

Μοντελοποίηση συστημάτων αποθήκευσης,  
με σκοπό την αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ  
στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Βεϊσάκης Μανούσος

12 Μαΐου 2022

<b>1</b>	<b>Παραγωγή Ενέργειας</b>	<b>6</b>
1.1	Κυψέλες Καυσίμου . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Αποθήκευση Ενέργειας</b>	<b>7</b>
2.1	Αντλησιοταμίευση . . . . .	7
2.2	Συσσωρευτές . . . . .	8
2.3	Υδρογόνο . . . . .	8
2.4	Σχόλια . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Ανάλυση Προγράμματος</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Τεχνικά Ζητήματα</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>15</b>

Η μεταστροφή σε φιλικότερες για το περιβάλλον πηγές ενέργειας είναι αναπόφευκτη, καθώς η ανάγκη για ένα οικολογικότερο μέλλον, αλλά και η επιβάρυνση των χωρών με τέλη εκπομπών, καθιστούν τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, ασύμφορες. Η μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ, όμως, στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας προϋποθέτει την ύπαρξη αποθηκευτικών μέσων, που θα δεσμεύουν την παραπάνω ενέργεια που παράγουν οι ΑΠΕ κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και θα την διαθέτουν στους καταναλωτές, κατά τις ώρες υψηλότερης ζήτησης. Αυτό συμβαίνει διότι η παραγωγή των ΑΠΕ εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, κανοντάς την απρόβλεπτη. Συνεπώς ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δεν να βασίζεται εξ ολοκλήρου σε αυτές.

Σε πολλά μέρη μάλιστα η εγκατάσταση ΑΠΕ πάνω από ένα όριο απαγορεύεται, διότι υπερβαίνεται το όριο ισχύς του δικτύου, αλλά κυρίως διότι είναι ανούσιο. Χωρίς κάποιον τρόπο να διαμοιράζεται η ενέργεια κατά τις ώρες μεγάλου φόρτου, η παραγόμενη ενέργεια απλά δεν είναι αξιοποιήσιμη. Με την αναμενόμενη εξέλιξη του δικτύου σε smart-grid και την ένταξη των micro-grid στην κοινωνία, προβλέπεται να υπάρξουν σημαντικές αλλαγές στον τρόπο που χειριζόμαστε την ενέργεια. Τα έξυπνα δίκτυα εκπροσωπούν μία αμφίδρομη σχέση μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης, καθώς ο ίδιος ο πολίτης στην σημερινή εποχή, μέσω των ΑΠΕ, μπορεί να είναι παραγωγός. Για τους παραπάνω λόγους η συζητήσεις περί ένταξης μεγάλων σταθμών αποθήκευσης ενέργειας στο δίκτυο, έχουν ενταθεί.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Python, το οποίο υπολογίζει το μέγεθος του αποθηκευτικού συστήματος που χρειάζεται μια περιοχή, έτσι ώστε να αυξηθούν οι ΑΠΕ στο δίκτυό της. Στα αποτελέσματα του προγράμματος περιλαμβάνονται το κόστος του τελικού συστήματος, καθώς και το πώς θα μεταβληθεί η καμπύλη του φορτίου του δικτύου, μέσω αυτής της προσαρμογής.

Τον 20ο αιώνα έγινε αντιληπτό ότι ο νέος τρόπος παραγωγής που έφερε η βιομηχανική επανάσταση δεν ήταν βιώσιμος. Πρώτη φορά η ανθρωπότητα είχε την ικανότητα να επηρεάσει σε τέτοιο βαθμό το οικοσύστημα της Γης. Ήταν εμφανές πια, ότι έπρεπε να βρεθεί ένας πιο οικολογικός τρόπος για να καλυφθούν οι όλο και αυξανόμενες ανάγκες των ανθρώπων, εάν ήθελε η ανθρωπότητα να αφήσει έναν, αν όχι καλύτερο, ίδιου επιπέδου κόσμο, στις επόμενες γενιές. Έτσι πολλές χώρες αποφάσισαν να καθιερώσουν νομοθεσίες, οι οποίες θα επιβάλλουν όλο και χαμηλότερη εκπομπή ρύπων διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ), προωθώντας μία μεταστροφή σε καθαρότερες πηγές ενέργειας, σε αντίθεση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όλο αυτό παρότρυνε τον επιστημονικό και τεχνολογικό τομέα να ερευνήσει ακόμα περισσότερο τις φιλικότερες για το περιβάλλον ενεργειακές πηγές, τις επονομαζόμενες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Λόγω της εξέλιξης της τεχνολογίας, της εύρεσης φθηνότερων υλικών και της μαζικής παραγωγής, οι βιομηχανίες κατάφεραν να μειώσουν το κόστος των ΑΠΕ και παράλληλα να αυξήσουν την αποδοτικότητά τους. Έτσι οι ΑΠΕ δεν ήταν πια μία ερευνητική ιδέα, αλλά μία πρωσιτή λύση, που συνυπολογίζοντας τα πρόστιμα στα ορυκτά καύσιμα, ανταγωνίζεται τις συμβατικές. Από τα παραπάνω συμπεραίνει κανείς, ότι η μεταστροφή στις ΑΠΕ είναι αναπόφευκτη και θα είναι το επίκεντρο των προσοχής για πολλά χρόνια ακόμη, όσον αφορά τον ενεργειακό τομέα.

