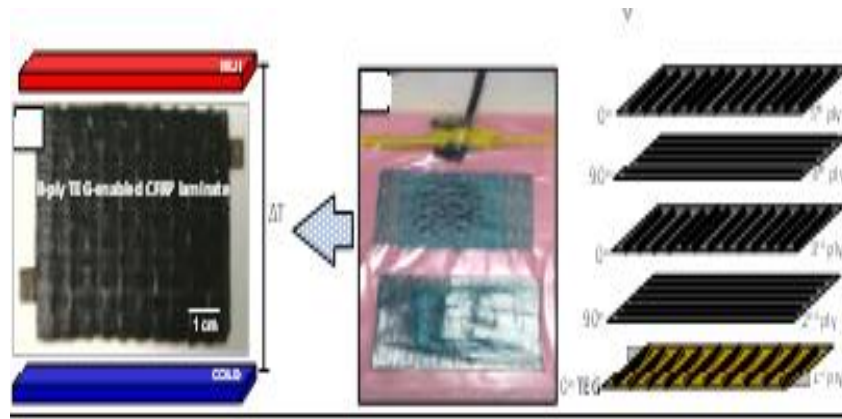


**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΕΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΓΙΑ ΑΠΟΔΟΤΙΚΗ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ****Ε. Λάμπρου<sup>1</sup>, Λ. Ν. Γεργίδης<sup>1,\*</sup>, Λ. Τζούνης, Γ. Καραλής<sup>1</sup>, Α. Σ. Παϊπέτης<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Ελλάδα(\*[lgerqidi@uoi.gr](mailto:lgerqidi@uoi.gr))**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι επιδόσεις μιας νέας προτεινόμενης και πρόσφατα κατασκευασμένης στο εργαστήριο<sup>[1]</sup> θερμοηλεκτρικής συσκευής (Thermoelectric Generator- TEG) από Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) χρησιμοποιώντας αριθμητικές προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα διακριτοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται για τη λύση των εξισώσεων συζευγμένων πεδίων που διέπουν τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα με τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Η αριθμητική επίλυση δίνει θερμικά και ηλεκτρικά πεδία, που μεταφράζονται σε κατανομές θερμοκρασίας και ηλεκτρικού δυναμικού σε όλη τη συσκευή. Η διαφορά δυναμικού του πρώτου και του τελευταίου θερμοστοιχείου της συσκευής υπολογίζεται για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας ρυθμιζόμενες από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της "θερμής" και της "ψυχρής" πλάκας της συσκευής. Έχουν διεξαχθεί αριθμητικές προσομοιώσεις για να διερευνηθούν διαφορετικές βασικές παράμετροι που περιγράφουν και χαρακτηρίζουν τη γεωμετρική και υλική φύση της συσκευής όπως ο αριθμός, η διάμετρος, το μήκος, ο συντελεστής πυκνότητας των θερμοστοιχείων και η θερμική αγωγιμότητα της ρητίνης πολυμερούς που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη συσκευή TEG. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της συσκευής όπως η τάση εξόδου, η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικώς μετρούμενα χαρακτηριστικά της, επιτρέποντας κατά αυτό τον τρόπο το βέλτιστο περαιτέρω σχεδιασμό και εξέλιξη της υπάρχουσας συσκευής. Στην κατεύθυνση του βέλτιστου σχεδιασμού της συσκευής τα αποτελέσματα της πολυπαραμετρικής μελέτης που προέκυψαν με χρήση κατά βάση πεπερασμένων στοιχείων έχουν χρησιμοποιηθεί ως είσοδοι σε μεθοδολογίες-αλγορίθμους νευρωνικών δικτύων. Ο στόχος είναι η συσχέτιση των συνθηκών λειτουργίας με τις αποκρίσεις ώστε να είναι δυνατή η άμεση περιγραφή και πρόβλεψη χαρακτηριστικών λειτουργίας και εξόδου της συσκευής από τον τελικό της χρήστη.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

