόσταση φτερών = 0,2805 m
- Μέσο πλάτος φτερών = 0,25 m
- Ολικό μήκος ξηραντηρίου = 22 m
- Μήκος φτερών = 21 m
- Συντελεστής πληρότητας = 0,9
- Συντελεστής απόδοσης = 0,8
- Χρόνος παραμονής του πυρήνα στον κύλινδρο = 10 min

Έχοντας αυτά τα δεδομένα ξεκινά ο υπολογισμός της εξίσωσης του φυσικού συστήματος. Πρώτη εξίσωση που χρησιμοποιείται είναι η παρακάτω:

$$x_t = 100 \frac{\text{ποσότητα νερού που απομένει}}{\text{βάρος τελικού προϊόντος}} \quad (1)$$

όπου

$x_t$ : η τελική υγρασία του πυρήνα καθώς εξέρχεται από το ξηραντήριο

και

$\text{βάρος τελικού προϊόντος} = \text{ποσότητα ξηρού πυρήνα} + \text{ποσότητα νερού που απομένει}$

όπου η ποσότητα ξηρού πυρήνα και η ποσότητα νερού που απομένει μετριοούνται σε  $\left(\frac{Kgr}{t}\right)$

αλλά η ποσότητα ξηρού πυρήνα ισούται με

$$\begin{aligned} \text{ποσότητα ξηρού πυρήνα} &= \text{ποσότητα πυρήνα} - \text{ποσότητα νερού που υπάρχει} = \\ &= \frac{1}{60} A (\text{χρόνος παραμονής}) - \frac{1}{60} A (\text{χρόνος παραμονής}) \frac{x_a}{100} \end{aligned}$$

όπου

$A$ : η παροχή πυρήνα στον περιστρεφόμενο κύλινδρο σε  $\left(\frac{ton}{h}\right)$

$x_a$ : η αρχική υγρασία του πυρήνα καθώς εισέρχεται στον περιστρεφόμενο κύλινδρο

$\text{χρόνος παραμονής}$ : είναι ο χρόνος παραμονής του πυρήνα στον κύλινδρο σε min.

Επίσης η ποσότητα νερού που απομένει είναι:

$$\begin{aligned} \text{ποσότητα νερού που απομένει} &= \text{ποσότητα νερού που υπάρχει} - \\ &\quad - \text{ποσότητα νερού που εξατμίζεται} = \\ &= \frac{1}{60} A (\text{χρόνος παραμονής}) \frac{x_a}{100} - \frac{1}{617} (\text{διαθέσιμη θερμότητα για εξάτμιση}) \end{aligned}$$

όπου η ποσότητα νερού που υπάρχει και η ποσότητα νερού που εξατμίζεται

μετριοούνται σε  $\left(\frac{Kgr}{t}\right)$  ενώ η διαθέσιμη θερμότητα για εξάτμιση σε  $\left(\frac{Kcal}{t}\right)$ .

Όμως η

$$\begin{aligned} \text{διαθέσιμη θερμότητα για εξάτμιση} &= \text{ωφέλιμο ποσό θερμότητας} - \\ &\quad - \text{δαπάνη για την άνοδο της θερμοκρασίας του πυρήνα} = \\ &= (\text{ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται}) (\text{συντελεστής απόδοσης}) - \\ &\quad - \frac{1}{60} A (\text{χρόνος παραμονής}) * 0.5 * 4 \end{aligned}$$

όπου το *ωφέλιμο ποσό θερμότητας* , η *δαπάνη για την άνοδο της θερμοκρασίας* και το *ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται* μετριοούνται σε  $\left( \frac{Kcal}{t} \right)$ .

Αλλά το

*ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται* =

$$= \left( \text{ποσό θερμότητας που εναλλάσσεται σε } \frac{Kcal}{h} \right) \frac{(\text{χρόνος παραμονής})}{60} =$$

$$= (0.9\alpha_1 + 0.1\alpha_2)(\text{επιφάνεια εναλλαγής})(T-323) \frac{(\text{χρόνος παραμονής})}{60}$$

όπου

η *επιφάνεια εναλλαγής* μετριέται σε m<sup>2</sup>

$\alpha_1$ : ο συντελεστής συναγωγής για μετάδοση θερμότητας από θερμαινόμενη επιφάνεια σε συσσωρευμένο υλικό που υπολογίστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο και

$\alpha_2$ : ο συντελεστής συναγωγής περιρρέουσας σφαίρας που επίσης υπολογίστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο.

$(T-323)$ : αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των καυσαερίων και του πυρήνα,  $T-273-50=T-323$ , αφού η θερμοκρασία του πυρήνα λαμβάνεται περίπου ίση με 50 βαθμούς Κελσίου στην έξοδο της.

Ισχύει επίσης ότι η:

$$\text{επιφάνεια εναλλαγής} = \frac{1}{3}(\text{συντελεστής πληρότητας})(\text{μέσος αριθμός φτερών}) *$$

$$*(\text{μήκος φτερών}) \sqrt{\left[ (\text{μέσο πλάτος φτερών})^2 + \left[ \frac{1}{2}(\text{μέση απόσταση φτερών}) \right]^2 \right]}$$

με

$$\text{μέση απόσταση φτερών} = \frac{\text{περίμετρος ξηραντηρίου}}{\text{μέσος αριθμός φτερών}}$$

Με τις κατάλληλες αντικαταστάσεις των παραπάνω σχέσεων στη σχέση (1), αλλά και με την προσθήκη των γνωστών δεδομένων του προβλήματος προκύπτει η

σχέση (2). Η σχέση αυτή δίνει την τελική υγρασία του πυρήνα ( $x_t$ ) σε συνάρτηση με την αρχική του υγρασία ( $x_\alpha$ ), την ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα ( $A$ ) σε  $\text{ton/h}$  στον περιστρεφόμενο κύλινδρο και την θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης του πυρήνα ( $T$ ) σε  $^\circ\text{K}$ .

$$x_t = 100 \left[ \frac{1.667 A x_\alpha - 0.0109(0.9\alpha_1 + 0.1\alpha_2)(T - 323) + 5.4025 A}{172.1 A - 0.0109(0.9\alpha_1 + 0.1\alpha_2)(T - 323)} \right] \quad (2)$$

#### 4.2.2. Προσαρμογή των συντελεστών $\alpha_1$ και $\alpha_2$ στο συγκεκριμένο πρόβλημα

Για να προσαρμοστούν οι συντελεστές  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  στο συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να οριστούν κάποια δεδομένα του προβλήματος που χρησιμοποιούνται σε αυτούς. Τα δεδομένα αυτά είναι για τον  $\alpha_1$ :

- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ , η σταθερά ακτινοβολίας σε  $\left( \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K^4} \right)$
- $E_w = 0.9$ , ο βαθμός εκπομπής τοιχώματος
- $E_b = 0.9$ , ο βαθμός εκπομπής συσσώρευσης
- ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda_g$ , σε  $\left( \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right)$ , προκύπτει από

ένα πίνακα τιμών του για διάφορες θερμοκρασίες με παρεμβολή. Ο πίνακας αυτός είναι:

**Πίνακας 3 Τιμές του Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας**

θερμοκρασία σε βαθμούς kelvin	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
333	0.02894
473	0.03795
498	0.0395
523	0.04106
548	0.042575
573	0.04409
598	0.04557
623	0.04705
648	0.048505
673	0.04996

Τα στοιχεία αυτά έχουν περαστεί σαν αρχείο σε ένα m-file, με την ονομασία thermiki.m, και με τη βοήθεια της συνάρτησης 'interp1' που υπάρχει μέσα σε αυτό το m-file γίνεται παρεμβολή στις τιμές με συνέπεια να υπάρχει διαθέσιμος ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για οποιαδήποτε θερμοκρασία.

- $d=0.0005\text{m}$ , η διάμετρος των σωματιδίων
- $P=7451$ , η πίεση του αέρα σε Pa
- $\delta=0.0001\text{m}$ , η επιφανειακή τραχύτητα του πυρήνα
- Η ειδική θερμοχωρητικότητα του αερίου  $C_{p,g}$  σε  $\left(\frac{J}{Kgr \cdot ^\circ K}\right)$ , προκύπτει

από τον πίνακα 4:

**Πίνακας 4 Τιμές Συντελεστή Ειδικής Θερμοχωρητικότητας Αερίου**

θερμοκρασία σε βαθμούς kelvin	ειδική θερμοχωρητικότητα του αερίου
333	1009
473	1026
498	1030
523	1035
548	1040
573	1046
598	1051
623	1057
648	1063
673	1069

Ο πίνακας αυτός βρίσκεται σαν αρχείο σε ένα m-file με την ονομασία thermochorit.m. Με τη συνάρτηση 'interp1' γίνεται πάλι παρεμβολή στις τιμές με αποτέλεσμα να είναι διαθέσιμες όλες οι αναγκαίες τιμές της ειδικής θερμοχωρητικότητας του αερίου.

- $M = 28,96$ , η μοριακή μάζα του αερίου σε  $\left(\frac{Kgr}{Kmol}\right)$
- $C=2.8$ , η χαρακτηριστική που εξαρτάται από τη μοριακή μάζα του αερίου.

Τα δεδομένα για τον  $\alpha_2$  είναι:

- $l=d=0.0005\text{ m}$ , το εύρος περιρροής
- ο αριθμός Prandtl  $Pr$ , που δίνεται από τον πίνακα 5 για διάφορες τιμές θερμοκρασιών.

**Πίνακας 5 Τιμές Αριθμού PRANDTL**

Θερμοκρασία σε βαθμούς kelvin	αριθμός Prandtl
373	0.707
473	0.7051
573	0.7083
673	0.7137
773	0.7194
873	0.7247

Με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγουμένως ο πίνακας αυτός είναι αποθηκευμένος σαν αρχείο σε ένα m-file, που καλείται pramd, και με παρεμβολή λαμβάνονται οι τιμές του αριθμού Prandtl για όλες τις θερμοκρασίες.

- Το κινηματικό ιξώδες  $\nu$  σε  $\left(\frac{m^2}{sec}\right)$  για διάφορες τιμές θερμοκρασιών δίνεται από τον πίνακα 6.

**Πίνακας 6 Τιμές για το Κινηματικό Ιξώδες**

Θερμοκρασία σε βαθμούς kelvin	κινηματικό ιξώδες
373	0.00002351
473	0.00003547
573	0.00004918
673	0.00006451
773	0.00008135
873	0.00009963

Το m-file που είναι αποθηκευμένες οι τιμές αυτές καλείται ixodes, και οι παρεμβολή σε αυτές γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

- Ο συντελεστής κατ' όγκο θερμικής διαστολής  $\beta$  δίνεται από τον πίνακα 7 για διάφορες τιμές θερμοκρασιών.

**Πίνακας 7 Τιμές για τον συντελεστή κατ' όγκο θερμικής διαστολής**

θερμοκρασία σε βαθμούς kelvin	συντελεστής κατ' όγκο θερμικής διαστολής
373	0.00268
473	0.00211
573	0.00174
673	0.00148
773	0.00129
873	0.00114

Οι τιμές του συντελεστή κατ' όγκο θερμικής διαστολής βρίσκονται σε ένα m-file με την ονομασία diastoli. Ενώ οι τιμές του για τις διάφορες θερμοκρασίες λαμβάνονται με παρεμβολή, με τη συνάρτηση 'interp1'.

- Η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των καυσαερίων και της πρώτης ύλης είναι  $\Delta T = T - 273 - 50 = T - 323$ , αφού η θερμοκρασία της πρώτης ύλης λαμβάνεται περίπου ίση με 50 βαθμούς Κελσίου στην έξοδο της.

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας από θερμαινόμενη επιφάνεια,  $\alpha_1$ , συμμετέχει κατά 90% στην όλη διαδικασία μετάδοσης θερμότητας ενώ ο συντελεστής περιρρέουσας σφαίρας,  $\alpha_2$ , κατά το υπόλοιπο 10%. Για αυτό το λόγο στην εξίσωση (2) υπάρχει ένας παράγοντας  $(0.9\alpha_1 + 0.1\alpha_2)$ . Αυτό υπολογίστηκε ως εξής:

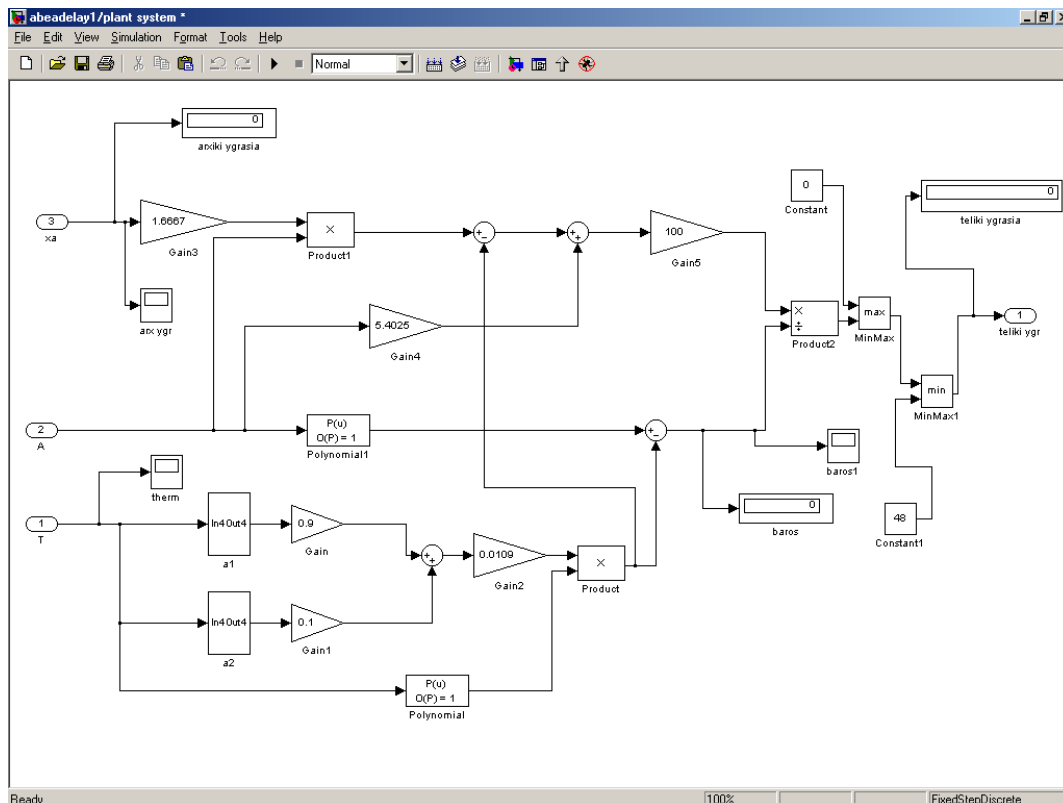
Ο χρόνος παραμονής του πυρήνα στον κύλινδρο είναι περίπου 10 λεπτά ενώ η ταχύτητα περιστροφής του είναι 3,5 στροφές το λεπτό. Άρα έως ότου εξέλθει ο πυρήνας του ξηραντηρίου θα έχουν πραγματοποιηθεί περίπου 35 περιστροφές άρα και 35 καταπτώσεις του πυρήνα που βρίσκεται εντός του κυλίνδρου. Ο χρόνος της κάθε κατάπτωσης του πυρήνα διαρκεί λίγο κάτω από τα 2 δευτερόλεπτα, άρα ο συνολικός χρόνος που ο πυρήνας βρίσκεται σε φάση κατάπτωσης είναι  $35 \cdot 2 = 70$  δευτερόλεπτα ή περίπου ένα λεπτό. Άρα στο 10% του χρόνου παραμονής του πυρήνα στον κύλινδρο, αυτός βρίσκεται σε φάση κατάπτωσης και τότε συμμετέχει ο συντελεστής περιρρέουσας σφαίρας,  $\alpha_2$ .

#### 4.3. Το Μοντέλο SIMULINK

Ο ελεγκτής ασαφούς λογικής μαζί με την εξίσωση που περιγράφει το φυσικό σύστημα θα μοντελοποιηθούν στο περιβάλλον του SIMULINK, όπου και θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση. Ο ασαφής ελεγκτής που έχει δημιουργηθεί θα μοντελοποιηθεί στο SIMULINK με τη βοήθεια του fuzzy logic toolbox. Η εξίσωση του φυσικού συστήματος θα κατασκευαστεί με τη βοήθεια των διαφόρων δομικών στοιχείων (blocks) που προσφέρει το SIMULINK.

#### 4.3.1. Μοντελοποίηση στο SIMULINK της εξίσωσης του φυσικού συστήματος

Η εξίσωση (2), που υπολογίστηκε στην ενότητα 4.2.1, προσομοιώνει τη διαδικασία ξήρανσης του πυρήνα. Αυτή η εξίσωση μοντελοποιημένη στο SIMULINK παρουσιάζεται στην εικόνα 4-7.

