

## ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ CO<sub>2</sub> - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕΣΩ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ

**Α. Στόικος<sup>1,2\*</sup>, Α.-Σ. Κυριακίδης<sup>2</sup>, Γ. Γραβάνης<sup>2,3</sup>, Δ. Τρίγκας<sup>2,4</sup>, Ι.Ν. Τσιμπανογιάννης<sup>2</sup>, Σ.  
Βουτετάκης<sup>2</sup>, Π. Σεφερλής<sup>1,2</sup>**

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

<sup>2</sup>Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Θέρμη, Ελλάδα

<sup>3</sup>Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων, ΔΙΠΑΕ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

<sup>4</sup>Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, ΔΙΠΑΕ, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

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

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αυξανόμενη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) με στόχο τη μείωση της αξιοποίησης των ορυκτών καυσίμων, απαιτεί την εφαρμογή μεθόδων αποθήκευσης της ενέργειας (ΑΕ), για την αντιμετώπιση ζητημάτων που τις χαρακτηρίζουν με πρωταρχικό αυτό της ασυνεχούς παροχής τους. Η ηλεκτροθερμική αποθήκευση ενέργειας (ΗΑΕ), προτείνεται ως λύση για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, κάνοντας χρήση ενός κύκλου φόρτισης (HP-Heat Pump) και ενός εκφόρτισης (HE-Heat Engine) με διακρίσιμο CO<sub>2</sub> (transcritical - TCO<sub>2</sub>) ως κύριο ρευστό λειτουργίας και το νερό και τον πάγο ως δευτερεύοντα. Η παρούσα έρευνα, επεκτείνει στο Aspen Plus v11 <sup>[1]</sup> το μοντέλο ΗΑΕ μόνιμης κατάστασης των Kyriakides et al. (2023) <sup>[2]</sup>, για δυναμικότητες 5 MW και 100 MW και αξιολογεί τους δείκτες απόδοσης του, μέσω παραμετρικής ανάλυσης ευαισθησίας (ΠΑΕ). Τα αποτελέσματα της ΠΑΕ υπολογίζονται κοντά σε αυτά της ΠΑΕ 1 MW <sup>[2]</sup> και αντιστοίχως πετυχαίνουν βελτίωση της συνολικής απόδοσης του βασικού συστήματος 7.68 % στα 5 MW και 7.66 % στα 100 MW. Στη συνέχεια, το μοντέλο (5 MW, 100 MW), επεκτείνεται περαιτέρω για να συμπεριλάβει την γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> και αξιολογείται η συνολική απόδοση 9 σεναρίων γεωλογικής αποθήκευσης σε σύγκριση με αυτή του μοντέλου χωρίς γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub> εφαρμόζοντας ξανά ΠΑΕ. Όλα τα σενάρια εκτός από ένα παρουσιάζουν βελτίωση του δείκτη απόδοσης με τη βέλτιστη να είναι 4.36 % (5 MW) και 4.26 % (100 MW). Συμπεραίνεται ότι, αυτό οφείλεται στην αύξηση των ωρών εκφόρτισης από 4.69 h σε 5.12 h στα 5 MW και σε 5.11 h στα 100 MW. Επίσης η ανισορροπία των θερμικών δεξαμενών αναδεικνύεται ως παράγοντας προς διερεύνηση. Τέλος, το ψηφιακό δίδυμο του μοντέλου χωρίς και με γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub> αναπτύσσεται στην Python, για να προσφέρει ένα φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον διαχείρισης του μοντέλου και παρουσίασης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ηλεκτροθερμική αποθήκευση ενέργειας, TCO<sub>2</sub>, γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub>, ψηφιακό δίδυμο