Παρόλα αυτά οι ΑΠΕ έχουν ένα πολύ σοβαρό μειονέκτημα, αυτό της αβεβαιότητας. Σε αντίθεση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας (π.χ. λιγνίτης, φυσικό αέριο κ.α.), οι οποίες έχουν μία σταθερή παραγωγή, η παραγωγή των ΑΠΕ βασίζεται, εκ φύσεως, στις καιρικές συνθήκες. Αυτό παρουσιάζει πολλές δυσκολίες όσον αφορά την ένταξή τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά δεν μπορεί ένα κράτος να βασιστεί σε αυτές για την πλήρη κάλυψη του φορτίου του, χωρίς να υπάρχει σε ένα βαθμό μία σταθερή πηγή ενέργειας, πάνω στην οποία θα ενταχθούν οι ΑΠΕ. Για παράδειγμα, τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) παράγουν ισχύ μόνο τις ώρες με συγκεκριμένη ηλιοφάνεια, ενώ το μεγαλύτερο φορτίο στο δίκτυο παρουσιάζεται τις βραδυνές ώρες. Αυτό σημαίνει ότι ενώ μπορεί να υπάρχει επαρκής ισχύς ΑΠΕ σύμφωνα με τις ανάγκες του δικτύου, αυτή δεν παράγεται τις αναγκαίες ώρες, με συνέπεια όλη αυτή η παραγόμενη ενέργεια, να μην είναι αξιοποιήσιμη. Οι ΑΠΕ δηλαδή εξυπηρετούν μέχρι στιγμής, την κάλυψη του

φορτίου αιχμής ενός δικτύου (ξαφνικές διακυμάνσεις πάνω από το σύννηθες) και η διείσδυσή τους πάνω από ένα βαθμό, έχει περισσότερα κόστη, παρά οφέλη.

Ο μόνος τρόπος για να είναι εφικτή η άυξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο και ίσως η εξ ολοκλήρου τροφοδοσία του δικτύου με αυτές, είναι να υπάρχει τρόπος να αποθηκευτεί η παραπανήσια ενέργεια κατά την ώρα παραγωγής της και η διάθεσή της στο δίκτυο κατά τις ώρες αυξημένης ζήτησης. Ευτυχώς, η αποθηκευτική τεχνολογία έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό τις τελευταίες δεκαετίες (βλ. Κεφάλαιο 2) και δίνεται η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών αποθηκευτικών μέσων, ανάλογα με τις ανάγκες. Κάποια απευθύνονται για παράδειγμα σε βραχυπρόθεσμες αποθηκεύσεις, ενώ άλλα μπορεί να απευθύνονται σε ανάγκες υψηλής ισχύος.

Η ένταξη των ΑΠΕ και πόσο μάλλον των αποθηκευτικών συστημάτων στο δίκτυο, θα πρέπει να συνοδεύεται με μεταρρυθμίσεις στην ίδια τη λειτουργία του δικτύου. Μέχρι σήμερα, το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθεί το συμβατικό σχήμα παραγωγού-καταναλωτή. Όταν είχε πρωτοσχεδιαστεί αυτή η διάταξη δεν είχε υπολογιστεί, ότι και ο ίδιος ο καταναλωτής θα μπορεί να γίνει παραγωγός και να προσφέρει ενέργεια στο δίκτυο. Στη σημερινή εποχή όμως, η εγκατάσταση ΑΠΕ σε οικιακό επίπεδο είναι κάτι το όλο και πιο σύννηθες, η σχέση μεταξύ παραγωγού και καταναλωτή γίνεται όλο και περισσότερο πιο αμφίδρομη. Αυτή την ανάγκη έρχονται να εξυπηρετήσουν τα έξυπνα δίκτυα (smart-grids). Σε συνδυασμό με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα <sup>1</sup>, οι μπαταρίες αυτές θα μπορούν να τροφοδοτούν το δίκτυο με επιπρόσθετη ενέργεια σε συνθήκες υψηλής ζήτησης.