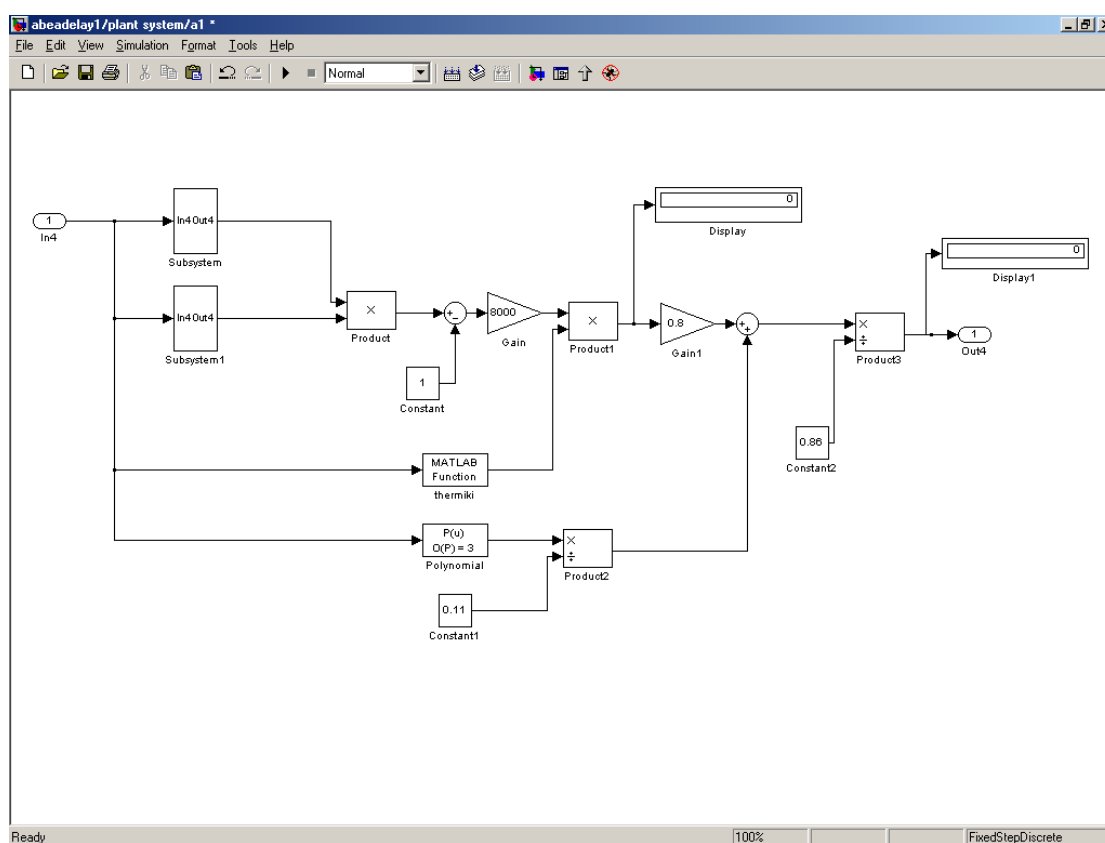


Εικόνα 4-7 Η εξίσωση (2) στο simulink

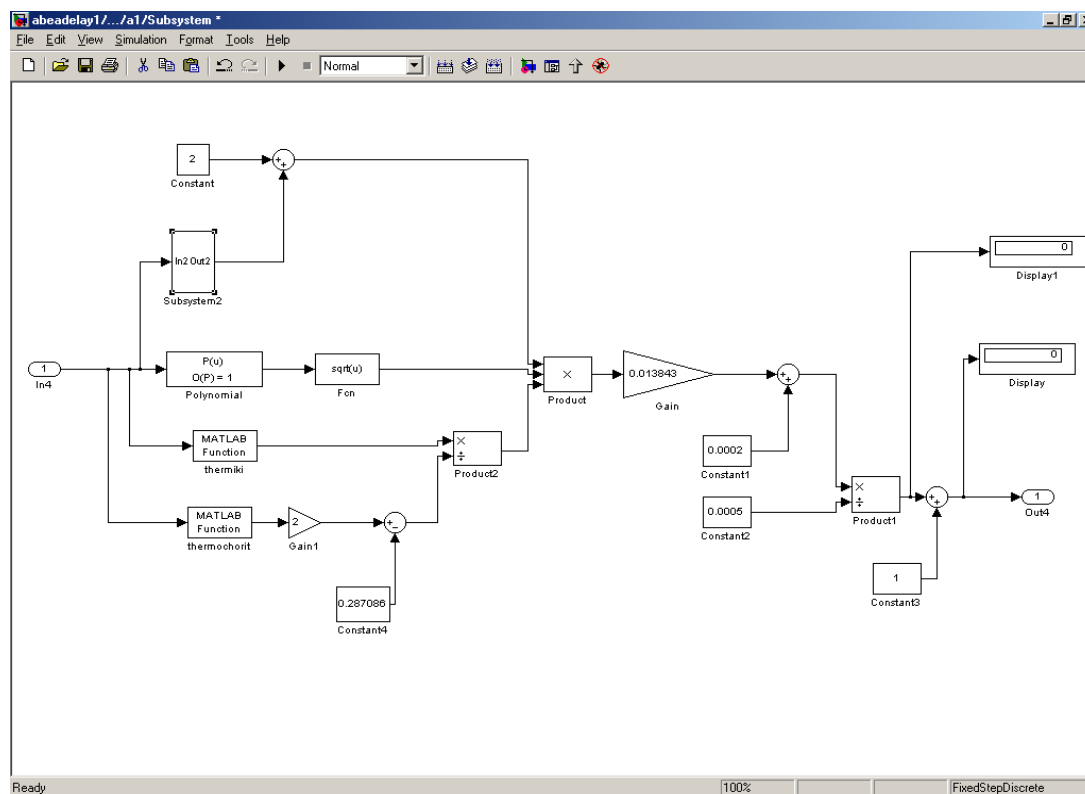
Από αυτό το σχήμα φαίνεται και αυτό που είχε τονιστεί κατά τον θεωρητικό υπολογισμό της εξίσωσης, ότι η εξίσωση του φυσικού συστήματος έχει σαν μεταβλητές εισόδου, την *θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης (T)*, την *ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα (A)* και την *αρχική υγρασία της πρώτης ύλης ( $x_a$ )* και σαν έξοδο την *τελική υγρασία του πυρήνα*.

Τα υποσυστήματα a1 και a2, όπως φαίνονται στο προηγούμενο σχήμα, αντιπροσωπεύουν τους δύο συντελεστές μετάδοσης θερμότητας, τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας από θερμαινόμενη επιφάνεια σε συσώρευση ( $a_1$ ) και τον συντελεστή περιρρέουσας σφαίρας ( $a_2$ ) αντίστοιχα. Ο συντελεστής  $a_1$  μοντελοποιείται όπως φαίνεται στην εικόνα 4-8.



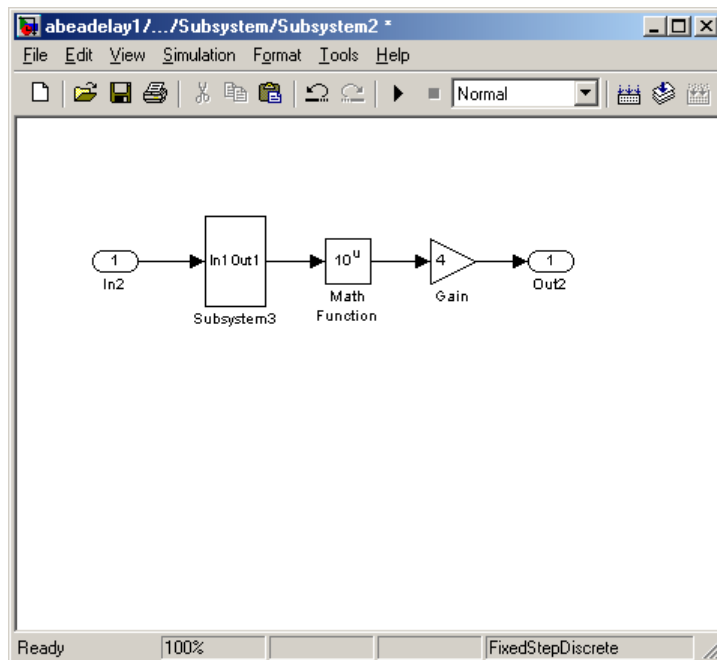
Εικόνα 4-8 Μοντελοποίηση Συντελεστή  $\alpha_1$ 

Το υποσύστημα (subsystem), που φαίνεται στο σχήμα 4-8 περιέχει:



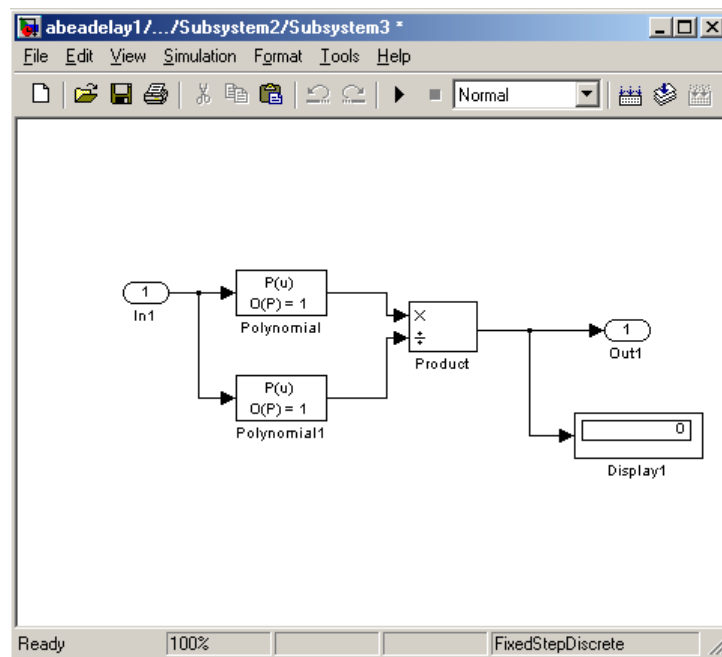
Εικόνα 4-9 Μοντελοποίηση του υποσυστήματος (subsystem)

Το υποσύστημα 2 (subsystem2), που εμφανίστηκε στο προηγούμενο παράθυρο, αποτελείται από τα δομικά στοιχεία που φαίνονται στην εικόνα 4-10.



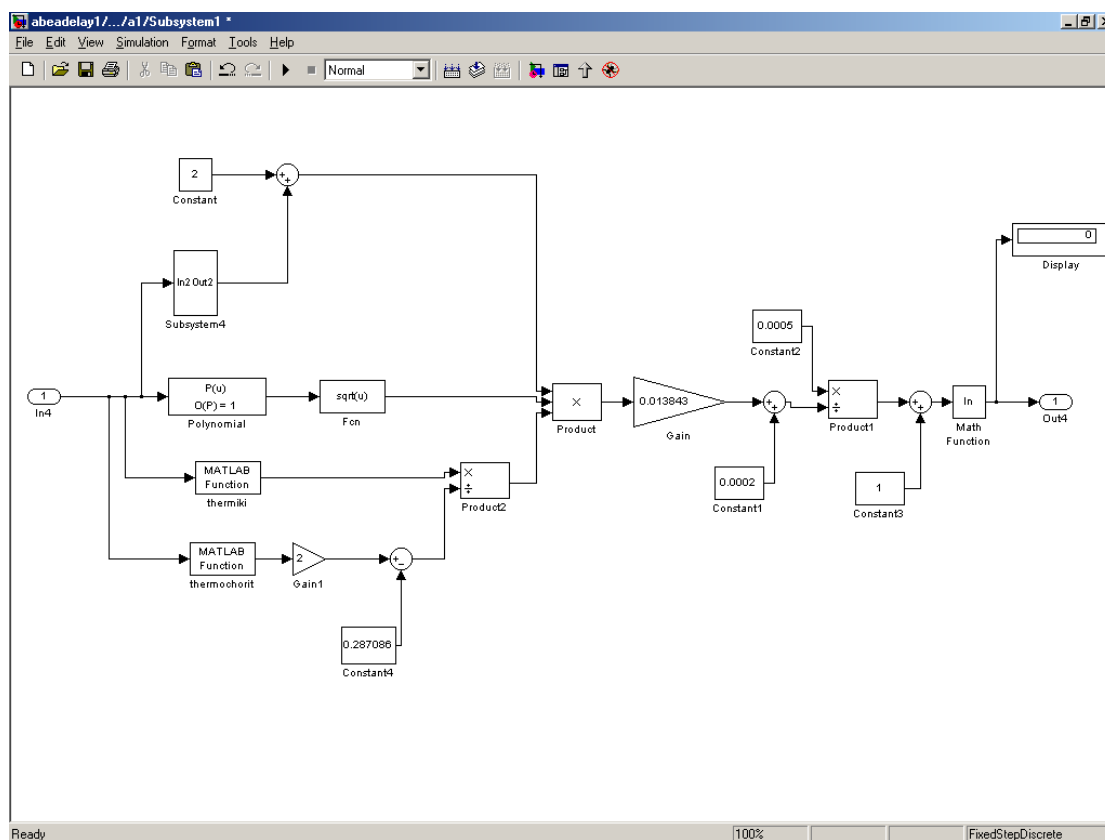
Εικόνα 4-10 Μοντελοποίηση του υποσυστήματος 2 (subsystem2)

Ενώ το υποσύστημα 3 (subsystem3) της εικόνας 4-10 αποτελείται από:



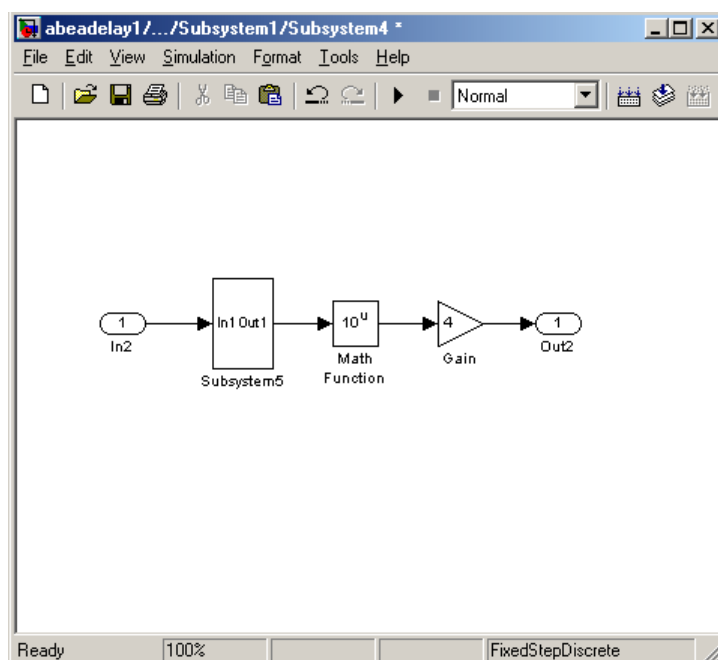
Εικόνα 4-11 Μοντελοποίηση του υποσυστήματος 3 (subsystem3)

Το υποσύστημα 1 (subsystem1) του παραθύρου της εικόνας 4-8 περιλαμβάνει τα ακόλουθα:



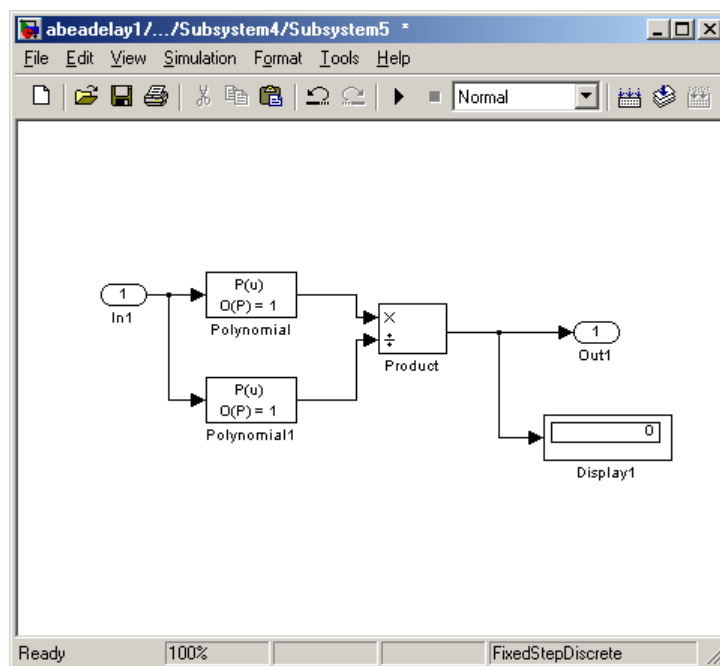
Εικόνα 4-12 Μοντελοποίηση του υποσυστήματος 1 (subsystem1)

Όπου το υποσύστημα 4 (subsystem4) του παραθύρου της εικόνας 4-12 περιλαμβάνει:



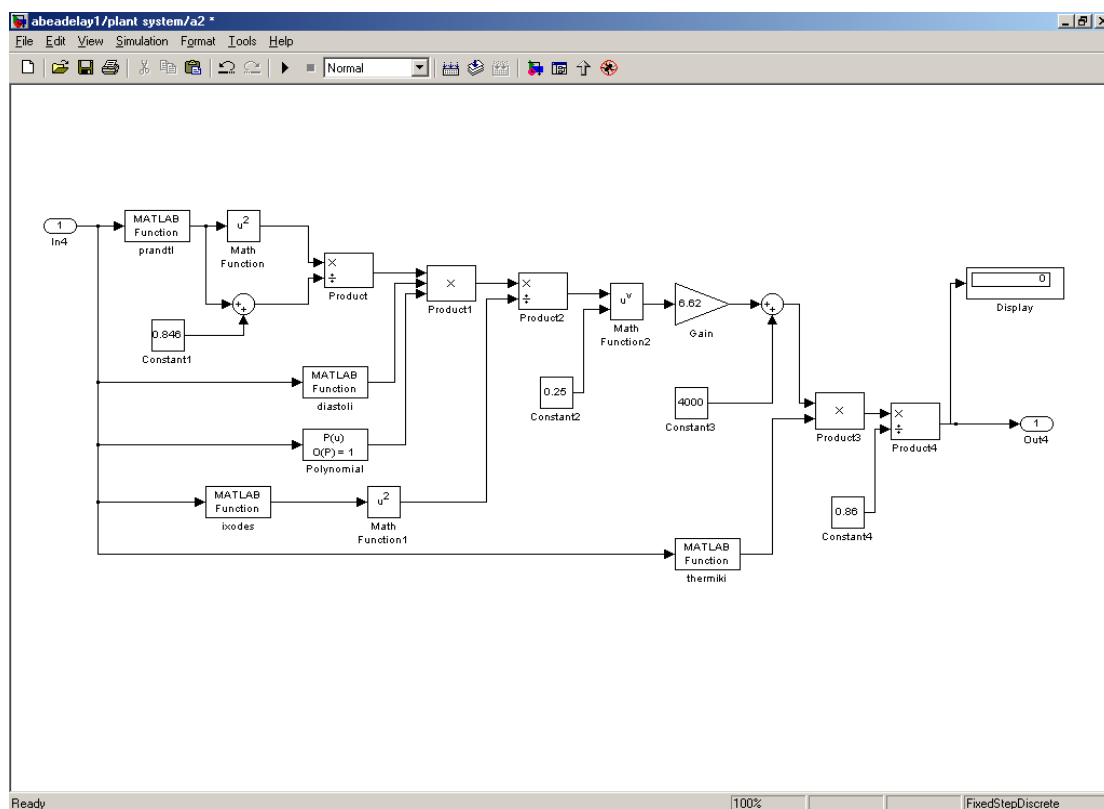
Εικόνα 4-13 Μοντελοποίηση του υποσυστήματος 4 (subsystem4)

Και το υποσύστημα (subsystem5) του προηγούμενου παραθύρου έχει την εξής δομή:



Εικόνα 4-14 Μοντελοποίηση του υποσυστήματος 5 ( subsystem5)

Ο συντελεστής  $a_2$ , ή συντελεστής περιρρέουσας σφαίρας, φαίνεται στο παράθυρο της εικόνας 4-7 ως  $a1$  και επιλέγοντας το θα εμφανιστούν τα δομικά στοιχεία που το αποτελούν. Αυτά παρουσιάζονται στην εικόνα 4-15.