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προβλεπόμενη μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων <sup>[3]</sup> καταδεικνύει την αυξανόμενη σημασία των ΑΠΕ. Προϋπόθεση όμως για την αποτελεσματική διεύθυνση των ΑΠΕ αποτελεί η επίλυση μίας σειράς ζητημάτων. Ένα από αυτά είναι η διαλείπουσα παροχή ενέργειας που καθιστά την ευρύτερη αξιοποίησή τους πιο δύσκολη σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Ως λύση σε αυτό το πρόβλημα, αναδεικνύεται η ΑΕ με μία σειρά μεθόδων να καταγράφονται στη βιβλιογραφία <sup>[4]</sup>. Η ΗΑΕ, που παρουσιάζεται από τους Mercangöz et al. (2012) <sup>[5]</sup>, είναι ένα σύστημα αποτελούμενο από δύο TCO<sub>2</sub> κύκλους, ένα σύστημα φόρτισης (HP) και ένα σύστημα εκφόρτισης (HE), με νερό και πάγο να χρησιμοποιούνται αντιστοίχως ως μέσα αποθήκευσης θερμής και ψυχρής θερμικής ενέργειας. Επεκτείνοντας την ιδέα αυτή, οι Carro et al. (2022) <sup>[6]</sup>, πρόσθεσαν στο μοντέλο ΗΑΕ, ένα σύστημα γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Οι Kyriakides et al. (2023) <sup>[2]</sup>, ανέπτυξαν το μοντέλο ΗΑΕ

σε μόνιμη κατάσταση, χωρίς να συμπεριλάβουν τη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> για δυναμικότητα 1 MW, και το επαλήθευσαν συγκρίνοντάς το με αυτό των Carro et al. (2022) [6]. Στη συνέχεια προχώρησαν στην αξιολόγηση του και τη βελτίωσή της απόδοσής του συστήματος ΗΑΕ, και αξιολόγησαν εναλλακτικά μέσα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας, επιπλέον του πάγου. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι κατά πρώτον η επέκταση του μοντέλου ΗΑΕ των Kyriakides et al. (2023) [2] στις δυναμικότητες των 5 MW και 100 MW και η αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος σε σύγκριση με αυτό του 1 MW [2], μέσω παραμετρικής ανάλυσης ευαισθησίας (ΠΑΕ). Σκοπός αυτής της ανάλυσης είναι να αποδειχτεί η εφαρμογή του συστήματος ΗΑΕ σε διάφορα εύρη δυναμικότητων που να ανταποκρίνονται σε πιθανές απαιτήσεις γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub>. Κατά δεύτερον, το μοντέλο επεκτείνεται για να συμπεριλάβει τη γεωλογική αποθήκευση του CO<sub>2</sub> στα 5 MW και 100 MW και αξιολογείται η απόδοση του για διαφορετικά σενάρια γεωλογικής αποθήκευσης εφαρμόζοντας ξανά ΠΑΕ. Ταυτοχρόνως η απόδοση αυτή συγκρίνεται με εκείνη του μοντέλου χωρίς γεωλογική αποθήκευση για την διερεύνηση της επίδρασης της γεωλογικής αποθήκευσης στο σύστημα ΗΑΕ. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ψηφιακό δίδυμο του προσομοιωμένου συστήματος αναπτυγμένο στην Python. Τέλος, παρουσιάζονται και αναλύονται τα συμπεράσματα της μελέτης με στόχο την μελλοντική αξιοποίησή τους.

## ΗΛΕΚΤΡΟΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΧΩΡΙΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO<sub>2</sub>

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο χωρίς γεωλογική αποθήκευση, όπως αυτό αναπτύχθηκε στο Aspen Plus V11 [1], καθώς επίσης και η ΠΑΕ, για την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας.

### Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο (Σχήμα 1) αποτελείται από δύο TCO<sub>2</sub> κύκλους (HP - Σχήμα 1α και HE Σχήμα 1β), που λειτουργούν μεταξύ μίας μέγιστης και μίας ελάχιστης πίεσης. Κατά τη διάρκεια του κύκλου HP, η ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ μετατρέπεται σε θερμική, κάνοντας χρήση δευτερευόντων ρευστών ενώ κατά τη διάρκεια του κύκλου HE, σε περιόδους έλλειψης ενέργειας η θερμική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και διοχετεύεται στο δίκτυο.



**Σχήμα 1.** Μαθηματικό μοντέλο ΗΑΕ χωρίς γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub> (1 MW [2], 5 MW, 100 MW). α) Κύκλος φόρτισης (HP-Heat Pump) β) κύκλος εκφόρτισης (HE-Heat Engine).

