



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

# **Εφαρμογή υβριδικού συστήματος ανάκτησης και αποθήκευσης ενέργειας σε γεραμούς λιμανιού**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

ΤΟΥ

Κουρτέλης Ιωάννης

A.M: HN07988

Επιβλέπων: Βλαχόπουλος Δημήτριος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ/ΙΟΥΝΙΟΣ /2022





HELLENIC DEMOCRACY  
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA  
SCHOOL OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL  
& COMPUTER ENGINEERING

# **Application of a hybrid energy recovery and storage system in port cranes**

THESIS

---

John Kourtelis AM: HN07988

**SUPERVISOR:** Dimitrios Vlahopoulos

UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA/JUNE/2022





ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

## ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Πτυχιακή Εργασία με τίτλο “ **Εφαρμογή υβριδικού συστήματος ανάκτησης και αποθήκευσης ενέργειας σε γεραμούς λιμανιού** ” καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. **Δημήτριος Βλαχόπουλος** αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Ιωάννης Κουρτέλης & Δημήτριος Βλαχόπουλος, 2022, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή: Ιωάννης Κουρτέλης HN07988



## Περίληψη

Η παγκόσμια μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων μέσω θαλάσσιων κατευθύνσεων αποτελεί ένα σπουδαίο ρόλο στην εμπορική και οικονομική ανάπτυξη κάθε χώρας. Σε κάθε λιμάνι του κόσμου ξεφορτώνονται χιλιάδες container όπου με την χρήση των γερανών αποβάθρας μεταφέρονται σε χώρους διαλογής και στην συνέχεια σε φορτηγά αποστολής προς κάθε κατεύθυνση. Η χρήση των γερανών STS και eRTG είναι μια λύση καινοτομίας στον σύγχρονο κόσμο αλλά για την λειτουργία τους δημιουργείται μεγάλη κατανάλωση ενέργειας και ορυκτών καυσίμων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή. Η ανάπτυξη της καθαρής ενέργειας αποτελεί ένα κορυφαίο περιβαλλοντικό στόχο για την απεξάρτηση από τα καύσιμα και η οποία αποτελεί ένα πρότυπο τεχνολογικών εφαρμογών για ένα πιο καθαρό και οικολογικό περιβάλλον. Η εγκατάσταση υβριδικών συστημάτων (HESS) δηλαδή ειδικών διαμορφωμένων μονάδων που συνδυάζουν παραγωγή και αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, είναι από τις πιο αποτελεσματικές και ολοκληρωμένες εφαρμογές καθαρής ενέργειας. Πρώτο και ζωτικής σημασίας βήμα για να φθάσουμε σε αυτόν τον στόχο είναι η εξοικονόμηση και η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας μέσω ενός μικροδικτύου, που περιλαμβάνει την χρησιμοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με ελεγκτές ρύθμισης ισχύος και συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Με εφαρμογή στους λιμενικούς γερανούς γίνεται η ανάλυση ροής ισχύος και υπολογίζεται η εξοικονόμηση ενέργειας για ένα καθορισμένο κύκλο φορτίου. Εν συνεχεία γίνεται μια μελέτη για τον σχεδιασμό ενός υβριδικού συστήματος όπου σύμφωνα με τις προδιαγραφές των γερανών υπολογίζεται η μέγιστη ζήτηση ενέργειας και εν τέλει η εξοικονόμηση αυτής για να βρεθεί το πιο κατάλληλο και οικονομικό μοντέλο.

---

**Λέξεις Κλειδιά:** Λιμάνι, Γερανός STS, Γερανός e-RTG, αποθήκη ενέργειας, παραγωγή ενέργειας

## Abstract

---

The Global transport of containers by sea directions constitutes a great role in commercial and economic development of every country. In every port of the world thousands of containers are unloaded where with the use of dock cranes transported to sorting areas and then to transport trucks in any direction. The use of cranes STS and RTG is an innovation solution in the modern world but for their operation, high energy consumption is created and fossil fuels related to climate change. The development of clean energy is a top environmental goal to reduce fuel and which is a model of technological applications for a cleaner and more ecological environment. The installation of hybrid systems (HESS) i.e. specially designed units that combine generation and storage of electricity, is one of the most efficient and integrated clean energy applications. First and foremost, step in reaching this is to save and improve energy efficiency via a micro-network containing the use of renewable energy in combination with power adjustment controllers and energy storage devices. With application in port cranes power flow analysis is performed and energy savings are calculated for a set load cycle. A study is then conducted to design a hybrid system where according to the specifications of the cranes the maximum energy demand is estimated and energy saving to find the most suitable and economical model.

---

**Keywords:** Port, STS Crane, RTG Crane, energy storage, energy production

---



## Ευχαριστίες

---

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Βλαχόπουλο Δημήτριο για όλη την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια εκπόμησης της εργασίας μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για όλη την υποστήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ/ΙΟΥΝΙΟΣ /2022

---



# Περιεχόμενα

---

Περίληψη .....	7
Abstract .....	8
Ευχαριστίες.....	9
Κατάλογος Σχημάτων .....	14
Κατάλογος Εικόνων .....	15
Κατάλογος Πινάκων.....	16
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....	18
1.1 Ιστορική αναδρομή .....	19
Κεφάλαιο 2 Τύποι γερανών σε ένα λιμάνι .....	21
2.1 Γερανοί προβλήτας .....	23
2.2 Γερανοί προαυλίου .....	24
2.3 Αρχιτεκτονική γερανών STS .....	26
2.3.1 Κύκλος φορτίου .....	29
2.4 Αρχιτεκτονική γερανών RTG .....	31
2.4.1 Κύκλος φορτίου .....	34
Κεφάλαιο 3 Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας .....	35
3.1 Battery Li ion storage system .....	36
3.1.2 Γενικά Χαρακτηριστικά .....	36
3.1.3 Χαρακτηριστικά υλικών σε μπαταρίες Li-ion.....	37
3.1.4 Προδιαγραφές κατά Χωρητικότητα & Τύπος.....	38
3.2 Ultracapacitors – Υπερπυκνωτές .....	40
3.2.1 Χαρακτηριστικά υπερπυκνωτή .....	40
3.2.2 Σύστημα διαχείρισης πυκνωτών. ....	40
3.2.3 Τα βασικά χαρακτηριστικά των υπερπυκνωτών .....	41
3.2.4 Σύνδεση φορτισμένων ή μη φορτισμένων υπερπυκνωτών με σύνδεση DC .....	42
3.3 Flywheel energy storage systems – FESS .....	44
3.3.1 Κύρια Μέρη Συστημάτων FESS .....	44
3.4 Αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα – Compressed air energy storage - CAES.....	47
3.5 Βαρυτική Ενέργεια (GES) .....	50
3.5.1 Gravitricity Gravity-based Energy Storage .....	50

3.5.2 Χαρακτηριστικά (GBES) .....	51
3.5.3 ARES (Advanced Rail Energy Storage System) .....	52
3.5.4 PHES (Pumped Hydro Energy Storage) .....	53
3.5.5 Χαρακτηριστικά (PHES) .....	53
3.6 Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων ενέργειας.....	54
3.5.1 Πυκνότητα Ισχύος (kW/m <sup>3</sup> ).....	58
3.5.2 Αποτελεσματικότητα μετ' επιστροφής – Round trip efficiency %..	58
3.5.3 Επαναχρησιμοποίηση και διάρκεια ζωής.....	58
3.5.4 Χρόνος εκφόρτισης και απόκρισης.....	59
3.5.5 Κόστος ενέργειας (\$/kWh) .....	59
3.5.6 Περιβαλλοντική Επίπτωση .....	59
3.5.7 Συμπέρασμα σύγκρισης ενεργειών.....	60
Κεφάλαιο 4 Παραγωγή Ενέργειας απο ΑΠΕ .....	62
4.1 Θαλάσσια ενέργεια .....	62
4.2 Buoyancy Energy Storage (BEST).....	63
4.2.1 Αρχιτεκτονική συστημάτων BEST .....	64
4.2.2 Πλεονεκτήματα του BEST .....	66
4.2.3 Εφαρμογές συστημάτων BEST .....	67
4.2.4 Εκτίμηση κόστους αποθήκευσης ενέργειας BEST .....	68
4.3 Underwater gravity storage (UGES).....	69
4.3.1 Αρχιτεκτονική συστημάτων (UGES) .....	69
4.3.2 Πλεονεκτήματα του UGES .....	70
4.3.3 Εφαρμογές συστημάτων UGES.....	71
4.3.4 Εκτίμηση κόστους αποθήκευσης ενέργειας UGES .....	72
4.4 Οφέλη από τη χρήση της θαλάσσιας ενέργειας .....	73
Κεφάλαιο 5 Σενάρια προς μελέτη .....	74
5.1 Σενάριο γερανών 2 STS και 2 e-RTG .....	74
5.1.2 Υπολογισμός χρόνων εκφόρτωσης / φόρτωσης.....	77
5.1.3 Κύκλος λειτουργίας γερανού και κατανάλωση ενέργειας.....	79
5.2 Γραμμική ομοιόμορφη επιταχυνόμενη κίνηση.....	79
5.3 Κινητική ενέργεια και ισχύς .....	81
5.4 Υπολογισμοί ισχύος για 2 STS και 2 e-RTG .....	82
5.5 Σενάριο γερανών 6 STS και 6 e-RTG .....	87
Κεφάλαιο 6 Επίλογος .....	91

6.1 Συμπεράσματα .....	91
6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις .....	92
Παραρτήματα .....	93
Βιβλιογραφία .....	94
Απόδοση ξενόγλωσσων όρων .....	98

## Κατάλογος Σχημάτων

---

Σχέδιο 1. Βήματα κύκλου ενός STS γερανού .....	30
Σχέδιο 2. Ζήτηση ισχύος κατα τον κύκλο φορτίου ενός STS γερανού. ....	31
Σχέδιο 3. Πρόσοψη RTG γερανού σχεδιασμένο στο AutoCAD 2021.....	33
Σχέδιο 4. Βήματα κύκλου ενός RTG γερανού σχεδιασμένο στο AutoCAD 2021.....	33

## Κατάλογος Εικόνων

---

Figure 1. Τροχοφόρος γερανός ανύψωσης πετρωμάτων .....	19
Figure 2. Διπλός γερανός με αλυσίδα και γάντζο. ....	21
Figure 3. Ship to shore cranes (STS) .....	23
Figure 4. Rubber Tired Gantry Cranes (RTG) .....	24
Figure 5. Rail Mounted Gantry Cranes (RMG).....	25
Figure 6. Χαρακτηριστικά ενός γερανού STS .....	30
Figure 7. Χαρακτηριστικά ενός RTG γερανού.....	32
Figure 8. Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας.....	35
Figure 9. Αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα ( CAES ) .....	48
Figure 10. Energy Vault's 75-meter-tall Commercial Demonstration Unit at night, in Arbedo-Castione.....	51
Figure 11. ARES Technology .....	52
Figure 12. Αποθήκευση ενέργειας άνωσης, (α) το σκίτσο του συστήματος και των κύριων εξαρτημάτων, (β) παρουσιάζει τις δυνάμεις που ασκούνται στον δέκτη άνωσης. ....	65
Figure 13. (α) Δέκτης αποθήκευσης μπαλονιού και (β) κατακόρυφη και (γ) οριζόντια όψη των σχεδίων αποδοχής αποθήκευσης σωλήνων σε τομή. ..	65
Figure 14. Μια τυπική μετατροπή αλυσίδας ( για ένα μόνο ηλεκτρομηχανικό σύστημα) μιας υποβρύχιας ενέργειας βαρύτητας συστήματος αποθήκευσης (UGES).....	69
Figure 15. Κύκλος φορτίου για γεραμούς STS .....	78

## Κατάλογος Πινάκων

---

Πίνακας 1. Τύποι γερανών STS και τα χαρακτηριστικά τους .....	27
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά κινητήρων γερανών STS .....	27
Πίνακας 3. Τα χαρακτηριστικά ενός RTG γερανού .....	34
Πίνακας 4. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά μπαταριών Li-ion ανα μοντέλο τύπου κυψέλης.....	39
Πίνακας 5.Επιδόσεις και χαρακτηριστικά μπαταριών Li-ion ESS High Power Type .....	39
Πίνακας 6. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά Super Capacitor .....	43
Πίνακας 7. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά Super Capacitor ESS High Power Type .....	43
Πίνακας 8. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά FES .....	46
Πίνακας 9. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά FESS .....	46
Πίνακας 10. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά CAES .....	49
Πίνακας 11. Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων 1 .....	55
Πίνακας 12. Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων 2 .....	56
Πίνακας 13. Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων 3 .....	57
Πίνακας 14. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά STS Crane .....	76
Πίνακας 15. Τεχνικά χαρακτηριστικά STS Crane .....	76
Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά κινητήρων STS Crane .....	76
Πίνακας 17. Τεχνικά χαρακτηριστικά RTG Crane .....	77
Πίνακας 18. Υπολογισμός 2 STS με CT 25 tons, Spreader 15 tons and Trolley 20 tons. ....	83
Πίνακας 19. Υπολογισμός 2 eRTG με CT 25 tons, Spreader 10 tons and Trolley 15 tons. ....	84
Πίνακας 20. Υπολογισμός 2 STS με CT 40 tons, Spreader 15 tons and Trolley 20 tons .....	85
Πίνακας 21. Υπολογισμός 2 eRTG με CT 40 tons, Spreader 10 tons and Trolley 15 tons. ....	86
Πίνακας 22. Υπολογισμός 6 STS με CT 25 tons, Spreader 15 tons and Trolley 20 tons. ....	87
Πίνακας 23. Υπολογισμός 6 eRTG CT 25 tons, Spreader 10 tons and Trolley 15 tons. ....	88
Πίνακας 24. Υπολογισμός 6 STS με CT 40 tons, Spreader 15 tons and Trolley 20 tons. ....	89
Πίνακας 25. Υπολογισμός 6 eRTG με CT 40 tons, Spreader 10 tons and Trolley 15 tons. ....	90





# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

---

Σύμφωνα με το θέμα της συγκεκριμένης μελέτης γίνεται μια παρουσίαση για την εξοικονόμηση ενέργειας όσο για την παραγωγή και την αποθήκευση αυτής σε γερανούς λιμένων.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή από τα αρχαία χρόνια μέχρι και την τωρινή χρονολογία.

Στο Δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η αρχιτεκτονική των λιμενικών γερανών STS και eRTG όπου επισυνάπτεται η κατασκευή τους, η λειτουργικότητα τους και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση πάνω στους τύπους αποθήκευσης ενέργειας σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους, την λειτουργία τους και την καλύτερη απόδοση που θα χρειαστεί για να διαλέξουμε το κατάλληλο μοντέλο για τους γερανούς.

Στο Τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η κατάλληλη επιλογή ΑΠΕ όπως η υποβρύχια βαρυτική ενέργεια που θα συμβάλει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η τελική ανάλυση για τα φορτία αιχμής που αφορούν τους γερανούς λιμένων όπως τους STS, eRTG όπου μέσω των παραπάνω κεφαλαίων ο κύριος στόχος του είναι να προσδιορίσει εάν η εφαρμογή συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στον τερματικό σταθμό εμπορευματοκιβωτίων του λιμένα είναι εφικτή και κερδοφόρα.

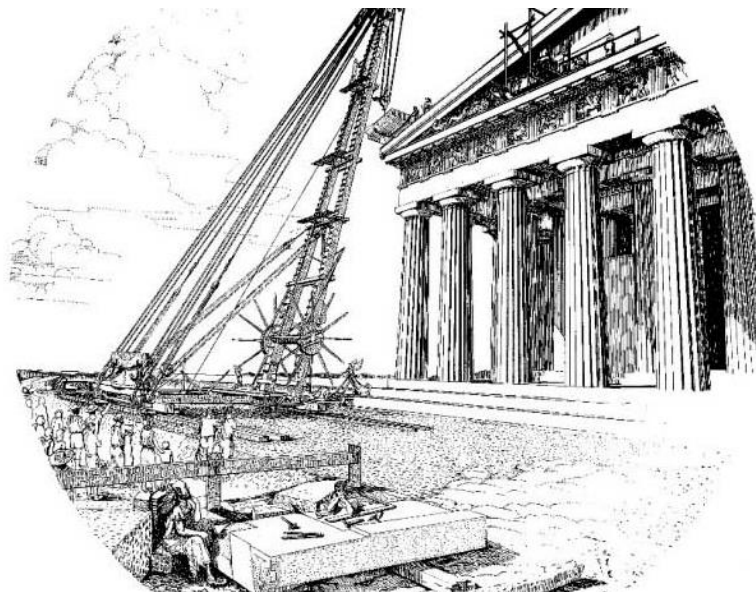
Κύριος σκοπός της εργασίας αυτής είναι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος μιας εκτεταμένης περιοχής του λιμένα, που έχει ως στόχο να εξασφαλίσει τη μαζική ενεργειακή αποθήκευση ενέργειας κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και την χρήση αυτής κατά τις ώρες αιχμής, όπου αυτό είναι δυνατό.

## 1.1 Ιστορική αναδρομή

Για χιλιάδες χρόνια, οι άνθρωποι έχουν καινοτομήσει τρόπους για να σηκώσουν βαριά αντικείμενα και να τα τοποθετήσουν εκεί που χρειάζονται. Όπως αποδείχθηκε σε αμέτρητα αρχαία αξιοθέατα σε όλο τον κόσμο, η ιστορία του γερανού είναι ευθυγραμμισμένη με την ιστορία των ορίων της ανθρώπινης δύναμης. Οι αρχαίοι Έλληνες ήταν πολλά χρόνια μπροστά από τον υπόλοιπο κόσμο όταν χρησιμοποιούσαν εξοπλισμό ανύψωσης.

Η έννοια των γερανών προήλθε από συστήματα τροχαλιών που δημιουργήθηκαν από τον Αρχιμήδη των Συρακουσών γύρω στο 287 - 212 π.Χ., το οποίο χρησιμοποίησε για να σηκώσει ένα ολόκληρο πολεμικό πλοίο, μαζί με το πλήρωμά του.

Στις θάλασσες, οι πρώτοι γερανοί λιμανιού χρησιμοποιήθηκαν το 1244 στην Ουτρέχτη, ενώ στην Αγγλία ο τροχός καταγράφηκε το 1331. Οι γερανοί χρησιμοποιήθηκαν σε λιμάνια, ορυχεία και κτίρια όπου ο γερανός στροφών είχε σημαντικό ρόλο ανύψωσης. Οι γερανοί τροφοδοτούνταν από γυαλιά που είχαν ακτίνες και στρόφαλους. Οι γερανοί με τροχό χρησιμοποιήθηκαν μέχρι το τέλος του 17ου αιώνα και ήταν απαραίτητοι στα λιμάνια και στην κατασκευή καθεδρικών ναών.



*Figure 1. Τροχοφόρος γερανός ανύψωσης πετρωματων*

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://buffaloah.com/a/DCTNRY/c/crane.html>

Ενώ οι γερανοί παρέμειναν χειροκίνητοι για αιώνες, η υδραυλική τεχνολογία αναπτύχθηκε με μια ιστορία που ξεκινά από την Αρχαία Αίγυπτο, την Κίνα και την Ελλάδα. Τα αρχαία συστήματα άρδευσης, όπως τα υδραγωγεία που αναπτύχθηκαν από τους Ρωμαίους, βασίστηκαν σε απλή υδραυλική τεχνολογία, όπως το σιφόνι. Αλλά μόλις τον 15ο αιώνα ο Blaise Pascal δημιούργησε μια νέα κατανόηση των υδραυλικών αρχών όπως η υδραυλική πρέσα που είναι το δομικό στοιχείο της σύγχρονης υδραυλικής. Πολύ αργότερα τον 19ο αιώνα, η άνοδος των σιδηρουργείων και η εκβιομηχάνιση σήμαινε ότι οι γερανοί θα κατασκευάζονταν με σίδηρο. Ο πρώτος γερανός από χυτοσίδηρο κατασκευάστηκε το 1834 και το 1851, οι γερανοί με το χέρι άρχισαν τελικά να λειτουργούν με ατμό.

Σήμερα, οι υδραυλικοί γερανοί κατασκευάζονται με καλύτερες προδιαγραφές και υλικά από τους γερανούς το 1800, αλλά βασίζονται στις ίδιες μηχανικές και υδραυλικές αρχές που αναπτύχθηκαν πριν από αιώνες. Οι σύγχρονοι υδραυλικοί γερανοί γεμίζουν με ασυμπίεστο υγρό, συνήθως λάδι, που μεταφέρει την πίεση μεταξύ των εμβόλων. Οι παραλλαγές αυτής της απλής αξιοποίησης της κίνησης ρευστού μας επέτρεψαν να σχεδιάσουμε γερανούς μεγάλης χωρητικότητας.

## Κεφάλαιο 2 Τύποι γερανών σε ένα λιμάνι

Μέχρι τη δεκαετία του 1950, τα πλοία φορτώνονταν κυρίως ως ογκώδες φορτίο. Αυτό ήταν πολύ αργό, εντατικό σε εργασία και ήταν επίσης επιρρεπές σε κλοπή και ζημιές. Τα δρομολόγια των πλοίων δεν ήταν σταθερά και επηρέαζαν τις επόμενες κλήσεις λιμένων. Τα εμπορεύματα που φορτώνανε ήταν επίσης αναποτελεσματικά, πράγμα που σήμαινε μεγαλύτερους χρόνους ανακαίνισης των πλοίων. Το φορτίο τοποθετούνταν σε παλέτες και μεταφερόταν σε ένα δίκτυ φορτίου και ανυψωνόταν με γερανό από την αποβάθρα στο πλοίο. Το φορτίο μόλις έμπαινε στο σκάφος, έπρεπε να στερεωθεί σωστά για να αποφευχθεί ζημιά κατά τη μεταφορά. Αυτή η έννοια της φόρτωσης άλλαξε όταν εισήχθησαν τυποποιημένα εμπορευματοκιβώτια. Η ύπαρξη τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων σήμαινε ότι θα μπορούσαν να κατασκευαστούν εξειδικευμένοι γερανοί για να χειρίζονται τη διαδικασία φόρτωσης πιο αποτελεσματικά και αποδοτικά. Ακόμα και σήμερα, αυτοί οι γερανοί από πλοίο σε ακτή συνεχίζουν να παίζουν σημαντικό ρόλο στην ανατροπή σκαφών και τη συνολική απόδοση της αλυσίδας εφοδιασμού.