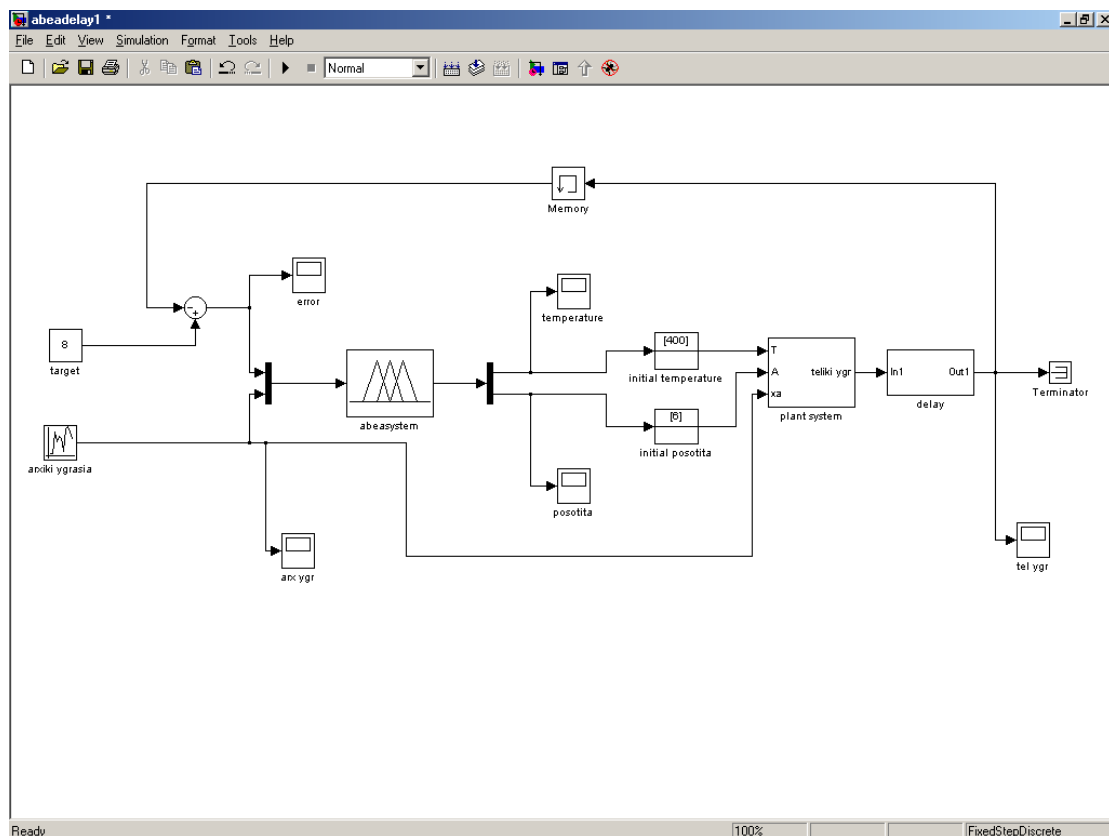
Εικόνα 4-15 Μοντελοποίηση Συντελεστή  $a_2$

#### 4.3.2. Μοντελοποίηση του συστήματος ελέγχου

Σε αυτή την ενότητα θα μοντελοποιηθεί ολόκληρο το σύστημα ελέγχου της διαδικασίας ξήρανσης του πυρήνα με τον ασαφή ελεγκτή και το φυσικό σύστημα. Η μοντελοποίηση του φαίνεται στην εικόνα 4-16.

Στα δομικά στοιχεία ‘initial temperature’ και ‘initial posotita’ του σχήματος τοποθετούνται οι αρχικές τιμές της θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης και της εισερχόμενης ανά ώρα ποσότητας. Οι τιμές αυτές μαζί με την αρχική υγρασία του πυρήνα, που προκύπτει από γεννήτρια τυχαίων αριθμών, εισέρχονται στο φυσικό σύστημα. Το τελευταίο δίνει μία τιμή υγρασίας του πυρήνα, βάση των δεδομένων που εισήλθαν σε αυτό, που εισέρχεται σε ένα δομικό στοιχείο με την ονομασία ‘delay’. Το δομικό αυτό στοιχείο χρησιμοποιείται για να ομαλοποιήσει τις τιμές υγρασίας που εξέρχονται του φυσικού συστήματος, δηλαδή οι μεταβολές από μία τιμή υγρασίας σε μία άλλη να γίνονται σταδιακά και όχι ακαριαία. Ουσιαστικά πραγματοποιεί γραμμική παρεμβολή στις τιμές εξόδου του φυσικού συστήματος, διορθώνοντας έτσι τις απότομες αντιδράσεις του.

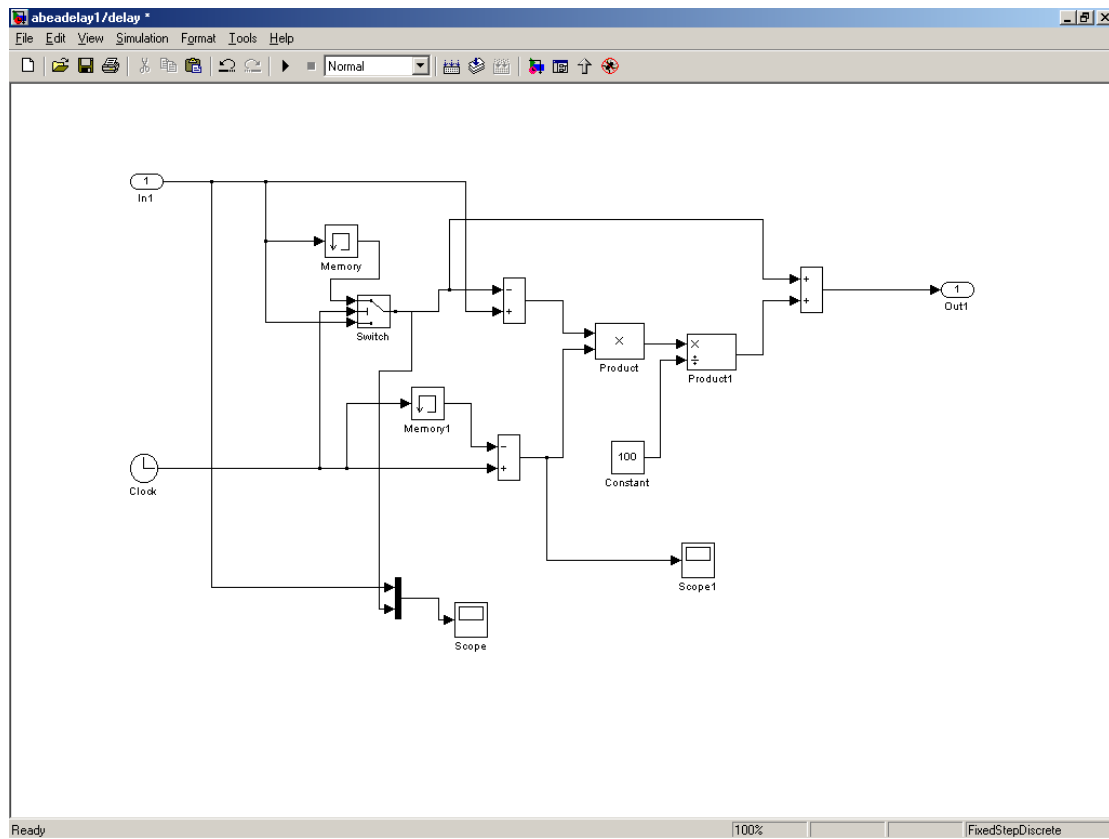
Στη συνέχεια η τιμή που προέκυψε από το υποσύστημα καθυστέρησης ‘delay’, αφού αφαιρεθεί από τον στόχο (target), εισέρχεται μαζί με την αρχική υγρασία στον ασαφή ελεγκτή ‘abeasystem’. Ο ασαφής ελεγκτής, που έχει ως εισόδους το σφάλμα της υγρασίας του πυρήνα και την αρχική υγρασία του, επεξεργάζεται τα δεδομένα και βγάζει μία τιμή θερμοκρασίας απαερίων ξήρανσης και μία τιμή εισερχόμενης ποσότητας. Τα νέα αυτά δεδομένα εισέρχονται με τη σειρά τους στο φυσικό σύστημα, αφού οι τιμές των δομικών στοιχείων ‘initial temperature’ και ‘initial posotita’ ισχύουν μόνο για την χρονική στιγμή  $t=0$ . Έτσι πραγματοποιείται μία συνεχής ανάδραση των δεδομένων από το φυσικό σύστημα στον ελεγκτή έως ότου επιτευχθεί ο στόχος που είναι το ποσοστό της υγρασίας του τελικού πυρήνα να κυμαίνεται στο 8%.



Εικόνα 4-16 Μοντελοποίηση Συστήματος Ελέγχου

Το υποσύστημα καθυστέρησης 'delay' δημιουργήθηκε βασιζόμενο σε μία γραμμική συνάρτηση της μορφής  $y = ax + b$ . Όπου το  $b$  ισούται με την υγρασία του πυρήνα τη χρονική στιγμή  $t_1$  ( $x_{t1}$ ) ενώ το  $a$  με το πηλίκο της διαφοράς της υγρασίας του πυρήνα, τη χρονική στιγμή  $t_2$  μείον τη χρονική στιγμή  $t_1$  ( $x_{t2} - x_{t1}$ ), προς μία σταθερά καθυστέρησης. Η σταθερά αυτή καθορίζει τον τρόπο που θα γίνεται η γραμμική παρεμβολή στις τιμές εξόδου του φυσικού συστήματος.

Η διάταξη του υποσυστήματος καθυστέρησης 'delay' και τα δομικά στοιχεία που το αποτελούν παρουσιάζονται στο παράθυρο της εικόνας 4-17.



Εικόνα 4-17 Μοντελοποίηση του υποσυστήματος καθυστέρησης delay

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθούν οι δοκιμές του συστήματος ελέγχου και θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Θα γίνει ένας αριθμός προσομοιώσεων για διάφορες τιμές αρχικής υγρασίας του πυρήνα, θερμοκρασίας απαερίων ξήρανσης και εισερχόμενης ποσότητας πρώτης ύλης έτσι ώστε να καταγραφούν οι αντιδράσεις του συστήματος για διαφόρους συνδυασμούς αυτών.

### 5.2. Προσομοιώσεις

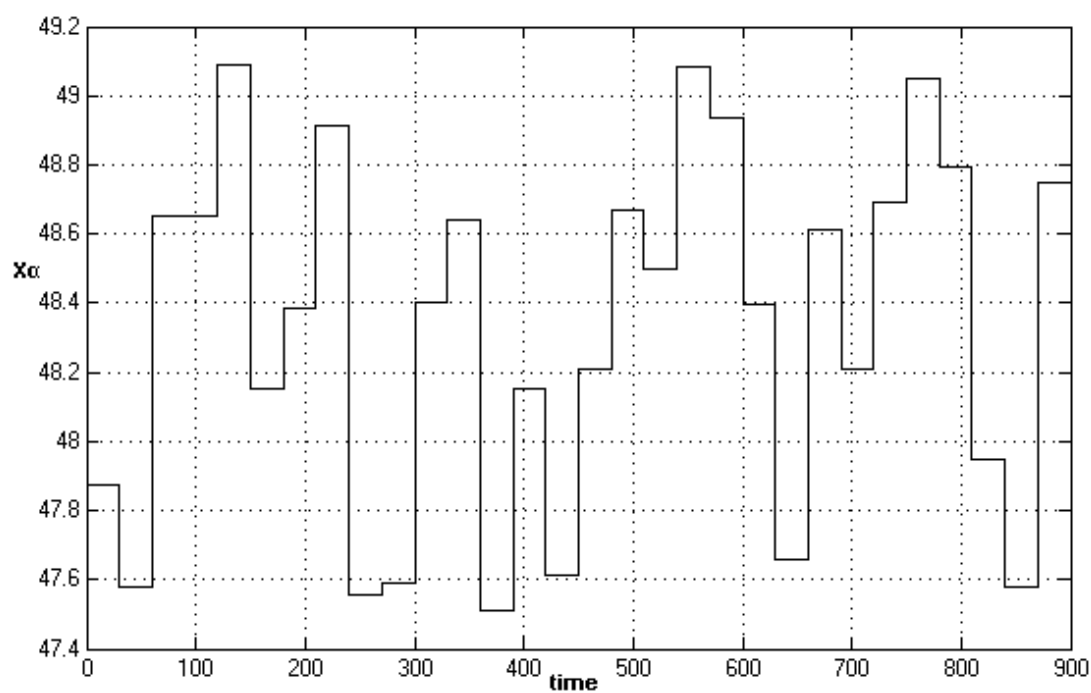
Στο σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών για να δίνει την αρχική υγρασία του πυρήνα. Δεν τοποθετήθηκε μία σταθερά για το λόγο ότι η υγρασία του πυρήνα που εισέρχεται μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή δύναται να μεταβάλλεται με εύρος 0,7%. Έτσι με τη γεννήτρια αριθμών επιτυγχάνεται να εισέρχονται στο σύστημα διαφορετικές τιμές υγρασίας σε κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, που θα κυμαίνονται μεταξύ δύο ορίων που θα έχουν οριστεί από πριν.

Οι παράμετροι της προσομοίωσης είναι ότι ξεκινάει από το 0 και τελειώνει στα 900 δευτερόλεπτα, χρησιμοποιείται σταθερό βήμα που καθορίζεται από το χρονικό διάστημα στο οποίο δίνει εντολές ο ασαφής ελεγκτής, 'refresh rate', και η μέθοδος ολοκλήρωσης που χρησιμοποιεί η προσομοίωση είναι 'discrete' για μη συνεχείς καταστάσεις.

Όταν η αρχική υγρασία του πυρήνα ( $x_a$ ) κυμαίνεται από 47,5 έως 49,2% και η αρχική θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης ( $T$ ) είναι 460 °K ενώ η αρχική ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πρώτης ύλης ( $A$ ) είναι 5 ton/h, το σύστημα αντιδρά ως εξής.