Το ρευστό εργασίας (working fluid) είναι το TCO<sub>2</sub> (κόκκινες γραμμές), ενώ τα δευτερεύοντα είναι το νερό (μπλε γραμμές) και ο πάγος (πράσινες γραμμές). Κατά τη διάρκεια του κύκλου HP (Σχήμα 1α), το υποκρίσιμο αέριο CO<sub>2</sub> (ρεύμα 1) συμπιέζεται στον συμπιεστή COMP από όπου εξέρχεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Έπειτα εισέρχεται στον συμπυκνωτή CON1, όπου συμπυκνώνεται αποβάλλοντας θερμότητα στο δευτερεύον ρευστό (νερό). Κατόπιν το CO<sub>2</sub> (ρεύμα 4) εκτονώνεται στην τουρμπίνα HT και εξέρχεται σε υγρή μορφή (ρεύμα 5). Στη συνέχεια, εισέρχεται στον εξατμιστή EVA1, όπου εξατμίζεται απορροφώντας θερμότητα από το δευτερεύον ρευστό (πάγο, ρεύμα ICE1), πριν κλείσει ο κύκλος. Αντίστοιχα, και κατά τη διάρκεια του κύκλου HE (Σχήμα 1β), το υποκρίσιμο CO<sub>2</sub> εισέρχεται (ρεύμα 7) στην αντλία PUMP και συμπιέζεται, ενώ στη συνέχεια εξατμίζεται στον εξατμιστή EVA2 απορροφώντας θερμότητα από το δευτερεύον ρευστό (νερό, ρεύμα HTW2). Ακολούθως το αέριο CO<sub>2</sub>, εκτονώνεται στη τουρμπίνα TURB, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και συμπυκνώνεται στον συμπυκνωτή CON2, αποβάλλοντας θερμότητα στο δευτερεύον ρευστό (πάγο, ρεύμα ICE3), και εξέρχεται σε υγρή μορφή (ρεύμα 12) κλείνοντας τον κύκλο.

Για την αξιολόγηση της απόδοσης της λειτουργίας του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν, η απόδοση του κύκλου ΗΡ,  $\eta_{HP}$  (Εξίσωση 1), η απόδοση του κύκλου ΗΕ,  $\eta_{HE}$  (Εξίσωση 2) και η συνολική απόδοση του συστήματος  $\eta_{R-T}$  (Εξίσωση 3) <sup>[2,6]</sup>, όπου  $h_{dis}$  συμβολίζει τις ώρες εκφόρτισης του ΗΕ ενώ  $h_{char}$  τις ώρες φόρτισης του ΗΡ. Οι ώρες εκφόρτισης υπολογίζονται ως το ελάχιστο μεταξύ των ωρών εκφόρτισης της θερμής δεξαμενής ( $Q_{CON1}/Q_{EVA2}$ ) $\times h_{char}$  και της ψυχρής δεξαμενής ( $Q_{EVA1}/Q_{CON2}$ ) $\times h_{char}$ .

$$\eta_{HP} = \frac{Q_{CON1} + Q_{EVA1}}{W_{COMP} - W_{HT}} \quad (1)$$

$$\eta_{HE} = \frac{W_{TURB} - W_{PUMP}}{Q_{EVA2} + Q_{CON2}} \quad (2)$$

$$\eta_{R-T} = \frac{W_{TURB} - W_{PUMP}}{W_{COMP} - W_{HT}} \times \frac{h_{dis}}{h_{char}} \quad (3)$$

### Ανάλυση ευαισθησίας

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ΠΑΕ στα 5 MW και 100 MW, με στόχο να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, ως προς την  $\eta_{R-T}$  και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του βασικού σεναρίου (base case) του συστήματος καθώς και αυτά της ΠΑΕ στα 1 MW (Πίνακας 1). Για την ΠΑΕ χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές οι μέγιστες πιέσεις,  $P_{HP,High}$  και  $P_{HE,High}$  με εύρη από 160 έως 220 bar.

