



**ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π.:  
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς τα μέλη ΔΕΠ της  
Σχολής Μηχ/γων  
Μηχ/κων

**ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ**

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. **Μπίτσικα Παναγιώτη του Ιωάννη**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον τομέα Θερμότητας. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Παρασκευή 11 Φεβρουαρίου, ώρα 11.00 π.μ. διαδικτυακά στη διεύθυνση:

**<https://www.epresence.gr/login/FPooPPcBzPaSuse>**

Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής:

«Σχεδίαση και Υπολογιστική Προσομοίωση Πρότυπης Μηχανής Stirling – Ανάλυση της Ροής  
στον Αναγεννητή και Παραμετρική Μελέτη»

Και ο αγγλικός ως εξής:

«Design and Computational Study of a Prototype Stirling Engine: Analysis of  
Gas Flow in the Regenerator and Parametric Study»



**Τίτλος εργασίας: Σχεδίαση και υπολογιστική προσομοίωση πρότυπης μηχανής Stirling – Ανάλυση της ροής στον αναγεννητή και παραμετρική μελέτη.**

Οι μηχανές Stirling είναι μηχανές εξωτερικής καύσης οι οποίες εφευρέθηκαν πριν από περισσότερο από δύο αιώνες, αλλά η ανάγκη για επίτευξη υψηλών θερμοκρασιών και πιέσεων εμπόδισε την ανάπτυξή τους. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναθερμανθεί το ερευνητικό ενδιαφέρον σχετικά με τις μηχανές Stirling, οι οποίες λειτουργούν είτε ως κινητήρες για παραγωγή έργου είτε ως ψυκτικές μηχανές. Η εργοπαραγωγός μηχανή Stirling περιλαμβάνει πέντε χώρους. Η συμπίεση και η εκτόνωση του αερίου πραγματοποιείται αντίστοιχα στον χώρο συμπίεσης, υπό χαμηλή θερμοκρασία, και στον χώρο εκτόνωσης, υπό υψηλή θερμοκρασία. Η μηχανή προσλαμβάνει θερμότητα από εξωτερική πηγή μέσω του θερμαντήρα και αποβάλλει θερμότητα προς το περιβάλλον μέσω του ψύκτη. Τέλος, ο αναγεννητής βρίσκεται ανάμεσα στον θερμαντήρα και τον ψύκτη και μέσω του μεταλλικού πλέγματος που διαθέτει, λειτουργεί ως ένας εσωτερικός εναλλάκτης στον οποίον αποθηκεύεται θερμότητα.

Στο πλαίσιο της διατριβής σχεδιάστηκε πρότυπη μηχανή Stirling β-τύπου, η οποία βασίζεται στην εργοπαραγωγό μηχανή Stirling GPU-3 της General Motors. Η πρότυπη μηχανή προσομοιώθηκε σε υπολογιστικό περιβάλλον (CFD) με χρήση του λογισμικού ANSYS Fluent. Η μελέτη ενεργειακών συστημάτων με χρήση υπολογιστικών μεθόδων παρέχει πληροφορίες σχετικά με στοιχεία της λειτουργίας τους, τα οποία δεν μπορούν να μελετηθούν από τα υπάρχοντα αναλυτικά μοντέλα. Οι ρυθμίσεις της προσομοίωσης προσέγγισαν σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία μιας πραγματικής μηχανής. Η προσομοιωμένη πρότυπη μηχανή λειτουργεί με Ήλιο και με ταχύτητα περιστροφής ίση με 2500 rpm. Η μέση πίεση της μηχανής είναι ίση με 45 bar, ενώ η πρόσληψη και η απόρριψη θερμότητας λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες ίσες με 977 και 288 K αντίστοιχα.