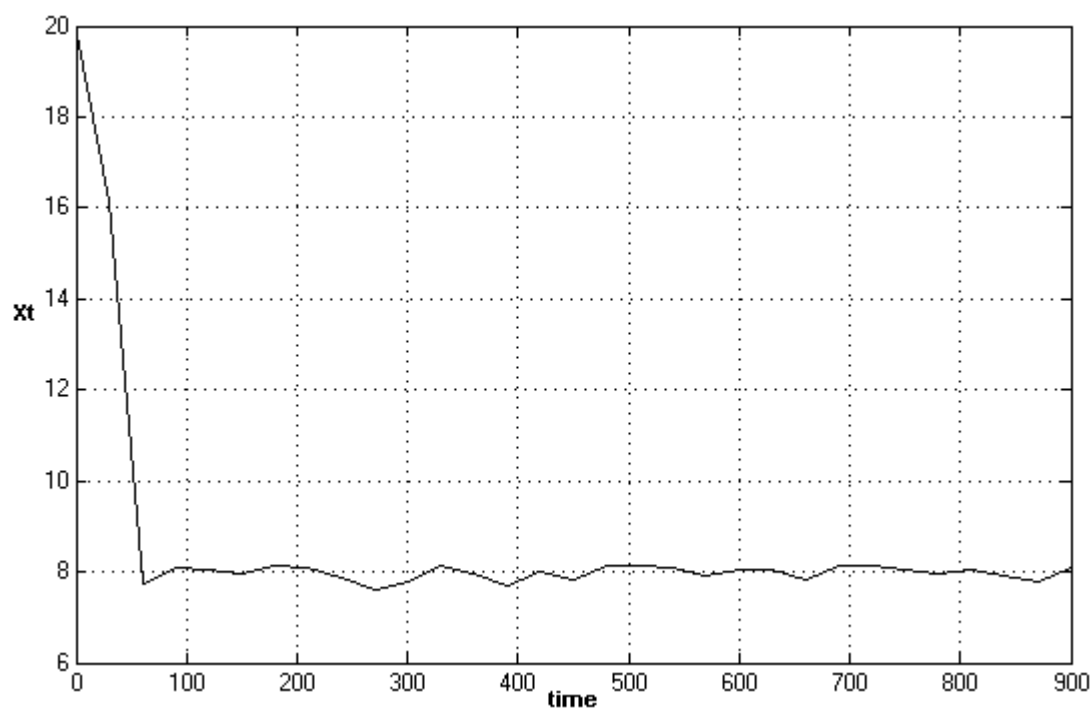
Η αρχική υγρασία του πυρήνα ( $x_a$ ) παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1:





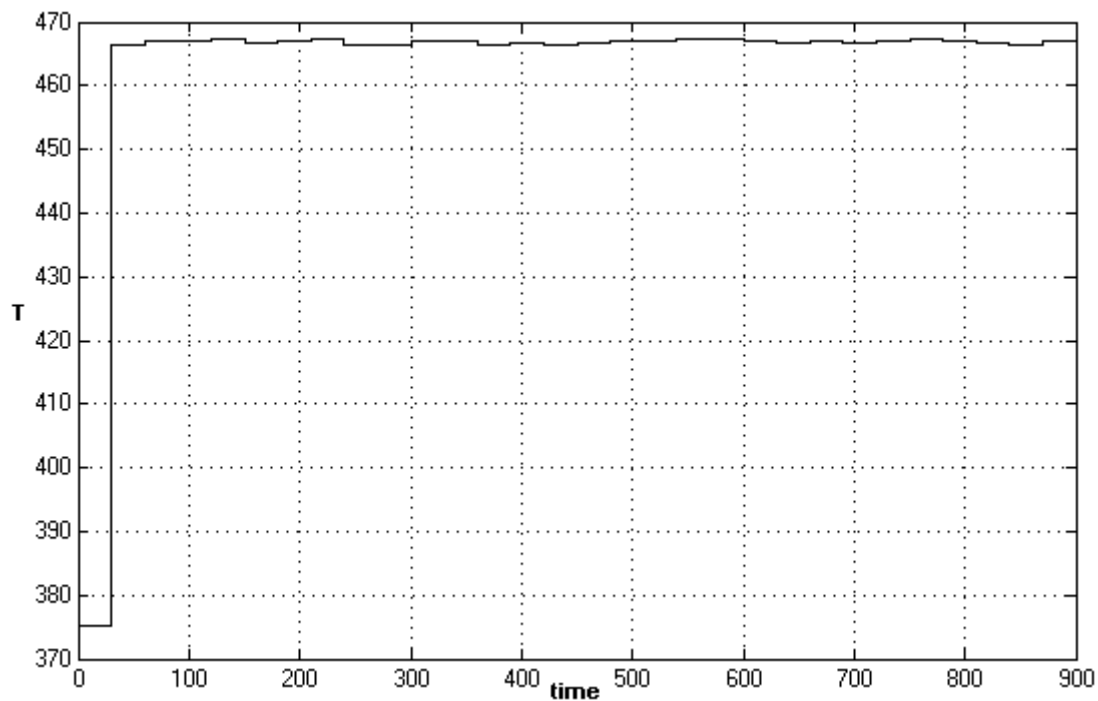
**Διάγραμμα 1 Διακύμανση Αρχικής Υγρασίας του Πυρήνα**

Η τελική υγρασία του πυρήνα ( $x_t$ ) παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2:

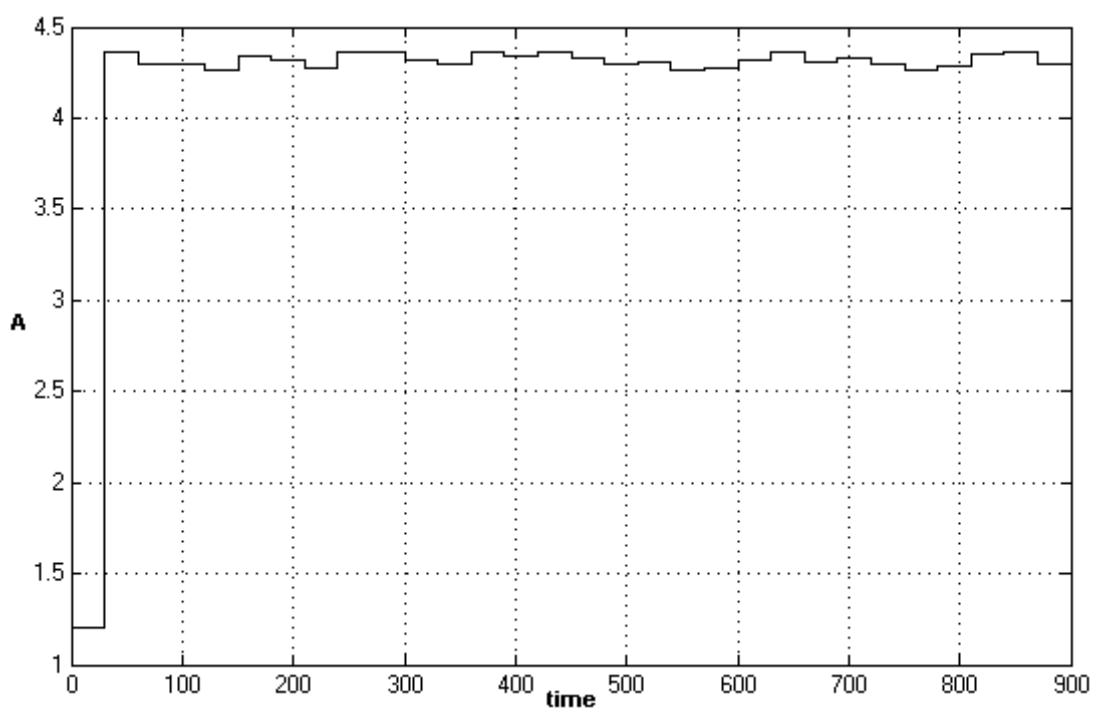


**Διάγραμμα 2 Διακύμανση της Τελικής Υγρασίας του Πυρήνα**

ενώ οι τιμές της θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης ( $T$ ) σε  $^{\circ}\text{K}$  και της ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας ( $A$ ) σε  $\text{ton/h}$ , όπως εξέρχονται του ελεγκτή φαίνονται στα Διαγράμματα 3 και 4.

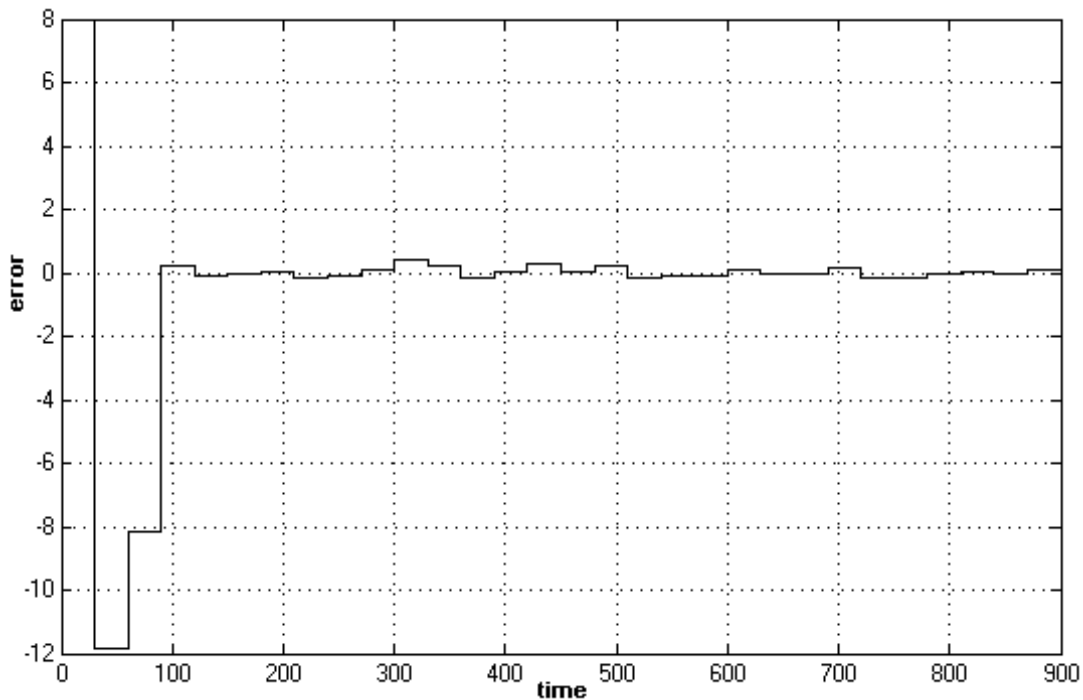


Διάγραμμα 3 Διακύμανση Θερμοκρασίας Απαερίων Ξήρανσης



Διάγραμμα 4 Διακύμανση της ανά ώρα Εισερχόμενης Ποσότητας

και το σφάλμα (*error*) της υγρασίας του πυρήνα όπως αυτή εξέρχεται του φυσικού συστήματος φαίνεται στο Διάγραμμα 5:

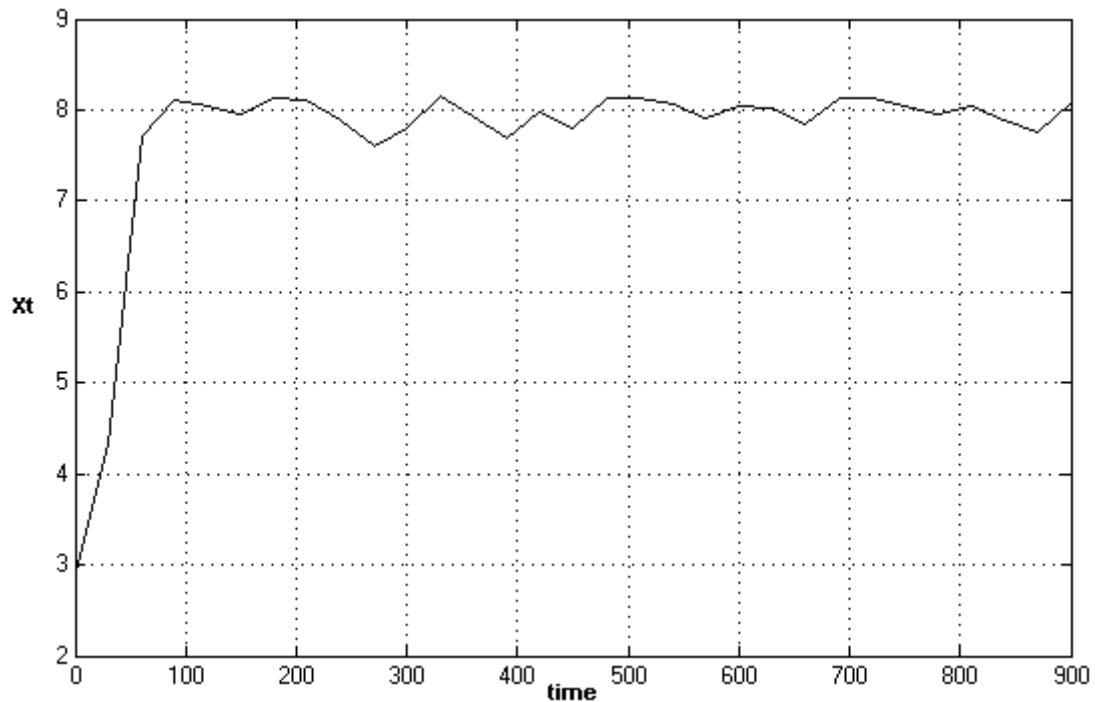


Διάγραμμα 5 Σφάλμα Τελικής Υγρασίας Πυρήνα

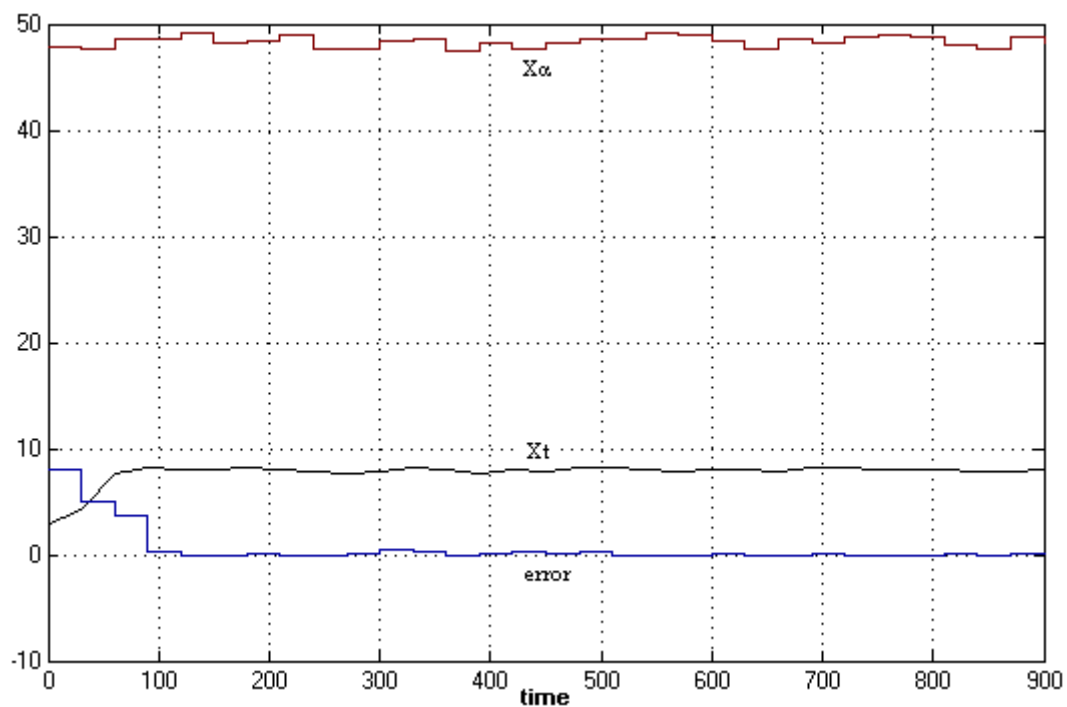
Η τελική υγρασία του πυρήνα ( $x_t$ ) ξεκινώντας από μία τιμή υγρασίας κοντά στο 20% ελαττώνεται σταδιακά έως ότου φτάσει στο 8%. Εκεί διατηρείται έχοντας μια μικρή διακύμανση που οφείλεται στις μεταβολές που υφίσταται κάθε 30 δευτερόλεπτα η αρχική υγρασία του πυρήνα ( $x_a$ ). Ο ασαφής ελεγκτής αντιδρά επίσης κάθε 30 δευτερόλεπτα (refresh rate) ανάλογα με τα δεδομένα που παίρνει εκείνη τη στιγμή. Η θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης ( $T$ ) ξεκινάει από τους 375 °K και καταλήγει γύρω από τους 467 °K. Ενώ η ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα ( $A$ ) ξεκινά από τους 1,2 ton/h και καταλήγει γύρω από τους 4,3 ton/h. Από αυτά τα στοιχεία γίνεται κατανοητό ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας έχει πιο βαρύνουσα σημασία από τη μεταβολή της εισερχόμενης ποσότητας. Δηλαδή μια μικρή αύξηση της θερμοκρασίας έχει μεγαλύτερες συνέπειες στο σύστημα από ότι μια αντίστοιχη της ποσότητας.

Αν για την ίδια αρχική υγρασία πυρήνα, μεταβληθούν οι αρχικές τιμές της θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης και της ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας και γίνουν 550 °K και 7.5 ton/h αντίστοιχα, η διακύμανση που θα έχει η τελική υγρασία φαίνεται στο Διάγραμμα 6. Αρχικά ξεκινάει από ένα ποσοστό 3% που προκύπτει από

τις αρχικές συνθήκες, στη συνέχεια με τις κατάλληλες εντολές του ασαφούς ελεγκτή το ποσοστό υγρασίας ανεβαίνει σταδιακά μέχρι το 8% όπου και διατηρείται με μία μικρή διακύμανση εξαιτίας των μεταβολών της αρχικής υγρασίας του πυρήνα. Αυτά φαίνονται στα Διαγράμματα 6 και 7, όπου στο εφτά υπάρχει σε ένα διάγραμμα, το σφάλμα (*error*), η τελική υγρασία ( $x_t$ ) και η αρχική υγρασία του πυρήνα ( $x_a$ ) μαζί.