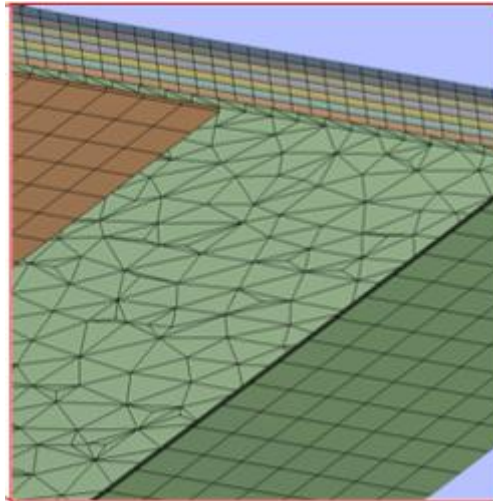
Τα θερμοηλεκτρικά (TE) υλικά είναι ένας δυνητικός υποψήφιος για τη συγκομιδή της θερμικής ενέργειας, λόγω της ικανότητάς τους να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ακόμη και από μικρές κλίσεις θερμοκρασίας που συχνά δημιουργούνται από ανεπαρκείς πηγές ενέργειας (π.χ. κινητήρες καύσης ή σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής). Τα TE υλικά ακολουθούν το γνωστό θερμοηλεκτρικό ή το φαινόμενο Seebeck (αντίθετο από το φαινόμενο Peltier) που περιγράφεται από τη θερμοηλεκτρική ισχύ (TEP) ή τη θερμοηλεκτρική ενέργεια ή το συντελεστή Seebeck (S). Στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο έχουμε την άμεση μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα διαμέσου της διάχυσης φορέων φορτίου, είτε ηλεκτρονίων είτε οπών, από την θερμή πλευρά του υλικού έως το κρύο. Για πρώτη φορά αναφέρεται μια θερμοηλεκτρική γεννήτρια (TEG) με βάση τις ίνες άνθρακα (CF) και η ενσωμάτωσή της σε ένα εποξειδικό στρωματοποιημένο δομικό σύνθετο υλικό φύλλο 8 φύλλων-στρωμάτων. Το CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) με δυνατότητα TEG αποτελείται από υφάσματα μονής κατεύθυνσης (UD) σε συμμετρική εναλλασσόμενη διαμόρφωση 0/90, με το δομοστοιχείο CF TEG να περιλαμβάνεται στο κάτω στρώμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Λεπτομέρειες για την κατασκευή της συσκευής μπορούν να βρεθούν στην εργασία<sup>[1]</sup>.