Figure 2. Διπλός γερανός με αλυσίδα και γάντζο.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <http://www.rottenplaces.de/main/10-sehenswerte-industriedenkmaeler-der-republik-teil-2-39114/>

Οι γερανοί λιμένων μετρούνται από την παραγωγικότητα, η οποία βαθμολογείται σε "κινήσεις". Μια κίνηση ισοδυναμεί με μια ολόκληρη κίνηση ενός εμπορευματοκιβωτίου από την αποβάθρα στο πλοίο ή από το σκάφος στην προβλήτα. Μια κίνηση επηρεάζεται από την ισχύ και την ταχύτητα των κινητήρων, καθώς και από την ανυψωτική ικανότητα του γερανού. Ανάλογα με το μέγεθος του σκάφους, ένας γερανός μπορεί να κάνει μεταξύ 30 - 50 κινήσεις την ώρα. Η κύρια εργασία ενός χειριστή ενός γερανού λιμένα είναι να φορτώνει και να εκφορτώνει εμπορευματοκιβώτια αποστολής από πάνω σε ένα σκάφος. Η εργασία απαιτεί μέγιστη συγκέντρωση, ακρίβεια και άριστο συντονισμό χεριού-ματιού.

Οι χειριστές γερανού λιμένων κάθονται μέσα σε ένα προστατευτικό πιλοτήριο, γνωστό και ως καμπίνα. Η καμπίνα είναι προσαρτημένη στο βραχίονα του γερανού, δίνοντάς τους την καλύτερη γωνία θέασης για την εκτέλεση των καθηκόντων τους. Και τα δύο χέρια ελέγχουν ξεχωριστά χειριστήρια με πολλαπλές λειτουργίες. Με τη βοήθεια των λιμενεργατών και της ραδιοεπικοινωνίας, οι χειριστές γερανών συλλέγουν τα container χρησιμοποιώντας τον διανομέα και διασφαλίζοντας ότι όλες οι κλειδαριές περιστροφής συναντούν τα θυλάκια των container πριν το σηκώσουν. Οι λιμενικοί γερανοί παίζουν ζωτικό ρόλο στις καθημερινές λιμενικές λειτουργίες. Χωρίς τη βοήθεια αυτών των γερανών, τα εμπορευματοκιβώτια δεν μπορούν να στοιβάζονται στο λιμάνι ή να φορτώνονται στο σκάφος. Υπάρχουν δύο τύποι γερανών λιμένων: γερανοί προβλήτας (**Quay Cranes**) και γερανοί προαυλίου (**Yard Cranes**).

## 2.1 Γερανοί προβλήτας

Αυτοί οι τύποι γερανών χρησιμοποιούνται για να λειτουργούν σε εμπορευματοκιβώτια από πλοίο σε ακτή και ακτή σε πλοίο και ως εκ τούτου είναι επίσης γνωστοί ως γερανοί πλοίων σε ακτές (STS). Οι γερανοί της αποβάθρας βρίσκονται κατά μήκος της προκυμιάς όπου τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι εύκολα προσβάσιμα.



Figure 3. Ship to shore cranes (STS)

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://www.liebherr.com/en/can/products/maritime-cranes/port-equipment/container-bridges/ship-to-shore-container-cranes.html>)

Όσον αφορά τους γεραμούς πλοίου προς ακτή, υπάρχουν δύο τύποι:

- το υψηλό προφίλ (με πλαίσιο A)
- το χαμηλό προφίλ

Παρόλο που λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο, κατά τη διαδικασία σχεδιασμού της θύρας εμπορευματοκιβωτίων αποφασίζεται ο τύπος του γερανού, με βάση την καταλληλότητα. Ο γερανός χαμηλού προφίλ διαθέτει σταθερό βραχίονα φόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων από και προς το πλοίο. Από την άλλη πλευρά, οι γερανοί υψηλών προδιαγραφών έχουν ένα μεντεσέ που επιτρέπει την ευκολότερη πλοήγηση στο πλοίο κατά την άφιξη ή την έξοδο από την αποβάθρα.



## 2.2 Γερανοί προαυλίου

Αυτοί οι τύποι γερανών βρίσκονται κυρίως στο προαύλιο εμπορευματοκιβωτίων του λιμανιού και μεταφέρουν φορτωμένα εμπορευματοκιβώτια από το προαύλιο σε ρυμουλκούμενα. Ενώ υπάρχουν διάφοροι τύποι γερανών προαυλίου όπως, είναι οι Rubber-Tired Gantry Cranes (RTG) και οι Rail-Mounted Gantry Cranes (RMG).



Figure 4. Rubber Tired Gantry Cranes (RTG)

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <http://www.gantrycranedesign.com/rubber-tyred-gantry-crane.html>

Ο γερανός RTG χρησιμοποιείται κυρίως για το χειρισμό εμπορευματοκιβωτίων ή άλλων αντικειμένων, όπως χαλύβδινων σωλήνων στον τερματικό λιμένα. Αντί να κινείται σε ράγες, ο γερανός RTG έχει ως ομάδα μηχανών τα ελαστικά όπου επιτρέπουν στον γερανό να ταξιδεύει σε οποιαδήποτε κατεύθυνση καθώς και να περιστρέφονται σε 20 °, 45 °, 90 ° με υδραυλική μετάδοση. Επίσης ο γερανός RTG λειτουργεί με την ίδια αρχή με την εξαίρεση ότι ολόκληρη η εξέδρα είναι κινητή από τη μια θέση στην άλλη και ο γερανός που κάθεται στην κορυφή είναι επίσης κινητός. Αυτός ο τύπος κινητού γερανού είναι χρήσιμος σε περιπτώσεις αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης ή για προαύλια προσωρινής αποθήκευσης εμπορευματοκιβωτίων. Λόγω της κινητικότητας μπορεί να μετακινηθεί σε απομακρυσμένη τοποθεσία και να χρησιμοποιηθεί για τη φόρτωση ή την εκφόρτωση εμπορευματοκιβωτίων.



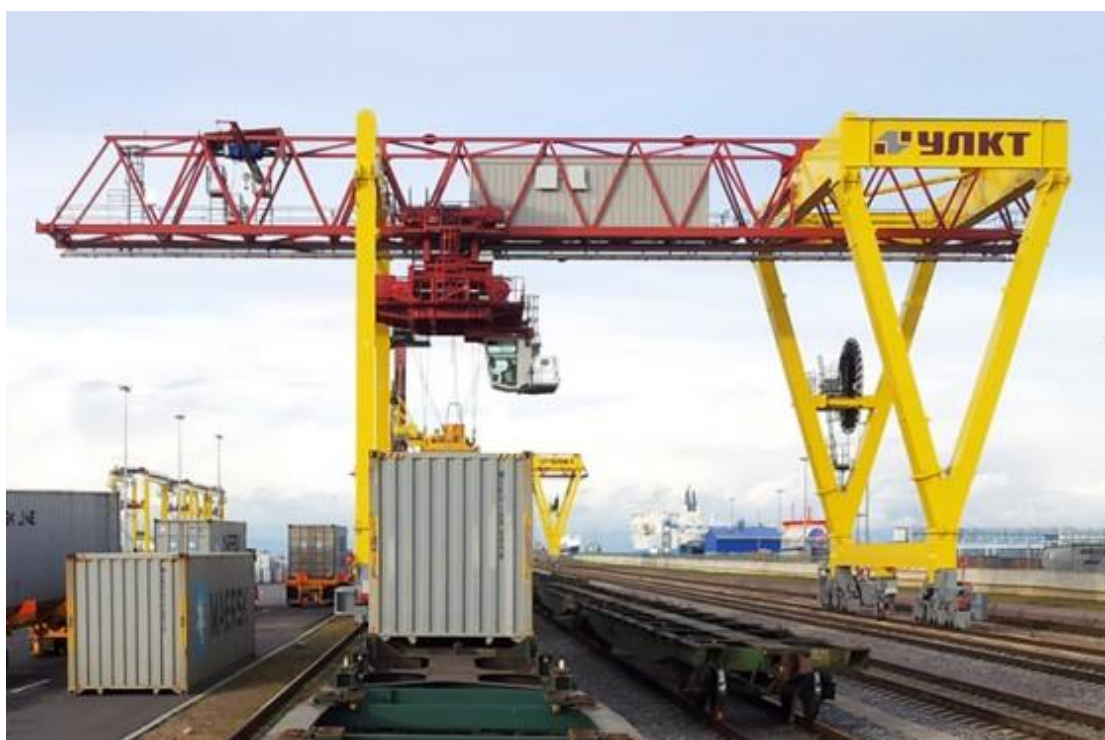


Figure 5. Rail Mounted Gantry Cranes (RMG)

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://www.nauticexpo.com/prod/liebherr-international-deutschland/product-30468-189566.html>)

Ο Σιδηροδρομικός γερανός RMG , χρησιμοποιείται συνήθως για τον γρήγορο, ασφαλή και αυτοματοποιημένο χειρισμό των εμπορευματοκιβωτίων. Ο γερανός παρέχει υψηλή απόδοση, αξιοπιστία, χαμηλό κόστος λειτουργίας και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, παίζοντας βασικό ρόλο στη διευκόλυνση των λειτουργιών στοίβαξης φορτίων. Οι γερανοί RMG είναι ειδικά εξοπλισμένοι με γερανογέφυρες, που τις συναντάμε συνήθως σε τερματικά για τον χειρισμό μεγάλων εμπορευματοκιβωτίων. Ο γερανός έχει γρήγορη ταχύτητα λειτουργίας και υψηλό επίπεδο εργασίας όπου παρέχει εξαιρετικά ομαλή λειτουργία και επιταχύνει τον κύκλο εργασιών του μεταφορέα εμπορευματοκιβωτίων ή άλλων γερανών.

## 2.3 Αρχιτεκτονική γερανών STS

Για την λειτουργία των τερματικών σταθμών απαιτούνται 4 λειτουργικά συστήματα όπως:

- φόρτωση / εκφόρτωση του πλοίου
- μεταφορά φορτίων
- αποθήκευση
- και παράδοση / παραλαβή

Το Πρώτο λειτουργικό σύστημα φόρτωση / εκφόρτωση, επιτυγχάνεται με γερανούς αποβάθρας (QC), οι οποίοι συνήθως είναι γερανοί πλοίου προς ξηρά (STS). Οι γερανοί STS συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς είναι εγκατεστημένοι σε σταθερή θέση και η κίνησή τους είναι περιορισμένη. Αυτοί οι γερανοί χρησιμοποιούν ηλεκτρικούς κινητήρες για το χειρισμό των τερματικών σταθμών και απαιτείται μεγάλη ποσότητα ισχύος για την ανύψωσή τους. Επιπλέον, όταν κατεβαίνει ένα container, οι κινητήρες ενεργούν με αναγεννητικό τρόπο, παράγοντας κορυφές ισχύος που στέλνονται πίσω και καταναλώνονται. Η ανάκτηση και η αποθήκευση αυτής της ενέργειας θα μπορούσε να κάνει τους γερανούς πιο αποτελεσματικούς και να μειώσει το συνολικό κόστος λειτουργίας των γερανών. Για το Δεύτερο και Τρίτο σύστημα η λειτουργία για μεταφορά φορτίων γίνεται με αυτοματοποιημένα φορητά που τα προορίζουν σε προάυλια αποθήκευσης, όπου εκεί χρησιμοποιούνται οι επόμενοι μηχανοκίνητοι γερανοί RTG. Τέλος λαμβάνουν μέρος οι γερανοί RMG που τα παραδίδουν σε φορητά για αποστολή προς κάθε πόλη ή μέσω μεταφορέα βαγονιού.

Μια πιθανή ταξινόμηση των γερανών αποβάθρας (QC) είναι ανάλογα με το μέγεθος του πλοίου που εξυπηρετούν. Υπάρχουν διάφοροι τύποι γερανών όπως :

Πίνακας 1. Τύποι γερανών STS και τα χαρακτηριστικά τους

Crane type / Characteristics	Panamax	Post Panamax	Super post Panamax	Megamax	Widespan Stacking Cranes
Scope Up	38 m	45 m	53 m.	above 53 m	30 - 40 m
Number of containers on the cover Up	13	16	19	20 +	13 +
Lifting height	30 m	35 m	40 m.	40 m +	20 - 25 m
Safe work load From	40-50 t single 65 t twin	40-50 t single 65 t twin	40-50 t single	40-50 t single 65 t twin	40-50 t single 65 t twin
Hoist Lifting speed From	50 / 125 m/min	60 / 150 m/min	65 t twin	90 - 180 m/min	50 - 125 m/min
Trolley Carriage travel speed	150 - 180 m/min	180 - 210 m/min	70 to 175 m / min.	210 - 240 m/min	180 m/min
Movement speed of the crane	45 m/min	45 m/min	210 to 240 m / min.	45 m/min	100 - 140 m/min
Wheel load From	30 - 45 t/m	40 - 55 t/m	45 m / min.	65 + t/m	40 - 50 t/m

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ : Crane Sizes & Technical Specifications

<https://www.liebherr.com/en/can/products/maritime-cranes/port-equipment/container-bridges/ship-to-shore-container-cranes.html>

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά κινητήρων γερανών STS

Crane type / Characteristics	Panamax	Post Panamax	Super post Panamax
Hoist motors	200-400kW	400-600kW	660-800kW
Trolley motors	22-30kW	37-55kW	55-75kW
Gantry motors	22kW	22-25kW	30-37kW
Boom motor	75-90kW	110-160kW	300-500kW

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ : <https://www.coursehero.com/file/105028925/an-introductory-guide-to-port-cranes-and-the-application-of-variable-speed-drives-iss1x-0704-0005-01/>

Οι γερανοί STS έχουν τρεις γενικούς τύπους κίνησης:

- Hoist - Ανύψωση
- Trolley - Τρόλεϊ
- travel (or gantry) – Η Κίνηση του γερανού

Η ανύψωση είναι η κάθετη κίνηση για την ανύψωση των εμπορευματοκιβωτίων και απαιτεί την υψηλότερη ισχύ όλων των κινήσεων καθώς μια μεγάλη μάζα πρέπει να ανυψώνεται σε περιορισμένο χρονικό διάστημα. Οι τυπικές ταχύτητες είναι:

- 50-90 m/min χωρίς φορτίο
- 125-180 m/min κατά την ανύψωση ενός εμπορευματοκιβωτίου.

Το τρόλεϊ είναι το κινητό στοιχείο που κινείται κατά μήκος της κύριας δέσμης και η κίνησή του παίρνει το όνομά του. Κατά συνέπεια, η κίνηση του τρόλεϊ είναι κάθετη προς την προκυμαία και μετακινείται από την ακτή στο πλοίο και το αντίστροφο. Ο κύριος μηχανισμός και οι μηχανισμοί ανύψωσης μπούμας που είναι τοποθετημένοι μέσα σε ένα μηχανοστάσιο ανθεκτικό στις καιρικές συνθήκες το οποίο είναι εγκατεστημένο στο τρόλεϊ.

Όπου απαιτούνται μέτριες ταχύτητες τρόλεϊ, αυτές μπορούν να είναι αυτοκινούμενες. Ανάλογα με το μέγεθος του γερανού, η ταχύτητα του τρόλεϊ κυμαίνεται από:

- 50 m/min έως 240 m/min

Η κίνηση ολόκληρου του γερανού πραγματοποιείται παράλληλα κατά μήκος της ράγας της αποβάθρας. Οι συνήθεις ταχύτητες κυμαίνονται από:

- 45 m/min έως 70 m/min που επιτυγχάνονται μετά από μερικά δευτερόλεπτα επιτάχυνσης.

Ένα μηχανικό ή ηλεκτρονικό σύστημα αντλιοθήσης εγκαθίσταται συχνά για να μειώσει την ταλάντευση του διανομέα (Spreader). Ο διανομέας μπορεί επίσης να είναι λίγο λοξός για να επιταχύνει την τοποθέτηση του container και ο οποίος ζυγίζει περίπου 10-12 τόνους, αλλά μπορεί να ζυγίζει περισσότερο από 20 τόνους και το οποίο συνυπάρχει μέσα στους υπολογισμούς.

Οι κινήσεις ανύψωσης, τρόλεϊ, μπούμας και gantry οδηγούνται συνήθως από κινητήρες και drivers AC με AFE που εξαλείφει τα αρμονικά προβλήματα και επιτρέπει την υπερβολική ενέργεια να επιστρέψει πίσω στο δίκτυο. Οι ταχύτητες ανύψωσης και κατεβάσματος μπορούν να ρυθμιστούν αυτόματα ανάλογα με το βάρος του φορτίου.

### 2.3.1 Κύκλος φορτίου

Όταν γίνεται ο χειρισμός ενός εμπορευματοκιβωτίου, ο κύκλος ολοκληρώνεται σε έξι βασικά βήματα: ανύψωση, τρόλεϊ, κατέβασμα και αντίστροφα. Ο κύκλος ολοκληρώνεται σε περίπου δύο λεπτά, ανάλογα με τον γερανό και τις συνθήκες. Κατά τη διάρκεια ενός κύκλου η ζήτηση ισχύος μεταβάλλεται με υψηλές κορυφές, κυρίως κατά τη διάρκεια της ανύψωσης. Ένα παράδειγμα για την ζήτηση ισχύος σε έναν ονομαστικό κύκλο παρουσιάζεται στο Σχέδιο 2 . Κατά τη μείωση, οι γερανοί STS μπορούν να αναγεννήσουν έως και το 90% της ενέργειας ανύψωσης. Εάν αυτή η ενέργεια δεν χρησιμοποιηθεί ή αποθηκευτεί, αποστέλλεται πίσω στο δίκτυο, προκαλώντας διαταραχές σε αυτήν.

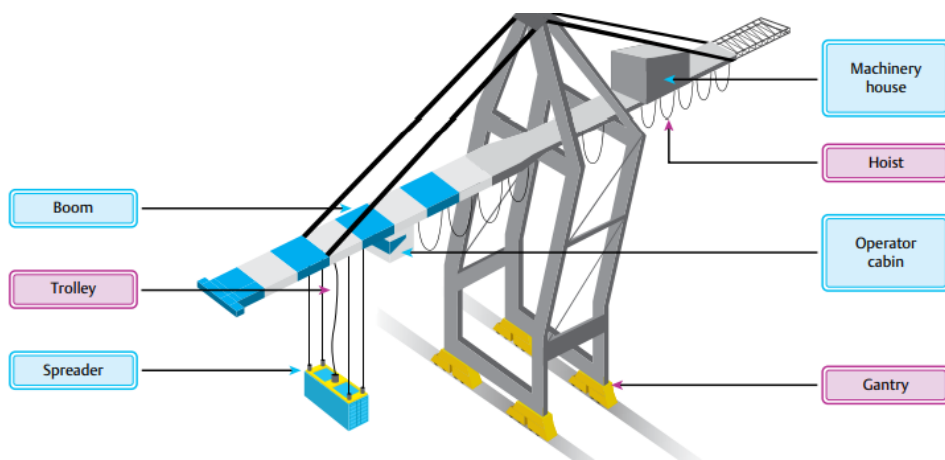
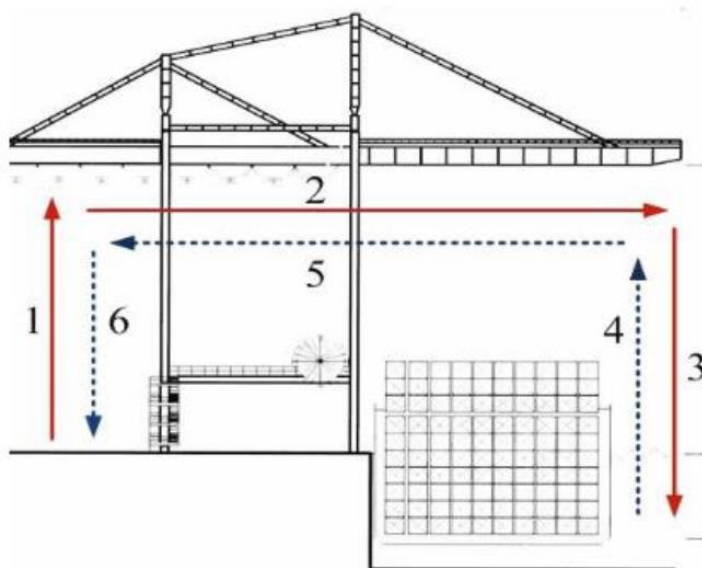


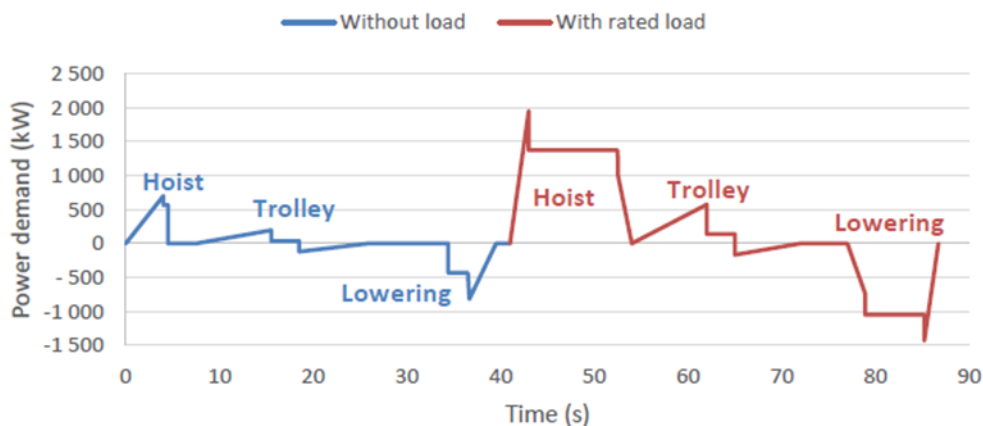
Figure 6. Χαρακτηριστικά ενός γερανού STS

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://www.nidec-netherlands.nl/media/2928-an-introductory-guide-to-port-cranes-and-the-application-of-variable-speed-drives-iss1x-0704-0005-01x.pdf>



Σχέδιο 1. Βήματα κύκλου ενός STS ΓΕΡΑΝΟΥ

Πηγή: PARISE AND HONORATI



Σχέδιο 2. Ζήτηση ισχύος κατα τον κύκλο φορτίου ενός STS γερανού.

(Πηγή: MITSUI E&S VIA YILPORT)

## 2.4 Αρχιτεκτονική γερανών RTG

Οι Μηχανοκίνητοι γερανοί RTG είναι ένας κοινός τύπος γερανού που χρησιμοποιείται για το χειρισμό και τη στοίβα των εμπορευματοκιβωτίων. Έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να κινούνται ελεύθερα γύρω από τον τερματικό σταθμό, καθώς δεν είναι τοποθετημένοι σε ράγες. Οι γερανοί RTG τροφοδοτούνται από κινητήρες ντίζελ, οι οποίοι τροφοδοτούν μια ηλεκτρική γεννήτρια και κατά συνέπεια αποτελούν σημαντική πηγή ρύπανσης, που συχνά αντιπροσωπεύουν τις μισές εκπομπές των τερματικών σταθμών εμπορευματοκιβωτίων. Η απόδοση καυσίμου των γερανών ντίζελ δεν είναι πολύ υψηλή, καθώς η κινητική ενέργεια συνήθως διαχέεται σε αντιστάσεις για να φρενάρει τα container κατά το χαμήλωμα. Επιπλέον, οι κινητήρες σε συμβατικούς γεραμούς RTG έχουν σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζουν εμπορευματοκιβώτια βάρους έως 40 τόνους. Η Μέγιστη ζήτηση ισχύος κατά την ανύψωση ενός container φτάνει από τα 550 Kw μέχρι και τα 1.2 MW. Έτσι, ο κινητήρας πρέπει να είναι σχεδιασμένος ώστε να παρέχει τέτοια ισχύ, ώστε να διατηρείται η σταθερότητα κατά τη διάρκεια των κορυφών ισχύος. Ωστόσο τα συμβατικά εμπορευματοκιβώτια λιμένων συνήθως έχουν μικρότερο βάρος όπου η ανύψωση παίρνει λιγότερο από το 20% του συνολικού χρόνου λειτουργίας του γερανού και οι αιχμές ισχύος συνήθως διαρκούν όχι περισσότερο από 2 δευτερόλεπτα.

