



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ  
ΕΛΕΓΧΟΥ

**Ανάπτυξη και εφαρμογή συστήματος βέλτιστου  
προβλεπτικού ελέγχου (MPC) βασισμένου σε προρρήσεις  
μοντέλου για μονάδα κυκλικής απενεργοποίησης καταλυτών  
(CPS).**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΙΣΜΗΝΗ Ν. ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ**

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Καραμπετάκης  
Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2011





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ  
ΕΛΕΓΧΟΥ

**Ανάπτυξη και εφαρμογή συστήματος βέλτιστου  
προβλεπτικού ελέγχου (MPC) βασισμένου σε προρρήσεις  
μοντέλου για μονάδα κυκλικής απενεργοποίησης καταλυτών  
(CPS).**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΙΣΜΗΝΗ Ν. ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ**

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Καραμπετάκης  
Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....  
Ν. Καραμπετάκης  
Επ. Καθηγητής Α.Π.Θ

.....  
Α. Βαρδουλάκης  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

.....  
Σ. Βουτετάκης  
Ερευνητής Ε.Κ.Ε.Τ.Α.

Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2011



.....  
Ισμήνη Ν. Αναστασίου

Πτυχιούχος Μηχ. Αυτοματισμού Α.Τ.Ε.Ι.Θ.

Copyright © Ισμήνη Ν. Αναστασίου, 2011.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βιομηχανία παραγωγής καταλυτών είναι ιδιαίτερος απαιτητική όσον αφορά στην ποιότητα των προϊόντων της. Για το λόγο αυτό η σωστή αξιολόγηση τους θεωρείται αναγκαία. Η μονάδα Κυκλικής Απενεργοποίησης Καταλυτών με προπυλένιο (Cyclic Propylene Steaming Pilot Plant/CPS), που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου Τεχνικής Χημικών Διεργασιών (ΙΤΧΗΔ), είναι ένας αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης που χρησιμοποιείται για απενεργοποίηση καταλυτών. Για να μπορέσει κάποιος να διασφαλίσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της διεργασίας απενεργοποίησης, θα πρέπει να βασίζεται σε ένα αξιόπιστο μαθηματικό μοντέλο που θα προσομοιώνει με ακρίβεια τη συμπεριφορά του συστήματος. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μαθηματικού μοντέλου, η αξιολόγησή του και η εκτίμηση των παραμέτρων του επιτεύχθηκε με τη χρήση δυναμικών πειραματικών δεδομένων από τη μονάδα, ενόσω λειτουργούσε χωρίς την εποπτεία κάποιου συστήματος ελέγχου, και εξελιγμένων στατιστικών μεθόδων. Η βελτίωση του σχήματος ελέγχου επιτεύχθηκε με την ανάπτυξη μιας στρατηγικής Βέλτιστου Προβλεπτικού ελέγχου βασισμένου σε προρρήσεις του μοντέλου (Model-based Predictive Control/MPC), ώστε να έχουμε πιο ακριβή έλεγχο της θερμοκρασίας του αντιδραστήρα, των ενεργειακών απαιτήσεων της διεργασίας καθώς και της τελικής ποιότητας του προϊόντος. Η βέλτιστη ακολουθία των χειραγωγούμενων μεταβλητών, η οποία ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ της βέλτιστης και της προβλεπόμενης θερμοκρασίας του αντιδραστήρα, υπολογίζεται με τεχνικές δυναμικού προγραμματισμού. Το σχήμα Βέλτιστου Προβλεπτικού Ελέγχου που σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε οδηγεί σε ανώτερη απόδοση της διεργασίας, συγκρινόμενο με το ήδη υπάρχον σύστημα ελέγχου της μονάδας, αποτελούμενο από συμβατικούς PI ελεγκτές.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Απενεργοποίηση καταλυτών, Βέλτιστος Προβλεπτικός Έλεγχος

**ABSTRACT**

The industrial production of catalysts is very demanding as far as the quality of its products is concerned. Due to that reason their proper evaluation is considered to be a necessity. The Cyclic Propylene Steaming Pilot Plant (CPS) is a fluidized bed reactor, established at Chemical Process Engineering Research Institute (CPERI), which is used for catalyst deactivation. In order to ensure the credibility of the deactivation results one must have a reliable mathematical model that accurately simulates the systems behavior. The development of the mathematical model, its validation and its parameter's estimation has been achieved using open-loop dynamic experimental data and advanced statistical methods. Furthermore, the improvement of the overall control scheme has been achieved through a Model-based Predictive Control strategy, in order to have a more accurate control of the reactor's temperature, the energy requirements and the final product quality. The optimal sequence of the manipulated variables which minimize the difference between the desirable and the predicted reactor temperature trajectories, is calculated using dynamic programming techniques. The model-based predictive control strategy, that is designed and implemented for the online control of the pilot plant, leads to superior quality compared to the previously installed control system, consisted of conventional PI controllers.

**KEYWORDS**

Catalyst deactivation, CPS, Model-based Predictive Control, MPC



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος “ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ” κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011. Η υλοποίηση της εργασίας έγινε σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών (ΙΤΧΗΔ) του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ).

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Μαθηματικών, κ. Νικόλαο Καραμπετάκη για την πολύτιμη βοήθειά του καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις με τις οποίες με εφοδίασε καθόλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Αντώνιο Βαρδουλάκη για το χρόνο που αφιέρωσε για την ανάγνωση της εργασίας αυτής, τον ερευνητή και διευθυντή του Εργαστηρίου Αναπτυξης Ολοκληρωμένων Συστημάτων Διεργασιών (ΕΑΝΟΣΥΣ) του ΙΤΧΗΔ/ΕΚΕΤΑ, κ. Σπύρο Βουτετάκη, την καθηγήτρια του τμήματος Αυτοματισμού του ΤΕΙ Θεσσαλονίκης, κα. Σημίρα Παπαδοπούλου και τον Επίκουρο καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΠΘ, κ. Πάνο Σεφερλή για την πολύτιμη βοήθειά τους και τις γνώσεις που μου προσέφεραν, τόσο κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας όσο και κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Μυρτώ Α., τον Δημήτρη Ι., τον Θοδωρή Δ., τη Μαργαρίτα Κ. και την Χριστίνα Γ. για τη συμπαράστασή τους, τη βοήθειά τους και την υποστήριξή τους καθόλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT.....	8
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup>	
ΜΟΝΑΔΑ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΤΑΛΥΤΩΝ	
1.1 Εισαγωγή .....	15
1.2 Περιγραφή της πιλοτικής μονάδας CPS.....	16
1.3 Πρωτόκολο απενεργοποίησης καταλυτών.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup>	
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ	
2.1 Προσομοίωση της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς της πιλοτικής μονάδας.....	21
2.2 Ανάπτυξη των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας.....	21
2.2.1 Αγωγή.....	22
2.2.2 Συναγωγή.....	23
2.3 Ανάπτυξη της συνάρτησης λειτουργικών συνθηκών.....	24
2.4 Ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου.....	24
2.5 Ανάπτυξη εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας και οριακών συνθηκών.....	26
2.5.1 Εσωτερικός αέρας.....	26
2.5.2 Καταλύτης.....	27
2.5.3 Κάτω αέρας.....	28
2.5.4 Μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα.....	29
2.5.5 Ενδιάμεσος αέρας.....	30
2.5.6 Θερμαντική επιφάνεια (Αντιστάσεις) .....	31
2.5.7 Μονωτής.....	32
2.5.8 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου.....	33
2.6 Ανάπτυξη οριακών συνθηκών, στην αξονική διεύθυνση.....	34
2.6.1 Πρώτη ζώνη.....	34
2.6.1.1 Εσωτερικός αέρας.....	34
2.6.1.2 Μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα.....	35
2.6.1.3 Ενδιάμεσος αέρας.....	35
2.6.1.4 Θερμαντική επιφάνεια.....	35

2.6.1.5 Μονωτής.....	35
2.6.1.6 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου.....	35
2.6.2 Δεύτερη ζώνη.....	36
2.6.2.1 Εσωτερικός αέρας.....	36
2.6.2.2 Μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα.....	36
2.6.2.3 Ενδιάμεσος αέρας.....	36
2.6.2.4 Θερμαντική επιφάνεια.....	36
2.6.2.5 Μονωτής.....	37
2.6.2.6 Εξωτερικό τοίχωμα του φούρνου.....	37
2.6.3 Τρίτη ζώνη.....	37
2.6.3.1 Καταλύτης.....	37
2.6.3.2 Μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα.....	37
2.6.3.3 Ενδιάμεσος αέρας.....	38
2.6.3.4 Θερμαντική επιφάνεια.....	38
2.6.3.5 Μονωτής.....	38
2.6.3.6 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου.....	38
2.6.4 Τέταρτη ζώνη.....	39
2.6.4.1 Κάτω αέρας.....	39
2.6.4.2 Θερμαντική επιφάνεια.....	39
2.6.4.3 Μονωτής.....	39
2.6.4.4 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου.....	39
2.6.5 Πέμπτη ζώνη.....	40
2.6.5.1 Κάτω αέρας.....	40
2.6.5.2 Θερμαντική επιφάνεια.....	40
2.6.5.3 Μονωτής.....	40
2.6.5.4 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου.....	40
2.7 Μαθηματικό μοντέλο στο gProms.....	41

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1 Πειραματικές διαδικασίες και αποτελέσματα προσομοίωσης.....	42
3.2 Πρώτη πειραματική διαδικασία.....	43
3.3 Δεύτερη πειραματική διαδικασία.....	44
3.4 Τρίτη πειραματική διαδικασία.....	45

3.5 Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	47
3.5.1 Σε συνθήκες 1 <sup>ου</sup> πειράματος.....	48
3.5.2 Σε συνθήκες 2 <sup>ου</sup> πειράματος.....	49
3.5.3 Σε συνθήκες 3 <sup>ου</sup> πειράματος.....	50
3.6 Συμπεράσματα.....	51
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup></b>	
<b>ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ</b>	
4.1 Σύστημα Βέλτιστου Ελέγχου βασισμένο σε προρρήσεις μοντέλου.....	53
4.2 Δομή συστήματος Βέλτιστου Ελέγχου βασισμένου σε προρρήσεις μοντέλου.....	55
4.3 Αλγόριθμος βέλτιστου ελέγχου.....	56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup></b>	
<b>ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΟΝΑΔΑ CPS</b>	
5.1 Εφαρμογή του σχήματος ελέγχου σε επίπεδο προσομοίωσης.....	59
5.2 Απευθείας εφαρμογή του σχήματος ελέγχου στην πιλοτική μονάδα.....	62
5.3 Αυτοματοποίηση της διεργασίας.....	65
5.4 Συμπεράσματα.....	67
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>	
<b>ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....</b>	<b>69</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>73</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>**

## ΜΟΝΑΔΑ ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΤΑΛΥΤΩΝ

### 1.1 Εισαγωγή

Η πιλοτική μονάδα κυκλικής απενεργοποίησης καταλυτών με προπυλένιο (Cyclic Propylene Steaming Pilot Plant/CPS), που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), χρησιμοποιείται για την προετοιμασία/αξιολόγηση δειγμάτων καταλυτών που χρησιμοποιούνται σε μονάδες καταλυτικής πυρόλυσης (Fluid Catalytic Cracking/FCC). Σκοπός της είναι η προσομοίωση της διεργασίας απενεργοποίησης των καταλυτών αυτών σε συνθήκες που να προσομοιάζουν την αντίστοιχη διεργασία στις μονάδες FCC. Οι καταλύτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται είναι συνήθως εμπλουτισμένοι με μέταλλα, κυρίως νικέλιο και βανάδιο. Στην εικόνα 1.1 μπορούμε να δούμε την πιλοτική μονάδα η οποία βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του ΕΚΕΤΑ.

Για να αξιολογήσουμε τους καταλύτες FCC, κρίνεται αναγκαία η δημιουργία προτύπων δειγμάτων των υπό αξιολόγηση καταλυτών στη CPS, τα οποία θα προσομοιώνουν την ακριβή κατάσταση των χρησιμοποιημένων καταλυτών. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται καταλυτική προπαρασκευή μέσω της απενεργοποίησης μετάλλων.

Η διαδικασία της απενεργοποίησης των καταλυτών είναι ασυνεχής και περιλαμβάνει εναλλασσόμενα στάδια αναγωγής και οξειδωσης, με τις αντίστοιχες ενδόθερμες και εξώθερμες αντιδράσεις στην επιφάνεια του καταλύτη. Η κυκλική εναλλαγή των αντιδράσεων αυτών επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος. Κατά τη λειτουργία της μονάδας απαιτείται η θερμοκρασία να φτάσει σε μια προκαθορισμένη επιθυμητή τιμή. Η διάρκεια της θέρμανσης για το σκοπό αυτό θα πρέπει να είναι η συντομότερη δυνατή ώστε να εξοικονομήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια. Επιπλέον απαιτείται η διατήρηση της θερμοκρασίας στην τιμή αυτή παρόλες τις εναλλαγές που προκύπτουν λόγω των χημικών αντιδράσεων.



**Εικόνα 1.1 Η πιλοτική μονάδα CPS του ΙΤΧΗΑ/ΕΚΕΤΑ**

Η διαδικασία απενεργοποίησης πρέπει κάθε φορά να είναι ακριβής και να πραγματοποιείται ακολουθώντας μια προκαθορισμένη ακολουθία βημάτων. Ακόμη και μικρές παρεκλίσεις μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα αυξομειώσεις της θερμοκρασίας που επηρεάζουν την τελική ποιότητα των προϊόντων. Στο τέλος της διαδικασίας απενεργοποίησης ο προς αξιολόγηση καταλύτης θα πρέπει να έχει τις ίδιες μακροσκοπικές ιδιότητες με τον καταλύτη της βιομηχανικής διαδικασίας.

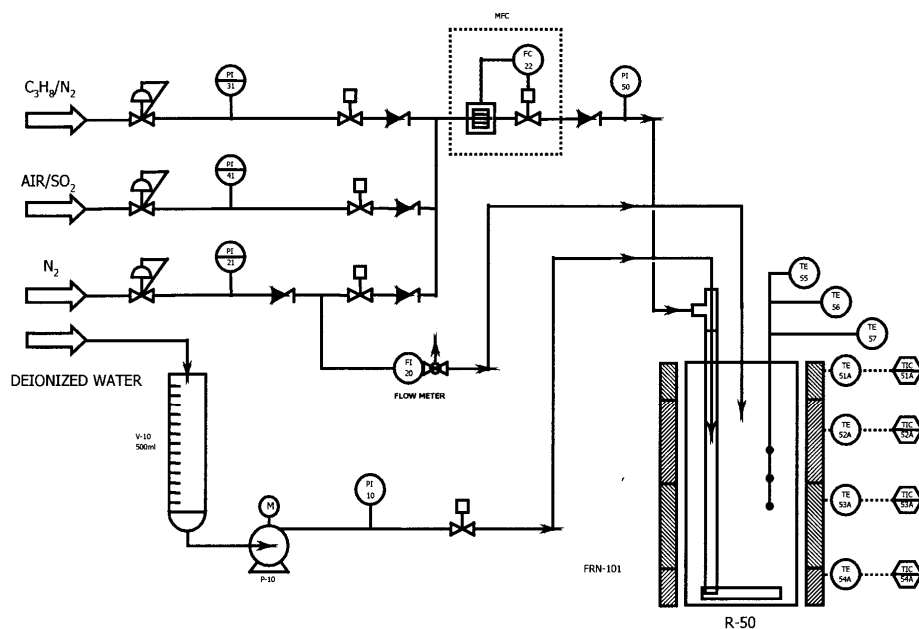
Στην εικόνα 1.2 μπορούμε να δούμε ένα απλοποιημένο διάγραμμα της μονάδας.

## **1.2 Περιγραφή της πιλοτικής μονάδας CPS**

Η πιλοτική μονάδα CPS αποτελείται από έναν μεταλλικό αντιδραστήρα, κατασκευασμένο από ειδικό κράμα χάλυβα, ο οποίος θερμαίνεται από τέσσερις αντιστάσεις τοποθετημένες μέσα σε κεραμικό υλικό. Ανάμεσα από τον αντιδραστήρα και τις επιφάνειες θέρμανσης παρεμβάλεται ένα κενό αέρα ενώ στο εσωτερικό του αντιδραστήρα τοποθετείται ο καταλύτης ο οποίος κατά τη διάρκεια της διεργασίας



βρίσκεται σε κατάσταση ρευστοαίωρησης (λόγω και της παρουσίας ρευμάτων αερίων τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία απενεργοποίησης).



Εικόνα 1.1 Απλοποιημένο διάγραμμα της πιλοτικής μονάδας CPS

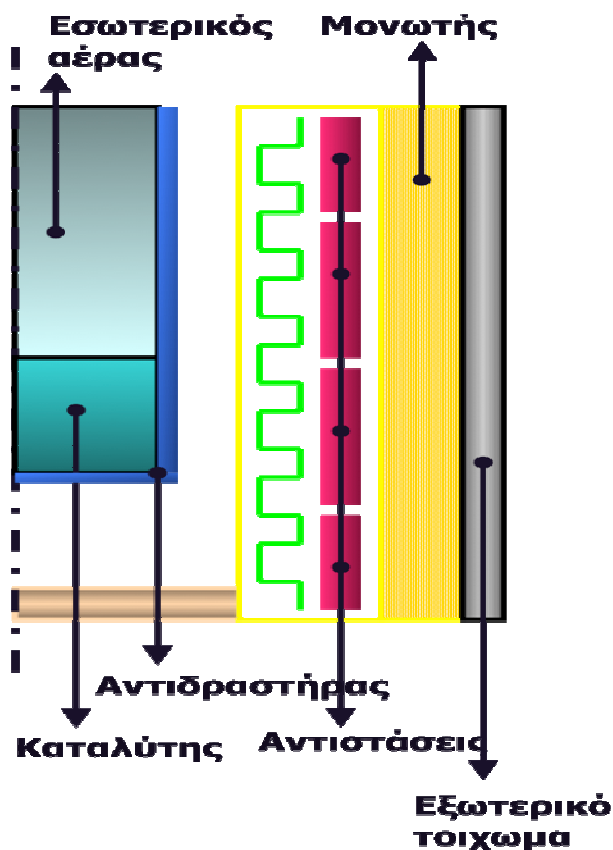
Το εξωτερικό περίβλημα της μονάδας είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτη λαμαρίνα. Μεταξύ της λαμαρίνας και της θερμαντικής επιφάνειας της μονάδας παρεμβάλεται το μονωτικό υλικό το οποίο είναι κατασκευασμένο από ειδικό κεραμικό μίγμα ώστε να αντέχει στις υψηλές θερμοκρασίες και παράλληλα να μην επιτρέπει στη θερμοκρασία να εξέρχεται προς το περιβάλλον.

Η θερμαντική επιφάνεια της μονάδας είναι χωρισμένη σε τέσσερις επιμέρους επιφάνειες (αντιστάσεις), οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Μετρώντας από την κορυφή, η 1<sup>η</sup> και η 4<sup>η</sup> αντίσταση είναι ισχύος 400 Watt ενώ η 2<sup>η</sup> και η 3<sup>η</sup> είναι ισχύος 1200 Watt.

Επίσης στην κορυφή της μονάδας υπάρχει ένα μεταλλικό καπάκι της ίδιας σύνθεσης με το εξωτερικό περίβλημα του φούρνου.

Η παροχή των ρευστών, που συμμετέχουν στη διεργασία, προς τον αντιδραστήρα γίνεται μέσω σωληνώσεων (γραμμών μεταφοράς) που ελέγχονται από ειδικές βάνες (valve operated) με δυνατότητα παροχής έως και 20 nlt/min η κάθε μια ξεχωριστά.

Πριν την έναρξη της διεργασίας ο καταλύτης, ο οποίος βρίσκεται σε στερεά κατάσταση, τοποθετείται στο εσωτερικό του αντιδραστήρα και στη συνέχεια κλείνουμε το μεταλλικό καπάκι του φούρνου που βρίσκεται στην κορυφή αυτού.



Εικόνα 1.3 Σκαριφματική αναπαράσταση της τοπολογίας του αντιδραστήρα.