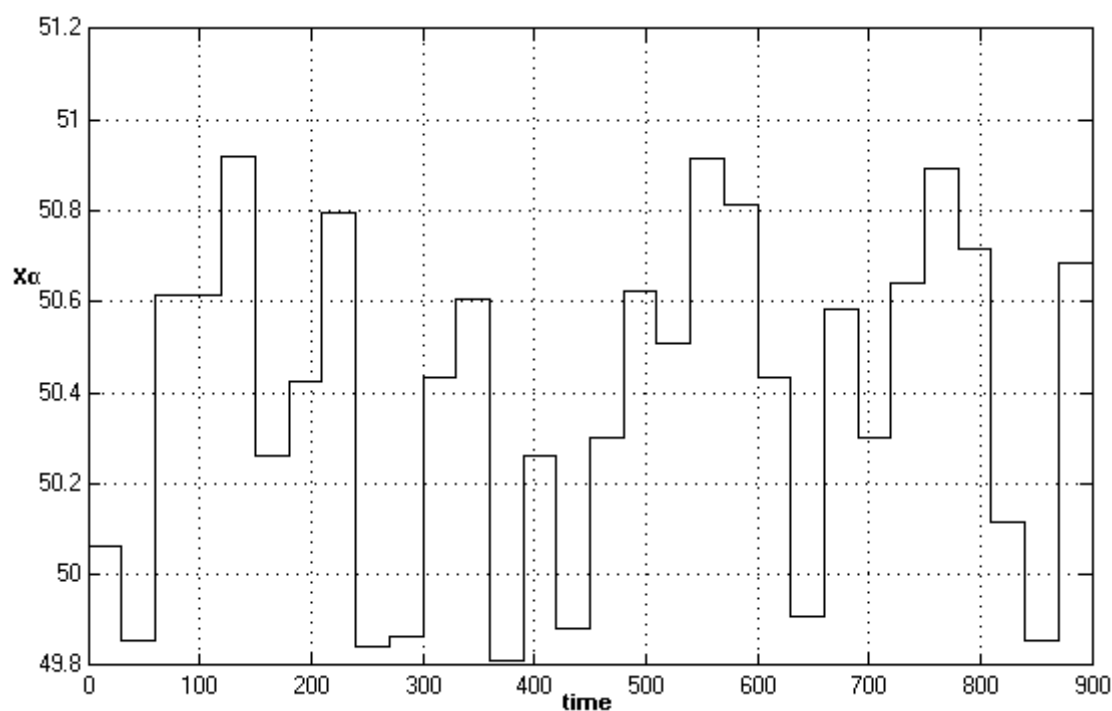


Διάγραμμα 6 Διακύμανση Τελικής Υγρασίας Πυρήνα



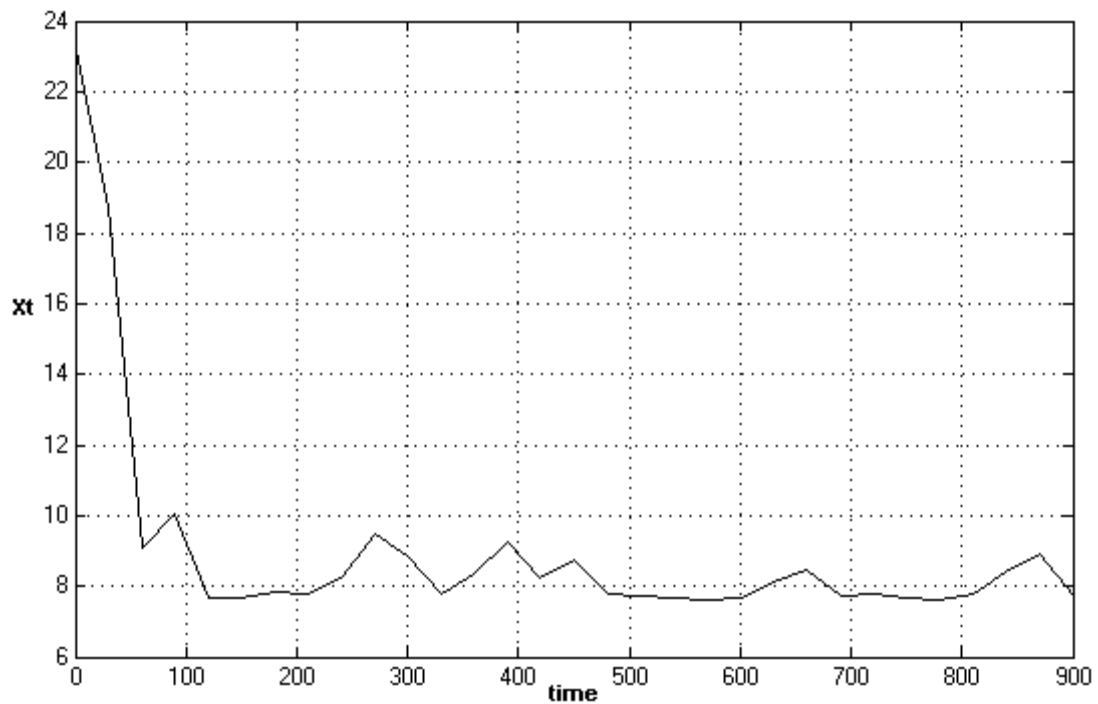
Διάγραμμα 7 Διακύμανση Σφάλματος - Τελικής Υγρασίας - Αρχικής Υγρασίας

Αλλάζοντας το άνω και κάτω όριο στη γεννήτρια αριθμών που παράγει τις τιμές της *αρχικής υγρασίας*, θα αλλάζουν και οι αντιδράσεις του ελεγκτή. Σε αυτή την προσομοίωση η *αρχική υγρασία του πυρήνα* κυμαίνεται από 49,8% έως 51%, ενώ σαν αρχικές τιμές της *θερμοκρασίας απαερίων ξήρανσης* και της *ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας* τοποθετούνται οι αρχικές συνθήκες της πρώτης προσομοίωσης έτσι ώστε να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις. Έτσι η *αρχική θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης* είναι 460 °K και η *αρχική ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα* 5 ton/h. Η διακύμανση της *αρχικής υγρασίας του πυρήνα* παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.



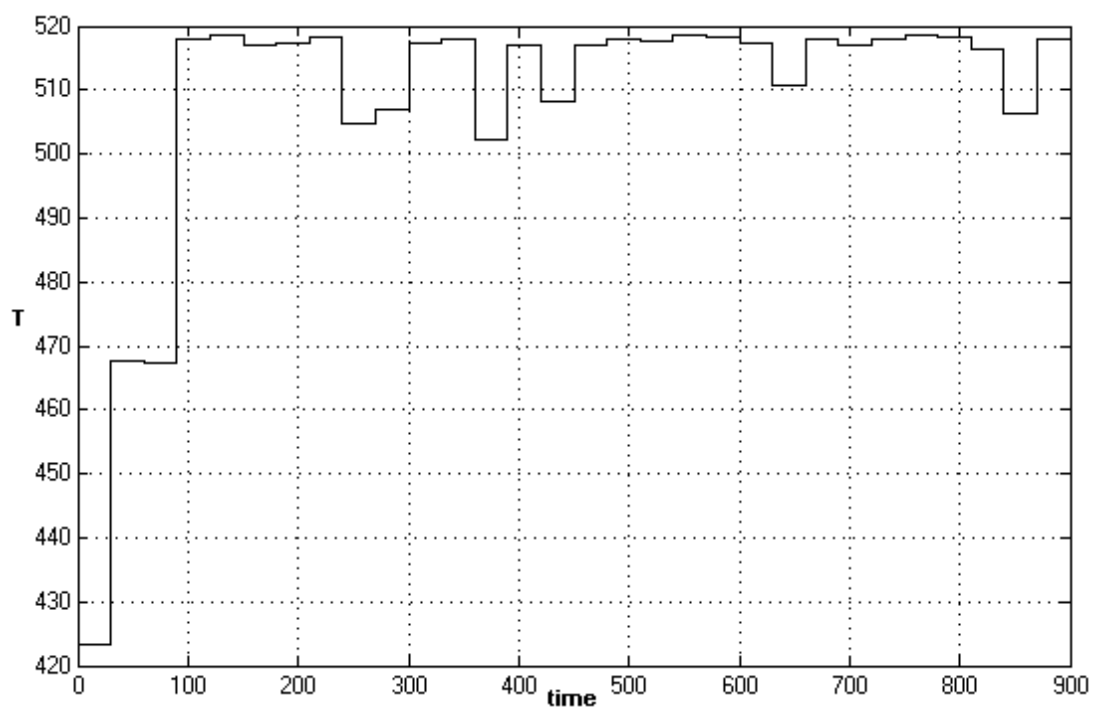
**Διάγραμμα 8 Διακύμανση Αρχικής Υγρασίας Πυρήνα**

Η *τελική υγρασία του πυρήνα* ξεκινάει από 23%, που αντιστοιχεί στις αρχικές συνθήκες. Αυτό το ποσοστό είναι κατά 3% μεγαλύτερο από την υγρασία της πρώτης προσομοίωσης με τις ίδιες αρχικές συνθήκες, γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της αρχικής υγρασίας από 47,9% σε 50,1%. Η *τελική υγρασία* ακολουθεί μια πτωτική διαδρομή έως ότου καταλήξει σε μια περιοχή κοντά στο 8%. Οι διακυμάνσεις της είναι μεγαλύτερες εξαιτίας της μεταβολής της αρχικής υγρασίας του πυρήνα από την περιοχή low στην medium. Στο Διάγραμμα 9 παρουσιάζεται η διακύμανση της *τελικής υγρασίας* κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

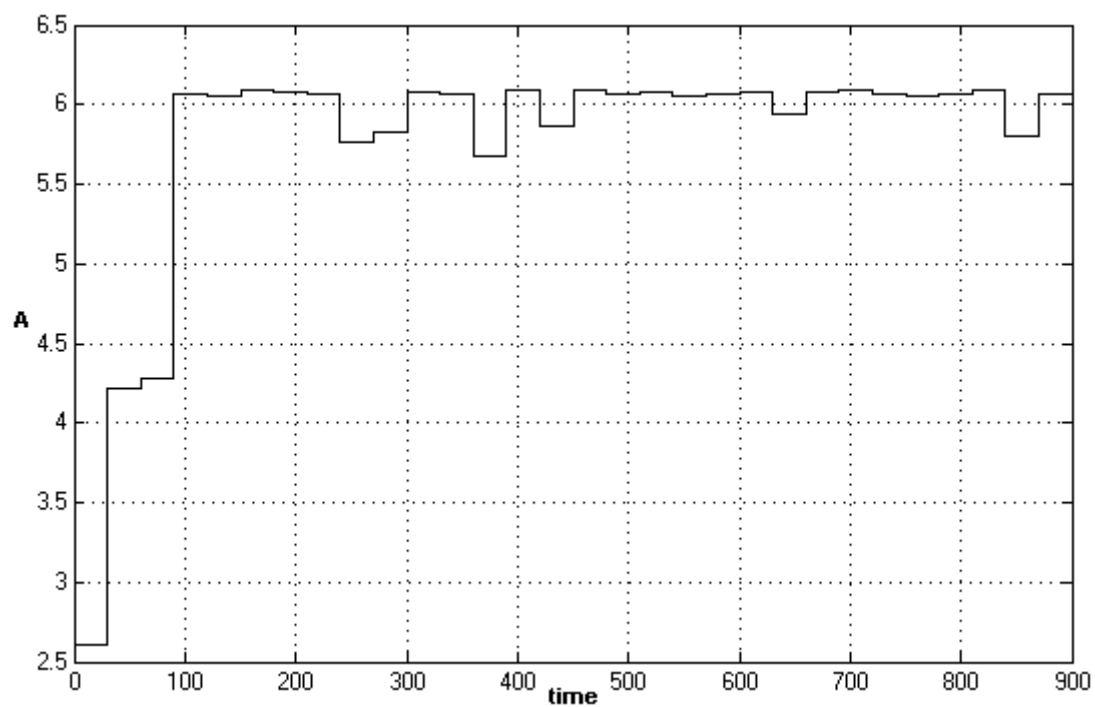


Διάγραμμα 9 Διακύμανση της Τελικής Υγρασίας του Πυρήνα

Οι μεταβολές στη θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης και στην ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα, όπως αυτές προκύπτουν από τον ελεγκτή, είναι παρόμοιες πράγμα που φανερώνει για ακόμη μία φορά την διαφορετική βαρύτητα που έχουν οι μεταβολές των δύο εξόδων του ελεγκτή στο σύστημα. Η θερμοκρασία ξεκινάει από τους 423 °K και καταλήγει σε μια περιοχή των 506 °K και 518 °K. Η εισερχόμενη ποσότητα κινείται από τους 2,6 ton/h και φτάνει στους 5,8 με 6.05 ton/h. Οι μεταβάσεις των δύο αυτών μεταβλητών φαίνονται στα Διαγράμματα 10 και 11.

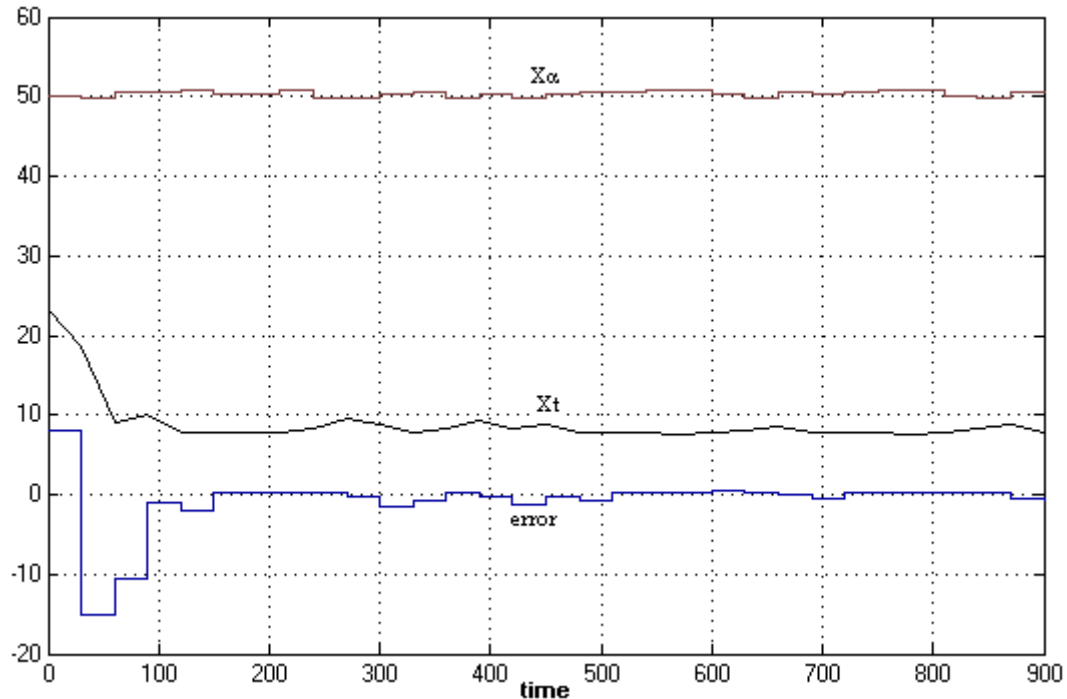


Διάγραμμα 10 Διακύμανση Θερμοκρασίας Απαερίων Ξήρανσης



Διάγραμμα 11 Διακύμανση της ανά ώρα Εισερχόμενης Ποσότητας Πορήνια

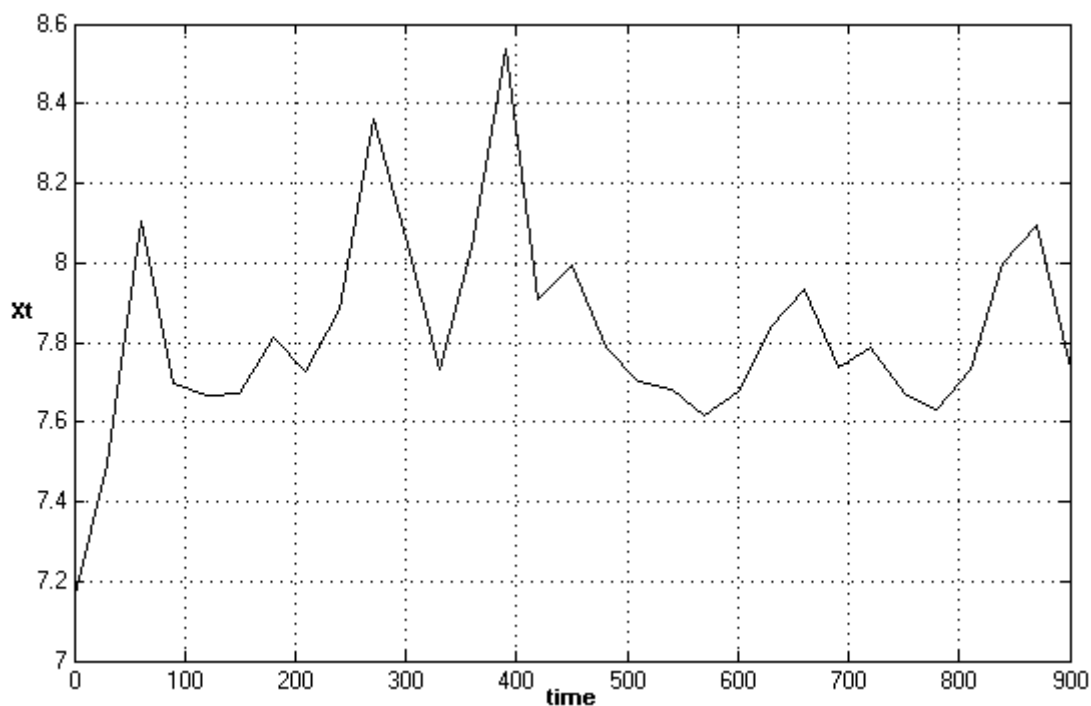
Στο Διάγραμμα 12 που ακολουθεί παρουσιάζονται μαζί η τελική υγρασία του πυρήνα ( $x_t$ ), η αρχική υγρασία του ( $x_a$ ) και το σφάλμα της υγρασίας που εισέρχεται στον ελεγκτή ( $error$ ).