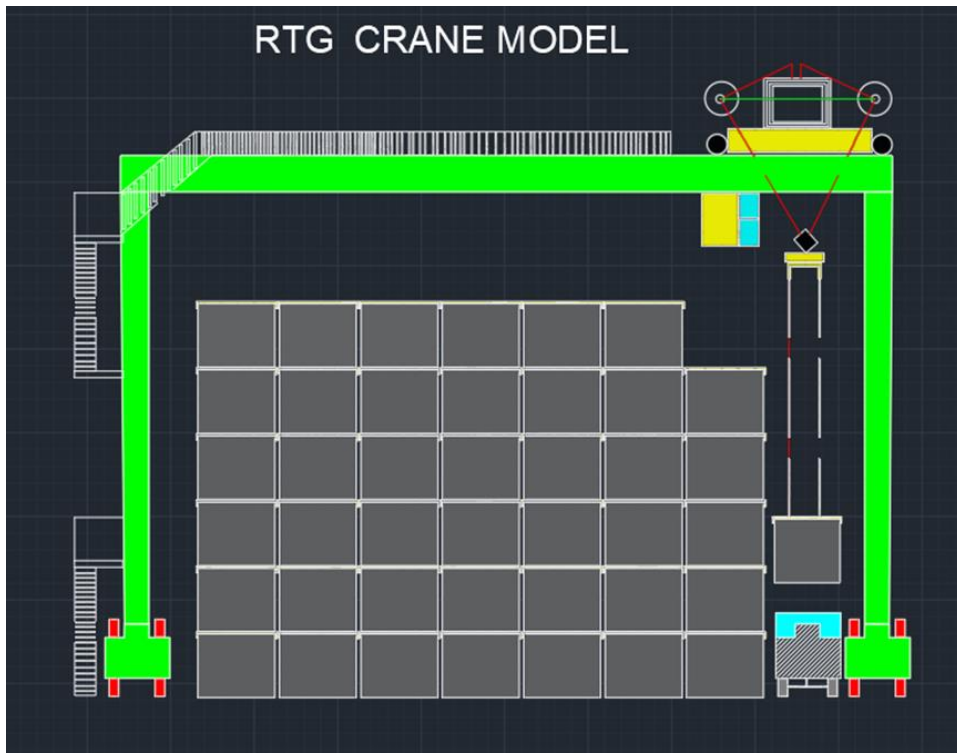
Αυτό σημαίνει ότι οι κινητήρες ντίζελ στους γερανούς RTG είναι υπερβολικά μεγάλοι και σχεδόν πάντα λειτουργούν με μη αποδοτικό τρόπο. Οι γερανοί RTG μπορούν να μειώσουν σημαντικά τις εκπομπές και το κόστος συντήρησής τους εάν είναι συνδεδεμένοι στο ηλεκτρικό δίκτυο και χρησιμοποιώντας βοηθητικούς κινητήρες ντίζελ μόνο όταν δεν είναι δυνατόν να διατηρηθεί ο γερανός συνδεδεμένος στο δίκτυο. Η ηλεκτρική σύνδεση επιτυγχάνεται συνήθως χρησιμοποιώντας μια μπάρα διαύλου (ζυγός) που βρίσκεται δίπλα στον γερανό ή μέσω ενός καλωδίου και αυτοί οι γερανοί συχνά ονομάζονται ως e-RTG. Άλλοι τρόποι μείωσης των εκπομπών RTG είναι η χρήση ενός υβριδικού συστήματος που αποτελείται από κάποια αποθηκευτική ενέργεια που να ταιριάζει με τις απαιτήσεις του γερανού και αυτό είναι ένα σενάριο που θα αναλυθεί στις παρακάτω ενότητες. Άλλος τρόπος είναι η εγκατάσταση πιο αποδοτικών κινητήρων όπως του μόνιμου μαγνήτη.



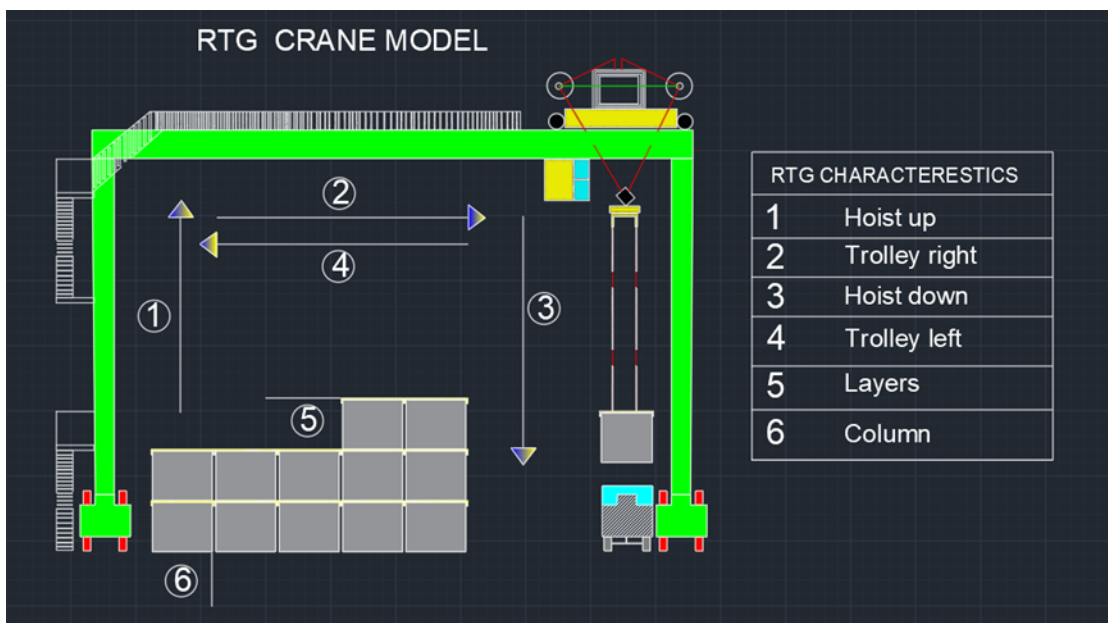
Figure 7. Χαρακτηριστικά ενός RTG γερανού.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://www.nidec-netherlands.nl/media/2928-an-introductory-guide-to-port-cranes-and-the-application-of-variable-speed-drives-iss1x-0704-0005-01x.pdf>





Σχέδιο 3. Πρόσωση RTG γερανού σχεδιασμένο στο AutoCAD 2021



Σχέδιο 4. Βήματα κύκλου ενός RTG γερανού σχεδιασμένο στο AutoCAD 2021

Πίνακας 3. Τα χαρακτηριστικά ενός RTG γερανού

Χαρακτηριστικά	Τιμή	Μονάδα
Gantry span	(7 wide + lane) 26.5m	m
Lifting height	(1 over 6) 21m	m
Lifting capacity	40	t
Spreader mass	10	t
Hoist motor power	2x96=192	kw
trolley motor power	4x7,5 =30	kw
gantry motor power	4x38=152	kw
Hoist speed (full load)	26	m/min
Hoist speed ( no load)	52	m/min
Hoist acceleration/ deceleration (full load)	2	sec
Hoist acceleration/ deceleration (no load)	4	sec
Trolley speed	70	m/min
Trolley acceleration/ deceleration	4	sec
Gantry speed (no load)	50	m/min
Gantry acceleration/ deceleration	8	sec

#### 2.4.1 Κύκλος φορτίου

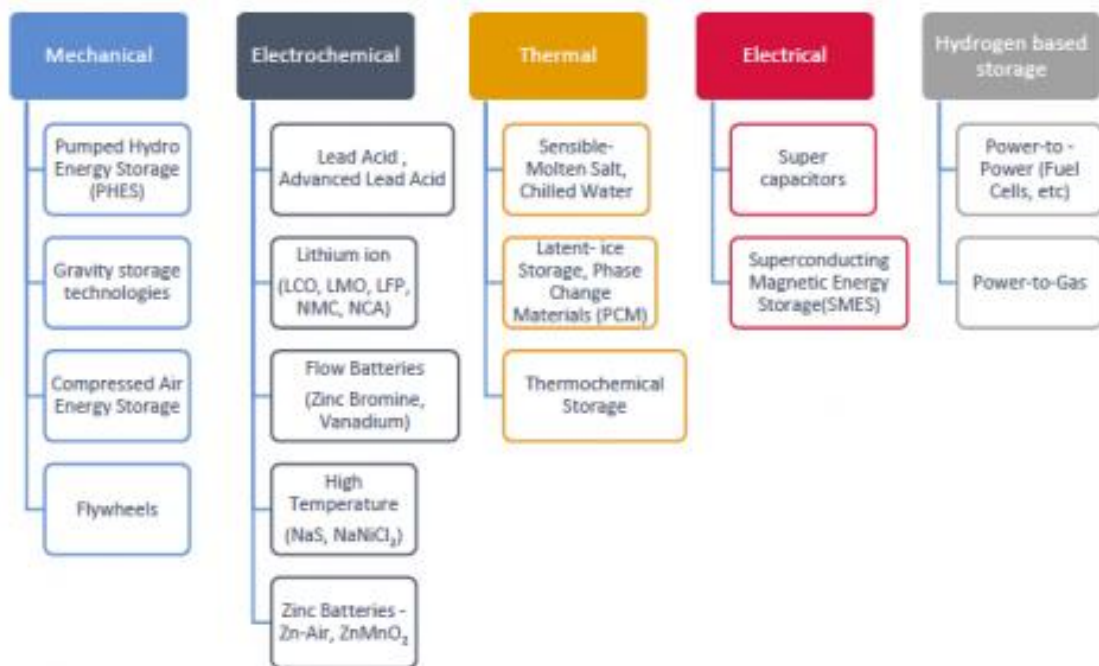
Όσο για την ολοκλήρωση ενός κύκλου είναι ίδια με αυτήν των γερανών STS απλά με μόνη διαφορά ότι η φόρτωση και εκφόρτωση γίνεται στον πράυλιο χώρο διαλογής. Για ασφαλή λειτουργία, τα RTG εγκαθίστανται με κουμπιά έκτακτης ανάγκης και διάφορα συστήματα ασφαλείας όπως αισθητήρες για την ανίχνευση:

- Υπερφόρτιση
- Υπερβολική ταχύτητα ανύψωσης
- Υπερβολική ταχύτητα ντίζελ
- Υπερθέρμανση νερού
- Χαμηλή πίεση λαδιού
- Ταχύτητα ανέμου

## Κεφάλαιο 3 Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας

Η αποτελεσματική αποθήκευση ενέργειας είναι ένας θεμελιώδης πυλώνας της ενεργειακής μετάβασης που επιτρέπει την ευέλικτη παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και εγγυάται την ενσωμάτωσή της στο δίκτυο. Η αποθήκευση ενέργειας, εκτός από την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, επιφέρει εξοικονόμηση απόδοσης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και να μετατραπεί σε άλλα είδη ενέργειας.

Figure 8. Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας



ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://etn.news/energy-storage/classification-of-energy-storage-technologies-an-overview?fbclid=IwAR3CKU2IqGfzxnSQzqrqg9jfnQUybUKPcspkPI-J47pvX11AFQAMG1qQRH0>

Όπως φαίνεται και απο το παραπάνω εικονογράφημα τα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας ταξινομούνται ως:

**Mechanical:** PHES, GES, CAES, FESS

**Electrochemical:** BESS

**Thermal:** TESS, MSES

**Electromagnetic:** SCES, SMES

**Chemical:** HESS, Synthetic Natural Gas

### 3.1 Battery Li ion storage system

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταρίας έχουν αποκτήσει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την εξυπηρέτηση δικτύου σε διάφορες εφαρμογές. Συγκεκριμένα, έχουν αναπτυχθεί συστήματα που βασίζονται σε μπαταρίες ιόντων λιθίου.

#### 3.1.2 Γενικά Χαρακτηριστικά

Οι μπαταρίες Ιόντων Λιθίου (Li-ion) αποτελούνται από κελιά (cells) στα οποία χρησιμοποιούνται συστατικά που περιέχουν λίθιο ως υλικό ανόδου και καθόδου. Καθώς μία τέτοια μπαταρία λειτουργεί τα ιόντα λιθίου (Li+) ανταλλάσσονται μεταξύ του θετικού και του αρνητικού ηλεκτροδίου. Κατά τη διαδικασία φόρτισης ή εκφόρτισης, τα ιόντα λιθίου εισέρχονται ή εξάγονται από τον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των ατομικών επιπέδων και των ενεργών στοιχείων. Τα κελιά Li-ion κατασκευάζονται σε μη φορτισμένη κατάσταση κι έτσι πρέπει να φορτιστούν πριν από τη χρήση τους. Τα κελιά Li-ion φορτίζονται τυπικά είτε χρησιμοποιώντας φόρτιση σταθερού ρεύματος (Constant Current- CC), είτε χρησιμοποιώντας φόρτιση η οποία αλλάζει από φόρτιση σταθερού ρεύματος σε φόρτιση σταθερής τάσης (Constant Current-Constant Voltage- CCCV). Αυτό το σύστημα φόρτισης επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης του κυκλώματος διαχείρισης της μπαταρίας.

Τα κελιά Li-ion μπορούν να υποβαθμιστούν ανεπανόρθωτα από την υπερφόρτιση ή την υπερ-εκφόρτιση, και μπορούν να εκλύσουν αέρια αν υπερφορτιστούν. Γι αυτό το λόγο, οι μπαταρίες συνήθως χρησιμοποιούν ένα σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας το BMS (Battery Management System) έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία και να αποφευχθεί τυχόν φαινόμενο υπερφόρτισης. Αυτό το σύστημα μπορεί να προσφέρει και επιπλέον λειτουργίες, όπως επιτήρηση της κατάστασης φόρτισης (State Of Charge-SOC) και επιτήρηση της θερμοκρασίας.

### 3.1.3 Χαρακτηριστικά υλικών σε μπαταρίες Li-ion

- ❖ Μεγάλη τιμή ελεύθερης ενέργειας κατά την αντίδραση με λίθιο
- ❖ Μπορεί να ενσωματώσει μεγάλες ποσότητες λιθίου
- ❖ Μπορεί να ενσωματώσει αντιστρεπτά λίθιο χωρίς να υποστεί αλλαγές στη δομή του
- ❖ Μεγάλος βαθμός διάχυσης ιόντων λιθίου
- ❖ Καλή αγωγιμότητα ηλεκτρονίων
- ❖ Αδιάλυτο στον ηλεκτρολύτη
- ❖ Σύνθεση χαμηλού κόστους

#### **Πλεονεκτήματα:**

- Σφραγισμένα κελιά, δεν απαιτείται συντήρηση
- Μεγάλη διάρκεια ενός κύκλου λειτουργίας
- Μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Μικρός βαθμός αυτό-εκφόρτισης
- Δυνατότητα γρήγορης φόρτισης
- Υψηλός βαθμός και υψηλή ισχύς εκφόρτισης
- Μεγάλη απόδοση φορτίου και ενέργειας
- Μεγάλη ειδική ενέργεια και πυκνότητα ενέργειας
- Δεν έχουν φαινόμενο μνήμης

### **Μειονεκτήματα:**

- Μέτριο αρχικό κόστος
- Υποβιβασμός τάσης σε υψηλές θερμοκρασίες
- Ανάγκη για κύκλωμα προστασίας
- Απώλεια χωρητικότητας και έκλυση θερμότητας όταν υπερφορτίζεται
- Έκλυση αερίων και θερμότητας όταν υποστεί κάποιο μηχανικό χτύπημα
- Τα κελιά κυλινδρικού σχήματος προσφέρουν χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας από τα αντίστοιχα τύπου NiCd ή NiMH

### **3.1.4 Προδιαγραφές κατά Χωρητικότητα & Τύπος**

Για να δούμε τις προδιαγραφές μίας μπαταρίας λιθίου ιόντων επιλέξαμε το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με εμπορευματοκιβώτια της Kokam (KCE) που χρησιμοποιείται για διάφορες εφαρμογές όπως:

- την μείωση αιχμής (Peak Shaving)
- την ρύθμιση συχνότητας,
- την ενσωμάτωση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας,
- τα μικροδίκτυα
- το UPS.

Μια μπαταρία λιθίου ιόντων μπορεί να αποθηκεύσει 250kWh-5.4MWh ενέργειας σε μεταφερόμενα container ISO 20ft / 40ft / 53ft. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να αποφορτιστεί με υψηλό ρυθμό C. και χρησιμοποιώντας κυψέλες υψηλής ενέργειας, μπορεί επίσης να προσαρμοστεί για να αποθηκεύει πολύ μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε περιορισμένο χώρο. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με container αποτελείται από τις μονάδες μπαταριών και τις βάσεις του σε μια γρήγορη και εύκολη συνδεσιμότητα σειριακή ή και παράλληλη. Η επιλογή παράλληλης σύνδεσης επιτρέπει στον πελάτη να αυξήσει εύκολα την ενεργειακή χωρητικότητα διατηρώντας ταυτόχρονα την ίδια τάση συστήματος. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με container είναι η βέλτιστη λύση για τη διατήρηση σταθερής τάσης και παρέχει επίσης εφεδρικές δυνατότητες ισχύος για πολλές εφαρμογές, όπως μετάδοση ισχύος, παραγωγή ηλεκτρισμού κ.λπ.

Πίνακας 4. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά μπαταριών Li-ion ανα μοντέλο τύπου κυψέλης

Τύπος	10~20Ah	20~50Ah	50~100Ah	100Ah~
Μοντέλο	SLPB75106205	SLPB120216216HR2	SLPB120255255	SLPB160460330
Ονομαστική χωρητικότητα (Ah)	16	46	75	240
Πυκνότητα ενέργειας (Wh / kg)	179	150	182	198
Ρεύμα εκφόρτισης	3 dc / 5 peak	8 dc / 12 peak	3 dc / 5 peak	2dc / 3 peak
Εσωτερική αντίσταση (mΩ)/Max.	3.80	0.50	0.65	0.50
Βάρος (g)/Max.	175	1,145	1,535	4,510

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ : <https://kokam.com/en/product/system/ess-solution>

Πίνακας 5.Επιδόσεις και χαρακτηριστικά μπαταριών Li-ion ESS High Power Type

Χαρακτηριστικά	Εύρος Επίδοσης	Παρατηρήσεις
Διαμόρφωση συστήματος	2 Banks	Incl. 1EA BCP per Bank
Bank Configuration	13 Racks (2C5R)	Παράλληλη σύνδεση
Εγκατεστημένη ενέργεια	3,253kWh	
Ονομαστική τάση	736Vdc	
Εύρος τάσης λειτουργίας	660 ~ 826Vdc	
Μέγιστη Ισχύς φόρτισης	5,855kW (1.8P)	1 κύκλος
Μέγιστη εκφόρτιση κορυφής	11,711kW (3.6P)	@ <10 sec, >SOC 50%
Μέγιστη ισχύς εκφόρτισης	5,855kW (1.8P)	1 κύκλος
Απόδοση DC μετ 'επιστροφής	>95%	@ 1.0P, BOL
Θερμοκρασία λειτουργίας	18~ 28°C	
Container Type	40ft	

## 3.2 Ultracapacitors – Υπερπυκνωτές

Οι Ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλής στρώσης, γνωστοί και ως υπερπυκνωτές, είναι ηλεκτροχημικοί πυκνωτές που έχουν ασυνήθιστα υψηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με κοινούς πυκνωτές, καθώς και αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από έναν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή υψηλής χωρητικότητας. Το φαινόμενο ηλεκτρικού πυκνωτή διπλής στρώσης παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1957 από μηχανικούς της General Electric.

### 3.2.1 Χαρακτηριστικά υπερπυκνωτή

Το κύτταρο υπερπυκνωτή (Supercapacitor Cell) είναι η βασική μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μέσα σε ένα σύστημα υπερκαταναλωτή, το οποίο περιέχει ένα συγκρότημα ηλεκτροδίων, ηλεκτρολύτη, διαχωριστή και συλλεκτών ρεύματος. Είναι μια ομάδα κυττάρων που συνδέονται μεταξύ τους σε μια σειρά ή και παράλληλα με διαμόρφωση. Διαχωρίζονται σε συσκευές αποθήκευσης ενέργειας που αποτελούνται από έναν ή περισσότερους υπερπυκνωτές, κυψέλες ή μονάδες ηλεκτρικά συνδεδεμένες. Διαθέτουν κύκλωμα παρακολούθησης που παρέχει πληροφορίες σε έναν υπερπυκνωτή του συστήματος.

### 3.2.2 Σύστημα διαχείρισης πυκνωτών.

Το σύστημα διαχείρισης πυκνωτών είναι ένα σύστημα εποπτείας που περιέχει έλεγχο, παρακολούθηση, εξισορρόπηση και προστατευτικές λειτουργίες του συστήματος υπερπυκνωτή. Παρακολουθεί και διαχειρίζεται την κατάστασή του, υπολογίζει δευτερεύον δεδομένα, αναφέρει αυτά τα δεδομένα και ελέγχει το περιβάλλον του για να μην επηρεάσει την ασφάλεια, την απόδοση του και διάρκεια ζωής εξισορρόπησης των κυττάρων.



### 3.2.3 Τα βασικά χαρακτηριστικά των υπερπυκνωτών

- Χαμηλή τάση εξόδου (2,7V ανά κυψέλη) και επομένως, σειρά σύνδεσης κυττάρων με εξισορρόπηση είναι απαραίτητη.
- Υψηλή πυκνότητα ισχύος (2kW/kg) αλλά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα.
- Σχεδόν απεριόριστοι κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης και μεγάλη διάρκεια ζωής δέκα ετών.
- Υψηλή απόδοση εισόδου, άνω του 95% , αλλά και το ποσοστό αυτοεκφόρτισης είναι επίσης υψηλό (5% ανά ημέρα) σε σύγκριση με τις μπαταρίες.
- Η κατάσταση φόρτισης (SoC) είναι απλή στην παρακολούθηση μετρώντας την τάση.
- Εύκολη εγκατάσταση, συμπαγές μέγεθος και προσαρμοστικότητα σε δυσμενή περιβάλλοντα (ζεστό, κρύο και υγρό).

