

## ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΕΥΡΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

**Θ. Ξενιτόπουλος<sup>1</sup>, Α. Αναγνωστόπουλος<sup>1,2\*</sup>, Υ. Ding<sup>2</sup>, Π. Σεφερλής<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

<sup>2</sup>Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Μπέρμινχαμ, Αγγλία

(\*[argyanag@meng.auth.gr](mailto:argyanag@meng.auth.gr))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει μία καινοτόμα μεθοδολογία για τον σχεδιασμό, τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση προηγμένων συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας συμπαγούς κλίνης. Συνδυάζει μεταευρετικούς αλγορίθμους με ένα μοντέλο βαθιάς μάθησης (νευρωνικό δίκτυο) για την πρόβλεψη της επίδοσης του συστήματος. Το νευρωνικό δίκτυο πετυχαίνει υψηλές τιμές του συντελεστή  $R^2$  (πάνω από 0.975) και χαμηλό μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (9.14%) στα δεδομένα επικύρωσης. Το νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιείται ως γενέτειρα της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στους μεταευρετικούς αλγορίθμους, αντικαθιστώντας την αναλυτική επίλυση υπολογιστικής ρευστομηχανικής με στόχο την επιτάχυνση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Αυτή η έρευνα υπογραμμίζει τη δυνατότητα εφαρμογής των προσεγγίσεων που ενσωματώνουν μηχανική μάθηση για τη δημιουργία γενικευμένων πλαισίων σχεδίασης συστημάτων Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας, προσφέροντας αποτελεσματικές λύσεις για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Ανάκτηση Απορριπτόμενης Θερμότητας, Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας, Υλικά Αλλαγής Φάσης, Βελτιστοποίηση διεργασιών, Βαθιά Μάθηση

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι παραδοσιακές βιομηχανίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην παγκόσμια οικονομία αλλά είναι τομείς των οποίων η απανθρακοποίηση είναι μεγάλη πρόκληση<sup>[1]</sup>. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση των βιομηχανικών εκπομπών άνθρακα κατά 42% έως το 2030<sup>[2]</sup>, αναγνωρίζοντας ότι οι βιομηχανίες συνεισφέρουν σημαντικά στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια ολοένα και μεγαλύτερη ανάγκη για ανάπτυξη τεχνολογιών ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας που μπορούν να δώσουν τη λύση σε αυτό το πρόβλημα<sup>[3]</sup>. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας (ΑΘΕ) αναδεικνύεται ως μία ελπιδοφόρα λύση που θα γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της παραγωγής απορριπτόμενης ενέργειας και της ανάγκης για ενεργειακή κατανάλωση σε ενεργειακά έντονους τομείς<sup>[4]</sup>. Η ΑΘΕ χωρίζεται σε τρεις επιμέρους κατηγορίες: αποθήκευση αισθητής θερμότητας, αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και αποθήκευση θερμοχημικής ενέργειας. Ανάμεσα σε αυτές, τα Σύνθετα Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΣΥΑΦ) στο πλαίσιο της δεύτερης κατηγορίας, δείχνουν υποσχόμενες προοπτικές στην ενίσχυση της ενθυλάκωσης των Υλικών Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ), με αποτέλεσμα την βελτίωση της απόδοσης μεταφοράς θερμότητας. Τα συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας συμπαγούς κλίνης προσφέρουν ευελιξία και αποτελεσματικότητα σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και βιομηχανικών εφαρμογών<sup>[5]</sup>. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα σε αυτά τα συστήματα επικεντρώνεται σε νέες μεθοδολογίες για τον σχεδιασμό, τα υλικά και την βελτιστοποίηση. Ένα νέο εργαλείο το οποίο εισάγεται στον τομέα είναι η μηχανική μάθηση (MM) με την προοπτική ότι μπορεί να μοντελοποιήσει και να βελτιστοποιήσει τα συστήματα αυτά. Κύρια εφαρμογή της MM στα συστήματα αυτά είναι η πρόβλεψη της επίδοσης του συστήματος και η βελτιστοποίηση σημαντικών παραμέτρων για βέλτιστη λειτουργία<sup>[6]</sup>. Παρόλο που τα συστήματα αποθήκευσης

λανθάνουσας ενέργειες συμπαγούς κλίνης αποτελούν μία λύση για την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας, υπάρχει ακόμα χώρος για ανάπτυξη νέων μεθοδολογιών ειδικά τέτοιων που ενοποιούν την MM με την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας. Η MM παρουσιάζει νέες ευκαιρίες για βελτίωση των συστημάτων και μπορεί να αντιμετωπίσει υπάρχοντες προκλήσεις με στόχο την πρόοδο και εξέλιξη της τεχνολογίας για να επιτευχθούν οι στόχοι προς την αειφορία.