**Σχήμα 1.** Η θερμοηλεκτρική συσκευή (CF TEG) αποτελούμενη από 10 θερμοστοιχεία στο κατώτερο στρώμα της

### ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (FEM)

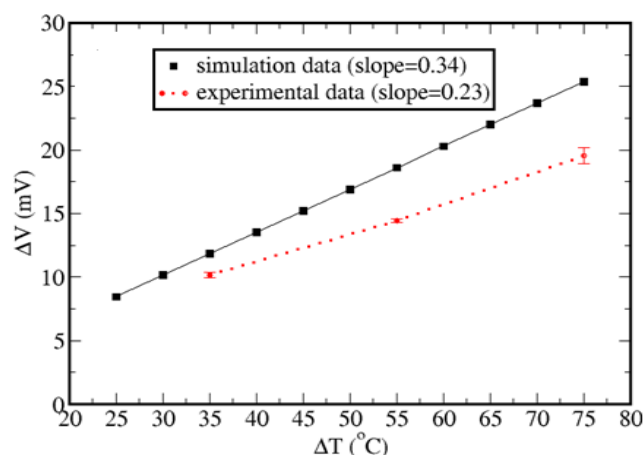
Η προτεινόμενη κατασκευασμένη, αποτελούμενη από δέκα (10) θερμοστοιχεία, θερμοηλεκτρική συσκευή στο Εργαστήριο Σύνθετων και Ευφύων Υλικών (CSM LAB) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 μοντελοποιείται και μελετάται χρησιμοποιώντας αριθμητικές προσομοιώσεις και την ακριβή γεωμετρία του CFRP με δυνατότητα TEG. Η μεθοδολογία πεπερασμένων στοιχείων (FEM) χρησιμοποιείται για τη λύση των συζευγμένων καταστατικών εξισώσεων που διέπουν τα θερμοηλεκτρικά φαινόμενα με τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες<sup>[1]</sup>. Η θερμοηλεκτρική συσκευή που έχει εξωτερικές διαστάσεις 40.0 mm × 60.0 mm έχει χωριστεί σε τέσσερα διαφορετικά χωρία που υιοθετούν ξεχωριστές διαδικασίες διακριτοποίησης των γεωμετριών τους. Οι περιοχές πλάκας αλουμινίου, στις οποίες τοποθετήθηκε το CFRP, για να υποδεχθούν την κλίση της θερμοκρασίας, χωρίστηκαν με μήκος διακριτοποίησης 0.002 m. Για τη με στρώματα περιοχή, χρησιμοποιήθηκε ένα μήκος διακριτοποίησης 0.0009 m για κάθε ένα από τα μεμονωμένα 7 στρώματα του σύνθετου υλικού που βρίσκεται πάνω από το πρώτο στρώμα που φιλοξενεί τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία και τη ρητίνη της συσκευής. Στο πρώτο στρώμα η μεμονωμένη γεωμετρία των δέκα κυλινδρικών θερμοστοιχείων, που το καθένα είχε μήκος 33.4 mm και διάμετρο 0.156 mm, διακριτοποιήθηκε με μήκος διακριτοποίησης στα 0.0002 m, ενώ τα αγωγίμα καλώδια Cu με 0.0001 m προκειμένου να παρακολουθούν λεπτομερώς την περιοχή ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην περιοχή επαφής της ρητίνης, του θερμοστοιχείου και των συρμάτων Cu, όπου χρησιμοποιήθηκε προσαρμοστική σύνδεση για την εξασφάλιση λεπτότερων και πυκνότερων πλεγμάτων. Τέλος, η περιοχή ρητίνης είναι διακριτοποιημένη με τετραεδρικά στοιχεία μεγέθους ίσου με 0.0025 m. Μετά την προαναφερθείσα διαδικασία διακριτοποίησης, έχουν δημιουργηθεί 436939 κόμβοι με 120207 πραγματικά στοιχεία. Το παραγόμενο πλέγμα για τη διακριτοποιημένη γεωμετρία της συσκευής CFRP με δυνατότητα TEG φαίνεται στο Σχήμα 2 σε μεγέθυνση και εισήχθη στο ANSYS Finite Element Solver. Οι απαραίτητες οριακές συνθήκες με το "κρύο" στοιχείο να έχει διατηρηθεί σε θερμοκρασία 24° C. Στο "θερμό" στοιχείο πλάκας μπορεί να μεταβάλλεται η θερμοκρασία και έτσι δημιουργείται η απαιτούμενη διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T$ . Το πρώτο θερμοστοιχείο έχει τάση 0 Volt (γειωμένο) προκειμένου να κατευθύνει την τρέχουσα ροή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη  $\Delta T$ . Η συσκευή αποτελείται από δέκα (10) σειριακά συνδεδεμένα CF-M40B θερμοστοιχεία που μαζί με τις αγωγίμες συνδέσεις Cu έδιναν μια αντίσταση συσκευής ίση με 109.98 Ohm.



**Σχήμα 2.** Πλέγμα διακριτοποίησης της υπό μελέτη θερμοηλεκτρικής συσκευής με τα επτά προστατευτικά στρώματα συνθέτου, το κατώτερο στρώμα που φιλοξενεί δέκα θερμοστοιχεία και τις δύο πλάκες αλουμινίου στο κατώτατο σημείο

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η αριθμητική επίλυση προβλήματος συνοριακών τιμών συζευγμένων πεδίων, που διέπουν το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, παρέχει θερμικά πεδία και ηλεκτρικά δυναμικά που μεταφράζονται σε θερμοκρασίες, κατανομές ηλεκτρικού δυναμικού <sup>[1]</sup> σε όλη τη συσκευή και διαφορές τάσης μεταξύ εισόδου και εξόδου της συσκευής. Η θερμοκρασία και το ηλεκτρικό δυναμικό υπολογίστηκαν στο διακριτοποιημένο χώρο της TE συσκευής CFRP που περιέχει δέκα (10) θερμοστοιχεία. Συγκεκριμένα οι θερμοκρασίες κατέδειξαν μια ομαλή κατανομή μεταξύ των διαφορετικών πλακών, οι οποίες χρησιμεύουν ως λουτρά θερμότητας. Η κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στα θερμοστοιχεία σε όλη την συσκευή καταδεικνύουν επίσης μια ομαλή συμπεριφορά με την αναμενόμενη πτώση τάσης κατά μήκος της ωμικής αντίστασης των θερμοστοιχείων. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται για τη συσκευή των δέκα (10) θερμοστοιχείων η τάση εξόδου (ανοιχτού κυκλώματος) για διαφορετικές τιμές διαφορών θερμοκρασίας  $\Delta T$ . Η συμφωνία ανάμεσα στα παραχθέντα από την προσομοίωση αποτελέσματα και τις πειραματικώς μετρούμενες τιμές είναι πολύ καλή με δεδομένες τις θερμικές και ηλεκτρικές απώλειες που ενέχει η πραγματική συσκευή. Η αναμενόμενη γραμμική σχέση της  $\Delta V$  ως συνάρτηση του  $\Delta T$  είναι έκδηλη με την κλήση της ευθείας να είναι ο συντελεστής Seebeck  $S = \Delta V / \Delta T$  του οποίου η ανεξάρτητη πειραματική μέτρηση για το p-type CF-M40B είναι  $S=33.826 \text{ mV/K}$ .