Αντίστοιχη χρήση έχει αρχίσει και σε πειραματικό επίπεδο στο εξωτερικό με τις οικιακές μπαταρίες (βλ. Tesla Powerwall στην Εικόνα 1). Αυτές αρχικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ασφάλεια σε περιοχές με συχνές διακοπές ρεύματος, με το να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και να τροφοδοτούν το σπίτι σε περίπτωση διακοπής. Υπάρχει η λειτουργία μάλιστα να προγραμματιστεί η μπαταρία να απορροφάει ενέργεια από το δίκτυο μόνο τις ώρες με φθηνότερο κόστος (π.χ. νυχτερινό ρεύμα). Η πραγματική αξία όμως αυτών των τεχνολογιών εμφανίζεται όταν συνδυαστούν με ΑΠΕ. Όση παραγωγή ενέργειας δεν αξιοποιείται επιτόπου, αποθηκεύεται στις μπαταρίες, από τις οποίες ο χρήστης αντλεί ενέργεια για τις βραδυνές τους καταναλώσεις. Με την χρήση των έξυπνων δικτύων που προαναφέρθηκαν, ο παραγωγός και ο καταναλωτής μπορούν να έχουν αμοιβαίο κέρδος. Το δίκτυο κάνει ανοιχτή πρόσκληση σε όποιον ενδιαφερόμενο, ώστε να μπορεί να του αντλεί ενέργεια από τις μπαταρίες του, συγκεκριμένες περιόδους του χρόνου (π.χ. Ιούλιος-Σεπτέμβριος που υπάρχει η μέγιστη ζήτηση). Κάθε περισταστικό διαρκεί



Εικόνα 1: Tesla Powerwall

<sup>1</sup>Την στιγμή που γράφεται το κείμενο κατατίθεται νομοσχέδιο προς ψήφιση στην ελληνική Βουλή, για την απαγόρευση πώλησης αυτοκινήτων εσωτερικής καύσης από το 2035, αλλά και υποχρεωτικής χρήσης αυτοκινήτων μηδενικών εκπομπών για τα ταξί εντός Αττικής και Θεσσαλονίκης από το 2027 [1].

κάποιες ώρες (συνήθως τις μεσημεριανές), ενώ υπάρχει όριο στα πόσα περιστατικά θα μπορεί να υπάρξουν στον ενδιαφερόμενο μέσα σε αυτήν την περίοδο (π.χ. 50). Στη συνέχεια το δίκτυο είναι υπεύθυνο να πληρώσει το ποσό που έχει εγγυηθεί, το οποίο είναι αρκετά ικανοποιητικό. Με αυτό το ποσό όμως κερδίζουν και οι δύο πλευρές. Το κόστος που θα είχε να λειτουργήσει μία παραπάνω μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μόνο για αυτά τα συγκεκριμένα περιστατικά μέσα στην περίοδο, είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από την "αγορά" της ενέργειας αυτής από τους ίδιους τους καταναλωτές. Από την άλλη ο καταναλωτής μπορεί να ορίσει το ποσό της ενέργειας που θα επιτρέψει να δίνει η μπαταρία στο δίκτυο και αν συνδυαστεί αυτό με κάποιο διάστημα που αυτός λείπει από το σπίτι, τότε η ενέργεια που παράγεται από τις ΑΠΕ στο σπίτι του δεν θα πηγαίνει χαμένη καθώς θα μπορεί να πωλείται ενώ λείπει. Με αυτόν τον τρόπο, αν οι κάτοικοι της περιοχής ενταχθούν σε αυτό το πρόγραμμα, φτιάχνεται μία μεγάλη εικονική μπαταρία για να στηρίζει το δίκτυό της.

Με την ίδια λογική και με τη χρήση των micro-grid θα μπορούν ολόκληρες περιοχές να τροφοδοτούνται σε μεγάλο βαθμό μεταξύ τους, μειώνοντας και το ρίσκο διακοπής ρεύματος από τυχόν βλάβη στον κεντρικό παραγωγό. Οι κάτοικοι με ΑΠΕ, γεννήτριες, μπαταρίες κ.α. θα υποστηρίζουν το δίκτυο της περιοχής τους, με το αντίστοιχο οικονομικό κέρδος από το δίκτυο. Έτσι βγαίνουν όλοι κερδισμένοι, ακολουθώντας την λογική που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

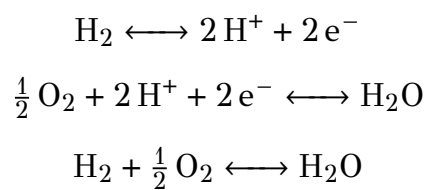
Όλα αυτά είναι εξελίξεις, στις οποίες τα έξυπνα δίκτυα μπορούν και θα πρέπει να ανταπεξέλθουν. Η ανθρωπότητα περνάει σε μια εποχή που η χρήση της ενέργειας αλλάζει μορφή, γίνεται αμφίδρομη με στόχο την αποδοτικότητα και την οικολογία.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

---

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 1.1 Κυψέλες Καυσίμου



Σχήμα 1.1: Χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία Κυψέλη Καυσίμου