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει τα εξής βήματα : Αρχικά ορίζουμε τις υπό μελέτη παραμέτρους που σχετίζονται με τη λειτουργία και την επίδοση συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας συμπαγούς κλίνης (οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 1 μαζί με τα όρια και τις μονάδες μέτρησης, και οπτικοποιούνται στο Σχήμα 1), και πραγματοποιούμε μία δειγματοληψία με τη μέθοδο Latin Hypercube Sampling δημιουργώντας έτσι 600 υποψήφιους σχεδιασμούς. Για κάθε έναν από τους σχεδιασμούς επιλύουμε το πρόβλημα υπολογιστικής ρευστομηχανικής και υπολογίζουμε την θερμότητα που αποθηκεύτηκε και τη θερμότητα που εξάχθηκε από το σύστημα (το μοντέλο CFD έχει επικυρωθεί με βάση δύο μελέτες που έχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα και η επικυρωποίηση φαίνεται στο Σχήμα 2). Χρησιμοποιούμε τους σχεδιασμούς και τα αποτελέσματα για το κάθε σύστημα ως βάση δεδομένων για να εκπαιδύσουμε ένα βαθύ νευρωνικό δίκτυο το οποίο προβλέπει την επίδοση οποιουδήποτε συστήματος πολύ πιο γρήγορα από την αναλυτική επίλυση του προβλήματος υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Έχοντας αυτό το μοντέλο που μπορεί να προβλέψει την επίδοση οποιουδήποτε συστήματος, το χρησιμοποιούμε ως γενέτειρα της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για να κάνουμε βελτιστοποίηση με μεταερευτικούς αλγορίθμους και να λάβουμε τους βέλτιστους σχεδιασμούς. Για την επίλυση του προβλήματος ρευστομηχανικής χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα COMSOL Multiphysics. Οι ακόλουθες παραδοχές έγιναν κατά τους υπολογισμούς : η περιοχή που βρίσκονται τα ΥΑΦ αντιμετωπίστηκε ως συνεχές, ενοποιημένο και ιστροπικό πορώδες περιβάλλον; Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία θεωρήθηκε αμελητέα; Μία συνθήκη μη ολίσθησης εφαρμόστηκε στα στερεά τοιχώματα που αλληλοεπιδρούν με το πορώδες μέσο, αντιμετωπίζοντας το στερεό πλέγμα ως αμετακίνητο εμπόδιο στο οποίο δε μπορεί να ολισθήσει ρευστό. Η διεπιφάνεια “Free and Porous Media Flow” χρησιμοποιήθηκε για να υπολογιστεί η δυναμική ρευστών μέσα στην συμπαγή κλίση αξιοποιώντας τις εξισώσεις Navier-Stokes για συμπιεστή ροή (1). Ο νόμος Darcy κρίθηκε πως δεν ταιριάζει εξαιτίας μεγάλων αριθμών Reynolds και Knudsen, τυπικούς σε ροές συμπαγούς κλίνης, οπότε χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο ροής non-Darcian, το οποίο βασίζεται στην εξίσωση Ergun (2),(3). Οι εξισώσεις διατήρησης μάζας και συνέχειας χρησιμοποιήθηκαν για πηγές (4). Στην είσοδο της διάταξης, μέτρα λήφθηκαν για να βεβαιωθούμε ότι η ροή εισέρχεται κάθετα στην επιφάνεια και όχι εφαπτομενικά ή με κλίση, ενώ στην έξοδο επιλέχθηκε ένας μηχανισμός ώστε να μην υπάρχει ροή προς το εσωτερικό της συσκευής από έξω. Η μετάδοση θερμότητας προσομοιώθηκε με την διεπιφάνεια “Heat Transfer in Solids and Fluids”, συγκεκριμένα με τις εξισώσεις θερμοδυναμικής μέσα στην υγρή και στερεή φάση του ΥΑΦ (5). Επιλέχθηκε η προσέγγιση Local Thermal Nonequilibrium για να αντισταθμιστούν οι πιθανές θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ υγρής και στερεής φάσης μέσα στο πορώδες μέσο. Η εξίσωση μετάδοσης θερμότητας στην υγρή φάση μέσα στο πορώδες μέσο φαίνεται στην εξίσωση (6), ενώ η μετάδοση θερμότητας στην στερεή φάση του ΣΥΑΦ στην (8), και η μετάδοση θερμότητας μεταξύ υγρής και στερεής φάσης στην (9). Για την επίλυση του προβλήματος πρώτα απευθυνόμαστε την ελεύθερη πορώδη ροή σε στατική φάση και στη συνέχεια λύνουμε την θερμοδυναμική και μετάδοση θερμότητας σε στερεά και υγρά σε χρονικά μεταβαλλόμενη φάση. Ο υπολογισμός της συνολικής ενέργειας που αποθηκεύτηκε και που απελευθερώθηκε δίνεται από τις εξισώσεις (16) και (17) αντίστοιχα. Οι ιδιότητες των ΥΑΦ παραμετροποιήθηκαν ανάλογα με το σημείο τήξης του κάθε υπό μελέτη υλικού. Τα εξεταζόμενα σε αυτή τη μελέτη υλικά φαίνονται στον Πίνακα 2 μαζί με το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο αντιστοιχούν και τις πηγές από τις οποίες πάρθηκαν οι

