

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ

Βιβλιογραφική επισκόπηση
Σταθμών Ηλεκτροπαραγωγής με
Συγκεντρωτικούς Συλλέκτες

Τομέας: Θερμότητας

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2024



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Ονοματεπώνυμο
Γεώργιος Παπαγεωργίου

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη, καταγραφή, ανάλυση και βιβλιογραφική επισκόπηση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν συγκεντρωτικά ηλιοθερμικά συστήματα. Καθώς πρόκειται για μια εν εξελίξει τεχνολογία καταγράφηκαν όσο το δυνατόν πιο επικαιροποιημένα δεδομένα που καταγράφονται παγκοσμίως.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική εισαγωγή στην ιστορία της ανθρώπινης ενεργειακής εξέλιξης, της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης και παραγωγής, καθώς και του ευρύτερου ενεργειακού προβλήματος. Σε ότι αφορά το ενεργειακό πρόβλημα αναλύονται οι παράμετροι της κλιματικής αλλαγής, της ενεργειακής φτώχειας, η σχέση ενέργειας και γεωπολιτικών κρίσεων και η παγκόσμια αναντιστοιχία ενεργειακής ζήτησης και ενεργειακής προσφοράς.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται σε γενικό επίπεδο τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ενέργειας και της ηλιακής ακτινοβολίας. Γίνεται αναφορά στα αστρονομικά δεδομένα της θέσης Γης-Ήλιου και των ηλιακών γωνιών.

Στο τρίτο κεφάλαιο εξετάζονται οι ηλιακοί συλλέκτες που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας. Οι δύο μεγάλες κατηγορίες, συγκεντρωτικοί και μη συγκεντρωτικοί συλλέκτες, αποτελούν το αντικείμενο μελέτης όπως και οι διάφορες υποκατηγορίες τους. Γίνεται ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών και των υλικών κατασκευής κάθε κατηγορίας, όπως και οι παράμετροι σχεδίασης που τις χαρακτηρίζουν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα βασικό χαρακτηριστικό και πλεονέκτημα των συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών συστημάτων, η θερμική αποθήκευση. Πρόκειται για το σύστημα που αποθηκεύει την περίσσεια ενέργειας του συνολικού συστήματος παραγωγής με σκοπό την εκμετάλλευση σε μεταγενέστερο χρόνο. Καταγράφονται τα διαφορετικά συστήματα θερμικής αποθήκευσης και τα χαρακτηριστικά τους ανάλογα τη λειτουργία και τα υλικά μέσα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξετάζεται η σύγχρονη κατάσταση σε επίπεδο εμπορικών εγκαταστάσεων των συγκεντρωτικών ηλιοθερμικών συστημάτων. Γίνεται μια καταγραφή και σύγκριση ανάλογα τα οικονομικά μεγέθη, την τοποθεσία και την εκάστοτε τεχνολογία.

Λέξεις-Κλειδιά : Ενεργειακό πρόβλημα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Θερμική Αποθήκευση, Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα, Ηλιακή Ενέργεια, Σταθμοί Ηλεκτροπαραγωγής, Παραβολικά Κοίλα Κάτοπτρα, Ηλιακός Πύργος Ισχύος, Συλλέκτης Fresnel, Συστήματα δίσκου μηχανής, Σύνθετοι Παραβολικοί Συλλέκτες

Abstract

The aim of this thesis is the study, recording, analysis and literature review of power plants with concentrated solar thermal systems. As this is an ongoing technology, as up-to-date as possible data worldwide were used.

The first chapter provides a general introduction to the history of human energy evolution, global energy consumption and production, and the wider energy problem. As far as the energy problem is concerned, the parameters of climate change, energy poverty, the relationship between energy and geopolitical crises and the global mismatch between energy demand and energy supply are analyzed.

The second chapter describes the characteristics of solar energy and solar radiation at a general level. Reference is made to the astronomical data on the Earth-Sun position and solar angles.

The third chapter discusses the solar panels used to harness solar energy. The two major categories, concentrating and non-concentrating collectors, are the subject of study as well as their various subcategories. An analysis of the technical characteristics and materials of construction of each category is given, as well as the design parameters that characterize them.

Chapter four presents a key feature and advantage of concentrating solar thermal systems, namely thermal storage. This is the system that stores the excess energy of the overall production system for use at a later time. The different thermal storage systems and their characteristics depending on the function and the material means are listed.

In chapter five, the current situation at the commercial installation level of concentrated solar thermal systems is discussed. An inventory and comparison is made depending on the economic sizes, location and the technology in question.

Keywords : Energy problem, Renewable energy sources, Thermal storage, Concentrating Solar Thermal Systems, Solar Energy, Solar Energy, Power Plants, Parabolic Trough Collectors, Solar Power Tower, Fresnel Collector, Collector Dish-Engine, Compound Parabolic Collectors

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Ιστορική ανασκόπηση της ενεργειακής εξέλιξης	7
1.2 Ενεργειακά Συστήματα & Ενεργειακή Παραγωγή και Κατανάλωση	11
1.3 Ενεργειακό Πρόβλημα	17
1.3.1 Αυξανόμενη Ζήτηση έναντι Περιορισμένης Προσφοράς	17
Σχήμα 1.11: Εκτίμηση ετών της εναπομείνουσας παραγωγής ορυκτών καυσίμων με	
βάση τα γνωστά αποθέματα και τα τρέχοντα επίπεδα ετήσιας παραγωγής ορυκτών	
καυσίμων. [32]	22
1.3.2 Κλιματική Αλλαγή	22
1.3.3 Ενέργεια & Γεωπολιτικές Κρίσεις	25
1.3.4 Ενεργειακή Φτώχεια-Ενεργειακή Ανισότητα	29
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	33
2.1 Ηλιακή Ενέργεια και Ηλιακή Ακτινοβολία	33
2.2 Ηλιακές Γωνίες και Αστρονομικά Δεδομένα	36
2.3 Ηλιακό Δυναμικό	41
2.4 Εκμετάλλευση και μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική	44
3. ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ	51
3.1 ΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ (NON-CONCENTRATING COLLECTORS)	51
3.1.1 Συλλέκτες Επίπεδης Πλάκας (Flat Plate Collectors)	52
3.1.2 Συλλέκτες με Σωλήνα Κενού (Evacuated Tube Collectors)	54
3.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ	55
3.2.1 Γραμμικοί Συλλέκτες Fresnel	55
3.2.2 Παραβολικός Κοίλος Συλλέκτης (Parabolic Trough Collector)	60
3.2.3 Παραβολικός Δίσκος-Μηχανή (Parabolic Dish-Engine)	71
3.2.4 Σύνθετοι Παραβολικοί Συλλέκτες (Compound Parabolic Collectors)	79
3.2.5 Πύργος Ηλιακής Ισχύος (Solar Power Tower)	83
4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (THERMAL ENERGY STORAGE) 97	
4.1 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	97
4.1.1 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΑΜΕΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ	
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ(ACTIVE DIRECT TES SYSTEMS)	98
4.1.2 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΕΜΜΕΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
(ACTIVE INDIRECT SYSTEMS)	99
4.1.3 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΜΜΕΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
ΜΟΝΟΥ ΔΟΧΕΙΟΥ-ΘΕΡΜΟΚΛΙΝΗΣ (SINGLE-TANK THERMOCLINE TES SYSTEM)	100
4.1.4 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ PACKED BED(ΠΑΚΤΩΜΕΝΕΣ-	
ΣΚΕΠΑΣΜΕΝΕΣ ΚΛΙΝΕΣ)	102
4.1.5 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΙΟΥ ΜΠΛΟΚ (CONCRETE BLOCKS BASED)	
105	

4.2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΚΑΙ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	106
4.2.1	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (SENSIBLE HEAT STORAGE SYSTEMS)	106
4.2.2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (LATENT HEAT STORAGE SYSTEMS)	116
4.2.3	ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	125
5.	Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	128
5.1	ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ	128
5.1.1	Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ	128
5.1.2	ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑΘΜΩΝ CSP ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ	130
5.2	ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	140
5.3	ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ Α.Π.Ε. ΜΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ CSP	145
5.3.1	Υβριδικά CSP/Αιολικά, CSP/ΦΒ με αποθήκευση θερμικής ενέργειας	146
5.3.2	Υβριδικό CSP/ΦΒ/Αιολικά με αποθήκευση θερμότητας	148
5.3.3	Υβριδική γεωθερμία/CSP με TES	149
5.4	ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ (INTEGRATED SOLAR COMBINED CYCLE POWER PLANTS)	150
5.5	ΤΕΧΝΙΚΕΣ & ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ	154
5.5.2	3 ^{ης} ΓΕΝΙΑΣ ΣΤΑΘΜΟΙ CSP	157
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	159

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική ανασκόπηση της ενεργειακής εξέλιξης

Η έννοια της ενέργειας, παρότι θεμελιώδης έννοια της φύσης, για αιώνες παραμένει δύσκολα ακριβώς κατανοήσιμη και ορίσιμη ακόμα και από ανθρώπους εξοικειωμένους με τις φυσικές επιστήμες. Εν τούτοις εμπεριέχει στην ίδια την ετυμολογία της από την αρχαία ελληνική προέλευσή της έναν επαρκή ορισμό: “έν”= εντός ή εσωτερικά + “ έργον”=έργο, ικανό να αντικατοπτρίσει την ιδέα ότι η ενέργεια εμπεριέχεται (= εν + περιέχω) ως δυνατότητα παραγωγής έργου σε κάθε φυσικό σύστημα.

Αμέτρητες ενεργειακές επιταγές , από την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη Γη μέχρι τις ελάχιστες θερμοκρασίες που απαιτούνται για τη λειτουργία χιλιάδων ενζύμων, ανέκαθεν διαμόρφωναν τη ζωή στη Γη, ελέγχοντας το περιβάλλον και θέτοντας τα όρια της ζωής των οργανισμών. Η ντετερμινιστική ερμηνεία του ρόλου της ενέργειας στην παγκόσμια ιστορία του ανθρώπου φαίνεται να αποτελεί μια φυσική πρόταση , εφόσον η ιστορία παρατηρηθεί ως μια συνεχής αναζήτηση για εξέλιξη και ανάπτυξη που επιτυγχάνεται αξιοποιώντας υψηλότερα επίπεδα ενέργειας [1]. Η χρονολόγηση αυτής της αναζήτησης με βάση τις επικρατούσες κινητήριες μηχανές , μηχανές μετατροπής ενέργειας και τις πηγές θερμότητας αναδεικνύει την σπουδαιότητα των ενεργειακών μεταβάσεων και διαχωρίζει την εξέλιξη του ανθρώπινου είδους σε ξεχωριστές ενεργειακές περιόδους.

Έτσι, η πρώτη ενεργειακή εποχή εκκινεί ταυτόχρονα μαζί με την ανθρώπινη προϊστορία, τον *Homo Erectus* πριν από 1,8 εκατομμύρια χρόνια [2]. Καθ’ όλη τη διάρκεια αυτής της προϊστορικής εποχής το ανθρώπινο είδος βασίστηκε εξ ολοκλήρου στη σωματική του ενέργεια, μετατρέποντας δηλαδή τη χημική ενέργεια των τροφών του σε μηχανική ενέργεια, απλώς στη μορφή της φυσικής του δύναμης εφαρμοζόμενης σε εκτελέσεις εργασιών για την επιβίωσή του. Οι βιολογικές απαιτήσεις και η μηχανική απόδοση των μυών (που δεν μπορούν να μετατρέψουν περισσότερο από το 20-25% της προσλαμβανόμενης τροφής σε κινητική ενέργεια) διέπουν αυτές τις προσπάθειες: οι υγιείς ενήλικες μικρότερου αναστήματος δεν μπορούν να διατηρήσουν χρήσιμο έργο σε ρυθμούς άνω των 50-90 W, όπως τη μετακίνηση αντικειμένων και κατασκευή καταλυμάτων και μπορούν να αναπτύξουν ισχύ 102 W μόνο κατά τη διάρκεια σύντομων περιόδων συγκεντρωμένης άσκησης [1], όπως ορισμένες μορφές κυνηγιού θηραμάτων.

Η αλματώδης μετάβαση στην ενεργειακή εξέλιξη ήταν όμως η *ανακάλυψη της φωτιάς*, της οποίας η σπουδαιότητα μνημονεύεται ποικιλοτρόπως παγκοσμίως όπως στον αρχαίο ελληνικό μύθο του Προμηθέα. Σύμφωνα με το μύθο, ο Προμηθέας έκλεψε τη φωτιά από τους θεούς και την έδωσε στους ανθρώπους, αλλά η φωτιά αντιπροσώπευε ως σύμβολο την ίδια τη δύναμη της γνώσης , της τεχνολογίας και του πολιτισμού ευρύτερα. Έτσι, λοιπόν παρόλο που το φυσικό

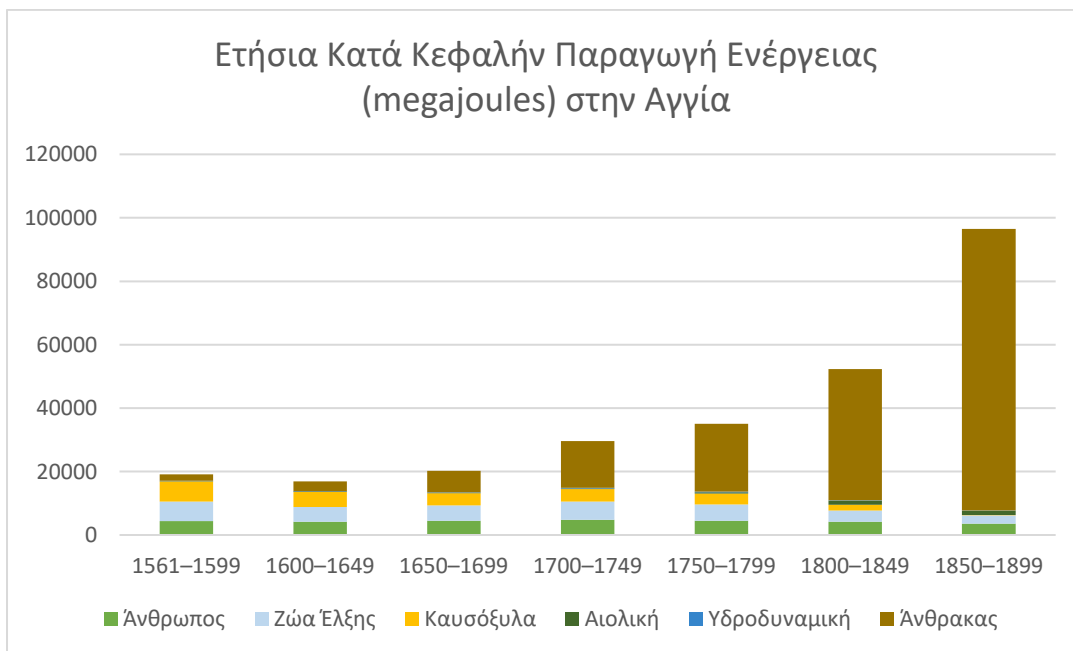
φαινόμενο της φωτιάς επηρέαζε όλα τα φυσικά είδη, μόνο το ανθρώπινο είδος έμαθε να την ελέγχει και να τη δημιουργεί κατά βούληση ή ακριβέστερα να εκμεταλλεύεται ωφέλιμα μιας ελεγχόμενης από τον ίδιο εξώθερμης καύσης. Ο έλεγχος της φωτιάς παρείχε στον άνθρωπο μια πηγή θερμότητας και φωτισμού, προστασία από τους θηρευτές του και τη δυνατότητα για τη δημιουργία πιο εξελιγμένων εργαλείων και νέες μεθόδους μαγειρέματος της τροφής του [1]. Έκτοτε και συνεπακόλουθα αυτής της ανακάλυψης το ανθρώπινο είδος εξαπλώθηκε γεωγραφικά σε πιο ψυχρά κλίματα και άλλαξε άρδην τις διατροφικές, συμπεριφορικές και κοινωνικές συνήθειες, προδιαγράφοντας σε τέτοιο βαθμό την μετέπειτα εξέλιξη του πολιτισμού του, που κατά τον Δαρβίνο θεωρείται η σπουδαιότερη ανακάλυψη της ανθρωπότητας, εξαιρουμένης μόνο της γλώσσας [2].

Ο άνθρωπος, φυσικά, συνέχισε για χιλιάδες χρόνια να προσπαθεί για εύρεση λύσεων μιας πιο αποδοτικής ενεργειακής εκμετάλλευσης προς όφελος των αναγκών του με αποτέλεσμα το κορυφαίο σημείο καμπής της ιστορίας την 1^η Βιομηχανική Επανάσταση και την έναρξή της στη Βρετανία στη δεκαετία του 1780 [6]. Μέχρι τα μέσα του 18ου αιώνα η Βρετανία ήταν το κορυφαίο εμπορικό έθνος στον κόσμο, ελέγχοντας μια παγκόσμια εμπορική αυτοκρατορία με αποικίες από τη Βόρεια Αμερική και την Καραϊβική μέχρι την Ινδία και την Αυστραλία κυρίως μέσω των δραστηριοτήτων της Εταιρείας Ανατολικών Ινδιών [7]. Οι ενεργειακές απαιτήσεις του υπερπόντιου εμπορίου και των επιχειρήσεων της Βρετανικής Αυτοκρατορίας ήταν οι κύριες αιτίες της 1^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης [8], ωθώντας σε πρωτοποριακές εφευρέσεις και εξελίξεις. Αξιοσημείωτες θεωρούνται η βελτίωση της ατμομηχανής των Παπέν και Σείβερν από τον Άγγλο μηχανικό Thomas Newcomen (1663-1729) και μετέπειτα η ατμομηχανή του Watt, που αποτέλεσε από το 1787 μια κινητήρια μηχανή γενικής χρήσης, ανοίγοντας το δρόμο για τη δημιουργία μεγάλων μονάδων παραγωγής και την εγκατάσταση δικτύου σιδηροδρομικών και ακτοπλοϊκών μεταφορών.

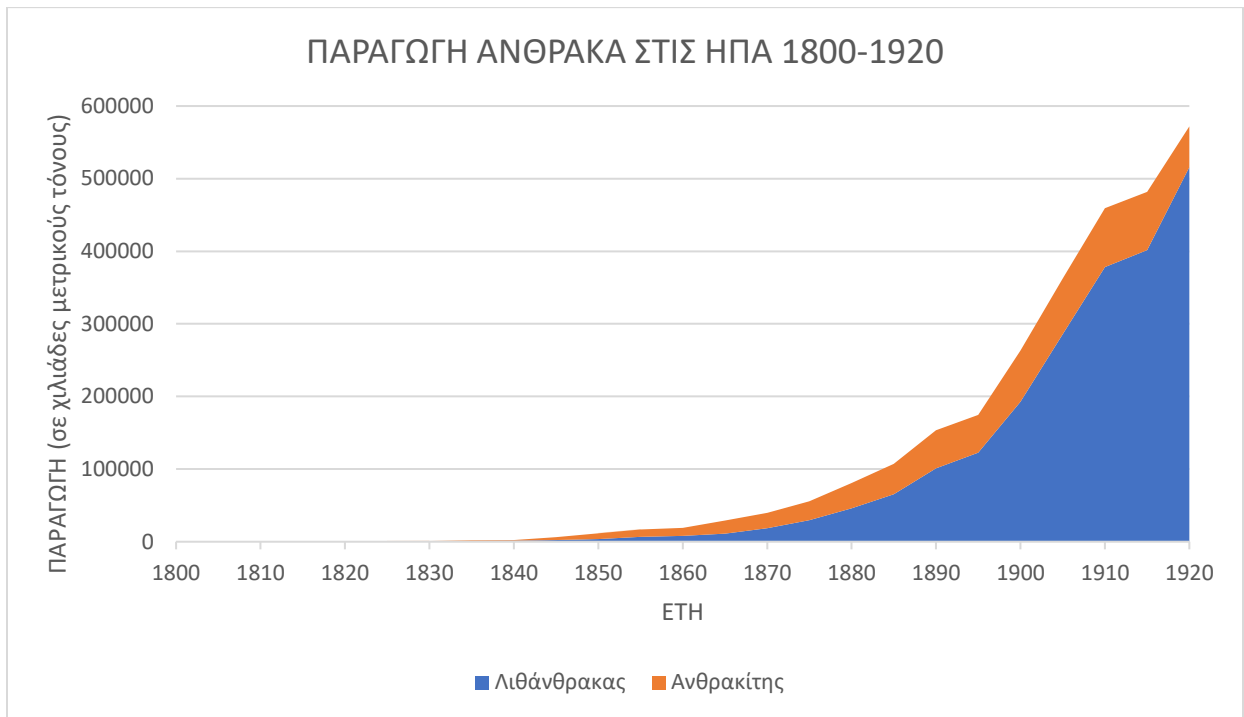
Αυτή η ανάπτυξη των ατμομηχανών αποδείχτηκε κρίσιμης σημασίας για να καταστεί δυνατή η επίλυση ολόκληρου του φάσματος των προβλημάτων παροχής ενέργειας, διότι επέτρεψε τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική. Μάλιστα ο όρος *ενέργεια* δεν είχε μέχρι τότε αποδεκτός, στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, όταν πλέον προεκτάθηκε και επιστημονικά τεκμηριωμένα από την μηχανική, από τον Σκώτο χημικό James Prescott Joule (1818-1889), για να συμπεριλάβει την εσωτερική ενέργεια της θερμοδυναμικής και την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια. Ο Émile Levasseur, γράφοντας προς το τέλος του δέκατου ένατου αιώνα, επιγραμματικά αποτύπωσε με γλαφυρό τρόπο τη σημασία της ατμομηχανής. Σημειώνοντας ότι η ισχύς ενός ατμοκίνητου ίππου υπολογιζόταν ότι παρείχε το ισοδύναμο ισχύος 21 χειρωνακτικών εργατών, υπέδειξε ότι στη Γαλλία γύρω στο 1840 οι ατμομηχανές εκτελούσαν την εργασία 1,2 εκατομμυρίων εργατών, αλλά ότι στα μέσα της δεκαετίας του 1880 η ταχεία επέκταση της χρήσης των ατμομηχανών σήμαινε ότι ο αριθμός αυτός είχε αυξηθεί σε 98 εκατομμύρια εργάτες, "δυόμισι δούλοι για κάθε κάτοικο της Γαλλίας" [9].

Βέβαια, η ενεργειακή αυτή μετάβαση λόγω των ατμομηχανών, αρχικά στην πρωτοστατούσα Αγγλία, υπήρξε άμεσα αλληλοτροφοδοτούμενη με την παραγωγή και τις απαιτήσεις σε

άνθρακα, το καύσιμο της νέας αυτής ενεργειακής εποχής. Συγκεκριμένα, την περίοδο 1650-1850 η κατά κεφαλήν κατανάλωση άνθρακα στην Αγγλία δεκατριπλασιάστηκε (βλ. Σχήμα 1, [10]) και κατά μέσο όρο κάθε 50 χρόνια διπλασιαζόταν [11]. Πέρα από κάθε άλλο παράγοντα, η ειδική θερμοχωρητικότητα και η θερμογόνος δύναμη του άνθρακα έναντι του ξύλου ήταν αυτή που τον επέβαλλε ουσιαστικά ως το κυρίαρχο καύσιμο για τις ατμομηχανές τις εποχής, καθώς ένα κιλό άνθρακα περιέχει 33% περισσότερη ενέργεια από ένα κιλό ξηρού ξύλου. Απόδειξη της επικράτησης του άνθρακα ως καύσιμο αποτελεί, επίσης, η ιστορική μεταβολή στον μετέπειτα βιομηχανικό κολοσσό, τις ΗΠΑ, όπου η εξόρυξη άνθρακα, είτε ως λιθάνθρακα είτε ως ανθρακίτης (είδος γαιάνθρακα) αυξήθηκε από 100.000 τόνους το 1800 σε 17,52 εκατομμύρια τόνους το 1860 (βλ. Σχήμα 2), ήτοι 180 φορές μεγαλύτερη [12].



Σχήμα 1.1 : Ετήσια κατά κεφαλήν κατανάλωση ενέργειας (megajoules) στην Αγγλία την περίοδο 1561-1899 [10]



Σχήμα 1.2 : Παραγωγή Άνθρακα (Λιθάνθρακα & Ανθρακίτη) στις ΗΠΑ στην 1^η & 2^η Βιομηχανική επανάσταση 1800-1920. [13] & [14]

Μετάπειτα στην ίδια χώρα, τις ΗΠΑ, συμβαίνουν τεχνολογικά άλματα τέτοια σημασίας που θεωρείται από τους ιστορικούς ότι σηματοδοτούν την 2^η βιομηχανική επανάσταση. Έτσι, το 1859, ο συνταγματάρχης Ντρέικ ξεκίνησε την έρευνα για "πετρέλαιο από πετρώματα" στο Titusville της Πενσυλβάνια, όπου μπόρεσε να χρησιμοποιήσει μια νεοσύστατη τεχνολογία διατηρώντας έτσι την καθαρότητα του εξορυσσόμενου πετρελαίου. Η επιτυχία του πυροδότησε μια άνθηση του πετρελαίου που εξαπλώθηκε γρήγορα σε όλες τις ΗΠΑ.

