



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

**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. ΛΥΚΑΣ Παναγιώτης του Θωμά**, Διπλωματούχος Μηχανολόγος Μηχανικός ΕΜΠ.

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την **Πέμπτη 2 Οκτωβρίου 2025 και ώρα 9:30 π.μ.** με φυσική παρουσία, στην αίθουσα Πολυμέσων του κτιρίου της Βιβλιοθήκης ΕΜΠ.

Το θέμα της Διδακτορικής Διατριβής είναι:

Ελληνικός τίτλος: «Προηγμένα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για κτηριακές και βιομηχανικές εφαρμογές»

Αγγλικός τίτλος: «Advanced energy production and storage systems from renewable energy sources for building and industrial applications»

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

Ioannis Antoniadis
24.09.2025 05:52 UTC

Ι. Αντωνιάδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Title: Advanced energy production and storage systems from renewable energy sources for building and industrial applications

Τίτλος: Προηγμένα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για κτηριακές και βιομηχανικές εφαρμογές

Summary

The present Ph.D. thesis focuses on the detailed analysis and investigation of advanced energy production and storage systems for applications in the industrial and building sectors. The emphasis is put on thermal energy storage (TES) systems and the integration of hydrogen production units as a form of energy storage. These systems store surplus energy from the intermittent production of renewable energy sources. Taking into account that the need for energy storage is strongly related to renewable-based energy production, various energy generation systems, such as solar thermal collectors, photovoltaic (PV) panels, and thermodynamic cycles, are also analyzed. Notably, the hybridization of different energy storage methods, along with the production of multiple energy forms, is emphasized. The configurations are simulated under both steady-state and dynamic conditions and evaluated based on energy, exergy, economics, and carbon emissions savings to provide a comprehensive assessment.

Renewable sources, such as solar, wind, geothermal, and biomass, along with alternative sources such as industrial waste heat, are capable of feeding electricity, heat, and cooling generation units in both residential and industrial sectors. The integration of cogeneration and multigeneration systems enhances overall thermodynamic efficiency, with a strong focus on ORCs and CO₂ Brayton cycles. Hydrogen is highlighted not only as a clean energy carrier but also as a long-term storage solution. Studies also emphasize the role of pumped thermal energy storage (PTES) and multigeneration in the building sector, suggesting promising avenues for decarbonization. CAES, especially in adiabatic setups combined with TES, is also explored as a viable storage alternative. The literature confirms the maturity of single-output energy systems and underscores growing interest in hydrogen-integrated multigeneration setups. However, several research gaps persist, such as limited studies on hybrid thermal-hydrogen storage, incomplete exploration of hydrogen-electricity storage optimization, and underdeveloped analyses of s-CO₂ cycles and cooling storage systems in industrial and building contexts. Notably, dynamic performance studies of CAES systems, particularly with integrated TES, remain scarce, pointing to significant opportunities for further research and system optimization.

The governing equations and mathematical models used to simulate a wide range of energy production and storage systems are outlined. Each model undergoes thorough validation and verification processes using experimental data and results from the literature to ensure reliability. Key thermodynamic performance metrics, such as thermal, electrical, energy, and exergy efficiency, coefficient of performance, and round-trip efficiency, used for proper system assessment, are defined. Alongside technical performance, the systems are analyzed from economic and environmental perspectives, focusing on cost-effectiveness and carbon emission reductions. The proposed comprehensive simulation framework is supported by modeling tools including Matlab, EES, TRNSYS, and Aspen Plus. Comparative analyses across different software tools further confirm model accuracy. Ultimately, a multi-objective optimization

strategy is introduced to identify optimal system designs based on multiple criteria, reflecting a holistic assessment of thermodynamic, economic, and environmental performance.

