

**ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :  
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

ΟΡΘΗ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΤΟΥ ΜΕ ΑΡ. ΓΕΝ. ΠΡΩΤ. 2571/24/B14/31-01-2024 ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΩΡΑ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ.

**Προς  
τα Μέλη ΔΕΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ**

**Π Ρ Ο Σ Κ Λ Η Σ Η**

Παρακαλείστε να παρευρεθείτε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής που εκπόνησε στον Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, ο Υποψήφιος Διδάκτορας **κ. ΔΡΟΣΑΤΟΣ Παναγιώτης του Νικολάου**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ (Integrated Master).

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί **τη Δευτέρα 5 Φεβρουαρίου 2024, ώρα 10:00-12:00**, δια ζώσης στην Αίθουσα Συσκέψεων του ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ, Αιγιάλειας 52, Μαρούσι και μέσω διαδικτυακής σύνδεσης στην κάτωθι διεύθυνση:

[https://teams.microsoft.com/l/meetupjoin/19%3ameeting\\_NWM3ZjhhMzQtMWM4OC00ZTA3LWI0NmEtOTcxZjc5NDBiMTcy%40thread.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%22177ac89f92d24e13a8a6960f75cca949%22%2c%22Oid%22%3a%2273098b7c-75fd-4988-ab0d-44aa0d1bcdd0%22%7d](https://teams.microsoft.com/l/meetupjoin/19%3ameeting_NWM3ZjhhMzQtMWM4OC00ZTA3LWI0NmEtOTcxZjc5NDBiMTcy%40thread.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%22177ac89f92d24e13a8a6960f75cca949%22%2c%22Oid%22%3a%2273098b7c-75fd-4988-ab0d-44aa0d1bcdd0%22%7d)

Το θέμα της Διδακτορικής της Διατριβής είναι:

**Ελληνικός τίτλος:** «Υπολογιστική προσομοίωση λεβήτων στερεού καυσίμου υπό συνθήκες ευέλικτης λειτουργίας συνεπικουρούμενης από αντίστοιχη μελέτη αντοχής υλικών του σωληνοτοιχώματος αυτών».

**Αγγλικός τίτλος:** «Numerical investigation of pulverized-fuel boilers under flexible operating conditions assisted by study of their membrane walls material durability».

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

Ι. Αντωνιάδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Θερμότητας  
Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

# Υπολογιστική προσομοίωση λεβήτων στερεού καυσίμου υπό συνθήκες ευέλικτης λειτουργίας συνεπικουρούμενης από αντίστοιχη μελέτη αντοχής υλικών του σωληνοτοιχώματος αυτών

Παναγιώτης Δροσάτος

*Επιβλέπων: Εμμανουήλ Κακαράς, Καθηγητής ΕΜΠ*

## Περίληψη Διδακτορικής Διατριβής

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η διερεύνηση της δυνατότητας μετατροπής μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με καύση κονιοποιημένου καυσίμου (άνθρακας) από μονάδες βάσης σε μονάδες αιχμής ή κυκλικής φόρτισης, χαρακτηριζόμενες από βελτιωμένα χαρακτηριστικά ευελιξίας και αποδοτικότητας. Για την επίτευξη των υπόψιν στόχων προτείνονται αρκετές τεχνολογικές εφαρμογές από τις οποίες δύο είναι αυτές που μελετώνται στη συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή, ήτοι η καύση προξηραμένου λιγνίτη (pre-dried lignite) ή βιομάζας μέσω συστήματος προξηρανσης, αποθήκευσης και έμμεσης εγχυσης ή η χρήση νέων υλικών κατασκευής των σωληνοτοιχωμάτων ή άλλων δομικών στοιχείων των λεβήτων για αύξηση της αντοχής τους σε συνθήκες υψηλής φόρτισης ή αλληπάλληλων επαναληπτικών λειτουργικών κύκλων.