Για να εκκινήσει η διεργασία πρέπει να καθορίσουμε την παρεχόμενη ισχύ προς τις αντιστάσεις του φούρνου καθώς και την ποσότητα του ρευστού που επιλέγεται κάθε φορά για ανάμιξη με τον καταλύτη.

Στην εικόνα 1.3 διακρίνεται μια σκαριφματική αναπαράσταση του αντιδραστήρα.

Στο εσωτερικό του αντιδραστήρα, όπου και τοποθετείται ο καταλύτης, λαμβάνουν χώρα οι χημικές αντιδράσεις. Για την απενεργοποίηση των καταλυτών ακολουθείται συγκεκριμένο πρωτόκολο.

### 1.3 Πρωτόκολο απενεργοποίησης καταλυτών

Η διαδικασία απενεργοποίησης πραγματοποιείται ακολουθώντας κάποια προκαθορισμένα βήματα. Ο αντιδραστήρας θερμαίνεται ακολουθώντας τρία προκαθορισμένα βήματα [1].

1. Το πρώτο, θερμοκρασιακό, σημείο αναφοράς (setpoint) είναι οι 293°C (478 Kelvin). Θερμαίνουμε τον αντιδραστήρα για 90 λεπτά, έως ότου η θερμοκρασία του φτάσει στους 293°C. Σε περίπτωση που η θερμοκρασία προσεγγίσει το setpoint παραμένουμε σε αυτό το θερμοκρασιακό επίπεδο έως την πάροδο του χρονικού ορίου.
2. Το επόμενο setpoint έχει προκαθοριστεί στους 595°C (868 Kelvin). Η διάρκεια αυτού του βήματος είναι 5.5 ώρες.
3. Το τρίτο και τελευταίο setpoint έχει οριστεί στους 788°C (1061 Kelvin). Η θέρμανση διαρκεί 3.5 ώρες και σκοπός είναι η θερμοκρασία να σταθεροποιηθεί γύρω από το setpoint χωρίς να παρατηρηθούν μεγάλες αποκλίσεις (+2-5% maximum)
4. Εφόσον η θερμοκρασία έχει σταθεροποιηθεί και με την πάροδο του χρονικού ορίου, το επόμενο βήμα είναι η εκκίνηση των κύκλων απενεργοποίησης. Κάθε κύκλος έχει διάρκεια 40 λεπτά. Η εναλλαγή των αερίων γίνεται ανά 10 λεπτά και συνολικά πραγματοποιούνται πλέον των 40 κύκλοι. Αναλυτικότερα η εναλλαγή των αερίων, η περιεκτικότητά τους καθώς και η επίδρασή τους στη θερμοκρασιακή συμπεριφορά της διεργασίας δίνονται στον πίνακα 1.1.

Χρόνος έκθεσης (min)	Ρεύμα αέρα	Επίδραση
10 min	AIR/SO <sub>2</sub>	Αύξηση της θερμοκρασίας
10 min	N <sub>2</sub>	Καμία επίδραση
10 min	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> /N <sub>2</sub>	Μείωση της θερμοκρασίας
10 min	N <sub>2</sub>	Καμία επίδραση

**Πίνακας 1.1 Περιγραφή ενός κύκλου απενεργοποίησης καταλύτη στη μονάδα CPS**

Η συνολική διάρκεια της διεργασίας, συμπεριλαμβανομένων και των κύκλων απενεργοποίησης είναι περίπου 22 ώρες. Μετά το πέρας της διεργασίας ο καταλύτης ο

οποίος προκύπτει θα πρέπει να είναι στην ίδια κατάσταση (να έχει τις ίδιες ιδιότητες) με τον καταλύτη που εξέρχεται από μια βιομηχανική διεργασία FCC. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο προχωρήσαμε αρχικά στη μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος. Ένα αξιόπιστο μαθηματικό μοντέλο που προσομοιώνει με ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός συστήματος αποτελεί εξάλλου τη βάση οποιουδήποτε MPC.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

#### 2.1 Προσομοίωση της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς της πιλοτικής μονάδας

Το πλήρες μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς της μονάδας αποτελείται από διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος, η επίλυση των οποίων παρέχει πληροφορίες για την πλήρη δυναμική και στατική συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος. Κατά συνέπεια, μέσω ενός αξιόπιστου μαθηματικού μοντέλου, στηριζόμενο στους βασικούς νόμους διατήρησης της ύλης και της ενέργειας προβλέπεται η συμπεριφορά μιας διεργασίας σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Οι παράμετροι ενός τέτοιου μαθηματικού μοντέλου, καθώς και οι εξισώσεις, έχουν φυσική υπόσταση και δεν αποτελούν απλώς εμπειρικές μαθηματικές προσεγγίσεις. Συνεπώς με την εκτίμηση των αγνώστων παραμετρών ενός τέτοιου μοντέλου και βασιζόμενοι στην αξιοπιστία πειραματικών μετρήσεων που ελήφθησαν από την πιλοτική μονάδα του ΙΤΧΗΔ μπορούμε να έχουμε ένα ισχυρότατο και ιδιαίτερα αξιόπιστο εργαλείο για το σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός εξελιγμένου συστήματος ελέγχου.

#### 2.2 Ανάπτυξη των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας

Όλες οι φυσικοχημικές διεργασίες περιλαμβάνουν την παραγωγή ή την απορρόφηση ενέργειας με τη μορφή θερμότητας. Επομένως οι νόμοι που διέπουν τη μεταφορά θερμότητας και οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ροής της θερμότητας έχουν ιδιαίτερη σημασία.

Όταν δυο σώματα με διαφορετικές θερμοκρασίες έρχονται σε επαφή, μια ποσότητα θερμότητας ρέει από το θερμότερο προς το ψυχρότερο (η συνολική ροή της

θερμότητας κατευθύνεται πάντα προς τη μικρότερη θερμοκρασία). Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία της μονάδας είναι δυο :

- Αγωγή
- Συναγωγή

### 2.2.1 Αγωγή

Αν μέσα σε ένα συνεχές μέσο εμφανίζεται διαβάθμιση (gradient) της θερμοκρασίας, τότε θα υπάρχει ροή θερμότητας χωρίς καμία ορατή κίνηση της ύλης. Ο μηχανισμός αυτός για μεταφορά θερμότητας ονομάζεται αγωγή (conduction). Σύμφωνα με το νόμο του Fourier η πυκνότητα ροής θερμότητας είναι ανάλογη της διαφορικής κλίσης της θερμοκρασίας και έχει αντίθετο πρόσημο από αυτή.

Ο νόμος του Fourier για μονοδιάστατη ροή είναι :

$$q = \frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Όπου :

- q*** ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας σε κατεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια
- A*** το εμβαδό επιφανείας
- T*** η θερμοκρασία
- x*** η απόσταση κάθετη στην επιφάνεια
- k*** η θερμική αγωγιμότητα(ή σταθερά αναλογίας)

Ο όρος  $Q/A$  εκφράζει το λόγο της θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας.

Το  $dT/dx$  είναι η διαφορική κλίση της θερμοκρασίας και το  $k$  το οποίο εμφανίζεται ως παράγοντας αναλογίας είναι μια φυσική ιδιότητα του υλικού.

Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση σχετίζεται με την επιλογή της κατεύθυνσης προς την οποία παρατηρείται μεταφορά θερμότητας.

Οι μονάδες μέτρησης του  $Q$  εκφράζονται σε *Watt* ή *Btu/h* και του  $dT/dx$  σε  $^{\circ}K/m, ^{\circ}C/m, ^{\circ}F/ft$ . Οι μονάδες του  $k$  είναι  $W/(m^{\circ}K), W/(m^{\circ}C), Btu/(ft^{\circ}h^{\circ}F)$ .

Στα μέταλλα η αγωγιμότητα οφείλεται στην κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων και υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα στη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα. Στα στερεά, που δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, και στα

περισσότερα υγρά, η θερμική αγωγιμότητα οφείλεται σε μεταφορά ορμής ανάμεσα σε γειτονικά δονούμενα μόρια ή άτομα. Στα αέρια η αγωγή είναι το αποτέλεσμα τυχαίας κίνησης των μορίων, με αποτέλεσμα η θερμότητα να διαχέεται από τις θερμότερες περιοχές στις ψυχρότερες. Η αγωγή θερμότητας στα υγρά ή στα αέρια επηρεάζεται συχνά από τη ροή ρευστών και οι διεργασίες μεταφοράς θερμότητας με αγωγή και συναγωγή συμπεριλαμβάνονται στον όρο “συναγωγή” ή “μεταφορά θερμότητας με συναγωγή”. Το πιο συνιθισμένο παράδειγμα αγωγής είναι η ροή θερμότητας σε αδιαφανή στερεά, όπως π.χ. στον τοίχο από τουβλα ενός κτιρίου ή στα μεταλλικά τοιχώματα του αυλού ενός εναλλάκτη.

### 2.2.2 Συναγωγή

Η συναγωγή (convection) αναφέρεται στη ροή θερμότητας που σχετίζεται με την κίνηση ενός ρευστού, όπως όταν ο θρμός αέρας από έναν φούρνο εισέρχεται στο δωμάτιο, ή στη μεταφορά θερμότητας από μια θερμή επιφάνεια σε ένα κινούμενο ρευστό. Η δεύτερη έννοια είναι πιο σημαντική για τις διεργασίες, επειδή περιλαμβάνει τη μεταφορά θερμότητας από μεταλλικά τοιχώματα, στερεά σωματίδια και υγρές επιφάνειες. Η πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή, σύμφωνα με το νόμο του Newton, είναι ανάλογη της διαφοράς θερμότητας ανάμεσα στη θερμοκρασία της επιφάνειας και στη θερμοκρασία του ρευστού.

$$\frac{q}{A} = h * (T_s - T_f) \quad (2.2)$$

Όπου :  $T_s$  η θερμοκρασία της επιφάνειας

$T_f$  η θερμοκρασία του κυρίως όγκου του ρευστού, μακριά από την επιφάνεια

$h$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

Αξίζει να σημειωθεί ότι η γραμμική εξάρτηση από τη διαφορά θερμοκρασίας  $T_s - T_f$ , είναι ίδια με εκείνη που αντιστοιχεί στην απλή αγωγή, μέσα σε ένα στερεό σταθερής θερμικής αγωγιμότητας.

Σε αντίθεση με τη θερμική αγωγιμότητα, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας δεν είναι εσωτερική ιδιότητα του υλικού αλλά εξαρτάται από :

- Τη ροή (η οποία καθορίζεται από τη μηχανική ρευστών).
- Τις θερμικές ιδιότητες του ρευστού.

### 2.3 Ανάπτυξη της συνάρτησης λειτουργικών συνθηκών

Το δυναμικό μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς της μονάδας περιγράφηκε από τις αντίστοιχες εξισώσεις που εκφράζουν τη μεταφορά της θερμότητας τόσο προς την αξονική όσο και προς την ακτινική κατεύθυνση συναρτήσει του χρόνου μέσω των μηχανισμών της αγωγής και της συναγωγής.

Έτσι εν κατακλείδι, προκύπτει τοπροσομοιωμένο μοντέλο του συστήματος με διαφορικές εξισώσεις κατανεμημένων παραμέτρων, με μερικές παραγώγους ως προς  $t$ ,  $z$ ,  $r$ . Δηλαδή, εντέλει, προκύπτει ένα δυναμικό δισδιάστατο μοντέλο με διαφορικές εξισώσεις που ορίζονται ως προς το χρόνο [2,3,4,5].

Η γενική εξίσωση που περιγράφει τις λειτουργικές συνθήκες της μονάδας είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial}{\partial r} \left( r * \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.3)$$

Η παραπάνω εξίσωση, όπως μπορούμε να διακρίνουμε, εκφράζει τη μεταφορά θερμότητας σε ολόκληρο τον όγκο της μονάδας.

### 2.4 Ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο της μονάδας αναπαριστά μια ημισυνεχή διαδικασία με μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Οι διακυμάνσεις αυτές αποδίδονται στην κυκλική εναλλαγή των λειτουργικών συνθηκών από ενδόθερμες σε εξώθερμες.

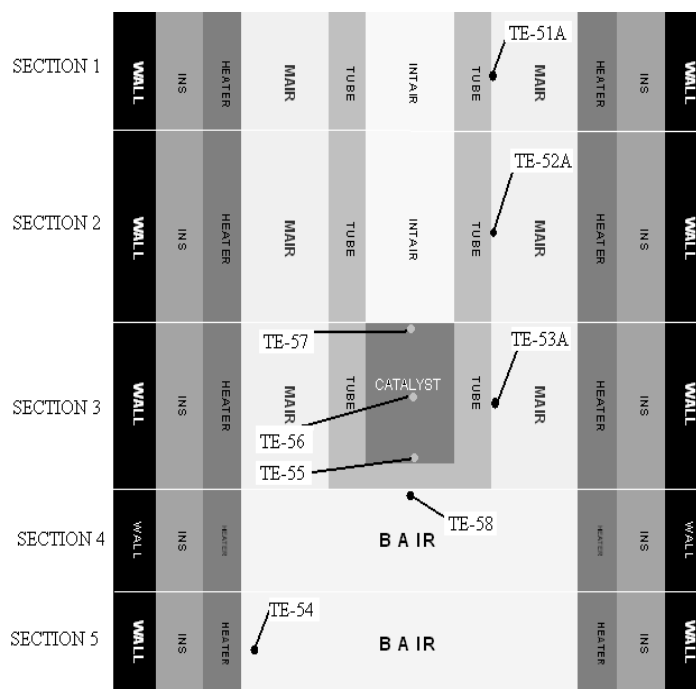
Ο φούρνος, εκ κατασκευής, είναι διαιρεμένος σε τέσσερις ζώνες θέρμανσης, στην αξονική διεύθυνση, σε αντιστοιχία με τις αντιστάσεις του. Για να προχωρήσουμε στη μοντελοποίηση, μετρώντας από πάνω προς τα κάτω, “χωρίσαμε”



την τρίτη ζώνη, η οποία αποτελεί τη ζώνη του καταλύτη, σε δύο ξεχωριστές ζώνες. Εν συνεχεία αναπτύχθηκε ξεχωριστά το μοντέλο της κάθε ζώνης.

Κάθε ζώνη περιέχει έξι υπο-μοντέλα σε αντιστοιχία με τα έξι διαφορετικά υλικά που καλύπτουν την επιφάνεια του αντιδραστήρα, στην ακτινική διεύθυνση.

Στην εικόνα 2.1 διακρίνεται ο διαχωρισμός των ζωνών της πιλοτικής μονάδας, όπως έγινε για την ευκολότερη μοντελοποίηση του συστήματος.



Εικόνα 2.1 Γραφική αναπαράσταση του διαχωρισμού των ζωνών για τη μοντελοποίηση της μονάδας CPS

Τα στοιχεία TE 51A-58 είναι τα θερμοστοιχεία της μονάδας τα οποία μας τροφοδοτούν με πληροφορίες σχετικά με τη θερμοκρασία στο εσωτερικό της μονάδας.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι εξισώσεις που περιγράφουν τις λειτουργικές συνθήκες της πιλοτικής μονάδας. Συμπεριλαμβάνονται οι εξισώσεις που αναφέρονται στις οριακές συνθήκες που επικρατούν μεταξύ των ζωνών του φούρνου, στην αξονική διεύθυνση, αλλά και μεταξύ των μοντέλων της κάθε ζώνης, στην ακτινική διεύθυνση. Για τη μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος λήφθηκε υπόψη το ισοζύγιο ενέργειας και όχι το ισοζύγιο μάζας της διεργασίας.

## 2.5 Ανάπτυξη εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας και οριακών συνθηκών

### 2.5.1 Εσωτερικός αέρας

Αφορά στα ρευστά που τροφοδοτούνται στον αντιδραστήρα και συντελούν στη ρευστοαιώρηση του καταλύτη αλλά και στην πρόκληση των απαραίτητων οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων στο εσωτερικό της ρευστοστερεάς κλίνης της μονάδας.

$$(\rho_{air} * C_{air}) \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_{air} * C_{air} * U_z) \frac{\partial T}{\partial z} = k_{air} * \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2.4)$$

Στην εξίσωση αυτή εκφράζεται μεταφορά θερμότητα με αγωγή και ως προς τις δυο κατευθύνσεις (αξονική και ακτινική) και η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή ως προς την αξονική κατεύθυνση.

#### Οριακές συνθήκες

Στο κέντρο του αντιδραστήρα :

$$-k_{air} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_a} = 0 \quad (2.4.1)$$

Στο τοίχωμα του αντιδραστήρα :

$$-k_{air} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_b} = h_{air} * (T(z, R_b) - T_b(z)) \quad (2.4.2)$$

Όπου :

- $C_{air}$  η ειδική θερμότητα του αέρα στο εσωτερικό του αντιδραστήρα
- $\rho_{air}$  η πυκνότητα του αέρα
- $T$  η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του αντιδραστήρα
- $\frac{\partial T}{\partial t}$  ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας T
- $k_{air}$  η αγωγιμότητα του εσωτερικού αέρα
- $U_z$  η ταχύτητα ροής
- $r$  η απόσταση από το κέντρο

$T_b$	η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα στα όρια του υλικού
$h_{air}$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον εσωτερικό αέρα στο μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα

## 2.5.2 Καταλύτης

Στη ζώνη αυτή ο καταλύτης βρίσκεται σε ρευστοαιώρηση σε ρεύμα αέρα (ρευστοστερεά κλίνη). Συνεπώς αντί της αναφοράς στις ιδιότητες του καταλύτη, γίνεται αναφορά στις ιδιότητες του ενιαίου αυτού ρευστού.

$$(\rho_{cat} C_{cat}) * \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho_{cat} C_{cat} * U_z) \frac{\partial T}{\partial z} = k_{cat} * \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2.5)$$

Και στην περίπτωση αυτή η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται αξονικά και ακτινικά με αγωγή και επιπλέον στην αξονική διεύθυνση και με συναγωγή.

### Οριακές συνθήκες

Στο κέντρο του αντιδραστήρα :

$$-k_{cat} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_a} = 0 \quad (2.5.1)$$

Στο εσωτερικό τοίχωμα του αντιδραστήρα :

$$-k_{cat} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_b} = h_{cat} (T(z, R_b) - T_b(z)) \quad (2.5.2)$$

Όπου :  $\rho_{cat} C_{cat}$  το γινόμενο της ειδικής θερμότητας και της πυκνότητας του Καταλύτη στη ρευστοστερεά κλίνη

$T$  η θερμοκρασία του καταλύτη στο εσωτερικό του αντιδραστήρα

$\frac{\partial T}{\partial t}$  ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας T

$k_{cat}$  η αγωγιμότητα του καταλύτη

$U_z$  η ταχύτητα ροής του αέρα, στη ρευστοστερεά κλίνη

$r$  η απόσταση από το κέντρο

$T_b(z)$	η θερμοκρασία του καταλύτη, στα όρια του υλικού
$h_{cat}$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από τον καταλύτη στο μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα

### 2.5.3 Κάτω αέρας

Πρόκειται για τον αέρα που βρίσκεται εγκλωβισμένος κάτω από τον αντιδραστήρα, στο εσωτερικό του φούρνου.

$$(\rho_{bair} * C_{bair}) \frac{\partial T}{\partial t} = k_{bair} * \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2.6)$$

Σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μέσω του μηχανισμού της αγωγής, τόσο ως προς την αξονική όσο και προς την ακτινική διεύθυνση.

#### Οριακές συνθήκες

Λόγω της γεωμετρίας του μοντέλου, το στρώμα του κάτω τμήματος του αέρα χωρίστηκε σε τρία υποστρώματα, σε αντιστοιχία με τα υπερκείμενα διαφορετικά υλικά, και καθένα από τα υποστρώματα αυτά μελετήθηκε ξεχωριστά.