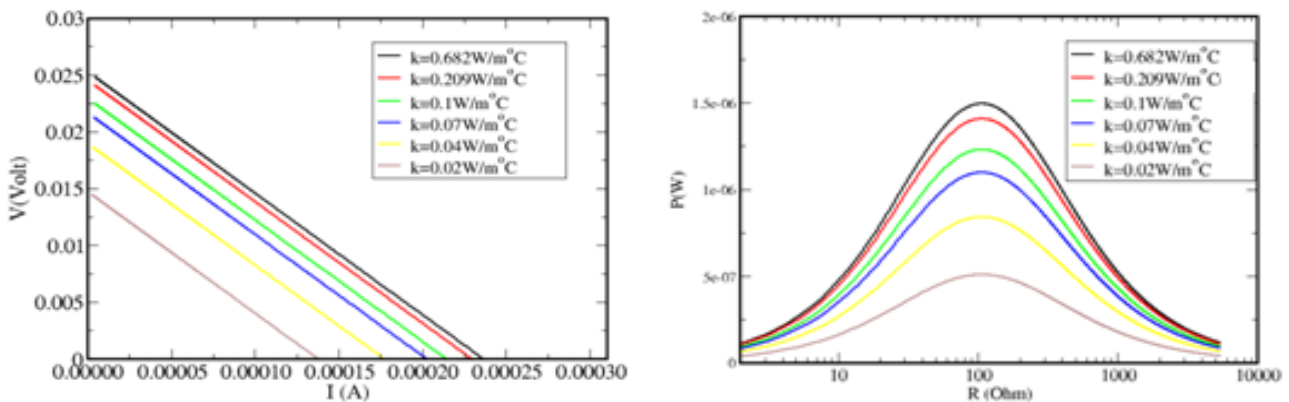
**Σχήμα 3.** Τάση εξόδου (ανοιχτού κυκλώματος) για διαφορετικές τιμές διαφορών θερμοκρασίας και άρα συνθηκών λειτουργίας από πειραματικές μετρήσεις και από την αριθμητική προσομοίωση

Με υπολογισμένη τη διαφορά δυναμικού στα άκρα της συσκευής και γνωστή την εσωτερική αντίστασή της είναι δυνατός ο υπολογισμός της μέγιστης καταναλισκόμενης ισχύος. Η μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς μαζί με τα τη διαφορά δυναμικού (τάση ανοικτού κυκλώματος  $V_{OC}$ ) παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1.** Αποτελέσματα προσομοίωσης και πειραματικές μετρήσεις για την τάση ανοικτού κυκλώματος καθώς και τη μέγιστη ισχύ της TE συσκευής σε διαφορετικές κλίσεις θερμοκρασίας.

Temperature difference ( $\Delta T$ )	VOC simul. (mV)	Pmax simul. ( $\mu W$ )	VOC exper. (mV)	Pmax exper. ( $\mu W$ )
35	11.83	0.32	10.19	0.24
55	18.60	0.79	14.44	0.47
75	25.36	1.46	19.56	0.87

Ακολουθώντας τις επιταγές της πειραματικής διαδικασίας και πάντα σε στενή συνεργασία με το πείραμα μελετήθηκε η επίδραση της θερμικής αγωγιμότητας της ρητίνης στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά εξόδου της συσκευής. Η βασική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα είχε συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $k=0.682W/m^{\circ}C$  και επιλέχθηκε και με γνώμονα αριθμητικές επιλύσεις που έλαβαν χώρα συγκριτικά για άλλες διαθέσιμες εμπορικές ρητίνες μερικές τιμές εκ των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 4. Χαρακτηριστικές τάσης – ρεύματος ( $V-I$ ) καθώς και η κατανάλωση ισχύος σε αντιστάσεις φορτίου υπολογίστηκαν για διαφορετικές ρητίνες με διαφορετικές θερμικές αγωγιμότητες καθώς και για τον αέρα και τελικά επιλέχθηκε η ρητίνη με τη μεγαλύτερη τιμή που δίνει και τη μεγαλύτερη τάση ανοικτού κυκλώματος.