Τη δεκαετία πριν από τη διάνοιξη της πρώτης πετρελαιοπηγής από τον συνταγματάρχη Ντρέικ, αρκετοί χημικοί εργάστηκαν με πετρέλαιο για να εξαγάουν καύσιμα για λάμπες. Ένας Καναδός, ο Abraham Gesner, επινόησε τον όρο "κηροζίνη" και δημιούργησε μια μικρή αγορά στις ΗΠΑ και τον Καναδά από το 1850 έως το 1854. Στην Ευρώπη, ο Ignacy Lukasiewicz βελτίωσε τη διαδικασία απόσταξης το 1852 και γενικά πιστώνεται με την εφεύρεση των βασικών στοιχείων της διύλισης του πετρελαίου. Μόλις οι γεωτρήσεις αργού πετρελαίου αναπτύχθηκαν και οι προμήθειες αυξήθηκαν, η κηροζίνη αποδείχθηκε αποδεκτός αντικαταστάτης του φαλαινέλαιου για φωτιστική χρήση, αλλά αποδείχθηκε ότι δεν ήταν η μόνη χρήση για τη νέα πηγή ενέργειας.

Οι πρώτοι διυλιστές, που διαχώριζαν το αργό πετρέλαιο σε τρία κύρια μέρη - τα ελαφρά άκρα που είναι παρόμοια με τη βενζίνη, τα μεσαία αποστάγματα που αποτελούνται από την κηροζίνη και το ντίζελ και τα βαρέα μαζούτ. Μάλιστα, τα δημοσιεύματα των εφημερίδων της

εποχής απεικόνιζαν τοπικούς διυλιστές να κατεβαίνουν κρυφά τη νύχτα και να ρίχνουν τα ελαφρά άκρα της διύλισης (βενζίνη) στα ποτάμια [15]. Τελικά αυτό αποδείχθηκε περιττό, καθώς η εύκολη διαθεσιμότητα φθηνής βενζίνης έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη του κινητήρα εσωτερικής καύσης και του αυτοκινήτου. Οι περισσότεροι από τους πρώτους κινητήρες μπορούσαν να λειτουργούν με μια ποικιλία αλκοολούχων και πετρελαϊκών υγρών, αλλά οι ταχέως αυξανόμενες προμήθειες αργού πετρελαίου και βενζίνης που προερχόταν από αυτό αλληλοτροφοδότησαν τις δύο εξελίξεις.

Ο Μάιμπαχ (Maybach) και ο Γκότλιμπ Ντάιμλερ (Gottlieb Daimler) κατασκεύασαν δικούς τους κινητήρες με βάση την πατέντα του Όττο, μια ατμοσφαιρική μηχανή αντίστοιχη του σημερινού τετρακύλινδρου βενζινοκινητήρα. Έτσι ο Karl Benz χρησιμοποιώντας την μηχανή αυτή, πιστώνεται με την εφεύρεση του πρώτου λειτουργικού αυτοκινήτου το 1886, το οποίο κινούνταν με προϊόντα πετρελαίου παρόμοια με τη σημερινή βενζίνη.

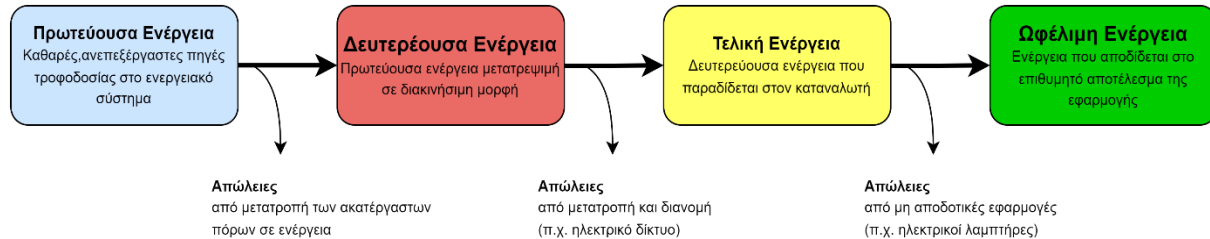
Παράλληλα με τις εξελίξεις στο πετρέλαιο και τις μηχανές εσωτερικής καύσης, μια άλλη αλληλουχία γεγονότων έμελλε να σημαδέψει τη 2^η Βιομηχανική επανάσταση και να καθορίσει το μέλλον της ανθρωπότητας και των ενεργειακών της αλλαγών. Αρχικά, το 1802, ο Humphry Davy εφηύρε το πρώτο ηλεκτρικό φως συνδέοντας την ηλεκτρική μπαταρία του σε ένα κομμάτι άνθρακα, ο οποίος ο άνθρακας έλαμψε, παράγοντας φως. Η εφεύρεσή του έγινε γνωστή ως ηλεκτρική λυχνία τόξου. Δεν ήταν όμως μέχρι το 1880, που ο Έντισον και η ομάδα του ανακάλυψαν ότι ένα ανθρακούχο νήμα μπαμπού μπορούσε να διαρκέσει πάνω από 1200 ώρες, ως βελτιωτική πατέντα στο λαμπτήρα, δημιουργώντας αυτό που σήμερα γνωρίζουμε ως λαμπτήρα πυρακτώσεως. Κι έτσι ο Έντισον και η εταιρεία του, Edison Electric Light Company, στις 4 Σεπτεμβρίου 1882, γύρισαν το διακόπτη και φωταγώγησε τη Νέα Υόρκη για πρώτη φορά με τον πρώτο σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τον Pearl Street Station [16], ξεκινώντας μια πορεία χωρίς επιστροφή για τις μελλοντικά γιγαντιαίες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια, που θα μας απασχολήσουν στο επόμενο κεφάλαιο.

1.2 Ενεργειακά Συστήματα & Ενεργειακή Παραγωγή και Κατανάλωση

Οι καινοτομίες και οι εφευρέσεις του παρελθόντος αφού άνοιξαν το δρόμο, βελτιώθηκαν και σε αυτές ήρθαν να προστεθούν κι άλλες εγκαθιδρύοντας τη σημερινή κατάσταση στο παγκόσμιο μίγμα παραγωγής ενέργειας. Όμως αυτός ο πλουραλισμός στην παραγωγή, μετατροπή και κατανάλωση ενέργειας δημιούργησε πολύπλοκα συστήματα τα οποία αποτελούνται από μεταβλητές και όρους που χρειάζεται να αποσαφηνιστούν.

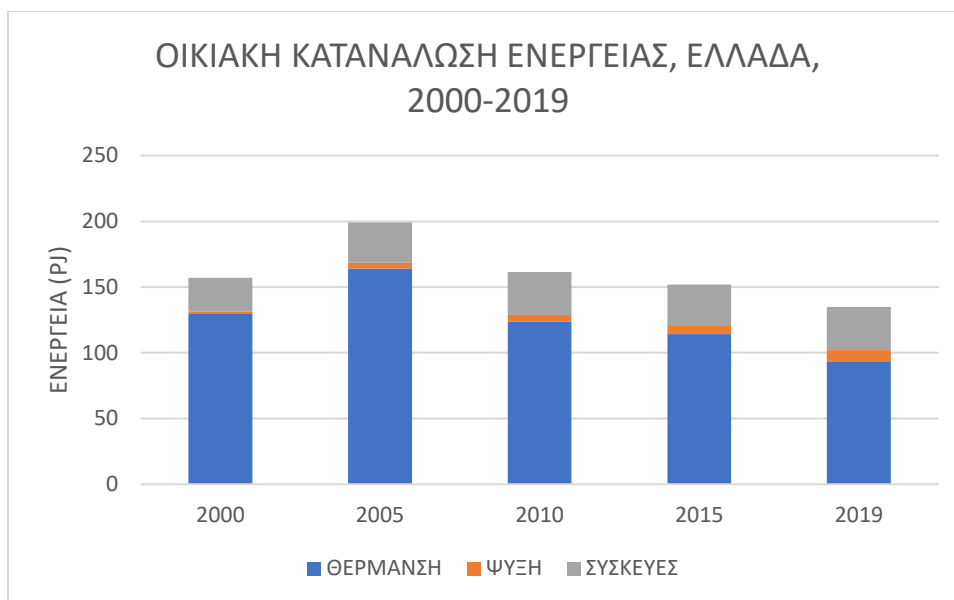
Στα υπό μελέτη ενεργειακά συστήματα χρησιμοποιείται ο όρος *φορέας ενέργειας*, εκφράζοντας ως μέσο που δύναται να παράξει ωφέλιμη ενέργεια άμεσα ή έμμεσα έπειτα από

μα διαδικασία μετατροπής. Ανάλογα το στάδιο μετατροπής χαρακτηρίζεται οι φορείς ενέργειας (και η ίδια η ενέργεια αντίστοιχα) ως πρωτεύοντες, δευτερεύοντες και τελικοί [20]. Όταν την *πρωτεύουσα ενέργεια* (ηλιακή ακτινοβολία, ισχύς ανέμου) και τους πρωτεύοντες ενεργειακούς φορείς (λιγνίτης, αργό πετρέλαιο, βιομάζα), που βρίσκονται στο περιβάλλον ως διαθέσιμοι πόροι, τους υποβάλλουμε σε οποιαδήποτε τεχνητή μετατροπή (π.χ καύση άνθρακα), μετατρέπονται σε δευτερεύουσα ενέργεια. Με τη σειρά της η δευτερεύουσα ενέργεια, πλέον σε μια μεταφερόμενη μορφή, μπορεί να μετατραπεί σε άλλη δευτερεύουσα ή σε τελική ενέργεια, η οποία αποτελεί την ενέργεια που ο καταναλωτής λαμβάνει (π.χ ηλεκτρισμός στο σπίτι, πετρέλαιο θέρμανσης σε λέβητα). Στο τελευταίο πλέον βήμα μετατροπής ο όρος *ωφέλιμη ενέργεια*, αναφέρεται ως την τελική ενέργεια που αποδίδει το επιθυμητό για τον καταναλωτή αποτέλεσμα αφαιρώντας τις όποιες απώλειες. Φυσικά σε όλα τα στάδια μετατροπής υπάρχουν πολλών ειδών απώλειες. (βλ. Σχήμα 1.3)



Σχήμα 1.3: Σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας μετατροπής από πρωτεύουσα ενέργεια σε ωφέλιμη [21].

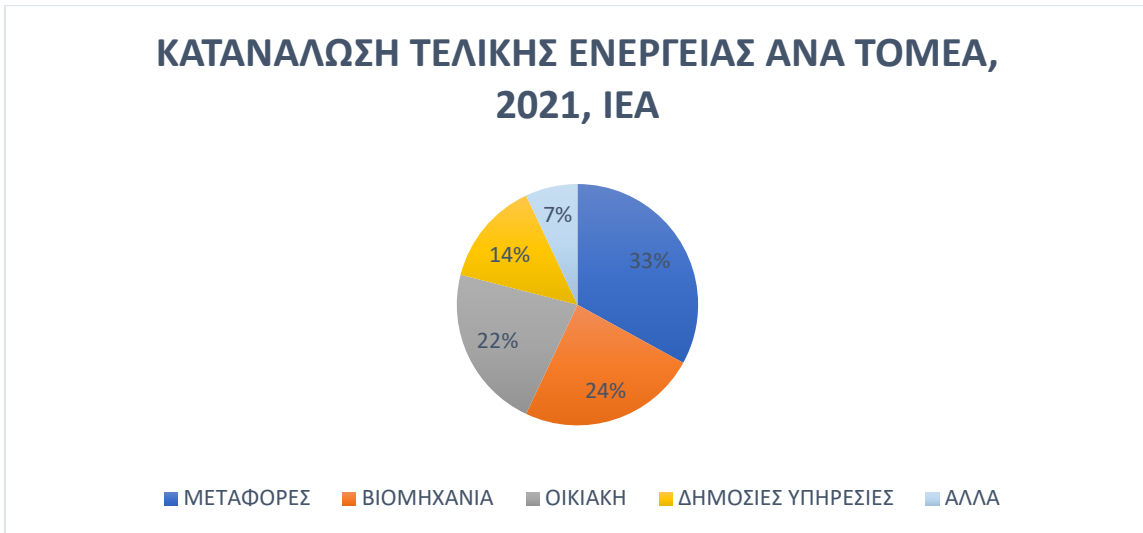
Η σημερινή κοινωνία, σε συνέχεια των Βιομηχανικών Επαναστάσεων, εξαρτάται πλήρως από αδιάκοπη παροχή *ωφέλιμης ενέργειας*. Ωφέλιμη ενέργεια ορίζουμε ως την ενέργεια που χρησιμοποιεί ο καταναλωτής για να ικανοποιήσει/πραγματοποιήσει τις αντίστοιχες απαιτήσεις του. Αυτές αποτελούν όλες τις διαδικασίες και ανάγκες της σημερινής καθημερινής μας ζωής π.χ. η προσαρμογή της θερμοκρασίας του χώρου στον οποίο βρισκόμαστε (βλ. Σχήμα 1.4)



Σχήμα 1.4: Η κατανάλωση ωφέλιμης ενέργειας στα νοικοκυριά στην Ελλάδα 2000-2019 [25]

Οι μελετητές συνηθίζουν να ομαδοποιούν όλες αυτές τις ενεργοβόρες δραστηριότητες στις εξής ευρύτερες κατηγορίες:

- Βιομηχανία
- Γεωργία
- Μεταφορές (Οδική, αερομεταφορά, σιδηροδρομική, ναυσιπλοΐα)
- Οικιακή χρήση (residential)
- Δημόσιες Υπηρεσίες (Services)
- Άλλα



Σχήμα 1.4: Ποσοστιαία Κατανομή της συνολικής κατανάλωσης Ωφέλιμης Ενέργειας (Energy End Use) ανά τομέα ανθρώπινης δραστηριότητας στις χώρες καταγραφής του ΙΕΑ(International Energy Agency)¹ το 2021 [22].

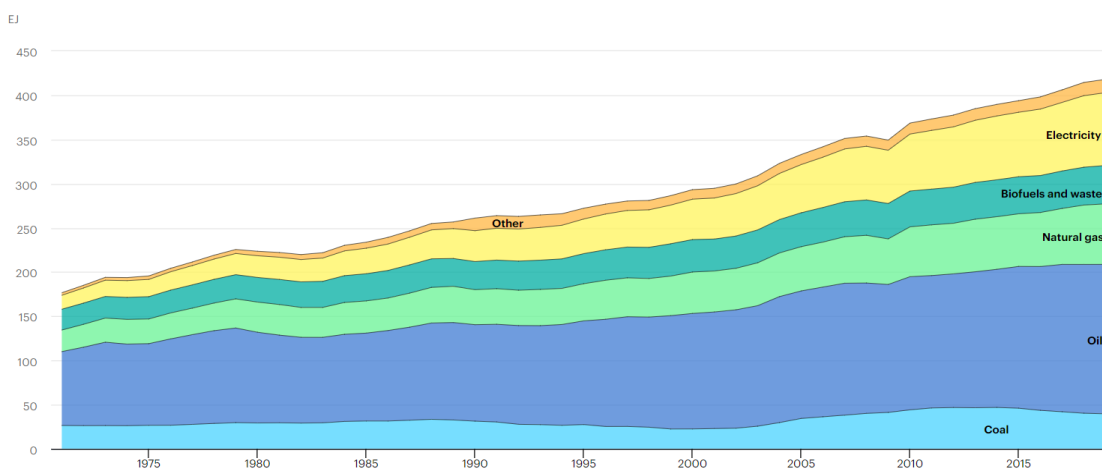


Σχήμα 1.5: Παγκόσμια Κατανάλωση Τελικής Ενέργειας ανά Τομέα ανθρώπινης δραστηριότητας το 2022 [22].

¹ International Energy Agency = Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας, ιδρύθηκε το 1974, την περίοδο της παγκόσμιας πετρελαϊκής κρίσης, αποτελώντας ακόμα και σήμερα τον βασικότερο διεθνή φορέα συντονισμού καταστάσεων διαταραχής εφοδιασμού στην τροφοδοσία πετρελαίου, μέσω των πολιτικών, μέτρων και σχεδίων δράσης που επεξεργάζεται. Τηρεί και επεξεργάζεται στατιστικά στοιχεία

Η κατανομή ενέργειας στις ανθρώπινες δραστηριότητες (βλ. Σχήμα 1.4) είναι κυρίως εστιασμένη στις μεταφορές, τη βιομηχανία, στην οικιακή χρήση και τις υπηρεσίες. Φυσικά, όλες αυτές οι κατηγορίες αποτελούν τα τελευταία στάδια χρήσης ενέργειας σε μια μακρά ροή ενέργειας ενός πολύπλοκου παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος. Νωρίτερα, προηγούνται οι εκάστοτε μορφές τελικής ή δευτερεύουσας ενέργειας ανάλογα τις μετατροπές που απαιτούνται στην εκάστοτε περίπτωση. Έτσι μπορούν κατηγοριοποιηθεί η κατανάλωση τελικής ενέργειας στις εξής κατηγορίες βάση της πηγής προέλευσης (βλ. Σχήμα 1.6) :

- Ηλεκτρισμός
- Πετρέλαιο/Πετρελαϊκά Προϊόντα
- Φυσικό Αέριο
- Βιοκαύσιμα και απόβλητα
- Άνθρακας
- Άλλα

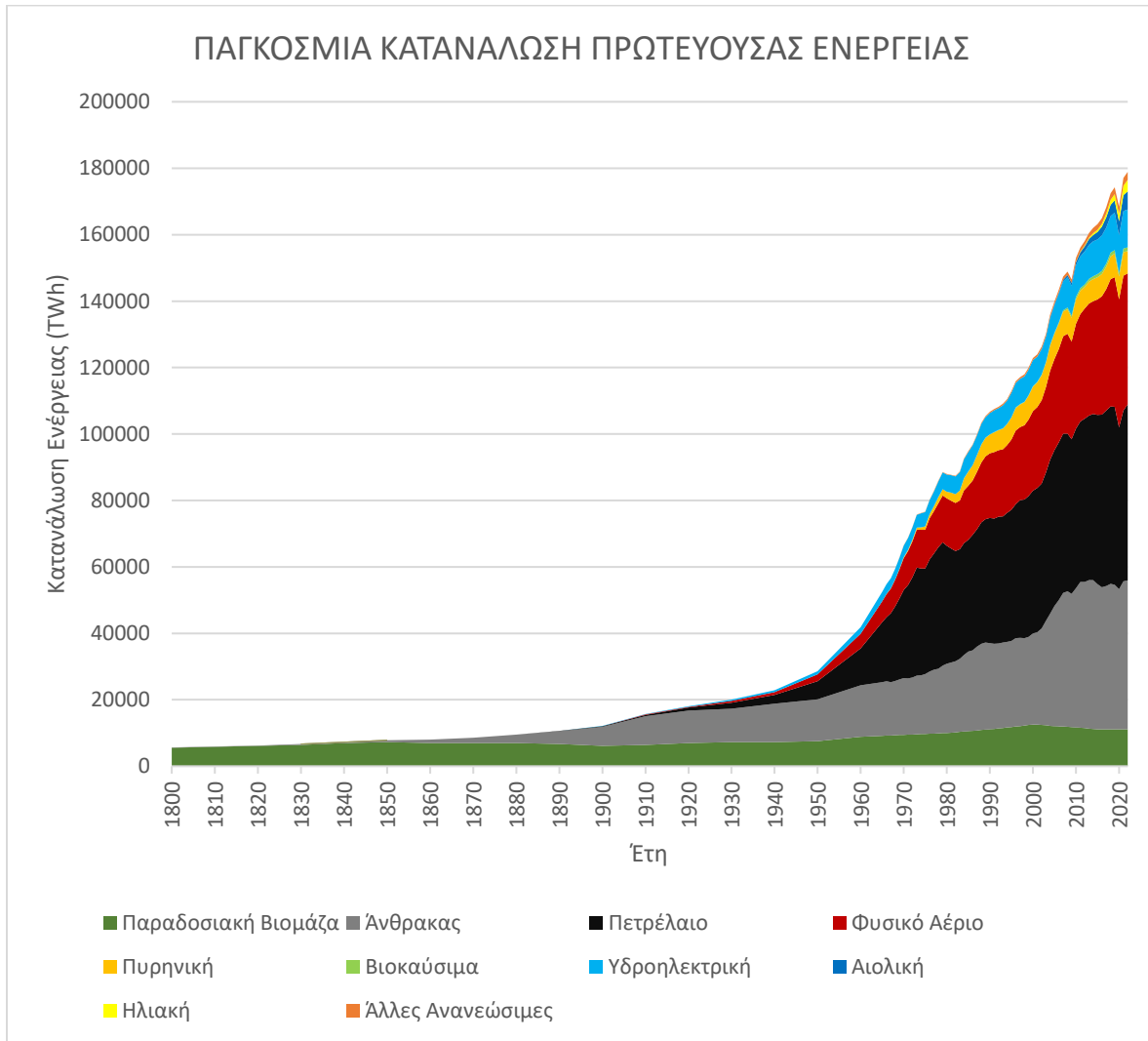


IEA, Licence: CC BY 4.0

Σχήμα 1.6: Παγκόσμια Κατανάλωση Τελικής Ενέργειας ανά πηγή ενέργειας τα έτη 1971-2019 [26].

για την ενέργεια, τα οποία αποστέλλονται από τα κράτη μέλη σε τακτική βάση και συντάσσει μελέτες και αναλύσεις για τις διαχρονικές εξελίξεις των παγκόσμιων αγορών ενέργειας [24]. Μέλη-χώρες και συνεργαζόμενες χώρες του Δ.Ο.Ε. (I.E.A) είναι όλες οι χώρες της Ε.Ε, οι ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Αυστραλία, η Αργεντινή, η Βραζιλία, η Ιαπωνία, η Ν.Κορέα, η Ινδία, η Ινδονησία, η Τουρκία, η Ν.Αφρική, το Ιράν, η Αίγυπτος κ.ά.

Παρατηρούμε λοιπόν παγκοσμίως μία ραγδαία αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας , σε όλες τις μορφές, που εξυπηρετούν οποιαδήποτε ανθρώπινη ανάγκη και δραστηριότητα. Φυσικό επακόλουθο είναι και η ανάλογη αύξηση στην παραγωγή και στην εκμετάλλευση πρωτεύουσας ενέργειας (βλ. Σχήμα 1.7), όπως αυτή ορίστηκε παραπάνω.