The simulation studies carried out in this thesis on various energy production and storage systems, with a focus on key findings and detailed discussions, are provided in Chapter 6. Section 6.1 explores electricity-hydrogen cogeneration systems using PTCs, ORCs, and water electrolyzers, analyzing two applications, one for a non-interconnected island and another for industrial use. The study examines the hybridization of thermal and hydrogen storage. If half of the ORC electricity production feeds the electrolyzer for hydrogen production, the yearly simulation study for the location of Athens, Greece, reveals that the annual energy and exergy efficiencies are computed at 14.9% and 15.9%, respectively. Additionally, Section 6.2 investigates multigeneration and storage configurations in industrial settings, studying two innovative plants powered by alternative energy sources. The first system uses PTCs combined with a CO₂ Brayton cycle and integrates thermal and hydrogen storage. A biomass boiler is placed strategically after the CO₂ recuperator to increase the temperature of the stream feeding an ORC, which is integrated as a secondary power cycle. Electricity, heat, cooling, and hydrogen are produced. Energy and exergy efficiencies achieve values up to 37.89% and 20.86%, revealing the potential of thermodynamic performance enhancement through hydrogen integration in multigeneration systems. The thesis also examines another industrial installation on a biofuels plant based on an ORC module and an absorption chiller powered by waste heat streams and solar heat. The integration of both hot and cold storage tanks is explored. It is worth noting that the incorporation of a cold water storage tank is beneficial for the performance of the absorption chiller, as the annual digester cooling production increases by 4.4%.

Furthermore, Section 6.3 proposes a multi-output production and storage system for buildings, with a multi-stage heat pump, ORC, and various hot and cold TES systems. The integration of the “Carnot battery” (PTES) and polygeneration concepts within this system is an innovative element. According to the results, the energy and exergy efficiencies are calculated up to 368.7% and 49.7%, respectively, at steady-state conditions. During the dynamic analysis, this system is applied in a residential building in Athens, Greece, aiming to meet all the energy demands (heating, cooling, domestic hot water, and electricity for appliances and lighting). The required electricity is supplied by PV panels, and the potential integration of battery storage is also explored as a secondary energy storage solution. At the selected final design, the mean load coverage of the building needs is about 86.7%. Moreover, Section 6.4 presents an adiabatic CAES system with integrated TES tanks, analyzing the dynamic charging and discharging processes and dimensioning components, such as storage tanks and air caverns, for different target temperatures and charging durations. The analysis of annual performance shows that the system's yearly round-trip (power-to-power) efficiency is 46.92%, assuming that it charges during off-peak hours when electricity prices are low (noon hours) and discharges during high-demand periods (evening hours).

Finally, Chapter 7 presents the main conclusions of the Ph.D. thesis, the innovative aspects of the research, and recommendations for future studies in the field.

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στη λεπτομερή ανάλυση και διερεύνηση προηγμένων συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας για εφαρμογές στον βιομηχανικό και τον κτηριακό τομέα. Έμφαση δίνεται στα συστήματα θερμικής αποθήκευσης ενέργειας και στην ενσωμάτωση μονάδων παραγωγής υδρογόνου ως μορφή αποθήκευσης ενέργειας. Τα συστήματα αυτά αποθηκεύουν πλεονάζουσα ενέργεια από τη διαλείπουσα παραγωγή των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ανάγκη για αποθήκευση ενέργειας σχετίζεται άμεσα με την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ, αναλύονται επίσης διάφορα συστήματα παραγωγής ενέργειας, όπως ηλιακοί θερμικοί συλλέκτες, φωτοβολταϊκά πάνελ και θερμοδυναμικοί κύκλοι. Επιπλέον, τονίζεται ο υβριδισμός διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης, σε συνδυασμό με την παραγωγή πολλαπλών μορφών ενέργειας. Οι διατάξεις προσομοιώνονται σε συνθήκες μόνιμης και μεταβατικής κατάστασης και αξιολογούνται βάσει ενεργειακών, εξεργειακών, οικονομικών και περιβαλλοντικών (μείωση εκπομπών άνθρακα) κριτηρίων, προκειμένου να αποτιμηθούν συνολικά.