Στην εργασία παρουσιάζεται αρχικά η χρονική μεταβολή των βασικών ιδιοτήτων του εργαζόμενου μέσου. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στη μελέτη φαινομένων όπως η ύπαρξη χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία η κατεύθυνση του αερίου δεν είναι ομοιόμορφη σε ολόκληρη την μηχανή, η πτώση πίεσης στα όρια του αναγεννητή, η ταχύτητα του αερίου εντός της μηχανής και η χωρική κατανομή της θερμοκρασίας του αερίου στους εναλλάκτες. Από τη μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής προέκυψε πως είναι προτιμότερη η μελέτη των εναλλακτών θερμότητας σε επιμέρους τμήματα. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση της πτώσης πίεσης στους εναλλάκτες θερμότητας υπό σταθερή και παλινδρομική ροή. Εξετάσθηκε η μεταφορά θερμότητας στους εναλλάκτες της μηχανής. Οι συσχετίσεις που προέκυψαν συγκρίθηκαν επιτυχώς με ευρέως χρησιμοποιούμενες θεωρητικές συσχετίσεις. Κατά την προσομοίωση, υπήρχαν πηγές απωλειών θερμότητας και έργου οι οποίες δεν συμπεριλήφθηκαν για λόγους απλοποίησης. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται επιπλέον βάσει των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Η πρότυπη μηχανή παράγει ισχύ ίση με 4.99 kW, ενώ ο ενδεικνύμενος και ο τελικός βαθμός απόδοσής της είναι ίσοι με 40.3 % και 33.8% αντίστοιχα. Το ενδεικνύμενο και το παραγόμενο έργο ανά κύκλο λειτουργίας είναι ίσα με 143 και 119.7 J, ενώ η προσδιδόμενη θερμότητα είναι ίση με 354.7 J. Ο τελικός βαθμός απόδοσης της πρότυπης μηχανής και οι επιμέρους λόγοι των απωλειών θερμότητας συγκρίνονται επιτυχώς με δημοσιευμένα αποτελέσματα της μηχανής GM GPU-3. Πριν τη σύγκριση, πραγματοποιήθηκε αναγωγή της γεωμετρίας της πρότυπης μηχανής στη γεωμετρία της GM GPU-3. Η παραγόμενη ισχύς της πρότυπης μηχανής με αναγωγή στη γεωμετρία της GM GPU-3 είναι ίση με 4.7 kW. Το ενδεικνύμενο και το παραγόμενο έργο



είναι ίσα με 136

και 112.7 J αντίστοιχα. Η θερμότητα που προσδίδεται στην μηχανή είναι ίση με 350.7 J, αντιστοιχώντας σε ισχύ ίση με 14.62 kW. Ο ενδεικνύμενος βαθμός απόδοσης της προσομοιωμένης πρότυπης μηχανής είναι ίσος με 38.8%, κατά 3.8% μεγαλύτερος από τον πειραματικό ενδεικνύμενο βαθμό απόδοσης της GM GPU-3 (35%). Η σχετική απόκλιση μεταξύ των βαθμών απόδοσης είναι κάτω από 10% και θεωρείται μικρή. Πιθανώς οφείλεται στον μη υπολογισμό κάποιων επιπλέον πηγών απωλειών θερμότητας. Οι απώλειες θερμότητας της μηχανής αντιστοιχούν στο 16.6% της συνολικά προσδιδόμενης θερμότητας. Η τιμή αυτή βρίσκεται εντός του προτεινόμενου εύρους για την GM GPU-3. Η πειραματικά παραγόμενη ισχύς της GM GPU-3 είναι ίση με 3.96 kW, κατά 15% χαμηλότερη σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ που προέκυψε κατά την προσομοίωση μετά την αναγωγή στη γεωμετρία της GM GPU-3. Ένα τμήμα της απόκλισης αυτής θεωρείται πως οφείλεται στον υπολογισμό μικρότερων απωλειών έργου στον κινηματικό μηχανισμό της μηχανής. Θεωρείται όμως πως υπάρχουν πηγές απωλειών έργου οι οποίες δεν υπολογίστηκαν κατά την έρευνα.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις ιδιότητες του εργαζόμενου μέσου στον αναγεννητή της μηχανής. Μελετήθηκε η αξονική μεταβολή της θερμοκρασίας του αερίου και του μεταλλικού πλέγματος, της μεταφοράς θερμότητας, της πτώσης πίεσης και της ταχύτητας του εργαζόμενου μέσου. Προέκυψαν χωρο-χρονικές εξισώσεις, οι οποίες υπολογίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια την τιμή κάθε μεγέθους για οποιαδήποτε χρονική στιγμή ή θέση εντός του αναγεννητή. Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα αναλυτικό μοντέλο μελέτης μηχανών Stirling ώστε να βελτιώσουν την ακρίβειά του.

Επεκτάθηκε το υπάρχον αναλυτικό αδιαβατικό μοντέλο δεύτερης τάξης, ώστε να συμπεριλάβει φαινόμενα όπως οι εντοπισμένες απώλειες πίεσης, οι απώλειες θερμότητας και οι απώλειες έργου στον κινηματικό μηχανισμό της μηχανής. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το αναλυτικό μοντέλο για την πρότυπη μηχανή ήταν σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων πιστοποίησε την εγκυρότητα του αναλυτικού μοντέλου.

Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας παρουσιάζεται η παραμετρική μελέτη της πρότυπης μηχανής με χρήση υπολογιστικών μεθόδων (CFD). Μελετήθηκε η επίδραση λειτουργικών και γεωμετρικών παραμέτρων, όπως η ταχύτητα περιστροφής, η πίεση λειτουργίας, οι γεωμετρικές παράμετροι του αναγεννητή και οι θερμοκρασίες του θερμαντήρα και του ψύκτη της μηχανής. Δοκιμάσθηκε ένα μεγάλο εύρος τιμών για κάθε παράμετρο και προέκυψε μια σαφής εικόνα για τα όρια λειτουργίας της μηχανής. Εκτός από την απόδοση της μηχανής, εξετάσθηκε η επίδραση επιλεγμένων παραμέτρων στην κατανομή της θερμοκρασίας στους εναλλάκτες της μηχανής, την πτώση της πίεσης και την μεταφορά θερμότητας. Τέλος, συσχετίσθηκε το έργο και η απαιτούμενη θερμότητα με κάθε παράμετρο που μελετήθηκε. Η σύγκριση μεταξύ των συσχετίσεων και των αποτελεσμάτων ήταν ικανοποιητική, παρέχοντας τη δυνατότητα για μια σαφή εκτίμηση της ισχύος και της απόδοσης της μηχανής σε όλο το εύρος τιμών των επιλεγμένων παραμέτρων που δοκιμάσθηκαν. Η μελέτη αυτή μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μια πολυπαραμετρική ανάλυση της πρότυπης μηχανής στο μέλλον.

Σχετικά με πιθανή μελλοντική έρευνα βασισμένη στην παρούσα εργασία, προτείνεται η τροποποίηση της γεωμετρίας της μηχανής σε επιλεγμένα σημεία για τη βελτίωση της απόδοσής της, καθώς και ο διαχωρισμός των εναλλακτών θερμότητας σε επιμέρους τμήματα. Προτείνεται επίσης η εκτέλεση της παραμετρικής μελέτης σε μικρότερο εύρος των παραμέτρων, ώστε να εντοπισθεί το βέλτιστο σημείο λειτουργίας της πρότυπης μηχανής ως προς την παραγόμενη ισχύ και την απόδοσή της.



Παρακάτω ακολουθούν οι δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά και οι εργασίες σε διεθνή συνέδρια που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής.

- [1] E. Rogdakis, G.Dogkas and P. Bitsikas, "CFD Simulation of Vuilleumier machine", *17<sup>th</sup> International Stirling Engine Conference*, Newcastle, UK, 24-26 August 2016.
- [2] E. Rogdakis, P. Bitsikas and G. Dogkas, "Numerical Simulation of Prime Mover Stirling Engine by Finite Volume Method", *17<sup>th</sup> International Stirling Engine Conference*, Newcastle, UK, 24-26 August 2016.
- [3] E. Rogdakis, P. Bitsikas and G. Dogkas, "Three-dimensional CFD simulation of Prime Mover Stirling Engine", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, IMECE 2017*, Tampa, Florida, 3-9 November 2017.
- [4] E. Rogdakis, P. Bitsikas and G. Dogkas, "Study of Gas Flow through a Stirling Engine Regenerator", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, IMECE 2017*, Tampa, Florida, 3-9 November 2017.
- [5] E. Rogdakis, P. Bitsikas and G. Dogkas, "CFD Study of a Stirling Engine regenerator as a Porous Medium", *eNergetics, 4<sup>th</sup> Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy*, Virtual-Serbia, 25-26 October 2018.
- [6] G.Dogkas, E. Rogdakis and P.Bitsikas, "3D CFD Simulation of a Vuilleumier Heat Pump", *Applied Thermal Engineering*, vol. 153, pp. 604-619, 2019.
- [7] E. Rogdakis, P.Bitsikas, G.Dogkas and G. Antonakos, "Three-dimensional CFD study of a beta-type Stirling Engine", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 11, pp. 302-316, April 2019.
- [8] G. Dogkas, P. Bitsikas, D.Tertipis and E. Rogdakis, "Vuilleumier Machine Speed Effect Investigation with CFD and Analytical Model", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 143, 2019.
- [9] G-R. Domenikos, P. Bitsikas and E. Rogdakis, "Computational Analysis of Cryogenic Stirling Refrigerator", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, IMECE 2019*, Salt-Lake City, Utah, 11-14 November 2019.
- [10] G-R. Domenikos, P. Bitsikas and E. Rogdakis, "Thermodynamic modelling of superfluid Stirling Cryocoolers", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, IMECE 2019*, Salt-Lake City, Utah, 11-14 November 2019.
- [11] P.Bitsikas, E. Rogdakis and G.Dogkas, "CFD study of heat transfer in Stirling Engine regenerator", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 17, February 2020.
- [12] P.Bitsikas, E. Rogdakis and G.Dogkas, "Numerical Study of Pressure Drop in Stirling Engine Regenerator", *ASCE Journal of Energy Engineering*, May 2020