Ένα τυπικό καθεστώς λειτουργίας για μια τράπεζα υπερπυκνωτών είναι να επιτρέπεται η τάση να μεταβάλλεται κατά ένα εύρος 2:1, το οποίο επιτρέπει στο 75% της μέγιστης αποθηκευμένης ενέργειας να χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα εφαρμογής.

Συνήθως αποφεύγεται ένα μεγαλύτερο βάθος εκφόρτισης, καθώς οδηγεί σε πολύ υψηλά ρεύματα πυκνωτή για ένα δεδομένο επίπεδο ισχύος και θέτει ακραίες απαιτήσεις στη διασύνδεση μετατροπέα DC-DC.

### 3.2.4 Σύνδεση φορτισμένων ή μη φορτισμένων υπερπυκνωτών με σύνδεση DC

Δεν πρέπει ποτέ να συνδέσουμε τους υπερπυκνωτές ή τις στοίβες υπερπυκνωτών απευθείας σε ένα DC-bus ή άλλο εξοπλισμό εάν η διαφορά τάσης μεταξύ των δύο συστημάτων είναι μεγαλύτερη από 10%. Εάν η τάση είναι μεγαλύτερη από 10%, υπάρχει υψηλός κίνδυνος καύσης καλωδίων, ασφαλειών, επαφών, διακοπών ή άλλων ηλεκτρονικών συσκευών ισχύος. Για αυτό το λόγο πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κατάλληλους προ-φορτιστές και άλλες συσκευές για περιορισμό στις τρέχουσες τιμές εισροής για την προστασία των συσκευών μας.

#### **Πλεονεκτήματα:**

- Προσφέρουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας και υψηλή πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με τον κοινό πυκνωτή.
- Υψηλή χωρητικότητα (Από 1 mF έως > 10,000F).
- Δυνατότητα γρήγορης φόρτισης.
- Ανώτερη απόδοση χαμηλής θερμοκρασίας (από -40°C έως 70°C).
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (περίπου 10 έως 15 χρόνια σε σύγκριση με 5-10 χρόνια μπαταρίας ιόντων λιθίου).
- Προσφέρει σχεδόν απεριόριστη διάρκεια ζωής κύκλου και μπορεί να κυκλοφορεί εκατομμύρια φορές.
- Υψηλότερη αξιοπιστία απόδοσης.
- Μειώνει το μέγεθος της μπαταρίας, το βάρος και το διαδοχικό κόστος.
- Πληρούν τα περιβαλλοντικά πρότυπα. Ως εκ τούτου, είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

#### **Μειονεκτήματα:**

- Έχουν υψηλότερο ποσοστό αυτοεκφόρτισης. Αυτό είναι πολύ υψηλό σε σύγκριση με την μπαταρία.
- Τα μεμονωμένα κελιά έχουν χαμηλές τάσεις. Ως εκ τούτου απαιτούνται σειριακές συνδέσεις για την επίτευξη υψηλότερων τάσεων.
- Η ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται ανά μονάδα βάρους είναι σημαντικά χαμηλότερη σε σύγκριση με την ηλεκτροχημική μπαταρία. Αυτό είναι περίπου 3 έως 5 Wh / Kg για έναν υπερ-πυκνωτή από 30 έως 40 Wh / Kg μιας μπαταρίας.
- Προσφέρει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με την μπαταρία. Αυτό είναι περίπου (1/5) έως (1/10) η ενέργεια της μπαταρίας.
- Δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυκλώματα AC και υψηλότερης συχνότητας.

Πίνακας 6. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά Super Capacitor

Προδιαγραφές	Εύρος Επίδοσης
Ονομαστική Τάση (V)	3.0 V
Χωρητική Ισχύς (F)	3000 F
ESR DC, Rated	0.27 mΩ
Χρήσιμη ειδική ισχύς	7.8 kW/kg
Ειδική Ενέργεια	7.4 Wh/kg
Προδιαγραφές δόνησης	ISO 16750-3, Table 12
Προδιαγραφές Αποπηξίας	IEC 60068-2-27, -29
Εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-40°C to 65°C
Χαρακτηριστικά ζωής	Επίδοση
DC τιμή ζωής σε υψηλή θερμοκρασία	1500 hours
Αλλαγή χωρητικότητας	20%
ESR Change	100%
Προβλεπόμενη διάρκεια ζωής DC στους 25 °C	10 Χρόνια
Αλλαγή χωρητικότητας	20%
ESR Change	100%
Προβλεπόμενη διάρκεια ζωής στους 25 °C	1.000.000 κύκλοι
Αλλαγή χωρητικότητας	20%
ESR Change	100%

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/cells/>

Πίνακας 7. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά Super Capacitor ESS High Power Type

Μοντέλο (Τύπος)	SKELGRID 520	SKELGRID 1500
Μέγιστο Ρεύμα (A)	1400 A	5000 A
Ονομαστική Ισχύς	75 kW	380 kW
Ονομαστικό Ρεύμα	250 A	1250 A
Ονομαστική Τάση	612 V	612 V
Απόδοση στην Μέγιστη ισχύ	92.4%	74.3%
Απόδοση στην ονομαστική ισχύ	98.6%	93.1%
MODULES IN SERIES	6	6
MODULES IN TOTAL	6	6
Κύτταρα σε Σειρά	216	216
Χωρητικότητα	14.8 F	14.8 F

### 3.3 Flywheel energy storage systems – FESS

Ο σφόνδυλος είναι μια μηχανική συσκευή που έχει σχεδιαστεί ειδικά για την αποθήκευση περιστροφικής ενέργειας (κινητική ενέργεια). Είναι ανάλογο με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής και της μάζας του. Ένας σφόνδυλος ως βαρύς τροχός απαιτεί αρκετές δυνάμεις για να περιστραφεί στον άξονά του. Αντιστέκεται στις αλλαγές στην ταχύτητα περιστροφής λόγω της ροπής αδράνειας του. Αλλάζοντας την αποθηκευμένη ενέργεια στο σφόνδυλο, η ταχύτητα περιστροφής του πρέπει να αυξηθεί ή να μειωθεί, δηλαδή συνεχίζει να περιστρέφεται μέχρι να ασκηθεί μεγάλη δύναμη. Μια μεγάλη ποσότητα κινητικής ενέργειας διατηρείται όταν περιστρέφεται ο σφόνδυλος. Αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται αργότερα για την εκκίνηση του κινητήρα ή την ταχύτητα. Ο σφόνδυλος είναι συνήθως κατασκευασμένος από χάλυβα που περιστρέφεται σε συμβατικά ρουλεμάν. Οι σφόνδυλοι υψηλής ενεργειακής πυκνότητας είναι κατασκευασμένοι από σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα και χρησιμοποιούν μαγνητικά ρουλεμάν. Τέτοιος σφόνδυλος περιστρέφεται με ταχύτητα έως και 60.000 rpm (1 kHz).

#### 3.3.1 Κύρια Μέρη Συστημάτων FESS

- ❖ **Η Ηλεκτρική Μηχανή** όπου πρόκειται για το ηλεκτρικό μέρος του συστήματος που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική-περιστροφική ενέργεια του σφονδύλου, όταν η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας και αντιστρόφως ανάλογα όταν αυτή λειτουργεί ως γεννήτρια. Θεωρητικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοσδήποτε τύπος μηχανής. Πρακτικά όμως στους μεγάλους και αργούς σφονδύλους χρησιμοποιούνται οι ασύγχρονες επαγωγικές μηχανές, ενώ στους μικρότερους και ταχύτερους είναι εκείνες του μόνιμου μαγνήτη.
- ❖ **Περιστρεφόμενη Μάζα** όπου ο σφόνδυλος συνδέεται με το δρομέα της ηλεκτρικής μηχανής και θεωρείται ουσιαστικά η συνέχεια του.
- ❖ **Ρουλεμάν** τα οποία χρησιμοποιούνται για την στήριξη των αξόνων του δρομέα της μηχανής και του σφονδύλου πετυχένοντας την ελαχιστοποίηση των τριβών.

- ❖ **Θάλαμος Κενού** όπου ο σφόνδυλος μαζί με τα μαγνητικά ρουλεμάν τοποθετούνται σε ένα θάλαμο κενού αέρα για την μεγαλύτερη δυνατή μείωση των τριβών. Αποτέλεσμα αυτής της κατασκευής είναι η περιστροφή του σφονδύλου σε εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες, οι οποίες πρακτικά αγγίζουν τις 20.000 με 50.000 rpm.
- ❖ **Ηλεκτρονικά Ισχύος** τα οποία είναι οι διακοπτικές διατάξεις ελέγχου τις ροής της Ισχύος οι οποίες αποτελούνται από δύο τριφασικούς μετατροπείς διακοπτικού τύπου των οποίων οι ρόλοι: ανόρθωση-αντιστροφή εναλλάσσονται ανάλογα με τη ροή της ισχύος φόρτισης ή εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης. Οι τριφασικές γέφυρες αυτών των μετατροπέων αποτελούνται από το συνδυασμό IGBT's και διόδων, ενώ ο έλεγχος των διακοπών (ON-OFF) γίνεται με διαμόρφωση εύρους παλμών μέσω ημιτονοειδούς διαμόρφωσης PWM.
- ❖ **Διάταξη Ελέγχου:** Πρόκειται για τη διάταξη που καθορίζει τη ροή της ισχύος, δηλαδή τη φόρτιση ή την εκφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης, στέλνοντας τα κατάλληλα σήματα ελέγχου στους μετατροπείς, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο δίκτυο.

### **Πλεονεκτήματα:**

Οι σφόνδυλοι είναι σχετικά απλή τεχνολογία με πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.

- Όσον αφορά το αρχικό κόστος και τη συνεχή συντήρηση, λειτουργούν φθηνότερα.
- Διαρκούν περίπου 10 φορές περισσότερο.
- Είναι φιλικό προς το περιβάλλον (δεν παράγουν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και δεν περιέχουν επικίνδυνες χημικές ουσίες που προκαλούν ρύπανση).
- Λειτουργούν σχεδόν σε οποιοδήποτε κλίμα και είναι πολύ γρήγοροι για να φτάσουν στην ταχύτητα φόρτισης.
- Είναι επίσης εξαιρετικά αποτελεσματικοί (80% ή περισσότερο).
- Καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο από τις μπαταρίες ή άλλες μορφές αποθήκευσης ενέργειας.
- Η δύναμη και η ενέργεια είναι σχεδόν ανεξάρτητες

### **Μειονεκτήματα:**

- ❖ Πολυπλοκότητα ανθεκτικών και χαμηλών ρουλεμάν
- ❖ Μηχανικά όρια πίεσης και κόπωσης
- ❖ Πιθανοί κίνδυνοι, τρόποι αποτυχίας
- ❖ Σχετικά υψηλές εσωτερικές απώλειες (όταν οι κύκλοι φόρτισης – εκφόρτισης δεν είναι συνεχείς)
- ❖ Σύντομοι χρόνοι εκφόρτισης

*Πίνακας 8. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά FES*

	<b>EnWheel®22</b>	<b>EnWheel®60</b>
<b>Μέγιστη ισχύς</b>	<b>22 kVA</b>	<b>80 kVA</b>
<b>Χρήσιμη Χωρητικότητα</b>	<b>3,6 kWh</b>	<b>3,6 kWh</b>
<b>Χρόνος φόρτισης</b>	<b>15 min</b>	<b>260 sec</b>
<b>Χρόνος Εκφόρτισης</b>	<b>15 min</b>	<b>260 sec</b>

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://www.Stornetic.com/our-technology/enwheel>

*Πίνακας 9. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά FESS*

	<b>DuraStor® 600/100</b>	<b>DuraStor® 1000</b>
<b>Μέγιστη ισχύς</b>	<b>600 kW</b>	<b>1200 kW</b>
<b>Ονομαστική ισχύς</b>	<b>420 kW</b>	<b>1000 kW</b>
<b>Χωρητικότητα</b>	<b>100 kWh</b>	<b>57 kWh</b>
<b>Σφόνδυλοι</b>	<b>28 x EnWheel® 22</b>	<b>16 x EnWheel® 60</b>

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://www.stornetic.com/our-technology/durastor>

### 3.4 Αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα – Compressed air energy storage - CAES

Το CAES είναι μία από τις τεχνολογίες αποθήκευσης δικτύου εμπορικής κλίμακας, όπου στόχος είναι η αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ενέργειας και η εξαγωγή της για χρήση αργότερα σε περιόδους υψηλής ενεργειακής ζήτησης. Επιπλέον, η τεχνική CAES περιλαμβάνει την αποθήκευση ενός ρεύματος αέρα ως συμπιεσμένο αέριο. Για να επιτευχθεί αυτό, ο ατμοσφαιρικός αέρας διοχετεύεται σε μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης ή σε σπήλαια που βρίσκονται υπόγεια ή βαθιά κάτω από το νερό. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας μηχανισμό βαλβίδας χρησιμοποιώντας κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας (όπως φυσικό αέριο) έτσι ώστε ο εξαναγκασμένος αέρας να ωθείται μέσα στις δεξαμενές αλλά να μην μπορεί να εξέλθει από την ίδια δίοδο. Σε αυτή την τεχνολογία ο αέρας λαμβάνεται από την ατμόσφαιρα και στη συνέχεια συμπιέζεται με τη χρήση συμπιεστών. Ο αέρας αργότερα αποθηκεύεται με τη μορφή πεπιεσμένου αέρα και όταν απαιτείται ενέργεια κατά τις περιόδους αιχμής χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, ο αέρας τοποθετείται σε έναν καυστήρα και σε έναν αεριοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο στόχος του CAES, όπως και των περισσότερων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας (π.χ. μπαταρίες, υπερκωνωτές κ.λπ.) είναι να παρέχει ένα μέσο με το οποίο η διαλείπουσα ανανεώσιμη ενέργεια να μπορεί να συνδυαστεί με μονάδες ορυκτών καυσίμων για την κάλυψη των απαιτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας. Λόγω της κυμαινόμενης και τυχαίας φύσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η ενσωμάτωσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο επιβάλλει πολλές τεχνικές προκλήσεις.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως η αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα, βοηθούν στην εξισορρόπηση του ηλεκτρικού φορτίου, προσθέτοντας έτσι ευελιξία στη λειτουργία του συστήματος και βοηθώντας στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκε η τεχνική CAES για την παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο δίκτυο. Όμως τον τελευταίο καιρό η τεχνολογία χρησιμοποιείται ως λύση αποθήκευσης για την αποθήκευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως ο άνεμος και η ηλιακή ενέργεια. Και για τις δύο αυτές πηγές οι έξοδοι τους μετατρέπονται πρώτα σε υψηλή πίεση που μπορούν να διοχετευτούν και να αποθηκευτούν σωστά σε δεξαμενές για μελλοντική χρήση.

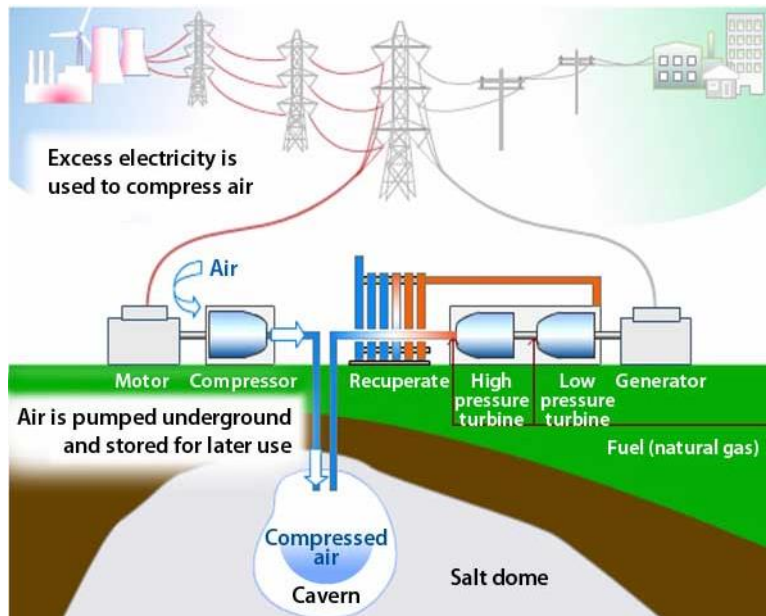


Figure 9. Αποθήκευση ενέργειας συμπιεσμένου αέρα ( CAES )

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://www.powermag.com/revived-energy-storage-technology-offers-major-grid-benefits/>

### Πλεονεκτήματα:

Τα εργοστάσια CAES που έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες εφαρμογές μπορούν να παρέχουν οικονομικό όφελος στους ιδιοκτήτες ή και χειριστές εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας. Τα οφέλη από τη χρήση μιας εγκατάστασης CAES για την υποστήριξη της ενέργειας περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Αύξηση της χρήσης εγκαταστάσεων παραγωγής κατά τις ώρες εκτός αιχμής
- Παρέχει ενδιάμεση και μέγιστη ισχύ κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- Αποθήκευση της νυχτερινής αιολικής ενέργειας για παράδοση κατά τη διάρκεια της ημέρας σε υψηλότερες τιμές.
- Παροχή ρύθμισης συχνότητας
- Παρέχει υποστήριξη VAR (π.χ., λειτουργώντας τη μονάδα CAES για την παροχή άεργου ισχύος στη λειτουργία συγχρονισμένου συμπυκνωτή).



- Ένα εργοστάσιο CAES μπορεί να λειτουργεί 24 ώρες την ημέρα στη λειτουργία συγχρονισμένου συμπυκνωτή, καθώς δεν απαιτεί αέρα από τη δεξαμενή αποθήκευσης.
- Παροχή εκτός αιχμής.

### **Μειονεκτήματα:**

- Η υπόγεια γεωλογία θεωρείται πιθανότατα ως ζήτημα κινδύνου από επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, παρόλο που το πετρέλαιο και εταιρείες φυσικού αερίου αποθηκεύουν καύσιμα με βάση υδρογονάνθρακες σε παρόμοιες υπόγειες δεξαμενές για πάνω από 80 χρόνια.
- Η επιλογή του ιστότοπου είναι κάπως περιορισμένη, καθώς χρειάζεται την παρουσία ορυχείων, σπηλαίων και ορισμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί.
- Όπως συμβαίνει με οποιαδήποτε μετατροπή ενέργειας, ορισμένες απώλειες είναι αναπόφευκτες. Λιγότερη ενέργεια τελικά φτάνει στο πλέγμα εάν διέρχεται από το σύστημα CAES παρά σε παρόμοιο σύστημα χωρίς αποθήκευση.
- Η απαίτηση για επιπλέον θέρμανση στη διαδικασία επέκτασης είναι το πιο σημαντικό μειονέκτημα. Σύμφωνα με ορισμένες εκτιμήσεις, θα χρειαστεί 1 kWh φυσικού αερίου για κάθε 3 kWh που παράγεται από ένα σύστημα CAES.

*Πίνακας 10. Επιδόσεις και χαρακτηριστικά CAES*

<b>Μοντέλο</b>	<b>OGWBE355S (30)</b>	<b>OGWBE400S (40)</b>
<b>Πίεση</b>	30 bar	40 bar
<b>Χωρητικότητα</b>	40m <sup>3</sup> /min	40m <sup>3</sup> /min
<b>Ισχύς</b>	220+132kW	220+185kW
<b>Θόρυβος</b>	80dB	80dB
<b>Βάρος</b>	5000kg	5000kg

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://bjbeneair.com/product/30-40bar-oil-free-screw-air-compressor/>

## 3.5 Βαρυτική Ενέργεια (GES)

Καθώς ο κόσμος παράγει ολοένα και περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για τεχνολογίες που μπορούν να δεσμεύουν και να αποθηκεύουν ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και να την απελευθερώνουν γρήγορα όταν απαιτείται. Ένα από αυτά τα συστήματα είναι το gravity energy storage και όπως θα δούμε παρακάτω διαμορφώνεται σε διάφορες κατηγορίες.

### 3.5.1 Gravitricity Gravity-based Energy Storage

Τα συστήματα βαρυτικής ενέργειας χρησιμοποιούν διαμορφώσεις βάρους έως και 12.000 τόνων συνολικά σε έναν βαθύ άξονα, αναρτημένο από έναν αριθμό καλωδίων, καθένα από τα οποία εμπλέκεται με ένα ηλεκτρικό βαρούλκο ικανό να σηκώνει το μερίδιό του στο βάρος. Η ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται με τη μορφή δυναμικής ενέργειας με την αύξηση των βαρών. Στη συνέχεια, η ισχύς παράγεται χαμηλώνοντας τα βάρη για να ενεργοποιηθεί μια γεννήτρια. Η τεχνολογία έχει αποδειχθεί ότι φτάνει σε πλήρη ισχύ σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο και έχει προβλεπόμενη απόδοση πλήρους κλίμακας έως και 80%. Κάθε μονάδα μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει ισχύ αιχμής μεταξύ 1 και 20 MW, με διάρκεια εξόδου από 15 λεπτά έως οκτώ ώρες. Για παράδειγμα, ένα σύστημα 10 MW, 25 MWh θα μπορούσε να παρέχει πλήρη ισχύ (10 MW) για 2,5 ώρες ή 5 MW σε πέντε ώρες.



*Figure 10. Energy Vault's 75-meter-tall Commercial Demonstration Unit at night, in Arbedo-Castione*

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://www.wired.com/story/energy-vault-gravity-storage/>

### 3.5.2 Χαρακτηριστικά (GBES)

- 50 χρόνια διάρκεια ζωής χωρίς όριο κύκλου ή υποβάθμιση.
- Χρόνος απόκρισης από μηδέν στην πλήρη ισχύ σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο.
- Αποδοτικότητα έως 80%.
- Ευελιξία : μπορεί να λειτουργεί αργά σε χαμηλή ισχύ ή γρήγορα σε υψηλή ισχύ.
- Εύκολο στην κατασκευή κοντά σε δίκτυα.
- Κοστολόγιο: Κοστίζει λιγότερο σε σχέση με τις μπαταρίες Li-ion.

### 3.5.3 ARES (Advanced Rail Energy Storage System)

Στην Καλιφόρνια, μια εταιρεία με το όνομα ARES (Advanced Rail Energy Storage System) έχει εφαρμόσει ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας σε κλίμακα δικτύου που είναι σε θέση να παρέχει ισορροπία κοινής ωφέλειας όταν χρειάζεται. Το σύστημα χρησιμοποιεί αυτόνομα οχήματα που μοιάζουν με τρένο 300 τόνων σε σιδηροδρομική γραμμή. Όταν μια επιχείρηση ηλεκτρισμού έχει ανάγκη από ρεύμα, τα οχήματα που έχουν φτάσει σε ένα υψηλό σημείο ξεκινούν την κάθοδό τους. Οι κινητήρες τους στη συνέχεια γίνονται γεννήτριες ενέργειας και παράγουν ηλεκτρισμό κατά την κίνηση της κατηφόρας και μετά το φρενάρισμα. Οι καμπίνες έχουν πέτρινους λίθους μέσα τους, έτσι ώστε να είναι πιο βαριές και πιο γρήγορα κατά την κατηφόρα.