Διάγραμμα 12 Διακύμανση Σφάλματος - Τελικής Υγρασίας - Αρχικής Υγρασίας Πυρήνα

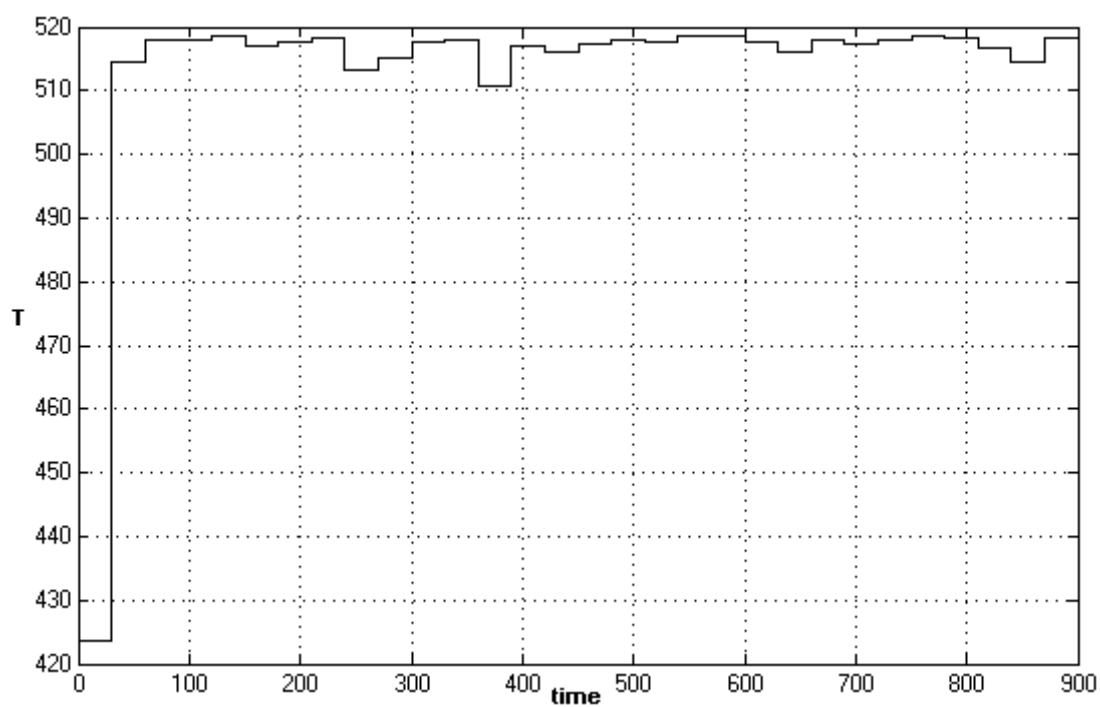
Διατηρώντας την αρχική υγρασία του πυρήνα και μεταβάλλοντας τις αρχικές συνθήκες βάζοντας για θερμοκρασία απαερίων ξήρανσης τους 550 °K και ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα τους 7,5 ton/h, η τελική υγρασία ξεκινάει από το 7,1% και ανέρχεται έχοντας μια διακύμανση από το 7,6 έως το 8,1%. Το ποσοστό εκκίνησης της τελικής υγρασίας είναι κατά 4% μεγαλύτερο από εκείνο της προσομοίωσης με μικρότερη αρχική υγρασία και με τις ίδιες αρχικές συνθήκες, γεγονός που οφείλεται στην αυξημένη αρχική υγρασία του πυρήνα. Η διακύμανση της τελικής υγρασίας φαίνεται στο Διάγραμμα 13.



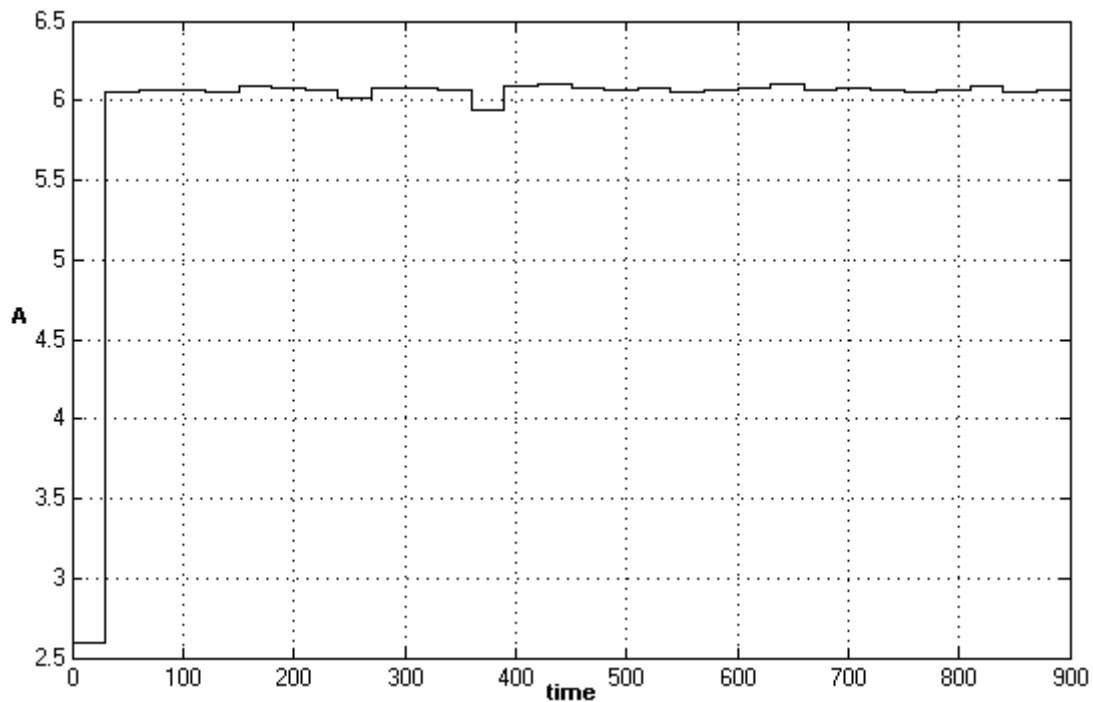


**Διάγραμμα 13 Διακύμανση Τελικής Υγρασίας Πυρήνα**

Η θερμοκρασία των αερίων ξήρανσης ανέρχεται από τους 423 °K έως τους 518 °K, ενώ η ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα ανέρχεται από τους 2,6 ton/h έως τους 6,1 ton/h. Οι μεταβολές των τιμών τους όπως αυτές εξέρχονται του ελεγκτή παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 14 και 15.

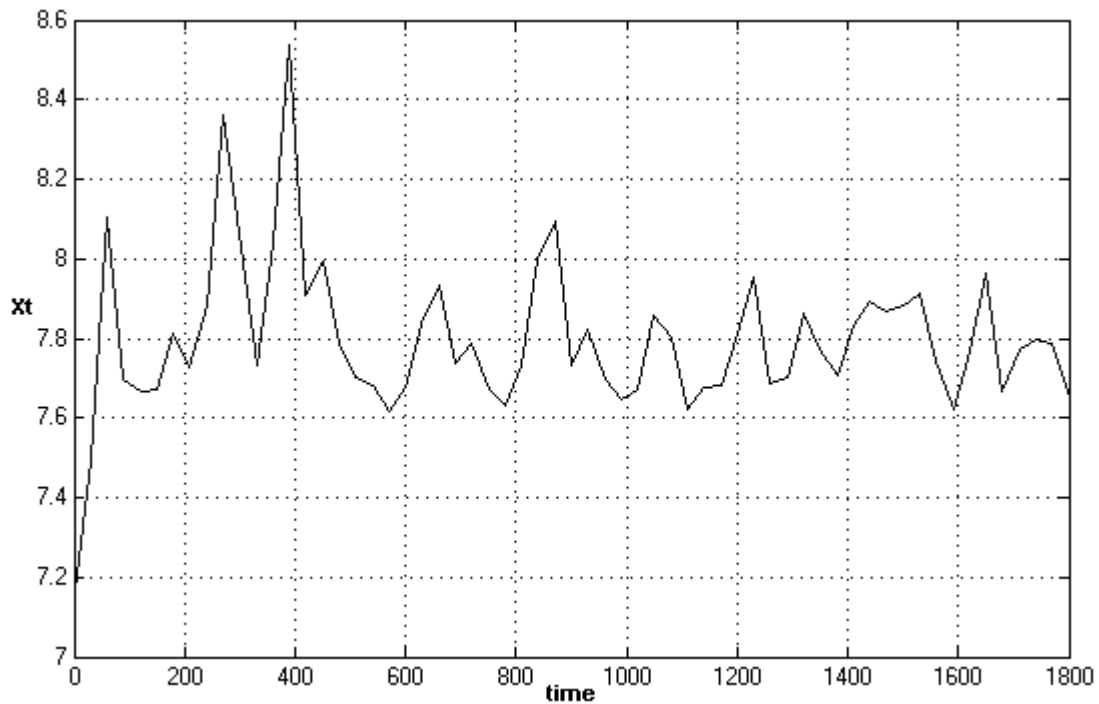


**Διάγραμμα 14 Διακύμανση Θερμοκρασίας Αερίων Ξήρανσης**



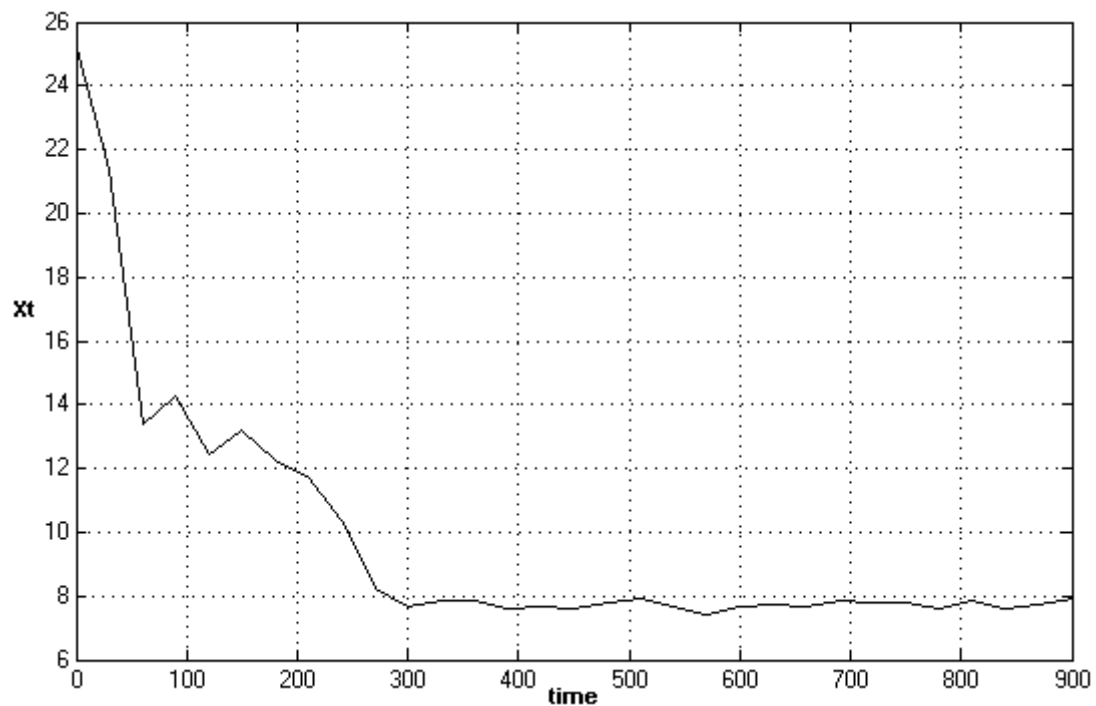
**Διάγραμμα 15 Διακύμανση της ανά ώρα Εισερχόμενης Ποσότητας Πυρήνα**

Επειδή στο διάγραμμα της τελικής υγρασίας του πυρήνα φαίνεται μια, έστω και μικρή, διακύμανση της μπορεί να δοκιμαστεί η αύξηση του χρόνου προσομοίωσης έτσι ώστε να δοθεί στον ελεγκτή περισσότερος χρόνος για να τη διορθώσει. Διπλασιάζοντας τον χρόνο προσομοίωσης, από τα 900 δευτερόλεπτα στα 1800, παρατηρείται μείωση του εύρους διακύμανσης της τελικής υγρασίας. Τώρα κυμαίνεται μεταξύ του 7,7% και 7,9% που θεωρείται μια καλή προσέγγιση του στόχου. Η νέα διακύμανση της τελικής υγρασίας παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 16.



Διάγραμμα 16 Διακύμανση Τελικής Υγρασίας Πυρήνα

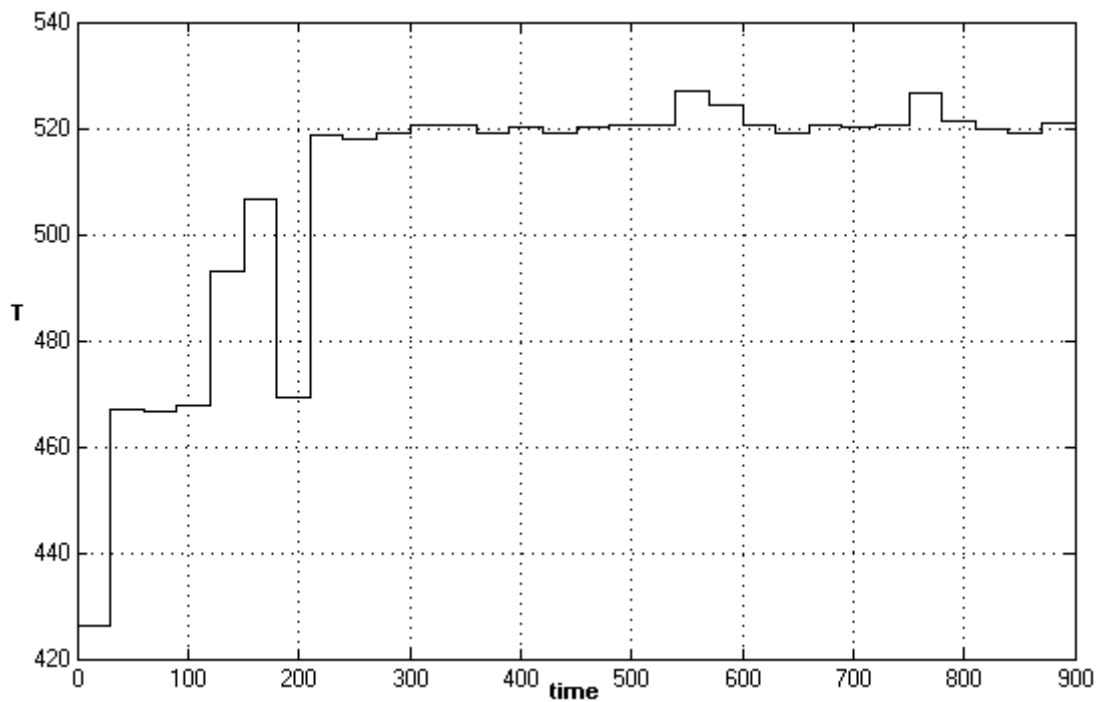
Στην επόμενη προσομοίωση, που ακολουθεί, η αρχική υγρασία του πυρήνα αυξάνεται και κυμαίνεται από 51% έως 52.5%. Η αρχική θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης είναι 460 °K ενώ η αρχική ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα είναι 5 ton/h. Με αυτές τις αρχικές συνθήκες πραγματοποιείται η προσομοίωση και η διακύμανση της τελικής υγρασίας του πυρήνα παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 17.



Διάγραμμα 17 Διακύμανση Τελικής Υγρασίας Πυρήνα

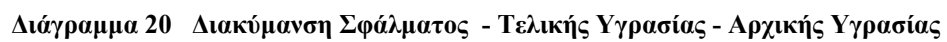
Παρατηρείται ότι λόγω της αύξησης της *αρχικής υγρασίας*, η *υγρασία του τελικού πυρήνα* ξεκινά από το ποσοστό 25% που αντιστοιχεί στις αρχικές συνθήκες. Υπάρχει αύξηση της τάξης του 5% από την πρώτη προσομοίωση και του 2% από τη δεύτερη αν και οι αρχικές συνθήκες παρέμειναν ίδιες. Με σταδιακή μείωση της υγρασίας του τελικού πυρήνα, καταλήγει στο ζητούμενο ποσοστό που είναι το 8%.

Η θερμοκρασία των *απαερίων ξήρανσης* ξεκινά από τους 427 °K και με κάποιες διακυμάνσεις καταλήγει στους 520 °K, ενώ η *ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα* ανέρχεται από τους 2,5 ton/h στους 6 ton/h. Η διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της ποσότητας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 18 και 19.

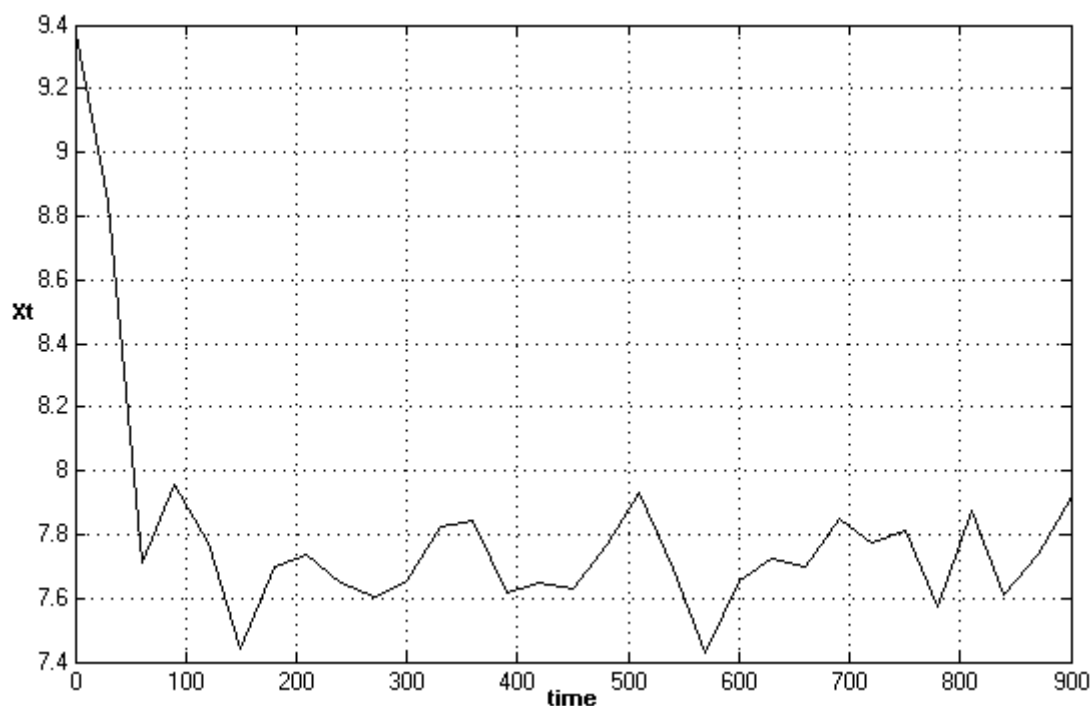


**Διάγραμμα 18 Διακύμανση Θερμοκρασίας Απαερίων Ξήρανσης**

Στο Διάγραμμα 20 παρουσιάζονται μαζί η τελική υγρασία του πυρήνα ( $x_t$ ), η αρχική υγρασία του ( $x_a$ ) και το σφάλμα της υγρασίας που εισέρχεται στον ελεγκτή (*error*).