Η αποθήκευση ενέργειας δεν είναι μία καινούργια ανησυχία. Ανέκαθεν ο άνθρωπος αναζητούσε τρόπους να δεσμεύσει ενέργεια για μελλοντική χρήση, απλά τώρα υπάρχει η κατάλληλη τεχνολογία. Με την μεταστροφή σε ένα πιο πράσινο μέλλον έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές τεχνολογίες που εξυπηρετούν ξεχωριστούς σκοπούς, όσον αφορά την αποθήκευση. Οι κύριες τεχνολογίες και οι χρήσεις τους που απασχολούν τον επιστημονικό τομέα είναι οι μπαταρίες (κυρίως Ιόντων-Λιθίου) για τα φορτία αιχμής του δικτύου και το υδρογόνο για μακροβιότερες αποθηκεύσεις. Παρόλα αυτά δεν θα πρέπει να λησμονείτε η αξιόπιστη αντλησιοταμίευση από αυτές τις τεχνολογίες. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν συνοπτικά αυτές οι κύριες τεχνολογίες αποθήκευσης που απασχολούν τον ενεργειακό τομέα, των οποίων η χρήση δεν είναι απλά επιστημονικά ενδιαφέροντα, αλλά και οικονομικά συμφέρουσα.

## 2.1 Αντλησιοταμίευση

Τα έργα αντλησιοταμίευσης έχουν εφαρμοσθεί εδώ και πάνω από έναν αιώνα, ώστε να δεσμεύουν την παραπάνω ενέργεια και να την διαθέτουν στο δίκτυο κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης. Σύμφωνα με το υπουργείο ενέργειας των ΗΠΑ [2], η πρώτη γνωστή χρήση των έργων αντλησιοταμίευσης ήταν στην Ιταλία και την Ελβετία την δεκαετία το 1890. Οι ίδιες οι ΗΠΑ διαθέτουν 43 τέτοιες μονάδες, οι οποίες είναι υπεύθυνες μέχρι και σήμερα για το 93% της ολικής αποθήκευσης ενέργειας του δικτύου τους.

Προφανώς τα έργα αυτά τότε δεν είχαν γίνει για να καλύψουν το τεχνικό πρόβλημα των ΑΠΕ, αλλά διότι δεν ήταν εφικτό να σταματάει η λειτουργία των μηχανών, όποτε ελαττωνόταν η ζήτηση. Τα έργα αυτά αποτελούσαν έναν απλό τρόπο να διατηρείται η λειτουργία των μηχανών σε ένα σταθερό επίπεδο, βοηθώντας τις και σε περιπτώσεις αυξημένης κατανάλωσης. Αντίστοιχα σήμερα, τα έργα αυτά παίζουν καθοριστικό ρόλο στην ένταξη των ΑΠΕ στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς η τεχνολογία και οι εγκαταστάσεις επιβιώνουν μέχρι και σήμερα, χωρίς να έχει σταματήσει η λειτουργία τους.

Η λειτουργία των συστημάτων αυτών είναι αρκετά απλή στη σύλληψη και



βασίζεται κατά κύριο λόγο στη βαρυτική δύναμη. Είτε κατασκευάζονται, είτε υπάρχουν φυσικά, υπάρχουν δύο δεξαμενές σε διαφορετικό υψόμετρο η μία από την άλλη. Κατά την διάρκεια την οποία υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας στο δίκτυο, η ενέργεια αυτή χρησιμοποιείται για να ξεκινήσουν οι αντλίες να γεμίζουν την πάνω δεξαμενή, με το νερό της κάτω. Όταν πια χρειαστεί να υπάρξει έκχυση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, το αποθηκευμένο νερό της πάνω δεξαμενής, αφήνεται να κυλίσει προς την κάτω. Κατά τη διαδρομή του, το νερό συναντάει υδροστροβίλους, οι οποίοι με την περιστροφική τους κίνηση μπορούν να διαθέσουν την ισχύ τους στο δίκτυο.

Η αντλησιοταμίευση παρουσιάζει πολλά θετικά και δικαιολογημένα αποτελεί την πλέον αξιόπιστη και δοκιμασμένη λύση στον τομέα της μαζικής αποθήκευσης ενέργειας. Αρχικά παρουσιάζει πολύ μεγάλη απόδοση της τάξης των 80%, ενώ το όριο ζωής της είναι τα 50 χρόνια. Αυτά συνδυάζονται με την προαναφερθήσα απλή λειτουργία και συντήρηση του έργου.