ιδιότητες τους.

$$\frac{1}{\varepsilon_p} \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot (-pI + K) - (\mu\kappa^{-1} + \beta\rho|u| + \frac{Q_m}{\varepsilon_p^2})u + F \quad (1)$$

$$\beta = \frac{1.75}{d_p(\varepsilon_p^3)} \frac{(1-\varepsilon_p)}{\varepsilon_p^3} \quad (2)$$

$$k = \frac{d_p^2}{150} \frac{\varepsilon_p^3}{(1-\varepsilon_p)^2} \quad (3)$$

$$\rho \cdot \nabla \cdot u = Q_m \quad (4)$$

$$\rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (5)$$

$$\rho_f C_{p,f} u \cdot \nabla T_f + \nabla \cdot q_f = Q_{s,f} + \varepsilon_p Q_f + \varepsilon_p Q_p + \varepsilon_p Q_{vd} \quad (6)$$

$$q_f = -(\varepsilon_p k_f + k_{disp}) \nabla T_f \quad (7)$$

$$\nabla \cdot q_s = -Q_{s,f} + \theta_s Q_s \quad (8)$$

$$Q_{s,f} = S_b h_{sf} (T_s - T_f) \quad (9)$$

Όπου  $S_b$  η ειδική επιφάνεια ορισμένη ως :

$$S_b = \frac{6\theta_s}{d_{pe}} \quad (10)$$

Όπου  $d_{pe}$  η διάμετρος των σφαιρικών καψουλών ΣΥΑΦ εντός της συμπαγούς κλίνης σε μέτρα και ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας ορισμένος ως :

$$h_{sf} = \left[ d_{pe} \left( \frac{1}{k_f Nu} + \frac{1}{k_s} \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα της στερεής φάσης του ΣΥΑΦ απεικονίζεται ως :

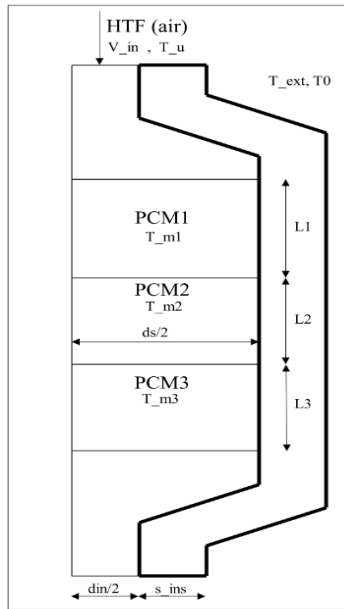
$$C_{p,s} = \theta_1 C_{p,1} + \theta_2 C_{p,2} + L_{1 \rightarrow 2} \frac{\partial a_m}{\partial T} \quad (12)$$