*Figure 11. ARES Technology*

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ: <https://www.railway.supply/en/ares-gravity-trains-may-solve-the-energy-storage-problem/>

Το σύστημα έχει ισχυρή απόδοση 78–80%, χωρίς απώλειες αποθήκευσης σε κατάσταση αναμονής δηλαδή χωρίς αυτοεκφόρτιση και προτεινόμενη διάρκεια ζωής του συστήματος 40 χρόνια.

### 3.5.4 PHES (Pumped Hydro Energy Storage)

Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδροηλεκτρικής ενέργειας (PHES) είναι ενός συγκεκριμένου τύπου υδροηλεκτρικών σταθμών που επιτρέπουν όχι μόνο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και την αποθήκευση της σε μια ανώτερη δεξαμενή με τη μορφή βαρύτητας δηλαδή την δυναμική ενέργεια του νερού. Κατά τις περιόδους με υψηλή ζήτηση, το νερό απελευθερώνεται μέσω των τουρμπινών σε χαμηλότερη δεξαμενή προκειμένου να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Σε περιόδους με χαμηλή ζήτηση, το νερό αντλείται πίσω από την κάτω δεξαμενή και αποθηκεύεται στην επάνω δεξαμενή.

### 3.5.5 Χαρακτηριστικά (PHES)

- Το PHES θεωρείται σήμερα μία από τις πιο οικονομικά αποδοτικές τεχνολογίες αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας διαθέσιμο, με απόδοση μετ' επιστροφής 75-85% και ανταγωνιστικό κόστος (800-1500 €/kW).
- Η τυπική ισχύς των μονάδων PHES κυμαίνεται περίπου από 20 έως 500 MW.
- Υψηλή απόδοση 80-90%
- Μεγάλη κλίμακα ενέργειας και χωρητικότητας αποθήκευσης
- Μεγάλη διάρκεια ζωής 40-60 χρόνια.
- χαμηλή αυτοεκφόρτιση 1-24 h.

Στο κεφάλαιο της βαρυτικής ενέργειας επισυνάπτεται και η υποβρύχια βαρυτική ενέργεια με τα συστήματα BEST και UGES και επειδή εν της λόγω εργασίας θα τα αναλύσουμε στις παρακάτω ενότητες.

### 3.6 Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων ενέργειας

Κατά συνέπεια, είναι χρήσιμο να αξιολογείται κάθε σύστημα αποθήκευσης κατά θεμελιώδη γνωρίσματα. Μερικά από αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να οριστούν ως εξής:

- ❖ **Χωρητικότητα και διάρκεια αποθήκευσης ενέργειας:** Αναφέρεται στην ποσότητα ενέργεια που μπορεί να αποθηκευτεί και τη διάρκεια που μπορεί να είναι η εν λόγω ενέργεια αποθηκευμένο.
- ❖ **Πυκνότητα ενέργειας/ισχύς :** Η ενεργειακή πυκνότητα ( $Wh/m^3$ ) είναι η ενέργεια αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου του συστήματος και η πυκνότητα ισχύος ( $W/m^3$ ) είναι την ισχύ εξόδου ανά μονάδα όγκου.
- ❖ **Διάρκεια ζωής :** Η διάρκεια ζωής, εάν η τεχνολογία αποθήκευσης, μετράται σε ένα από τα δύο έτη ή συνολικούς κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης.
- ❖ **Χρόνος φόρτισης/εκφόρτισης και απόκρισης:** Ο χρόνος που απαιτείται για τη φόρτιση ή να αποφορτιστεί πλήρως. Ο χρόνος απόκρισης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να ξεκινήσει η παροχή ονομαστική ισχύ εξόδου.
- ❖ **Κόστος κεφαλαίου:** Το αρχικό κόστος μιας τεχνολογίας αποθήκευσης, είτε ανά μονάδα εκφόρτισης ισχύος ή ανά μονάδα εκφόρτισης ενέργειας.

Είναι επομένως απαραίτητο να αναλυθούν κριτικά τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά (τεχνικά και οικονομικά) των συστημάτων αποθήκευσης προκειμένου να καθοριστούν κριτήρια σύγκρισης για την επιλογή στην καλύτερη τεχνολογία.

Παρακάτω οι πίνακες 11, 12, και 13, αναφέρουν όλα τα δεδομένα των ενεργειών που αναλύσαμε και θα συγκρίνουμε .

Πίνακας 11. Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων 1

Technology	Specific Energy Wh/kg (Wh/L)	Specific power W/kg (W/L)	daily self discharge rate (%)	service life (years)	Round trip efficiency (%)
PHES	0.5-1.5	0.1	0.1%	40-60	75-85
CAES	30-60	0.5-1.5	0.1%	20-40	71-85
FES	10-(30)	400-1500	100%	~15	90-95
SMES	10-(75)	500-2000	10-15%	20	>97
SCES	2.5-15	10000	5-40%	20	95
STES (TES) molten salt	80-120	10-(30)	0.5%	10-(20)	50-90
NaS	150-240	150-230	20%	10-(15)	75-90
VRB (VRFB)	10-(35)	100-166	0.2%	15	80
Zn Br	20-29	90-110	0.24%	8-(10)	70
Ni-Cd	50-75	150-300	0.2-0.6%	10-(20)	95
Li-ion	200	150-315	0.1-0.3%	5-(15)	95
Fuel cells	800-10.000	500+	-	-	-
Metal-air	80-200	300	0.036-0.0833	6-(20)	<50
NaNiCl <sub>2</sub>	100-120	150-200	15%	10-15	85-90
Pb-Acid	30-50	75-300	0.1-0.3%	5-(15)	65-80
Ni-MH	60-80	200	0-0.6%	5-(15)	50-80
GPM	1.6-6.4GW	40-1600MW	0	30+	75-80
Gravitricity	1MW	40MW	0	50+	80-90
BEST	19 GWh+	-	-	15	90
UGES	1MW	-	-	30	80

- Πηγή:**
1. Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression (Julian David Hunt, Behnam Zakeri)
  2. Sizing of underwater gravity storage with solid weights participating in electricity markets (Jean-François Toubéau, Chloé Ponsart)
  3. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration (Abraham Alem Kebede, Theodoros Kalogiannis)
  4. Review of energy storage technologies for sustainable power networks (D.O. Akinyele, R.K. Rayudu)
  5. DOGES: Deep ocean gravitational energy storage (R. Cazzaniga, M. Cicu)
  6. Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Applications (Ana Cristina Ruoso, Nattan Roberto Caetano and Luiz Alberto Oliveira Rocha)
  7. Capability study of dry gravity energy storage (C.D. Botha, M.J. Kamper)



Πίνακας 12. Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων 2

Technology	Energy Density (kWh/m <sup>3</sup> )	Power Density (kW/m <sup>3</sup> )	Power (MW)	Discharge Time (ms to hr)	Response Time (ms to hr)
PHES	0.133-0.5	0.01-0.12	10-5000	1-24 h	sec - min
CAES	3-(6)	5-(2)	5-300	1-24 h	<15 min
FES	20-80	1000-2000	0-0.25	<1 h	<10 msec
SMES	0.2-2.5	1000-4000	10	msec-8sec	<10 msec
SCES	2.5-15	1000-5000	0-0.3	1 min	<10 msec
STES (TES) molten salt	80-120	0	0.001-10	<1 min	days-month
NaS	150-250	150-250	0.05-34	<6 h	1-2 min
VRB (VRFB)	16-33	0.5-2	0.3-3	<8 h	<10 min
Zn Br	20-30	4-(6)	0.1-6	-	-
Ni-Cd	60-150	150-300	0-40	sec-hrs	20 ms-sec
Li-ion	200-500	50-800	0-100	min-hr	20 ms-sec
Fuel cells	800	55	0-50	sec-24h+	sec - min
Metal-air	150-400	>5000	27-40	<1 h	<10 msec
NaNiCl <sub>2</sub>	150-180	220-300	0-3	sec-hr	< sec
Pb-Acid	50-80	10-400	0-40	≤4 h	msec
Ni-MH	189.9	588	0.01-3	-	-
GPM	1.6	3.13	20-2000	1-4 h	-
Gravitricity	0.2-3.1	0.3-30	4	<2 h	0.5 h
BEST	0	800	10-100	Weeks	sec - min
UGES	0.532	0.48	10 MW	0	15-30 sec

**Πηγή: 1.** Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression (Julian David Hunt, Behnam Zakeri)

**2.** Sizing of underwater gravity storage with solid weights participating in electricity markets (Jean-François Toubéau, Chloé Ponsart)

**3.** A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration (Abraham Alem Kebede, Theodoros Kalogiannis)

**4.** Review of energy storage technologies for sustainable power networks (D.O. Akinyele, R.K. Rayudu)

**5.** DOGES: Deep ocean gravitational energy storage (R. Cazzaniga, M. Cicu)

**6.** Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Applications (Ana Cristina Ruoso, Nattan Roberto Caetano and Luiz Alberto Oliveira Rocha)

**7.** Capability study of dry gravity energy storage (C.D. Botha, M.J. Kamper)



Πίνακας 13. Σύγκριση αποθηκευτικών μέσων 3

Technology	Energy Cost (\$/kWh)	Power Cost (\$/kW)	Operating and Maintenance (O &M) cost (\$/kW/year)	Storage Period (Short – Long term)	Environmental Impact
PHES	5-100	600-2000	0.1-1.4	Mid-long term	High/Medium
CAES	217-271	400-800	16.7	Mid-long term	Medium/Low
FES	1085-5427	271-380	3-(25)	Low	Very Low
SMES	1000-10000	200-300	0	short-term	Low
SCES	300-2000	271-480	6	short-term	Very Low
STES (TES) molten salt	0.14-13.65	3650		5 days-months	Very Low
NaS	300-500	380-3256	80	Long term	High
VRB (VRFB)	190-1085	651-1628	70	Long term	Medium/Low
Zn Br	150-1000	800-2900	6	Long term	Medium
Ni–Cd	800–1500	500–1500	20	Short-long ter	High
Li-ion	600–2500	1303–4342	10	Short-mid	Medium/Low
Fuel cells	-	10000	6000-20000	Long term	Low
Metal–air	300–1300	500–1500	20	Short-mid	Low
NaNiCl <sub>2</sub>	100–345	150–300	0	Mid-long	Medium/low
Pb-Acid	120–150	300–600	50	Short-mid	High
Ni-MH	400–2400	-	-	Mid-long	High
GPM	6-101	602-2005	0.1-1.4	Mid-long	Medium
Gravitricity	171	-	-	Mid-long	Medium
BEST	105	4000-8000	-	Short-mid	Low
UGES	100	150	2.5	Short-mid	Low

**Πηγή: 1.** Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression (Julian David Hunt, Behnam Zakeri)

**2.** Sizing of underwater gravity storage with solid weights participating in electricity markets (Jean-François Toubéau, Chloé Ponsart)

**3.** A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration (Abraham Alem Kebede, Theodoros Kalogiannis)

**4.** Review of energy storage technologies for sustainable power networks (D.O. Akinyele, R.K. Rayudu)

**5.** DOGES: Deep ocean gravitational energy storage (R. Cazzaniga, M. Cicu)

**6.** Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Applications (Ana Cristina Ruoso, Nattan Roberto Caetano and Luiz Alberto Oliveira Rocha)

**7.** Capability study of dry gravity energy storage (C.D. Botha, M.J. Kamper)

### 3.5.1 Πυκνότητα Ισχύος (kW/m<sup>3</sup>)

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναλύσαμε οι καλύτερες ενέργειες με την μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος είναι: η μπαταρία Metal air >5000 (kW/m<sup>3</sup>) όπου είναι υψηλότερη από αυτή των μπαταριών ιόντων λιθίου. Έπειτα ακολουθεί ο υπερπυκνωτής με 1000-5000 (kW/m<sup>3</sup>) που έχει επίσης υψηλή πυκνότητα ισχύος από την ίδια ονομαστική μπαταρία. Στην συνέχεια ακολουθεί η Υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας (SMES) με 1000-4000 (kW/m<sup>3</sup>) αλλά έχει μέτρια ενεργειακή πυκνότητα. Τέλος έρχεται ο σφόνδυλος (FES) με 1000-2000 (kW/m<sup>3</sup>) όπου είναι σχεδιασμένο για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας και έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος για βραχυπρόθεσμες εφαρμογές σε συνεργασία με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.5.2 Αποτελεσματικότητα μετ' επιστροφής – Round trip efficiency %.

Όσον αφορά την αποδοτικότητα μετ' επιστροφής η Υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας (SMES) έχει υψηλή παραγωγικότητα μετατροπής ενέργειας άνω του 97% έχοντας υψηλή αξιοπιστία. Εν συνέχεια ακολουθεί το σύστημα (FES) με 95% και ακολουθεί το (SCES) – (Ni Cd) και η μπαταρία λιθίου Li ion στα 95%.

### 3.5.3 Επαναχρησιμοποίηση και διάρκεια ζωής

Οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης υδροηλεκτρικής ενέργειας (PHES) έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής 40 – 60 χρόνια και τεράστια χωρητικότητα ισχύος στα 5.000 MW. Ακολουθεί η βαρυτική ενέργεια Gravitricity στα 50+ χρόνια και έχει προβλεπόμενη απόδοση πλήρους κλίμακας έως και 80%. Το σύστημα συμπιεσμένου αέρα (CAES) έχει 20-40 χρόνια και έχει δυνατότητα παροχής ενέργειας που κυμαίνεται από λίγες ώρες έως αρκετές ημέρες. Τέλος μένει το σύστημα Gravity Power Module (GPM) στα 30+ χρόνια και μπορεί να φτάσει από το μηδέν στην πλήρη ισχύ σε λιγότερο από 20 δευτερόλεπτα.

### 3.5.4 Χρόνος εκφόρτισης και απόκρισης

Αν και το σύστημα πλεούμενης βαρυτικής ενέργειας (BEST) μπορεί να εκφορτίζει για ολόκληρες εβδομάδες έχει μεσαίο χρόνο απόκρισης (sec-min), έπειτα ακολουθεί το σύστημα (VRB) και (NaS) με εκφόρτιση 6-8 ώρες καθώς και αυτά με μεσαίο χρόνο απόκρισης στα 2-10 min. Αντιθέτως τον μικρότερο και γρηγορότερο χρόνο απόκρισης τον έχουν τα συστήματα : Pb-Acid, Li-ion, Ni-Cd στα 20 ms-sec. Τέλος για τα <10 msec είναι το SCES, SMES και FES.

### 3.5.5 Κόστος ενέργειας (\$/kWh)

Το κόστος είναι μια σημαντική παράμετρος για θέματα που σχετίζονται με το σχεδιασμό προϊόντων. Το πιο φθηνό ενεργειακό κόστος ανήκει στο σύστημα STES (TES) molten salt στα 0.14-13.65 (\$/kWh) αλλά έχει υψηλό κόστος ισχύος στα 3650 (\$/kW). Εν συνεχεία έρχεται το (PHES) με 5-100 (\$/kWh) και το (GPM) στα 6-101 (\$/kWh) και τέλος το σύστημα υποβρύχιας βαρυτικής ενέργειας UGES στα 100 (\$/kWh). Η πιο ακριβή ενέργεια καταλογίζεται στο (SMES) με 1.000-10.000 (\$/kWh) και στο (FES) με 1.085-5.427 (\$/kWh).

### 3.5.6 Περιβαλλοντική Επίπτωση

Όπως συμβαίνει με κάθε μεγάλο έργο υποδομής, η κατασκευή των PHES έχει επιπτώσεις στη γεωλογία καθώς το έδαφος μετατρέπεται σε μεγάλους ταμιευτήρες αποθήκευσης υδάτων και ενδέχεται να δημιουργηθεί μετατόπιση του εδάφους καθώς και απομάκρυνση της πανίδας.

Το CAES αυξάνει μετρίως τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις καθώς έχει περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής λόγω γεωλογικών περιορισμών που προκύπτουν από την ανάγκη για κοιτάσματα αλατιού, η οποία μετά την έκπλυση μπορεί να χρησιμεύσει ως φυσική δεξαμενή για πεπιεσμένο αέρα. Ωστόσο χρειάζεται σχετικά μεγάλος όγκος δεξαμενών για πεπιεσμένο αέρα για να εξασφαλιστεί επαρκής ενεργειακή πυκνότητα.

Το FES έχει πολύ μικρό αντίκτυπο προς το περιβάλλον όταν κατά την λειτουργία του βρίσκεται σε ρελαντί και το 15% της ενέργειας του χάνεται σε θερμότητα.

Οι ενέργειες που έχουν υψηλό αντίκτυπο στο περιβάλλον είναι: NaS, Ni-Cd, Pb-Acid και Ni-MH λόγω έκλυσης αερίων και θερμότητας όταν υπερφορτίζονται ή υποστούν κάποιο μηχανικό χτύπημα.

Τα συστήματα GPM και Gravitricity έχουν μεσαία κατηγορία επιπτώσεων λόγω των ειδικών εκσκαφών που πρέπει να κάνουν στο έδαφος.

Από τα συστήματα υποβρύχιας βαρυτικής ενέργειας έχουμε πολύ χαμηλές επιπτώσεις και που οφείλονται εξαιτίας των συμμάτινων αγωγών που είναι εμποτισμένα μέσα στην θάλασσα.

### 3.5.7 Συμπέρασμα σύγκρισης ενεργειών

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι μια ιδανική λύση για να αξιοποιούν τη διακοπόμενη ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που συχνά συνδέονται με αδύναμα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για να σχηματίσουν τοπικά μικροδίκτυα. Εξαιτίας της μεγάλης διακύμανσης στο ισοζύγιο φορτίου και παραγωγής των μικροδικτύων, τα βασικά σημεία που συμβάλουν για ένα σωστό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι:

- ❖ Η μεγάλη πυκνότητα ισχύος και να ανταποκρίνεται γρήγορα σε διακυμάνσεις ισχύος σε σύντομη χρονική κλίμακα από δευτερόλεπτα έως λεπτά.
- ❖ πρέπει να έχει μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα για να αντιμετωπίσει τις ανισορροπίες ισχύος σε μακροπρόθεσμη βάση.

Για τα μικροδίκτυα, όπου τα επίπεδα ισχύος είναι της τάξης των KW προς MW, υπάρχει η τεχνολογία των ηλεκτροχημικών μπαταριών όπως: Li-ion, Ni-Cd, Ni-MH, Metal air, Zn Br. Αν και οι μπαταρίες έχουν συνήθως μεγάλες ενεργειακές πυκνότητες, η πυκνότητα ισχύος, ο κύκλος ζωής και οι ταχύτητες απόκρισης είναι πολύ περιορισμένες.

Για τα μικροδίκτυα, όπου τα επίπεδα ισχύος είναι της τάξης των MW προς GW υπάρχει η τεχνολογία των FES, SCES και SMES όπου έχουν μεγάλες πυκνότητες ισχύος, μεγάλους κύκλους λειτουργίας και γρήγορες ταχύτητες απόκρισης. Το SMES αν και έχει την μεγαλύτερη απόδοση μετ' επιστροφής >97% και είναι φιλικό προς το περιβάλλον έχει το πιο ακριβό κόστος ενέργειας στα 10.000 (\$/kWh) και εννοείται ότι δεν μας συμφέρει για την εργασία μας για τον τερματικό σταθμό λιμανιού. Το σύστημα PHEs αν και είναι μεγάλης κλίμακας ισχύος δεν μπορούμε να τα εφαρμόσουμε λόγω της μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας και του υψηλού αντίκτυπου του περιβάλλοντος αν και έχει χαμηλό κόστος ενέργειας 5-100 (\$/kWh). Το σύστημα SCES αν και έχει μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από το FES στα 1000-5000 (kW/m<sup>3</sup>) μπορεί να κάνει εκφόρτιση μόνο 40 % ημερησίως, ενώ ο σφόνδυλος εκφορτίζει μέχρι και στο 100% καθώς το μέσο αποθήκευσης που χρησιμοποιεί είναι μηχανικό και η μονάδα μπορεί να αποφορτιστεί επανειλημμένα και πλήρως χωρίς καμία ζημιά στη συσκευή.

Η χρήση της τεχνολογίας FES αφορά κυρίως την αποθήκευση βραχυπρόθεσμης ηλεκτρικής ενέργειας έως και αρκετές ώρες, όπου υπάρχει ανάγκη για γρήγορη απόκριση (υψηλή πυκνότητα ισχύος), συμπεριλαμβανομένων:

- ✓ υπηρεσιών υποστήριξης και καθιστώντας τη λειτουργία του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας πιο ευέλικτη,
- ✓ τις αεροπορικές, τις θαλάσσιες καθώς και τις οδικές μεταφορές.

Μετα την ανάλυση που κάναμε και τα συμπεράσματα που βγάλαμε θα επιλέξω ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας το FES.

## Κεφάλαιο 4 Παραγωγή Ενέργειας απο ΑΠΕ

---

### 4.1 Θαλάσσια ενέργεια

Οι θάλασσες και οι ωκεανοί αποτελούν σημαντικές πηγές καθαρής ενέργειας και καλύπτουν το 75% της επιφάνειας του πλανήτη. Ωστόσο μπορούν να θεωρηθούν ως μια παγκόσμια ενεργειακή αποθήκη. Οι θαλάσσιες Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), στις οποίες περιλαμβάνεται τόσο η κυματική, η ωκεάνια και η υποβρύχια βαρυτική ενέργεια αναμένεται να προωθήσουν την ανάπτυξη κάθε οικονομίας, που ζητεί να μειώσει τον άνθρακα, ενώ συνδέονται με την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού και ενισχύουν επιλογές που αφορούν στη μέγιστη αξιοποίηση εγχώριων πηγών ενέργειας, αλλά και εν δυνάμει ενεργειακών πόρων. Παράλληλα, συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος και αποτελούν πυλώνα της γαλάζιας οικονομίας. Η θάλασσα μπορεί να προσφέρει τεράστιες ποσότητες ενέργειας, μέσω κυμάτων παλίρροιών και θερμοκρασιακών διαφορών του νερού. Στα πλεονεκτήματα από τη χρήση της ενέργειας αυτής εντάσσονται, μεταξύ άλλων και οι σχετικά ήπιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η αδιάκοπη παραγωγή ενέργειας, ενώ κρίσιμα μειονεκτήματα αποτελούν το κόστος μεταφοράς της ενέργειας στη στεριά, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας. Πλέον η θαλάσσια ενέργεια δεν αποτελεί μια ενιαία έννοια, αλλά χωρίζεται σε έξι βασικές κατηγορίες:

- την **ηλιακή ενέργεια** (Solar Energy) η οποία προκύπτει από τις ηλιακές ακτίνες που απορροφά η επιφάνεια της θάλασσας,
- την **αιολική ενέργεια** (Wind Energy) η οποία προκύπτει σε μορφή ρευμάτων ή κυμάτων (Wave Energy), που εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας,
- το **φαινόμενο της παλίρροιας** (Tidal Energy), που εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του ήλιου και της σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό.
- το **θερμικό δυναμικό** θερμότερων και ψυχρότερων θαλάσσιων στρωμάτων (Ocean Thermal Energy), εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας και στις **μεταβολές πυκνότητας** μεταξύ θαλάσσιων στρωμάτων διαφορετικής αλατότητας (Salinity Energy).