Παρόλα αυτά θα πρέπει να τονιστούν κάποιες δυσκολίες. Η εύρεση ενός κατάλληλου μορφολογικά εδάφους, δεν είναι κάτι εύκολο. Θα πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον 100m υψομετρική διαφορά μεταξύ της μίας δεξαμενής από την άλλη, για να έχει νόημα οποιαδήποτε επένδυση, ενώ παράλληλα αυτές οι δεξαμενές δεν θα πρέπει να είναι και πολύ μακριά μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει ότι συνήθως συναντάμε κατάλληλες μορφολογίες σε ιδιαίτερα δύσβατα μέρη, κάτι που μπορεί να καθιστά την κατασκευή πολύ δαπανηρή, ίσως και ασύμφορη. Επιπλέον, για τον ίδιο λόγο, μπορεί η περιοχή να μην παρέχει πρόσβαση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, συνεπώς η σύνδεση του έργου με το δίκτυο να είναι ανέφικτη. Τέλος η κατασκευή του έργου είναι δαπανηρή, ενώ δεν θα πρέπει να παραβλέπονται οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα της περιοχής.

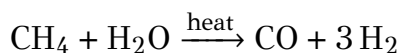
Στην πράξη όμως τα έργα αντλησιοταμίευσης έχουν αποδείξει την αξία τους και δεν κατέχουν τυχαία την κυρίαρχη θέση στην αποθήκευση, καθώς με την απλή τους κατασκευή και λειτουργία, κατατάσσονται στα μακροβιότερα και πιο αξιόπιστα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Έργα πολλών δεκαετιών συνεχίζουν να λειτουργούν εξίσου καλά μέχρι και σήμερα, ενώ παρόλο τον ανταγωνισμό των νέων τεχνολογιών, παραμένουν η καλύτερη λύση όσον αφορά την μακροχρόνια αποθήκευση.

## 2.2 Συσσωρευτές

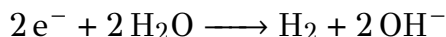
Οι μπαταρίες είναι ένα πολύ ευρύ φάσμα με διαφορετικές τεχνολογίες, που είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθούν και να προβλεφθούν. Η συμπεριφορά των συσσωρευτών αλλάζει, ανάλογα με τις παραμέτρους.

## 2.3 Υδρογόνο

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται εδώ και χρόνια στην διαστημική τεχνολογία, καθώς αποτελεί το κύριο προωθητικό καύσιμο για τους πυραύλους. Η χρήση του περιλαμβάνει κυρίως δύο τρόπους, είτε την άμεση καύση του, είτε την μετατροπή



Σχήμα 2.1: Χημική αντίδραση Αναμόρφωσης Μεθανίου



Σχήμα 2.2: Ηλεκτρόλυση Νερού

του σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω κυψελών καυσίμου. Και στις δύο περιπτώσεις το υδρογόνο οξειδώνεται και το μόνο παραπροϊόν της αντίδρασης είναι το νερό. Στην πρώτη περίπτωση η θερμότητα που παράγεται χρησιμοποιείται για να κινήσει τις συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK), ενώ στη δεύτερη περίπτωση το ηλεκτρόνιο από την αντίδραση των παραπάνω στοιχείων προμηθεύουν τους κινητήρες με ηλεκτρική ενέργεια.

Ενώ όμως το υδρογόνο είναι από τα πιο άφθονα στοιχεία στον κόσμο, δεν μπορεί να βρεθεί εύκολα στην ατομική του μορφή, παρά μόνο σε μοριακές ενώσεις. Η διαδικασία της εξαγωγής του υδρογόνου από τα μόρια αυτά, καθορίζει σε τελικό βαθμό, το κατά πόσο η τεχνολογία αυτή είναι φιλική προς το περιβάλλον ή όχι. Μέχρι και σήμερα οι δύο βασικοί τρόποι εξαγωγής του υδρογόνου είναι η αναμόρφωση του μεθανίου ( $\text{CH}_4$ ) και η ηλεκτρόλυση του νερού.

Η πρώτη μέθοδος είναι η πιο διαδεδομένη μορφή μαζικής παραγωγής υδρογόνου. Η διαδικασία βασίζεται στο ότι το μεθάνιο μπορεί να διασπαστεί σε μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο, όταν έρθει σε επαφή με υψηλής θερμοκρασίας υδρατμούς (Σχήμα 2.1). Αλλά ενώ το τελικό προϊόν είναι μηδενικών εκπομπών, όλη η διαδικασία αυτή χρειάζεται τρομερά ποσά θερμότητας, το οποίο την καθιστά υπερβολικά αντιοποδοτική και περιβαλλοντικά προβληματική. Συνήθως το μεθάνιο από αυτήν τη διαδικασία προσλαμβάνεται από την επεξεργασία και αεριοποίηση βιομάζας, κάνοντας όλην την διαδικασία πιο “πράσινη”.