Στο κέντρο του κάτω αέρα (κάτω από τον καταλύτη) :

$$-k_{bair} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_a} = 0 \quad (2.6.1)$$

Στον κάτω αέρα, ακριβώς κάτω από το τοίχωμα του αντιδραστήρα :

$$-k_{bair} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_a} = h_{bair1} * (T_a(z) - T(z, R_a)) \quad (2.6.2)$$

Στον κάτω αέρα, ακριβώς κάτω από τον ενδιάμεσο αέρα :

$$-k_{bair} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_b} = h_{bair2} * (T(z, R_b) - T_b(z)) \quad (2.6.3)$$

Όπου :  $C_{bair}$  η ειδική θερμότητα του κάτω αέρα

$\rho_{bair}$	η πυκνότητα του κάτω αέρα
$T$	η θερμοκρασία του κάτω αέρα
$\frac{\partial T}{\partial t}$	ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας, στη μονάδα του χρόνου
$k_{bair}$	η αγωγιμότητα του κάτω αέρα
$r$	η απόσταση από το κέντρο
$T_a(z)$	η θερμοκρασία του κάτω αέρα, στα όρια του υλικού ( $r=R_a$ )
$T_b(z)$	η θερμοκρασία του κάτω αέρα, στα όρια του υλικού ( $r=R_b$ )
$h_{bair}$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας

#### 2.5.4 Μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα

$$(\rho_{tube} * C_{tube}) \frac{\partial T}{\partial t} = k_{tube} * \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2.7)$$

Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με αγωγή

#### Οριακές συνθήκες

$$-k_{tube} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_a} = h_{tube1} * (T_a(z) - T(z, R_a)) \quad (2.7.1)$$

$$-k_{tube} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_b} = h_{tube2} * (T(z, R_b) - T_b(z)) \quad (2.7.2)$$

Όπου :

$C_{tube}$	η ειδική θερμότητα του μετάλλου
$\rho_{tube}$	η πυκνότητα του μετάλλου
$T$	η θερμοκρασία
$\frac{\partial T}{\partial t}$	ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας, στη μονάδα του χρόνου
$k_{tube}$	η αγωγιμότητα του μετάλλου
$r$	η απόσταση από το κέντρο
$T_a(z)$	η θερμοκρασία του μεταλλικού τοιχώματος, στα όρια του

	υλικού ( $r=R_a$ )
$T_b(z)$	η θερμοκρασία του μεταλλικού τοιχώματος, στα όρια του υλικού ( $r=R_b$ )
$h_{tube1}$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του μετάλλου, προς τον εσωτερικό αέρα ή τον καταλύτη
$h_{tube2}$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του μετάλλου, προς τον ενδιάμεσο αέρα

### 2.5.5 Ενδιάμεσος αέρας

Πρόκειται για τον αέρα που βρίσκεται μεταξύ του μεταλλικού τοιχώματος του αντιδραστήρα και της θερμαντικής επιφάνειας.

$$(\rho_{mair} * C_{mair}) \frac{\partial T}{\partial t} = k_{mair} * \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2.8)$$

Και στην περίπτωση αυτή, η μεταφορά της θερμότητας, πραγματοποιείται με το μηχανισμό της αγωγής.

#### Οριακές συνθήκες

$$-k_{mair} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{r=R_a} = h_{mair1} * (T_a(z) - T(z, R_a)) \quad (2.8.1)$$

$$-k_{mair} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{r=R_b} = h_{mair2} * (T(z, R_b) - T_b(z)) \quad (2.8.2)$$

Όπου :  $C_{mair}$  η ειδική θερμότητα του ενδιάμεσου αέρα

$\rho_{mair}$  η πυκνότητα του ενδιάμεσου αέρα

$T$  η θερμοκρασία

$\frac{\partial T}{\partial t}$  ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας, στη μονάδα του χρόνου

$k_{mair}$  η αγωγιμότητα του ενδιάμεσου αέρα

$r$  η απόσταση από το κέντρο

$T_a(z)$  η θερμοκρασία του ενδιάμεσου αέρα, στα όρια του υλικού ( $r=R_a$ )

- $T_b(z)$  η θερμοκρασία του ενδιάμεσου αέρα, στα όρια του υλικού ( $r=R_b$ )
- $h_{mair1}$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, από τον ενδιάμεσο αέρα προς το μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα
- $h_{mair2}$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, από τον ενδιάμεσο αέρα προς τη θερμαντική επιφάνεια

### 2.5.6 Θερμαντική επιφάνεια (Αντιστάσεις)

Στρώμα, όπου οι ηλεκτρικές αντιστάσεις, βρίσκονται τοποθετημένες μέσα σε δύστηκτο κεραμικό υλικό, το οποίο και αποτελεί τη θερμαντική επιφάνεια της μονάδας.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = S + k_h * \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2.9)$$

Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με αγωγή.

#### Οριακές συνθήκες

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_a} = h_{air2} * (T_a(z) - T(z, R_a)) \quad (2.9.1)$$

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_b} = h_r * (T(z, R_b) - T_b(z)) \quad (2.9.2)$$

Όπου :  $\rho C_p$  το γινόμενο της ειδικής θερμότητας και της πυκνότητας της αντίστασης

$T$  η θερμοκρασία

$\frac{\partial T}{\partial t}$  ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας, στη μονάδα του χρόνου

$k_h$  η αγωγιμότητα της αντίστασης (κεραμικό υλικό)

$r$  η απόσταση από το κέντρο

$T_a(z)$  η θερμοκρασία της αντίστασης, στα όρια του υλικού ( $r=R_a$ )

$T_b(z)$  η θερμοκρασία της αντίστασης, στα όρια του υλικού ( $r=R_b$ )

$h_{air2}$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από την αντίσταση προς τον

ενδιάμεσο αέρα

$h_r$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από την αντίσταση προς τον μονωτή

Επίσης :  $S = \frac{Q}{V}$

Όπου :  $Q$  η ισχύς της αντίστασης της κάθε ζώνης, εκφρασμένη σε Watt

και  $V = \pi * \Delta L * (R_b^2 - R_a^2)$

Όπου :  $V$  ο όγκος του κεραμικού, στο οποίο βρίσκεται τοποθετημένη αντίσταση της κάθε ζώνης σε  $m^3$

$\Delta L$  το μήκος της κάθε ζώνης

### 2.5.7 Μονωτής

Μονωτικό υλικό, που παρεμβάλεται μεταξύ της θερμαντικής επιφάνειας και του εξωτερικού τοιχώματος του φούρνου.

$$(\rho_{mon} * C_{mon}) \frac{\partial T}{\partial t} = k_{mon} * \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2.10)$$

Η μεταφορά της θερμότητας γίνεται με αγωγή.

### Οριακές συνθήκες

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_a} = h_{mon1} * (T_a(z) - T(z, R_a)) \quad (2.10.1)$$

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_b} = h_{mon2} * (T(z, R_b) - T_b(z)) \quad (2.10.2)$$

Όπου :  $C_{mon}$  η ειδική θερμότητα του μονωτή

$\rho_{mon}$  η πυκνότητα του μονωτή

$T$  η θερμοκρασία



$\frac{\partial T}{\partial t}$	ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας, στη μονάδα του χρόνου
$k_{mon}$	η αγωγιμότητα του μονωτή
$r$	η απόσταση από το κέντρο
$T_a(z)$	η θερμοκρασία του μονωτή, στα όρια του υλικού ( $r=R_a$ )
$T_b(z)$	η θερμοκρασία του μονωτή, στα όρια του υλικού ( $r=R_b$ )
$h_{mon1}$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, από το μονωτή προς τη θερμαντική επιφάνεια
$h_{mon2}$	ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, από το μονωτή προς το εξωτερικό τοίχωμα του φούρνου

### 2.5.8 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου

Πρόκειται για το εξωτερικό μεταλλικό περίβλημα της μονάδας.

$$(\rho_{wall} * C_{wall}) \frac{\partial T}{\partial t} = k_{wall} * \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (2.11)$$

Η μεταφορά της θερμότητας πραγματοποιείται με αγωγή.

#### Οριακές συνθήκες

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_a} = h_{wall1} * (T_a(z) - T(z, R_a)) \quad (2.11.1)$$

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_b} = h_{wall2} * (T(z, R_b) - T_b(z)) \quad (2.11.2)$$

Όπου :  $C_{wall}$  η ειδική θερμότητα του εξωτερικού τοιχώματος

$\rho_{wall}$  η πυκνότητα του εξωτερικού τοιχώματος

$T$  η θερμοκρασία

$\frac{\partial T}{\partial t}$  ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας  $T$ , στη μονάδα του χρόνου

$k_{wall}$  η αγωγιμότητα του εξωτερικού τοιχώματος

$r$  η απόσταση από το κέντρο

- $T_a(z)$  η θερμοκρασία του εξωτερικού τοιχώματος, στα όρια του υλικού  
( $r=R_a$ )
- $T_b(z)$  η θερμοκρασία του εξωτερικού τοιχώματος, στα όρια του υλικού  
( $r=R_b$ )
- $h_{wall1}$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, του εξωτερικού τοιχώματος  
προς το μονωτή
- $h_{wall2}$  ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, του εξωτερικού τοιχώματος  
προς το περιβάλλον

## 2.6 Ανάπτυξη οριακών συνθηκών, στην αξονική διεύθυνση

Οι εξισώσεις 2.4 έως και 2.11, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, είναι ικανές να περιγράψουν τη μεταφορά της θερμότητας, τόσο ακτινικά όσο και αξονικά. Στην περίπτωση όμως της αξονικής διάδοσης της θερμότητας αλλάζουν οι οριακές συνθήκες για κάθε μοντέλο της κάθε ζώνης. Συνεπώς κρίνεται αναγκαία η αναλυτική περιγραφή του κάθε μοντέλου από ζώνη σε ζώνη. Στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικά οι οριακές συνθήκες που ισχύουν, από την 1<sup>η</sup> έως και την 5<sup>η</sup> ζώνη του φούρνου, στην αξονική διεύθυνση.

### 2.6.1 Πρώτη ζώνη

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες προς το περιβάλλον, η παράγωγος της θερμοκρασίας στο σημείο  $L_b$  ισούται με το μηδέν.

#### 2.6.1.1 Εσωτερικός αέρας

$$-k_{air} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.12.1)$$

$$-k_{air} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{L=L_b} = 0 \quad (2.12.2)$$

#### 2.6.1.2 Μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα

$$-k_{tube} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.13.1)$$

$$-k_{tube} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = 0 \quad (2.13.2)$$

### 2.6.1.3 Ενδιάμεσος αέρας

$$-k_{mair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.14.1)$$

$$-k_{mair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = 0 \quad (2.14.2)$$

### 2.6.1.4 Θερμαντική επιφάνεια

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.15.1)$$

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = 0 \quad (2.15.2)$$

### 2.6.1.5 Μονωτής

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.16.1)$$

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = 0 \quad (2.16.2)$$

### 2.6.1.6 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.17.1)$$

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = 0 \quad (2.17.2)$$

## 2.6.2 Δεύτερη ζώνη

### 2.6.2.1 Εσωτερικός αέρας

$$-k_{air} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.18.1)$$

$$-k_{air} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.18.2)$$

### 2.6.2.2 Μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα

$$-k_{tube} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.19.1)$$

$$-k_{tube} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.19.2)$$

### 2.6.2.3 Ενδιάμεσος αέρας

$$-k_{mair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.20.1)$$

$$-k_{mair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.20.2)$$

### 2.6.2.4 Θερμαντική επιφάνεια

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.21.1)$$

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.21.2)$$

### 2.6.2.5 Μονωτής

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.22.1)$$

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.22.2)$$

### 2.6.2.6 Εξωτερικό τοίχωμα του φούρνου

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.23.1)$$

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.23.2)$$

## 2.6.3 Τρίτη ζώνη

### 2.6.3.1 Καταλύτης

$$-k_{cat} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.24.1)$$

$$-k_{cat} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.24.2)$$

### 2.6.3.2 Μεταλλικό τοίχωμα του αντιδραστήρα

$$-k_{tube} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.25.1)$$

$$-k_{tube} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.25.2)$$

### 2.6.3.3 Ενδιάμεσος αέρας

$$-k_{mair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.26.1)$$

$$-k_{mair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.26.2)$$

#### 2.6.3.4 Θερμαντική επιφάνεια

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.27.1)$$

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.27.2)$$

#### 2.6.3.5 Μονωτής

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.28.1)$$

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.28.2)$$

#### 2.6.3.6 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.29.1)$$

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.29.2)$$

#### 2.6.4 Τέταρτη ζώνη

#### 2.6.4.1 Κάτω αέρας

$$-k_{bair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.30.1)$$

$$-k_{bair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.30.2)$$

#### 2.6.4.2 Θερμαντική επιφάνεια

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.31.1)$$

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.31.2)$$

#### 2.6.4.3 Μονωτής

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.32.1)$$

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.32.2)$$

#### 2.6.4.4 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = h_l * (T(L_a, r) - T_l(r)) \quad (2.33.1)$$

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.33.2)$$

#### 2.6.5 Πέμπτη ζώνη

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν απώλειες προς το περιβάλλον, η παράγωγος της θερμοκρασίας στο σημείο  $L_a$  ισούται με το μηδέν.

### 2.6.5.1 Κάτω αέρας

$$-k_{bair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = 0 \quad (2.34.1)$$

$$-k_{bair} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.34.2)$$

### 2.6.5.2 Θερμαντική επιφάνεια

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = 0 \quad (2.35.1)$$

$$-k_h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.35.2)$$

### 2.6.5.3 Μονωτής

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = 0 \quad (2.36.1)$$

$$-k_{mon} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.36.2)$$

### 2.6.5.4 Εξωτερικό τοίχωμα φούρνου

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_a} = 0 \quad (2.37.1)$$

$$-k_{wall} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L=L_b} = h_u * (T_u(r) - T(L_b, r)) \quad (2.37.2)$$

## 2.7 Μαθηματικό μοντέλο στο gProms

Το gPROMS είναι το πλέον εξελιγμένο και αξιόπιστο πακέτο λογισμικού



μοντελοποίησης, προσομοίωσης και βελτιστοποίησης, το οποίο είναι διαθέσιμο για την βιομηχανία χημικών και φυσικών διεργασιών. Είναι εξειδικευμένο στην άμεσα συνδεδεμένη με υπολογιστή υποστήριξη διεργασιών και αξιοποιεί τις πιο σύγχρονες τεχνικές ταυτόχρονης συνολικής επίλυσης. Οι τελευταίες προσφέρουν πλήρως σύγχρονη προσομοίωση της διεργασίας σε αντιδιαστολή με την πεπαλαιωμένη μέθοδο διαδοχικής επίλυσης εξισώσεων, η οποία έχει περιορισμένες δυνατότητες.

Τα οφέλη χρήσης του gPROMS συνοψίζονται στα εξής:

- Εξειδικευμένοι και προσαρμοσμένοι στη βιομηχανία διεργασιών επιλύτες και προσομοιωτές που επιτυγχάνουν εξαιρετική ακρίβεια και αποτελεσματικότητα.
- Δυνατότητα ανάπτυξης προσαρμοσμένων μοντέλων για τις διαφοροποιημένες ανάγκες της εκάστοτε μονάδας.
- Προσέγγιση ανοικτά διευθετούμενου μοντέλου η οποία επιτρέπει τη συλλογή πολύτιμων δεδομένων σε εύχρηστη μορφή.
- Βιβλιοθήκες ανωτάτου επιπέδου για την οικοδόμηση πεπλεγμένων μοντέλων με απλά σεντ εντολών.
- Απεριόριστη ευελιξία για την ανάπτυξη μοντέλων σε οποιαδήποτε κλίμακα – από αυστηρά εργαστηριακή έως πλήρως βιομηχανική.
- Απεριόριστη δυνατότητα χρήσεων – από άμεσο έλεγχο μονάδας έως απλή προσομοίωση φαινομένων.
- Ευκολία ενσωμάτωσης διαθέσιμων έτοιμων αλγορίθμων σε προσαρμοσμένα μοντέλα για πλήρη εκμετάλλευση της αποδοτικότητας και των δυνατοτήτων του gPROMS.

Ένα επιπλέον πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι η εύκολη επικοινωνία του με άλλα προγράμματα όπως το Matlab ή η Fortran καθώς και με το Excel για την άμεση εξαγωγή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων του [6].

Όλα τα παραπάνω και με δεδομένη την πολυπλοκότητα της διεργασίας το gProms θεωρήθηκε ως η καταλληλότερη επιλογή.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>**

### **ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ**

### 3.1 Πειραματικές διαδικασίες και αποτελέσματα προσομοίωσης

Εφόσον αναπτύχθηκε ένα δυναμικό μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει ικανοποιητικά τη δυναμική συμπεριφορά ενός συστήματος κατανεμημένων παραμέτρων, πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων στην πιλοτική μονάδα. Η πραγματοποίησή τους κρίθηκε απαραίτητη για να ελεγχθεί αν το μαθηματικό μοντέλο ακολουθεί την πραγματική συμπεριφορά της μονάδας καθώς και για τον προσδιορισμό των αγνώστων τιμών των παραμέτρων που επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τη συμπεριφορά μιας διεργασίας.

Τα πειράματα χαρακτηρίζονται από διαφορετικές τιμές παροχής ισχύος, εναλλακτικές τακτικές θέρμανσης και ψύξης και διαφορετική διάρκεια. Συνεπώς παρατηρούνται διαφορετικές διακυμάνσεις των τιμών και των μεγίστων της θερμοκρασίας.

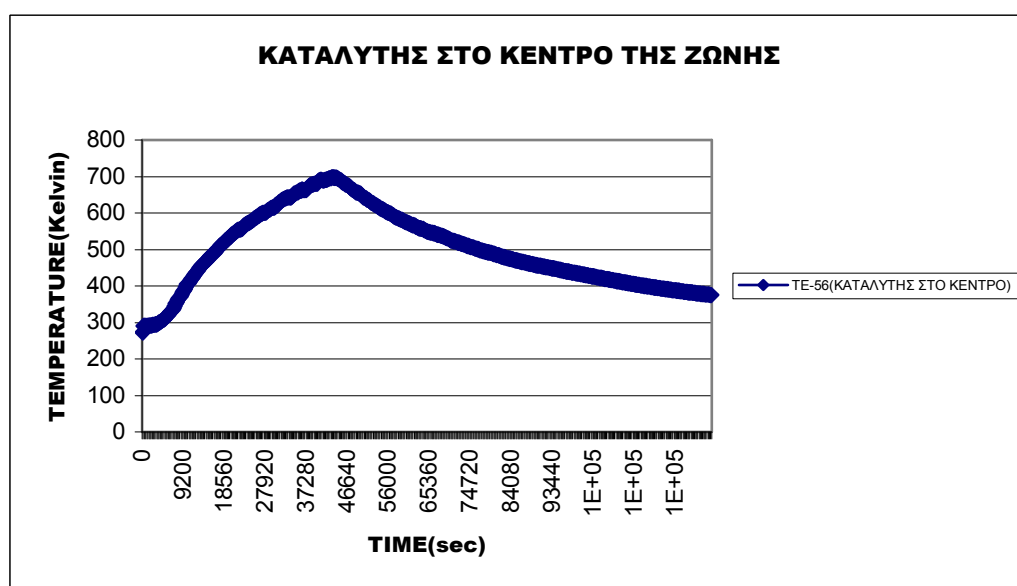
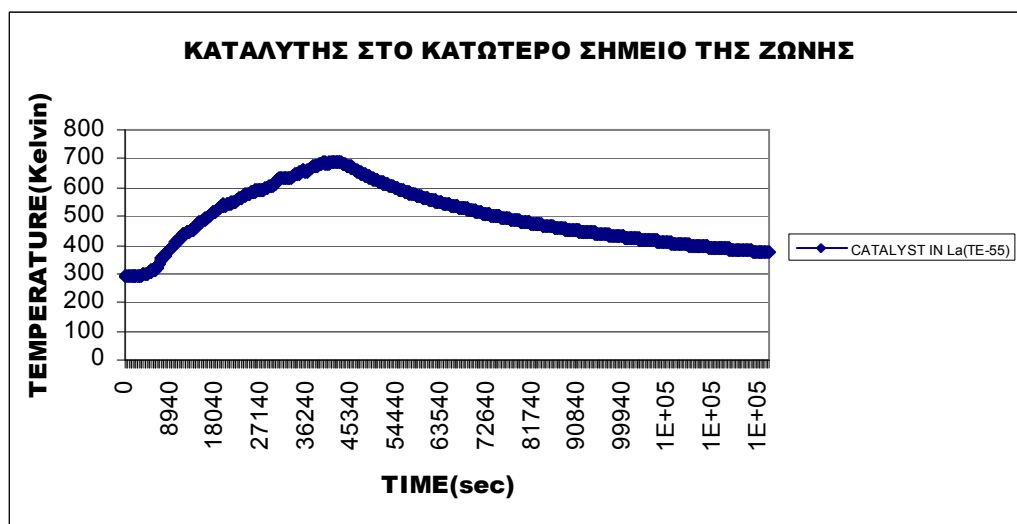
Από τη σειρά των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, επιλέχθηκαν τα τρία χαρακτηριστικότερα για τη λειτουργία της μονάδας, για να προσομοιωθούν και στη συνέχεια παρατίθενται οι γραφική τους απεικόνιση, καθώς και τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των πειραματικών δεδομένων από τη μονάδα και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την προσομοίωση αυτών στο μαθηματικό μοντέλο.