Όπου  $\theta_1$  και  $\theta_2$  τα κλάσματα όγκου των δύο φάσεων (στερεή και υγρή),  $c_{p1}$  και  $c_{p2}$  είναι οι ειδικές θερμοχωρητικότητες των δύο φάσεων και  $L_{12}$  η λανθάνουσα θερμότητα σχετιζόμενη με τη μεταβολή φάσης από την φάση 1 στην φάση 2, και  $a_m$  είναι το κλάσμα του μέσου όγκου.

$$a_m = \frac{1}{2} \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_1 + \theta_2} \quad (13)$$

Η θερμική αγωγιμότητα του ΣΥΑΦ περιγράφεται ως :

$$k_s = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \quad (14)$$



**Σχήμα 1.** Σχηματική αναπαράσταση της συσκευής και απεικόνιση των εξεταζόμενων μεταβλητών

Οι απώλειες από τις πλάγιες επιφάνειες του συστήματος μοντελοποιούνται ως μία ειδική θερμορροή  $q_0$  κατά μήκος των συνόρων της συσκευής ως :

$$q_0 = h (T_{amb} - T) \quad (15)$$

$$Q_{charge} = \dot{m}_{air} \times \tau \times \sum_{n=1}^N (T_{inlet} C_{p,air,inlet} - T_{outlet} C_{p,air,outlet}) \quad (16)$$

$$Q_{discharge} = \dot{m}_{air} \times \tau \times \sum_{n=1}^N (T_{outlet} C_{p,air,outlet} - T_{inlet} C_{p,air,inlet}) \quad (17)$$

**Πίνακας 1.** Μεταβλητές που εξετάζονται στην επίλυση και στο νευρωνικό δίκτυο

Περιγραφή Μεταβλητής	Σύμβολο	Μονάδες Μέτρησης	Κάτω Όριο	Άνω Όριο
Διάμετρος αποθηκευτικού δοχείου	ds	m	0.15	6
Διάμετρος εισόδου	din	m	0.1	2
Διάμετρος σωματιδίων	dp	m	0.01	0.25
Παροχή όγκου εργαζόμενου μέσου	V_in	m <sup>3</sup> /s	0.1	6
Πάχος μόνωσης	s_ins	m	0.01	1
Μήκος πρώτου αποθηκευτικού δοχείου	L1	m	0.1	5
Μήκος δεύτερου αποθηκευτικού δοχείου	L2	m	0.1	5
Μήκος τρίτου αποθηκευτικού δοχείου	L3	m	0.1	5
Χρόνος φόρτισης	t_charging	h	1	8
Χρόνος εκφόρτισης	t_discharge	h	1	28
Αρχική Θερμοκρασία	T0	°C	-5	30
Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	T_ext	°C	-5	30
Θερμοκρασία τήξης πρώτου ΥΑΦ	T_m1	°C	0.1	550
Θερμοκρασία τήξης δεύτερου ΥΑΦ	T_m2	°C	0.1	500
Θερμοκρασία τήξης τρίτου ΥΑΦ	T_m3	°C	0.1	500
Θερμοκρασία απορριπτόμενης ροής	T_u	°C	0.1	650

Το μοντέλο υπολογιστικής ρευστομηχανικής που περιγράφεται παραπάνω, υποβλήθηκε σε διαδικασία επικύρωσης για να εξασφαλισθεί η ακρίβειά του στην προσομοίωση της διεργασίας. Εξετάσθηκαν δύο μελέτες επικύρωσης έναντι πειραματικών δεδομένων από προηγούμενες μελέτες [7],[8], με σφάλματα κοντά στο 0.46% και 4.47% αντίστοιχα. Κρίνεται ότι συνολική συμφωνία μεταξύ προσομοίωσης και πειραματικών δεδομένων είναι ικανοποιητική.

**Πίνακας 2.** Υλικά Αλλαγής Φάσης που εξετάζονται και πηγές για τις ιδιότητές τους

Τύπος Υλικού Αλλαγής Φάσης	Θερμοκρασία (°C)	Πηγή
Paraffin RT Series	50-100	Ιστοσελίδα εταιρίας
LiNO <sub>3</sub> -NaNO <sub>3</sub> -KNO <sub>3</sub> -Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	98-147	[9-11]
NaNO <sub>2</sub> -KNO <sub>3</sub>	138-220	[11-13]
NaNO <sub>2</sub> -KNO <sub>3</sub>	220-334	[11,14-16]
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	397-600	[17-18]