Η μελέτη της προτεινόμενης διάταξης έμμεσης εγχυσεως προξηραμένου λιγνίτη ή βιομάζας πραγματοποιείται στις Ελληνικές μονάδες «Μεγαλόπολη IV» και «Άγιος Δημήτριος V» με τη χρήση μεθόδων υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Στο πλαίσιο των συγκεκριμένων διερευνήσεων μελετάται ο κάθε φορά επιλεγόμενος χώρος του λέβητα σε χρονικά αμετάβλητες συνθήκες ενός εύρους διαφορετικών θερμικών φορτίων, τα χαμηλότερα εκ των οποίων δύναται να βρίσκονται σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη από το τεχνικό ελάχιστο της εκάστοτε μονάδας. Σκοπός της διερεύνησης είναι η εξέταση της δυνατότητας της επιβολής ευσταθούς και αποδοτικής λειτουργίας της μονάδας σε συνθήκες πέραν των

προδιαγραφόμενων με τη χρήση της προτεινόμενης τεχνικής λύσης. Παράλληλα, εξετάζονται διαφορετικές στρατηγικές καύσης που συμπεριλαμβάνουν διαφορετικό αριθμό και τοποθεσία ανοικτών καυστήρων καθώς και διαφορετική στρατηγική έκχυσης του προξηραμένου λιγνίτη ή της βιομάζας μέσω συμβατικών ή μη συμβατικών καυστήρων για το χαμηλότερο θερμικό φορτίο. Για μεγαλύτερη ακρίβεια και πιστότητα αποτελεσμάτων ως προς την απόδοση καύσης, αναπτύσσονται συγκεκριμένες υπορουτίνες για τον υπολογισμό του ρυθμού αντίδρασης του εξανθρακώματος των σωματιδίων όλων των τύπων καυσίμου (λιγνίτη, βιομάζας) με βάση πειραματικά δεδομένα. Παράλληλα, ειδικώς αναπτυχθείσα υπορουτίνα χρησιμοποιείται και για το ρυθμό επικάλυψης τέφρας στα σωληνοτοιχώματα. Τέλος, σε περίπτωση συμπερίληψης του τμήματος συναγωγής στην μελέτη, εκτός από μια δυνατότητα που προσφέρεται από το χρησιμοποιηθέν πηγαίο κώδικα, κρίθηκε αναγκαία η ανάπτυξη ειδικής υπορουτίνας για αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και της αποδοτικότητας χρήσης των υπολογιστικών εργαλείων. Με βάση τα ληφθέντα αποτελέσματα γίνεται ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση της συμπεριφοράς του λέβητα στις μελετούμενες περιπτώσεις και προσδιορισμός των πιο αποδοτικών σχημάτων καύσης.

Για την μελέτη της χρήσης νέων υλικών κατασκευής των σωληνοτοιχωμάτων ή άλλων δομικών στοιχείων των λεβήτων για αύξηση της αντοχής τους σε υψηλότερες φορτίσεις ή σε κυκλική λειτουργία της μονάδας χρησιμοποιείται ως αναφορά η Γερμανική μονάδα «GKM9». Για την επίτευξη των στόχων της συγκεκριμένης μελέτης απαιτείται η συνέργεια διαφορετικών μαθηματικών μοντέλων: μοντέλου υπολογιστικής ρευστομηχανικής για την πρόλεξη του πεδίου πυκνότητας θερμικής ροής, μοντέλου διεργασιών APROS για τον υπολογισμό της χωρικής κατανομής θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου (νερού/ατμού), μοντέλου θερμικής αγωγής για την προσέγγιση της θερμοκρασίας του υλικού στα σωληνοτοιχώματα, και μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των πιο σημαντικών παραμέτρων της μελέτης αυτής, ήτοι του πεδίου τάσεων/παραμορφώσεων. Αναλόγως προς τις προηγούμενες περιπτώσεις, γίνεται μελέτη της συμπεριφοράς του λέβητα στο τμήμα της εστίας σε ένα εύρος θερμικών φορτίων. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιείται και πάλι διερεύνηση αντικατάστασης του καυσίμου εναύσεως στο χαμηλότερο θερμικό φορτίο με προξηραμένο λιγνίτη ή βιομάζα και αξιολόγηση της συμπεριφοράς του λέβητα με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους. Επιπλέον, για την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών στα υπόψιν θερμικά φορτία, κρίνεται αναγκαία η υιοθέτηση μιας απλοποιητικής αλλά συνάμα καινοτόμας και επικυρωμένης προσέγγισης, λόγω πολυπλοκότητας των γεωμετρικών διαμορφώσεων των μελετούμενων δομών του λέβητα. Πιο συγκεκριμένα, η πυκνότητα αλληλουχία νεύρων/σωληνώσεων του ατμοποιητή αντικαθίσταται από πλάκες αμελητέου πάχους ισοδύναμου, ανισότροπου υλικού, το οποίο εμφανίζει ακριβώς την ίδια μηχανική συμπεριφορά σε ίδιες συνθήκες φόρτισης με το πραγματικό υλικό, καθότι τα στοιχεία του μητρώου δυσκαμψίας έχουν διαμορφωθεί καταλλήλως προκειμένου να συμπεριλάβουν την πραγματική γεωμετρία και τις συνθήκες λειτουργίας του εργαζόμενου μέσου. Μετά την μοντελοποίηση ολόκληρου του ατμοποιητή στο χώρο της εστίας, γίνεται εντοπισμός των πιο επίφοβων περιοχών για εμφάνιση υψηλών τάσεων και παραμορφώσεων και λεπτομερή μελέτη τους. Τέλος, πραγματοποιείται χρονικά μεταβαλλόμενη προσομοίωση δύο εκλεγόμενων περιοχών του ατμοποιητή που κατασκευάζονται από υλικό T24 μεταξύ των θερμικών φορτίων 27% και 100% του ονομαστικού με υπόθεση χρονικού διαστήματος μετάβασης τις δύο ώρες. Με θεώρηση της μέγιστης επιβαλλόμενης τάσης που προκύπτει κατά την μεταβατική αυτή λειτουργία πραγματοποιείται μελέτη κόπωσης.