**Πίνακας 1.** Αποτελέσματα ΠΑΕ (1 MW <sup>[2]</sup>, 5 MW, 100 MW) καθώς και προσομοίωσης βασικού μοντέλου.

Παράμετρος	Βασικό μοντέλο (1 MW) <sup>[2]</sup>	ΠΑΕ (1 MW) <sup>[2]</sup>	ΠΑΕ (5 MW)	ΠΑΕ (100 MW)
Μέγιστη πίεση ( $P_{HP,High}/P_{HE,High}$ , bar)	200/190	214/220	216/220	214/220
Ώρες εκφόρτισης νερού/πάγου ( $h_{dis,hs}/h_{dis,cs}$ , h)	4.85/3.92		5.61/4.69	
Ώρες φόρτισης/εκφόρτισης ( $h_{char}/h_{dis}$ , h)	10/3.92		10/4.69	
Χαμένη αισθητή θερμική ενέργεια (%)	23.72		19.61	
$\eta_{HP}/\eta_{HE}$ ,	5.3/0.083,	5.45/0.095,	5.44/0.095,	5.47/0.094,
$\eta_{R-T}$ (%)	39.26	46.90	46.94	46.92

Τα αποτελέσματα για 5 MW και 100 MW του Πίνακα 1, προσεγγίζουν τα αποτελέσματα της ΠΑΕ για σύστημα 1 MW και επιβεβαιώνουν τη βελτίωση των δεικτών απόδοσης σε σχέση με το βασικό σενάριο. Η βέλτιστη  $\eta_{R-T}$  υπολογίζεται για μέγιστες πιέσεις 216/220 bar (5 MW) και 214/220 bar (100 MW) και εμφανίζει βελτίωση σε σχέση με το βασικό μοντέλο 7.68 % στα 5 MW και 7.66 % στα 100 MW, βελτίωση που αποδίδεται στην αύξηση των  $h_{dis,cs}$  από 3.92 σε 4.69 ώρες. Η αύξηση των  $h_{dis,cs}$  οφείλεται στην αύξηση του λόγου  $Q_{EVA1}/Q_{CON2}$  που παρατηρείται στη ΠΑΕ και για τις τρεις δυναμικότητες σε σύγκριση με το βασικό μοντέλο. Το ίδιο συμπέρασμα, προκύπτει και για τους  $\eta_{HP}$  και  $\eta_{HE}$  με αντίστοιχες βελτιώσεις έως 0.17 και 0.012, ενώ η αισθητή θερμική ενέργεια που δεν αξιοποιείται μειώθηκε κατά 4.11 %.

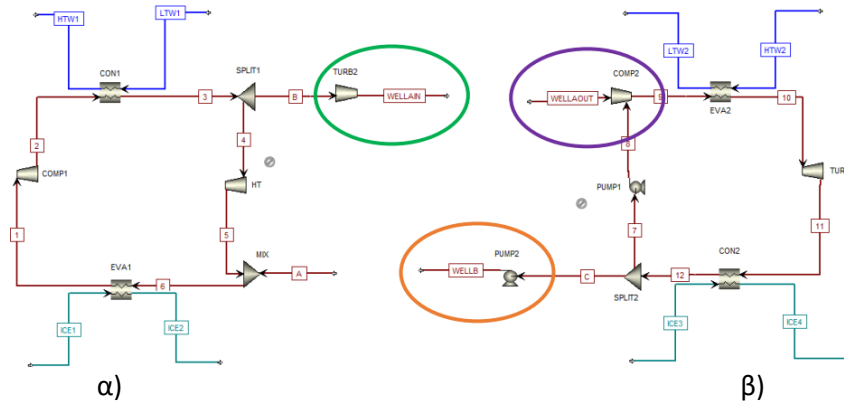
### ΗΛΕΚΤΡΟΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ CO<sub>2</sub>

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο με γεωλογική αποθήκευση, στα πηγάδια Α και Β (Σχήμα 2) σύμφωνα με τους Carro et al. (2022) <sup>[6]</sup>, καθώς επίσης και η ΠΑΕ, για την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας.