Για την λήψη των πειραματικών δεδομένων από τη μονάδα χρησιμοποιήθηκαν τόσο εσωτερικά, όσο και εξωτερικά θερμοστοιχεία τα οποία παρείχαν όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά της θερμοκρασίας.

Η λήψη των δεδομένων καθώς και η επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα SCADA FIX32, το οποίο πραγματοποιεί και τον εποπτικό έλεγχο της μονάδας.

### 3.2 Πρώτη πειραματική διαδικασία

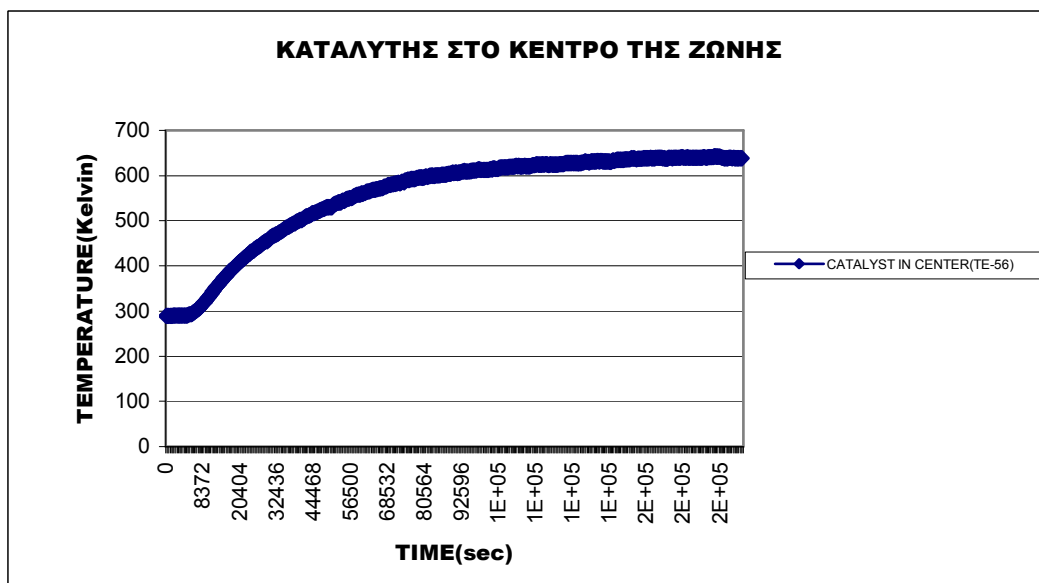
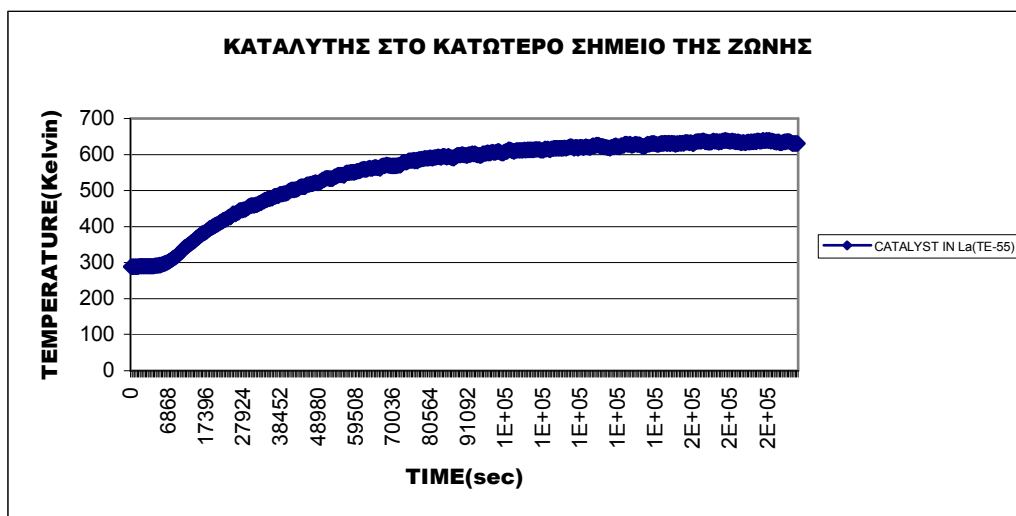
Κατά την πρώτη πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε αρχικά θέρμανση της τρίτης και τέταρτης ζώνης του φούρνου, όπου και βρίσκεται ο καταλύτης, με το 20% της συνολικής τους ισχύος, για 12 ώρες και στη συνέχεια ψύξη της μονάδας για 24 ώρες.

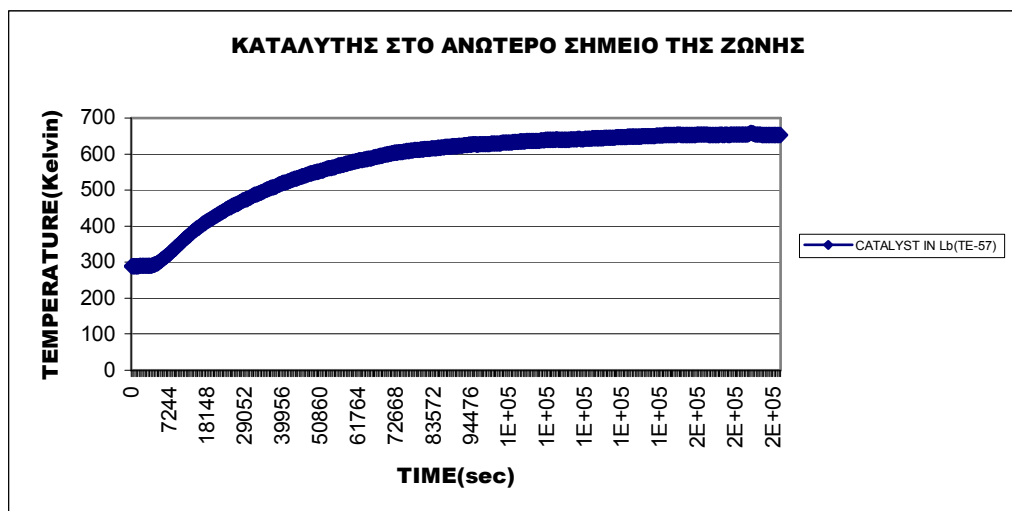


Εικόνα 3.1.α,β. Θερμοκρασιακό προφίλ του καταλύτη κατά την 1<sup>η</sup> πειραματική διαδικασία

### 3.3 Δεύτερη πειραματική διαδικασία

Κατά την δεύτερη πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε θέρμανση της τρίτης και τέταρτης ζώνης του φούρνου, παρέχοντας μόνο το 10% της συνολικής τους ισχύος. Σκοπός αυτού του πειράματος ήταν να παρατηρηθεί η συμπεριφορά, κυρίως του καταλύτη, αλλά και γενικότερα όλων των ζωνών του φούρνου (θερμαινόμενων ή μη), σε σταθερές συνθήκες θέρμανσης έως ότου να διαπιστωθεί σταθεροποίηση των συνθηκών λειτουργίας (steady state). Η συνολική διάρκεια του πειράματος ήταν 52 ώρες.





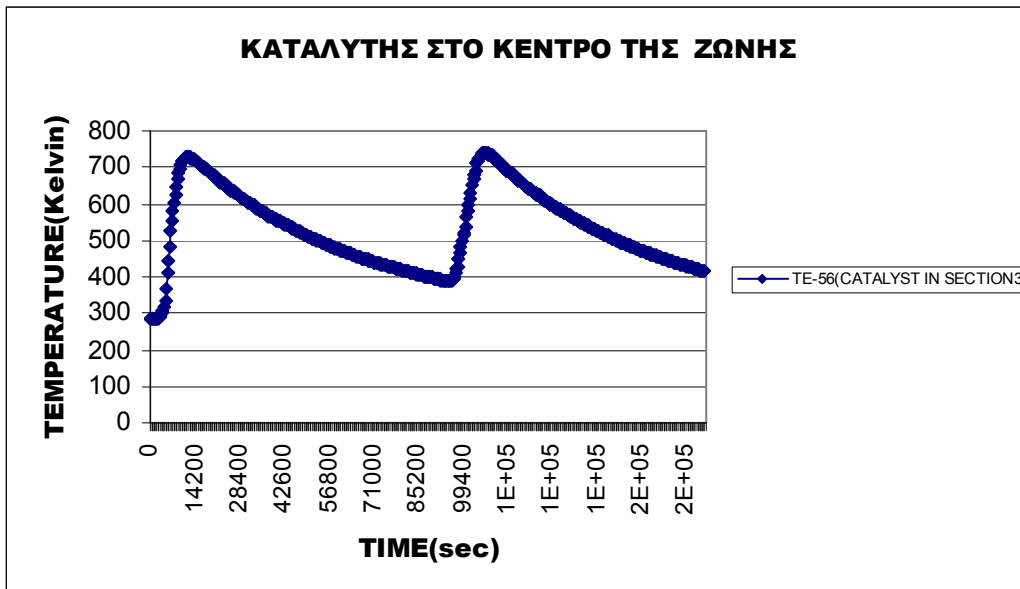
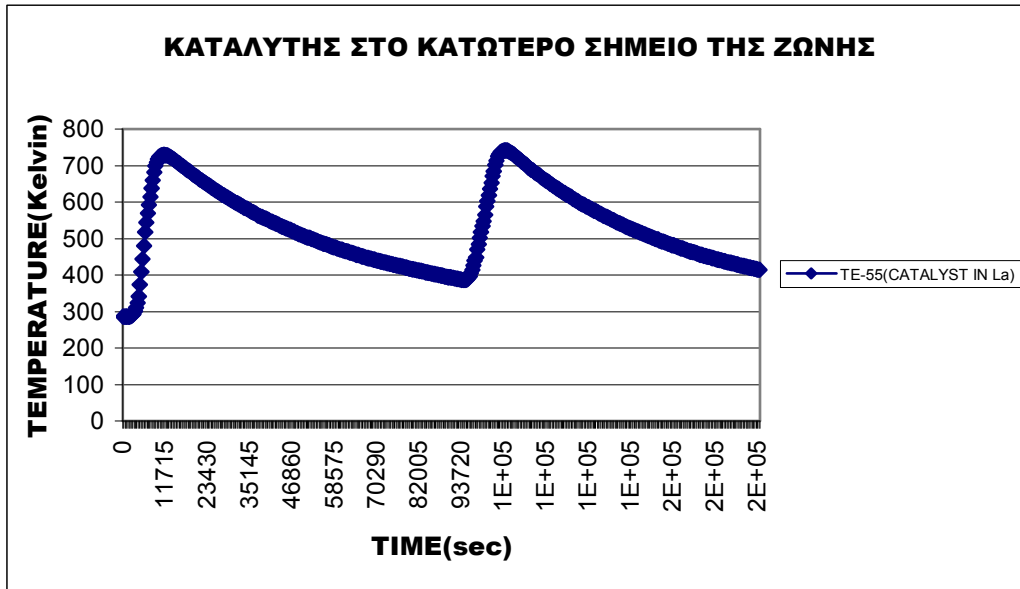
Εικόνα 3.2.α,β,γ. Θερμοκρασιακό προφίλ του καταλύτη κατά τη 2η πειραματική διαδικασία

### 3.4 Τρίτη πειραματική διαδικασία

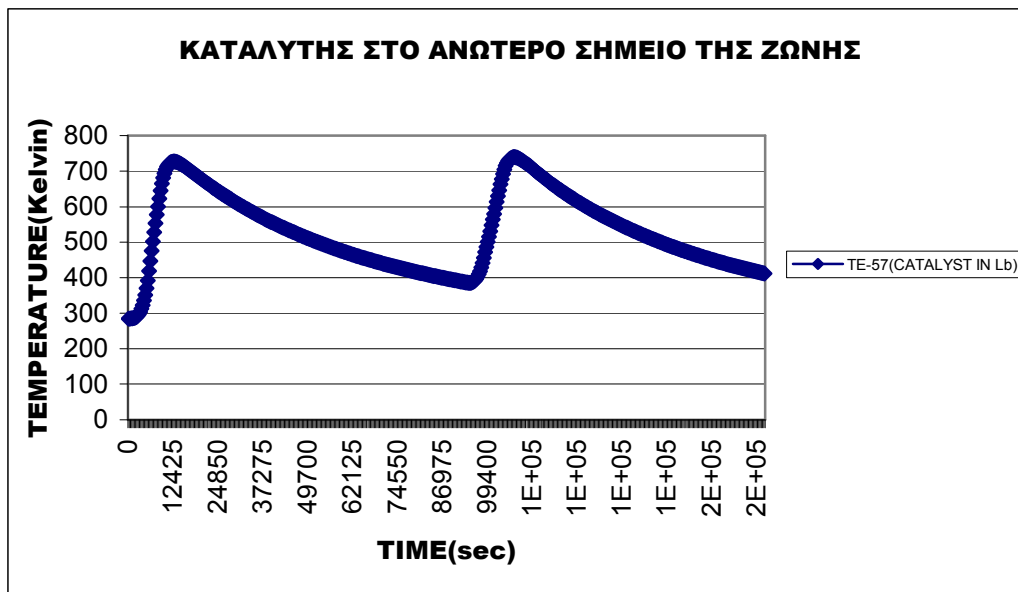
Κατά την τρίτη πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε αρχικά θέρμανση και των πέντε ζωνών του φούρνου, με το 40% της συνολικής τους ισχύος, για 2 ώρες, και ακολούθησε φυσική ψύξη, για 24 ώρες. Εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε επαναθέρμανση, πάλι και των πέντε ζωνών του φούρνου, με το 30% της συνολικής τους ισχύος, για 2 ώρες, και τέλος ψύξη.

Σκοπός αυτού του πειράματος υπήρξε ο έλεγχος της συνολικής συμπεριφοράς του φούρνου, τόσο κατά τη θέρμανση όσο και κατά την ψύξη του, σε συνθήκες που αναπαριστούν αυτές της πραγματικής διεργασίας.

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από αυτή την πειραματική διαδικασία παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον, καθώς αποτελούν μια αξιόπιστη πηγή πληροφοριών σχετικά με την απόκριση και τη γενικότερη θερμοκρασιακή συμπεριφορά του κάθε μοντέλου ξεχωριστά σε κάθε ζώνη.



Εικόνα 3.3,α,β. Θερμοκρασιακό προφίλ του καταλύτη κατά την 3<sup>η</sup> πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 3.3.γ. Θερμοκρασιακό προφίλ του καταλύτη κατά την 3<sup>η</sup> πειραματική διαδικασία.

### 3.5 Σύγκριση πειραματικών δεδομένων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης

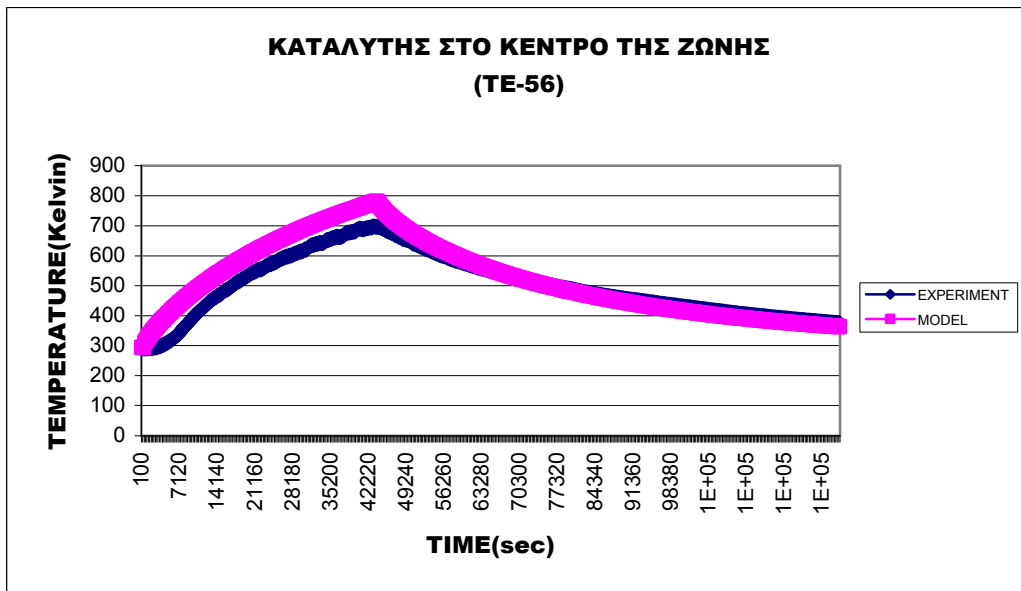
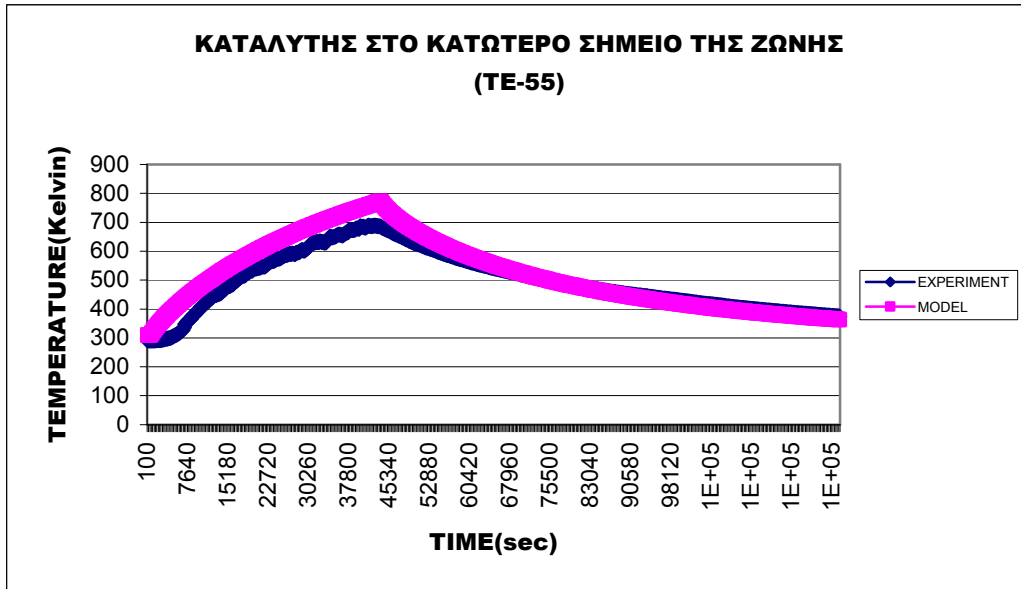
Παρακάτω ακολουθούν οι γραφικές που απεικονίζουν της σύγκριση μεταξύ κάθε μιας πειραματικής διαδικασίας με τα αντίστοιχα δεδομένα που προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου, με τις ίδιες αρχικές και λειτουργικές συνθήκες του κάθε πειράματος.

Η σύγκριση αυτή γίνεται ώστε να εξάγουμε τα συμπεράσματά μας ως προς την αξιοπιστία του μαθηματικού μοντέλου. Πολύ μεγάλες αποκλίσεις των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από τα πειραματικά δεδομένα καθιστούν αυτόματα οποιοδήποτε μαθηματικό μοντέλο αναξιόπιστο. Στην περίπτωση αυτή έχουμε δυο επιλογές. Είτε επιλέγουμε να προχωρήσουμε σε εκτίμηση κάποιων εκ των παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου ώστε να βελτιώσουμε την απόδοση του και την αξιοπιστία του, είτε απορρίπτουμε το μοντέλο που ήδη υπάρχει και προχωρούμε στην ανάπτυξη ενός νέου. Στην πρώτη περίπτωση η εκτίμηση των παραμέτρων ενός μαθηματικού μοντέλου γίνεται με τη χρήση σύνθετων στατιστικών μεθόδων και αφορά μόνο στις κρίσιμες παραμέτρους του συστήματος.