Σχήμα 1.7: Η παγκόσμια κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας βάση της πηγής παραγωγής την περίοδο 1800-2022. [19] & [18] & [17]

1.3 Ενεργειακό Πρόβλημα

Στις αρχές της δεκαετίας έκανε την εμφάνιση του ως φιλοσοφικός στοχασμός, η έννοια του παγκόσμιου ενεργειακού προβλήματος. Η ενέργεια, η απρόσκοπτη και φθηνή χρήση της, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον από την αλόγιστη και καταστροφική κατανάλωση της και η διασύνδεσή της σε όλους τους τομείς της σύγχρονης ανθρώπινης ζωής είναι το κυρίαρχο ζήτημα και πρόβλημα σε παγκόσμιο επίπεδο. Ένα πρόβλημα τόσο πολύπλοκο και πολυπαραγοντικό, που κυρίως διαχωρίζεται στις εξής συνιστώσες:

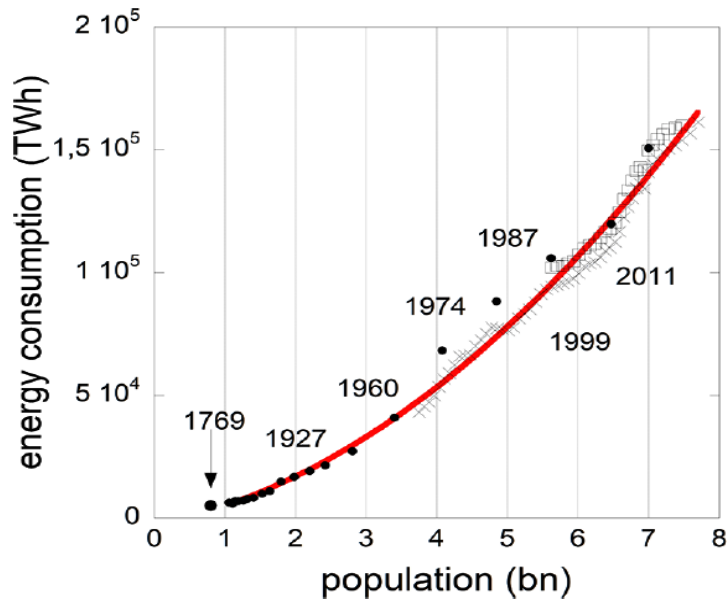
- Αυξανόμενη Ζήτηση έναντι Περιορισμένης Προσφοράς
- Κλιματική Αλλαγή
- Ενεργειακή ασφάλεια & Γεωπολιτικές κρίσεις
- Ενεργειακή Φτώχεια & Ενεργειακή Ανισότητα

1.3.1 Αυξανόμενη Ζήτηση έναντι Περιορισμένης Προσφοράς

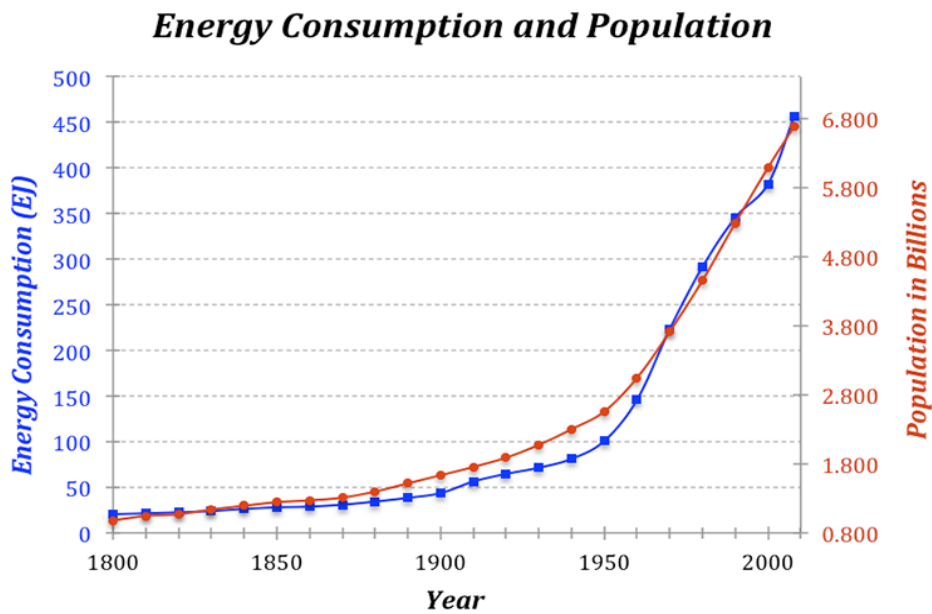
Όπως είδαμε (βλ. Σχήμα 1.7) η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας διαρκώς αυξάνεται από την 1^η Βιομηχανική Επανάσταση μέχρι σήμερα. Από το 1850 μέχρι σήμερα εικοσαπλασιάσθηκε και από το 1900 μέχρι σήμερα δεκαπλασιάσθηκε, με κάθε χρόνο του 21^ο αιώνα να δείχνει σημάδια όλο και μεγαλύτερης αύξησης.

Παγκόσμια κατανάλωση πρωτεύουσας ενέργειας ανά περιοχή								
τετράκις εκατομμύρια Βρετανικών θερμικών μονάδων								
Περιοχή	2022	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Μέση ετήσια ποσοστιαία αλλαγή, 2022–2050
Αμερική	152.6	152.3	155.8	160.3	165.0	171.2	178.7	0.6%
Η.Π.Α	98.9	97.3	97.4	98.3	99.4	101.9	105.1	0.2%
Καναδάς	14.7	14.7	15.5	16.4	17.5	18.7	20.1	1.1%
Μεξικό	7.7	7.8	8.4	8.9	9.3	9.9	10.5	1.1%
Βραζιλία	14.9	15.6	16.5	17.4	17.9	18.3	18.8	0.8%
Υπόλοιπη Αμερική	16.4	16.8	18.0	19.3	20.8	22.4	24.2	1.4%
Ευρώπη και Ευρασία	130.1	132.9	134.3	138.1	143.1	148.3	154.4	0.6%
Δυτική Ευρώπη	84.2	86.1	86.9	88.7	91.2	93.6	96.7	0.5%
Ρωσία	33.5	33.9	34.1	35.3	36.4	37.8	39.2	0.6%
Ανατολική Ευρώπη και Ευρασία	12.3	12.8	13.3	14.2	15.4	16.8	18.5	1.5%
Ασία & Ειρηνικός	292.6	309.4	336.6	360.5	381.1	403.7	424.1	1.3%
Ιαπωνία	18.6	18.6	17.1	16.5	16.2	15.9	15.8	-0.6%
Ν.Κορέα	13.0	13.5	13.8	14.1	14.2	14.2	14.3	0.3%
Αυστραλία & Νέα Ζηλανδία	7.2	7.2	7.7	8.0	8.4	8.8	9.2	0.9%
Κίνα	172.5	179.7	187.2	191.4	192.8	194.9	195.4	0.4%
Ινδία	38.3	43.5	56.2	69.4	82.5	96.7	110.4	3.9%
Υπόλοιπη Ασία & Ειρηνικός	43.1	46.9	54.5	61.1	67.1	73.2	78.9	2.2%
Αφρική και Μέση Ανατολή	62.5	66.9	71.4	77.4	83.1	90.4	97.6	1.6%
Αφρική	24.3	26.0	29.5	33.6	37.2	42.5	47.8	2.4%
Μέση Ανατολή	38.2	40.8	42.0	43.9	45.9	47.9	49.8	0.9%
Παγκόσμια	637.8	661.4	698.2	736.4	772.2	813.6	854.7	1.1%

Πρώτος παράγοντας, που μπορούμε να τονίσουμε ως αιτία της ραγδαίας αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης τα τελευταία 200 χρόνια είναι η επίσης **απότομη αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού**. Συγκεκριμένα, η αύξηση του πληθυσμού ευθύνεται για το 52% της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης, παρατηρώντας ότι από το 1850 έως το 1990 ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξήθηκε από 1,13 δις σε 5,32 δις την ίδια περίοδο που η παγκόσμια χρήση ενέργειας από 0,68 TW αυξήθηκε σε 13,2 TW [27].



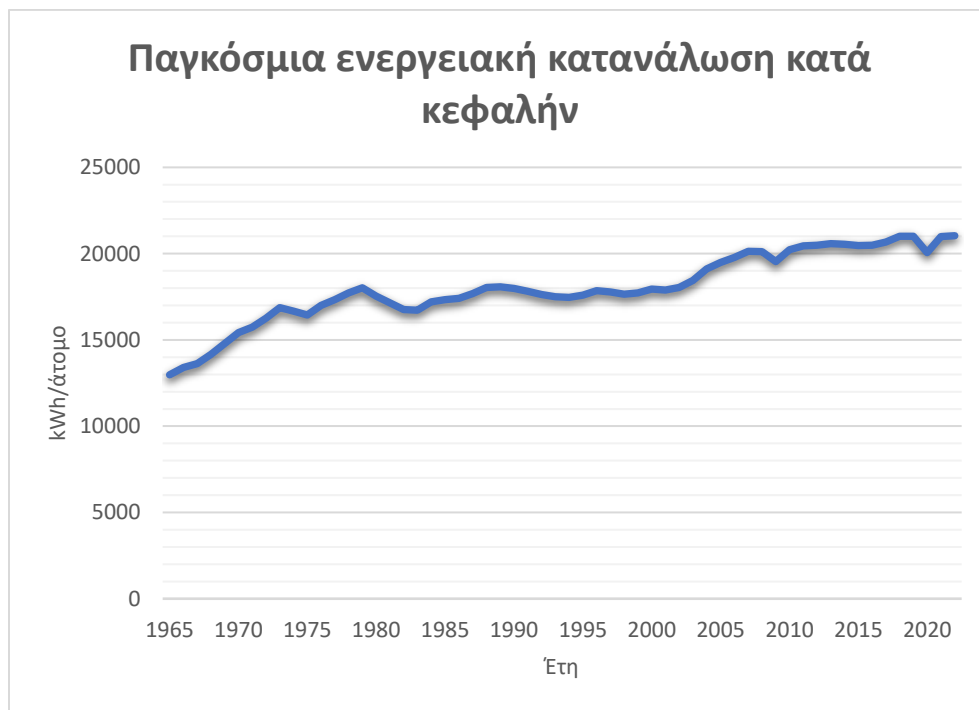
Σχήμα 1.8 : Αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης σε σχέση με την πληθυσμιακή αύξηση από το 1769 [28]. Η κόκκινη γραμμή είναι σε λογαριθμική κλίμακα.



Σχήμα 1.9 : Ετήσια ενεργειακή κατανάλωση και παγκόσμιος πληθυσμός [30].

Μάλιστα, τα μοντέλα πρόγνωσης της ενεργειακής κατανάλωσης στο εγγύς μέλλον δείχνουν αυτή η αυξητική τάση να παραμένει αμείωτη (βλ. Πίνακα 1.1). Όπως είναι λογικό εν μέρει αυτό οφείλεται στο ότι συγχρόνως ο παγκόσμιος πληθυσμός προβλέπεται να αυξηθεί με δραματικούς ρυθμούς, από 8 δις τον Νοέμβριο του 2022 σε 9,7 δις το 2050 και 10,4 δις τα μέσα της δεκαετίας του 2080 [29].

Δεύτερος παράγοντας, που παράλληλα φέρει μερίδιο στην απότομη αύξηση κατανάλωσης ενέργειας τους τελευταίους δύο αιώνες είναι η αύξηση στην ενεργειακή κατανάλωση κάθε ανθρώπου ξεχωριστά, ειδικά στις αναπτυγμένες βιομηχανικά χώρες του λεγόμενου “δυτικού κόσμου”. Ορισμένες μελέτες μάλιστα, αποδίδουν στην κατά κεφαλήν αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης το 48% της συνολικής αύξησης κατανάλωσης [27].



Σχήμα 1.10: Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο τα έτη 1965-2022 [31].

Είναι γεγονός ότι μαζί με την τεράστια και πολύπλευρη αύξηση των μέσων παραγωγής ενέργειας τους τελευταίους δύο αιώνες, δόθηκε η δυνατότητα σε εκατομμύρια ανθρώπων να καταναλώσουν οι ίδιοι μεγαλύτερα ποσότητα ενέργειας είτε έμμεσα με τη μορφή παραγόμενων αγαθών και υπηρεσιών είτε άμεσα ως ωφέλιμη άμεσα στους ίδιους ενέργεια. Το αποτέλεσμα φυσικά είναι, ειδικά στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες, να παρατηρείται

αμετροεπής κατανάλωση ενέργειας ανά άτομο, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι περιορισμοί που υπάρχουν από τη μεριά της προσφοράς ενέργειας.

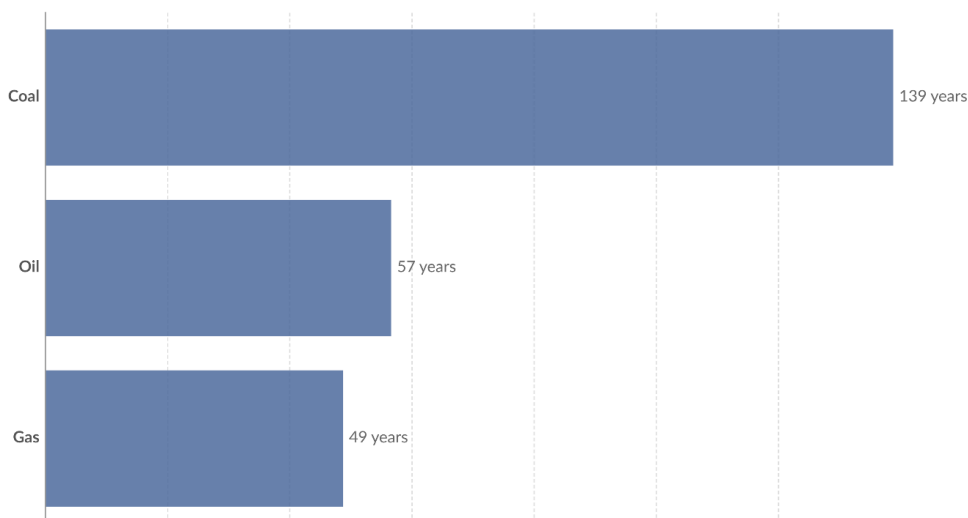
Από τον αντίποδα λοιπόν, εκείνον της *προσφοράς ενέργειας*, παγκοσμίως υπάρχουν βασικοί περιορισμοί που εμποδίζουν την παραγωγή ενέργειας να δυσκολεύεται και στο παρόν και στο μέλλον να ακολουθήσει τους ρυθμούς αύξησης της κατανάλωσης. Ο κύριος περιορισμός βρίσκεται στο ενεργειακό μίγμα το οποίο εξακολουθεί από την περίοδο της 1^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης να αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (βλ. Σχήμα 1.7). Ορίζουμε ως μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τους φυσικούς πόρους οι οποίοι είτε δεν αναπληρώνονται ή δεν αναπληρώνονται από τη φύση με τον αντίστοιχο ρυθμό με τον οποίο δαπανώνται. Κατά συνέπεια, πρόκειται για πεπερασμένους πόρους των οποίων τα αποθέματα από τον άνθρωπο αντλούνται διαρκώς ενώ ο σχηματισμός νέων αποθεμάτων απαιτεί εκατομμύρια χρόνια. Οι σημαντικότερες τέτοιες πηγές, στην ενεργειακή παραγωγή, είναι ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, γνωστά ως *ορυκτά καύσιμα*.

Από τη στιγμή λοιπόν που περίπου το 80% της σημερινής κατανάλωσης ενέργειας βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, είναι απαραίτητο να υπάρχουν και τα αντίστοιχα αποθέματα μακροπρόθεσμα ώστε να καλύπτονται αυτές οι ανάγκες. Πολλαπλές όμως έρευνες αποδεικνύουν ακριβώς το αντίθετό, ότι δηλαδή τα όποια κοιτάσματα υπάρχουν σήμερα, σε διάστημα μερικών ετών, σύμφωνα με τους ρυθμούς κατανάλωσης πρόκειται να εξαντληθούν. Παράλληλα όποια νέα κοιτάσματα ανακαλύπτονται είτε είναι δυσπρόσιτα για εκσκαφές και εξορύξεις είτε είναι ελάχιστης αξίας σε σύγκριση με την απαιτούμενη τροφοδοσία.

Years of fossil fuel reserves left, 2020

Our World
in Data

Years of global coal, oil and natural gas left, reported as the reserves-to-product (R/P) ratio which measures the number of years of production left based on known reserves and present annual production levels. Note that these values can change with time based on the discovery of new reserves, and changes in annual production.



Data source: Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

OurWorldInData.org/fossil-fuels | CC BY

Σχήμα 1.11: Εκτίμηση ετών της εναπομείνουσας παραγωγής ορυκτών καυσίμων με βάση τα γνωστά αποθέματα και τα τρέχοντα επίπεδα ετήσιας παραγωγής ορυκτών καυσίμων. [32]

1.3.2 Κλιματική Αλλαγή

Οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά μέσο όρο σε βάθος χρόνου δεκαετιών, σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία, συνθέτουν το κλίμα αυτής της τοποθεσίας. Όταν όμως, οι μέσες αυτές συνθήκες, είτε λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας είτε λόγω φυσικής, αλλάξουν τότε μιλάμε για κλιματική αλλαγή.

Η κλιματική αλλαγή παγκοσμίως δεν είναι μόνο η γενικώς απλουστευμένη αντίληψη ότι η παγκόσμια θερμοκρασία αυξάνεται, αλλά είναι ένα σύνθετο και πολυεπίπεδο φαινόμενο. Πρωταρχικά, σε επίπεδο ατμόσφαιρας, η δεκαετία 2011-2020 ήταν η θερμότερη δεκαετία που έχει καταγραφεί, με την παγκόσμια μέση θερμοκρασία να φτάνει μέχρι και 1.1 °C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα το 2019. Η ανθρωπογενής υπερθέρμανση του πλανήτη αυξάνεται σήμερα με ρυθμό 0,2°C ανά δεκαετία [33].

Στην επιφάνεια της γης, η βροχόπτωση που παρατηρείται στο έδαφος της είναι πολύ περισσότερη κατά την περίοδο των υγρών εποχών και πολύ λιγότερη κατά τις ξηρές εποχές. Πολλά είδη φυτών και ζώων έχουν μετακινηθεί πιο κοντά στους πόλους και σε μεγαλύτερα υψόμετρα, για να ακολουθήσουν τις αλλαγές στις κλιματικές ζώνες. Πολλά από τα παγωμένα

μέρη της Γης, είναι πλέον θερμότερα και λιώνουν ή ξεπαγώνουν γρήγορα. Συνολικά, οι χιονοπτώσεις μειώνονται. Η εκτεταμένη υποχώρηση των παγετώνων από το 1950 έχει να παρατηρηθεί τουλάχιστον 2000 χρόνια [34]. Η χιονοκάλυψη στο βόρειο ημισφαίριο έχει μειωθεί από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και ορισμένες από τις εδαφικές περιοχές που συνήθως είναι παγωμένες όλο το χρόνο έχουν θερμανθεί και αποψυχθεί. Οι πάγοι της Γροιλανδίας και της Ανταρκτικής συρρικνώνονται, όπως και η συντριπτική πλειονότητα των παγετώνων παγκοσμίως, προσθέτοντας τεράστιες ποσότητες νερού στους ωκεανούς. Χαρακτηριστικά, η έκταση του Αρκτικού Ωκεανού που καλύπτεται από θαλάσσιο πάγο, κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, είναι σήμερα κατά 40% μικρότερη από ό,τι τη δεκαετία του 1980. Είναι η μικρότερη που έχει υπάρξει εδώ και τουλάχιστον χίλια χρόνια [35]. Η στάθμη της θάλασσας έχει αυξηθεί παγκοσμίως κατά περίπου 20 εκατοστά (περίπου 8 ίντσες) από το 1900. Αυξάνεται ταχύτερα από οποιαδήποτε άλλη στιγμή εδώ και τουλάχιστον 3.000 χρόνια, και η ταχύτητα αυτή επιταχύνεται. Φυσικά αυτές και άλλες μεταβολές στο κλίμα παγκοσμίως επηρεάζουν κάθε περαιτέρω οικοσύστημα και μικροκλίμακα σε όλα τα επίπεδα ζωής που είναι εξαιρετικά δύσκολο να μελετηθεί σε όλη του τη διάσταση. Πρόκειται ούτως ή άλλως για μια διαρκώς ενισχυόμενη διαδικασία επιδείνωσης.

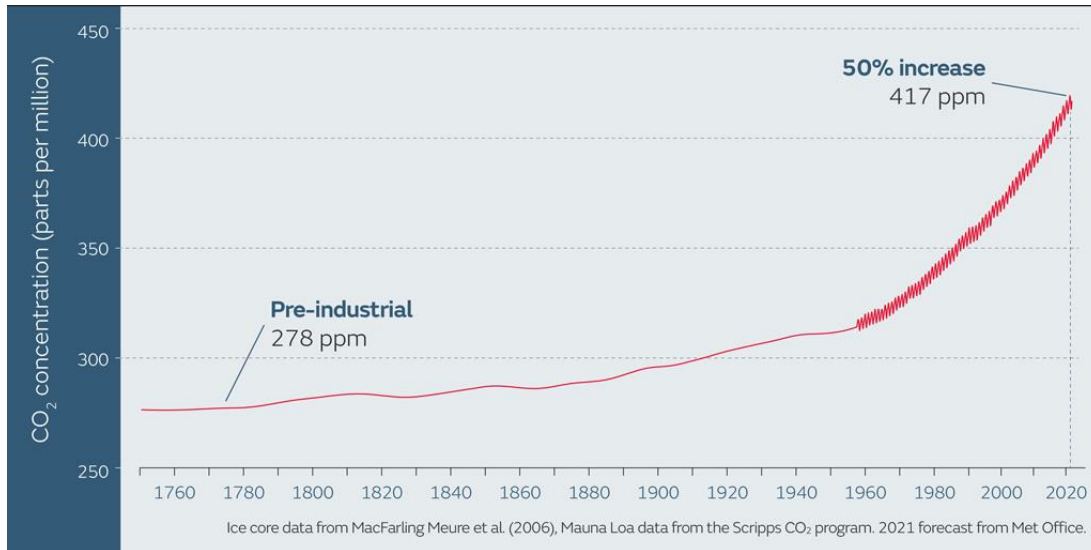
Ο κύριος παράγοντας της κλιματικής αλλαγής είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ορισμένα αέρια στην ατμόσφαιρα της Γης δρουν σαν το γυαλί ενός θερμοκηπίου, παγιδεύοντας τη θερμότητα του ήλιου και εμποδίζοντάς την να διαρρεύσει πίσω στο διάστημα και να προκαλέσει υπερθέρμανση του πλανήτη.

Πολλά από αυτά τα αέρια του θερμοκηπίου απαντώνται στη φύση, αλλά οι ανθρώπινες δραστηριότητες αυξάνουν τις συγκεντρώσεις ορισμένων από αυτά στην ατμόσφαιρα, ειδικότερα:

- Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)
- Μεθάνιο (CH_4)
- Οξείδιο του αζώτου (N_2O)
- Φθοριούχα αέρια

Το CO_2 που παράγεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες είναι ο μεγαλύτερος παράγοντας που συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Μέχρι το 2020, η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα είχε αυξηθεί κατά 48% πάνω από το προβιομηχανικό επίπεδο (πριν από το 1750) (βλ. Σχήμα 1.12). Τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο) είναι μακράν ο μεγαλύτερος συντελεστής της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το 75% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και σχεδόν το 90% όλων των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [34]. Άλλα αέρια του θερμοκηπίου εκπέμπονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες σε μικρότερες ποσότητες. Το μεθάνιο είναι πιο ισχυρό αέριο του

θερμοκηπίου από το CO₂, αλλά έχει μικρότερη διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα. Το οξείδιο του αζώτου, όπως και το CO₂, είναι ένα αέριο του θερμοκηπίου με μεγάλη διάρκεια ζωής που συσσωρεύεται στην ατμόσφαιρα επί δεκαετίες έως αιώνες. Οι ρύποι που δεν είναι αέρια του θερμοκηπίου, συμπεριλαμβανομένων των αερολυμάτων όπως η αιθάλη, έχουν διαφορετικά αποτελέσματα θέρμανσης και ψύξης και συνδέονται επίσης με άλλα ζητήματα, όπως η κακή ποιότητα του αέρα.

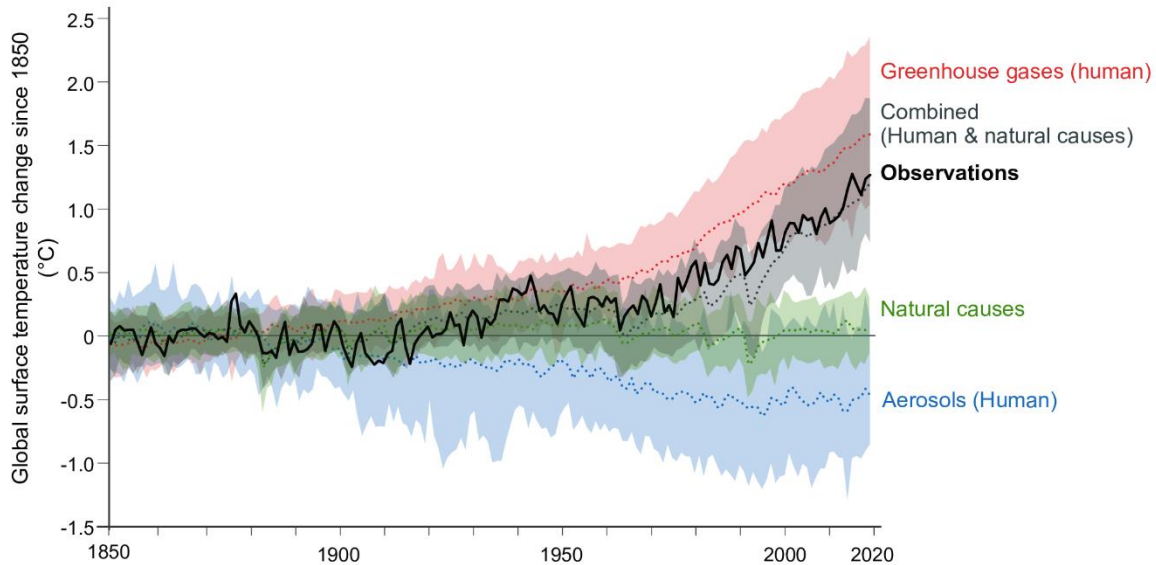


Σχήμα 3.12: Παγκόσμια ατμοσφαιρική συγκέντρωση CO₂ τα έτη 1700-2021 [36].

Τα φυσικά αίτια, όπως οι αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία ή η ηφαιστειακή δραστηριότητα, εκτιμάται ότι συνέβαλαν λιγότερο από 0,1°C στη συνολική αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ 1890 και 2010 [33].

Καταλαβαίνουμε λοιπόν, ότι η λεγόμενη κλιματική αλλαγή είναι μια ανθρωπογενής παράμετρος του ευρύτερου *ενεργειακού προβλήματος* που μπορεί να περιοριστεί (βλ. Σχήμα 3.13).