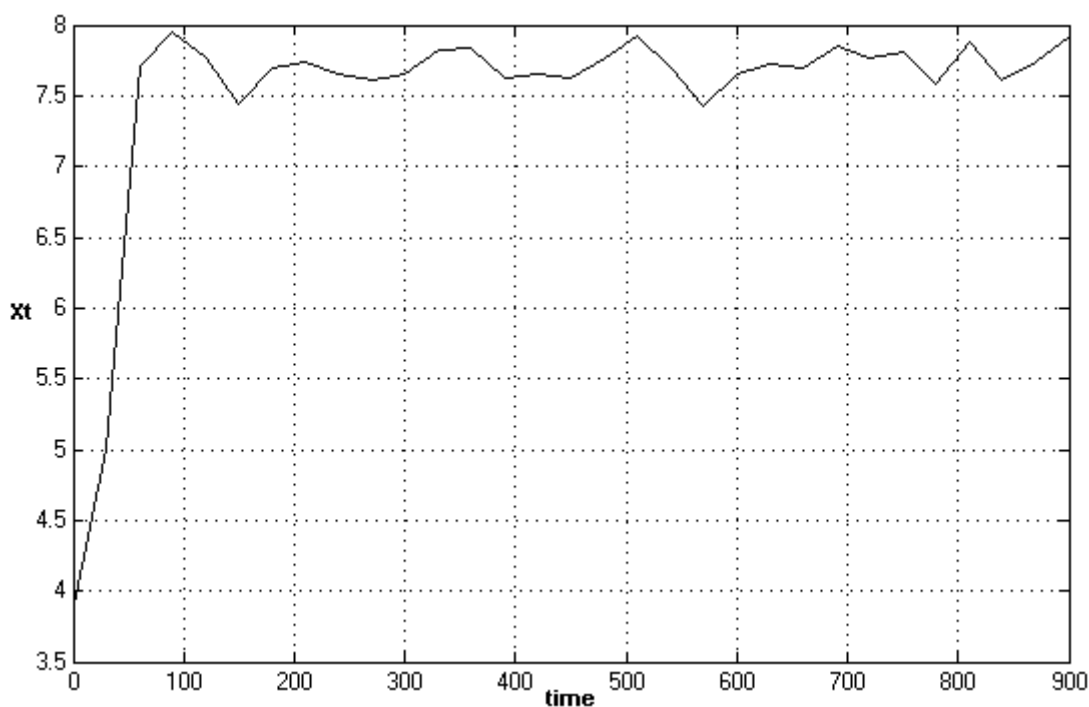
Διατηρώντας το εύρος διακύμανσης της *αρχικής υγρασίας του πυρήνα* το ίδιο με προηγουμένως, μεταβάλλονται οι αρχικές συνθήκες. Έτσι η *αρχική θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης* παίρνει την τιμή 550 °K και η *ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα* την τιμή 7,5 ton/h. Με αυτές τις αρχικές συνθήκες η διακύμανση της τελικής υγρασίας εμφανίζεται στο Διάγραμμα 21:



Διάγραμμα 21 Διακύμανση Τελικής Υγρασίας Πυρήνα

Ξεκινά από ένα ποσοστό υγρασίας της τάξης του 9,4%, που είναι κατά 6,4% μεγαλύτερο από αυτό της πρώτης προσομοίωσης και κατά 2% από αυτό της δεύτερης γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της *αρχικής υγρασίας*. Τελικά καταλήγει σε μια περιοχή μεταξύ του 7,6% και 7,9%.

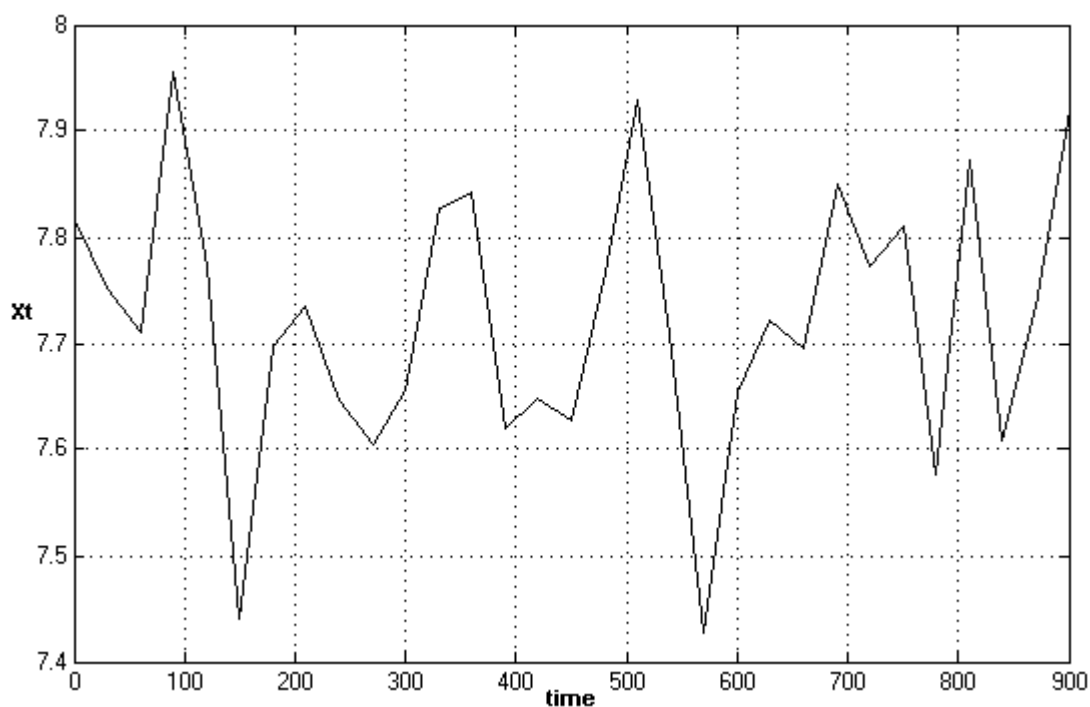
Για να φανεί η καταλυτική επίδραση της μεταβολής της *θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης* στο σύστημα, αυξάνεται κατά 10 °K. Έτσι οι αρχικές συνθήκες γίνονται 560 °K για τη *θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης* ενώ η *ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα* μένει σταθερή στους 7,5 ton/h. Η νέα διακύμανση της *τελικής υγρασίας του πυρήνα* φαίνεται στο Διάγραμμα 22.



Διάγραμμα 22 Διακύμανση Τελικής Υγρασίας Πυρήνα

Με μια αύξηση της θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης κατά 1,8% ή κατά 10 βαθμούς Kelvin και διατηρώντας την ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα σταθερή, η τελική υγρασία που αντιστοιχεί στις αρχικές συνθήκες μειώνεται από το 9,4%, της προηγούμενης προσομοίωσης, στο 4% υπάρχει δηλαδή μείωση κατά 5,4%. Τελικά η τελική υγρασία του πυρήνα καταλήγει στην ίδια περιοχή, ανάμεσα στο 7,6% και 7,9%.

Αν η θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης παραμείνει σταθερή, 550 °K, και η ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα ελαττωθεί κατά 10 % ή κατά 0,135 ton/h, η διακύμανση της τελικής υγρασίας του πυρήνα έχει την μορφή του Διαγράμματος 23:

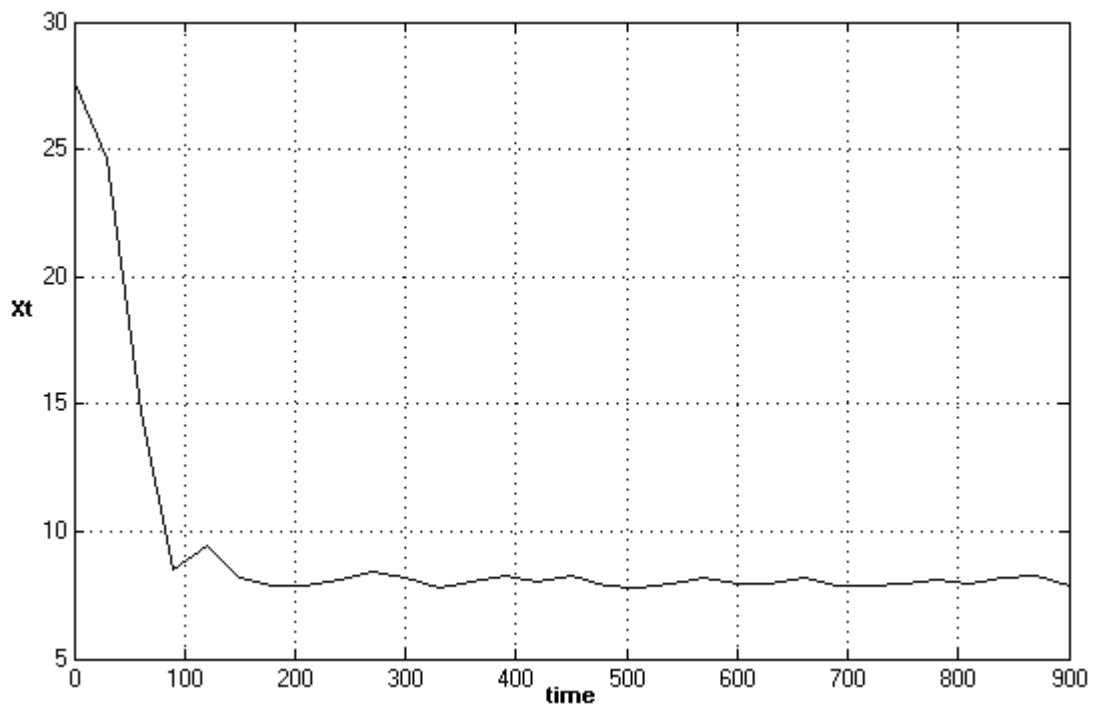


Διάγραμμα 23 Διακύμανση Τελικής Υγρασίας Πυρήνα

Η τελική υγρασία του πυρήνα μειώνεται κατά 1,6%, φτάνει στο 7,8%, και στη συνέχεια έχει μία διακύμανση μεταξύ 7,6% και 7,9% που θεωρείται μία αποδεκτή περιοχή τελικής υγρασίας του πυρήνα. Από αυτό αποδεικνύεται ότι τελική υγρασία που προκύπτει από μια ποσοστιαία αύξηση της θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης δεν ισούται με την υγρασία που προκύπτει από μια αντίστοιχη ποσοστιαία μείωση της ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας πυρήνα. Άρα η βαρύτητα στο σύστημα της μεταβολής της θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή της μεταβολής της ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας πυρήνα.

Μεταβάλλοντας τη γεννήτρια αριθμών, που παράγει τυχαίες τιμές αρχικής υγρασίας του πυρήνα, η αρχική υγρασία αυξάνεται και κυμαίνεται πλέον από 52,5% έως 54,5%. Οι αρχικές συνθήκες για αυτή την προσομοίωση είναι 460 °K, για τη θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης, και 5 ton/h για την ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, όσο αφορά την τελική υγρασία του πυρήνα, φαίνονται στο Διάγραμμα 24.

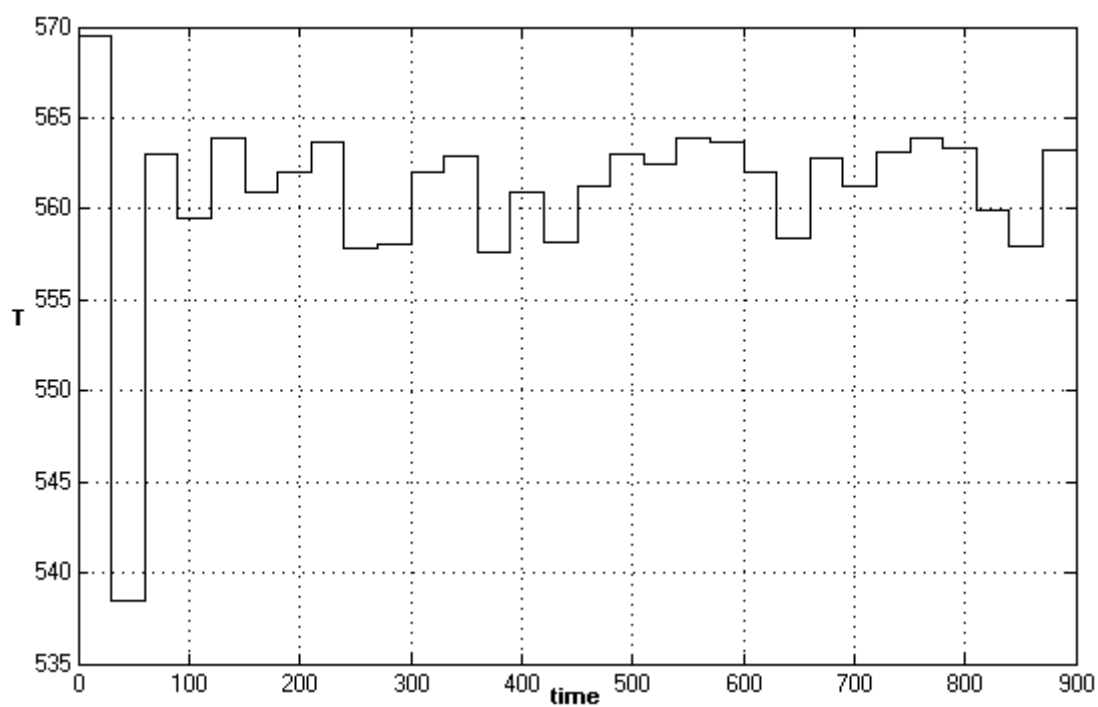




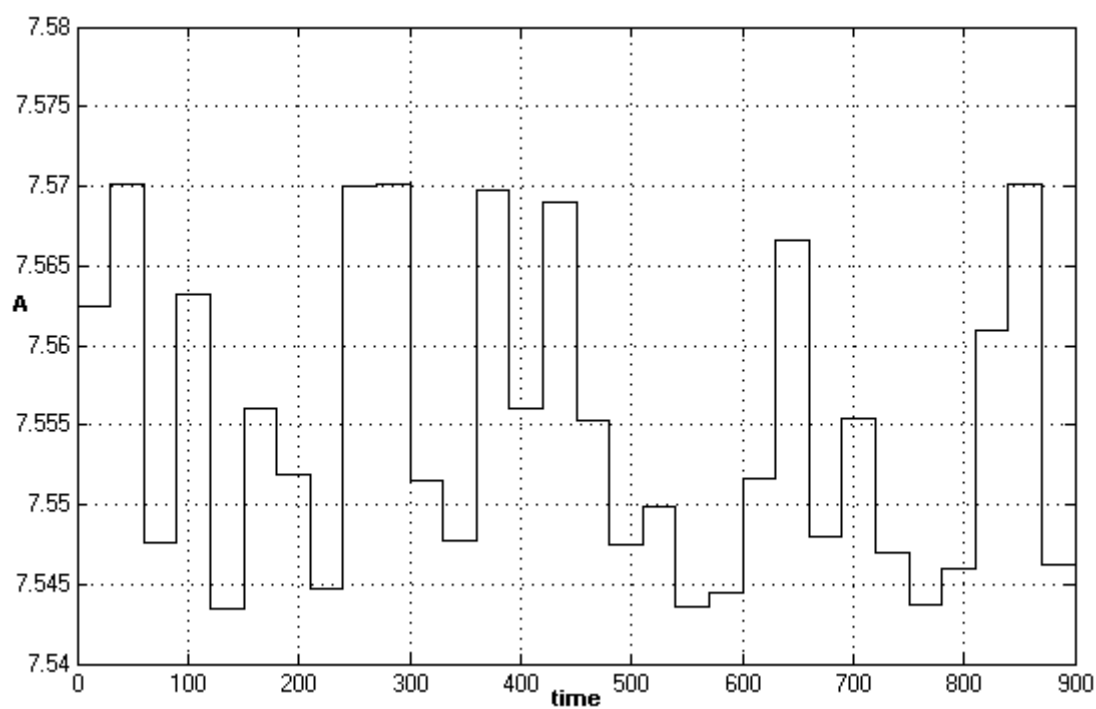
**Διάγραμμα 24 Διακύμανση Τελικής Υγρασίας Πυρήνα**

Η τελική υγρασία του πυρήνα ξεκινά από ένα ποσοστό 27,5%, ποσοστό που αντιστοιχεί στις αρχικές συνθήκες, και καταλήγει στο 8%. Το ποσοστό που αντιστοιχεί στις αρχικές συνθήκες, για αυτή την περίπτωση, είναι μεγαλύτερο κατά 7,5%, 4,5% και 2,5% από την πρώτη, δεύτερη και τρίτη προσομοίωση αντίστοιχα με τις ίδιες αρχικές συνθήκες εξαιτίας της αύξησης της αρχικής υγρασίας του πυρήνα.