Στην περίπτωση που το μοντέλο μας συγκλίνει ικανοποιητικά στην πραγματική συμπεριφορά του συστήματος (οχι αποκλίσεις μεγαλύτερες του 5%) τότε θεωρείται

ότι προσομοιώνει με αξιοπιστία τη συμπεριφορά του συστήματος και εν συνεχεία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η βάση ενός ευρύτερου σχήματος ελέγχου.

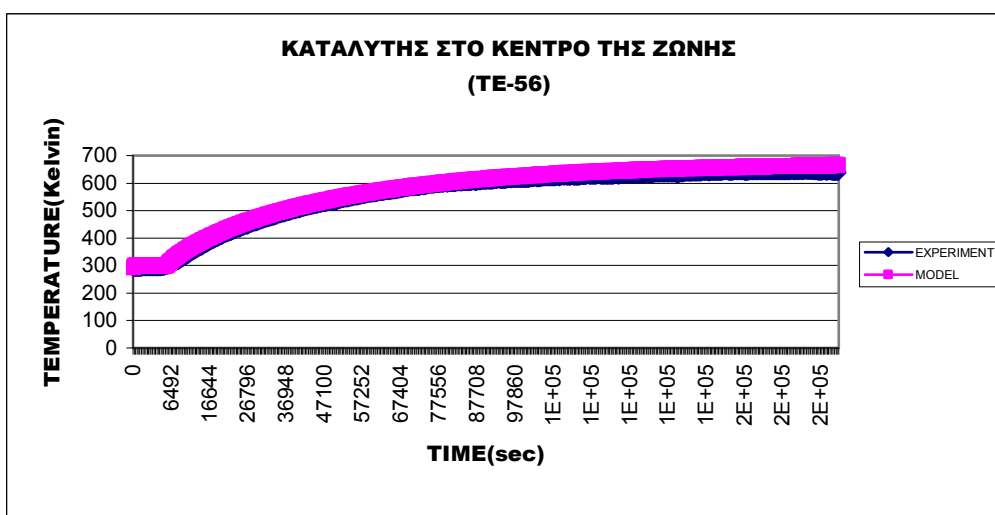
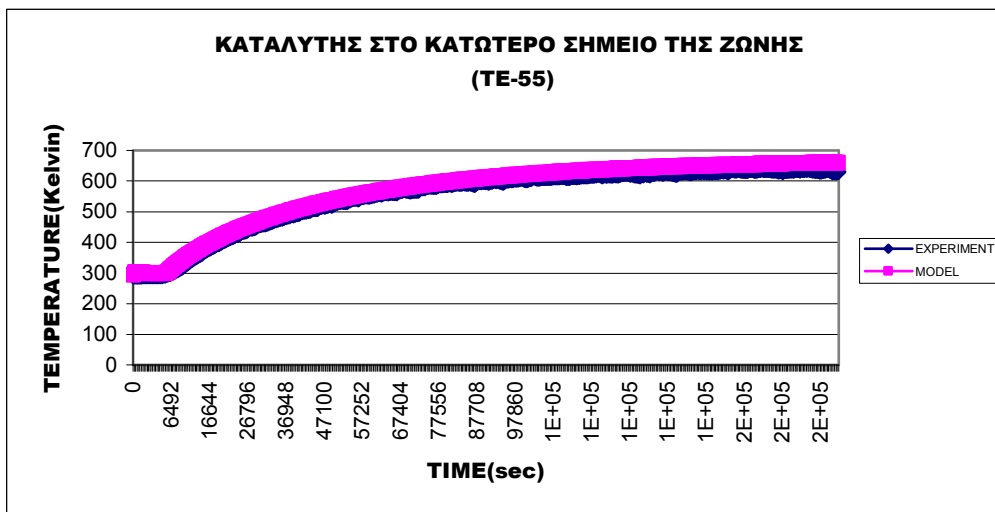
### 3.5.1 Σε συνθήκες 1<sup>ο</sup> πειράματος



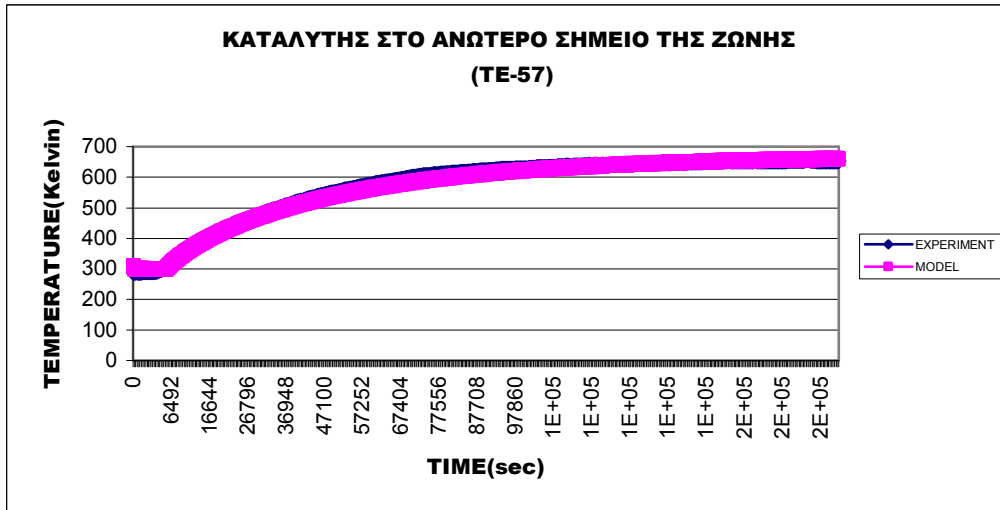
Εικόνα 3.4.α,β. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μαθηματικού μοντέλου σε συνθήκες του 1<sup>ο</sup> πειράματος – θερμοκρασιακό προφίλ του καταλύτη.



### 3.5.2 Σε συνθήκες 2<sup>οο</sup> πειράματος

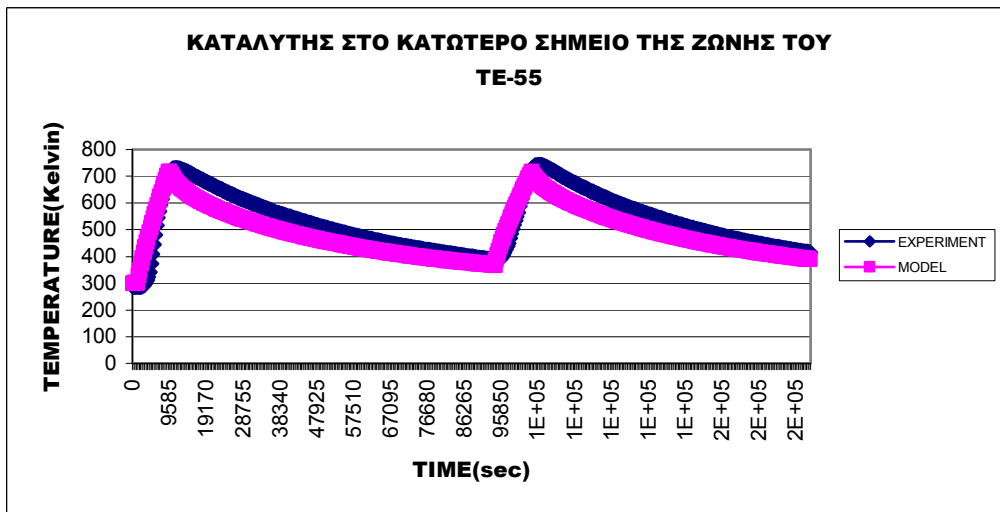


Εικόνα 3.5.α,β. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μαθηματικού μοντέλου σε συνθήκες του 2<sup>οο</sup> πειράματος – θερμοκρασιακό προφίλ του καταλύτη.

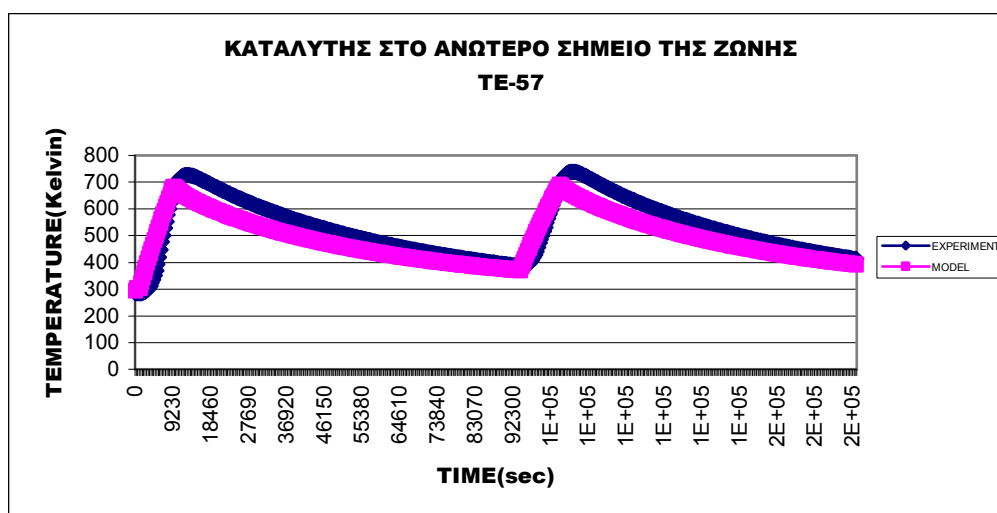
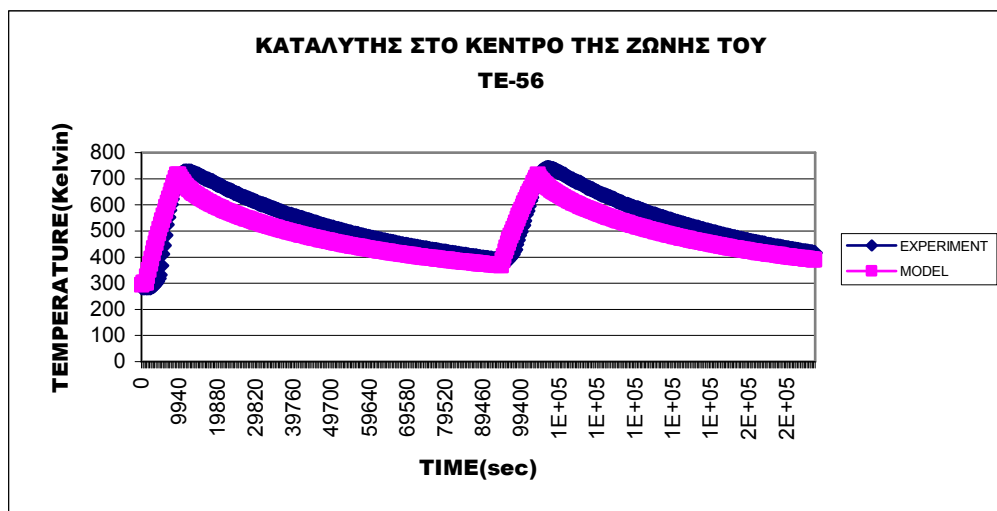


Εικόνα 3.5.γ. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μαθηματικού μοντέλου σε συνθήκες του 2<sup>ου</sup> πειράματος – θερμοκρασιακό προφίλ του καταλύτη.

### 3.5.3 Σε συνθήκες 3<sup>ου</sup> πειράματος



Εικόνα 3.6.α. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μαθηματικού μοντέλου σε συνθήκες του 3<sup>ου</sup> πειράματος – θερμοκρασιακό προφίλ του καταλύτη.



Εικόνα 3.6.β,γ. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων και αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μαθηματικού μοντέλου σε συνθήκες του 3<sup>ου</sup> πειράματος – θερμοκρασιακό προφίλ του καταλύτη.

### 3.6 Συμπεράσματα

Μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα παραπάνω ότι τα δεδομένα από τις περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν συγκλίνουν ικανοποιητικά με τα πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν από τη μονάδα. Συνεπώς έχουμε ένα μοντέλο που προσομοιώνει με αρκετή ακρίβεια τη διεργασία μας, άρα ένα μοντέλο το οποίο θα μπορούσε να θεωρηθεί αξιόπιστο. Για να επιβεβαιώσουμε αυτά μας τα συμπεράσματα προχωρήσαμε και στην εκτίμηση μερικών κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος. Για την εκτίμηση των παραμέτρων αυτών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος

της μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood). Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ

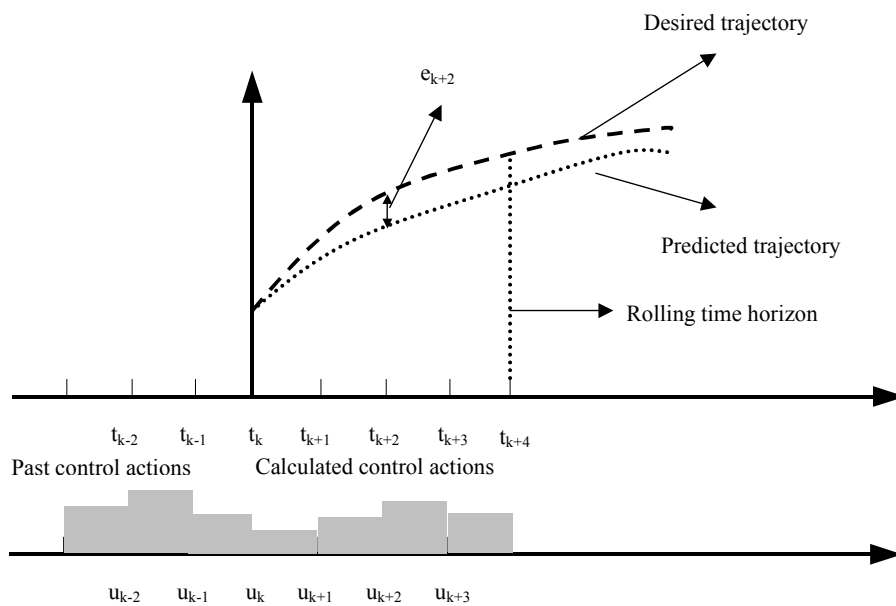
#### 4.1 Σύστημα Βελτιστου Ελεγχου βασισμένο σε προρρήσεις μοντέλου

Το σύστημα ελέγχου που βασίζεται σε μαθηματικό μοντέλο στηρίζεται στην αρχή του κυλιόμενου χρονικού ορίζοντα (rolling/moving horizon) κατά τον οποίο παρακολουθείται η απόκριση της διεργασίας και υπολογίζονται οι δράσεις του ελεγκτή. Πρώτα ορίζεται η επιθυμητή τροχιά απόκρισης (trajectory) της διεργασίας κατά τη διάρκεια του κυλιόμενου χρονικού ορίζοντα. Στη συνέχεια υπολογίζεται η απόκριση του συστήματος που οφείλεται στις παρελθούσες δράσεις του ελεγκτή και η απόκλιση από την επιθυμητή τροχιά. Υπολογίζονται οι δράσεις του ελεγκτή που ελαχιστοποιούν τη διαφορά ανάμεσα στην επιθυμητή και την προρρούμενη απόκριση της διεργασίας. Για να διατηρηθεί η σθεναρότητα του συστήματος ελέγχου επιβάλλονται περιορισμοί στο ρυθμό μεταβολής των χειραγωγούμενων μεταβλητών (δράσεις του ελεγκτή), αλλά και περιορισμοί στην απόκλιση τους από κάποια, πιθανώς ορισμένη, βέλτιστη τιμή των χειραγωγούμενων μεταβλητών σε μόνιμη κατάσταση. Συνεπώς, το σύστημα ελέγχου εκφράζεται σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση που περιλαμβάνει τουλάχιστον τρεις διακριτούς όρους:

- ο πρώτος όρος συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση της απόκλισης της προρρούμενης από την επιθυμητή τροχιά, μέσω των τετραγώνων του σφάλματος ανάμεσα στην επιθυμητή και πραγματική απόκριση,
- ο δεύτερος στην ελαχιστοποίηση της έκτασης των δράσεων του ελεγκτή, μέσω των τετραγώνων της μελλοντικής τιμής των αντίστοιχων χειραγωγούμενων μεταβλητών από την αμέσως προηγούμενη,
- ο τρίτος στην ελαχιστοποίηση της απόστασης των χειραγωγούμενων μεταβλητών από το σημείο βέλτιστης λειτουργίας σε μόνιμη κατάσταση, μέσω των τετραγώνων της απόστασης της τιμής της κάθε χειραγωγούμενης μεταβλητής από τη τιμή της στη βέλτιστη μόνιμη κατάσταση.

Συντελεστές βαρύτητας που εισάγονται στην αντικειμενική συνάρτηση αποδίδουν τη σχετική σπουδαιότητα των τριών προαναφερθέντων όρων για κάθε σχετική μεταβλητή. Η αντικειμενική συνάρτηση (ή συνάρτηση κόστους) επιλύεται υποκείμενη στο μη γραμμικό μοντέλο της διεργασίας, μαζί με τους περιορισμούς που αφορούν στην ασφαλή λειτουργία της και εκφράζονται ως όρια μεταβλητών. Ανώτερα και κατώτερα όρια διακύμανσης των μεταβλητών ελέγχου και εισόδου επιβάλλονται στο πρόβλημα. Επίσης, είναι δυνατή η προσθήκη στοχαστικών μοντέλων για την περιγραφή στοχαστικών διαταραχών του συστήματος. Σε κάθε χρονική στιγμή εφαρμόζεται η δράση ελέγχου για το καθορισμένο χρονικό διάστημα και έπειτα οι μετρήσεις της διεργασίας χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του σφάλματος μοντέλου - διεργασίας. Στο επόμενο βήμα το σύστημα ελέγχου μέσω ανάδρασης του σφάλματος διορθώνει τη δράση του [5,7,8].

Η αρχή λειτουργίας ενός συστήματος βέλτιστου ελέγχου παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 4.1 [5].

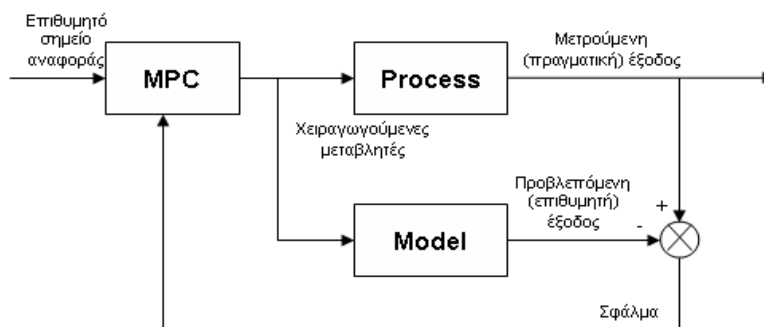


**Εικόνα 4.1 Αρχή λειτουργίας ενός συστήματος βέλτιστου ελέγχου βασισμένου σε προρρήσεις μοντέλου**

## 4.2 Δομή συστήματος Βέλτιστου Ελέγχου βασισμένου σε προρρήσεις μοντέλου

Η δομή του συστήματος ελέγχου αποτελεί πρωταρχικό στοιχείο για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου σχεδίου ελέγχου για τη διεργασία. Περιγράφεται από την επιλογή των ρυθμιζόμενων και χειραγωγούμενων μεταβλητών για την επίτευξη των στόχων του συστήματος ελέγχου. Αρχικά προσδιορίζονται επακριβώς οι στόχοι του συστήματος ελέγχου για τη διεργασία. Συνήθως οι στόχοι του ελέγχου αφορούν βέλτιστες τιμές για τις ποιοτικές προδιαγραφές του προϊόντος, τη δυναμικότητα, τη μετατροπή τροφοδοσίας, την εκλεκτικότητα των αντιδράσεων, την κερδοφορία της διεργασίας, τα περιθώρια ευστάθειας, την ευρωστία της διεργασίας κλπ. Είναι προφανές ότι αρκετοί στόχοι μπορούν να συνδεθούν άμεσα με μεταβλητές της διεργασίας ενώ άλλοι στόχοι χρειάζονται ένα πιο πολύπλοκο και αναλυτικό τρόπο για τον προσδιορισμό τους. Έτσι οι αντικειμενικοί στόχοι για το σύστημα ελέγχου κατηγοριοποιούνται σε άμεσους και έμμεσους. Οι άμεσοι στόχοι περιγράφονται πλήρως από μια μεταβλητή της διεργασίας, όπως για παράδειγμα η σύσταση του τελικού προϊόντος που χαρακτηρίζει με επάρκεια την ποιότητα ή η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων της διεργασίας που βελτιώνει σημαντικά την κερδοφορία. Η ικανοποίηση του αντίστοιχου στόχου του ελέγχου μπορεί να επιτευχθεί με τη διατήρηση της εν λόγω μεταβλητής στο επιθυμητό επίπεδο ή εντός ενός εύρους τιμών γύρω από την επιθυμητή τιμή. Ο μερικός έλεγχος που στηρίζεται στην αρχή ότι μερικοί μόνο στόχοι ακολουθούνται αυστηρά ενώ ένα υποσύνολο αυτών ακολουθείται με πιο χαλαρό τρόπο είναι μια συνήθης επιλογή στο σχεδιασμό της δομής του συστήματος ελέγχου. Αντίθετα, οι έμμεσοι στόχοι του ελέγχου είναι πιο αφηρημένοι και μπορούν να εκτιμηθούν μόνο μέσω συναρτησιακών σχέσεων πολύ συχνά μη γραμμικών ανάμεσα στις μεταβλητές της διεργασίας. Αυτό τους καθιστά δύσκολους στη μέτρηση ή τον υπολογισμό τους σε συνθήκες πραγματικού χρόνου. Τυπικά παραδείγματα έμμεσων στόχων ελέγχου αποτελούν η μετατροπή της τροφοδοσίας σε προϊόντα και η εκλεκτικότητα των αντιδράσεων μιας διεργασίας. Η απουσία μετρήσεων των έμμεσων στόχων σε πραγματικό χρόνο κάνει τη χρήση ενός μοντέλου με καλά χαρακτηριστικά πρόβλεψης των καταστάσεων της διεργασίας ιδιαίτερα σημαντική [5,7,8,9].