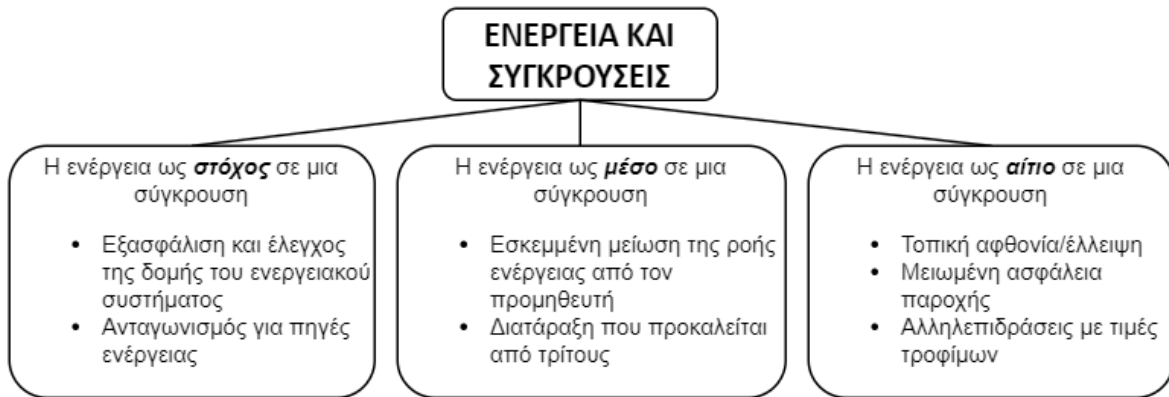
Observed warming (1850-2019) is only reproduced in simulations including human influence.



Σχήμα 3.13: Γράφημα παγκόσμιας θερμοκρασιακής μεταβολής με χρήση μοντέλων προσομοίωσης κλίματος [37].

1.3.3 Ενέργεια & Γεωπολιτικές Κρίσεις

Οι δυνητικοί ενεργειακοί πόροι είναι άφθονοι, αλλά η γεωγραφική κατανομή των συγκεντρωμένων σημειακών πηγών, π.χ. των ορυκτών πόρων, είναι άνισα κατανομημένη σε όλη την υδρόγειο και η υποκαταστασιμότητα μεταξύ των πρωτογενών ενεργειακών πόρων είναι συχνά χαμηλή βραχυπρόθεσμα [38]. Οι υποδομές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ενέργειας είναι επίσης γεωγραφικά συγκεντρωμένες και μπορεί να έχουν εγγενείς (χωρικές) συμφορήσεις, π.χ. τα Στενά του Ορμούζ. Ο έλεγχος λοιπόν, των ενεργειακών συστημάτων καθορίζει τον εθνικό πλούτο και τη γεωπολιτική ισχύ οποιασδήποτε κρατικής οντότητας τουλάχιστον από τη Βιομηχανική Επανάσταση, αλλά τα κύρια μέσα παραγωγής ενέργειας έχουν μετατοπιστεί με την πάροδο του χρόνου. Σε όλη τη διάρκεια της ιστορίας, τα κράτη που είχαν πρόσβαση στην κυρίαρχη πηγή ενέργειας της εκάστοτε εποχής ήταν σε θέση να αυξήσουν τον απόλυτο και σχετικό πλούτο και την επιρροή τους, διαμορφώνοντας τον γεωπολιτικό χάρτη. Κάθε φορά που η πηγή της ενεργειακής ασφάλειας άλλαζε, το ίδιο συνέβαινε και με τα μοτίβα πλούτου και εξουσίας. Παρατηρείται λοιπόν, καθόλη αυτή την ιστορική περίοδο η ενέργεια και τα συστήματα ενέργειας, να αποτελούν κεντρικό άξονα συγκρούσεων, πολιτικών, πολεμικών ή οικονομικών. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις η ενέργεια και ο έλεγχος των πρωτεύουσων πηγών της αποτελούν ή στόχο ή μέσο ή αίτιο (βλ. Σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.14 : Τυπολογία των συνδέσεων της ενέργειας με τις γεωπολιτικές συγκρούσεις [39].

1.3.3.1 Η ενέργεια ως στόχος σε μία γεωπολιτική σύγκρουση

Δεδομένου ότι η ενέργεια έχει οικονομική αξία ως εμπόρευμα και αποτελεί επίσης ζωτικό παράγοντα για τη δημιουργία ευημερίας και πλούτου, ορισμένοι φορείς μπορεί να προσπαθήσουν να διασφαλίσουν ζωτικά τμήματα του ενεργειακού συστήματος ή ορισμένα από τα εγγενή χαρακτηριστικά του. Ωστόσο, η προσπάθεια αυτή μπορεί να προκαλέσει ή να πυροδοτήσει συγκρούσεις με άλλους δρώντες. Αυτό εγείρει το ζήτημα της εδαφικής νομιμότητας, δηλαδή ποιος επιτρέπεται να κάνει τι σε δεδομένο χρόνο και τόπο. Η αδιάλειπτη πρόσβαση στην ενέργεια μπορεί να είναι σημαντική για την ευημερία και την επιβίωση των κρατών, καθώς απαιτείται για την τροφοδοσία του στρατού και για την ανάπτυξη της οικονομίας [39]. Εκτός από το ότι θεωρούνται στρατηγικοί και ζωτικής σημασίας, οι ενεργειακοί πόροι έχουν επίσης οικονομική αξία και μπορούν να παρέχουν μια ροή εσόδων για τους παραγωγούς.

Αυτοί οι λόγοι αυξάνουν τον ανταγωνισμό για τους πόρους και μπορούν να αυξήσουν τον κίνδυνο βίαιων συγκρούσεων μεταξύ κρατών. Οπότε παρατηρούμε συγκρούσεις στις οποίες τα κράτη προσπαθούν να εξασφαλίσουν ή να ελέγξουν τις διεθνείς ενεργειακές ροές για να βελτιώσουν τη δική τους (εθνική) ασφάλεια π.χ. η στρατιωτική ανάπτυξη των ΗΠΑ στην πλούσια σε πετρέλαιο περιοχή της Μέσης Ανατολής έχει ερμηνευτεί ως επιδίωξη διασφάλισης των εξαγωγών και μιας ανοικτής διεθνούς αγοράς πετρελαίου που ωφελεί την εθνική ασφάλεια των ΗΠΑ.

Ο έλεγχος ή η επιρροή των παγκόσμιων ενεργειακών ροών μπορεί να απαιτεί την ικανότητα προβολής ισχύος σε πολλαπλές περιοχές. Τέτοιες ικανότητες συνδέονται συνήθως με έναν

παγκόσμιο ηγεμόνα που διαθέτει τη στρατιωτική ισχύ να διεξάγει επιχειρήσεις σε πολλαπλές περιοχές, π.χ. ναυτικές δυνάμεις ικανές να διασφαλίζουν ζωτικές θαλάσσιες οδούς. Χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος που μπορούν να αυξήσουν τον κίνδυνο συγκρούσεων σε αυτή την ομάδα είναι η γεωγραφική (χωρική) συγκέντρωση πόρων υψηλής ποιότητας, οι εμπορικές διαδρομές και οι υποδομές μεταφοράς, καθώς και η αντίληψη ενός στρατηγικού πόρου, π.χ. η περιορισμένη διαθεσιμότητα υποκατάστατων ενός ενεργειακού φορέα βραχυπρόθεσμα και η ευπάθεια σε διαταραχές [38]. Εκτός από το ενεργειακό σύστημα είναι επίσης απαραίτητο να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να εξελιχθεί η διεθνής κοινωνία, ιδίως η πολιτικότητα, η ισορροπία ισχύος μεταξύ των κρατών και οι μεταβάσεις ισχύος μεταξύ ηγεμονιών, προκειμένου να αναλυθεί η πιθανή μελλοντική εξέλιξη τέτοιων συγκρούσεων. Αυτές οι συνθήκες πλαισίου έχουν αλλάξει κατά τη διάρκεια της ιστορίας και μπορούν να αλλάξουν και πάλι στο μέλλον [39]. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα, το Ηνωμένο Βασίλειο, ένας προηγούμενος διεθνής ηγεμόνας, ήταν σημαντικός παραγωγός και εξαγωγέας άνθρακα, που εκείνη την εποχή αποτελούσε τη σημαντικότερη πηγή ενέργειας. Αργότερα, καθώς το πετρέλαιο απέκτησε σημασία στο ενεργειακό μείγμα, το Ηνωμένο Βασίλειο δημιούργησε επίσης παρουσία στην πλούσια σε πετρέλαιο περιοχή της Μέσης Ανατολής, μια διπλωματική και στρατιωτική δέσμευση την οποία ανέλαβαν οι ΗΠΑ καθώς η παγκόσμια ισορροπία ισχύος μετατοπίστηκε στον Ατλαντικό [40]. Παραδείγματα επίσης, από τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο περιλαμβάνουν την προσπάθεια του Χίτλερ να ελέγξει τα πετρελαϊκά πεδία του Καυκάσου προκειμένου να τροφοδοτήσει τον στρατό της Γερμανίας και την κατοχή γειτονικών χωρών από την Ιαπωνία προκειμένου να αποκτήσει πρόσβαση στους πόρους που απαιτούνται για την οικοδόμηση ενός ισχυρού στρατού [41].

1.3.3.2 Η ενέργεια ως μέσο μιας σύγκρουσης

Η ευπάθεια των κοινωνιών σε διαταραχές της ροής ενέργειας επέτρεψε τη χρήση του ενεργειακού συστήματος ως πολιτικού μοχλού πίεσης για την επίτευξη άλλων, μη ενεργειακών στόχων. Η χρήση του ενεργειακού συστήματος ως μέσου σε μια πολιτική σύγκρουση απαιτεί ένα συνδυασμό χωρικών χαρακτηριστικών, π.χ. σημεία συμφόρησης που μπορούν να προσβληθούν, και χρονικών χαρακτηριστικά, π.χ. ευπάθεια σε βραχυπρόθεσμες διαταραχές [39]. Οπότε ανάλογα με το κίνητρο των κρατών παρατηρούνται δύο κατηγορίες συγκρούσεων i) σκόπιμη μείωση της ροής από τον προμηθευτή ή χρήστη, και (ii) διαταραχή που προκαλείται από τρίτο μέρος, π.χ. τρομοκρατική επίθεση στο ενεργειακό σύστημα με σκοπό να βλάψει το συμφέροντα των χωρών παραγωγών, καταναλωτών ή/και διαμεσολαβητών [38]. Η σκόπιμη μείωση της ροής της ενέργειας, γνωστή και ως το "ενεργειακό όπλο", συνδέεται συνήθως με μεγάλους ενεργειακούς εξαγωγείς που εκμεταλλεύονται την εξάρτηση και την ευπάθεια των εισαγωγέων προκειμένου να αποκτήσουν πολιτική επιρροή και να επηρεάσουν τις εγχώριες ή αποφάσεις πολιτικής του εσωτερικού και του εξωτερικού. Η αντίθετη κατάσταση, δηλαδή ένας ή μια ομάδα από εισαγωγέων που μποϊκοτάρουν έναν παραγωγό, μπορεί επίσης να συμβεί.

Μια τέτοια περίπτωση είναι το μποϋκοτάζ που εφαρμόζουν οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης προς τη Ρωσία, λόγω του Ρωσο-Ουκρανικού πολέμου από το Φεβρουάριο του 2022. Η εξάρτηση από τις εισαγωγές από λίγους προμηθευτές μπορεί ακόμα να επηρεάσει τις πολιτικές αποφάσεις εάν ο προμηθευτής διαθέτει την ικανότητα και τα μέσα για να βλάψει έναν εισαγωγέα, ακόμη και χωρίς να εφαρμόσει πραγματικά την υλοποίηση της απειλής [42]. Έτσι, εάν το ενεργειακό όπλο θεωρείται ως απειλή από τους εισαγωγείς εν μέρει εξαρτάται από τις υποθέσεις της λογικής των εξαγωγέων, π.χ. αν ο εξαγωγέας επιδιώκει απόλυτη επικράτηση ή πλεονέκτημα θέσης σε σχέση με άλλα κράτη.

Χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος που επιτρέπουν το ενεργειακό όπλο να χρησιμοποιηθεί είναι τα σημεία συμφόρησης (π.χ. Διώρυγα Σουέζ) , όπως η γεωγραφική συγκέντρωση των υποδομών, η εξάρτηση από τις εισαγωγές/εξαγωγές, η χαμηλή ρευστότητα και η ευπάθεια σε διαταραχές. Αυτό συνεπάγεται ότι πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο οι παράγοντες της προσφοράς όσο και της ζήτησης κατά την αξιολόγηση των προοπτικών του ενεργειακού όπλου. Επιπλέον, είναι ευκολότερο να εδραιωθεί ο έλεγχος των ροών εάν η δομή του αγοράς είναι περιφερειακή παρά παγκόσμια, δεδομένου ότι η παγκόσμια δομή αγοράς θα απαιτούσε την αποδοχή της διεθνούς κοινωνίας ή μιας ηγεμονικής δύναμης. Αυτό σημαίνει επίσης ότι πρέπει να αναλυθούν οι συνθήκες του περιβάλλοντος, καθώς είναι πιο δύσκολο σε έναν πολυπολικό κόσμο να κερδίσει την αποδοχή για τη χρήση του "ενεργειακού όπλου" στις παγκόσμιες ροές ενέργειας, καθώς κανένας μεμονωμένος παράγοντας δεν μπορεί να καθορίσει την ατζέντα [43].

1.3.3.3 Η ενέργεια ως αίτιο μιας σύγκρουσης

Αν και μπορεί να είναι ακούσια από την πλευρά των παραγωγών ενέργεια ή χρηστών, ορισμένα χαρακτηριστικά του ενεργειακού συστήματος μπορούν να αποσταθεροποιήσουν μια κοινωνία και να προκαλέσουν ή να επιδεινώσουν μια υφιστάμενη σύγκρουση. Αυτή η σχέση αναφέρεται ως "πολλαπλασιαστής απειλών" ή "καταλύτης απειλών" [44], καθώς η αιτιώδης συνάφεια δεν είναι απαραίτητα ότι η σύγκρουση συμβαίνει, αλλά ότι η πιθανότητα εμφάνισής της και η σοβαρότητά της αυξάνεται. Τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες αποσταθεροποιητών που αποτελούν συνδυασμούς οικονομικών, πολιτικών και/ή φυσικών παραγόντων μπορούν να διακριθούν : (i) τοπική αφθονία πόρων, γνωστή και ως "κατάρα των πόρων", (ii) περιβαλλοντική υποβάθμιση που προκαλεί έλλειψη ανανεώσιμων πόρων, (iii) μειωμένη ασφάλεια εφοδιασμού που προκαλεί αλυσιδωτές επιπτώσεις (π.χ. οικονομική αστάθεια), και (iv) αλληλεπιδράσεις με τα τρόφιμα. με τις τιμές των τροφίμων που έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στην επισιτιστική ασφάλεια [38]. Η κλίμακα αυτών των συγκρούσεων ήταν ιστορικά κυρίως τοπική και επηρέασε την ανθρώπινη ασφάλεια, αλλά ορισμένες θα μπορούσαν δυνητικά να επεκταθούν σε εθνική ή ακόμη και σε διεθνή κλίμακα.

Εάν ο πόρος είναι μη ανανεώσιμος, η εξάντληση ή/και το αυξημένο κόστος εξόρυξης μπορεί επίσης να περιορίσει τα μελλοντικά έσοδα. Όταν τα έσοδα από τις εξαγωγές μειώνονται

ραγδαία, το κράτος αντιμετωπίζει ξαφνικά μια κατάσταση χαμηλής ανταγωνιστικότητας στην παγκόσμια αγορά και όλο και περισσότερο ακριβές εισαγωγές, μια κατάσταση που μπορεί να αποσταθεροποιήσει το κράτος [38].

Όσον αφορά τις πολιτικές πτυχές, εάν ο πλούτος των πόρων διανέμεται ανισομερώς, αυξάνεται η πιθανότητα αδύναμων θεσμών, διαφθοράς, παραβίασης των ανθρωπίνων δικαιωμάτων και κακής ανάπτυξης των δημοκρατικών συστημάτων [44]. Τα κράτη που είναι φτωχά αλλά εξαρτώνται οικονομικά από τις πρωτογενείς πηγές ενέργειας (πετρελαιοπηγές κυρίως), δηλαδή όπου ένα υψηλό ποσοστό του ΑΕΠ προέρχεται από την εξόρυξη πρωτογενών πόρων αλλά το κατά κεφαλήν εισόδημα είναι χαμηλό (π.χ. Νιγηρία), είναι πιο πιθανό να βιώσουν βίαιες ενδοκρατικές συγκρούσεις [44]. Αυτό καθίσταται δυνατό από της μικρής κλίμακας βιοτεχνική εξόρυξη, την παραγωγή με λιγυστά εμπόδια και πόρους που είναι γεωγραφικά προσβάσιμοι (π.χ. στην ξηρά) και ληηλατήσιμοι, έτσι ώστε οι τοπικές εμπόλεμες παρατάξεις να μπορούν να τους χρησιμοποιούν για να χρηματοδοτούν άλλες δραστηριότητες και έτσι να εντείνουν ή να παρατείνουν μια σύγκρουση [45,46].

1.3.4 Ενεργειακή Φτώχεια-Ενεργειακή Ανισότητα

Ενεργειακή φτώχεια ονομάζουμε την κατάσταση κατά την οποία ένα άτομο ή ένα νοικοκυριό αδυνατεί να έχει πρόσβαση σε απαραίτητες υπηρεσίες και προϊόντα ενέργειας όπως θέρμανση, ψύξη, φωτισμός, γεγονός που επιφέρει δυσμενείς συνέπειες τόσο στην υγεία και την ευημερία, όσο και στο περιβάλλον [47]. Παρά το γεγονός ότι η ενέργεια είναι η κινητήριος δύναμη του πολιτισμού, η πρόσβαση, ακόμα και σήμερα σε επαρκή και φτηνή ενέργεια δεν είναι ισάξια κατανομημένη στον πλανήτη.

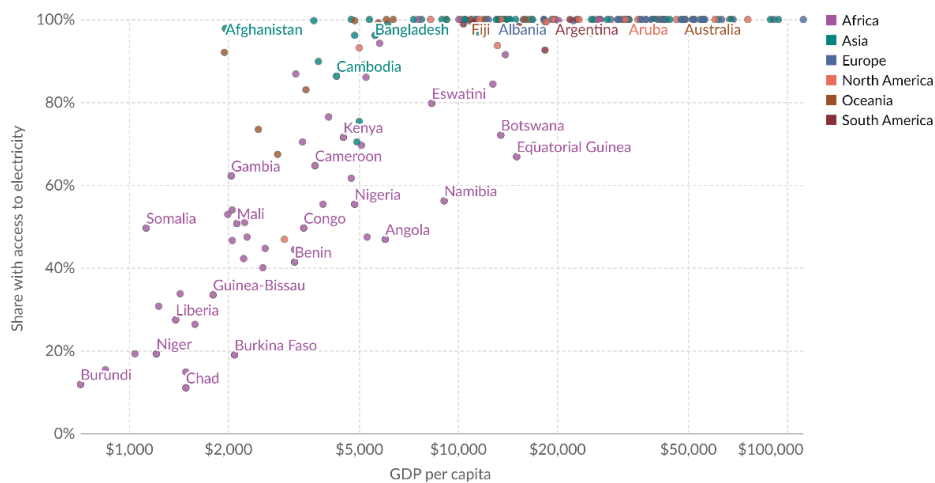
Όταν, φυσικά, δεν υπάρχει πρόσβαση σε σύγχρονες πηγές ενέργειας, οι άνθρωποι καταφεύγουν σε επικίνδυνες για την υγεία λύσεις. Η έλλειψη ενέργειας έχει άμεσα καταστροφικά αποτελέσματα στις ζωές των ανθρώπων στη πρόσβασή τους σε καθαρό νερό, καθαρό αέρα, σε αποχέτευση και τήρηση στοιχειωδών κανόνων υγιεινής. Για παράδειγμα προκειμένου να μαγειρέψουν και να ζεσταθούν οι άνθρωποι καταφεύγουν στη καύση σκουπιδιών ή καυσόξυλων με τραγικό αποτέλεσμα για τους ίδιους, η κατ' οίκον μόλυνση του αέρα είναι από μόνη της ο μεγαλύτερος περιβαλλοντικός κίνδυνος για την υγεία, υπεύθυνος για 1,6 εκατομμύρια θανάτους κάθε χρόνο [48].

Η έλλειψη επαρκών ενεργειακών συστημάτων είναι αναμενόμενο να συσχετίζεται με την οικονομική κατάσταση της εκάστοτε περιοχής. Έτσι, παρατηρείται χώρες στις οποίες το ημερήσιο εισόδημα είναι μικρότερο από 2\$/ημέρα, τα επίπεδα εξηλεκτρισμού να είναι πολύ χαμηλά και ο πληθυσμός να βασίζεται στην παραδοσιακή βιομάζα (βλ. Σχήμα 3.15, Σχήμα 3.16).

Access to electricity vs. GDP per capita, 2020

Our World in Data

Having access to electricity is defined in international statistics as having an electricity source that can provide very basic lighting, and charge a phone or power a radio for 4 hours per day. GDP per capita is adjusted for inflation and differences in the cost of living between countries.



Data source: Data compiled from multiple sources by World Bank
 Note: GDP per capita is expressed in international-\$¹ at 2017 prices.

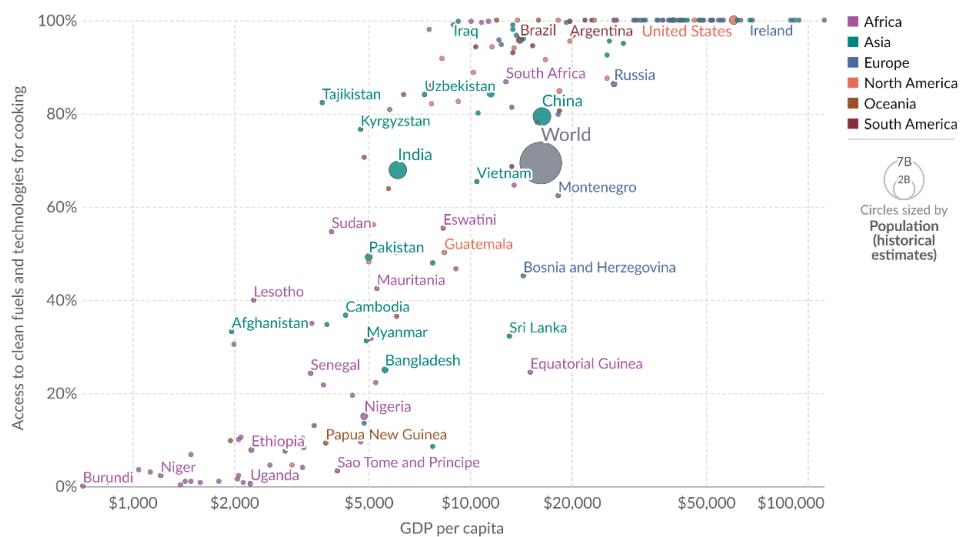
OurWorldInData.org/energy | CC BY

Σχήμα 3.15: Πρόσβαση σε ηλεκτρισμό στην κάθε χώρα σε συνάρτηση με το εκάστοτε κατά κεφαλήν ΑΕΠ [49].

Access to clean fuels for cooking vs. GDP per capita, 2020

Our World in Data

Access to clean fuels for cooking is vital in reducing the burden of health and mortality impacts of indoor air pollution.

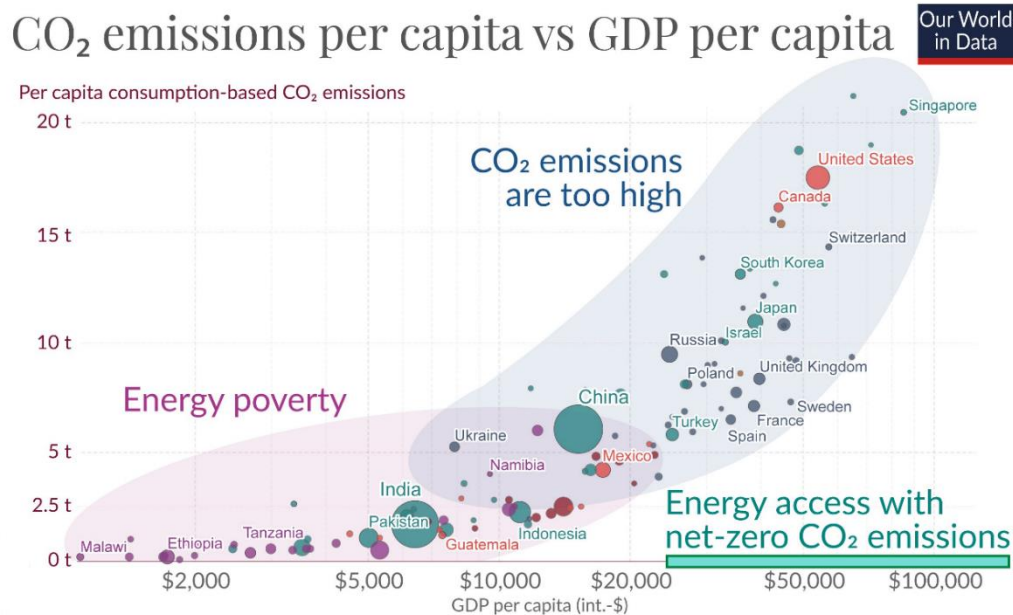


Data source: World Bank, WHO

OurWorldInData.org/indoor-air-pollution | CC BY

Σχήμα 3.16: Πρόσβαση σε καθαρά καύσιμα για μαγείρεμα σε συνάρτηση με το κατά κεφαλήν ΑΕΠ [50].