- Και τέλος η **Ωσμωτική ενέργεια**, η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού που απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται **ωσμωτική ενέργεια** (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημι-διαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής. Η ενέργεια που απελευθερώνεται από την ανάμειξη του γλυκού νερού με το θαλασσινό νερό μπορεί να γίνει αντιληπτή με την κατανόηση του φαινομένου της ώσμωσης, από όπου προκύπτει και το όνομα «ωσμωτική ενέργεια». (Πηγή :Ocean thermal energy conversion)

Η θαλάσσια ενέργεια έχει ιδιαίτερα υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, σε σχέση με τις άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η τεχνολογία, πλέον, παρέχει την απαραίτητη τεχνογνωσία για να μπορεί η θαλάσσια ενέργεια να αποτελέσει τον κύριο φορέα παραγωγής ενέργειας, πετυχαίνοντας τέτοιους ρυθμούς παραγωγής όπου μπορεί να πουλάει ενέργεια σε άλλες χώρες.

Στην δική μας μελέτη θα αναλύσουμε δύο συστήματα υποβρύχιας βαρυτικής ενέργειας το BEST (Buoyancy Energy Storage) και το UGES (Underwater gravity storage) όπου μετά από ανάλυση και εξακρίβωση θα επιλέξουμε ποιο από τα δύο συστήματα μας συμφέρει τόσο σε απόδοση, όσο και σε ποιο οικονομικό μοντέλο.

## 4.2 Buoyancy Energy Storage (BEST)

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι εξαιρετικά ασταθής, ιδιαίτερα καθώς η αιολική, η ηλιακή και η υδροηλεκτρική ενέργεια εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές και κλιματικές συνθήκες. Τα πράγματα που κάνουν το σημερινό σύστημα ενέργειας τόσο ασυνήθιστα μοναδικό είναι η απρόβλεπτη απαίτησή του και οι ασυμμετρίες του στις εισόδους στο γενικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι απαιτούνται ορισμένες προσαρμογές, οι οποίες περιλαμβάνουν πιο αποτελεσματικά συστήματα αποθήκευσης. Το Buoyancy Energy είναι ένα πλωτό υδραυλικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται στην καθιερωμένη τεχνολογία πίσω από τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με αντλία. Αποτελείται από πλωτές πλατφόρμες που είναι διατεταγμένες μεμονωμένα ή σε ομάδες και μπορεί να βρίσκεται κοντά σε υπεράκτια αιολικά πάρκα, όπως στην Ευρωπαϊκή Βόρεια Θάλασσα ή σε οποιαδήποτε υπεράκτια τοποθεσία, όπου απαιτείται αποκεντρωμένη αντιστάθμιση της κυμαινόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις τεχνολογίας αποθήκευσης που έχουν σχεδιαστεί εδώ και χρόνια για πολλούς διαφορετικούς τομείς, αλλά με ορισμένα οικονομικά και τεχνικά μειονεκτήματα όπως ζητήματα με το κόστος, τις τοπογραφικές απαιτήσεις, την οικονομική απόδοση και την αποδοτικότητα αποθήκευσης ενέργειας.

Το BEST έχει αναπτυχθεί για να ξεπεραστούν τέτοια ελαττώματα, όπως έχουν παρατηρηθεί σε όλα τα συστήματα αποθήκευσης μέχρι σήμερα. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης βαρυτικής ενέργειας βαθέων ωκεανών είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον για την αποθήκευση ενέργειας για υπεράκτια αιολική ενέργεια, σε ακτές και νησιά χωρίς βουνά, και ως αποτελεσματική προσέγγιση για συμπίεση υδρογόνου.

#### 4.2.1 Αρχιτεκτονική συστημάτων BEST

Η αρχή λειτουργίας του BEST είναι απλή καθώς η διακοπτόμενη ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτεί έναν κινητήρα συνδεδεμένο με ένα καλώδιο που τραβάει μια μεγάλη σημαδούρα πίεσης στο βάθος. Κατά την κάθοδο, η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια λόγω της δύναμης άνωσης. Όταν απαιτείται η ζήτηση, η σημαδούρα αφήνεται να ανέβει, οδηγώντας τον κινητήρα, ο οποίος επαναφέρει σταθερή και προβλέψιμη ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Η **εικόνα 11(α)** δείχνει τα κύρια στοιχεία των συστημάτων και η **εικόνα 11(β)** δείχνει τις δυνάμεις που ασκούνται στη σημαδούρα.



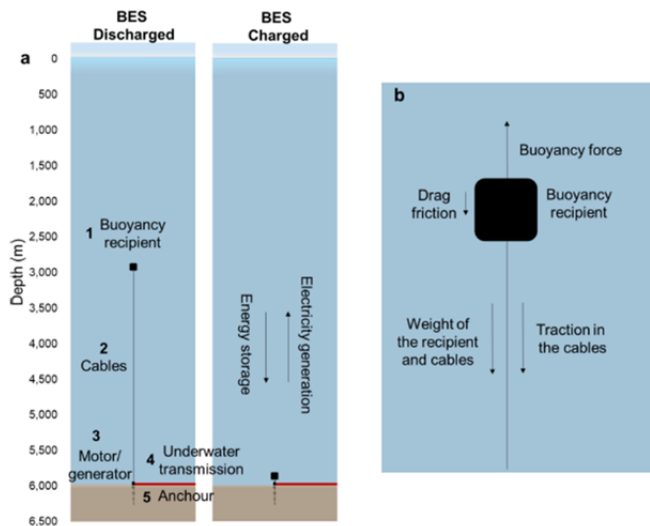


Figure 12. Αποθήκευση ενέργειας άνωσης, (α) το σκίτσο του συστήματος και των κύριων εξαρτημάτων, (β) παρουσιάζει τις δυνάμεις που ασκούνται στον δέκτη άνωσης.

Πηγή: Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression.

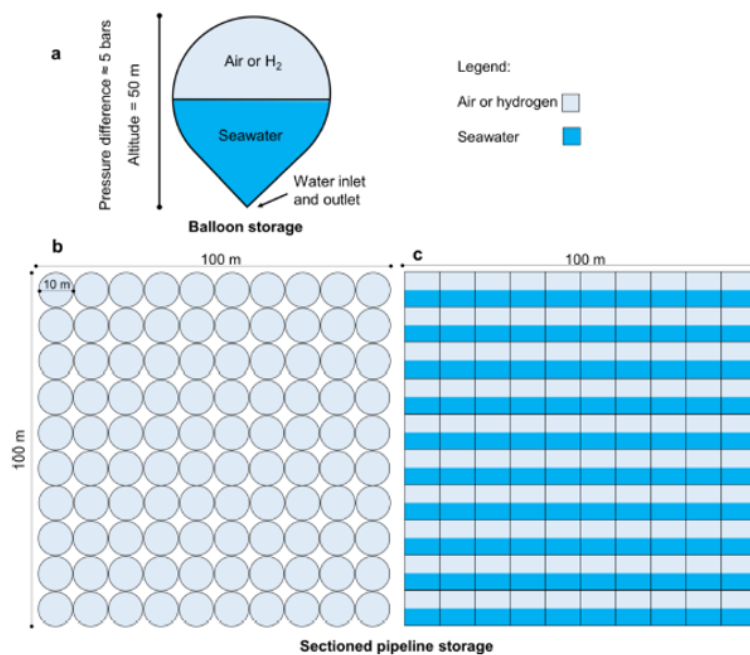


Figure 13. (α) Δέκτης αποθήκευσης μπαλονιού και (β) κατακόρυφη και (γ) οριζόντια όψη των σχεδίων αποδοχής αποθήκευσης σωλήνων σε τομή.

Πηγή: Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression.

Η ταχύτητα ανόδου και κατεβάσματος πρέπει να είναι χαμηλή λόγω απωλειών και λόγω δυνάμεων έλξης. Το σύστημα μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την ταχύτητα ανόδου και μείωσης του δέκτη άνωσης ανάλογα με τις απαιτήσεις ισχύος για το σύστημα. Λόγω του υψηλού ενεργειακού κόστους του συστήματος, το σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί κοντά στη μέγιστη χωρητικότητα. Τα οφέλη της λειτουργίας του συστήματος περιλαμβάνουν την αποθήκευση ενέργειας σε εβδομαδιαίους κύκλους σε συγχρονισμό με το σύστημα μπαταρίας, το οποίο αποθηκεύει ενέργεια σε καθημερινούς κύκλους και την ικανότητά του να συμπιέζει αποτελεσματικά το υδρογόνο. Ένα σημαντικό βήμα στο σύστημα BEST είναι η επιλογή του αερίου συμπίεσης. Το αέριο συμπίεσης που χρησιμοποιείται είναι είτε αέρας είτε υδρογόνο. Η πυκνότητα του αέρα αυξάνεται σημαντικά με το βάθος, ενώ δεν υπάρχει δραστική αλλαγή στην πυκνότητα του υδρογόνου με την αύξηση του βάθους. Η υψηλή πυκνότητα δεν είναι ιδανική για αυτά τα συστήματα επειδή η πυκνότητα του αερίου που γίνεται παρόμοια με την πυκνότητα του θαλασσινού νερού μειώνει το δυναμικό άνωσης.

#### 4.2.2 Πλεονεκτήματα του BEST

- Το BEST εξετάζει νέες τοποθεσίες για αποθήκευση ενέργειας, επιτρέποντας έτσι τις λίμνες και τους ωκεανούς ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας, ελαχιστοποιώντας τη χρήση της γης.
- Παρέχει ανταγωνιστική απόδοση με βάση κινητήρες υψηλής απόδοσης, αργές ταχύτητες και χαμηλές απώλειες τριβής.
- Μπορεί εύκολα να κλιμακωθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές που κυμαίνονται από MW έως GW, επομένως βρίσκει εφαρμογές σε πολλαπλές βοηθητικές υπηρεσίες από τη ρύθμιση συχνότητας έως τα αποθέματα περιστροφής και τη μετατόπιση φορτίου.
- Δεν υπάρχει απώλεια ενέργειας με την πάροδο του χρόνου, δίνοντας στο BEST τη δυνατότητα να αποθηκεύει ενέργεια για σχεδόν απεριόριστες διάρκειες.
- Οι αρχικές προβλέψεις εκτιμούν ότι η διάρκεια ζωής του BEST είναι σχεδόν 15 χρόνια, καθιστώντας το συγκρίσιμο με τα συστήματα PHES και μπαταριών.

### 4.2.3 Εφαρμογές συστημάτων BEST

Το BEST βρίσκεται μακριά από τις συμβατικές απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας, επομένως η λύση περιορίζεται σε ορισμένες τοποθεσίες και εφαρμογές. Αυτά μπορεί να είναι τα ακόλουθα:

- ❖ **Παράκτιες περιοχές:** Παράκτιες περιοχές χωρίς βουνά που είναι κατάλληλες για αποθήκευση υδροηλεκτρικής ενέργειας με αντλία θα μπορούσαν να είναι μια πιθανή εναλλακτική λύση για τα συστήματα BEST. Ωστόσο, ορισμένες παράκτιες περιοχές έχουν μια μακρά ηπειρωτική πλάκα, η οποία θα αυξήσει το κόστος του έργου αυξάνοντας το κόστος υποβρύχιας μετάδοσης.
- ❖ **Νησιά:** Τα νησιά έχουν συχνά κοντές ηπειρωτικές πλάκες, επιτρέποντας την εγκατάσταση του συστήματος BEST σε απόσταση λίγων χιλιομέτρων από την ακτή του νησιού.
- ❖ **Υπεράκτια αιολική ενέργεια κοντά στην ακτή:** Το BEST μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποθήκευση αιολικής ενέργειας, ειδικά επειδή μπορεί να λειτουργήσει σε εβδομαδιαίους κύκλους αποθήκευσης, κάτι που είναι βολικό για την ελαχιστοποίηση της διαλείπουσας λειτουργίας των σταθμών αιολικής ενέργειας.
- ❖ **Πλωτή υπεράκτια αιολική ενέργεια:** Οι δυνατότητες του BEST είναι τεράστιες για την πλωτή υπεράκτια αιολική ενέργεια λόγω του μεγάλου διαθέσιμου βάθους μακριά από τις ακτές των ωκεανών.
- ❖ **Συμπύεση υδρογόνου:** Η τρέχουσα τεχνολογία για τη συμπύεση του υδρογόνου στα 600 bars έχει συνήθως απόδοση περίπου 40 έως 50%. Τα συστήματα BEST μπορούν να συμπιέσουν υδρογόνο με απόδοση περίπου 90%.
- ❖ **Εξόρυξη βαθέων υδάτων:** Η εξόρυξη βαθέων υδάτων θα απαιτεί πολύ ηλεκτρική ενέργεια στο μέλλον, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί με υπεράκτια αιολική ενέργεια και καύσιμα, όπως το υδρογόνο. Το BEST μπορεί να υποστηρίξει υπεράκτιους σταθμούς αιολικής ενέργειας για να εξασφαλίσει τροφοδοσία ρεύματος για εβδομάδες με χαμηλή παραγωγή αιολικής ενέργειας.

#### 4.2.4 Εκτίμηση κόστους αποθήκευσης ενέργειας BEST

Το BEST είναι μια ανταγωνιστική εναλλακτική λύση αποθήκευσης ενέργειας που δεν έχει λάβει μεγάλη προσοχή. Λόγω του αυξημένου ενδιαφέροντος για εβδομαδιαία ενέργεια αποθήκευσης και την ανάγκη για αποτελεσματικές λύσεις για τη συμπίεση του υδρογόνου, αυτό έχει τη δυνατότητα να γίνει μια σημαντική τεχνολογία στη μελλοντική ενέργεια αγοράς και αποθήκευσης. Το κόστος αποθήκευσης του BEST είναι λίγο χαμηλότερο, αλλά η εγκατεστημένη χωρητικότητα είναι πολύ υψηλότερη. Ενώ το κόστος επένδυσης αποθήκευσης ενέργειας των μπαταριών σήμερα είναι περίπου \$150/kWh, το κόστος του BEST είναι μόλις 105 \$ ανά kWh.

Η κύρια πρόκληση για την εφαρμογή αυτού του συστήματος είναι το κόστος για εξαρτήματα συστήματος, των καλωδίων και της άγκυρας, για την υποστήριξη του δέκτη άνωσης για ένα σύστημα BEST με 70 MW και 7914 MWh χωρητικότητα.

- **Καλώδια** 3,5 km καλωδίων, 285 KN : 91.430.000USD
- **Δέκτης άνωσης** με 100 σωλήνες HDPE με 100 m.: 1200 USD
- **Άγκυρα** με 100 σωλήνες HDPE με 100 m. : 157.000.000 USD
- **Κινητήρας/γεννήτρια** Ισχύς 70 MW με Κόστος ρεύματος: 70.000.000 USD
- **Κατασκευή** όπου το 50% του κόστους του εξοπλισμού οφείλεται στην πολυπλοκότητα του έργου. : 159.815.000 USD
- **Υδρογόνο** με κόστος υδρογόνου 6 USD/kg: 4710 USD
- **Κόστος αποθήκευσης ενέργειας (USD/kWh)** Υποθέτοντας το κόστος όλων των εξαρτημάτων και χωρητικότητα αποθήκευσης 4,6198 GWh, δηλαδή σε α μέγιστο βάθος 6000 m και μεταβαλλόμενο βάθος 4000m: 105 USD/kWh
- **Κόστος Ισχύος (USD/kW)** Αναλαμβάνοντας το κόστος όλων των εξαρτημάτων και χωρητικότητα αποθήκευσης: 6917 USD/kW
- **Συνολικό κόστος έργου** υποθέτοντας βάθος 6000 m : **484.155.000 USD**

## 4.3 Underwater gravity storage (UGES)

### 4.3.1 Αρχιτεκτονική συστημάτων (UGES)

Η υποβρύχια αποθήκευση βαρύτητας είναι ένα σύστημα που αποτελείται από έναν αριθμό στερεών μπλόκ, τα οποία αποθηκεύονται χρησιμοποιώντας συσκευές επίπλευσης. Κάθε μπλόκ μπορεί να συνδεθεί σε επαγωγική μηχανή (μέσω βαρούλκου) που μπορεί εναλλακτικά να μειώσει το βάρος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια να το σηκώσει πίσω για να αποθηκεύσει δυναμική ενέργεια. Μια κινητή αδιάβροχη πλατφόρμα (που περιέχει το ηλεκτρομηχανικό σύστημα) μπορεί να μετακινηθεί από το ένα μπλόκ στο άλλο, και στη συνέχεια, τα μπλόκ αγκιστρώνονται (και αποσυνδέονται) στο σύστημα μέσω ενός αυτοματοποιημένου ρομπότ. Η ταχύτητα του επαγωγικού μηχανήματος ελέγχεται μέσω ενός οδηγού μεταβλητής συχνότητας, ο οποίος επιτρέπει τη λειτουργία του σε μεγάλο εύρος ισχύος εξόδου χωρίς απώλεια απόδοσης. Αυτό επιπλέον παρέχει μια αμφίδρομη διεπαφή με το ηλεκτρικό δίκτυο, δηλαδή το μηχάνημα λειτουργεί ως κινητήρας κατά τη φόρτιση και ως γεννήτρια κατά την εκφόρτιση. Δεδομένου ότι το βαρούλκο πρέπει να περιστραφεί σε πολύ χαμηλότερη ταχύτητα από τον κινητήρα, και τα δύο συστήματα συνδέονται μέσω ενός μειωτήρα ταχύτητας  $R:1$

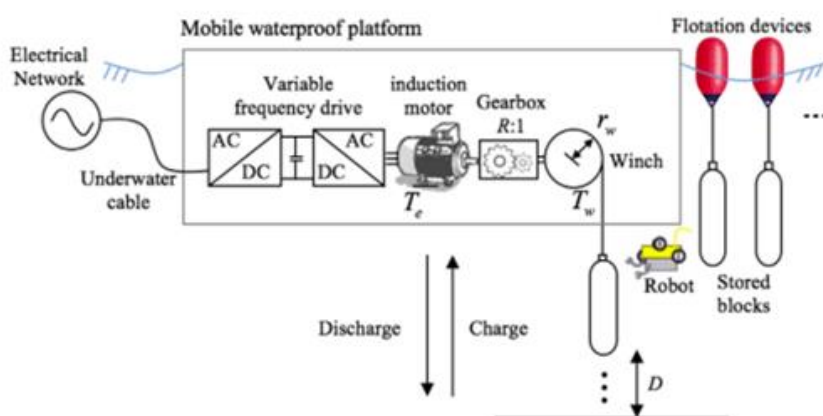


Figure 14. Μια τυπική μετατροπή αλυσίδας ( για ένα μόνο ηλεκτρομηχανικό σύστημα) μιας υποβρύχιας ενέργειας βαρύτητας συστήματος αποθήκευσης (UGES)

Πηγή: Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression.

Η έξοδος ισχύος (σε MW) ορίζεται από το βάρος των μπλόκ και τον αριθμό των μηχανών επαγωγής που λειτουργούν σε παράλληλη σύνδεση (δηλαδή, κάθε μονάδα μεταβλητής συχνότητας μπορεί να συνδεθεί σε πολλά μηχανήματα για να πολλαπλασιαστεί ο αριθμός των μπλόκ που μπορούν να μετακινηθούν ταυτόχρονα). Η ενεργειακή χωρητικότητα UGES (σε MWh) αντικατοπτρίζεται από τον συνολικό αριθμό των μπλόκ. Η πρακτική σκοπιμότητα της λύσης UGES περιορίζεται από την ικανότητά της να συλλαμβάνει ένα νέο μπλόκ προτού το προηγούμενο τελειώσει το ταξίδι του. Αυτός ο περιορισμός συνδέεται άμεσα με το βάθος της κοιλάτητας, καθώς τα μεγαλύτερα ύψη προσφέρουν περισσότερο χρόνο για την εκτέλεση της λειτουργίας αγκίστρωσης.

#### 4.3.2 Πλεονεκτήματα του UGES

- Το UGES είναι μια ανταγωνιστική λύση (με ελκυστική απόδοση των επενδύσεων), που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους επένδυσης και λειτουργίας, και της υψηλής ευελιξίας (επιτρέποντας για την αποτελεσματική αμοιβαιοποίηση των ροών εσόδων στις αγορές ενέργειας και αποθεματικών).
- Μεγιστοποιεί το κέρδος του :
  - 1) συμμετέχοντας από κοινού σε ενεργειακή αυθαιρεσία (δηλαδή, εκφόρτιση ηλεκτρικής ενέργειας σε υψηλές τιμές αιχμής και χρέωση σε χαμηλές τιμές εκτός αιχμής.
  - 2) στην παροχή λειτουργικών αποθεμάτων (δηλαδή, χωρητικότητα ισχύος που προσφέρεται την επόμενη μέρα στον διαχειριστή συστήματος που μπορεί να ενεργοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο για την διατήρηση της συχνότητας του συστήματος).
- Η αποθήκευση με βαρύτητα έχει εύρος συνεχούς λειτουργίας με υψηλούς ρυθμούς ράμπας, όχι όριο κύκλου και μεγάλη διάρκεια ζωής κατά την οποία τα ελαττωματικά εξαρτήματα μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα και οικονομικά.

- Οι αποδόσεις σε φόρτιση και εκφόρτιση εκτιμώνται σε 0,95 RTE (απόδοση μετ' επιστροφής περίπου 0,9) και προέρχονται από απώλειες τόσο στα ηλεκτρικά εξαρτήματα (μεταβλητή ταχύτητα μετάδοσης κίνησης και μηχανή επαγωγής με γρανάζια), όσο και στο μηχανικό μέρος (τριβή στο βαρούλκο).
- Το UGES είναι μια κερδοφόρα επένδυση αφού τα συνολικά έσοδα είναι υψηλότερα από το αποσβεσμένο κόστος.
- Μπορεί εύκολα να κλιμακωθεί σε εφαρμογές που κυμαίνονται από kW έως MW.
- Επιπλέον, η λειτουργία UGES είναι πιο σταθερή αφού δεν επηρεάζεται από κακές καιρικές συνθήκες όπως ισχυρούς ανέμους.