Οι ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική και η βιομάζα, καθώς και εναλλακτικές πηγές όπως η απορριπτόμενη θερμότητα βιομηχανικών διεργασιών, είναι ικανές να τροφοδοτούν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ψύξης, τόσο στον κτηριακό όσο και στο βιομηχανικό τομέα. Η ενσωμάτωση συστημάτων συμπαραγωγής και πολυπαραγωγής ενισχύει τη συνολική θερμοδυναμική απόδοση, με ιδιαίτερη έμφαση στους οργανικούς κύκλους Rankine και στους κύκλους Brayton με χρήση CO₂. Το υδρογόνο επισημαίνεται όχι μόνο ως καθαρό καύσιμο αλλά και ως μακροπρόθεσμη λύση αποθήκευσης. Έρευνες δίνουν επίσης έμφαση στον ρόλο της «μπαταρίας Carnot» και της πολυπαραγωγής στον κτηριακό τομέα, υποδεικνύοντας υποσχόμενες λύσεις προς την απανθρακοποίηση. Η τεχνολογία αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, ιδίως σε αδιαβατικές διατάξεις σε συνδυασμό με θερμική αποθήκευση, εξετάζεται επίσης ως βιώσιμη εναλλακτική λύση αποθήκευσης. Η βιβλιογραφία επιβεβαιώνει την ωριμότητα των συστημάτων μεμονωμένης παραγωγής ενέργειας και υπογραμμίζει το αυξανόμενο ενδιαφέρον για συστήματα πολυπαραγωγής με ενσωμάτωση υδρογόνου. Ωστόσο, παραμένουν σημαντικά ερευνητικά κενά, όπως η περιορισμένη μελέτη σε υβριδικά συστήματα θερμικής αποθήκευσης-αποθήκευσης υδρογόνου, η ελλιπής βελτιστοποίηση συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου-ηλεκτρισμού, καθώς και η ανεπαρκής ανάλυση κύκλων υπερεκρίσιμου CO₂, και συστημάτων αποθήκευσης σε ψυχρά δοχεία για βιομηχανικές και κτηριακές εφαρμογές. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι μελέτες της δυναμικής συμπεριφοράς συστημάτων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα, ιδιαίτερα με ενσωματωμένη θερμική αποθήκευση, είναι σπάνιες, γεγονός που φανερώνει ένα σημαντικό πεδίο για περαιτέρω έρευνα και βελτιστοποίηση.

Περιγράφονται οι βασικές εξισώσεις και τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη προσομοίωση διαφόρων συστημάτων παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Κάθε μοντέλο υπόκειται σε διεξοδικές διαδικασίες επικύρωσης και επαλήθευσης, βασισμένες σε πειραματικά δεδομένα και αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία τους. Καθορίζονται οι βασικούς δείκτες θερμοδυναμικής απόδοσης, όπως η θερμική και ηλεκτρική απόδοση, η ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση, ο συντελεστής συμπεριφοράς και η κυκλική απόδοση, που χρησιμοποιούνται για την ορθή αξιολόγηση των συστημάτων. Πέρα από τους τεχνικούς δείκτες, τα συστήματα αναλύονται από οικονομική και περιβαλλοντική σκοπιά, με έμφαση στην οικονομική αποδοτικότητα και στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Το προτεινόμενο ολοκληρωμένο πλαίσιο προσομοίωσης υποστηρίζεται από εργαλεία μοντελοποίησης όπως το Matlab, το EES, το TRNSYS και το Aspen Plus. Συγκριτικές

αναλύσεις με διαφορετικά λογισμικά επιβεβαιώνουν περαιτέρω την ακρίβεια των μοντελοποιήσεων. Τέλος, παρουσιάζεται μια στρατηγική πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης των σχεδιαστικών παραμέτρων, βασισμένη σε πολλαπλά κριτήρια που αντανακλούν μια ολιστική αξιολόγηση από θερμοδυναμική, οικονομική και περιβαλλοντική σκοπία.