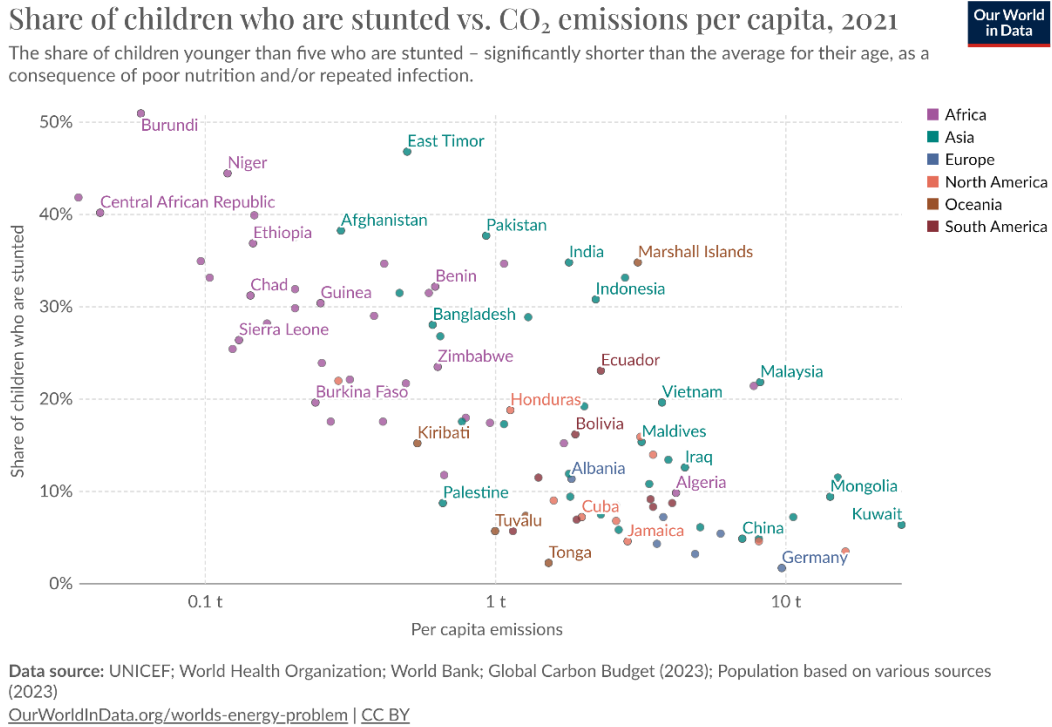
Αντιθέτως, παρατηρείται οι χώρες στις οποίες το συνολικό ή/και το κατά κεφαλήν ΑΕΠ η πρόσβαση σε σύγχρονες μορφές ενέργειας να είναι πολύ πιο ευρεία, καθώς η οικονομική ανάπτυξη συνοδεύεται από εκβιομηχάνιση και εξηλεκτρισμό. Όμως, καθώς ο ενεργειακός τομέας παγκοσμίως βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, παρατηρείται οι πλουσιότερες χώρες να καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και κατά συνέπεια να εκπέμπουν περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) (βλ. Σχήμα 3.17). Μάλιστα, ακόμα και αν εξεταστεί η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα για φτωχά νοικοκυριά σε πλούσιες χώρες (π.χ. Γερμανία, Ιρλανδία), παρατηρείται και αυτή εξαιρετικά υψηλή ξεπερνώντας τους 2,4 τόνους CO₂ κάθε έτος για το 99% του πληθυσμού [51].



Σχήμα 3.16: Οι κατά κεφαλήν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με το κατά κεφαλήν ΑΕΠ [

Τελικά, συμπεραίνουμε ότι αφού το κατά κεφαλήν ΑΕΠ συνεπάγεται υψηλότερες εκπομπές CO₂ είναι αναμενόμενο ότι όσο αυξάνονται οι εκπομπές CO₂, βελτιώνονται και οι συνθήκες διαβίωσης. Αυτό σημαίνει ότι όπου παρατηρούμε χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα υπάρχουν και τραγικά φαινόμενα παιδικής πείνας και θνησιμότητας λόγω φυσικά φτώχειας (βλ. Σχήμα 3.17).

Έτσι, ενώ η παγκόσμια κοινότητα προσπαθεί να μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα λόγω της περιβαλλοντικής ρύπανσης είναι εμφανές ότι αυτό πρέπει να μην συνοδεύεται από χειροτέρευση του βιοτικού επιπέδου ανθρώπων.



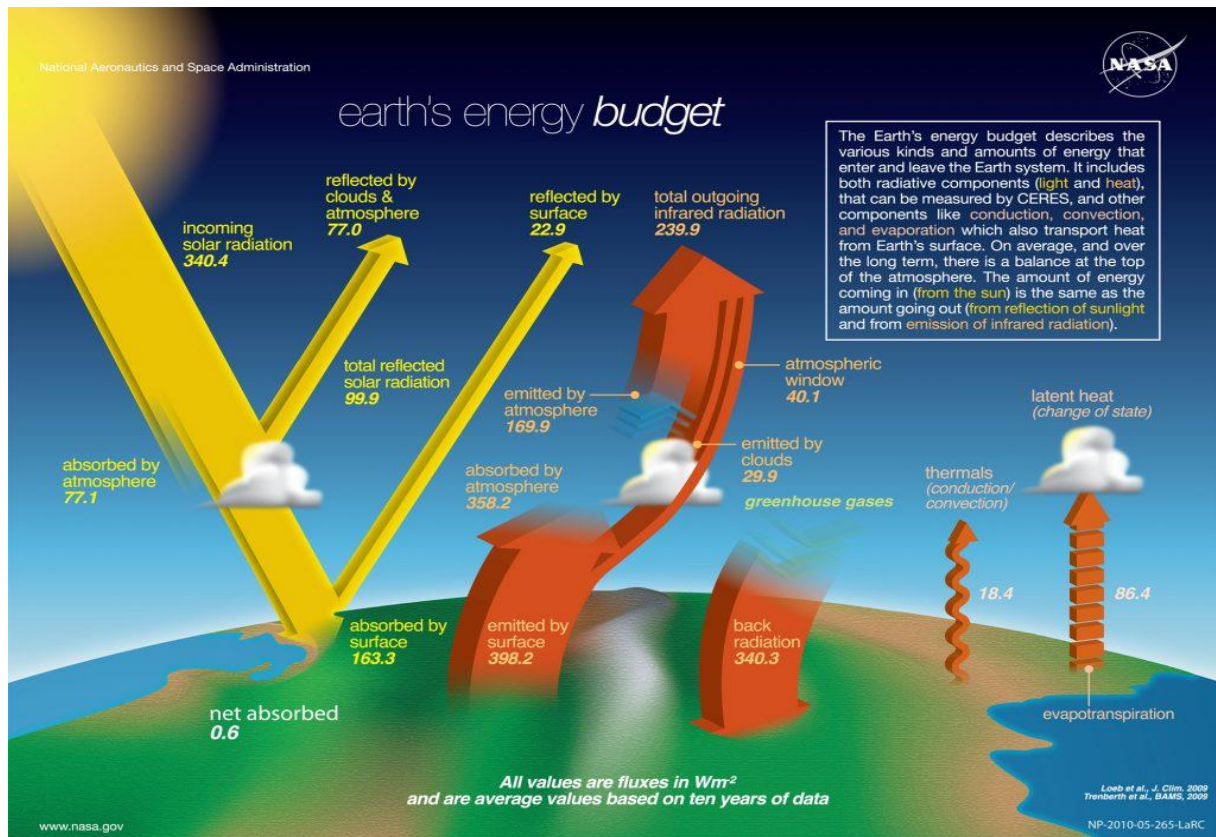
Εικόνα 1: Ποσοστό υποσιτισμένων παιδιών σε σχέση με τις κατά κεφαλήν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [53].

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΗΛΙΑΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

2.1 Ηλιακή Ενέργεια και Ηλιακή Ακτινοβολία

Ο Ήλιος είναι μία σχεδόν τέλεια σφαίρα θερμών αερίων, με μια μέση ακτίνα 695.000 χλμ, στο κέντρο της οποίας λαμβάνει χώρα μία συνεχής πυρηνική σύντηξη μέσω μιας σειρά βημάτων που ονομάζεται p-p αλυσίδα (πρωτονίων-πρωτονίων). Αυτή η αλυσιδωτή αντίδραση έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή τεράστιας ποσότητας ενέργειας, της *ηλιακής ενέργειας*, η οποία μεταφέρεται με τη μορφή σωματιδίων και κυμάτων. Η συνολική ενέργεια που παράγεται από τον ήλιο είναι $3,8 \times 10^{20}$, που ακτινοβολείται προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτή η ενέργεια και η ηλιακή ακτινοβολία μεταφέρονται στη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μέχρι την επιφάνεια της Γης σε απόσταση περίπου 150.000.000 km σε μόλις 8,3 λεπτά. Η Γη δέχεται μόνο ένα μικρό ποσοστό από αυτή την ενέργεια, περίπου συνολικά $1,7 \times 10^{14}$ W, η οποία συνήθως εκφράζεται σε μονάδες ενέργειας προς χρόνο ανά επιφάνεια, δηλαδή στην περίπτωση της επιφάνειας της Γης $\sim 1368 \text{ W/m}^2$.

Όταν συναντά την ατμόσφαιρα, 6% της ακτινοβολίας ανακλάται και 16% απορροφάται. Οι συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες (σύννεφα, σκόνη, ρύπανση) μειώνουν επιπλέον την ηλιακή ακτινοβολία που ταξιδεύει εντός της ατμόσφαιρας κατά 20% λόγω ανάκλασης και κατά 3% λόγω απορρόφησης. Η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας μέσω ατμοσφαιρικής συναγωγής (μεταφορά αισθητής θερμότητας) και η εξάτμιση και συμπύκνωση του ατμού (μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας) επηρεάζουν τους ανέμους και τον κύκλο του νερού. Όταν πλέον φθάνει στην επιφάνεια του πλανήτη μας, το ηλιακό φως απορροφάται από τους ωκεανούς, την ξηρά και τα φυτά (βλ. Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Προσπίπτουσα και Απορροφώμενη Ηλιακή Ενέργεια σε W/m² [34].

Οι άνωθεν συνδυασμοί ανακλάσεων, απορροφήσεων διαθλάσεων και διασκορπίσεων έχουν ως αποτέλεσμα υψηλά δυναμικά επίπεδα ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε περιοχή της Γης. Έτσι λοιπόν η συνολική ακτινοβολία του διασκορπισμένου ηλιακού φωτός σε ένα οποιοδήποτε σημείο της Γης είναι άθροισμα διάχυτης και άμεσης ακτινοβολίας.

Διάχυτη Ακτινοβολία:

Είναι το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στον πλανήτη μας έπειτα από τον διασκορπισμό και τις αλλαγές κατεύθυνσης που υφίσταται κατά τη διαδρομή ροής μέσα στην ατμόσφαιρα.

Άμεση Ακτινοβολία:

Είναι το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στον πλανήτη μας απευθείας από τον Ήλιο χωρίς να παρεμβληθεί διασκορπισμός της στη γήινη ατμόσφαιρα.

Όλικη Ακτινοβολία:

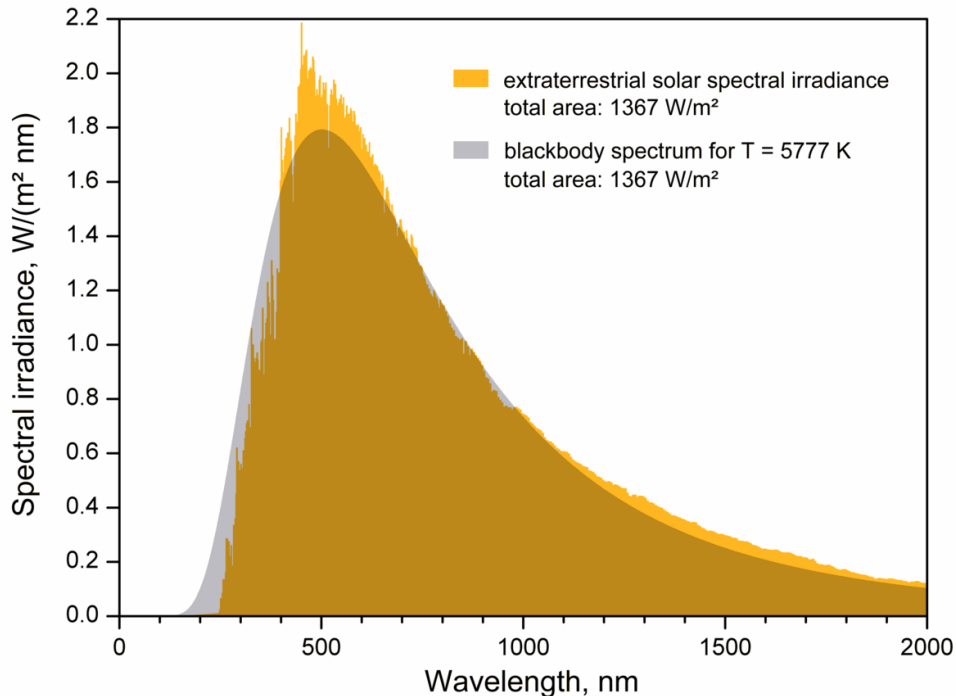
Είναι το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας.

Προσπίπτουσα Ακτινοβολία:

Είναι ο ρυθμός με τον οποίο προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία πάνω σε μια επιφάνεια (W/m^2) και συμβολίζεται ως G . Αν ολοκληρωθεί για χρονικό διάστημα μιας ώρας συμβολίζεται I και για χρονικό διάστημα μιας ημέρας συμβολίζεται H (J/m^2).

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει έξω από την ατμόσφαιρα της Γης είναι σταθερή και ανεξάρτητη από τις εποχές του έτους, η λεγόμενη στις μετρήσεις *ηλιακή σταθερά* $G_{sc} = 1353W/m^2$. Το μέγεθος όμως, η διάρκεια και οι μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια του πλανήτη μας σε μια συγκεκριμένη περιοχή ποικίλλει ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της εκάστοτε περιοχής, το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας, την ώρα της ημέρα, την εποχή του έτους και το κλίμα της περιοχής.

Το σύνολο των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών, προερχόμενο από τον Ήλιο, έχουν μήκη κύματος από 0,3 μέχρι 3μm και μπορεί να εξομοιωθεί με την ακτινοβολία που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία 5777 βαθμών Kelvin (βλ. Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Σύγκριση της ακτινοβολίας μελανός σώματος με την ηλιακή ακτινοβολία [33].

Η συντριπτική πλειοψηφία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν είναι ορατή στο ανθρώπινο μάτι. Τα περισσότερα υψηλής συχνότητας κύματα που εκπέμπονται από τον ήλιο είναι οι ακτίνες Γάμμα, οι ακτίνες Χ και η υπεριώδης ακτινοβολία (UV ακτίνες). Οι πιο επιβλαβείς UV ακτίνες απορροφώνται σχεδόν πλήρως από την ατμόσφαιρα της Γης. Η υπέρυθρη ακτινοβολία που επίσης εκπέμπεται από τον ήλιο, είναι πολύ χαμηλότερης συχνότητας. Η περισσότερη θερμότητα από τον ήλιο λοιπόν φτάνει ως υπέρυθρη. Τέλος μεταξύ της υπέρυθρης και της υπεριώδους ακτινοβολίας βρίσκεται το φάσμα της ορατής ακτινοβολίας, που περιέχει μάλιστα και όλα τα χρώματα που βλέπουμε στη Γη.

2.2 Ηλιακές Γωνίες και Αστρονομικά Δεδομένα

Είναι γνωστό, πως η διαδρομή στην οποία κινείται η Γη είναι μια ελλειπτική τροχιά γύρω από τον Ήλιο, με αποτέλεσμα η απόσταση Γης-Ήλιου να μεταβάλλεται. Η απόσταση Γης-Ήλιου μεγιστοποιείται την περίοδο του καλοκαιριού και φτάνει το 1,01668 της μέσης απόστασης-αστρονομικής μονάδας, σημείο που ονομάζεται *Περιήλιο* (1 αστρονομική μονάδα AU=149.597.871 km), μια αύξηση δηλαδή της τάξεως του 1,67%. Αντίστοιχα την περίοδο του χειμώνα η Γη προσεγγίζει περισσότερο τον Ήλιο, με την απόσταση να μειώνεται στο ίδιο ποσοστό (1,67%), φτάνοντας δηλ. το 0,9833 της μέσης απόστασης και το σημείο της τροχιάς ονομάζεται *Αφήλιο* (βλ. Σχήμα 2.3).. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς της Γης είναι:

Περιήλιο (σημείο της τροχιάς ενός σώματος του Ηλιακού Συστήματος που βρίσκεται στη μικρότερη απόσταση από τον Ήλιο) = $147 \cdot 10^6$ km.

Αφήλιο (σημείο της τροχιάς ενός σώματος του Ηλιακού Συστήματος που βρίσκεται στη μεγαλύτερη απόσταση από τον Ήλιο) = $152 \cdot 10^6$ km.

Εκκεντρότητα $e = OH/OA = 0.0167$

Όπου $OA = (HA + AG) / 2 = 149,5 \cdot 10^6$ km (βλ. Σχήμα 2.4)

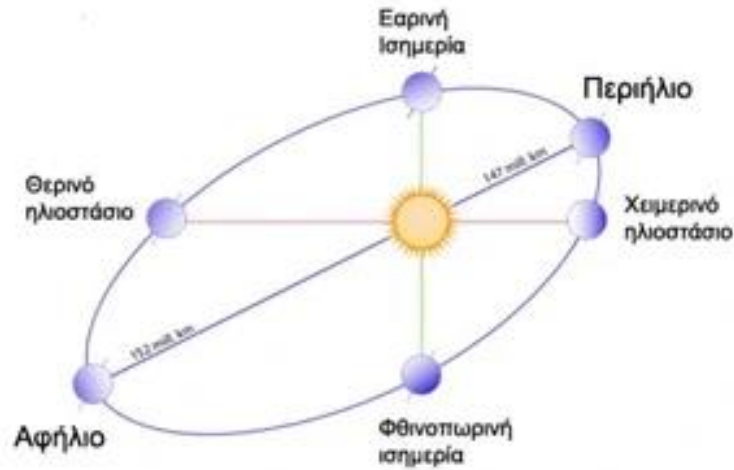
Ο ήλιος βρίσκεται συγκεκριμένα πάνω στο μεγάλο ημιάξονα της ελλειπτικής τροχιάς (έστω στο σημείο Η και όχι στο κέντρο της, βλ. Σχήμα 2.4).

Λόγω της πολύ μικρής εκκεντρότητας ($e = 0,0167$) ο μεγάλος ημιάξονας, έχει μικρή διαφορά από τον μικρό ημιάξονα ($OA - OB = 20848,5$ km) και η ελλειπτική τροχιά πλησιάζει τη μορφή κύκλου. Αν r είναι η μέση απόσταση ήλιου – γης, η απόσταση ήλιου – γης την ημέρα v του έτους r_v , είναι:

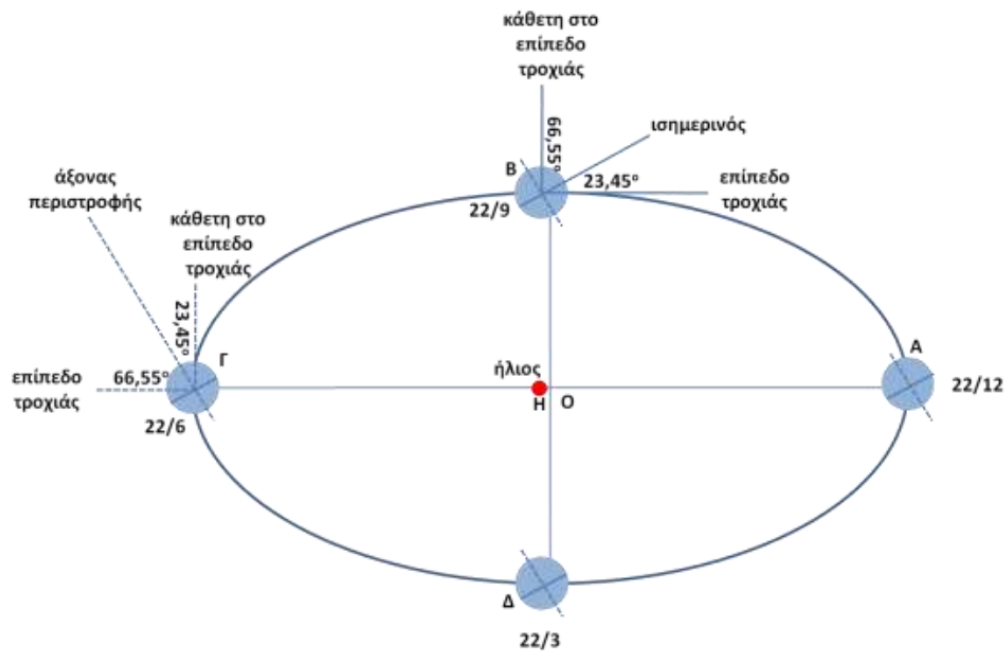
$$\frac{r_v}{r} = \frac{1 - e^2}{1 + e \cos \left[(v - 1) \times \left(\frac{360}{365} \right) \right]} \quad (2.1)$$

($v = 1$ για την 1η Ιανουαρίου). Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, έξω από τα όρια της γήινης ατμόσφαιρας, εξαρτάται από την απόσταση αυτή και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{ov} = I_{OAVE} \left(\frac{r}{r_v} \right)^2 \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.3: Θέση Γης στο Περιήλιο και το Αφήλιο



Σχήμα 2.4: Ελλειπτική Τροχιά της Γης

Παρατηρείται λοιπόν ότι κατά το καλοκαίρι η Γη δέχεται λιγότερη ηλιακή ενέργεια σε σχέση με το χειμώνα (σε αντίθεση με την κοινή διαπίστωση). Οι εποχές οφείλονται στην κλίση του άξονα περιστροφής της Γης ως προς το επίπεδο της τροχιάς που είναι ίση με $23,4^\circ$.

Για τη μελέτη της ηλιακής ενέργειας και ακτινοβολίας είναι απαραίτητη η γνώση των συντεταγμένων στις οποίες βρίσκεται κάθε στιγμή ο ήλιος σε σχέση με το εκάστοτε σημείο μελέτης στην επιφάνεια της Γης. Έτσι υπάρχουν συγκεκριμένα βασικές γωνίες που περιγράφουν τη θέση του ήλιου στην εκάστοτε περίπτωση και φυσικά μεγέθη που βοηθούν στους αναγκαίους υπολογισμούς τέτοιων θεμάτων:

Ο ηλιακός χρόνος είναι ο χρόνος που μετράται με βάση τη φαινόμενη κίνηση του ηλίου στον ουρανό. Έτσι, ηλιακό μεσημέρι είναι η χρονική στιγμή που ο ήλιος τέμνει τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Ο ηλιακός χρόνος δεν συμπίπτει με τον τοπικό χρόνο τρολ, που δείχνει το ρολόι. Συνδέεται όμως με αυτόν σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\text{Ηλιακός Χρόνος} = t_{\text{ρολ}} \pm 4 \cdot (L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.3)$$

Όπου, L_{st} είναι το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού στον οποίο βασίζεται ο τοπικός χρόνος (π.χ για την Ελλάδα είναι περίπου μεταξύ 35° και 41°) και L_{loc} το γεωγραφικό μήκος του παρατηρητή. Η σχέση ισχύει με + για τα δυτικά μήκη και με - για τα ανατολικά. Ο συντελεστής 4 εκφράζει λεπτά/μοίρα (min/deg). Τέλος, E (min) είναι η εξίσωση του χρόνου που λαμβάνεται για κάθε ημέρα του έτους από τη σχέση:

$$E = 9,87 \cdot \sin(2B) - 7,53 \cdot \cos(B) - 1,5 \cdot \sin(B) \quad (2.4)$$

$$\text{όπου, } B = \frac{360(n - 81)}{364} \quad (2.5)$$

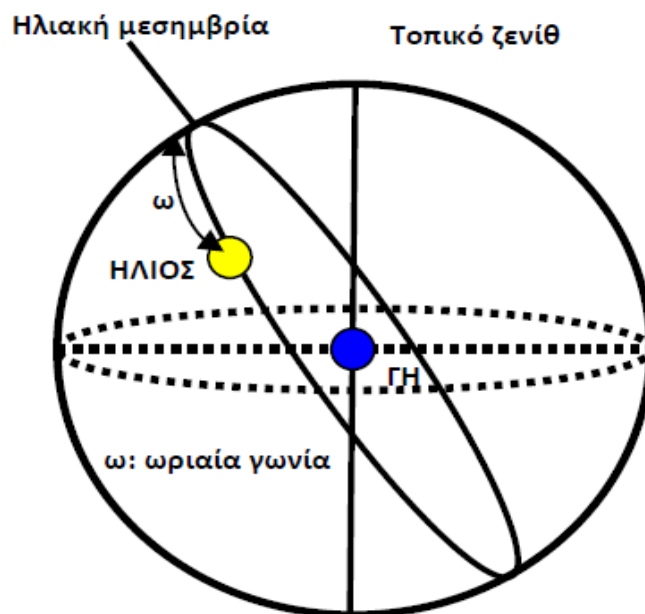
για $n = \text{ημέρα του έτους (1 έως 365)}$

Ωριαία γωνία (hour angle), ω : είναι η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της γης περί τον άξονα της με ρυθμό $15^\circ/h = 0,25^\circ/min$ (βλ Σχήμα 2.5).