Με βάση τα ληφθέντα αποτελέσματα από τις άνωθεν διερευνήσεις γίνεται κατανοητό πως η διαμόρφωση ενός συστήματος έκχυσης/καύσης έμμεσου τύπου και μάλιστα προξηραμένου και αποθηκευμένου καυσίμου δύναται να μειώσει το ελάχιστο θερμικό φορτίο ευσταθούς λειτουργίας ενός λέβητα κωνιοποιημένου καυσίμου και έτσι να αυξήσει την ευελιξία ως προς το εύρος λειτουργίας, ενώ παράλληλα δύναται να αντικαταστήσει και τη χρήση συμβατικών καυσίμων εναύσεως. Ωστόσο, η προτεινόμενη διάταξη για την επίτευξη των πιο αποδοτικών συνθηκών όσον αφορά σε κρίσιμες παραμέτρους καύσης

είναι κάθε φορά συνάρτηση της μελετούμενης μονάδας και των επιβαλλόμενων συνθηκών, και έτσι δεν μπορούν να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα, εκτός από μεμονωμένους δείκτες. Επιπρόσθετα, από τη μελέτη συμπεριφοράς υλικού, εξάγεται το συμπέρασμα πως το υπόψιν υλικό έχει μεγάλη αντοχή για πολύ μεγάλο αριθμό λειτουργικών κύκλων, γεγονός που πιστοποιεί τη δυνατότητα μετατροπής μιας υπερσύγχρονης μονάδας βάσεως σε αιχμής ή κυκλικής λειτουργίας με τη χρήση προηγμένων υλικών. Επιπλέον οι διεργασίες που υφίστανται τα υλικά πριν τη λειτουργική τους χρήση δύνανται να έχουν αυξήσει την αντοχή τους και να έχουν μεταφέρει προς ανώτερη στάθμη το όριο διαρροής, αποτρέποντας έτσι την πλαστική παραμόρφωση σε πραγματικές συνθήκες. Εντούτοις, για αύξηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων κρίνεται αναγκαία η συνέχιση της διερεύνησης με ενσωμάτωση των παραμενουσών τάσεων στις συγκολλήσεις χρησιμοποιώντας επιπλέον πειραματικά δεδομένα.



**National Technical University of Athens**  
**School of Mechanical Engineering**  
**Thermal Section**  
**Laboratory of Steam Boilers and Thermal Plants (LSBTP)**

# **Numerical investigation of pulverized-fuel boilers under flexible operating conditions assisted by study of their membrane walls material durability**

**Panagiotis Drosatos**

*Supervisor: Emmanuil Kakaras, Professor NTUA*

## **Summary of PhD Thesis**

The purpose of this PhD thesis is to investigate the possibility of converting pulverized, coal-fired power plants from base units to peak or cyclic-load units, characterized by improved flexibility and efficiency. In order to achieve these objectives, several technological applications are proposed, two of which are studied in this PhD thesis, namely the combustion of pre-dried lignite or biomass through a pre-drying, storage and indirect injection system or the use of new materials for the construction of membrane walls or other structural elements of boilers to increase their durability to conditions of high load or repetitive operating cycles.