Το σύστημα βέλτιστου ελέγχου καταstrώνεται με την επιλογή των κατάλληλων ρυθμιζόμενων και χειραγωγούμενων μεταβλητών και αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία, η σύνδεση των οποίων παρουσιάζεται στην εικόνα 4.2:



Εικόνα 4.2 Δομή του σχήματος βέλτιστου ελέγχου βασισμένου σε προρρήσεις μοντέλου

- την καταγραφή των μετρήσεων για τις ρυθμιζόμενες μεταβλητές και όλες τις διαθέσιμες μεταβλητές κατάστασης της διεργασίας,
- την εκτίμηση των μη μετρήσιμων καταστάσεων του μοντέλου της διεργασίας καθώς και των στοχαστικά μεταβαλλόμενων παραμέτρων του μοντέλου ,
- τον αλγόριθμο βέλτιστου ελέγχου (MPC) που στηρίζεται σε προρρήσεις του μη γραμμικού μοντέλου και υπολογίζει τη βέλτιστη ακολουθία δράσεων για τις χειραγωγούμενες μεταβλητές ώστε να ικανοποιηθεί η τροχιά (πορεία) αναφοράς για τις ρυθμιζόμενες μεταβλητές,
- τη μετάδοση των υπολογισμένων τιμών για τις χειραγωγούμενες μεταβλητές στα τελικά στοιχεία ελέγχου (ενεργοποιητές) της διεργασίας.

### 4.3 Αλγόριθμος βέλτιστου ελέγχου

Ο αλγόριθμος του βελτίστου ελέγχου βασίζεται σε προρρήσεις του μοντέλου για τη μελλοντική απόκριση της διεργασίας εξ αιτίας των επιδράσεων που έχουν στις μεταβλητές εξόδου οι παρελθούσες και παρούσες δράσεις (μεταβλητές εισόδου). Σημαντική παράμετρος είναι ο χρονικός ορίζοντας που εκτείνεται στο μέλλον για τον οποίο θα υπολογισθούν οι προρρήσεις του μοντέλου (ορίζοντας πρόρρησης). Η προρρούμενη απόκριση του συστήματος μπορεί να συγκριθεί με κάποια επιθυμητή απόκριση (τροχιά) του συστήματος σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές για τη



δυναμική επίδοση της διεργασίας. Στην περίπτωση που η προρρούμενη απόκριση αποκλίνει της επιθυμητής μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις μεταβλητές εισόδου (χειραγωγούμενες μεταβλητές) σε μελλοντικές χρονικές στιγμές για να οδηγήσουμε το σύστημα στην επιθυμητή κατάσταση. Η επιλογή των κατάλληλων θέσεων για τις μεταβλητές εισόδου επιτυγχάνεται μέσω της βέλτιστης ικανοποίησης ενός δείκτη απόδοσης για το σύστημα ελέγχου. Η ακολουθία των μελλοντικών τιμών των μεταβλητών εισόδου που υπολογίζονται βρίσκεται εντός ενός ορισμένου χρονικού ορίζοντα (ορίζοντας ελέγχου). Ο ορίζοντας ελέγχου μπορεί να είναι μικρότερος ή ίσος του ορίζοντα πρόρρησης. Οι μεταβλητές εισόδου διατηρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου δειγματοληψίας της διεργασίας.

Σε κάθε χρονική περίοδο εφαρμόζεται η πρώτη δράση ελέγχου, που προκύπτει από την ακολουθία υπολογισμού, και λαμβάνεται μια νέα μέτρηση της απόκρισης του συστήματος. Η διαφορά ανάμεσα στην πραγματική απόκριση του συστήματος και στην προβλεπόμενη από το μοντέλο αποτελεί το σφάλμα της διεργασίας. Το υπολογιζόμενο σφάλμα προσδιορίζει τη διόρθωση των μελλοντικών προρρήσεων του μοντέλου. Συνήθως θεωρείται ότι το μετρούμενο σφάλμα στη συμπεριφορά του συστήματος παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα πρόρρησης. Η ανάδραση του σφάλματος της διεργασίας εισάγει ολοκληρωτική δράση στο σύστημα και κατ' επέκταση απαλοιφή της απόκλισης της διεργασίας από την επιθυμητή τροχιά σε σταθερή κατάσταση.

Το σύστημα βέλτιστου ελέγχου ακολουθεί τον εξής αλγόριθμο:

$$\min_u \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{k=1}^{N_p} w_i^y (\hat{y}_i - y_{sp,i})_k^2 + \sum_{i=1}^{N_I} \sum_{k=1}^{N_C} w_i^u (u_i - u_{ss,i})_k^2 \quad (4.1)$$

ως προς τους περιορισμούς

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$$

$$\mathbf{e}_k = (\mathbf{y}_m - \hat{\mathbf{y}})_k$$

$$\hat{\mathbf{y}}_{k+i} = \mathbf{y}_{k+i} + \mathbf{e}_k$$

$$\mathbf{u}^l \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^u$$

$$N_p = T_p/T_I, \quad N_C = T_C/T_I$$

---

Όπου τα  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{u}$  και  $\mathbf{y}$  αντιστοιχούν σε σταθερά διανύσματα των μεταβλητών διαχείρισης και εξόδου του συστήματος. Τα σύμβολα  $\mathbf{f}$  και  $\mathbf{g}$  εκφράζουν τα σετ των διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων του μοντέλου της διεργασίας. Το διάνυσμα  $\hat{\mathbf{y}}$  εκφράζει τις προβλέψεις που αφορούν στις μεταβλητές του συστήματος και περιλαμβάνουν το βαθμό συμμετοχής του βέλτιστου όρου στην πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του μοντέλου. Το διάνυσμα  $\mathbf{y}_{sp}$  εκφράζει την επιθυμητή απόκριση των μεταβλητών εξόδου του συστήματος. Τα σύμβολα  $\mathbf{w}^u$  και  $\mathbf{w}^y$  αποτελούν τους συντελεστές στάθμισης για την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου. Αποτελούν και τις παραμέτρους για το σύστημα ελέγχου καθώς επιτρέπουν την αλλαγή των δυναμικών χαρακτηριστικών [5].

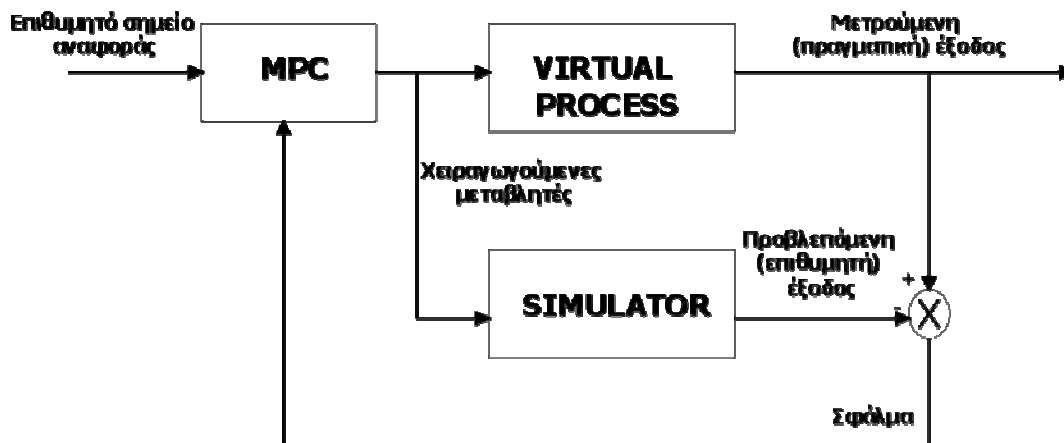
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΟΝΑΔΑ CPS

#### 5.1 Εφαρμογή του σχήματος ελέγχου σε επίπεδο προσομοίωσης

Ο έλεγχος της μονάδας CPS πραγματοποιήθηκε αρχικά σε επίπεδο προσομοίωσης ώστε να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα στο σχήμα ελέγχου που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες συμπεριφορές της πιλοτικής μονάδας.

Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται δυο εκδοχές του μαθηματικού μοντέλου της διεργασίας. Η μια εκδοχή αντιπροσωπεύει εικονικά την πραγματική διεργασία (Virtual Process) και η δεύτερη, στην οποία έχουν εσκεμένα εισαχθεί κάποια σφάλματα στις τιμές κρίσιμων παραμέτρων, τον προσομοιωτή της διεργασίας (Simulator).

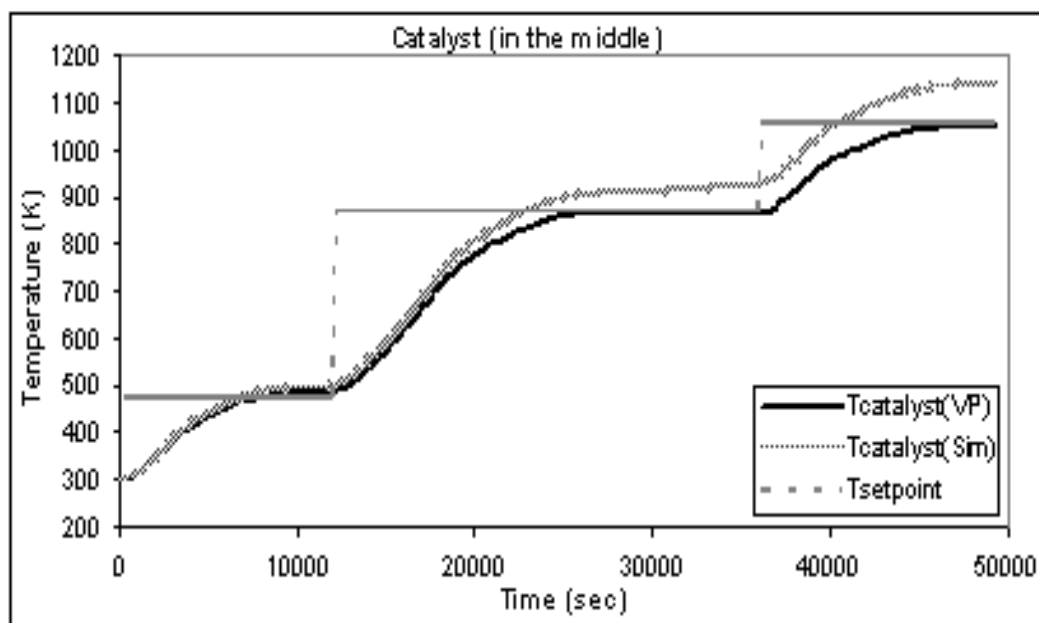


Εικόνα 5.1. Δομή του σχήματος βέλτιστου ελέγχου βασισμένου σε προρρήσεις μοντέλου για τον έλεγχο της μονάδας σε επίπεδο προσομοίωσης

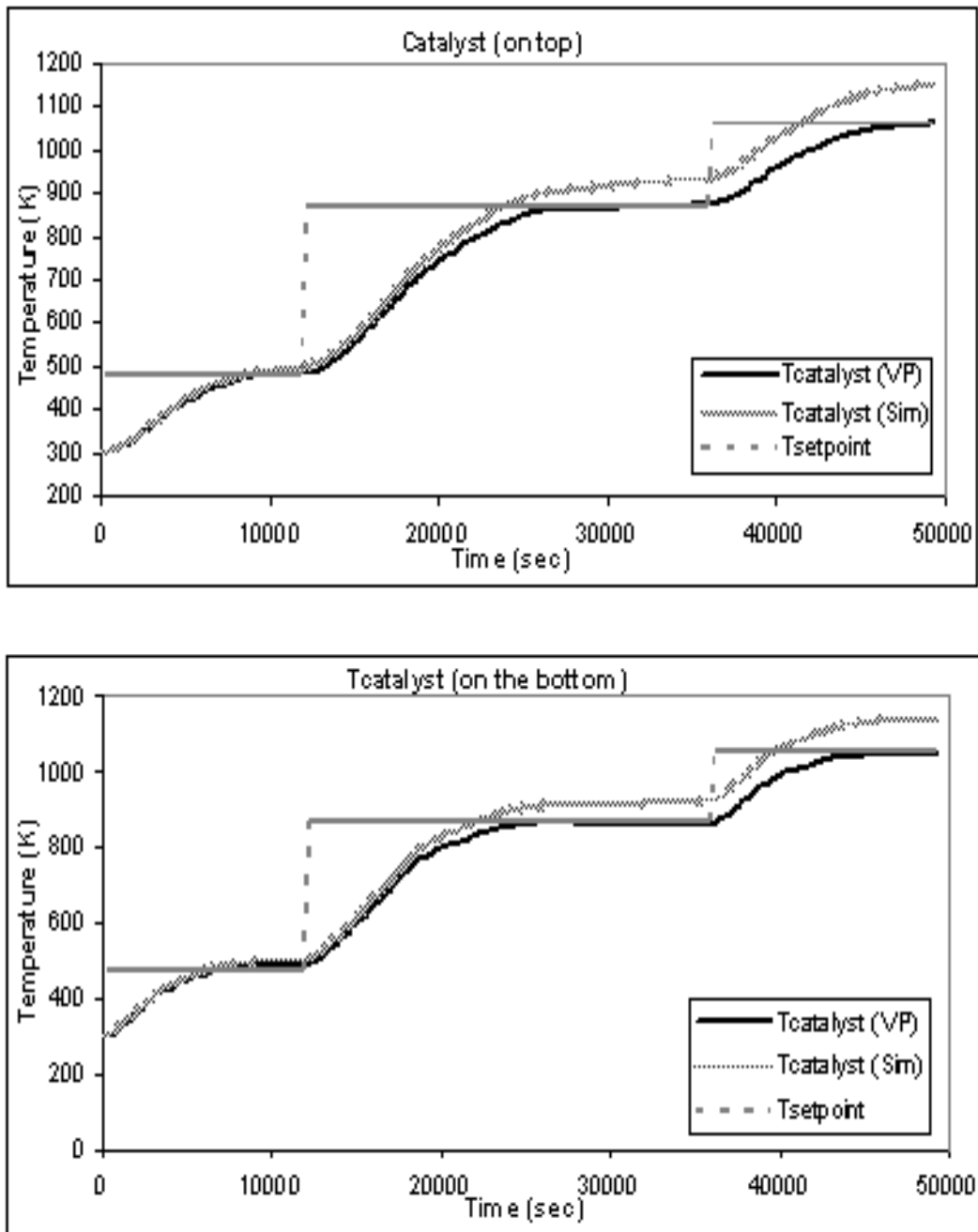
Ακολούθησε μια σειρά από δυναμικές προσομοιώσεις που αποσκοπούσε στον καθορισμό των παραμέτρων του συστήματος βέλτιστου ελέγχου όπως για παράδειγμα των ειδικών συντελεστών βάρους στη συνάρτηση κόστους (αντικειμενική συνάρτηση).

Ο χρονικός ορίζοντας ελέγχου της διεργασίας ορίστηκε στα 1200 sec, ίσος με το χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης. Αυτός χωρίζεται σε πέντε διαστήματα ελέγχου το καθένα εκ των οποίων ορίζεται στα 240 sec. Η προθερμανση πραγματοποιήθηκε σε τρία στάδια (τρεις προκαθορισμένες τιμές αναφοράς της θερμοκρασίας) και ο χρόνος παραμονής σε κάθε θερμοκρασία ορίστηκε ίσος με τον αντίστοιχο χρόνο της πραγματικής διεργασίας με βάση το πρωτόκολλο απενεργοποίησης καταλυτών όπως έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο [1]. Η πρώτη τιμή αναφοράς (setpoint) της θερμοκρασίας καθορίστηκε στους 205°C (478 K), η δεύτερη στους 595 °C (868 K) και η τρίτη στους 783 °C (1056 K).

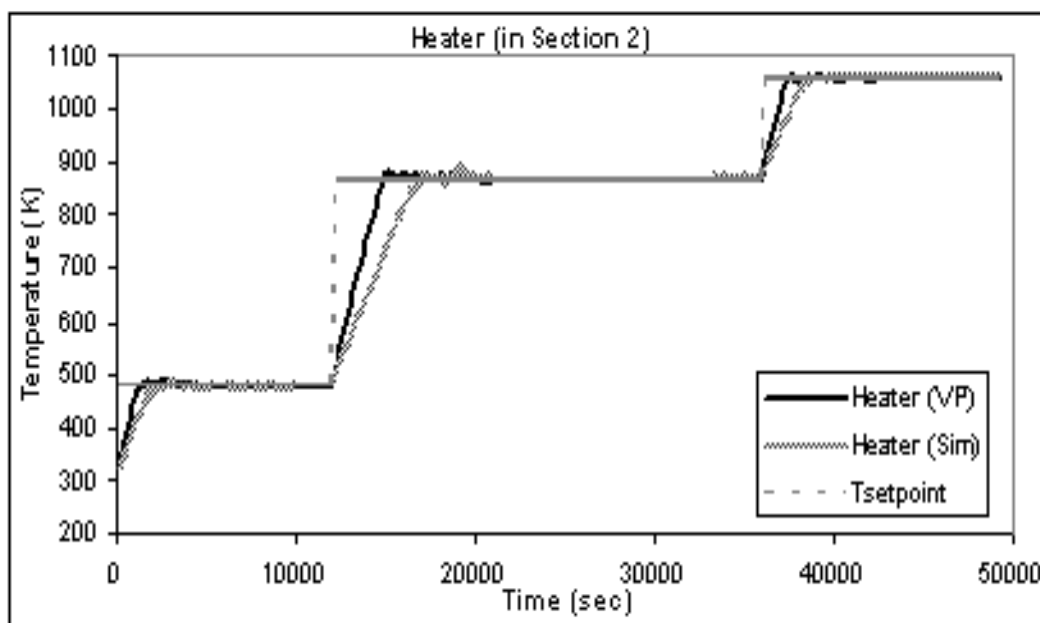
Στην εικόνα 5.2 μπορούμε να δούμε το θερμοκρασιακό προφίλ τριών σημείων του καταλύτη και ενός σημείου της ζώνης θέρμανσης όπως προέκυψαν από την εφαρμογή του σχήματος βέλτιστου προρρητικού ελέγχου σε επίπεδο προσομοίωσης.