Ισχύει:

$$\omega = 15 \cdot (\text{Ηλιακός Χρόνος} - 12) \quad (2.6)$$

Με $\omega > 0$ για μ.μ. & $\omega < 0$ για π.μ.



Σχήμα 2.5: Ωριαία γωνία

Ηλιακή απόκλιση (declination), δ : είναι η γωνιακή θέση του ηλίου κατά το ηλιακό μεσημέρι ως προς το επίπεδο του ισημερινού. Πρόκειται ,δηλαδή, για τη γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει τα κέντρα του ήλιου και της γης ,και από το επίπεδο του ισημερινού.

Ισχύει ότι $-\Delta \leq \delta \leq \Delta$, όπου $\Delta = 23,45^\circ$, γωνία που ορίζει:

Το μέγιστο γεωγραφικό πλάτος (θετικό από τον ισημερινό και προς το βορά ή αρνητικό από τον ισημερινό προς το νότο) στο οποίο ο ήλιος μπορεί να φωτίσει κατακόρυφα (υπό γωνία 90°) – το μέγιστο αυτό βόρειο πλάτος $+23,45^\circ$ ορίζει τον τροπικό του καρκίνου, ο οποίος φωτίζεται κατακόρυφα στις 12 το μεσημέρι (ηλιακή ώρα) στις 22/6 και το μέγιστο νότιο πλάτος $-23,45^\circ$ ορίζει τον τροπικό του αιγόκερου, ο οποίος φωτίζεται κατακόρυφα στις 12 το μεσημέρι (ηλιακή

ώρα) στις 22/12 – ο θερμικός ισημερινός της γης εκτείνεται στη ζώνη αυτή από 23,45° βόρεια μέχρι -23,45° νότια του γεωγραφικού ισημερινού.

Η Ηλιακή απόκλιση δ λοιπόν, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360(284 + n)}{365}\right) \quad (2.7)$$

όπου n είναι ο χαρακτηριστικός αριθμός της συγκεκριμένης ημέρας του χρόνου ($n = 1$ για την 1η Ιανουαρίου).

Γωνία πρόσπτωσης: η γωνία μεταξύ της ακτινοβολίας και της κάθετης στην επιφάνεια. Μπορεί να ξεπεράσει την τιμή των 90° που σημαίνει ο ήλιος πίσω από την επιφάνεια.

Γεωγραφικό πλάτος (Latitude), φ ή L_{at} : η γωνιακή απόσταση ενός σημείου από τον Ισημερινό, με $-90^\circ \leq \varphi \leq +90^\circ$

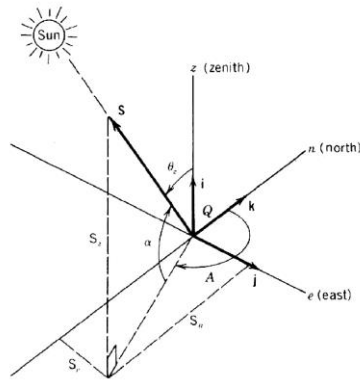
Ζενιθιακή γωνία, θ_z : η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του τοπικού ζενίθ και την ευθεία παρατηρητή-ήλιο. Ισχύει: $0 \leq \theta_z \leq 90^\circ$

Ηλιακό ύψος (elevation angle), a_s : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο (βλ. Σχήμα 2.5). Δίνεται από τη σχέση:

$$\sin(a_s) = \cos(\omega) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) = \cos(\theta_z) \quad (2.8)$$

Ηλιακό αζιμούθιο (azimuth angle), A : είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της Νότιας κατεύθυνσης (με δεξιόστροφη φορά). Έχουμε, δηλαδή $\gamma_s = 0^\circ$ στο Νότο, $\gamma_s = 90^\circ$ στηβ Δύση, $\gamma_s = 180^\circ$ στο Βορρά και $\gamma_s = -90^\circ$ στην Ανατολή. Η σχέση που υπολογίζει την γωνία αζιμούθιο είναι:

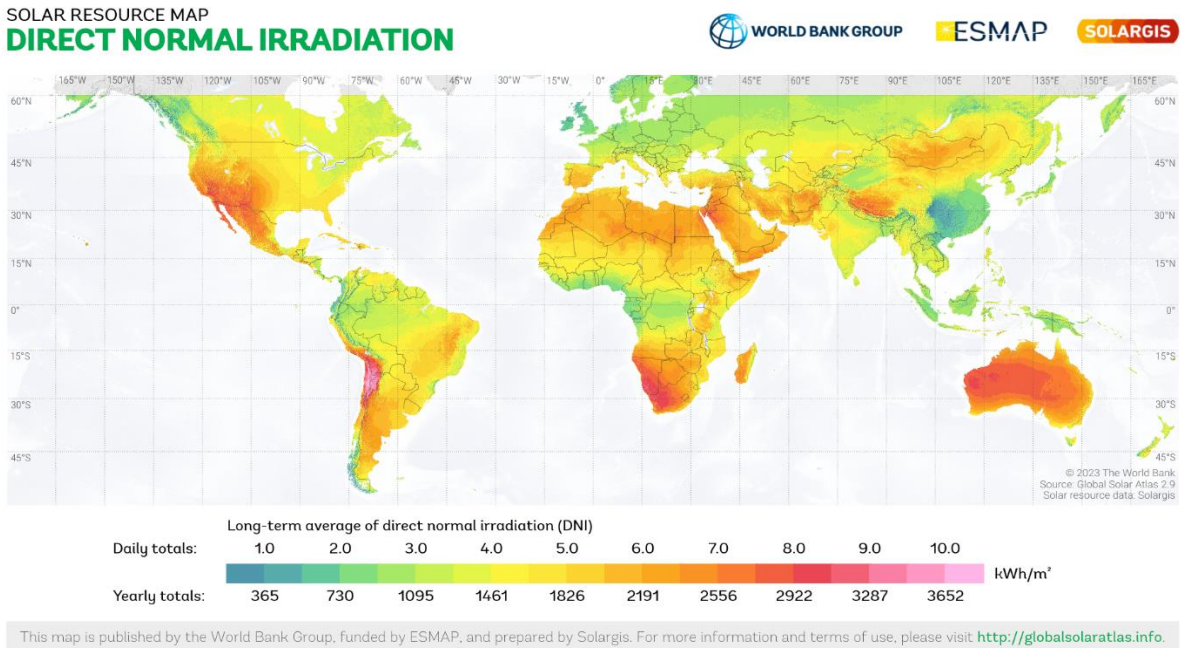
$$\sin(A) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(a_s)} \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.5: Ηλιακό ύψος και ηλιακό αζιμούθιο(Azimuth) [35].

2.3 Ηλιακό Δυναμικό

Το ηλιακό δυναμικό ενός σημείου της Γης είναι ουσιαστικά ο μέσος όρος των τιμών άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Όμως η άμεση προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία έχει διαφορετικούς ορισμούς ανάλογα την περίπτωση μελέτης και δημιουργεί σύγχυση σε μελετητές και επιστήμονες. Ο πιο διαδεδομένος είναι ότι άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι ο λόγος της ισχύος ακτινοβολίας, σε μια δεδομένη επιφάνεια δέκτη από μια μικρή στερεά γωνία με επίκεντρο της τον ηλιακό δίσκο, προς το εμβαδόν της επιφάνειας αυτής (W/m^2). [37]. Έτσι όταν το επίπεδο της επιφάνειας του δέκτη είναι κάθετο στον άξονα της στερεάς γωνίας και η ακτινοβολία ολοκληρωθεί για το χρονικό διάστημα μιας ημέρας, αναφερόμαστε πλέον σε ολική άμεση ακτινοβολία σε κανονικές συνθήκες (Direct Normal Irradiance) ή ηλιακό δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Πρόκειται για το φυσικό μέγεθος που χαρακτηρίζει μια περιοχή ως φιλόξενη ή αφιλόξενη για εγκατάσταση έργων που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, καθώς ορίζει, πιο απλοϊκά πόση ηλιοφάνεια έχει η συγκεκριμένη περιοχή.



Σχήμα 2.6: Παγκόσμιος Χάρτης Δυναμικού Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας (Direct Normal Irradiance) [38].

Παρατηρείται ότι οι περιοχές περίξ του Ισημερινού, με γεωγραφικό πλάτος περίπου από -40° έως $+40^{\circ}$, εμφανίζουν το περισσότερο ηλιακό δυναμικό. Πρόκειται κυρίως δηλαδή για την Αυστραλία, το μεγαλύτερο μέρος της Αφρικής και της Μέσης Ανατολής, τη νότια Ισπανία, τη Χιλή, τις νοτιοδυτικές Πολιτείες των ΗΠΑ (Καλιφόρνια, Νέο Μεξικό) και το Μεξικό. Δεν είναι τυχαίο ότι η ετήσια άμεση ηλιακή ακτινοβολία στις προαναφερθείσες περιοχές είναι τόσο μεγάλη, που παρουσιάζουν υψηλές θερμοκρασίες όλο το έτος, προβλήματα λειψυδρίας και γονιμότητας του εδάφους και κατά επέκταση βιωσιμότητας.

Σε ότι αφορά τον Ελλαδικό χώρο, παρόλο που δεν βρίσκεται στις πρώτες σε υψηλό ηλιακό δυναμικό περιοχές του πλανήτη, παρατηρούμε ορισμένα τμήματα της επικράτειας να ξεπερνούν ακόμα και τις 2000 kWh/m^2 . Είναι φυσιολογικό λοιπόν, περιοχές που γειτνιάζουν με τη Βόρεια Αφρική, όπως η Ρόδος και η Κρήτη να παρουσιάζουν μελετητικό ενδιαφέρον για την κατασκευή έργων που θα εκμεταλλεύονται αυτή την υψηλού δυναμικού ηλιακή ακτινοβολία (βλ.Σχήμα 2.7).



Σχήμα 2.7: Χάρτης Άμεσης Ηλιακής Ακτινοβολίας (Direct Normal Irradiance) της Ελλάδας [38].

Η μελέτη του ηλιακού δυναμικού μιας τοποθεσίας απαιτεί μετρήσεις και καταγραφές δεδομένων για πολλά συναπτά έτη ώστε τα αποτελέσματα να είναι αξιόπιστα. Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο είναι το πυρανόμετρο, το πυρηλιόμετρο και η κυψελίδα αναφοράς.

Το πυρανόμετρο είναι όργανο που μετράει την ολική και διάχυτη πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και η φασματική τους ευαισθησία είναι ανεξάρτητη του μήκους κύματος της

ακτινοβολίας. Έτσι το πυρανόμετρο, εκμεταλλεύεται το φαινόμενο *Seebeck*, κατά το οποίο σε ένα κλειστό κύκλωμα από δύο ανόμοια μέταλλα, οι ενώσεις των οποίων έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες, με αυτή τη διαφορά θερμοκρασίας να δημιουργείται διαφορά δυναμικού η οποία προκαλεί την ροή ρεύματος [39]. Συγκεκριμένα, ένα θερμοζεύγος πυρανόμετρου μπορεί να παράγει μια τάση λίγων μικροβόλτ (μV) έως αρκετών δεκάδων μικροβόλτ (μV) για κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας του ανά ένα βαθμό Κελσίου. Καθώς αυτή η τάση δεν είναι αρκετή, πιο ιδανικό είναι να κατασκευάζονται τα πυρανόμετρα με αρκετά, συνδεδεμένα σε σειρά, θερμοζεύγη προκειμένου να καταγράφεται στην έξοδο τάση της τάξεως των mV. Η αύξηση της θερμοκρασίας του, λόγω της απορρόφησης ακτινοβολίας, επηρεάζεται από τον άνεμο, τη βροχή και την εκπομπή θερμικής ενέργειας προς το περιβάλλον [40].

2.4 Εκμετάλλευση και μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική

Αντιμέτωποι με την εξάντληση των ορυκτών πόρων ως πηγές ενέργειας αλλά και τη κλιματική αλλαγή και τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προέρχονται από τη χρήση τους, η παγκόσμια κοινότητα έχει επανειλημμένα θέσει στόχους ραγδαίας ενεργειακής μετάβασης. Ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής καθώς είναι υπεύθυνος για περίπου το 40% των αέριων του θερμοκηπίου παγκοσμίως [41]. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή, αιολική, γεωθερμική, υδροδυναμική) αποτελούν πλέον τη κυρίαρχη εναλλακτική στα ορυκτά καύσιμα.

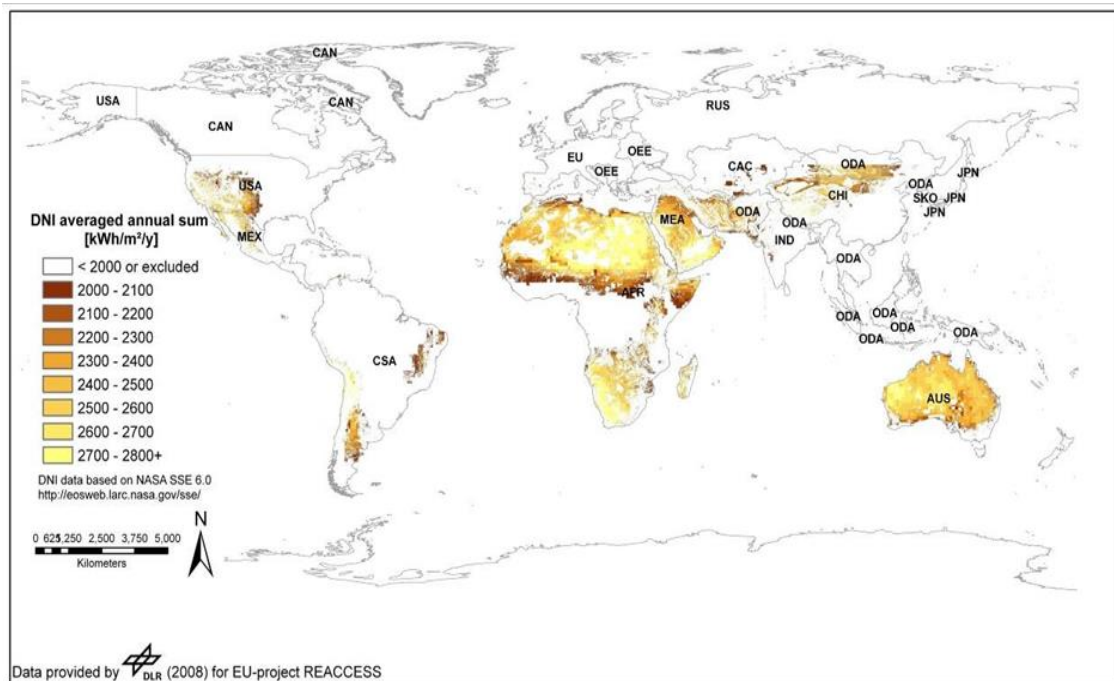
Όμως η στοχαστική και μεταβλητή φύση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ήλιος, άνεμος) των περισσότερων τεχνολογιών με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες) είναι τέτοια που δεν επιτρέπει τη πλήρη κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του δικτύου (είτε μεμονωμένα είτε παγκόσμια) καθ' όλη τη διάρκεια του 24ώρου. Πιο συγκεκριμένα, π.χ. κατά τη διάρκεια έλλειψης ηλιοφάνειας (είτε λόγω νύκτας είτε λόγω συννεφιάς) αδυνατούν τα φωτοβολταϊκά να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια, ενώ αντίστοιχα αν επικρατεί άπνοια οι ανεμογεννήτριες αδυνατούν να λειτουργήσουν και να αποδώσουν ηλεκτρική ενέργεια.

Συνεπώς, απαιτούνται τεχνολογίες οι οποίες να μην αποδίδουν αδιάκοπα ηλεκτρική ενέργεια ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους (όπως οι θερμικοί σταθμοί κάθε είδους) αλλά συγχρόνως να είναι φιλικές προς το περιβάλλον και να μην επιταχύνουν την ήδη επιδεινωθείσα κλιματική αλλαγή. Για αυτό ακριβώς το λόγο, τα Συγκεντρωτικά Θερμοηλιακά Συστήματα (*Concetrated Solar Power*) ή Ηλιοθερμικοί Σταθμοί Ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν μια συνδυαστική εναλλακτική που ήδη έχει αποκτήσει τεχνολογικό ενδιαφέρον. Καθώς, έχουν την δυνατότητα οι συγκεκριμένοι ηλιοθερμικοί

σταθμοί να εκμεταλλεύονται την άμεση ηλιακή ακτινοβολία (DNI), προκειμένου να εκκινήσουν συμβατικούς κύκλους συστήματος ατμοστροβίλου, αντλούν ως πρωτογενή ενέργεια, μια πηγή ουσιαστικά ανεξάντλητη και πλήρως φιλοπεριβαλλοντική και όχι τα παραδοσιακά πρωτογενή καύσιμα των θερμοηλεκτρικών σταθμών (λιγνίτης, φυσικό αέριο κ.ά). Συγχρόνως, η δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε ειδικά συστήματα επιτρέπει στους συγκεκριμένους σταθμούς να παράγουν ηλεκτρισμό πέραν των ωρών ηλιοφάνειας ή ακόμα και να συνδυαστούν με ένα συμβατικό θερμοηλεκτρικό σταθμό για πλήρη κάλυψη της ονομαστικής ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι ενδεικτικά, 1 MW εγκατεστημένης ισχύος συγκεντρωτικού θερμοηλιακού συστήματος (CSP) αποτρέπει την εκπομπή 1360 τόνων διοξειδίου του άνθρακα έναντι ενός λιγνιτικού θερμοηλεκτρικού σταθμού και 1 τετραγωνικό μέτρο (m^2) ηλιακού κατόπτρου παράγει ετησίως 400KWh ηλεκτρισμού, αποτρέποντας την εκπομπή 12 τόνων CO_2 και την καύση 2,5 τόνων ορυκτών καυσίμων σε ορίζοντα 25ετής λειτουργίας [42].

Η μελέτη και εγκατάσταση οποιουδήποτε ΣΗΣ (CSP) έργου προϋποθέτει αρχικά την επιλογή της βέλτιστης τοποθεσίας και αντίστοιχα της στατιστικής καταγραφής του ηλιακού δυναμικού (DNI). Κριτήρια επιλογής είναι η κλίση του εδάφους της εκάστοτε τοποθεσίας που δεν πρέπει να ξεπερνάει το 2%, η ύπαρξη δασών, βάλτων, κινούμενων αμμόλοφων, καλλιεργήσιμων εκτάσεων, αεροδρομίων, ορυχείων και άλλων δραστηριοτήτων εκμετάλλευσης της γης. Φυσικά, τα καταγεγραμμένα στατιστικά επί συναπτά έτη της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) υποδεικνύουν σε τι βαθμό η εκάστοτε εγκατάσταση πρόκειται να αποδώσει, προϋποθέτοντας τουλάχιστον ακτινοβολία μεγαλύτερη των 2000KWh/ m^2 ετησίως.

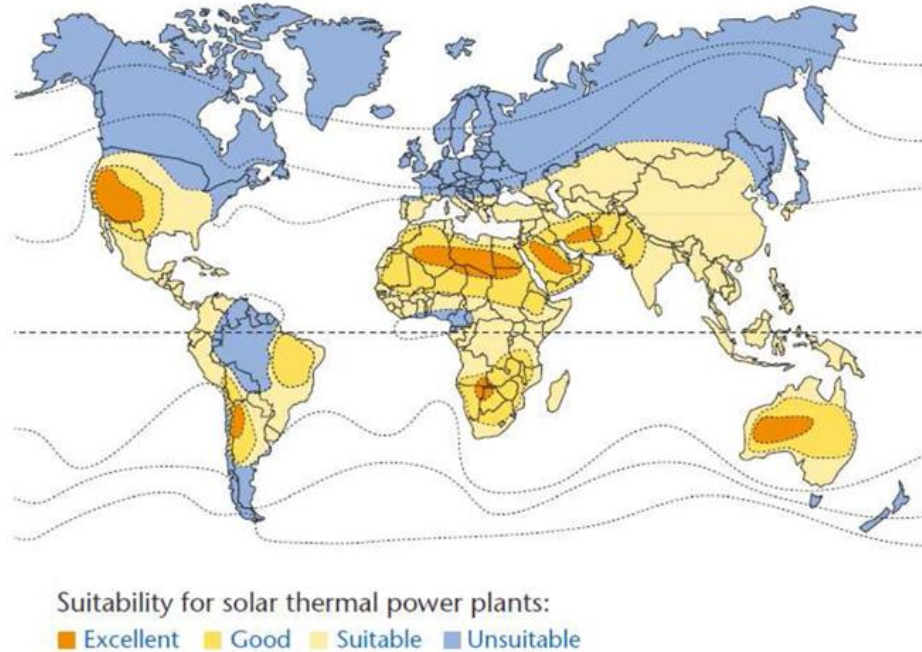
Τα άνωθεν κριτήρια έχουν μελετηθεί παγκοσμίως από μελετητές και με το συνδυασμό τους έχουν σχηματίσει χάρτες καταλληλότητας για εγκατάσταση τοποθεσιών. Μια σημαντική μελέτη αποτελεί η 22 ετών στατιστική καταγραφή ηλιακού δυναμικού των *NASA Surface Meteorology* και *Solar Energy Program (SSE)* (βλ. Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Χάρτης αποτελεσμάτων του ετήσιου αθροίσματος DNI για εν δυνάμει εγκατάσταση ΣΗΣ όπως ορίστηκε από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα REACCESS. [44]

Έτσι καταγράφεται, τουλάχιστον θεωρητικά, μια δυνατότητα εγκατάστασης ΣΗΣ της τάξεως των 3.000.000 TWh/έτος που ισοδυναμεί με το 120πλάσιο της σημερινής παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης των 25500 TWh/έτος (βλ. Σχήμα 3.2) [43].

Τα Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα έχουν αναγνωριστεί ως κατάλληλα κυρίως για μεγάλη ηλεκτροπαραγωγή της τάξεως 10-1000 MW.