#### 4.3.3 Εφαρμογές συστημάτων UGES

Μια ελβετική εταιρία η EnergyVault εγκαινίασε πρόσφατα μια υπόγεια επίδειξη ισχύος 4 MW-35 MWh σε εργοστάσιο, που αποτελείται από έναν γερανό με έξι επιμυκήνσεις που μετακινεί τσιμεντόλιθους 35 τόνων σε κάθετη απόσταση 120 m και συγκέντρωσε 110 εκατομμύρια δολάρια από το SoftBank Vision Fund για την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας. Στην ίδια τάση, εμφανίζονται και άλλες εφαρμογές, όπως :

- ❖ Η **EarthPumpStore** όπου μεγάλα δοχεία γεμάτα με υλικά συμπαγούς γης (όπως σκόνη άνθρακα ή άλλα απόβλητα υλικά) μετατοπίζονται κατακόρυφα μέσα σε ανοιχτό χώρο δομής.
- ❖ Η **ARES (Advanced Rail Energy Storage)** που προτείνει συρμούς μεταφοράς με κινητήρες κίνησης άξονα για μεταφορά μαζών προς τα πάνω και προς τα κάτω για την αποθήκευση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα.
- ❖ Η **Gravitricity** που εκμεταλλεύεται εγκαταλελημένους άξονες ορυχείου για ανύψωση και κατέβασμα μεγάλου βάρους.

#### 4.3.4 Εκτίμηση κόστους αποθήκευσης ενέργειας UGES

Για την αποθεματική αγορά, το UGES χρειάζεται να έχει αρκετή αποθηκευμένη ενέργεια, ώστε να είναι διαθέσιμη σε κάθε περίπτωση. Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες περιλαμβάνουν το κόστος που σχετίζεται με:

1. τον αριθμό των εγκατεστημένων μπλόκ :  $n_{\text{μπλόκ}}$
2. πάγια, διάφορα τέλη (για την πλατφόρμα, τα καλώδια πρόσδεσης κ.λπ.)
3. ο αριθμός των μηχανών επαγωγής με γρανάζια:  $n^{gm}$  (με το οποίο συνδέονται ένα βαρούλκο και ένα καλώδιο έλξης).
  - **Επαγωγική μηχανή** (nBlocks) : 30, 000 €
  - **Βαρούλκο** (ngm) : 500 €
  - **Καλώδιο έλξης** (ngm) :  $D \times (4€/m)$
  - **Μπλόκ** (25 τόνων) ατσάλι-χάλυβα & συσκευές επίπλευσης: 500 €
  - **Καλώδια πλατφόρμας και πρόσδεσης** : 5000 €
  - **2 Robots** (ROV) : 5000€/ROV
  - **2 Οδηγοί μεταβλητής συχνότητας VFD** : 20000 €

Η υποβρύχια αποθήκευση με βαρύτητα δεν είναι μόνο μια οικολογική αλλά και οικονομικά αποδοτική λύση. Αυτό οφείλεται κυρίως στο χαμηλό επενδυτικό του κόστος, που υπολογίζεται σε περίπου 100 €/kWh, το οποίο είναι χαμηλότερο από τις αντίπαλες τεχνολογίες όπως τα συστήματα αποθήκευσης αντληθέντων υδροηλεκτρικών ή μπαταριών. Η τεχνολογία UGES είναι επίσης ανταγωνιστική στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας χάρη στην ικανότητά του να αξιοποιεί τα κέρδη από διαφορετικές ροές εσόδων.

Τελικά μετά την εξακρίβωση των δύο συστημάτων BEST και UGES μπορούμε να επιλέξουμε για το δικό μας σενάριο των γερανών το σύστημα **UGES** λόγω του χαμηλότερου κόστους ενέργειας στα 100 (\$/kWh) και κόστος ισχύος στα 150 (\$/kWh).



## 4.4 Οφέλη από τη χρήση της θαλάσσιας ενέργειας

Η θαλάσσια ενέργεια, σε όλες της τις μορφές, θεωρείται μια από της πιο ανεξάντλητες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και η πιο προβλέψιμη. Επίσης, αποτελείται από τεράστια ποσά δυναμικής ενέργειας τα οποία θα μπορούσαν να μας δώσουν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής, αλλά και μηχανικής ενέργειας. Αυτό είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα, γιατί θα μπορούσαμε έτσι να μειώσουμε την χρήση των ορυκτών καυσίμων τα οποία επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα και το περιβάλλον με πολλούς ρύπους.

Με την δημιουργία έργων για την εκμετάλλευση της θαλάσσιας ενέργειας, θα υπάρξει μεγάλη αλλαγή στην οικονομία των χωρών και ιδιαίτερα στις χώρες όπου θα γίνονται τα συγκεκριμένα έργα. Έτσι δημιουργείται ένας νέος κλάδος, στις νέες τεχνολογίες, ο οποίος θα φέρει νέες θέσεις εργασίας επιστημονικού προσωπικού, τεχνικούς κατασκευής και συντήρησης, τεχνικούς παρακολούθησης λειτουργίας καθώς και πολλές βιομηχανίες που θα ασχοληθούν με τον κλάδο.

## Κεφάλαιο 5 Σενάρια προς μελέτη

---

Στόχος αυτής της μελέτης είναι να βρεθούν τα κατάλληλα και επικερδή συστήματα ανάκτησης και αποθήκευσης ενέργειας για τους διάφορους παρόχους και μελλοντικούς γεραμούς σε έναν υποθετικό τερματικό σταθμό με 60.000 container/έτος. Με αυτόν τον τρόπο, η ζήτηση ενέργειας και αιχμής του τερματικού αναμένεται να μειωθεί, βελτιώνοντας την ενεργειακή και οικονομική του απόδοση. Τα κύρια αντικείμενα μελέτης θα είναι δύο σενάρια γεραμών με 2 STS - 2 eRTG και 6 STS - 6 eRTG με container των 25 και 40 τόνων. Χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες πληροφορίες που παρέχονται και λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία, θα προτείνουμε το κατάλληλο ESS για τον τερματικό σταθμό. Θα γίνουν δύο προτάσεις για την μελλοντική κατάσταση με τους νέους γεραμούς STS και eRTG. Η εξοικονόμηση ενέργειας και ζήτησης ενέργειας θα υπολογιστεί για καθεμία από τις προτεινόμενες λύσεις. Η υπολογισμένη εξοικονόμηση θα συγκριθεί με το κόστος και τη διάρκεια ζωής αυτών των λύσεων για τον προσδιορισμό της κερδοφορίας τους.

### 5.1 Σενάριο γεραμών 2 STS και 2 e-RTG

Καθώς ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που μεταφέρονται από πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων συνεχίζει να αυξάνεται, οι γερανοί από πλοίο σε ακτή (STS) χρειάζονται ριζική αλλαγή για να συμβαδίζουν με τις κλήσεις λιμένων κατά μέσο όρο μεγέθους. Οι γερανοί STS τύπου : Super Post Panamax της εταιρείας Mitsui Engineering and Shipbuilding Ltd. είναι ικανοί να εξυπηρετούν πλοία με 22 σειρές εμπορευματοκιβωτίων και να ανυψώνουν εμπορευματοκιβώτια έως 65 τόνους.

Η νέα ιδέα του γερανού έχει σχεδιαστεί για να παρέχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τον παραδοσιακό σχεδιασμό STS:

- Μειωμένη ταχύτητα διαδρομής τρόλεϊ χωρίς απώλεια απόδοσης (μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, λιγότερος χρόνος διακοπής λειτουργίας και κόστος συντήρησης, λιγότερος θόρυβος).

- Χωρίς περιορισμούς στα συνδυασμένα φορτία τρόλεϊ, εξαιρετική απόδοση σε καταστάσεις βαριάς ανύψωσης.
- Δεν υπάρχουν αρμοί ράγας τρόλεϊ (λιγότερη συντήρηση, λιγότερος θόρυβος), επομένως η χαλύβδινη κατασκευή υφίσταται λιγότερη κόπωση (μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του γερανού, λιγότερος χρόνος διακοπής λειτουργίας, μειωμένο κόστος συντήρησης).
- Υπάρχουν μέτρα απόσβεσης, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα για μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στον διάδρομο του γερανού.
- Καλύτερη αεροδυναμική απόδοση ως αποτέλεσμα του σχήματος και της θωράκισης των παράλληλων δοκών και της απουσίας στηριγμάτων που αναρτούν την μπούμα και την άνω κατασκευή (μειωμένο κόστος θεμελίωσης, μειωμένη διάβρωση).
- Χρήση τεχνολογίας τηλεχειρισμού και αυτοματισμού, καλός έλεγχος φορτίου και τοποθέτηση.

Ας υποθέσουμε ότι στην ακτή έχει ένα εμπορικό πλοίο (OOCL Hong Kong) μήκους 400m , πλάτος 58.8m, ύψος 49m και βύθισμα 16 μέτρα. Τα container (ISO containers of 20'/40'/) στοιβάζονται έως και 10 ψηλά στο κατάστρωμα και εκτείνονται σε τουλάχιστον 23 σειρές. Το λιμάνι διαθέτει 2 γεραμούς STS που είναι συνδεδεμένοι στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ως κατάλληλο μοντέλο γερανού θα επιλέξουμε Super Post Panamax με τα εξής στοιχεία:

- Crane Weight: 2000 tons
- Spreader mass: 15 tons
- Trolley mass 20 tons

### **Τυπικές διαστάσεις ενός CT (20ft and 40ft):**

- Container Height 2.591 m
- Container Width 2.438 m

## Τυπικά γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του STS.

Πίνακας 14. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά STS Crane

Name	Value
Gantry Span	50m
Outreach	46-73m+
Lift height	30 - 54+ m (45m)

Πίνακας 15. Τεχνικά χαρακτηριστικά STS Crane

Name	Value	Acceleration Time	Deceleration Time
Hoist speed, when spreader is empty of containers	180 m/min (u1)	(a1 3m/sec) – (t1 4sec)	3m/sec – 3.5sec
Hoist speed, when spreader is loaded with containers	90 m/min (u2)	(a2 1.5m/sec) - (t2 2sec)	1.5m/sec – 1.5sec
Trolley transit speed	210 m/min (u3)	(t3 8sec)	7sec -0
Gantry speed	45m/min	5.0sec	-

Πίνακας 16. Χαρακτηριστικά κινητήρων STS Crane

Crane type	Super post Panamax	rpm	engine performance
Characteristics			
Hoist motors x2	660-800kW	1000-1800	0.90
Trolley motors x4	55-75kW	2970- 1480	0.85 - 0.87
Gantry motors x8	30-37kW	1500-2953	0.90
Boom motor x1	300-500kW	3000-1500	0.90

Πίνακας 17. Τεχνικά χαρακτηριστικά RTG Crane

Χαρακτηριστικά	Τιμή	Μονάδα
Gantry span	(7 wide + lane) 26.5m	m
Lifting height	(1 over 6) 21m	m
Lifting capacity	40	t
Spreader mass	10	t
Hoist motor power	2x96=192	kw
trolley motor power	4x7,5 =30	kw
gantry motor power	4x38=152	kw
Hoist speed (full load)	26	m/min
Hoist speed ( no load)	52	m/min
Hoist acceleration/ deceleration (full load)	2	sec
Hoist acceleration/ deceleration (no load)	4	sec
Trolley speed	70	m/min
Trolley acceleration/ deceleration	4	sec
Gantry speed (no load)	50	m/min
Gantry acceleration/ deceleration	8	sec

### 5.1.2 Υπολογισμός χρόνων εκφόρτωσης / φόρτωσης

Η λειτουργία χωρίζεται στον κύκλο εκφόρτωσης και φόρτωσης. Οι κύριες διαφορές αυτών των δύο κύκλων είναι ότι στον κύκλο εκφόρτωσης το ανυψωτικό ξεκινά από τη θέση A και στη θέση αυτή ο διανομέας φορτώνεται με Container. Από την άλλη πλευρά, στον κύκλο φόρτωσης το ανυψωτικό ξεκινά από τη θέση F.

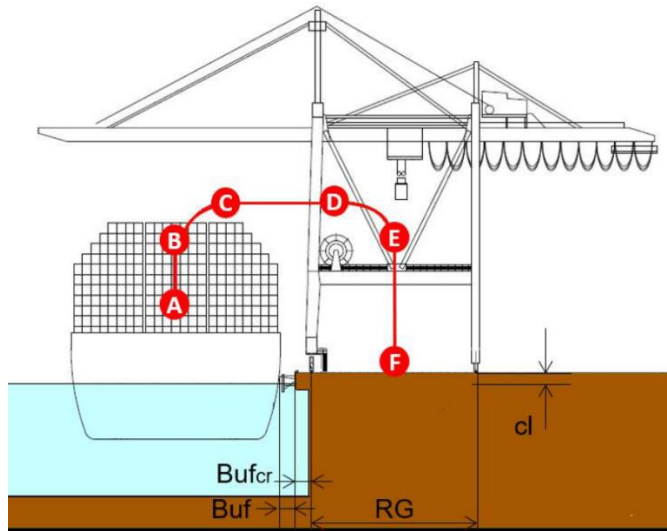


Figure 15. Κύκλος φορτίου για γεραμούς STS

Πηγή: (COFASTRANS-Indented Berths Feasibility Study, 2015)

Η ακολουθία της κίνησης του ανυψωτικού αποτελείται από πέντε στάδια. Ο αρχικός χρόνος στο σημείο εκκίνησης A είναι ( $t_a = 0$ ). Στο ανοδικό στάδιο A-B, το φορτίο ανυψώνεται από το αρχικό επίπεδο A στο επίπεδο B, δηλαδή πάνω από κάθε πιθανό εμπόδιο στην περιοχή. Υποτίθεται ότι το φορτίο φτάνει στο σημείο B με τη μέγιστη ταχύτητα ανύψωσης  $u_{2max}$ . Κατά τη λεγόμενη κίνηση διαγώνιας επιτάχυνσης B-C, το φορτίο ανυψώνεται μέχρι το επίπεδο C πάνω από τυχόν εμπόδια κατά μήκος της υπόλοιπης διαδρομής. Η ταχύτητα ανύψωσης (κάθετη) επιβραδύνεται και η ταχύτητα του τρόλεϊ (οριζόντια) επιταχύνεται. Η σύνθεση των ταχυτήτων, καμπυλώνει την τροχιά. Υποτίθεται ότι στο σημείο C το τρόλεϊ δεν έχει φτάσει στη μέγιστη ταχύτητά του. Επιπλέον, από το σημείο C στο σημείο D το τρόλεϊ κινείται με μέγιστη ταχύτητα  $u_{3max}$ . Το στάδιο D-E ονομάζεται κίνηση διαγώνιας επιβράδυνσης, επειδή η ταχύτητα του τρόλεϊ μειώνεται από το  $u_{3max}$  στο μηδέν, ενώ το φορτίο κατεβαίνει στο επίπεδο E. Μετά το σημείο D, υπάρχει ταυτόχρονη κίνηση του τρόλεϊ (οριζόντια) και του ανυψωτικού (κάθετη). Κατά τη διαγώνια επιβράδυνση και πριν από το σημείο E, θεωρείται ότι η ταχύτητα ανύψωσης έχει αποκτήσει τη μέγιστη ταχύτητα  $u_{2max}$ . Στη συνέχεια, το φορτίο χαμηλώνεται από το E στο F. Σε κάποιο σημείο πριν από το σημείο F, η ταχύτητα ανύψωσης μειώνεται από το  $u_{2max}$  στο μηδέν. Ένας χρόνος παραμονής ( $Dt$ ) λαμβάνεται υπόψη στο σημείο F.

### 5.1.3 Κύκλος λειτουργίας γερανού και κατανάλωση ενέργειας

Με σκοπό τον υπολογισμό της ελάχιστης ισχύος και των απαιτήσεων ενέργειας για την ανύψωση εμπορευματοκιβωτίων, χρησιμοποιήθηκαν εκφράσεις ενέργειας και κίνησης από την κλασική μηχανική..

## 5.2 Γραμμική ομοιόμορφη επιταχυνόμενη κίνηση

Καθώς είναι γνωστές οι ταχύτητες ανύψωσης και τρόλεϊ, καθώς και οι αρχικές και τελικές επιταχύνσεις, οι εξισώσεις για μια γραμμική ομοιόμορφα επιταχυνόμενη κίνηση θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό του χρόνου ανύψωσης και τρόλεϊ:

$$x = x_0 + u_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (1)$$

$$u = u_0 + a t \quad (2)$$

Όπου

- $x$  είναι η τελική θέση.
- $x_0$  είναι η αρχική θέση.
- $v$  είναι η τελική ταχύτητα.
- $v_0$  είναι η αρχική ταχύτητα.
- $a$  είναι η επιτάχυνση.
- $t$  είναι ο χρόνος

Όταν η ταχύτητα είναι σταθερή, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει τις ίδιες εξισώσεις κάνοντας  $a = 0$ .

## Δυναμική ενέργεια και συναφής δύναμη

Η παραλλαγή της δυναμικής βαρυτικής ενέργειας, για μια διαφορά ύψους στην οποία η διακύμανση της επιτάχυνσης της βαρύτητας θεωρείται αμελητέα, γράφεται ως:

$$\Delta E_p = m g \Delta h$$

Όπου:

- $m$  είναι η μάζα του αντικειμένου του οποίου υπολογίζεται η πιθανή ενέργεια.
- $g$  είναι η σταθερά βαρύτητας. Η τοπική βαρύτητα στη Σουηδία θα χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την έκθεση,  $g \approx 9,82 \text{ m / s}^2$ .
- $\Delta h$  είναι η μεταβολή ύψους του αντικειμένου.

Αυτή η παραλλαγή της πιθανής ενέργειας θα είναι η μέγιστη ανακτήσιμη ενέργεια κατά την ανύψωση ενός CT .

Διαίρεση της έκφρασης (3) με χρονική διακύμανση - χρόνος που προκύπτει, εάν η παραλλαγή είναι άπειρη :

$$\frac{\Delta E_p}{\Delta t} = m g \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Και έχοντας υπόψη ότι το χρονικό παράγωγο της ενέργειας είναι δύναμη και το παράγωγο μιας μετατόπισης είναι η ταχύτητα:

$$P_p = m g v$$

Όπου:

- $P_p$  είναι η δύναμη που σχετίζεται με την πιθανή ενέργεια
- $v$  είναι η ταχύτητα του αντικειμένου.



### 5.3 Κινητική ενέργεια και ισχύς

Κατά τη διάρκεια των φάσεων επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, η ταχύτητα ενός δοχείου αλλάζει. Επομένως, υπάρχει μια αλλαγή στην κινητική ενέργεια, η οποία απαιτεί ένα ορισμένο ποσό ισχύος. Η κινητική ενέργεια ορίζεται ως:

$$E_k = \frac{1}{2} m u^2$$

Όπου:

- $m$  είναι η μάζα του αντικειμένου του οποίου υπολογίζεται η κινητική ενέργεια.
- $v$  είναι η ταχύτητα του εν λόγω αντικειμένου.

Η ισχύς που δίνεται για την αύξηση της κινητικής ενέργειας αποκτάται με την σχέση:

$$P_k = m u a = F a$$

Όπου:

- $a$  είναι η επιτάχυνση του αντικειμένου.
- $F$  είναι η δύναμη που ασκείται στο αντικείμενο

## 5.4 Υπολογισμοί ισχύος για 2 STS και 2 e-RTG

Σύμφωνα με τα γεωγραφικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των γερανών για τον υπολογισμό της ισχύος παίζουν ρόλο τα βάρη των container , spreader και trolley καθώς επίσης και το ύψος, η απόσταση και οι χρόνοι κύκλου του φορτίου για την φόρτωση του container ως το σημείο εκφόρτωσης. Για το λόγο αυτό επιλέξαμε τρεις διαφορετικούς κύκλους φορτίου που ξεκινάνε από την μεσαία κλίμακα του πλοίου καθώς επίσης από την αριστερή και δεξιά μεριά του πλοίου για να υπολογίσουμε μια ολική κατανάλωση ενέργειας από όλες τις αποστάσεις και διαφορές ύψους container με τον διανομέα του γερανού. Για το κόστος κατανάλωσης ενέργειας θα κάνουμε 2 συγκρίσεις με 2 υποθετικά βιομηχανικά τιμολόγια:

Τιμολόγιο ημέρας Γ22 με χρέωση ενέργειας: 0.10158 (\$/kWh)

Τιμολόγιο νύχτας Γ23 με χρέωση ενέργειας: 0.07897 (\$/kWh)

Για το κόστος χρέωσης αναγεννητικής ενέργειας θα χρησιμοποιήσουμε το κοστολόγιο του FES : 1085 (\$/kWh) αλλά μόνο το 60% επειδή ένα ποσοστό της αποθηκευτικής ενέργειας θα καταναλώνεται από άλλον γερανό.

Για την χρέωση παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ θα χρησιμοποιήσουμε το σύστημα UGES στα 100 (\$/kWh) όπου από εκεί θα χρειαστούμε το 40% παραγωγής ενέργειας.

Για το 1<sup>ο</sup> σενάριο η διαστασιολόγηση είναι :

- ❖ 60.000 CT /year (12 months)
- ❖ 5000 CT/month (30 days)
- ❖ 168 CT/day (1 hour)
- ❖ 84 CT/h

Πίνακας 18. Υπολογισμός 2 STS με CT 25 tons, Spreader 15 tons and Trolley 20 tons.

ID	Movement	Consumption	Generation
A>B	Hoist spreader with CT	442 kW	
B>C	Deceleration		111kW
C>D	Trolley with Spreader and CT	380kW	
D>E	Deceleration		90 kW
E>F	Lift spreader with CT		253kW
F>E	Hoist spreader without CT	63kW	
E>D	Deceleration		55kW
D>C	Trolley with Spreader without CT	295kW	
C>B	Deceleration		85 kW
B>A	Lift spreader without CT		110 kW
	Σύνολο σε 1 min	1.180 MW	704 KW
	Σύνολο σε 1 hour / day	99 MWh	59 MWh
	Σύνολο / month	2.9 GWh	1.7 GWh
	Σύνολο /year	34.8 GWh	20.4 GWh
	Τιμολόγιο ημέρας	3.5 million USD	
	Τιμολόγιο νύχτας	2.7 million USD	
	Κοστολόγιο FES 60%		1.3 billion USD
	Κοστολόγιο UGES 40%		816 million USD

Πίνακας 19. Υπολογισμός 2 eRTG με CT 25 tons, Spreader 10 tons and Trolley 15 tons.