Τα Διαγράμματα 25 και 26 που παρουσιάζουν τις μεταβολές της θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης και της ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας πυρήνα, όπως αυτές εξέρχονται του ασαφούς ελεγκτή.

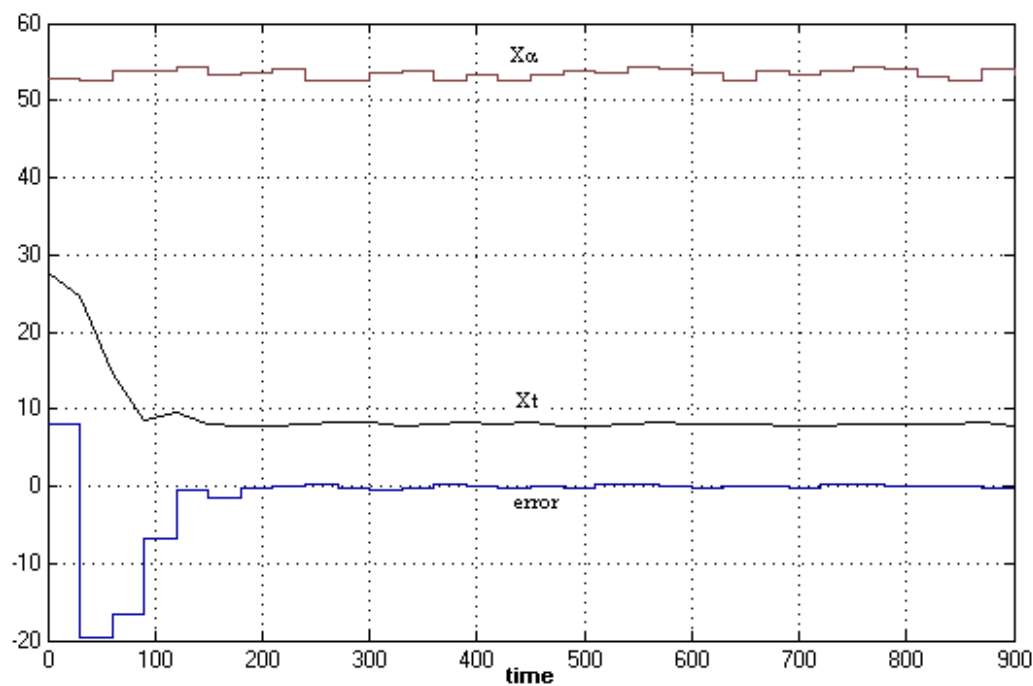


Διάγραμμα 25 Διακύμανση Θερμοκρασίας Απαερίων Ξήρανσης



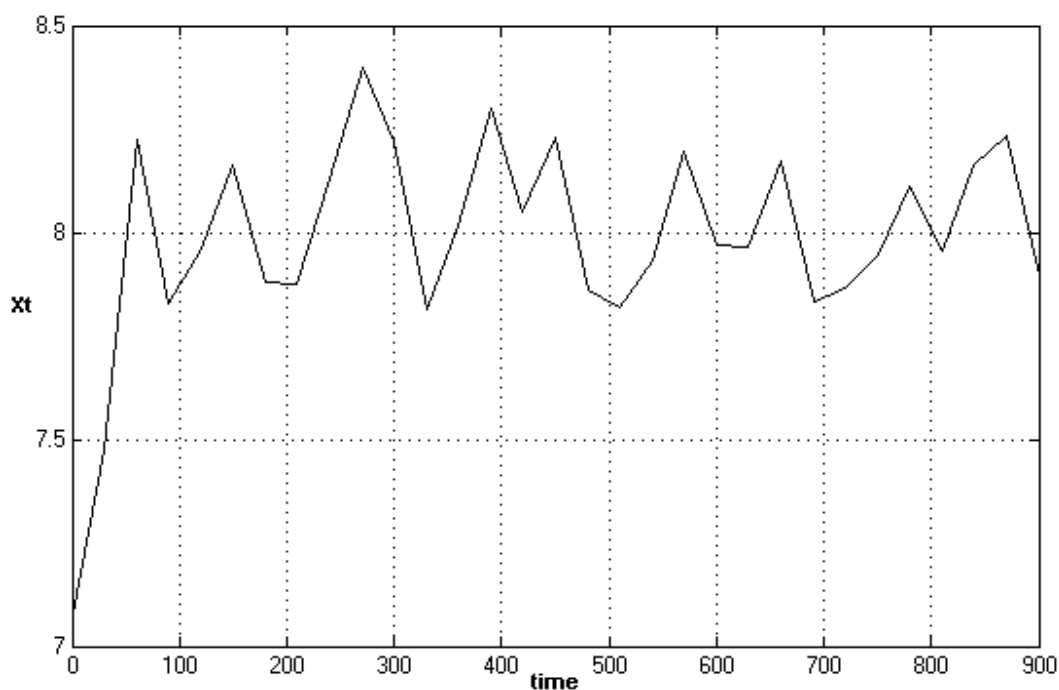
Διάγραμμα 26 Διακύμανση της ανά ώρα Εισερχόμενης Ποσότητας Πυρήνα

Στο Διάγραμμα 27 παρουσιάζονται μαζί η τελική υγρασία του πυρήνα ( $x_t$ ), η αρχική υγρασία του ( $x_a$ ) και το σφάλμα της υγρασίας που εισέρχεται στον ελεγκτή (*error*).



Διάγραμμα 27 Διακύμανση Σφάλματος - Τελικής Υγρασίας - Αρχικής Υγρασίας

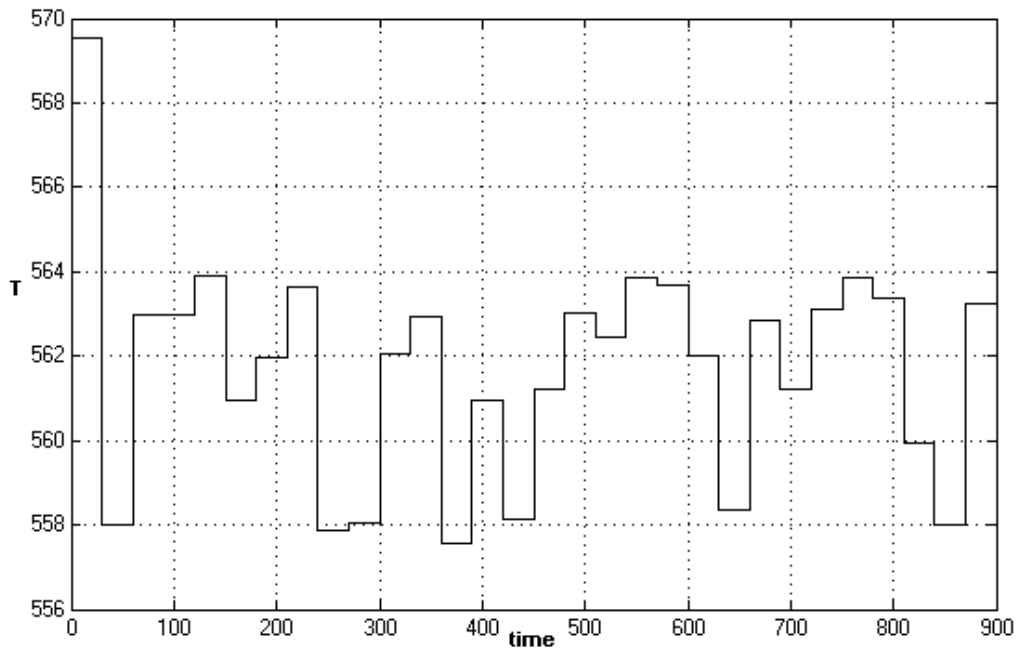
Για την ίδια υγρασία μεταβάλλονται οι αρχικές συνθήκες και σαν θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης λαμβάνεται η τιμή  $560^\circ\text{K}$  ενώ σαν ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα η τιμή  $7,5 \text{ ton/h}$ . Εκτελώντας την προσομοίωση, η διακύμανση της τελικής υγρασίας του πυρήνα που προκύπτει φαίνεται στο Διάγραμμα 28.



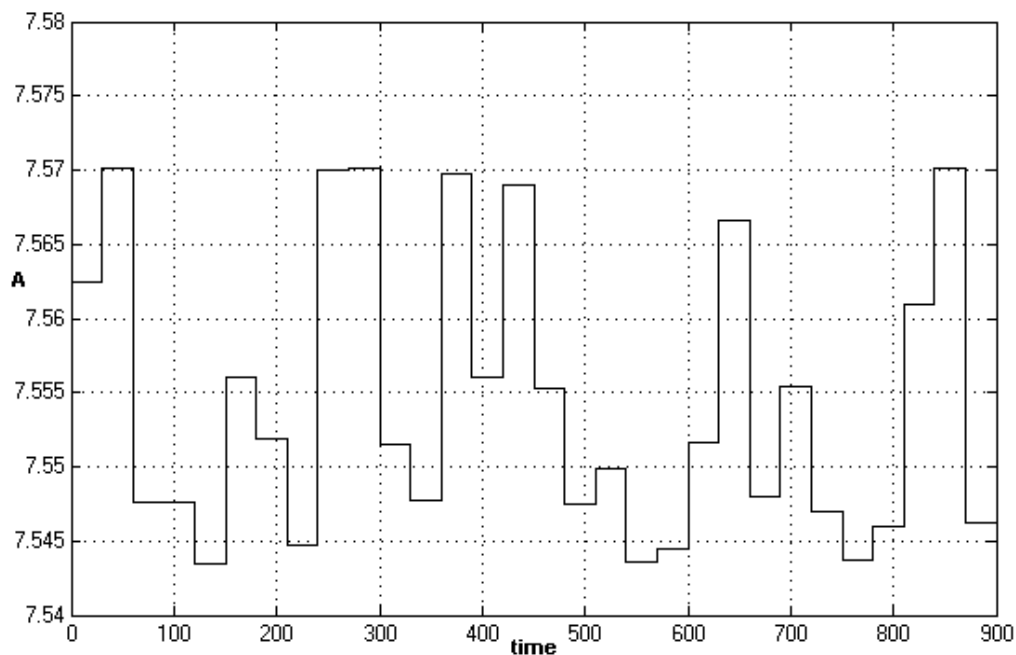
Διάγραμμα 28 Διακύμανση Τελικής Υγρασίας Πυρήνα

Η τελική υγρασία του πυρήνα που αντιστοιχεί στις αρχικές συνθήκες είναι 7,1% και με την επίδραση του ελεγκτή ανέρχεται σε μια περιοχή τιμών μεταξύ 7,8% και 8,2%. Η διακύμανση που υπάρχει στην περιοχή αυτή οφείλεται στις μεταβολές του ποσοστού αρχικής υγρασίας του πυρήνα από τη γεννήτρια αριθμών.

Η διακύμανση της θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης και της ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας πυρήνα στο χρόνο προσομοίωσης παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 29 και 30.



**Διάγραμμα 29 Διακύμανση Θερμοκρασίας Απαερίων Ξήρανσης**



**Διάγραμμα 30 Διακύμανση της ανά ώρα Εισερχόμενης Ποσότητας Πυρήνα**

Ίσως η διακύμανση της θερμοκρασίας των αερίων ξήρανσης και της ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας να φαίνεται ίδια με τις αντίστοιχες της προηγούμενης προσομοίωσης όμως ουσιαστικά δεν είναι. Αποδείχθηκε ότι έστω και μια μικρή μεταβολή στη θερμοκρασία μπορεί να επιδράσει καταλυτικά στο σύστημα.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διαδικασία ξήρανσης του πυρήνα, όπως λειτουργεί σήμερα, στηρίζεται αποκλειστικά στον ανθρώπινο παράγοντα με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ορισμένα προβλήματα. Για να αποφευχθούν τα προβλήματα αυτά έγινε μια προσπάθεια αυτοματοποίησης της διαδικασίας ξήρανσης του πυρήνα.

Με την αρωγή της θεωρίας μετάδοσης θερμότητας μοντελοποιήθηκε η μεταβολή της υγρασίας του πυρήνα σε συνάρτηση με την *αρχική του υγρασία*, την *θερμοκρασία των απερίων ξήρανσης* και την *ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα πυρήνα* στον ξηραντήρα. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ελεγκτής βασιζόμενος στη θεωρία της ασαφούς λογικής που ελέγχει τη διαδικασία. Το όλο σύστημα προσομοιώθηκε στο περιβάλλον του SIMULINK, της MATLAB, όπου με τις κατάλληλες αναδράσεις από το φυσικό σύστημα στον ασαφή ελεγκτή ελέγχεται η διαδικασία ξήρανσης του πυρήνα. Σε πραγματικές συνθήκες το σύστημα λαμβάνει τα αναγκαία δεδομένα από διαφόρους αισθητήρες και όργανα που θα είναι τοποθετημένα σε νευραλγικά σημεία του ξηραντηρίου.

Όπως φάνηκε από τις προσομοιώσεις του συστήματος τα αποτελέσματα είναι αρκετά αισιόδοξα. Ο στόχος, που είναι το ποσοστό υγρασίας να κυμαίνεται κοντά στο 8%, στις περισσότερες περιπτώσεις πραγματοποιήθηκε. Αν και υπήρχε μια μικρή διακύμανση, που οφειλόταν στις μεταβολές της αρχικής υγρασίας που εισερχόταν στον ασαφή ελεγκτή και στο φυσικό σύστημα, η περιοχή που κυμαινόταν η τελική υγρασία του πυρήνα θεωρείται αποδεκτή.

Ένα άλλο συμπέρασμα που προέκυψε από τις προσομοιώσεις του συστήματος είναι η διαφορετική βαρύτητα που έχουν οι δύο μεταβλητές εξόδου του ασαφούς ελεγκτή. Η *θερμοκρασία των απερίων ξήρανσης* έχει μεγαλύτερη βαρύτητα για αυτό και μια μικρή μεταβολή της δύναται να προκαλέσει αλλαγές στο σύστημα που αντιστοιχούν σε μεγάλες μεταβολές της *ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας πυρήνα*. Για αυτό το λόγο οι μεταβολές στη θερμοκρασία θα πρέπει να προσεχθούν αρκετά κατά τη λειτουργία του συστήματος.

Με τη χρήση του αυτοματοποιημένου συστήματος ελέγχου της διαδικασίας θα εξαλειφθούν τα περισσότερα από τα προβλήματα, και τα ποιοτικά αλλά και ποσοτικά αποτελέσματα θα είναι εμφανή. Θα ήταν χρήσιμο λοιπόν να εφαρμοστεί έτσι ώστε εκτός από τα πλεονεκτήματα που θα προσφέρει, να του δοθεί και η ευκαιρία να

βελτιωθεί μέσα από τις πραγματικές συνθήκες της διαδικασίας ξήρανσης του πυρήνα. Αυτό γιατί όσο αξιόπιστα και αν είναι τα θεωρητικά δεδομένα, εάν το σύστημα δεν δοκιμαστεί σε ρεαλιστικές συνθήκες ώστε να γίνουν οι κατάλληλοι πειραματισμοί, δύσκολα θα αποδώσει έτσι όπως μπορεί.

Στο αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου της διαδικασίας ξήρανσης του πυρήνα χρειάζεται, στο μέλλον, να προστεθούν και άλλοι δύο ασαφείς ελεγκτές οι οποίοι θα ελέγχουν την *θερμοκρασία των απαερίων ξήρανσης* και την *ανά ώρα εισερχόμενη ποσότητα*. Ο ελεγκτής της *θερμοκρασίας των απαερίων ξήρανσης* θα ελέγχει τον τρόπο που μεταβάλλεται η θερμοκρασία ενώ ο ελεγκτής της *ανά ώρα εισερχόμενης ποσότητας πυρήνα* θα ελέγχει την μεταβολή της εισερχόμενης ποσότητας. Και οι δύο θα βρίσκονται υπό τον έλεγχο του κεντρικού ελεγκτή που έχει δημιουργηθεί.

Η εξίσωση επίσης, που περιγράφει το φυσικό σύστημα, χρειάζεται να ερευνηθεί περαιτέρω έτσι ώστε να προσομοιώνει αποτελεσματικότερα τον τρόπο που μεταβάλλεται η υγρασία του πυρήνα μέσα στον περιστρεφόμενο ξηραντήρα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα ο ασαφής ελεγκτής να ρυθμιστεί σύμφωνα με ρεαλιστικότερα δεδομένα και η αποτελεσματικότητα του να βελτιστοποιηθεί.

**Βιβλιογραφία:**

- [1] Leena Yliniemi, “Advanced control of a rotary dryer”, Department of Process Engineering, University of Oulu, Finland, pp. 13-17, 1999
- [2] VDI-Warheatlas 6, VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf, κεφάλαια Mg και Gh, 1991
- [3] Ροβέρτος Κίνγκ, “Υπολογιστική νοημοσύνη στον έλεγχο συστημάτων”, τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Εκδόσεις Π. Τραυλός-Ε. Κωσταράκη, pp. 55-103, 1998
- [4] Αναστάσιος Πουλιέζος, “Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου Ι”, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2002
- [5] Fuzzy Logic Toolbox For Use with MATLAB, User’s Guide, version 2, The MATH WORKS inc., pp 1-5, 1995