Εικόνα 5.2.α. Αποτελέσματα της εφαρμογής του σχήματος βέλτιστου ελέγχου σε επίπεδο προσομοίωσης



Εικόνα 5.2.β.γ. Αποτελέσματα της εφαρμογής του σχήματος βέλτιστου ελέγχου σε επίπεδο προσομοίωσης



Εικόνα 5.2.δ. Αποτελέσματα της εφαρμογής του σχήματος βέλτιστου ελέγχου σε επίπεδο προσομοίωσης

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω αποτελέσματα το σύστημα ελέγχου ανταποκρίνεται θετικά σε επίπεδο προσομοίωσης. Καταφέρνει να διορθώσει τα σφάλματα που εσκεμένα έχουν εισαχθεί στην εικονική διεργασία και να επιτύχει την τήρηση του πρωτοκόλου απενεργοποίησης του καταλύτη.

Έτσι μπορούμε στη συνέχεια να προχωρήσουμε στην απευθείας εφαρμογή του σχήματος ελέγχου στην πιλοτική μονάδα.

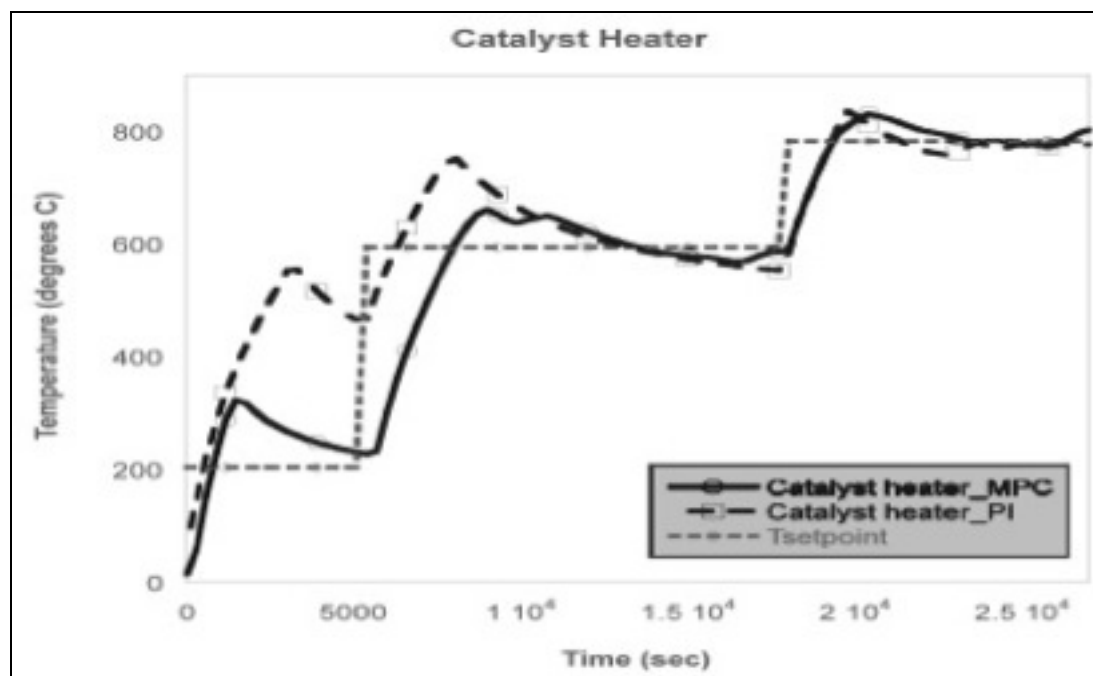
## 5.2 Απευθείας εφαρμογή του σχήματος ελέγχου στην πιλοτική μονάδα

Για τον έλεγχο της διεργασίας με το σύστημα βέλτιστου ελέγχου ο χρονικός ορίζοντας του συστήματος καθορίστηκε στα 1200sec και διαιρείται σε πέντε διαστήματα ελέγχου. Δηλαδή το διάστημα ελέγχου της διεργασίας καθορίζεται στα 240 sec. Το μοντέλο επικοινωνεί με τη μονάδα μέσω δυο αρχείων επικοινωνίας του Excel. Στα αρχεία αυτά βρίσκονται όλες οι τιμές των μεταβλητών της διεργασίας και μέσω των αρχείων αυτών αποστέλλονται στη CPS οι νέες τιμές των μεταβλητών ελέγχου. Επίσης στα αρχεία αυτά υπολογίζεται και το σφάλμα της διεργασίας το οποίο ανατροφοδοτείται στο σύστημα βέλτιστου ελέγχου.

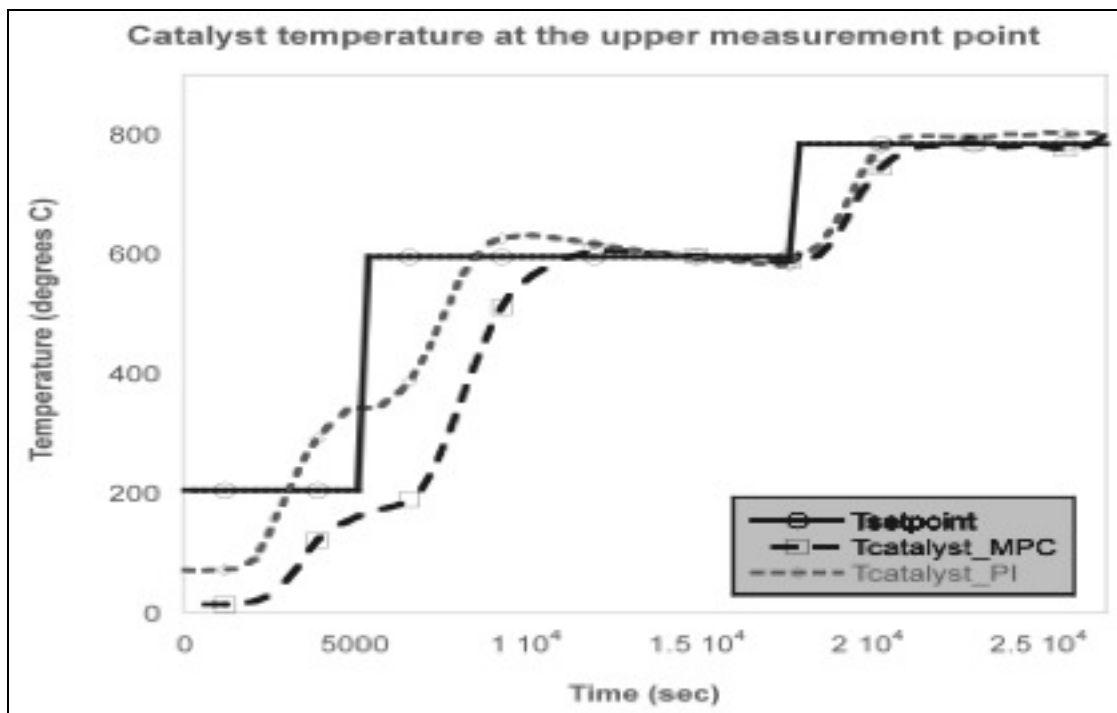
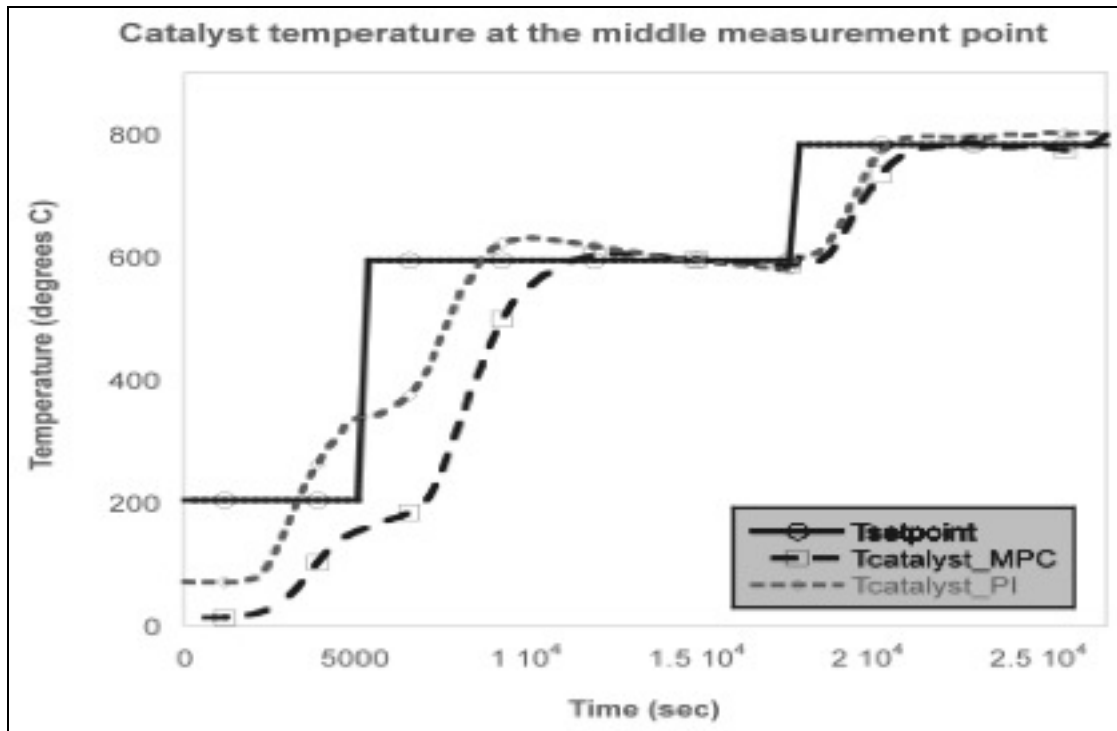
Κατά την εκκίνηση ενός πειράματος πρώτα γίνεται αρχικοποίηση των τιμών των μεταβλητών στο μαθηματικό μοντέλο βάσει των δεδομένων που παρέχονται από τη CPS. Εν συνεχεία τίθεται σε λειτουργία η μονάδα και παράλληλα ξεκινά και η προσομοίωση της διεργασίας από το μοντέλο.

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία προσομοίωσης και από τη μονάδα γίνει λήψη των τιμών για το ίδιο χρονικό διάστημα για το οποίο έγινε και η προσομοίωση και προκύψει το σφάλμα της διεργασίας, υπολογίζονται από το σύστημα βέλτιστου ελέγχου οι τιμές των μεταβλητών ελέγχου για το διάστημα των επόμενων 1200 δευτερολέπτων. Οι νέες τιμές ανατροφοδοτούνται στη μονάδα μέσω των αρχείων επικοινωνίας καθώς και στο μαθηματικό μοντέλο και στα επόμενα 240 sec προκύπτει το νέο σφάλμα της διεργασίας σε σχέση με την πρόβλεψη του μοντέλου το οποίο ανατροφοδοτείται στο σύστημα βέλτιστου ελέγχου μαζί με όλες τις νέες τιμές των μεταβλητών του συστήματος, πάλι μέσω των αρχείων επικοινωνίας, και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Στην εικόνα 5.3 μπορούμε να δούμε τα αποτελέσματα από την απευθείας εφαρμογή του σχήματος ελέγχου στην πιλοτική μονάδα.



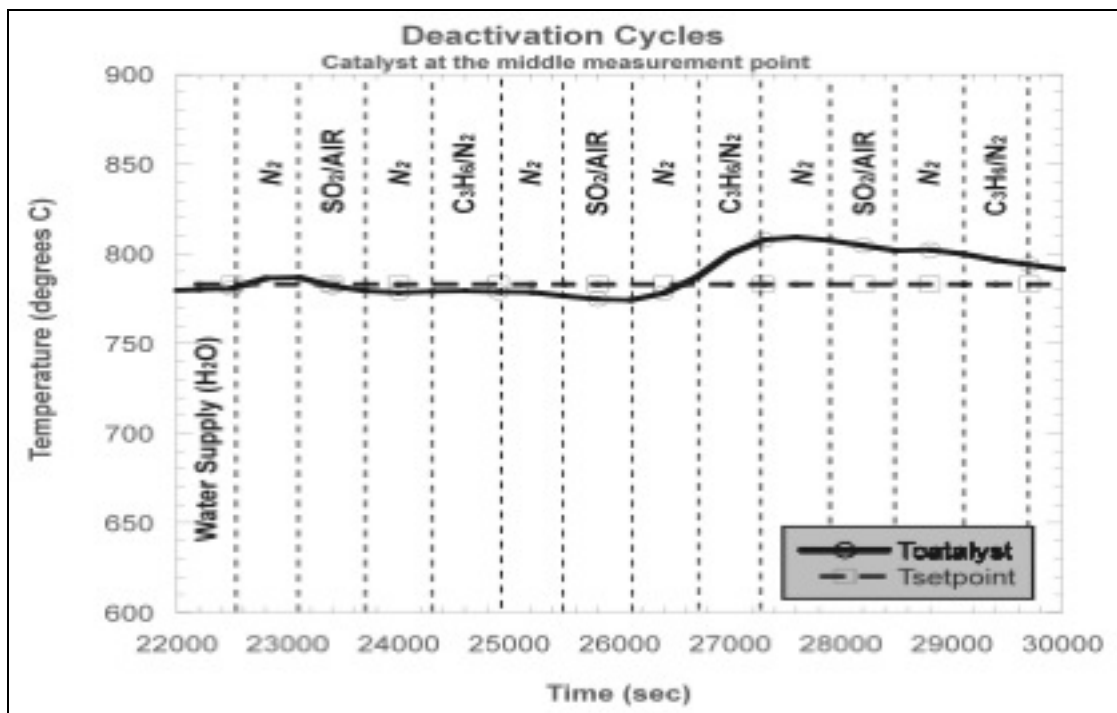
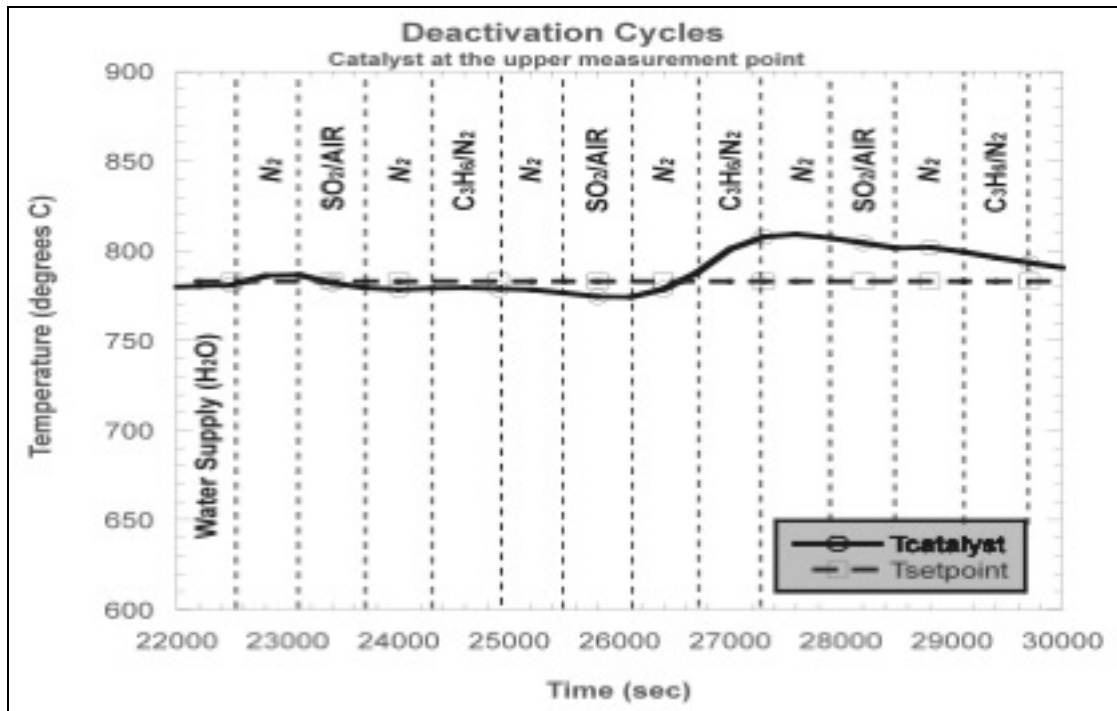
Εικόνα 5.3.α. Αποτελέσματα της απευθείας εφαρμογής του σχήματος βέλτιστου ελέγχου στη μονάδα CPS



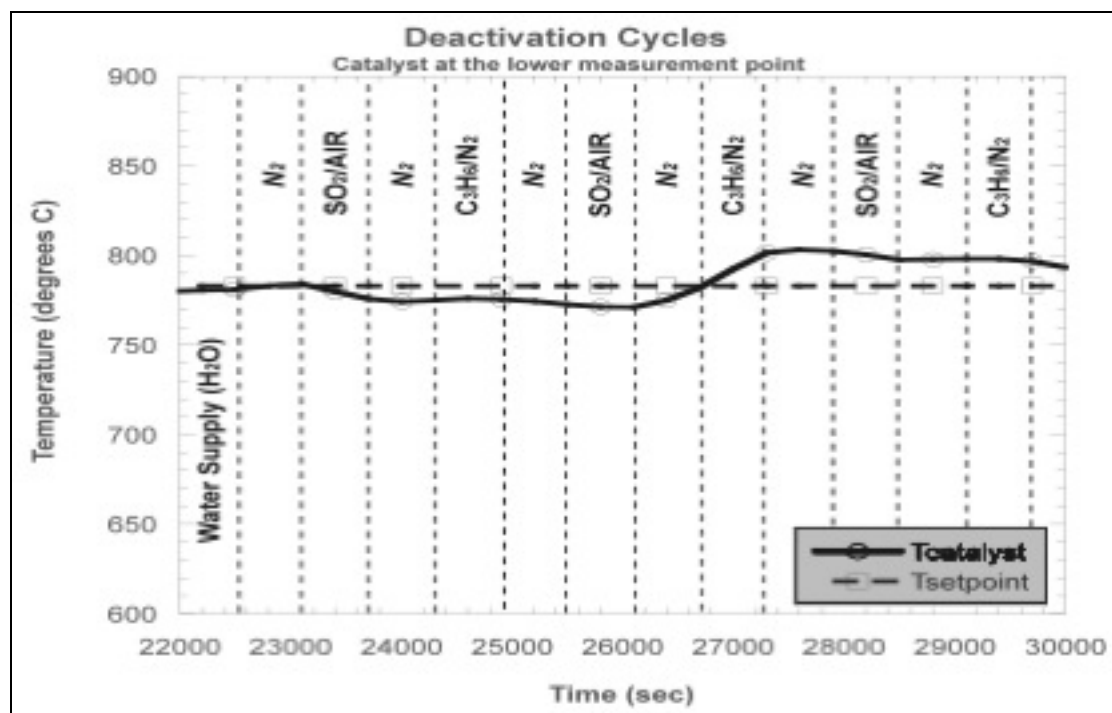
Εικόνα 5.3.β,γ. Αποτελέσματα της απευθείας εφαρμογής του σχήματος βέλτιστου ελέγχου στη μονάδα CPS

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.4, κατά τη διάρκεια που εκτελούνται οι κύκλοι απενεργοποίησης του καταλύτη με τις εναλλαγές των ρευμάτων των αερίων, το σύστημα ελέγχου ανταποκρίνεται με αξιοπιστία και εμφανίζει βελτιωμένη απόδοση σε σχέση με το ήδη υπάρχον συμβατικό σύστημα ελέγχου της μονάδας.