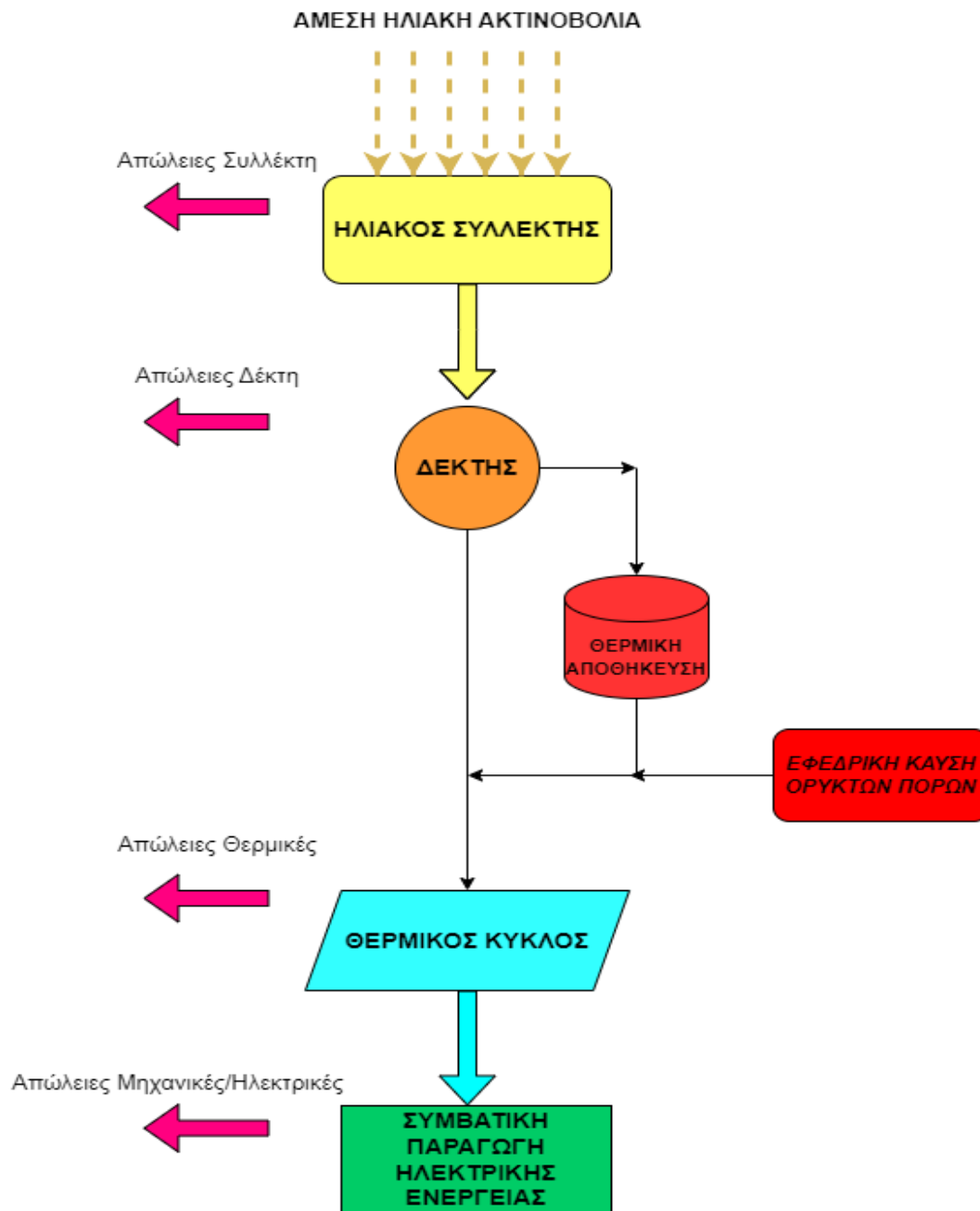
Σχήμα 3.2: Παγκόσμιος Χάρτης Καταλληλότητας Εγκατάστασης ΣΗΣ [65].

Η παραγωγή ηλεκτρισμού από την ηλιακή ενέργεια, που αποτελεί την πρωτογενή ενέργεια αυτών των συστημάτων, είναι αποτέλεσμα συνεχόμενων μετατροπών από τη μια μορφή στην άλλη. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται και συλλέγεται μέσω διαφόρων τεχνολογιών συλλογής και συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα δέκτη. Εκεί παρέχεται η συγκεντρωμένη ακτινοβολία, μετατρέπεται άμεσα σε θερμική ενέργεια, καθώς αναπτύσσονται μέχρι και πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Ακολούθως, η θερμική ενέργεια μεταφέρεται στις διατάξεις του συστήματος, με τη μορφή υψηλής ενθαλπίας σε ένα εργαζόμενο μέσο (π.χ. νερό-ατμός). Στη συνέχεια αυτή η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να λειτουργήσει ένας συμβατικός θερμικός κύκλος παραγωγής ισχύος (π.χ. αεριοστρόβιλος). Όπως είπαμε τα τελικά στάδια ΣΗΣ για ηλεκτροπαραγωγή, είναι όμοια με αυτά της συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής (π.χ. Θερμοηλεκτρικός Σταθμός Λιγνίτη), αφού η τελική μετατροπή ενέργειας αφορά τη δημιουργία και χρήση ατμού ή αερίου ικανά για την περιστροφή στροβίλων της γεννήτριας της εγκατάστασης.

Παράλληλα, στην άμεση εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας, μπορεί η θερμική ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας (και της επιθυμητής άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας) να αποθηκευτεί σε ένα μέσο υγρό, στερεό ή σε άλλο υλικό αλλαγής φάσης όπως για παράδειγμα κεραμικά, τσιμέντο, υγροποιημένα άλατα κ.ά. Αυτή η αποθηκευμένη ενέργεια έπειτα, σε συνθήκες μη άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, μπορεί να γίνει και πάλι διαθέσιμη, να εξαχθεί και

να χρησιμοποιηθεί στη λειτουργία ηλεκτροπαραγωγής. Επιπλέον, πλεονέκτημα αποτελεί ότι υπάρχει η δυνατότητα να υποστηριχτεί η όλη λειτουργία του συστήματος από την προσθήκη ενός σταθμού συμπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα, ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών όλες τις εποχές του χρόνου και σε όλες τις καιρικές συνθήκες. Παραθέτουμε τη βασική ροή της διαδικασίας που διέπει όλα τα Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα ανεξαρτήτως μεγέθους ή τύπου :

- Συλλογή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (DNI) με διάταξη συλλεκτών
- Συγκέντρωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε κεντρικό δέκτη
- Μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική ενέργεια από ηλιακό/κεντρικό δέκτη
- Μεταφορά της θερμικής ενέργειας στο σύστημα
- Μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια μέσω θερμικών κύκλων και θερμικών μηχανών.
- Μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω γεννήτριας



Σχήμα 3.3: Σχεδιάγραμμα Ροής Ενέργειας και Λειτουργιών ΣΗΣ

Τα Συγκεντρωτικά Ηλιοθερμικά Συστήματα, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και προσπαθώντας να καλύψουν διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες και να υπερβούν οικονομικά κόστη και κλιματικές προκλήσεις, έχουν πλέον διαμορφωθεί στις εξής διαφορετικές κατηγορίες με βάση το είδος σχεδίασης:

- Πύργος Ηλιακής Ισχύος ή Σύστημα Κεντρικού Ηλιακού Δέκτη (Solar Power Tower)
- Παραβολικοί Κοίλοι Συλλέκτες (Parabolic Trough Collector – PTC)
- Δίσκος-Μηχανή (Dish-Engine)
- Γραμμικοί Ανακλαστήρες Fresnel (Concentrating Linear Fresnel Reflectors)



Εικόνα 3.1: Τυπικά συστήματα των διάφορων Συγκεντρωτικών Ηλιοθερμικών Συστημάτων

3. ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

Ηλιακός συλλέκτης ονομάζεται η συσκευή που μετατρέπει τη συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα, δηλαδή την ηλιακή ενέργεια σε θερμική, η οποία μεταφέρεται σε ένα ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητα που διαρρέει τον συλλέκτη. Μέρος της προσπίπτουσας συγκεντρωμένης ηλιακής ακτινοβολίας ανακλάται στο περιβάλλον. Για τους συλλέκτες με διαφανές κάλυμμα στην επιφάνεια, η αναχαιτισθείσα ακτινοβολία υπόκειται σε ανάκλαση, απορρόφηση και μετάδοση στην επιφάνεια κάλυψης, επομένως συνεισφέρει στις οπτικές απώλειες. Άρα η απόδοση ενός συλλέκτη εξαρτάται από οπτικούς και θερμικούς παράγοντες.

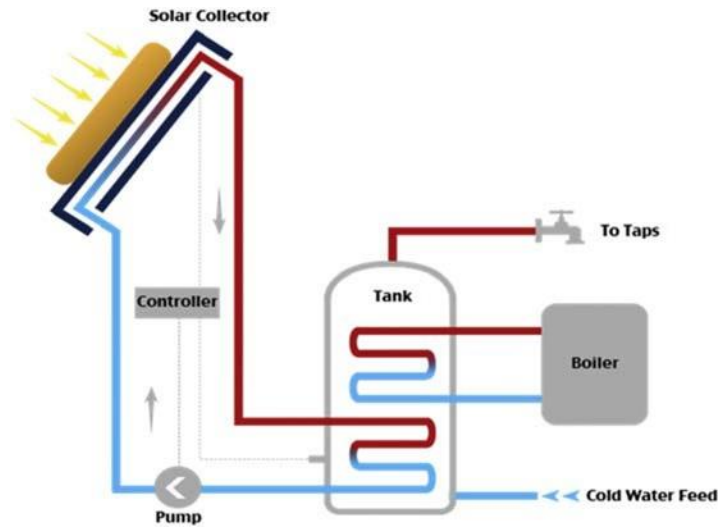
Οι ηλιοθερμικοί συλλέκτες (Solar Thermal Collector) διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τους *συγκεντρωτικούς* και τους *μη-συγκεντρωτικούς* (βλ. Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1 : Ταξινόμηση και κατηγορίες ηλιακών συλλεκτών.

3.1 ΜΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ (NON-CONCENTRATING COLLECTORS)

Αυτός ο τύπος συλλεκτών αποτελείται από συλλέκτες επίπεδης πλάκας, συλλέκτες με εκκενωμένο σωλήνα και δεν απαιτεί τεχνική συγκέντρωσης, αλλά η ποσότητα των ακτίνων που συλλέγονται εξαρτάται από την επιφάνεια. Η μεγάλη επιφάνεια στην περίπτωση αυτή είναι σημαντική για την αύξηση της απόδοσης του συλλέκτη.



Εικόνα 2: Βασική διάταξη ηλιοθερμικού συλλέκτη [66].

3.1.1 Συλλέκτες Επίπεδης Πλάκας (Flat Plate Collectors)

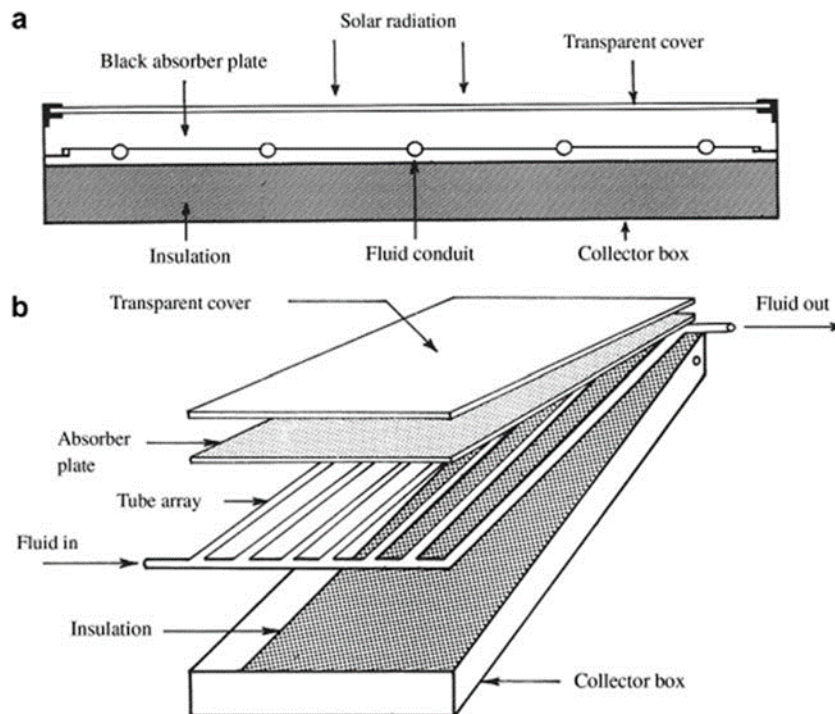
Οι επίπεδοι συλλέκτες που είναι μη συγκεντρωτικού τύπου αποτελούνται από επίπεδο θερμικό συλλέκτη σε σχεδιασμό ή σχήμα. Υπάρχουν δύο τύποι: με υαλοπίνακα/τζάμι ή χωρίς υαλοπίνακα/τζάμι. Μπορούν να μεταφέρουν θερμότητα μέσω ρευστού εργασίας όπως νερό, ψυκτικά μέσα, αέρας κ.λπ. Για τον επίπεδο συλλέκτη, η ακτινοβολία προσπίπτει στο διαφανές κάλυμμα με επιφάνεια υψηλής απορροφητικότητας, η πλάκα απορροφά μέρος της ενέργειας της ακτινοβολίας, η οποία με τη σειρά της μετατρέπεται σε θερμότητα και στη συνέχεια μεταδίδεται στο ρευστό μεταφοράς μέσω σωλήνων για αποθήκευση ή άμεση χρήση [67].

Ο συλλέκτης αποτελείται από τα εξής βασικά τμήματα:

- *Απορροφητική πλάκα (absorber plate)*: Απορροφά την ακτινοβολία από τον ήλιο.
- *Γυάλινο κάλυμμα (Glass Cover)*: Μεταφέρει την ενέργεια στον απορροφητή και ελαχιστοποιεί τις απώλειες θερμότητας ακτινοβολίας και συναγωγής στον συλλέκτη.
- *Σωλήνας ροής (Flow tube)*: Αποτελείται από το υγρό μεταφοράς θερμότητας.

- Μονωμένο μεταλλικό κουτί συλλέκτη (Collector box) : Μειώνει τις απώλειες θερμότητας του συλλέκτη.

Στο σχήμα 3.2 μπορούμε να δούμε τα επιμέρους τμήματα του συλλέκτη επίπεδης πλάκας.



Σχήμα 3.2: Τυπικός σχεδιασμός και επιμέρους μέρη ενός συλλέκτη επίπεδης πλάκας [67].

Οι συλλέκτες επίπεδης πλάκας με τζάμι διαθέτουν ένα διαφανές κάλυμμα, συνήθως από γυαλί ή πλαστικό, το οποίο προστατεύει την απορροφητική πλάκα και το υγρό από το εξωτερικό περιβάλλον. Το κάλυμμα μειώνει τις απώλειες θερμότητας από τον συλλέκτη δημιουργώντας ένα φαινόμενο θερμοκηπίου, παγιδεύοντας την υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από την πλάκα. Αυτό καθιστά τους επίπεδους συλλέκτες με υαλοπίνακες πιο αποδοτικούς και κατάλληλους για εφαρμογές υψηλότερων θερμοκρασιών, όπως το ζεστό νερό χρήσης ή η θέρμανση χώρων. Ωστόσο, οι συλλέκτες επίπεδων πλακών με τζάμια έχουν επίσης ορισμένα μειονεκτήματα. Είναι ακριβότεροι, βαρύτεροι και πιο επιρρεπείς στη θραύση από τους μη υαλοποιημένους. Απαιτούν επίσης περισσότερη συντήρηση, όπως ο καθαρισμός του καλύμματος από τη σκόνη ή το χιόνι και η αποτροπή του παγώματος ή του βρασμού του υγρού.

Οι συλλέκτες επίπεδης πλάκας χωρίς τζάμι δεν έχουν διαφανές κάλυμμα και εκτίθενται απευθείας στον αέρα του περιβάλλοντος. Αυτό σημαίνει ότι έχουν χαμηλότερες απώλειες θερμότητας από τους υαλοπίνακες, καθώς δεν εκπέμπουν υπέρυθη ακτινοβολία. Έχουν

επίσης χαμηλότερα κέρδη θερμότητας, καθώς δεν επωφελούνται από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ως εκ τούτου, οι επίπεδοι συλλέκτες χωρίς τζάμια είναι λιγότερο αποδοτικοί και κατάλληλοι για εφαρμογές χαμηλότερης θερμοκρασίας, όπως η θέρμανση πισίνας ή η προθέρμανση νερού. Ωστόσο, οι συλλέκτες επίπεδων πλακών χωρίς τζάμια έχουν επίσης ορισμένα πλεονεκτήματα. Είναι φθηνότεροι, ελαφρύτεροι και ανθεκτικότεροι από τους υαλοπίνακες. Απαιτούν επίσης λιγότερη συντήρηση, καθώς δεν χρειάζεται να καθαρίζονται ή να προστατεύονται από το πάγωμα ή τον βρασμό.

Ωστόσο, οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν επίσης ορισμένα βασικά μειονεκτήματα. Οι επίπεδοι συλλέκτες έχουν χαμηλή απόδοση και υψηλή απώλεια θερμότητας σε σύγκριση με άλλους τύπους ηλιακών συλλεκτών, ιδίως σε υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία. Έχουν επίσης περιορισμένο εύρος λειτουργίας και χαμηλή ανοχή σε ακραίες συνθήκες, όπως το πάγωμα, ο βρασμός ή η στασιμότητα.

3.1.2 Συλλέκτες με Σωλήνα Κενού (Evacuated Tube Collectors)

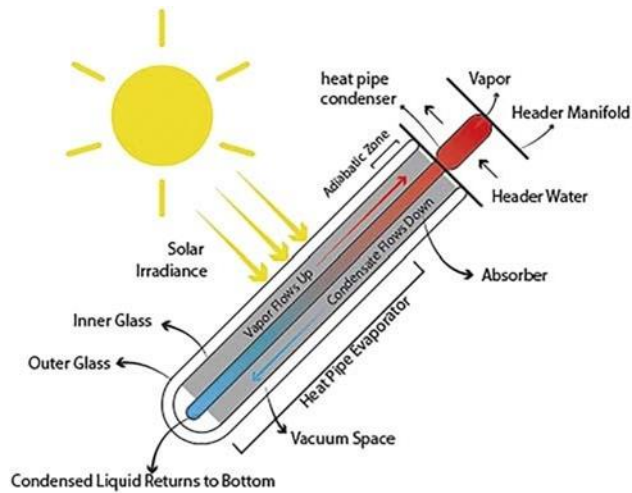
Ο συλλέκτης με σωλήνα κενού είναι ένας συλλέκτης που μοιάζει με σωλήνα και αποτελείται από σειρά σωλήνων κενού για την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού για χρήση όταν δέχεται ηλιακό φως. Στους σωλήνες χρησιμοποιούνται κενά ή εκκενωμένοι χώροι για να εισέρχονται οι ακτινοβολίες και να παγιδεύεται η θερμότητα μειώνοντας τις απώλειες θερμότητας στην ατμόσφαιρα. Οι σωλήνες είναι κατασκευασμένες από μέταλλο που λειτουργεί ως απορροφητική πλάκα, στερεωμένη σε σωλήνα (σωλήνας θερμότητας) για την μεταφορά της θερμικής ενέργειας που συλλέγεται από τον ήλιο στο νερό για εφαρμογές/χρήση.

Οι συλλέκτες εκκενωμένων σωλήνων λειτουργούν με τη βασική αρχή της εφαρμογής του ηλιακού φωτός για τη θέρμανση υγρών. Τα κύρια συστατικά στοιχεία του σχεδιασμού του ETC στο σχήμα 4.7 αναφέρονται παρακάτω:

- *Σωλήνας Θερμότητας (Heat Pipe)* : Μεταφορά της θερμότητας στο ρευστό.
- *Απορροφητική πλάκα (Absorber Plate)* : Απορροφά την ακτινοβολία που εισέρχεται στον σωλήνα κενού.
- *Χάλκινη βαλβίδα (Copper Manifold)* : Εναλλάκτης θερμότητας.

Οι εφαρμογές του ηλιακού συλλέκτη με σωλήνα κενού είναι στο οικιακό νερό, στη θέρμανση χώρων, στη ψύξη και θέρμανση βιομηχανικών διεργασιών. Οι αποδόσεις είναι συνήθως 30-45%. Σε γενικές γραμμές, οι ETC (Evacuated Tube Collectors) υπερτερούν των FPC (Flat Plated Collectors) σε κρύο καιρό, επειδή η απόδοση των ETC δεν πέφτει τόσο γρήγορα όταν οι

εξωτερικές θερμοκρασίες της ατμόσφαιρας πέφτουν. Οι ETC έχει ένα μέτριο εύρος θερμοκρασιών περίπου στους 150-200°C.



Σχήμα 3.3: Όψη ηλιακού συλλέκτη με σωλήνα κενού [68].

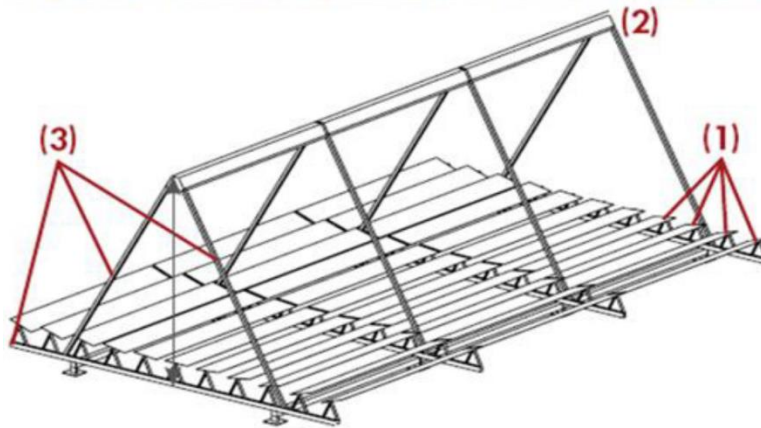
3.2 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΙ ΣΥΛΛΕΚΤΕΣ

3.2.1 Γραμμικοί Συλλέκτες Fresnel



Πρ

Εικόνα 3.1: Επιμήκης ηλιακός συλλέκτης Fresnel της εταιρείας Soltigua [69].



Σχήμα 3.4: Τμήματα γραμμικού συλλέκτη Fresnel [72].

Τα κύρια τμήματα ενός γραμμικού ηλιακού συλλέκτη Fresnel είναι όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.4 :

Πρωτεύοντα κάτοπτρα (primary mirrors) (1): κατασκευασμένα από επίπεδες παράλληλες λωρίδες κατόπτρων. Οι σημαντικότερες παράμετροι σχεδιασμού είναι: το πλάτος των λωρίδων, ο αριθμός των σειρών και τα κενά μεταξύ δύο διαδοχικών κατόπτρων. Σε σύγκριση με το με το παραβολικό κάτοπτρο, το LFSC έχει περισσότερες οπτικές απώλειες. Οι συλλέκτες Fresnel δεν έχουν μόνο διαμήκη απώλειες- επηρεάζονται επίσης από εγκάρσιες απώλειες συνημίτονου επειδή κάθε κάτοπτρο ακολουθεί τον ήλιο ξεχωριστά. Σε υψηλές εγκάρσιες γωνίες πρόσπτωσης, οι παράλληλες λωρίδες κατόπτρων σκιάζουν/μπλοκάρουν η μία την άλλη.

Δέκτης (2): τα κύρια στοιχεία του δέκτη είναι: ο σωλήνας απορρόφησης και το δευτερεύον κάτοπτρο. Το πεδίο του πρωτεύοντος κατόπτρου από μόνο του δεν μπορεί από μόνο του να συσσωρεύσει την απαιτούμενη ισχύ. Η ιδέα είναι να αυξηθεί το απόδοση χωρίς να δημιουργηθούν περισσότερες θερμικές απώλειες. Είναι απαραίτητο να προστεθεί ένα δευτερεύον κάτοπτρο πάνω από το σωλήνα απορρόφησης για να μετριαστεί αυτή η οπτική ανακρίβεια και να βελτιωθεί ο συντελεστής αναχαίτισης. Επιπλέον, είναι αυξάνεται το πλάτος της επιφάνειας του στόχου χωρίς να επηρεάζεται ο σωλήνας απορρόφησης. Το δευτερεύον κάτοπτρο διαμόρφωση πρέπει να προσαρμόζεται ώστε να συγκεντρώνει την εισερχόμενη ακτινοβολία στο σωλήνα απορρόφησης.

Σύστημα παρακολούθησης: Το LFSC διαθέτει μόνο παρακολούθηση ενός άξονα. Η κίνηση των παράλληλων λωρίδων κατόπτρου εξαρτάται μόνο από την πορεία του ήλιου και όχι από τη θέση του κατόπτρου. Κάθε κάτοπτρο παρακολουθεί τον ήλιο ξεχωριστά, στην ίδια γωνιακή ταχύτητα. Τα πρωτεύοντα κάτοπτρα ακολουθούν την τροχιά του ήλιου σε όλη τη διάρκεια της ημέρας, κυρίως με άξονα στη διεύθυνση Βορρά-Νότου, ενώ οι δέκτες παραμένουν σταθεροί.

Επίσης, οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα σε διαφορετικές θερμοκρασίες λειτουργίας για την κάλυψη διαφορετικών αναγκών, καθώς η συγκεκριμένη σχεδίαση προβλέπει μεγάλη ευελιξία στην επιλογή ενός λόγου συγκέντρωσης. Πρακτικά, οι συλλέκτες Fresnel χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο για παραγωγή θερμότητας μέσης ή χαμηλής θερμοκρασίας. Οι χαμηλές θερμοκρασίες έχουν ευρεία εφαρμογή στη θέρμανση/ψύξη κτηρίων, σε βιομηχανικές διαδικασίες παροχής θερμότητας και στην κατεργασία ύδατος.

Οι γραμμικοί συλλέκτες Fresnel έχουν χαμηλότερη οπτική και θερμική απόδοση από τις άλλες τεχνολογίες, όπως τα παραβολικά κάτοπτρα, επειδή ο συνδυασμός ενός σταθερού δέκτη και ενός άξονα παρακολούθησης του ήλιου σε οριζόντιο επίπεδο οδηγούν σε μεγαλύτερες απώλειες συνημίτονου. Τα τμήματα χαμηλού κόστους του συλλέκτη συχνά χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίζουν αυτό το μειονέκτημα.