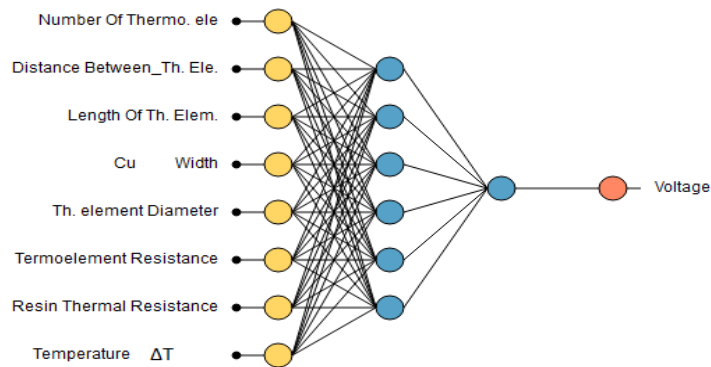


**Σχήμα 4.**  $V-I$  χαρακτηριστικά της TE συσκευής με δέκα (10) θερμοστοιχεία (αριστερά) και κατανάλωση ισχύος ( $P$ ) (δεξιά) πάνω στην αντίσταση φορτίου ( $R$ ) για διαφορετικές τιμές θερμικής αγωγιμότητας της ρητίνης.

#### ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

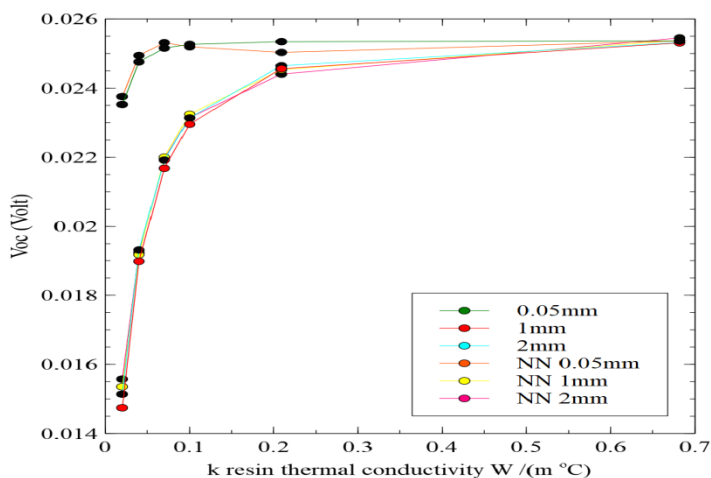
Σε επίπεδο σχεδιασμού θερμοηλεκτρικής συσκευής είναι επιτακτική η ανάγκη για τη βέλτιστη απόδοσή της. Υπάρχει όμως και η απαίτηση του σχεδιαστή να έχει στη διάθεσή του χαρακτηριστικά λειτουργίας της στην περίπτωση τροποποίησης κάποιων από τις πολλές παραμέτρους που είναι φανερό πως εμπλέκονται σε μία τέτοια συσκευή απαιτεί ενδεχομένως επανασχεδιασμό της γεωμετρίας και πλήρη επανάληψη των απαιτητικών υπολογισμών πεπερασμένων στοιχείων. Τα υλικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των θερμοστοιχείων, οι μεταξύ τους απόσταση, οι ωμικές συνδέσεις τους, η θερμική αγωγιμότητα της ρητίνης είναι μερικές από τις παραμέτρους που μπορούν και παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία της. Στην

παρούσα εργασία έγινε χρήση τεχνικών νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιώντας λογισμικό και υπολογιστικά εργαλεία από το Tensor Flow της Google καθώς και το MatLab για τη μοντελοποίηση πρόβλεψης και εκτίμησης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της συσκευής. Επιλέχθηκε το νευρωνικό δίκτυο feedforward τοπολογίας<sup>[3]</sup> (8 input, 6 neurons on hidden layer, 1 output) με tanh συναρτήσεις ενεργοποίησης. Το πλήθος των θερμοστοιχείων, η μεταξύ τους απόσταση, το μήκος και η διάμετρος τους από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, η θερμική αγωγιμότητα της ρητίνης (Σχήμα 5) συσχετίστηκαν για την εκτίμηση της τάσης εξόδου της συσκευής για ενδιάμεσες τιμές των παραμέτρων.