Οι μελέτες προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, εστιάζοντας στα αποτελέσματα και στον λεπτομερή σχολιασμό τους, περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 6. Η Ενότητα 6.1 διερευνά συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και υδρογόνου, τα οποία χρησιμοποιούν παραβολικούς ηλιακούς συλλέκτες, οργανικούς κύκλους Rankine και ηλεκτρολύτες νερού. Αναλύονται δύο εφαρμογές – μία για ένα μη διασυνδεδεμένο νησί και μία για βιομηχανική χρήση. Η μελέτη εξετάζει τον υβριδισμό της θερμικής αποθήκευσης με την αποθήκευση σε υδρογόνο. Εάν το ήμισυ της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τον οργανικό κύκλο Rankine διοχετευθεί στον ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου, η ετήσια μελέτη προσομοίωσης για την τοποθεσία της Αθήνας δείχνει ότι η ετήσια ενεργειακή και εξεργειακή απόδοση υπολογίζονται σε 14.9% και 15.9%, αντίστοιχα. Επιπροσθέτως, η Ενότητα 6.2 μελετά διατάξεις πολυπαραγωγής και αποθήκευσης σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, εστιάζοντας σε δύο καινοτόμες εγκαταστάσεις που τροφοδοτούνται από εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Το πρώτο σύστημα χρησιμοποιεί παραβολικούς συλλέκτες σε συνδυασμό με κύκλο Brayton με CO₂, ενσωματώνοντας θερμική αποθήκευση και αποθήκευση σε υδρογόνο. Ένας λέβητας βιομάζας τοποθετείται στρατηγικά μετά τον ανακομιστή για να αυξήσει τη θερμοκρασία του ρεύματος που τροφοδοτεί ένα ORC, το οποίο χρησιμοποιείται ως δευτερεύων κύκλος ισχύος. Παράγεται ηλεκτρισμός, θερμότητα, ψύξη και υδρογόνο. Οι ενεργειακές και εξεργειακές αποδόσεις φθάνουν μέχρι 37.89% και 20.86% αντίστοιχα, αναδεικνύοντας τη βελτίωση των θερμοδυναμικών επιδόσεων μέσω της ενσωμάτωσης υδρογόνου σε συστήματα πολυπαραγωγής. Η διατριβή εξετάζει επίσης μια άλλη βιομηχανική εγκατάσταση σε μονάδα βιοκαυσίμων που βασίζεται σε οργανικό κύκλο Rankine και ψυκτική μονάδα απορρόφησης. Οι δύο μονάδες τροφοδοτούνται από ρεύματα απορριπτόμενης θερμότητας και θερμότητα από ηλιακούς συλλέκτες. Διερευνάται η ενσωμάτωση δεξαμενών αποθήκευσης θερμού και ψυχρού νερού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η προσθήκη δεξαμενής αποθήκευσης ψυχρού νερού βελτιώνει την απόδοση της ψυκτικής μονάδας απορρόφησης, αυξάνοντας την ετήσια παραγωγή ψύξης του digester κατά 4.4%.

Επιπλέον, η Ενότητα 6.3 προτείνει ένα σύστημα πολυπαραγωγής και αποθήκευσης για τον κτηριακό τομέα, που περιλαμβάνει μία πολυβάθμια αντλία θερμότητας, οργανικό κύκλο Rankine, καθώς και διάφορα συστήματα αποθήκευσης θερμού και ψυχρού νερού. Ο συνδυασμός της τεχνολογίας της «μπαταρίας Carnot» και της τεχνολογία πολυπαραγωγής στο εν λόγω σύστημα αποτελεί ένα καινοτόμο στοιχείο της έρευνας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, οι ενεργειακές και εξεργειακές αποδόσεις φθάνουν μέχρι 368.7% και 49.7%, αντίστοιχα, υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης. Στη δυναμική ανάλυση, το σύστημα εφαρμόζεται σε κατοικία στην Αθήνα, με στόχο να καλύπτει πλήρως τις ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου (θέρμανση, ψύξη, ζεστό νερό χρήσης και ηλεκτρισμός για φωτισμό και συσκευές). Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από φωτοβολταϊκά πάνελ, ενώ διερευνάται και η ενσωμάτωση αποθήκευσης μέσω μπαταρίας ως δευτερεύουσα μορφή αποθήκευσης ενέργειας. Στον τελικό επιλεγμένο σχεδιασμό, η μέση κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτηρίου φθάνει το 86.7%. Επίσης, η Ενότητα 6.4 παρουσιάζει ένα αδιαβατικό σύστημα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα με ενσωματωμένες δεξαμενές θερμικής αποθήκευσης. Αναλύονται δυναμικά οι διαδικασίες φόρτισης και εκφόρτισης του συστήματος και γίνεται διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων του, όπως οι δεξαμενές θερμικής αποθήκευσης και η κοιλότητα αέρα, για διαφορετικές θερμοκρασίες στόχους και διάρκειες φόρτισης. Η ανάλυση

της ετήσιας λειτουργίας δείχνει ότι η ετήσια κυκλική απόδοση του συστήματος ανέρχεται στο 46.92%, θεωρώντας ότι η φόρτιση γίνεται κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και χαμηλών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας (μεσημβρινές ώρες), ενώ η εκφόρτιση πραγματοποιείται κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης (βραδινές ώρες).

Τέλος, το Κεφάλαιο 7 παρουσιάζει τα κύρια συμπεράσματα αυτής της διδακτορικής διατριβής, τα καινότομα στοιχεία της έρευνας και τις προτάσεις για μελλοντικές μελέτες.