Εικόνα 5.4.α,β. Αποτελέσματα της απευθείας εφαρμογής του σχήματος βέλτιστου ελέγχου στη μονάδα CPS κατά τη διάρκεια των κύκλων απενεργοποίησης του καταλύτη



Εικόνα 5.4.γ. Αποτελέσματα της απευθείας εφαρμογής του σχήματος βέλτιστου ελέγχου στη μονάδα CPS κατά τη διάρκεια των κύκλων απενεργοποίησης του καταλύτη

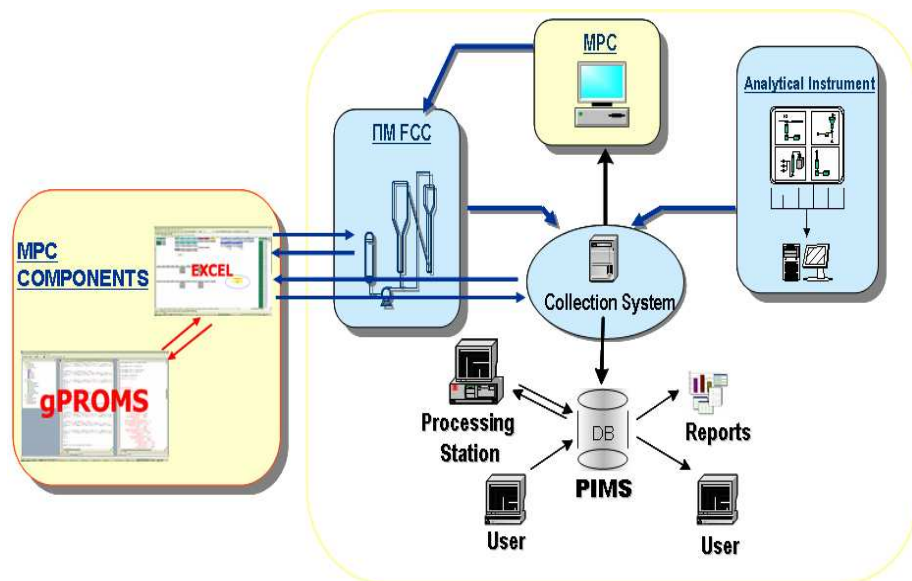
Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα η χρήση του σχήματος Βέλτιστου Ελέγχου βελτιώνει σημαντικά τη θερμοκρασιακή συμπεριφορά του αντιδραστήρα.

Η απόκριση του συστήματος με τη χρήση του Βέλτιστου ελεγκτή είναι ταχύτερη και επιπλέον δεν παρατηρείται μεγάλη υπερανύψωση της θερμοκρασίας όπως συμβαίνει στην περίπτωση του ελέγχου με συμβατικούς PI ελεγκτές.

### 5.3 Αυτοματοποίηση της διεργασίας

Η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου της μονάδας καθώς και του συστήματος βέλτιστου ελέγχου έγινε σε περιβάλλον gPROMS, ενώ ο έλεγχος της μονάδας πραγματοποιείται από ένα σύστημα εποπτικού ελέγχου (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA). Για την αυτοματοποιημένη μεταφορά δεδομένων και την ενδοεπικοινωνία των μοντέλων αναπτύχθηκε λογισμικό σε αντικειμενοστραφή γλώσσα προγραμματισμού, το οποίο επιτρέπει την εποπτεία και την καταγραφή των τιμών της διεργασίας σε πραγματικό χρόνο. Οι ενδείξεις και οι τιμές ελέγχου της διεργασίας αποθηκεύονται σε ένα κεντροποιημένο σύστημα

αρχαιοθέτησης (Project Integrated Management System, PIMS). Η δομή του συστήματος συμπληρώνεται με τη χρήση του προγράμματος Excel, το οποίο λειτουργεί ως πρωταρχική και ενδιάμεση πλατφόρμα διάθεσης και μεταφοράς των δεδομένων μεταξύ του προσομοιωτή, του ελεγκτή και της διεργασίας. Η επικοινωνία του συστήματος SCADA με το Excel γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου NetDDE (Network Dynamic Data Exchange Protocol).



Εικόνα 5.5. Αυτοματοποίηση της διεργασίας

#### 5.4 Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα, το σύστημα βέλτιστου ελέγχου βασισμένου σε προρρήσεις μοντέλου ανταποκρίνεται εξαιρετικά, καθώς η απόκριση της διεργασίας παρακολουθεί την αλληλουχία των αλλαγών του σημείου αναφοράς με χαμηλό ποσοστό υπερένωσης και μεγάλη ακρίβεια.

Αποδεικνύεται λοιπόν με τον τρόπο αυτό η υπεροχή του βέλτιστου σχήματος ελέγχου συγκριτικά με τους συμβατικούς PI ελεγκτές.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας του μοντέλου προχωρήσαμε στην εκτίμηση κάποιων κρίσιμων παραμέτρων του. Η εκτίμηση των παραμέτρων γίνεται με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood) για το μη γραμμικό και χρονικά μεταβαλλόμενο μοντέλο της διεργασίας [10,11]. Η αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιείται δίνεται από τη σχέση:

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^N (Y_{ci}(t_i, \theta) - y_i)^2 = \sum_{i=1}^N d_i^2(\theta) = \mathbf{d}^T(\theta)\mathbf{d}(\theta)$$

όπου  $y_c$  είναι η χρονική πρόβλεψη του μοντέλου για τη μεταβλητή  $y$ , και  $y$  είναι η μέτρηση της μεταβλητής. Το σύμβολο  $\theta$  αντιπροσωπεύει τις εκτιμώμενες παραμέτρους του μοντέλου για τις οποίες θεωρείται ότι ακολουθούν κανονική κατανομή με συγκεκριμένη μεταβλητότητα. Η μεταβλητότητα των παραμέτρων προέρχεται είτε από προηγούμενη γνώση (πειράματα) είτε από εκτίμηση μέσω των δεδομένων.

Οι νέες μετρήσεις για τις ρυθμιζόμενες μεταβλητές της διεργασίας προστίθενται στα δεδομένα προηγούμενων χρονικών περιόδων και αποτελούν το σύνολο των μετρήσεων. Υπάρχει δυνατότητα για την αύξηση της βαρύτητας των νέων μετρήσεων καθώς αποτελούν πιο αντιπροσωπευτικά δείγματα της παρούσας κατάστασης της διεργασίας.

Οι εκτιμώμενες παράμετροι επιλέχθηκαν τόσο με βάση την ευαισθησία του μοντέλου ως προς αυτές αλλά και τη θέση των διαθέσιμων μετρήσεων. Η μεταβλητότητα των μετρήσεων θεωρήθηκε σταθερή και γνωστή. Χρησιμοποιήθηκαν δυναμικά πειραματικά δεδομένα από τρία πειράματα με διαφορετικές αρχικές και λειτουργικές συνθήκες

- Πείραμα 1: Θέρμανση – Ψύξη σε μία ζώνη,
- Πείραμα 2: Θέρμανση σε μια ζώνη,

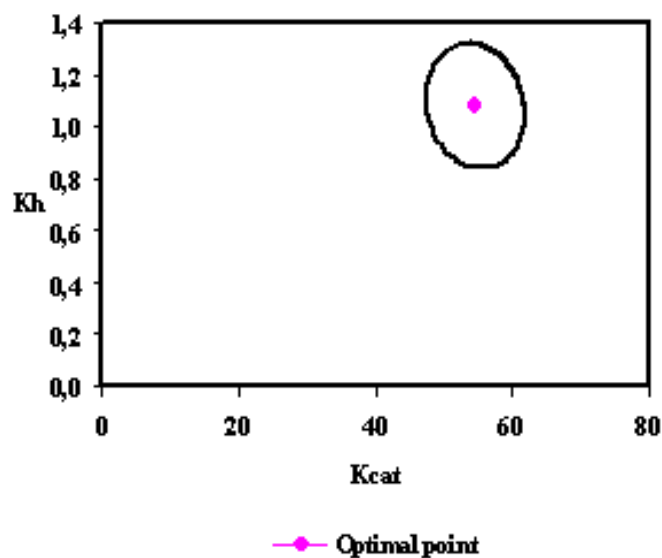
- Πείραμα 3: Θέρμανση – Ψύξη – Θέρμανση – Ψύξη, σε τέσσερις ζώνες.

Οι παράμετροι που εκτιμήθηκαν είναι η θερμική αγωγιμότητα του καταλύτη,  $k_{cat}$ , του τοιχώματος,  $k_{tube}$ , της αντίστασης,  $k_h$ , και του μονωτή,  $k_{mon}$ , καθώς και η θερμοχωρητικότητα του πυρίμαχου υλικού της αντίστασης. Οι τιμές των παραμέτρων δίνονται στον Πίνακα Π1.

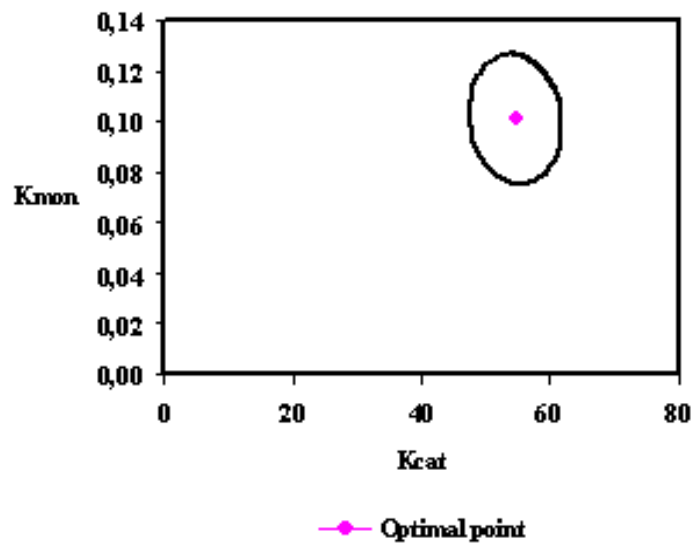
Παράμετρος	Αρχική τιμή	Εκτίμηση	Διάστημα εμπιστοσύνης 95%	Τυπική απόκλιση
$k_{cat}$	3.54E+01	5.46E+01	5.99E-01	3.05E-01
$k_{tube}$	3.70E+02	2.55E+02	3.30E+00	1.68E+00
$k_h$	9.00E-01	1.08E+00	1.99E-02	1.02E-02
$k_{mon}$	1.80E-01	1.01E-01	2.11E-03	1.08E-03
$\rho C_p$	4.45E+06	4.50E+06	1.05E+04	5.38E+03

Πίνακας Π1. Εκτιμήσεις τιμών παραμέτρων – Στατιστικά στοιχεία

Στην εικόνα Π1.α,β παρουσιάζονται τα ελλειψοειδή των κοινών διαστημάτων εμπιστοσύνης των παραμέτρων.



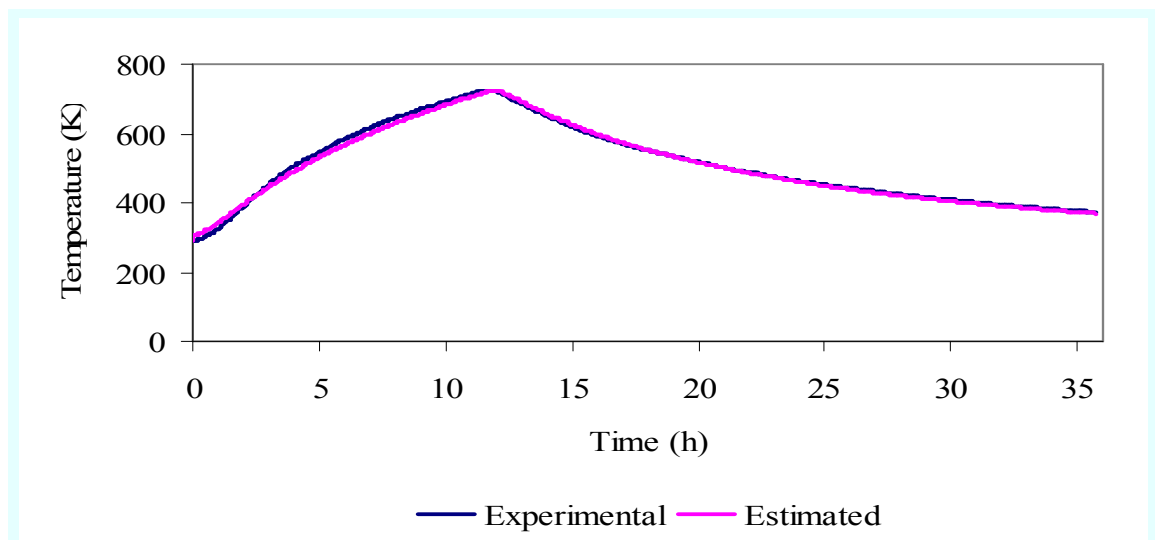
Εικόνα Π1.α. 95% κοινά διαστήματα εμπιστοσύνης για τις παραμέτρους  $k_{mon}$ ,  $k_{cats}$ ,  $k_h$ .



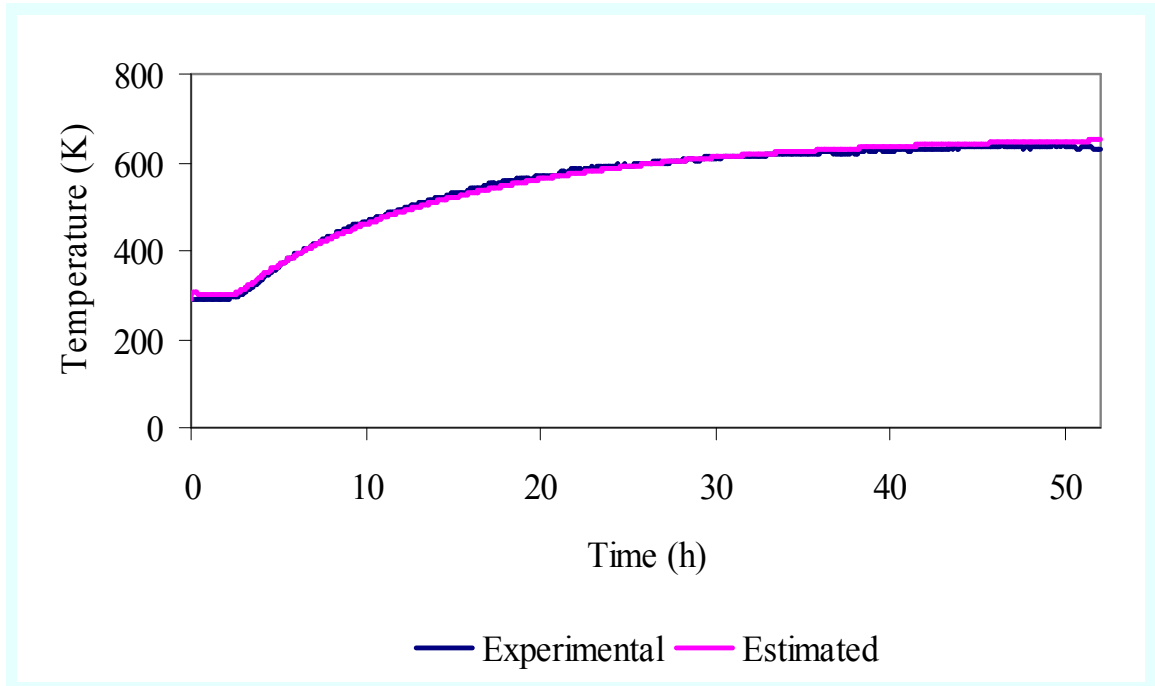
Εικόνα Π1.β. 95% κοινά διαστήματα εμπιστοσύνης για τις παραμέτρους  $k_{mon}$ ,  $k_{cat}$ ,  $k_h$ .

Από τα παραπάνω αποτελέσματα δεν παρατηρείται σημαντική συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων.

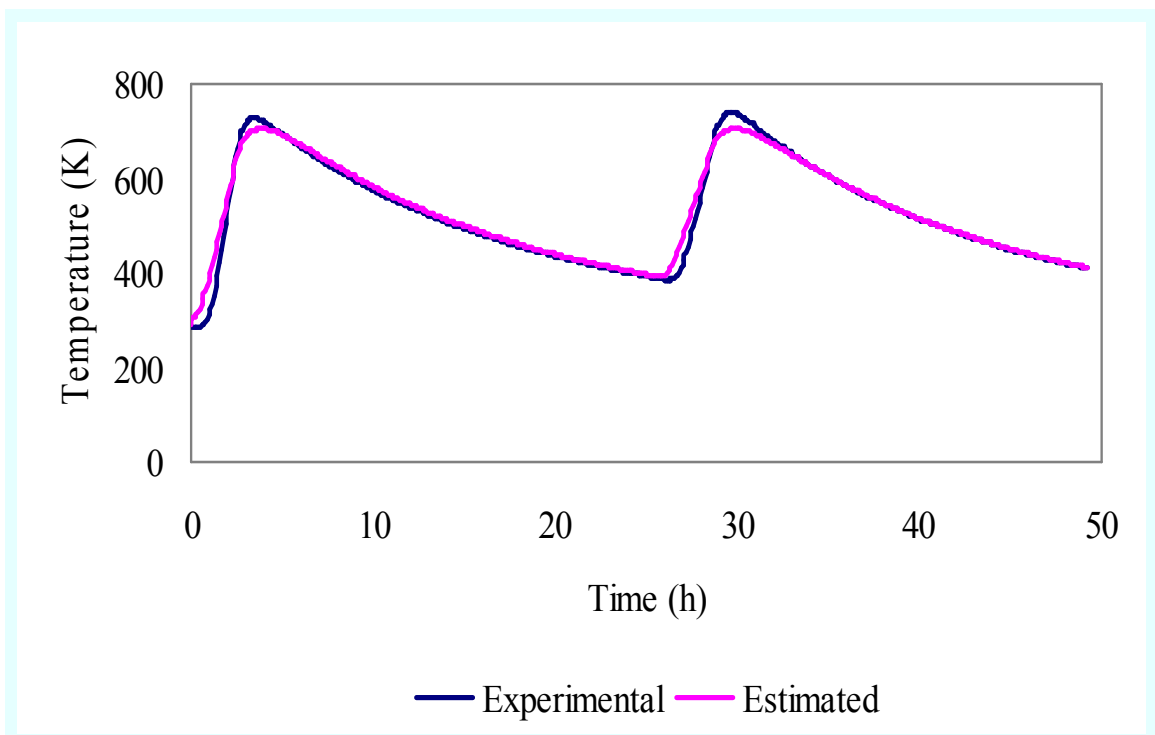
Στις εικόνες Π2, Π3 και Π4 γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης όπου και παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση.



Εικόνα Π2. Αποτελέσματα σύγκρισης σε συνθήκες 1<sup>ου</sup> πειράματος



Εικόνα Π3. Αποτελέσματα σύγκρισης σε συνθήκες 1<sup>ου</sup> πειράματος



Εικόνα Π4. Αποτελέσματα σύγκρισης σε συνθήκες 3<sup>ου</sup> πειράματος

Τα σφάλματα που προκύπτουν οφείλονται στην αβεβαιότητα της πραγματικής θέσης των θερμοστοιχείων εντός του αντιδραστήρα, στα σφάλματα μέτρησης καθώς και στην παραδοχή των σταθερών φυσικών ιδιοτήτων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μονάδας.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] *Wallenstein D., Harding R.H., Nee J.R.D, Boock L.T.*, Recent advances in the deactivation of FCC catalysts by cyclic propylene steaming (CPS) in the presence and absence of contaminant metals., *Applied Catalysis A: General, Vol.204, pp.89-106, 2000*
- [2] *Perry R.H., Green D.W.*, Perry's Chemical Engineers Handbook, 7<sup>th</sup> Edition, *McGraw-Hill, NY, 1997*
- [3] *McCabe W.L., Smith J.C.*, Unit operations of chemical engineering, 3<sup>rd</sup> Edition, *McGraw-Hill, NY, 1976*
- [4] *Gilbert W.R.*, Mathematical model of FCC catalyst deactivation., *Chemical Engineering Comm., Vol. 190, pp. 1485-1498, 2003*
- [5] *Marlin T.E.*, Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance, *McGraw-Hill, NY, 1995*
- [6] *gProms v.2.3.3 User's Guide, Process Systems Enterprise, London, 2004*
- [7] *Henson M.A.*, Nonlinear model predictive control: current status and future directions., *Computers Chem. Eng., Vol.23, pp.187-202, 1998*
- [8] *Nagy Z.K., Roman R., Agachi S.P., Allgower F.*, A real-time approach for moving horizon estimation based nonlinear model predictive control of a fluid catalytic cracking unit., 7<sup>th</sup> World congress of Chemical Engineering, pp.504, *Glasgow, 2005*
- [9] *Eaton J.W., Rawlings J.B.*, Feedback control of chemical processes using online optimization techniques., *Computers Chem. Eng., Vol. 14, No. 4/5, pp.469-479, 1990*
- [10] *Ψωινός Δ.Π.*, Στατιστική, Εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1999
- [11] *Παπαδημητρίου Ι.*, Περιγραφική Στατιστική, Εκδ. Παρατηρητής, Θεσσαλονίκη, 2001