Η ηλεκτρόλυση από την άλλη βασίζεται στη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, όταν αυτό διαπερνάται από υψηλά ποσά ηλεκτρικού ρεύματος 2.2. Η τελική ενέργεια που χρειάζεται να δαπανηθεί είναι μεγαλύτερη από αυτήν της αναμόρφωσης του μεθανίου, αλλά η τεχνική αυτή βασίζεται στο ότι η ηλεκτρική ενέργεια για τη διάσπαση παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, το υδρογόνο έχει πολύ μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα. Συγκεκριμένα η ενεργειακή πυκνότητα του συμπιεσμένου υδρογόνου είναι γύρω στις 40,000Wh/kg, σε αντίθεση με τις μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου που είναι λιγότερο από 280Wh/kg. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για τον τομέα των μεταφορών, καθώς το μεγάλο πρόβλημα της ηλεκτροκίνησης είναι η μικρή αυτονομία. Ένα όχημα που κινείται με υδρογόνο θα μπορεί να διανύει μεγάλες αποστάσεις, κρατώντας το βάρος του σε λογικά επίπεδα. Ειδικά για τα πλοία, τα φορτηγά, αλλά κυρίως για τα αεροπλάνα, που δεν μπορούν να μεταφέρουν το βάρος τόσων συσσωρευτών που χρειάζεται η κίνησή τους, το υδρογόνο θα μπορούσε να είναι μία εφικτή λύση στο ενεργειακό τους πρόβλημα. Δεν πρέπει να ξεχνιέται ούτως ή άλλως, ότι τα παραπάνω μεταφορικά μέσα, αποτελούν ένα μεγάλο μέρος των εκπομπών βλαβερών ουσιών για το περιβάλλον. Το υδρογόνο είναι μία λύση την οποία αναλύουν πολλές κατασκευάστριες εταιρίες οχημάτων και για τον λόγο του εφοδιασμού. Το υδρογόνο χρειάζεται λιγότερο από 5 λεπ-

τά για τον πλήρη ανεφοδιασμό του, σε αντίθεση με τις μπαταρίες, που για να φορτίσουν μπορεί να χρειαστούν μέχρι και μερικές ώρες.

Το σημαντικό πρόβλημα με το υδρογόνο είναι η μεταφορά του και η διανομή του. Σε αντίθεση με τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, το κόστος για την συμπίεση, μεταφορά και διανομή του υδρογόνου είναι μεγάλο. Το υδρογόνο παρόλο που όπως προαναφέρθηκε διαθέτει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, το ίδιο το στοιχείο είναι πολύ μικρής πυκνότητας. Αυτό σημαίνει ότι για ένα δεδομένο βάρος υδρογόνου, ο όγκος που καταλαμβάνει είναι τεράστιος. Για να είναι συνεπώς εύκολη η χρήση του πρέπει να συμπίεστεί και αυτό επιτυγχάνεται είτε με την αύξηση της πίεσής του (περίπου στις 700atm), είτε με την μείωση της θερμοκρασίας τους κάτω από τους 250 °C. Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης όμως, μπορεί να λάβει χώρα in-situ, μειώνοντας κατά ένα βαθμό αυτά τα κόστη.

## 2.4 Σχόλια

Αυτό που θα πρέπει να γίνει κατανοητό είναι ότι δεν υπάρχει κάποια τεχνολογία που να λύνει όλο το πρόβλημα της αποθήκευσης. Υπάρχει λόγος που υπάρχουν διαφορετικοί μέθοδοι αποθήκευσης της ενέργειας και ένα σωστό μελλοντικό πλάνο οφείλει να τις περιλαμβάνει όλες, ανάλογα με το είδος της αποθήκευσης που χρειάζεται. Οι μπαταρίες συμπεριφέρονται πολύ καλά σε γρήγορες απαιτήσεις φορτίου, ενώ υστερούν σε μακροχρόνια αποθήκευση. Αυτό το κενό θα μπορούσαν να το καλύψουν τα υδροηλεκτρικά έργα, ενώ ένα είδος αποθήκευσης της μορφής του σημερινού καυσίμου που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στις μεταφορές θα ήταν το υδρογόνο. Όπως και με την παραγωγή ενέργειας, έτσι και με την αποθήκευσή της, ένα υπεύθυνο πλάνο για το ενεργειακό μέλλον θα πρέπει να περιλαμβάνει πολλαπλές πηγές παραγωγής και αποθήκευσης, αξιοποιώντας τα θετικά της κάθε μίας, εξαλείφοντας την εξάρτηση μία πηγή, δηλαδή των μοναδικών σημείων αποτυχίας (Single Point of Failure - SPOF).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Παρακάτω θα αναλυθούν οι συναρτήσεις που αποτελούν τον κορμό των λειτουργιών του προγράμματος και που βρίσκονται στο αρχείο processData.py. Η επεξήγηση του κυρίως προγράμματος main.py θα γίνει μέσω αυτής της διαδικασίας.