ID	Movement	Consumption	Generation
A>B	Hoist spreader with CT	576 kW	
B>C	Deceleration		221kW
C>D	Trolley with Spreader and CT	290kW	
D>E	Deceleration		73.5kW
E>F	Lift spreader with CT		446 kW
F>E	Hoist spreader without CT	147kW	
E>D	Deceleration		140 kW
D>C	Trolley with Spreader without CT	245 kW	
C>B	Deceleration		163 kW
B>A	Lift spreader without CT		69 kW
	Σύνολο σε 1 min	1.258 MW	1.113MW
	Σύνολο σε 1 hour / day	105 MWh	93.48 MWh
	Σύνολο / month	3.15 GWh	2.8 GWh
	Σύνολο /year	37.80 GWh	33.6 GWh
	Τιμολόγιο ημέρας	3.8 million USD	
	Τιμολόγιο νύχτας	2.9 million USD	
	Κοστολόγιο FES 60%		2.18 billion USD
	Κοστολόγιο UGES 40%		1.3 billion USD

Πίνακας 20. Υπολογισμός 2 STS με CT 40 tons, Spreader 15 tons and Trolley 20 tons

ID	Movement	Consumption	Generation
A>B	Hoist spreader with CT	809kW	
B>C	Deceleration		269 kW
C>D	Trolley with Spreader and CT	294.3 kW	
D>E	Deceleration		110.3 kW
E>F	Lift spreader with CT		578 kW
F>E	Hoist spreader without CT	52 kW	
E>D	Deceleration		45kW
D>C	Trolley with Spreader without CT	35.6 kW	
C>B	Deceleration		55 kW
B>A	Lift spreader without CT		49 kW
	Σύνολο σε 2 minutes	1.191 MW	1.106MW
	Σύνολο σε 1 hour / day	100 MWh	92.82 MWh
	Σύνολο / month	3 GWh	2.7 GWh
	Σύνολο /year	36 GWh	32.40 GWh
	Τιμολόγιο ημέρας	3.6 million USD	
	Τιμολόγιο νύχτας	2.8 million USD	
	Κοστολόγιο FES 60%		2.10 billion USD
	Κοστολόγιο UGES 40%		1.2 billion USD

Πίνακας 21. Υπολογισμός 2 eRTG με CT 40 tons, Spreader 10 tons and Trolley 15 tons.

ID	Movement	Consumption	Generation
A>B	Hoist spreader with CT	817 kW	
B>C	Deceleration		287 kW
C>D	Trolley with Spreader and CT	429kW	
D>E	Deceleration		383 kW
E>F	Lift spreader with CT		491kW
F>E	Hoist spreader without CT	74 kW	
E>D	Deceleration		163 kW
D>C	Trolley with Spreader without CT	188 kW	
C>B	Deceleration		82 kW
B>A	Lift spreader without CT		49kW
	Σύνολο σε 1 min	1.508 MW	1.455 MW
	Σύνολο σε 1 hour / day	127 MWh	122 MWh
	Σύνολο / month	3.8 GWh	3.7 GWh
	Σύνολο /year	45.60 GWh	44.40 GWh
	Τιμολόγιο ημέρας	4.6 million USD	
	Τιμολόγιο νύχτας	3.5 million USD	
	Κοστολόγιο FES 60%		2.8 billion USD
	Κοστολόγιο UGES 40%		1.7 billion USD

## 5.5 Σενάριο γερανών 6 STS και 6 e-RTG

Για το 2<sup>ο</sup> σενάριο η διαστασιολόγηση είναι :

- ❖ 60.000 CT /year (12 months)
- ❖ 5000 CT/month (30 days)
- ❖ 168 CT/day (1 hour)
- ❖ 14 CT/h

*Πίνακας 22. Υπολογισμός 6 STS με CT 25 tons, Spreader 15 tons and Trolley 20 tons.*

ID	Movement	Consumption	Generation
A>B	Hoist spreader with CT	1.4 MW	
B>C	Deceleration		179 kW
C>D	Trolley with Spreader and CT	90 kW	
D>E	Deceleration		168 kW
E>F	Lift spreader with CT		993kW
F>E	Hoist spreader without CT	577 kW	
E>D	Deceleration		76.3 kW
D>C	Trolley with Spreader without CT	84 kW	
C>B	Deceleration		70 kW
B>A	Lift spreader without CT		276 kW
	Σύνολο σε 1 min	2.1 MW	1.7 MW
	Σύνολο σε 1 hour / day	176.4 MWh	142.8 MWh
	Σύνολο / month	5.2 GWh	4.2 GWh
	Σύνολο /year	62.40 GWh	50.4 GWh
	Τιμολόγιο ημέρας	6.3 million USD	
	Τιμολόγιο νύχτας	4.9 million USD	
	Κοστολόγιο FES 60%		3.2 billion USD
	Κοστολόγιο UGES 40%		2 billion USD

Πίνακας 23. Υπολογισμός 6 eRTG CT 25 tons, Spreader 10 tons and Trolley 15 tons.

ID	Movement	Consumption	Generation
A>B	Hoist spreader with CT	953 kW	
B>C	Deceleration		104 kW
C>D	Trolley with Spreader and CT	117 kW	
D>E	Deceleration		135 kW
E>F	Lift spreader with CT		593 kW
F>E	Hoist spreader without CT	238 kW	
E>D	Deceleration		70 kW
D>C	Trolley with Spreader without CT	40 kW	
C>B	Deceleration		87 kW
B>A	Lift spreader without CT		213 kW
	Σύνολο σε 1 min	1.4 MW	1.2 MW
	Σύνολο σε 1 hour / day	117.6 MWh	100.8 MWh
	Σύνολο / month	3.5 GWh	3.1 GWh
	Σύνολο /year	42 GWh	37.20 GWh
	Τιμολόγιο ημέρας	4.2 million USD	
	Τιμολόγιο νύχτας	3.3 million USD	
	Κοστολόγιο FES 60%		2.4 billion USD
	Κοστολόγιο UGES 40%		1.48 billion USD



Πίνακας 24. Υπολογισμός 6 STS με CT 40 tons, Spreader 15 tons and Trolley 20 tons.

ID	Movement	Consumption	Generation
A>B	Hoist spreader with CT	2.1 MW	
B>C	Deceleration		295 kW
C>D	Trolley with Spreader and CT	112 kW	
D>E	Deceleration		210 kW
E>F	Lift spreader with CT		1.36 MW
F>E	Hoist spreader without CT	519 kW	
E>D	Deceleration		80kW
D>C	Trolley with Spreader without CT	83 kW	
C>B	Deceleration		78 kW
B>A	Lift spreader without CT		180 kW
	Σύνολο σε 1 min	2.8 MW	2.5 MW
	Σύνολο σε 1 hour / day	235 MWh	210 MWh
	Σύνολο / month	7.1 GWh	6.3 GWh
	Σύνολο /year	85.20GWh	75.60 GWh
	Τιμολόγιο ημέρας	8.6 million USD	
	Τιμολόγιο νύχτας	6.7 million USD	
	Κοστολόγιο FES 60%		4.9 billion USD
	Κοστολόγιο UGES 40%		3 billion USD

Πίνακας 25. Υπολογισμός 6 eRTG με CT 40 tons, Spreader 10 tons and Trolley 15 tons.

ID	Movement	Consumption	Generation
A>B	Hoist spreader with CT	1.3 MW	
B>C	Deceleration		164 kW
C>D	Trolley with Spreader and CT	152 kW	
D>E	Deceleration		193 kW
E>F	Lift spreader with CT		980 KW
F>E	Hoist spreader without CT	252 kW	
E>D	Deceleration		66 kW
D>C	Trolley with Spreader without CT	42 kW	
C>B	Deceleration		62 kW
B>A	Lift spreader without CT		201 kW
	Σύνολο σε 1 min	1.75 MW	1.6 MW
	Σύνολο σε 1 hour / day	147 MWh	135 MWh
	Σύνολο / month	4.4 GWh	4.1 GWh
	Σύνολο /year	52.80 GWh	49.2 GWh
	Τιμολόγιο ημέρας	5.3 million USD	
	Τιμολόγιο νύχτας	4,1 million USD	
	Κοστολόγιο FES 60%		3.2 billion USD
	κοστολόγιο UGES 40%		1.9 billion USD

Απο τα αποτελέσματα καταλήγουμε ότι το σενάριο των 2 STS και 2 RTG είναι συμφέρον διότι εκφορτώνουμε περισσότερα container και των 25 tons CT και των 40 tons CT. Έπειτα απο θέμα κατανάλωσης ενέργειας συμφερει το σενάριο των 25 ton CT. Απο το κόστος κατανάλωσης ενέργειας συμφέρει το τιμολόγιο νύχτας όπου έχουμε κέρδος 90%. Τέλος στο κόστος αποθηκευμένης ενέργειας FES και UGES έχουμε κέρδος 85 %.

# Κεφάλαιο 6 Επίλογος

---

## 6.1 Συμπεράσματα

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και η ενεργειακή απόδοση απαιτούν νέες στρατηγικές και καινοτομίες για την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τομείς αξιοποίησης της ενέργειας όπως οι λιμενικές περιοχές πρέπει να είναι οργανωμένες ως μικροδίκτυα για να επιτρέπουν μειωμένο αντίκτυπο στο παροχή δικτύου με στόχο την καθαρή μηδενική ενέργεια. Μια σημαντική πτυχή ενός υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι μόνο το κατάλληλο ESS γρήγορης απόκρισης όπως το FESS, αλλά και μια αποτελεσματική αρχιτεκτονική συστήματος ελέγχου που λαμβάνει τις κατάλληλες αποφάσεις πότε θα κάνει φόρτιση, εκφόρτιση, ποιο μέρος των υβριδικών συστημάτων παρέχει την ενέργεια και ποια υπηρεσία δικτύου παρέχει τα περισσότερα έσοδα δηλαδή το σύστημα ελέγχου που πρέπει να αναλύει και τις δύο τεχνικές πτυχές του δηλαδή το σύστημα αποθήκευσης, καθώς και τη λήψη κατάλληλων εμπορικών αποφάσεων για αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης.

Σύμφωνα με το θέμα της εργασίας που μας δόθηκε για την διαστασιολόγηση ενός λιμένα 60.000 CT/year και την ανάλυση 2 διαφορετικών σεναρίων κατανάλωσης ισχύος σε ώρες αιχμής αλλά και την αποθήκευση ενέργειας κατά την αναγεννητική πέδηση καταλήγω ότι το πιο οικονομικό σενάριο τόσο σε αποθήκευση ενέργειας αλλά και σε ενεργειακό κόστος είναι το σενάριο των 2 STS και 2 e-RTG. Εν συνεχεία επιλέγω ως μοντέλο αποθηκευτικής ενέργειας τον σφόνδυλο διότι έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος και εύκολα κλιμακούμενη για βραχυπρόθεσμες εφαρμογές σε συνεργασία με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, επίσης έχει υψηλό βάθος εκφόρτισης, υψηλή απόδοση: έως 85-90% RTE και μεγάλη διάρκεια ζωής. Οι μειωμένες κορυφές μπορούν να επιτρέψουν στον χειριστή να κόψει τη ζήτηση ενέργειας δημιουργώντας μια σχετική εξοικονόμηση που μπορεί να κάνει την επένδυση εξαιρετικά κερδοφόρα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση κόστους με το έξυπνο δίκτυο σε σύγκριση με τις συμβατικές ρυθμίσεις. Η ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο μικροδίκτυο λιμένων έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση κόστους επειδή παλιά που δεν υπήρχε ούτε αναγεννητική πέδηση αλλά ούτε και αποθηκευτικά μέσα όλη η ενέργεια των γερανών καταναλώνονταν στις αντιστάσεις.

Τώρα με την προσθήκη υβριδικών αποθηκευτικών ενεργειών σε σύνδεση με το μικροδίκτυο μπορούμε να πούμε ότι εξοικονομούμε αρκετά χρήματα τόσο για την απόσβεση μιας κατασκευαστικής εφαρμογής αλλά και για την πώληση έξτρα ενέργειας προς το δίκτυο ή σε άλλους βιομηχανικούς χώρους.

Από τα υποβρύχια συστήματα βαρυτικής ενέργειας θα επιλέξω το σύστημα UGES το οποίο μπορεί εύκολα να κλιμακωθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές που κυμαίνονται από MW έως GW και δεν υπάρχει απώλεια ενέργειας με την πάροδο του χρόνου, δίνοντας στο UGES τη δυνατότητα να αποθηκεύει ενέργεια για σχεδόν απεριόριστες διάρκειες και έχει πολύ φθινό κόστος ηλεκτρικής ισχύος έως και 150 (\$/kW) και ενέργειας 100 (\$/kWh).

## 6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Τα σημερινά λιμάνια γίνονται μεγαλύτερα, πιο πολυσύχναστα και αντιμετωπίζουν όλο και περισσότερες προκλήσεις καθώς σχεδιάζουν να παραμείνουν ένα βήμα μπροστά με την απόδοση του εφοδιασμού. Ο αυτοματισμός, η συνδεσιμότητα και η ηλεκτροκίνηση είναι από τις τάσεις με τον υψηλότερο αντίκτυπο. Ωστόσο μέχρι τώρα η συζήτηση για την ηλεκτροδότηση των τερματικών σταθμών έχει επικεντρωθεί σε μεγάλο βαθμό σχετικά με τις τεχνικές λεπτομέρειες του σχεδιασμού του εξοπλισμού καθώς και τις εξελίξεις σε τεχνολογία φόρτισης και αποθήκευσης ενέργειας. Για την μείωση κατανάλωσης του ηλεκτρισμού πρέπει να εξεταστεί μια πιο εκτεταμένη προοπτική για ολόκληρη την ενεργειακή διαχείριση του τερματικού σταθμού με παράλληλα ευφυή δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας όπως αυτοματισμοί, ψηφιοποίηση και αύξηση συνδεσιμότητας παγκόσμιων αλυσίδων logistics. Η ανανεώσιμη ενέργεια έχει αποδειχθεί ότι είναι μια μελλοντική πηγή ενέργειας, επομένως κατάλληλη και πρέπει να διερευνηθούν νέοι μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθήκευση ενέργειας με στερεά βάρη (βαρυτική ενέργεια) εξακολουθεί να μελετάται και οι δυνατότητές της ως μελλοντικό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας είναι ακόμη άγνωστες. Μέχρι στιγμής, έχει αποδειχθεί ότι είναι ο πιο αποτελεσματικός και περιβαλλοντικά επωφελής τρόπος.

## Παραρτήματα

---

Ιστοσελίδα: Google.com

Υπολογιστικό πρόγραμμα : Microsoft Excel

Σχεδιαστικό πρόγραμμα : AutoCAD 2021

## Βιβλιογραφία

---

- [1] A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. Abraham Alem Kebede, Theodoros Kalogiannis, Joeri Van Mierlo, Maitane Berecibar.
- [2] Review of energy storage technologies for sustainable power networks. D.O. Akinyele, R.K. Rayudu School of Engineering and Computer Science, Victoria University of Wellington, Wellington 6140, New Zealand.
- [3] DOGES: Deep Ocean gravitational energy storage. R. Cazzanigaa, M. Cicua, T. Marranaa, M. Rosa-Clota, P. Rosa-Clota, G.M. Tinab, Koiné Multimedia srl Italy, Pisa, Italy DIEEI University of Catania, Italy.
- [4] Storage Gravitational Energy for Small Scale Industrial and Residential Applications. Ana Cristina Ruoso 1, Nattan Roberto Caetano 1 and Luiz Alberto Oliveira Rocha 2, Department of Production Engineering, Technology Center, Federal University of Santa Maria, Av. Roraima 1000, 97105-900 Santa Maria, Brazil; anacristinaruoso@mail.ufsm.br (A.C.R.); nattan.caetano@ufsm.br (N.R.C.) 31 October 2019.
- [5] Capability study of dry gravity energy storage. C.D. Botha\*, M.J. Kamper Stellenbosch University, South Africa 16 March 2019.
- [6] Redesign options of large container vessels in order to comply better with the COFASTRANS system for loading/unloading from both sides. TSAGANOS Leonidas – Nektarios. NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS SCHOOL OF NAVAL ARCHITECTURE & MARINE ENGINEERING DIVISION OF MARINE STRUCTURES SHIPBUILDING TECHNOLOGY LABORATORY Athens, March 2020.
- [7] KONECRANES. (2020). Rubber Tired Gantry Cranes. Retrieved from <https://www.konecranes.com/en-us/equipment/container-handling-equipment/rubber-tired-gantry-cranes>.
- [8] Crane Double Cycling in Container Ports: Effect on Ship Dwell Time. Anne V. Goodchild and Carlos F. Daganzo. Institute of Transportation Studies University of California at Berkeley July 2005
- [9] Opportunities for peak shaving the energy demand of ship-to-shore quay cranes at container terminals. Harry Geerlings, Robert Heij & Ron van Duin 26 February 2018.

[10] Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression. Julian David Hunt, Behnam Zakeri, Alexandre Giulietti de Barros d, Walter Leal Filho, Augusto Delavald Marques, Paulo S´ergio Franco Barbosa, Paulo Smith Schneider, Marcelo Farenzena 18May 2021.

[11] Sizing of underwater gravity storage with solid weights participating in electricity markets. Jean-François Toubeau, Chloé Ponsart, Christophe Stevens, Zacharie De Grève, François Vallée 22 June 2020.

[12] A Comparative Study of Energy Storage Systems and Active Front Ends for Networks of Two Electrified RTG Cranes. Feras Alasali, Antonio Luque, Rayner Mayer and William Holderbaum 10 May 2019.

[13] High-Speed Flywheel and Motor Drive Operation for Energy Recovery in a Mobile Gantry Crane. M. M. Flynn, P. McMullen, O. Solis.

[14] PEMA. (2011). ENERGY AND ENVIRONMENTAL EFFICIENCY IN PORTS & TERMINALS.

<https://www.pema.org/wpcontent/uploads/downloads/2011/06/PEMA-IP2-Energy-and-Environmental-Efficiency-in-Ports-and-Terminals.pdf>

[15] Smoothing the demand of RTG cranes with intelligent energy storage systems. Richard Bradshaw, Ziad Banna, William Holderbaum & Rayner Mayer. [https://www.tocevents-europe.com/content/dam/Informa/toc-events-europe/presentations/tech-toc-presentations-/clean-technologies/Rayner\\_Mayer\\_Richard\\_Bradshaw.pdf](https://www.tocevents-europe.com/content/dam/Informa/toc-events-europe/presentations/tech-toc-presentations-/clean-technologies/Rayner_Mayer_Richard_Bradshaw.pdf)

[16] Game-Based Energy Management Method for Hybrid RTG Cranes. Dawei Chen, Wangqiang Niu, Wei GU and Nigel Schofield 19 September 2019.

[17] SKELETON TECHNOLOGIES. (2020) Ultracapacitors Cut Energy Consumption of Port Cranes by 30%.

<https://www.skeletontech.com/skeleton-blog/ultracapacitors-cut-energy-consumption-of-port-cranes-by-30?fbclid=IwAR1A4UuwfOHWZziIJ7qOzuA3v4UUstdu0n3yFmPX8JHVMJsf0yM7zkv54>

[18] Ultracapacitors for Port Crane Applications: Sizing and Techno-Economic Analysis. Mostafa Kermani, Giuseppe Parise, Ben Chavdarian and Luigi Martirano 22 April 2020.

- [19] Modeling and Simulation of an Electromechanical System for a Hybrid Rubber Tire Gantry Crane. S.R.A Bolonne, D.P Chandima Department of Electrical Engineering University of Moratuwa, Sri Lanka 28 Sep 2018.
- [20] Review and prospect of compressed air energy storage system. Laijun CHEN<sup>1</sup>, Tianwen ZHENG, Shengwei MEI, Xiaodai XUE, Binhui LIU, Qiang LU<sup>1</sup> 13 September 2016.
- [21] Compressed Air Energy Storage. Lee Layton, PE. PDHonline Course E365 (4 PDH) 2012
- [22] Economic Modeling of Compressed Air Energy Storage. Yang GU, James McCalley, Ming Ni and Rui Bo 18 April 2013.
- [23] DC Bus Regulation with a Flywheel Energy Storage System. Barbara H. Kenny, Peter E. Kascak NASA/TM—2002-211897/REV1 January 2013.
- [24] Modeling and Analysis of a Flywheel Energy Storage System for Voltage Regulation. Kamran Masteri Farahani. Ryerson University 1 January 2012.
- [25] STORNETIC. (2018). Powerful Storage System for Grid Services. [https://d3pcsg2wjg9izr.cloudfront.net/files/92540/download/702398/1-stornetic\\_general\\_presentation.pdf](https://d3pcsg2wjg9izr.cloudfront.net/files/92540/download/702398/1-stornetic_general_presentation.pdf)
- [26] Lithium batteries and ultracapacitors alone and in combination in hybrid vehicles: Fuel economy and battery stress reduction advantages. Andrew Burke, Marshall Miller, and Hengbing Zhao. Institute of Transportation Studies, University of California-Davis. November 2010.
- [27] Control of a Super-Capacitor Based Energy Storage System. Ding Wu. 2013
- [28] MAXWELL. (2021). Maxwell's High Power and Energy Cell. [https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/09/3003279.2\\_Final-DS\\_New-2.7V-3000F-Cell\\_20210406.pdf](https://maxwell.com/wp-content/uploads/2021/09/3003279.2_Final-DS_New-2.7V-3000F-Cell_20210406.pdf)
- [29] Kokam. (2022). ESS Battery Solution. <https://kokam.com/en/product/system/ess-solution>
- [30] Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids. Holger C. Hesse, Michael Schimpe, Daniel Kucevic and Andreas Jossen 11 December 2017.



[31] USE OF LITHIUM BATTERIES IN THE MARINE AND OFFSHORE INDUSTRIES. American Bureau of Shipping. 15 JULY 2018.

[32] LIBHERR. (2022). Ship to shore container cranes.  
<https://www.liebherr.com/en/can/products/maritime-cranes/port-equipment/container-bridges/ship-to-shore-container-cranes.html>

[33] Implementation of energy recovery and storage systems in cranes in the Port of Gavle. Pierre Ander Aranaga Decori June 2020.

[34] <https://www.dei.gr/el/gia-tin-epixeirisi/revma/epaggelmaties-epixeiriseis/g22/>

[35] <https://www.dei.gr/el/gia-tin-epixeirisi/revma/epaggelmaties-epixeiriseis/g23/>

## Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

---

ESDs	Energy storage devices
EES	Electric energy storage
TES	Thermal energy storage
FBES	Flow battery energy storage
VRFB	Vanadium Redox flow batteries
PSB	Polysulphide Bromine flow batteries
Zn Br	Zinc Bromine flow batteries
SCES	Super capacitor energy storage
SMES	Superconductive magnetic energy storage
STES	Sensible thermal energy storage
PCM	Latent-phase change material
TCS	Thermochemical storage
PHS	Pumped hydro storage
CAES	Compressed air energy storage
FES	Flywheel energy storage
Li-ion	Lithium-ion
Pb-Acid	Lead-acid
Ni-Cd	Nickel-cadmium
Ni-MH	Nickel-metal hydride
Na-S	Sodium-sulphur
NaNiCl <sub>2</sub>	Sodium nickel chloride
Li-S	Lithium-Sulphur batteries
M-ion	Metal-ion Batteries

MW	Megawatt
MWh	Megawatt hour
KW	Kilowatt
KWh	Kilowatt hour
Wh/kg	Watt hour per kilogram
W/kg	Watt per kilogram
KWh/m <sup>3</sup>	Kilowatt hour per cubic meter
KW/m <sup>3</sup>	Kilowatt per cubic meter
ms	Milli-second
hr	Hour
STS	Ship to shore crane
RTG	Rubber tyred gantry crane
CT	Container and Container Terminal