### Περιγραφή του μοντέλου

Το μοντέλο του συστήματος (Σχήμα 2), αποτελείται επίσης από τους δύο κύκλους TCO<sub>2</sub>, ΗΡ και ΗΕ. Διαφέρει σε σχέση με το σύστημα χωρίς γεωλογική αποθήκευση, ως προς το ότι ο ΗΡ (Σχήμα 2α) λειτουργεί πλέον ως ανοιχτός κύκλος, με όλο το CO<sub>2</sub>, να ρέει απευθείας μέσω των ρευμάτων Α, 6, 1, 2, 3, Β, WELLAIN στο γεωλογικό πηγάδι Α (πράσινος κύκλος). Αντίστοιχα, στον κύκλο ΗΕ (Σχήμα 2β), που είναι επίσης ανοιχτός, όλο το CO<sub>2</sub>, ρέει απευθείας από το πηγάδι Α (μωβ κύκλος) αξιοποιώντας γεωλογική θερμική ενέργεια, μέσω των ρευμάτων WELLAOUT, 9, 10, 11, 12, C και

WELLB σε ένα δεύτερο γεωλογικό πηγάδι B (πορτοκαλί κύκλος). Μέρος του ρευστού θα αποθηκευτεί μόνιμα υπογείως καθώς και πλευρικά στα τοιχώματα των πηγαδιών ενώ, μία μικρή ποσότητα, θα μεταφερθεί από το πηγάδι B στο πηγάδι A.



**Σχήμα 2.** Μαθηματικό μοντέλο ΗΑΕ με γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub> (5 MW, 100 MW). α) ΗΡ β) ΗΕ.

Για τη μελέτη της επίδρασης των συνθηκών του συστήματος γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub>, εξετάστηκαν 9 διαφορετικά σενάρια πηγαδιών (Πίνακας 2), από αυτά που παρουσιάζονται στα αποτελέσματα των Carneiro and Behnous (2023) [7] και αφορούν τις ανοιχτές δομές υπόγειων πορωδών δεξαμενών. Το Σενάριο 5 (βασικό σενάριο γεωλογικής αποθήκευσης) έχει τη μέση πτώση πίεσης και θερμοκρασίας μεταξύ εισόδου και εξόδου μεταξύ των διαθέσιμων πηγαδιών A [7], ενώ η πίεση εισόδου του πηγαδιού B ( $P_{WELLB}$ ) επιλέγεται ως 55 bar [7].

**Πίνακας 2.** Δεδομένα γεωλογικών σεναρίων (Πηγάδι A).

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5	Σενάριο 6	Σενάριο 7	Σενάριο 8	Σενάριο 9
$T_{WELLAOUT}$ (°C)	55.2	45.2	50.2	50.2	50.2	52.7	47.7	50.2	50.2
$P_{WELLAOUT}$ (bar)	105	105	110	100	105	105	105	107.5	102.5

Η αξιολόγηση του μοντέλου, γίνεται με τους ίδιους δείκτες όπως και στο μοντέλο χωρίς γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub>, προσαρμοσμένους στο παρόν σύστημα (Σχήμα 2), η<sub>HP</sub> (Εξίσωση 4), η<sub>HE</sub> (Εξίσωση 5) και η<sub>R-T</sub> (Εξίσωση 6) που βασίζονται στους τύπους των Carro et al. (2022) [6].

$$\eta_{HP} = \frac{Q_{CON1} + Q_{EVA1}}{W_{COMP1} - W_{TURB2}} \quad (4)$$

$$\eta_{HE} = \frac{W_{TURB1} - W_{PUMP2} - W_{COMP2}}{Q_{EVA2} + Q_{CON2}} \quad (5)$$

$$\eta_{R-T} = \frac{W_{TURB1} - W_{PUMP2} - W_{COMP2}}{W_{COMP1} - W_{TURB2}} \times \frac{h_{dis}}{h_{char}} \quad (6)$$