Η πρώτη συνάρτηση ονομάζεται formatData και σκοπός της είναι να μετατρέψει τα δεδομένα σε μορφή που θα επιτρέψει και θα διευκολύνει την επεξεργασία τους.

Τα δύο κύρια αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα είναι η χρονοσειρά του φορτίου του δικτύου και η χρονοσειρά της παραγώμενης ισχύος των ΦΒ, για την συγκεκριμένη περιοχή.

Τα δεδομένα για το φορτίο του δικτύου λαμβάνονται έτοιμα για την περιοχή που θα επιλεγεί, από το αρχείο στο οποίο είναι αποθηκευμένα με όνομα data/`περιοχή`\_gridload.csv. Ο χρήστης στην αρχή του προγράμματος ζητείται να διαλέξει μία από τις περιοχές που αναγράφονται και ανάλογα με την επιλογή του (1-5), επιλέγεται το κατάλληλο αρχείο από τον παραπάνω φάκελο.

```
print("\nSelect examination area from the list below (1-5)")
place = int(input("[1] Chania\n[2] Rethymno\n"
                  + "[3] Heraklio\n[4] Ag.Nikolaos\n[5] Moires\n"))

while place > 5 or place < 1:
    print("\nInvalid answer. Please choose one of the below:")
    place = int(input("[1] Chania\n[2] Rethymno\n"
                     + "[3] Heraklio\n[4] Ag.Nikolaos\n[5] Moires\n"))
```

Όσον αφορά τα δεδομένα για την παραγώμενη ισχύς από τα ΦΒ, αυτά κατεβαίνουν από την ιστοσελίδα του PV-GIS μέσω του API του. Το αίτημα για τα δεδομένα γίνεται μέσω της εντολής curl και τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται με τη σειρά τους στο αρχείο data/pv\_production.csv. Για να γίνει το αίτημα αυτό στην ιστοσελίδα, θα πρέπει να δωθούν κάποιες παράμετροι, μέσα στις οποίες είναι και οι συντεταγμένες της περιοχής. Συνεπώς ανάλογα με την επιλογή του χρήστη, οι συντεταγμένες αποθηκεύονται σε δύο μεταβλητές, lat και lon. Αυτές αντλούνται από ένα dictionary, το οποίο ορίζεται στην αρχή του προγράμματος για να είναι εφικτή η εύκολη τροποποίησή του ανάλογα με τις

ανάγκες του χρήστη. Για τον ίδιο λόγο ορίζονται στην αρχή του προγράμματος και οι υπόλοιπες μεταβλητές που χρειάζεται η ιστοσελίδα, αλλά και όλο το πρόγραμμα.

```
places = {
    1: (35.512, 24.012),
    2: (35.364, 24.471),
    3: (35.343, 25.153),
    4: (35.185, 25.706),
    5: (35.050, 24.877)
}
```

```
lat = str(places[place][0])
lon = str(places[place][1])
```

Η συνάρτηση `formatData` δέχεται ως ορίσματα τις δύο χρονοσειρές και τις μετατρέπει σε έναν πίνακα που η κάθε του σειρά είναι μία μέρα του χρόνου και κάθε στήλη του είναι η αντίστοιχη ώρα της ημέρας, κατά την οποία πάρθηκε η μέτρηση. Στο τέλος, η συνάρτηση επιστρέφει δύο πίνακες οι οποίοι έχουν 365 γραμμές και 24 στήλες.

Για την μοντελοποίηση του συστήματος αποθήκευσης θα χρειαστεί να δημιουργηθεί ένα αντικείμενο μπαταρίας, το οποίο θα μπορεί να φορτίζει και να ξεφορτίζει, να περιέχει όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας και να μπορεί να αυξάνεται η χωρητικότητά της, με το να προστίθεται σε αυτήν και άλλες ίδιες μπαταρίες, σαν να υπήρχε ένα σύμπλεγμα μπαταριών. Στην αρχή του προγράμματος δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει το είδος της μπαταρίας, από την οποία θα αποτελείται το σύστημα.

```
print("\nChoose battery type:")
type = int(input("[1] Lead-Carbon (300,000.00/MWh)\n"
                 + "[2] Lithium-Ion (500,000.00/MWh)\n"))

while type > 2 or type < 1:
    print("\nInvalid answer. Please choose one of the below:")
    type = int(input("[1] Lead-Carbon\n"
                    + "[2] Lithium-Ion\n"))

if type == 1:
    bat_type = path + "/thesis/data/lead_carbon.json"
else:
    bat_type = path + "/thesis/data/lithium_ion.json"
```

Η επιλογή του χρήστη μετατρέπεται σε όνομα αρχείου json. Με βάση αυτό το αρχείο δημιουργείται η αρχική αναπάρσταση μιας μπαταρίας. Αν το αρχείο δεν βρίσκεται στην σωστή μορφή ή δεν υπάρχει καθόλου, το πρόγραμμα τερματίζει με το να ενημερώνει για το είδος του σφάλματος.

```
try:
    bat = Battery.from_json(bat_type)
except Exception as err:
    print("\nFailed to instantiate battery object from json file...\n")
    sys.exit(err)
```