**Σχήμα 5.** Πολυπαραμετρική μοντελοποίηση της τάσης εξόδου της συσκευής με χρήση τεχνικών νευρωνικών δικτύων

Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν αποτελέσματα προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων για ένα εύρος τιμών των προαναφερθέντων παραμέτρων. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στο Σχήμα 6 τιμές τάσης εξόδου, που έχουν προκύψει από το νευρωνικό δίκτυο σε ενδιάμεσες τιμές πάχους για τις αγωγίμες συνδέσεις Cu καθώς και υπολογισμοί σε αυτές τις ενδιάμεσες τιμές με επίλυση του θερμοηλεκτρικού προβλήματος με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα είναι σε πολύ καλή συμφωνία. Είναι φανερό λοιπόν πως η χρήση νευρωνικών δικτύων στο γενικότερο πλαίσιο της τεχνητής νοημοσύνης μπορεί να δώσει ασφαλείς εκτιμήσεις σε ελάχιστο χρόνο σε ενδιάμεσες τιμές για τις παραμέτρους έχοντας λάβει το set δεδομένων εκπαίδευσης όπως αυτά προέκυψαν από τις αριθμητικές επιλύσεις πεπερασμένων στοιχείων.



**Σχήμα 6.** Εκτίμηση της τάσης εξόδου της συσκευής με χρήση τεχνικών νευρωνικών δικτύων για διαφορετικές θερμικές αγωγιμότητες και πάχους αγωγίμων συνδέσεων Cu. Επίσης παρουσιάζονται σε αυτές τις ενδιάμεσες τιμές και αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα αριθμητικής μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές μετρήσεις τάσης ανοικτού κυκλώματος  $V_{oc}$  και την απόδοση της συσκευής. Διεξήχθη πολυπαραμετρική μελέτη με μεταβλητές τις μεταβολές της θερμοκρασίας, το μήκος και τη διάμετρο των θερμικών στοιχείων, τη θερμική αγωγιμότητα της ρητίνης, το συντελεστή πυκνότητας πλήρωσης των θερμοστοιχείων. Εν δυνάμει μπορούν να μελετηθούν νέα υλικά ημιαγωγών με υψηλότερους συντελεστές Seebeck και βελτιωμένα χαρακτηριστικά ηλεκτρικής ισχύος που χρησιμοποιούνται στο εργαστήριο Συνθέτων και Ευφυών Υλικών του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης των Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων (CSM LAB). Η έξοδος της προαναφερθείσας πολυπαραμετρικής μελέτης Πεπερασμένων Στοιχείων που συνεπικουρεί πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιείται ως είσοδος για μια διαδικασία πρότυπης μοντελοποίησης νευρωνικού δικτύου με ενδιαφέρουσες δυνατότητες που βοηθούν στο σχεδιασμό και την κατασκευή βέλτιστων συσκευών TE.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου «ΠΡΟΗΓΜΕΝΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΙΕΡΑΡΧΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΥΤΟΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟ ΚΑΙ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΕΛΕΓΧΟ ΥΓΙΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ» -[ATHENA]», και συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εθνικούς πόρους μέσω του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα, Επιχειρηματικότητα & Καινοτομία (ΕΠΑνΕΚ 2014-2020), Δράση ΕΡΕΥΝΩ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ (κωδικός έργου: Τ1ΕΔΚ-03480). Οι αριθμητικές προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων και υπολογισμοί νευρωνικών δικτύων έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Μαθηματικής Μοντελοποίησης και Επιστημονικών Υπολογισμών του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G. Karalis, L. Tzounis, E. Lambrou, L. N. Gergidis, A. S. Paipetis, "A carbon fiber thermoelectric generator integrated as a lamina within an 8-ply laminate epoxy composite: Efficient thermal energy harvesting by advanced structural materials", submitted.
- [2] A. Boukai, Y. Bunimovich, J. Tahir-Kheli, J. Yu, W. Goddard, J. Heath. Nature. (2008); 451(7175):168-171.
- [3] J.Schmidhuber. Neural Networks 61 (2015) 85-117.