**Dissertation title:** *Design and computational study of a prototype Stirling engine: Analysis of gas flow in the regenerator and parametric study.*

Stirling engines are external combustion engines that were invented more than two centuries ago, but their development was hindered by the need to achieve high levels of pressure and temperature for their effective operation. However, research interest in Stirling machines has been renewed during the last decades. Stirling engines may operate either as work-producing or as cooling machines. A Stirling engine consists of five spaces. Working gas compression and expansion take place in the compression space under low temperature and in the expansion space under high temperature, respectively. The engine absorbs heat from an external source through its heater and rejects heat to the environment through the cooler. The regenerator is placed between the cooler and the heater and, through its metallic matrix acts as an internal heat exchanger for heat storage during the cycle.

For the purposes of this dissertation, a prototype beta-type Stirling engine was designed, based on the GPU-3 Stirling engine by General Motors. The prototype engine was studied in a simulated environment of Computational Fluid Dynamics (CFD) with the use of ANSYS Fluent software. The computational study of energy systems can provide information about aspects of their operation that cannot be studied by the already developed analytical models. The setup of the simulated engine closely approximated the operation of a real Stirling engine. The working gas of the simulated engine is Helium at a rotational speed of 2500 rpm. The mean pressure of working gas is 45 bar. The values of the temperature under which the engine is absorbing and rejecting heat are equal to 977 K and 288 K respectively.

The dissertation presents first the temporal variation in the main properties of the working gas. Emphasis is given to the study of phenomena such as intervals in the engine cycle, when the direction of gas flow is not uniform in all the engine spaces; the drop of gas pressure at the boundaries of the regenerator; patterns of gas velocity inside the engine; and spatial distribution of temperature in the heat exchangers. The study of variation in gas temperature led to the conclusion that the heat exchangers of the engine have to be examined in separate parts. The drop of gas pressure inside the heat exchangers was compared under steady and oscillating flow. Finally, the heat transfer in the heat exchangers was studied. The resulting correlations were comparable with widely used theoretical correlations.

For the purposes of simplification, the simulation did not take into account specific losses of heat and work output. These losses are calculated separately after the end of the simulation and based on the simulation results. The output power of the prototype engine is equal to 4.99 kW, while the engine's indicated and real efficiency is equal to 40.3% and 33.8%, respectively. The indicated work and the work output per engine cycle are equal to 143 and 119.7 J, respectively, while the heat input equals to 354.7 J. The efficiency of the prototype engine and the ratios of the calculated thermal losses to the heat input are comparable with published results of the GM GPU-3 Stirling engine. The results obtained from the two engines are in good agreement. Before the comparison, the results of the prototype engine simulation were reduced to the design characteristics of the GM GPU-3 engine. The power output of the prototype engine, thus reduced, is equal to 4.7 kW. The indicated work and the work output are equal to 136 and 112.7 J, respectively. The heat input is equal to 350.7 J per cycle, corresponding to input power of 14.62 kW. The indicated efficiency of the prototype engine, after reduction to the GM GPU-3 geometry, is equal to 38.8%, that is 3.8% higher than the experimentally indicated efficiency of the GM GPU-3 (35%). The

relative deviation between the resulting indicated efficiencies is lower than 10%, which is considered a low value. This deviation is probably due to the fact that some additional thermal losses were not calculated. The calculated thermal losses are equal to 16.6% of the total heat input; this value is within the suggested range for the GM GPU-3 Stirling Engine. The experimental work output of the GM GPU-3 engine is equal to 3.96 kW; this value is lower by 15% in comparison to the power output of the simulated prototype engine, after the reduction mentioned above. This deviation is considered to be partly caused by the calculation of lower work losses in the engine's kinematic mechanism. However, it is assumed that there are extra sources of work loss that were not calculated during the research.