### Ανάλυση ευαισθησίας

Η ΠΑΕ εφαρμόστηκε στα 9 σενάρια του Πίνακα 2. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 3 και 4, όπου φαίνεται ότι το σενάριο 6 παρουσιάζει τη μέγιστη η<sub>R-T</sub> (51.30 % - 5 MW, 51.18 % - 100 MW), σε αντίθεση με το σενάριο 2 που παρουσιάζει την ελάχιστη (44.29 % - 5 MW, 43.71 % - 100 MW), πράγμα που οφείλεται στις μέγιστες ώρες εκφόρτισης που εμφανίζουν (5.12 h - 5 MW, 5.11 h - 100 MW). Η αύξηση των ωρών εκφόρτισης σχετίζεται ξανά με την αύξηση του μικρότερου εκ των δύο λόγων  $Q_{CON1}/Q_{EVA2}$  και  $Q_{EVA1}/Q_{CON2}$ . Στο σενάριο 2, παρουσιάζεται και η μεγαλύτερη ανισορροπία μεταξύ των θερμών και ψυχρών φορτίων στις δεξαμενές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, όπως φαίνεται από τον δείκτη χαμμένης θερμικής ενέργειας (21.71 % - 5 MW, 24.94 % - 100 MW) και σχετίζεται με τις αναξιοποίητες ώρες εκφόρτισης είτε στη θερμή είτε στη ψυχρή δεξαμενή. Τέλος, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα του Πίνακα 1. Για κάθε δυναμικότητα, η η<sub>R-T</sub> εμφανίζεται αυξημένη σε όλα τα σενάρια εκτός από το σενάριο 2. Για το σενάριο 6, με τη μέγιστη βελτίωση, η η<sub>R-T</sub> αυξήθηκε 4.36 % (5 MW) και 4.26 % (100 MW), ενώ η η<sub>HE</sub>

0.027 (5 MW) και 0.029 (100 MW). Αντιθέτως, η  $\eta_{HP}$  μειώθηκε 1.21 (5 MW) και 1.33 (100 MW). Η βελτίωση αυτή ( $\eta_{R-T}$ ,  $\eta_{HE}$ ) βασίζεται στα ίδια συμπεράσματα, αφού οι ώρες εκφόρτισης αυξήθηκαν από 4.69 h σε 5.12 h στα 5 MW και 5.11 h στα 100 MW ενώ η αναξιοποίητη θερμική ενέργεια μειώθηκε από 19.61 % σε 2.53 % στα 5 MW και 0.58 % στα 100 MW.

**Πίνακας 3.** Αποτελέσματα ΠΑΕ γεωλογικών σεναρίων 1-9 (5 MW).

Παράμετρος	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6	Σ7	Σ8	Σ9
Μέγιστη πίεση ( $P_{HP,High}/P_{HE,High}$ , bar)	205/160	190/220	190/200	195/160	180/170	185/160	200/215	200/200	180/160
Ώρες εκφόρτισης νερού/πάγου ( $h_{dis,hs}/h_{dis,cs}$ , h)	5.48/4.99	4.42/5.38	4.91/5.41	5.06/4.94	5.03/5.24	5.25/5.12	4.77/5.24	4.97/5.28	5.1/5.11
Ώρες φόρτισης / εκφόρτισης ( $h_{char}/h_{dis}$ , h)	10/4.99	10/4.42	10/4.91	10/4.94	10/5.03	10/5.12	10/4.77	10/4.97	10/5.1
Χαμένη θερμική ενέργεια (%)	9.81	21.71	10.18	2.42	4.17	2.53	9.85	6.23	0.19
$\eta_{HP}/\eta_{HE}$	4.11 / 0.125	4.21 / 0.118	4.21 / 0.124	4.16 / 0.119	4.28 / 0.12	4.23 / 0.122	4.14 / 0.122	4.14 / 0.124	4.28 / 0.119
$\eta_{R-T}$ (%)	49.90	44.29	49.14	49.42	50.37	51.30	47.71	49.75	51.04