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου που επιλέχθηκε για την μοντελοποίηση της θερμότητας που αποθηκεύεται και που απελευθερώνεται ξεκινάει με μία κανονικοποίηση των δεδομένων, χρησιμοποιεί L2 κανονικοποίηση για την αποφυγή του overfitting και αποτελείται από πλήρως συνδεδεμένα επίπεδα με 2048, 1024, 256, 64, 16 νευρώνες που καταλήγουν στον τελικό νευρώνα, και χρησιμοποιεί την ReLU ως συνάρτηση ενεργοποίησης. Στα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τεστ, πετυχαίνει τιμή του συντελεστή συσχέτισης  $R^2$  0.975 για την θερμότητα που αποθηκεύεται και 0.974 για την θερμότητα που απελευθερώνεται, και κρίνεται ικανό να προβλέψει αξιόπιστα και γρήγορα τη θερμική επίδοση οποιουδήποτε συστήματος. Για τα υπόλοιπα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τεστ, εφαρμόζουμε τον στατιστικό έλεγχο υπόθεσης Shapiro-Wilk ώστε να βεβαιωθούμε ότι τα υπόλοιπα ακολουθούν κανονική κατανομή και επομένως να μην προστίθεται μεροληψία από το μοντέλο παλινδρόμησης. Γίνεται σύγκριση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης (Genetic Algorithm, Harmony Search, Wind Driven Optimization, Ant Colony Optimization) ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην οποία συγκλίνανε και τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτήθηκε. Ο αλγόριθμος Harmony Search εκτελείται γρήγορα και οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα. Εφαρμόζουμε τη μεθοδολογία με τα παραπάνω μοντέλα πρόβλεψης και αλγόριθμο βελτιστοποίησης σε περιπτώσεις όπου προέκυψαν πειραματικά αποτελέσματα για να δείξουμε κατά πόσο θα μπορούσε να βελτιωθεί η επίδοση των συστημάτων, βελτιστοποιώντας τις σχεδιαστικές παραμέτρους, και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

**Πίνακας 3.** Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε μελέτες περίπτωσης από την βιβλιογραφία

Μελέτη Περίπτωσης	1 <sup>[19]</sup>	2 <sup>[7]</sup>	3 <sup>[20]</sup>	4 <sup>[21]</sup>
<b>Πειραματικά αποτελέσματα</b>				
Θερμοκρασία φόρτισης	465	326	375	65
Παροχή όγκου απορριπτόμενης ροής	0.0129	0.03056	0.00862	0.0075
Χρόνος φόρτισης	1.0	3.33	5.0	3.0
Θερμοκρασία εκφόρτισης	325	286	50	30
Χρόνος εκφόρτισης	1.33	3.33	3.33	2.0
Αποθηκευμένη ενέργεια [MJ]	7.44	3.96	26.41	2.54
Απελευθερωμένη ενέργεια [MJ]	6.48	3.84	25.59	2.16
Βαθμός απόδοσης φόρτισης (%)	91.5	72.3	76.4	50.5
Βαθμός συνολικής απόδοσης	79.7	70.1	74	42.9
<b>Μοντελοποιημένα αποτελέσματα</b>				
Αποθηκευμένη ενέργεια [MJ]	7.66	5.01	31.11	4.22
Απελευθερωμένη ενέργεια [MJ]	7.12	4.78	28.37	3.98
Βαθμός απόδοσης φόρτισης (%)	93.6	92.8	90.3	84.4
Συνολικός βαθμός απόδοσης (%)	87.0	88.5	82.4	79.6