Οι υπολογισμοί που ακολουθούν από εδώ και πέρα, εφαρμόζονται για κάθε σειρά των πινάκων φορτίου δικτύου και παραγωγής ΦΒ, δηλαδή για κάθε ημέρα του χρόνου. Στη συνέχεια αυξάνονται οι μπαταρίες κατά μία και ξανατρέχει

το πρόγραμμα από την αρχή. Ουσιαστικά υπάρχουν δύο βρόγχοι for ο ένας μέσα στον άλλο. Το πρόγραμμα τερματίζει όταν ένα από τα παρακάτω σενάρια επιτευχθεί.

1. Όταν όλη η παραγόμενη ενέργεια από τις ΑΠΕ, αξιοποιείται.
2. Όταν οι ΑΠΕ μαζί με τις μπαταρίες τροφοδοτούν το 100% του δικτύου.
3. Όταν το κόστος του συστήματος αποθήκευσης, φτάσει το μέγιστο αποδεκτό από τον χρήστη.

Για να επιτευχθεί η τρίτη συνθήκη, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει ένα μέγιστο κόστος που μπορεί να διαθέσει. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει τον αριθμό 0, αν δεν θέλει να υπάρχει κάποιος οικονομικός περιορισμός.

Μετά την `formatData` εκτελείται η συνάρτηση `wastedEnergy`. Αυτή δέχεται για ορίσματα δύο σειρές αριθμών, στην περίπτωσή μας τις μετρήσεις μίας ημέρας για το φορτίο του δικτύου και της παραγόμενης ισχύς των ΦΒ και στη συνέχεια υπολογίζει πόση ενέργεια από τα ΦΒ δεν αξιοποιείται μέσα στην ημέρα. Στο τέλος ελέγχει αν η μπαταρία έχει χώρο να αποθηκεύσει αυτήν την ενέργεια και αν μπορεί, το κάνει.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

---

## ΤΕΧΝΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ

Το πρόγραμμα έχει σχεδιασθεί να τρέχει σε περιβάλλον Linux και χρησιμοποιεί Python 3 με τις παρακάτω βιβλιοθήκες:

- os
- json
- requests
- pandas
- math
- sys
- numpy
- matplotlib

Πέρα από αυτές τις βιβλιοθήκες, το πρόγραμμα χρειάζεται κάποιες εντολές του Linux για να λειτουργήσει, οι οποίες είναι:

- curl
- figlet

Για την γρήγορη και εύκολη σύνθεση του περιβάλλοντος, υπάρχει ένα script το οποίο εγκαταστεί όλα τα προαπαιτούμενα σε ένα περιβάλλον Linux, το οποίο πρέπει όμως να βασίζεται στη διανομή Debian. Σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται τέτοιου είδους διανομή, ο χρήστης θα πρέπει να εγκαταστήσει χειροκίνητα τις βιβλιοθήκες και τα προγράμματα αυτά. Επιπλέον το σύστημα πρέπει να έχει γραφικό περιβάλλον, αλλιώς δεν μπορούν να εμφανιστούν τα διαγράμματα, που δημιουργούνται μέσω της βιβλιοθήκης matplotlib. Σε αντίθετη περίπτωση, ο χρήστης θα πρέπει να τροποποιήσει τον κώδικα στον τομέα που φτιάχνονται τα διαγράμματα, με σκοπό αντί να εμφανίζονται, το πρόγραμμα να τα αποθηκεύει σε αρχείο εικόνας, το οποίο μπορούν να ανοιχτούν χωρίς γραφικό περιβάλλον.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τώρα πια με την τεχνολογία που διαθέτουμε έχουμε την κατάλληλη ισχύ για να τροφοδοθούμε εντελώς από ΑΠΕ και να ανεξαρτητοποιηθούμε από τα ορυκτά καύσιμα. Το μόνο εμπόδιο σε αυτήν την λειτουργία είναι η αποθήκευση.



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Γιώργος Φιντικάκης. ‘Στην Βουλή τις επόμενες ημέρες ο πρώτος κλιματικός νόμος της χώρας-Τι θα περιλαμβάνει για καυστήρες πετρελαίου και συμβατικά αυτοκίνητα’. στο: *EnergyPress* (11 Μάι. 2022). <https://energypress.gr/news/stin-voyli-tis-epomenes-imeres-o-protos-klimatikos-nomos-tis-horas-ti-tha-perilamvanei-gia>.
- [2] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. ‘What is pumped storage hydropower?’ στο: *EnergyGov* (18 Ιαν. 2017). <https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower>.