**Πίνακας 4.** Αποτελέσματα ΠΑΕ γεωλογικών σεναρίων 1-9 (100 MW).

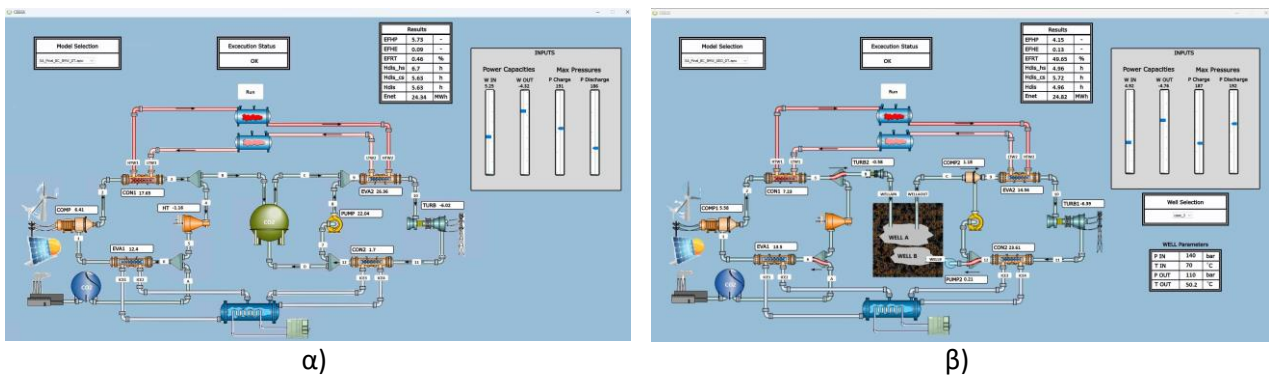
Παράμετρος	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6	Σ7	Σ8	Σ9
Μέγιστη πίεση ( $P_{HP,High}/P_{HE,High}$ , bar)	215/160	210/220	215/220	220/165	220/205	200/160	220/220	220/215	215/185
Ώρες εκφόρτισης νερού/πάγου ( $h_{dis,hs}/h_{dis,cs}$ , h)	5.36/4.97	4.37/5.46	4.87/5.36	4.95/4.90	5.02/5.13	5.14/5.11	4.69/5.27	4.94/5.25	5.05/5.04
Ώρες φόρτισης / εκφόρτισης ( $h_{char}/h_{dis}$ , h)	10/4.97	10/4.37	10/4.87	10/4.90	10/5.02	10/5.11	10/4.69	10/4.94	10/5.04
Χαμένη θερμική ενέργεια (%)	7.84	24.94	10.06	1.02	2.19	0.58	12.36	6.27	0.19
$\eta_{HP}/\eta_{HE}$	4.05 / 0.125	4.08 / 0.122	4.05 / 0.127	4.02 / 0.122	4.02 / 0.126	4.14 / 0.123	4.02 / 0.125	4.02 / 0.127	4.05 / 0.124
$\eta_{R-T}$ (%)	49.76	43.71	48.77	49.07	50.24	51.18	47.00	49.44	50.42

## ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ

Στη συνέχεια δημιουργήθηκε το ψηφιακό δίδυμο των μοντέλων των συστημάτων ΑΕ, όπως αυτά αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, για τη δημιουργία ενός λειτουργικού και φιλικού προς το χρήστη ψηφιακού περιβάλλοντος προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος. Το ψηφιακό δίδυμο δημιουργήθηκε στην Python μέσω της οποίας γίνεται η αποστολή των δεδομένων εισόδου από το γραφικό περιβάλλον χρήστη (Graphical User Interface - GUI) στο Aspen Plus v11 <sup>[1]</sup>, καθώς και των αποτελεσμάτων πίσω στο GUI. Συγχρόνως, μία βάση δεδομένων τεχνολογίας NoSQL, η MongoDB <sup>[8]</sup>, χρησιμοποιήθηκε για την αποθήκευση των δεδομένων. Τέλος τα GUI (Σχήμα 3α/Σχήμα 3β), που δημιουργήθηκαν με τη βιβλιοθήκη PyQt5 <sup>[9]</sup>, επιτρέπουν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και εμπεριέχουν εργαλεία μέσω των οποίων ο χρήστης μπορεί να ορίσει τιμές για μία σειρά παραμέτρων και να πραγματοποιήσει την προσομοίωση του συστήματος με σκοπό την αξιολόγηση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας και γεωλογικών σεναρίων.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στη παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν μαθηματικά μοντέλα για την προσομοίωση της ΗΑΕ σε μόνιμη κατάσταση, για δύο δυναμικότητες (5 και 100 MW), και για τις περιπτώσεις χωρίς και με γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Αρχικά πραγματοποιήθηκε ΠΑΕ για τη μελέτη της απόδοσης του



α)

β)

**Σχήμα 3.** GUI μαθηματικού μοντέλου ΗΑΕ. α) χωρίς γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub> β) με γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub>.