The study of the proposed combustion scheme of pre-dried lignite or biomass through a pre-drying, storage and indirect injection system is carried out in the Greek units "Megalopolis IV" and "Agios Dimitrios V" using Computational Fluid Dynamics methods. In the context of these investigations, the selected zones of boiler are studied at different thermal loads assuming steady-state conditions, the lowest of which are below the existing technical minima of the units in order to examine the possibility of imposing stable and efficient operation of the unit at off-design conditions by using the proposed technical solutions. At the same time, different combustion strategies and different ways of injecting pre-dried lignite or biomass at the lowest thermal load are examined, using conventional or sophisticated burners. For greater accuracy and validity of the derived results in terms of combustion efficiency, specific in-house codes are developed to approximate the reaction rate of particles of all fuel types (lignite, biomass) based on experimental data. At the same time, a specifically-developed, in-house subroutine is used for the calculation of the fouling rate.

Finally, in case of inclusion of the convection part in the study, alongside the utilization of a feature offered by the main code, it was deemed necessary to develop an in-house code to increase the accuracy of the results and the calculation efficiency. Based on the results obtained, the qualitative and quantitative evaluation of the boiler behavior in the selected cases and the determination of the most efficient combustion schemes is possible.

For the study of the use of new materials for the construction of membrane walls or other structural elements of boilers to increase their durability to conditions of high load or repetitive operating cycles, the German unit "GKM9" is used as a reference. In order to achieve the objectives of this study, the synergy of different mathematical models is required: a Computational Fluid Dynamics model is used to predict the developed heat flux field, an APROS process model to calculate the spatial distribution of the working medium's temperature, a thermal conduction model to approximate the material temperature in membrane walls, and a Finite Element Model to calculate the most important parameters of this study, namely the stress/deformation fields. As in the previous two cases, the behavior of the boiler's main furnace is studied in a range of thermal loads. In this context, an investigation is again carried out to replace the start-up fuel at the lowest thermal load with pre-dried lignite or biomass and evaluate the boiler behavior. For the simulation of the material performance, it is needed to adopt a simplistic, but yet innovative and validated approach, due to the complexity of the boiler structures. More specifically, the sequence of nerves/pipes of the evaporator component is replaced by plates. In order to achieve high accuracy of the results, the isotropic material is replaced by an equivalent, anisotropic material, which, nevertheless, exhibits exactly the same mechanical behavior under the same loading conditions. In order for this to happen, we proceed to the appropriate configuration of the stiffness matrix elements, by including the actual geometry and the operating conditions of the working medium. After modeling the entire evaporator of the main furnace, the areas that are more prominent to high tensions are identified and studied in detail. Finally, a time-varying simulation of the local areas of the evaporator that are made of T24 (collector and corner areas) is performed between 27% and 100% thermal loads with a two-hour transition time assumed. By considering the maximum imposed stress during this transient operation, a fatigue study is carried out.

Based on the results obtained from the above investigations, it is understood that the implementation of an indirect firing system using pre-dried lignite or biomass can reduce the minimum thermal load of a pulverized-fuel boiler and increase its flexibility in terms of operating range, while at the same time it can replace conventional fuels during the start-up stages. However, the proposed scheme and strategy for achieving the most efficient conditions in terms of critical combustion parameters is case-dependent, so no general conclusions can be drawn, except for individual parameters. In addition, the investigation of material performance indicates that the material under consideration can withstand a very large number of operating cycles, which certifies the possibility of converting a state-of-the-art base unit into a peak or cyclic-load one through the implementation of advanced materials. In addition, it is assessed that the processes that materials undergo before their actual use may increase their strength and move the yield limit to a higher level, thus preventing plastic deformation in real conditions. However, in order to increase the accuracy of the results, it is necessary to continue the investigation by integrating the residual stresses in the welds with additional experimental data.