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη αυτή αντιμετωπίζει την επείγουσα ανάγκη για αποδοτική ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας σε βιομηχανίες με υψηλές εκπομπές άνθρακα, εισάγοντας μία καινοτόμο προσέγγιση για την μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση συστημάτων αποθήκευσης λαθάνουσας θερμότητας συμπαγούς κλίνης, η οποία συνδυάζει βαθιά μάθηση και μεταερευτικούς αλγορίθμους. Κύρια ευρήματα περιλαμβάνουν την υψηλή προσαρμοστικότητα του μοντέλου βαθιάς μάθησης σε διαφορετικές κλίμακες, την αποτελεσματικότητα του Harmony Search αλγορίθμου στην βελτιστοποίηση του συστήματος για μέγιστη ανάκτηση αποθηκευμένης ενέργειας. Τέλος, μελλοντικές εξελίξεις περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση στοιχείων κόστους και πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση λαμβάνοντας υπόψη την επίδοση του συστήματος και το συνολικό κόστος.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στα πλαίσια του REDTHERM (101068507) για την χρηματοδότηση αυτής της έρευνας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] O. Ellabban, H. Abu-Rub, F. Blaabjerg, Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39(2014)
- [2] European Commission, 2030 Energy Strategy, Europa (2016)
- [3] H. Jouhara et al., Waste Heat recovery technologies and applications, *Therm. Sci. Eng. Prog.* 6. (2018)
- [4] L. Miró, J. Gasia, L.F. Cabeza, Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery : A review, *Appl. Energy*, 179 (2016)
- [5] H. Jouhara et al., Latent thermal energy storage technologies and applications: A review, *Int. J. Thermofluids*. 5–6 (2020)
- [6] G.H. Gu et al., Machine learning for renewable energy materials, *J. Mater. Chem. A.* (2019).
- [7] S. Bellan et al., Numerical and experimental studies on heat transfer characteristics of thermal energy storage system packed with molten salt PCM capsules, *Appl. Therm. Eng.* 90 (2015).
- [8] S. Loem, T. Deethayat, A. Asanakham, T. Kiatsirirot, Thermal characteristics on melting/solidification of low temperature PCM balls packed bed with air charging/discharging, *Case Stud. Therm. Eng.* 14 (2019).
- [9] J. Wang, M. Lai, H. Han, Z. Ding, S. Liu, D. Zeng, Thermodynamic modeling and experimental verification of eutectic point in the LiNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>-Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ternary system, *J. Therm. Anal. Calorim.* 119 (2015)
- [10] F. Xu, J. Wang, X. Zhu, X. Liu, Thermodynamic modeling and experimental verification of a NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>-LiNO<sub>3</sub>-Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> system for solar thermal energy storage, *New J. Chem.* 41 (2017).
- [11] Y. Takahashi, R. Sakamoto, M. Kamimoto, Heat capacities and latent heats of LiNO<sub>3</sub>, NaNO<sub>3</sub>, and KNO<sub>3</sub>, *Int. J. Thermophys.* 9 (1988).
- [12] S. Nomura, Thermal Properties of NaNO<sub>2</sub>, *J. Phys. Soc. Japan.* 16 (1961).
- [13] T. Ohkubo, R. Ohnishi, V. Sarou-Kanian, C. Bessada, Y. Iwadate, Molecular dynamics simulations of the thermal and transport properties of molten NaNO<sub>2</sub>-NaNO<sub>3</sub> systems, *Electrochemistry.* 86 (2018).
- [14] A. Anagnostopoulos, A. Alexiadis, Y. Ding, Molecular dynamics simulation of solar salt (NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub>) mixtures, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 200 (2019) 109897.
- [15] A. Anagnostopoulos, A. Palacios, N. Navarrete, M.E. Navarro, L. Hernandez, Y. Ding, Effect of temperature on the internal structure of solar salt-SiO<sub>2</sub>, in: *AIP Conf. Proc.*, 2019: p. 200003.
- [16] R.W. Bradshaw, Effect of Composition on the Density of Multi-Component Molten 1250 Nitrate Salts, *Mater. Chem.* (2009).
- [17] G.J. Janz, E. Neuenschwander, F.J. Kelly, High-temperature heat content and related properties for Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, and the ternary eutectic mixture, *Trans. Faraday Soc.* 59 (1963) 841–845.
- [18] G.J. Janz, M.R. Lorenz, Solid-Liquid Phase Equilibria for Mixtures of Lithium, Sodium, and Potassium Carbonates, *J. Chem. Eng. Data.* 6 (1961).
- [19] Li, Ming-Jia, et al. "Experimental and numerical study on the performance of a new high-temperature packed-bed thermal energy storage system with macroencapsulation of molten salt phase change material." *Applied energy* 221 (2018): 1-15.
- [20] He, Xibo, et al. "Optimization design and performance investigation on the cascaded packed-bed thermal energy storage system with spherical capsules." *Applied Thermal Engineering* 225 (2023): 120241.
- [21] Izquierdo-Barrientos, María Asunción, Celia Sobrino, and José Antonio Almendros-Ibáñez. "Thermal energy storage in a fluidized bed of PCM." *Chemical engineering journal* 230 (2013): 573-583.