Particular emphasis was given to the properties of working gas in the regenerator of the engine. The axial variation in the temperature of working gas and metal matrix, as well as in heat transfer, pressure drop, and gas velocity was studied. The resulting spatial and temporal equations of the studied properties provide highly accurate estimates of the value of each property at any time and in any position within the regenerator. These equations can be used in an analytical model for the study of Stirling engines, to improve the model's accuracy in predicting the engine's performance.

The existing second-order analytical model was extended in order to incorporate phenomena such as the losses of pressure caused by factors other than friction, heat losses, and the loss of work in the engine's kinematic mechanism. The results obtained from the analytical model for the prototype engine were in good agreement with the respective results of the simulation. Comparison between the results of the analytical model and the CFD simulation verified the model's validity.

The last section of the dissertation presents a parametric study of the prototype engine with the use of CFD. The effect of operational and geometrical parameters on the engine's performance was studied. Studied parameters included the engine rotational speed, gas mean pressure, properties of the regenerator geometry, as well as the values of temperature of the heater and the cooler of the engine. A wide range of values was tested for each of the studied parameters, in order to obtain a clear view of the operational limits of the engine. In addition to the engine's performance, the effect of selected parameters on the spatial distribution of gas temperature in the heat exchangers, on the pressure drop, and on the heat transfer, were also studied. Finally, the work output and the required heat input were correlated with each one of the examined parameters. The satisfactory correspondence between the resulting correlations and the simulation data, enabled a precise estimation of the power output and efficiency of the engine for the entire value range of each selected parameter. This study can serve as the basis for a future multi-parameter analysis of the prototype engine.

Proposals for potential future studies based on the present work, include the modification of the engine geometry in selected points, in order to improve its performance, and the division of the heat exchangers in several parts. Moreover, further parametric study, in a narrower range of values for the selected parameters is proposed, in order to define the optimum operating point for the prototype engine with regard to power output and engine performance.

The following journal publications and conference presentations were generated by the research presented in this dissertation.

- [1] E. Rogdakis, G.Dogkas and P. Bitsikas, "CFD Simulation of Vuilleumier machine", *17<sup>th</sup> International Stirling Engine Conference*, Newcastle, UK, 24-26 August 2016.
- [2] E. Rogdakis, P. Bitsikas and G. Dogkas, "Numerical Simulation of Prime Mover Stirling Engine by Finite Volume Method", *17<sup>th</sup> International Stirling Engine Conference*, Newcastle, UK, 24-26 August 2016.
- [3] E. Rogdakis, P. Bitsikas and G. Dogkas, "Three-dimensional CFD simulation of Prime Mover Stirling Engine", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, IMECE 2017*, Tampa, Florida, 3-9 November 2017.
- [4] E. Rogdakis, P. Bitsikas and G. Dogkas, "Study of Gas Flow through a Stirling Engine Regenerator", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, IMECE 2017*, Tampa, Florida, 3-9 November 2017.
- [5] E. Rogdakis, P. Bitsikas and G. Dogkas, "CFD Study of a Stirling Engine regenerator as a Porous Medium", *eNergetics, 4<sup>th</sup> Virtual International Conference on Science, Technology and Management in Energy*, Virtual-Serbia, 25-26 October 2018.
- [6] G.Dogkas, E. Rogdakis and P.Bitsikas, "3D CFD Simulation of a Vuilleumier Heat Pump", *Applied Thermal Engineering*, vol. 153, pp. 604-619, 2019.
- [7] E. Rogdakis, P.Bitsikas, G.Dogkas and G. Antonakos, "Three-dimensional CFD study of a beta-type Stirling Engine", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 11, pp. 302-316, April 2019.
- [8] G. Dogkas, P. Bitsikas, D.Tertipis and E. Rogdakis, "Vuilleumier Machine Speed Effect Investigation with CFD and Analytical Model", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 143, 2019.
- [9] G-R. Domenikos, P. Bitsikas and E. Rogdakis, "Computational Analysis of Cryogenic Stirling Refrigerator", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, IMECE 2019*, Salt-Lake City, Utah, 11-14 November 2019.
- [10] G-R. Domenikos, P. Bitsikas and E. Rogdakis, "Thermodynamic modelling of superfluid Stirling Cryocoolers", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, IMECE 2019*, Salt-Lake City, Utah, 11-14 November 2019.
- [11] P.Bitsikas, E. Rogdakis and G.Dogkas, "CFD study of heat transfer in Stirling Engine regenerator", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 17, February 2020.
- [12] P.Bitsikas, E. Rogdakis and G.Dogkas, "Numerical Study of Pressure Drop in Stirling Engine Regenerator", *ASCE Journal of Energy Engineering*, May 2020