συστήματος ΗΑΕ χωρίς γεωλογική αποθήκευση. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά της ΠΑΕ 1 MW [2] και παρουσιάζουν αντίστοιχη βελτίωση σε σχέση με το βασικό μοντέλο, με την  $\eta_{R-T}$  να βελτιώνεται κατά 7.68 % στα 5 MW και 7.66 % στα 100 MW, επαληθεύοντας την εφαρμογή σε μεγαλύτερες δυναμικότητες. Αναφορικά με την περίπτωση της γεωλογικής αποθήκευσης CO<sub>2</sub>, τα αποτελέσματα της ΠΑΕ για τα 9 διαφορετικά γεωλογικά σενάρια, έδειξαν βελτίωση στον δείκτη συνολικής απόδοσής τους για όλα εκτός από ένα, με τη βέλτιστη να εμφανίζεται για το σενάριο 6, 4.36 % (5 MW) και 4.26 % (100 MW). Υπάρχουν έτσι γεωλογικές συνθήκες, που βελτιώνουν την  $\eta_{R-T}$  του μοντέλου χωρίς γεωλογική αποθήκευση CO<sub>2</sub>. Η βελτίωση αυτή οφείλεται στην αύξηση των ωρών εκφόρτισης, από 4.69 h σε 5.12 h στα 5 MW και σε 5.11 h στα 100 MW ενώ ως παράγοντας βελτίωσης, πρέπει να διερευνηθεί και η ανισορροπία των θερμικών δεξαμενών καθώς παρατηρείται σημαντική βελτίωση του δείκτη χαμένης θερμικής ενέργειας από 19.61 % σε 2.53 % στα 5 MW και 0.58 % στα 100 MW. Τέλος αναπτύχθηκε ένα λειτουργικό και φιλικό προς το χρήστη ψηφιακό δίδυμο για τον χειρισμό των μοντέλων. Στο μέλλον, θα αναπτυχθούν δυναμικά μαθηματικά μοντέλα για την ΗΑΕ για τη δυναμική προσομοίωση του συστήματος και την ανάπτυξη και αξιολόγηση προηγμένων συστημάτων ελέγχου.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα αυτή έχει χρηματοδοτηθεί από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα HORIZON της Ευρωπαϊκής Ένωσης CEEGS-NOVEL CO<sub>2</sub>-BASED ELECTROTHERMAL ENERGY AND GEOLOGICAL STORAGE SYSTEM μέσω της Συμφωνίας Επιχορήγησης με Αριθμό: 101084376. Οι απόψεις και γνώμες που εκφράζονται όμως είναι μόνο του(-ων) συγγραφέα(-ων) και δεν αντικατοπτρίζουν απαραίτητως αυτές της Ευρωπαϊκής Ένωσης ή CINEA. Ούτε η Ευρωπαϊκή Ένωση ούτε η χορηγούσα αρχή μπορούν να θεωρηθούν υπεύθυνες για αυτές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Aspen Technology Inc. (1981-2019). Aspen Plus V11, <[www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus](http://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus)>, accessed 28 August 2023.
- [2] Kyriakides AS, Stoikos A, Trigkas D, Gravanis G, Tsimpanogiannis IN, Papadopoulou S, Voutetakis S. (2023). Chemical Engineering Transactions, 103, 505-510.
- [3] International Energy Agency. (2023). World Energy Outlook 2023, <[www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023](http://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023)>, accessed: 12 April 2024.
- [4] Koochi-Fayegh S, Rosen MA. (2020). Journal of Energy Storage, 27, 101047.
- [5] Mercangöz M, Hemrle J, Kaufmann L, Z'Graggen A, Ohler C. (2012). Energy, 45, 407-415.
- [6] Carro A, Chacartegui R, Ortiz C, Carneiro J, Beccera JA. (2022). Energy, 238, 121665.
- [7] Carneiro J, Behnous B. (2023). Deliverable D2.1, CEEGS, Évora, 50 pp.
- [8] MongoDB Inc. (2024). MongoDB, <[www.mongodb.com/](http://www.mongodb.com/)>, accessed 31 October 2023.
- [9] Riverbank Computing Limited. (2023). PyQt5, <[www.pypi.org/project/PyQt5/](http://www.pypi.org/project/PyQt5/)>, accessed 31 October 2023.