Το πεδίο του πρωτεύοντος κατόπτρου του LFC ακολουθεί το προφίλ μιας παραβολής που έχει την εστιακή της γραμμή στον σωλήνα του απορροφητή (absorber tube). Ωστόσο, σε σύγκριση με τα παραβολικά, η ανακλαστική επιφάνεια είναι τοποθετημένη σε ένα επίπεδο κοντά στο επίπεδο του εδάφους. Αυτό οδηγεί σε πιο συμπαγή σχεδιασμό, αυξάνει τη χρήση του εδάφους και μειώνει τα φορτία του ανέμου [71].

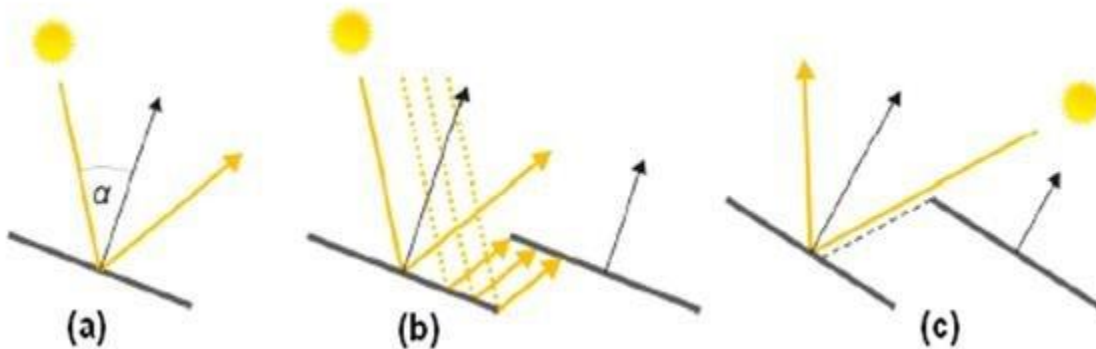
Ο σχεδιασμός του γραμμικού συλλέκτη Fresnel (LFC) επιτρέπει επίσης, μια σταθερή διαμόρφωση του απορροφητή σε αντίθεση με τους συλλέκτες παραβολικού κοίλου. Αυτό απλοποιεί τις υδραυλικές συνδέσεις και μειώνει το κόστος. Επιπλέον, δεδομένου ότι ο απορροφητής είναι σταθερός, φωτίζεται πάντα από τα πρωτεύοντα κάτοπτρα από κάτω και μόνο ένα κλάσμα της ακτινοβολίας προσπίπτει τον απορροφητή από πάνω. Αυτό είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για διφασική λειτουργία.

Στη στρωματοποιημένη ροή δύο φάσεων, ο ατμός βρίσκεται στο άνω τμήμα του σωλήνα του απορροφητή και το υγρό νερό στο κάτω μέρος. Εάν παρέχεται πολύ μεγάλη ισχύς στο άνω τμήμα όπου βρίσκεται ο ατμός, θα αναπτυχθεί μεγάλη κλίση θερμοκρασίας λόγω του χαμηλού ρυθμού μεταφοράς θερμότητας μέσω του ατμού σε σύγκριση με το νερό. Αυτή η κλίση μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη θερμική διαστολή του απορροφητή με αποτέλεσμα να προκληθούν βλάβες στο σωλήνα του απορροφητή και στο γυάλινο κάλυμμά του.

Η οπτική απόδοση του LFC είναι ένα μέτρο του πόσο από τη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία (DNI) μπορεί να μετατραπεί σε θερμική ενέργεια. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που υποβαθμίζουν την οπτική απόδοση του συλλέκτη, με τις κύριες επιδράσεις να συνοψίζονται :

1. *Απώλειες συνημίτονου*: Πρόκειται για την απώλεια που προκύπτει από μη κανονικές προσπίπτουσες ακτίνες στην επιφάνεια του κατόπτρου. Λόγω της μη κανονικής πρόσπτωσης, η αποτελεσματική επιφάνεια του κατόπτρου μειώνεται (βλ. Σχήμα 2.2 αριστερά) κατά έναν παράγοντα ίσο με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και της κανονικής επιφάνειας του κατόπτρου.

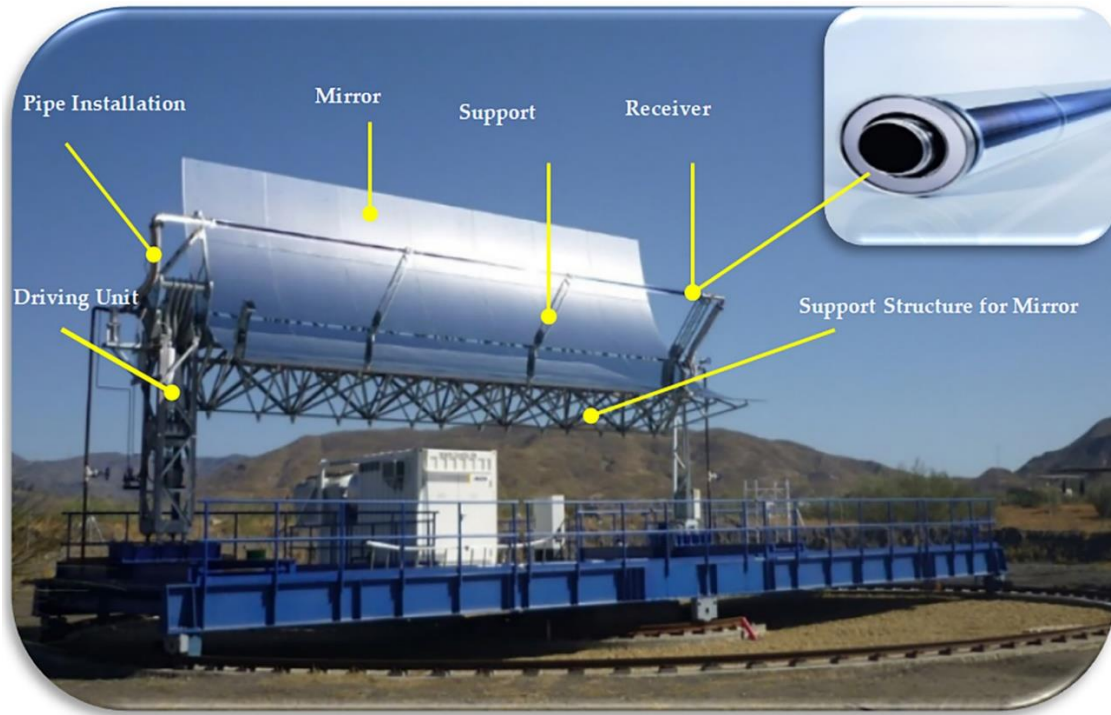
- Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πραγματικότητα, η κανονική πρόσπτωση δεν μπορεί ποτέ να αξιοποιηθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ακόμη και όταν η επιφάνεια του κατόπτρου θα σχημάτιζε κανονική γωνία με τις ηλιακές ακτίνες, εκείνη τη στιγμή το κάτοπτρο θα σκιάζεται από τον απορροφητή (βλ. Σχήμα 3.5)
2. *Μπλοκάρισμα του φωτός και σκίαση στο κάτοπτρο:* Οι απώλειες αποκλεισμού/μπλοκαρίσματος εμφανίζονται όταν ένα από τα κάτοπτρα εμποδίζει την ανακλώμενη ακτινοβολία να φθάσει στον απορροφητή. Από την άλλη πλευρά, η σκίαση συμβαίνει όταν ένα κάτοπτρο σκιάζεται από ένα γειτονικό κάτοπτρο (βλ. Σχήμα 3.5)
 3. *Ανακλαστικότητα κατόπτρου:* Αν και συνήθως χρησιμοποιούνται κάτοπτρα με υψηλή ανακλαστικότητα, η ανακλαστικότητα 100% είναι δύσκολα εφικτή. Η ανακλαστικότητα των κατόπτρων υποβαθμίζεται περαιτέρω από τη ρύπανση και τη συσσώρευση βρωμιάς/σκόνης στην επιφάνεια των κατόπτρων.
 4. *Αποτελεσματική απορρόφηση-διαπερατότητα του σωλήνα απορρόφησης:* Η οπτική απόδοση επηρεάζεται επίσης από τη διαπερατότητα του γυάλινου περιβλήματος του σωλήνα απορρόφησης και επίσης από την ηλιακή απορροφητικότητα της επίστρωσης.
 5. *Τελικές απώλειες:* Ο σωλήνας απορροφητή εκτείνεται κατά μήκος του πεδίου του πρωτεύοντος κατόπτρου, ωστόσο λόγω της μεταβαλλόμενης θέσης του ήλιου, ο απορροφητής φωτίζεται πλήρως μόνο όταν η σχετική αζιμουθιακή γωνία μεταξύ του ήλιου και του συλλέκτη είναι μηδενική. Διαφορετικά, η ηλιακή ακτινοβολία απομακρύνεται από τον απορροφητή. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι συλλέκτες γραμμικής εστίασης κατασκευάζονται συνήθως σε μεγάλες σειρές για να μειωθούν οι απώλειες στα άκρα.
 6. *Διαρροή ακτινοβολίας:* Διαρροή ακτινοβολίας μπορεί να συμβεί σε πολλά σημεία του συλλέκτη. Για παράδειγμα, ένα μέρος της ακτινοβολίας δεν θα φτάσει στο σωλήνα απορρόφησης επειδή ανακλάται έξω από το δευτερεύον ανακλαστήρα. Διαρροή μπορεί επίσης να συμβεί λόγω μη τέλει παρακολούθησης ή μη τέλει εστιακής απόστασης των πρωτευόντων κατόπτρων. Αυτό εξαρτάται από τον συνολικό οπτικό σχεδιασμό.
 7. *Σκίαση από τον απορροφητή:* Σε υψηλές γωνίες ανύψωσης του ήλιου, ο απορροφητής σκιάζει ένα μέρος του πεδίου του κατόπτρου. Κάποια σκίαση θα προέλθει επίσης από τη δομή του συλλέκτη [71].



Σχήμα 3.5 : Σχηματική αναπαράσταση οπτικών απωλειών : (α) συνημιτόνου, (β) αποκλεισμού, (γ) σκίασης [72].

Ένα μειονέκτημα των γραμμικών Fresnel που έχουν μόνο έναν δέκτη είναι ότι είναι δύσκολο να αλλάξει η κατεύθυνση του δέκτη για ένα μεγάλο μέγεθος του πεδίου που απαιτείται σε ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας πολλών μεγαβάτ. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται στο σύστημα συμπαγών γραμμικών ανακλαστήρων Fresnel (Concentrated Linear Fresnel Collectors (CLFR)) που χρησιμοποιεί δύο παράλληλους δέκτες για κάθε σειρά ανακλαστήρων. Εάν οι δέκτες στο CLFR είναι αρκετά κοντά, τότε οι μεμονωμένοι ανακλαστήρες μπορούν να κατευθύνουν ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία σε τουλάχιστον δύο δέκτες, επιτρέποντάς τους να είναι πιο πυκνοσυσκευασμένες συστοιχίες και να έχουν χαμηλότερο ύψος απορροφητή. Οι σωλήνες των δεκτών στα συστήματα CLFR τοποθετούνται στο εστιακό σημείο μιας σειράς κατόπτρων. Ένα πρόσθετο σύνολο κατόπτρων τοποθετείται επίσης στην κορυφή των σωλήνων προκειμένου να συλλαμβάνουν και να εστιάζουν εκ νέου το ηλιακό φως που δεν προσπίπτει απευθείας στους σωλήνες. Αυτή η διάταξη εξασφαλίζει ότι χρησιμοποιείται όλο το διαθέσιμο φως. Ανάλογα με τη θέση του ήλιου, οι ανακλαστήρες μπορούν να εναλλάσσονται σε διαφορετικούς δέκτες για να βελτιωθεί η οπτική απόδοση. Σε σύγκριση με το γραμμικό σύστημα ανακλαστήρων Fresnel, τα συστήματα CLFR μπορούν να παράγουν μεγάλο ποσό θερμότητας και είναι οικονομικά αποδοτικά σε μικρή έκταση. Τα συστήματα CFLR είναι κλιμακούμενα στις ανάγκες του σταθμού παραγωγής ενέργειας και μπορούν να εφαρμοστούν ως αυτόνομες εγκαταστάσεις, καθώς και ως ενισχυτές σε βιομηχανικές εφαρμογές.

3.2.2 Παραβολικός Κοίλος Συλλέκτης (Parabolic Trough Collector)



Εικόνα 3.2: Παραβολικός Κοίλος Συλλέκτης και τα επιμέρους τμήματά του [73].

Ο παραβολικός κοίλος συλλέκτης (Parabolic Trough Collector ή PTC) είναι το πιο ώριμο και διαδεδομένο συγκεντρωτικό ηλιοθερμικό σύστημα σήμερα. Το πρώτο PTC ήταν για χρήση συστήματος άμεσης ατμοπαραγωγής το 1870. Λόγω των σημαντικών βελτιστοποιήσεων και εξελίξεων στο δέκτη, στο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και στη χρήση εναλλακτικών ρευστών μέσων μεταφοράς θερμότητας, η τεχνολογία του παραβολικού συλλέκτη έχει επιτύχει καλύτερες θερμικές αποδόσεις [75].

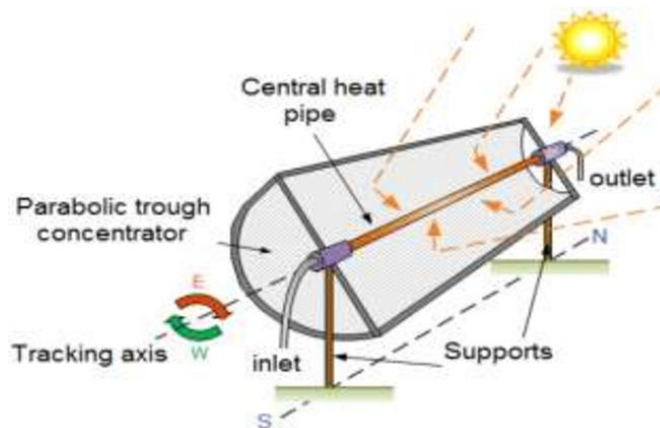
Η κυριότερη εφαρμογή των παραβολικών συλλεκτών είναι στα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής με ηλιοθερμική ενέργεια (CSP plants), τα οποία χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής του ατμού. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται τα εργοστάσια όπου ο ατμός παράγεται άμεσα από τους συλλέκτες και το ηλιακό πεδίο και κατευθύνεται προς τον ατμοστρόβιλο παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος του συστήματος (Direct Steam Generation). Στη δεύτερη κατηγορία, τα έμμεσου τύπου, χρησιμοποιείται ένα θερμικό έλαιο (thermal oil), το οποίο μέσω ενός συστήματος εναλλακτών θερμότητας, παρέχει την απαραίτητη θερμική ενέργεια στο εργαζόμενο ρευστό μέσο του κύκλου παραγωγής ισχύος (Rankine).

Επιπλέον, οι παραβολικοί κοίλοι συλλέκτες χρησιμοποιούνται και σε εγκαταστάσεις, όπου συμβάλλουν μόνο στη θέρμανση του λέβητα ανάκτησης θερμότητας ή στην προθέρμανση, με συνδυασμό των κύκλων Rankine – Brayton.

Ως εργαζόμενο μέσο στον κύκλο Rankine χρησιμοποιείται νερό ή οργανικό ρευστό μέσο, και έτσι ονομάζεται οργανικός κύκλος Rankine (Organic Rankine Cycle - ORC). Για χαμηλότερες θερμοκρασίες, οργανικά μέσα όπως το πεντάνιο και το κυκλοεξάνιο είναι αποδοτικότερα σε σχέση με το νερό, καθώς το κρίσιμο σημείο τους είναι κοντά στη θερμοκρασία λειτουργίας του θερμικού κύκλου. Όταν η λειτουργία της εγκατάστασης γίνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες, το νερό είναι το ιδανικό εργαζόμενο μέσο. Σε πολλές περιπτώσεις, για όσο το δυνατόν πιο αδιάκοπη λειτουργία της ηλεκτροπαραγωγής, χρησιμοποιούνται υβριδικά εργοστάσια, όπου συνδυάζονται διάφορες πηγές θερμότητας για την επίτευξη της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας [76].

3.2.2.1 Κάτοπτρα

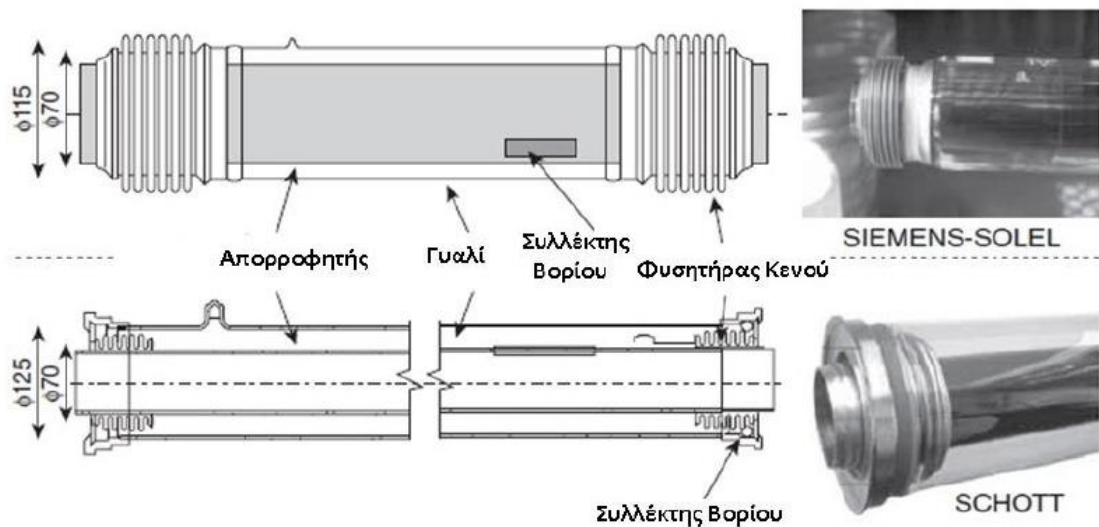
Πρώτο βασικό μέρος του παραβολικού κοίλου συλλέκτη είναι το παραβολικό κάτοπτρο, που έχει σχήμα σαν U, συνήθως μια αλουμινένια επιφάνεια ή εξαιρετικά γυαλισμένο γυαλί (polished glass). Το αλουμίνιο έχει βαθμό απόδοσης ανακλαστικότητας 88% και το γυαλί 95% [77]. Τα παραβολικά αυτά κάτοπτρα στηρίζονται σε αλουμινένια ή ασάλινη δομή στήριξης [78]. Εκμεταλλευόμενο βασική γεωμετρική ιδιότητα της παραβολής, το παραβολικό κάτοπτρο ανακλά τις ηλιακές ακτίνες που προσπίπτουν κάθετα πάνω του, με συγκεντρωτική εστίαση στην εστιακή γραμμή, δηλαδή στον απορροφητήρα (βλ. Σχήμα 3.6). Η εστίαση αυτή της ακτινοβολίας δημιουργεί μεγάλη συγκέντρωση ακτινοβολίας σε περιορισμένη επιφάνεια και επιτυγχάνει στο τέλος μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου.



Σχήμα 3.6: Σχηματική διάταξη παραβολικού συλλέκτη [79]

3.2.2.2 Σωλήνας κενού (evacuated tube)

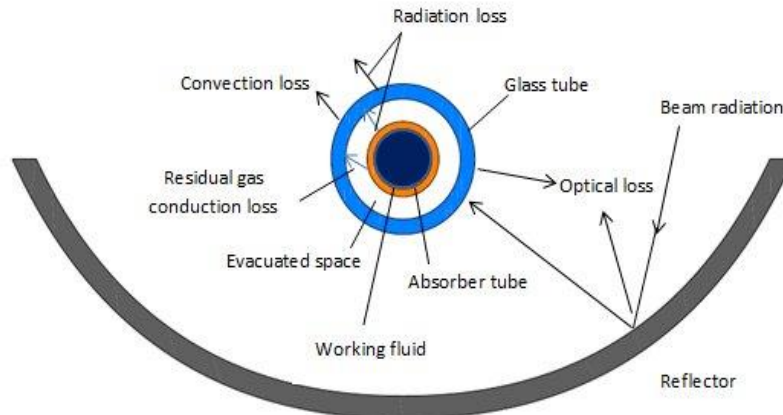
Στους παραβολικούς συλλέκτες χρησιμοποιείται σχεδόν πάντα σωλήνας κενού ο οποίος οδηγεί πολύ μικρές απώλειες θερμότητας ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας. Τα 2 βασικά τμήματα του είναι ο απορροφητήρας και το κάλυμμα. Η επιλεκτική επιφάνεια του απορροφητήρα σε συνδυασμό με τις συνθήκες κενού που επικρατούν ανάμεσα σε κάλυμμα και απορροφητήρα οδηγούν σε πολύ μικρό συντελεστή απωλειών θερμότητας. Οι εταιρείες κατασκευάζουν πλέον σωλήνες κενού για υψηλές θερμοκρασίες (>400°C), στις οποίες κυκλοφορεί είτε θερμικό έλαιο είτε τετηγμένο άλας και εντός του κάθε σωλήνα υπάρχει ένας συλλέκτης βορίου, ο οποίος είναι ένας χημικός συλλέκτης (getter) για την απορρόφηση διαφόρων μορίων τα οποία εισέρχονται στο διάκενο απορροφητήρα-καλύμματος. Επίσης ο φυσητήρας κενού (bellows) βοηθά στην αντιμετώπιση των θερμικών διαστολών [82].



Εικόνα 4: Σωλήνες κενού εμπορίου [82].

3.2.2.3 Απορροφητήρας (absorber)

Τα βασικά χαρακτηριστικά του απορροφητήρα (absorber) είναι αρχικά ο συντελεστής εκπομπής (ϵ) του, ο οποίος καθορίζει της απώλειες ακτινοβολίας και ο συντελεστής απορρόφησης (absorber coefficient) ο οποίος καθορίζει τι ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας απορροφά. Για τη βελτιστοποίηση της απορροφητικής ικανότητας γίνεται ειδική επεξεργασία στην επιφάνεια για να μειωθεί ο συντελεστής εκπομπής. Ο συντελεστής εκπομπής αυξάνει με τη θερμοκρασία και γι αυτό είναι σημαντικό να έχει χαμηλή τιμή στις θερμοκρασίες λειτουργίας του συλλέκτη, οι οποίες όμως αυξάνονται όσο μεγαλώνει το μέγεθος του απορροφητήρα. Το μέγεθος του απορροφητήρα πρέπει να είναι ικανοποιητικό ώστε να αυξάνει ο βαθμός σύλληψης της ηλιακής ακτινοβολίας. Από την άλλη βέβαια, όσο μεγαλώνει το μέγεθος, αυξάνεται και η σύλληψη της ηλιακής ακτινοβολίας συνολικά.



Σχήμα 3.7 : Διάγραμμα τομής σωληνοειδούς απορροφητή με σωλήνα κενού (evacuated tubular absorber) [81].

3.2.2.4 Εργαζόμενο ρευστό μέσο του συστήματος

Η επιλογή του εργαζόμενου μέσου μέσο πρέπει να συνδυάζει τις παρακάτω ιδιότητες:

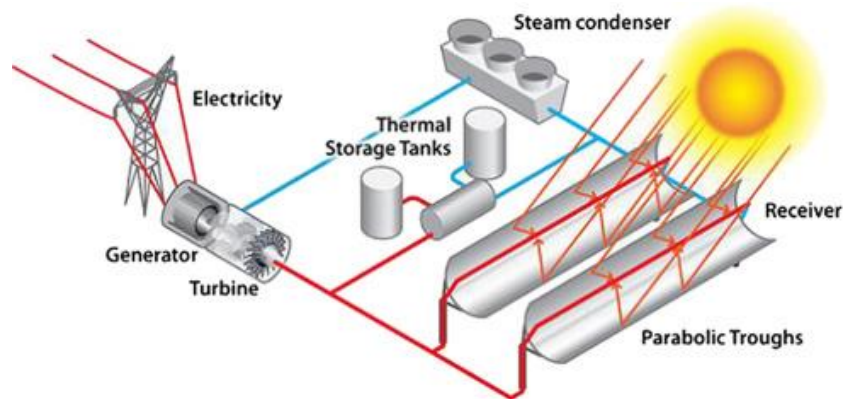
- Υψηλή τιμή ειδικής θερμοχωρητικότητας (special thermal conductivity), με τη δυνατότητα παραλαβής μεγάλων ποσών θερμότητας.
- Υψηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να θερμαίνεται ομοιόμορφα σε μικρό χρονικό διάστημα.
- Χαμηλή συνεκτικότητα ώστε να μειώνεται το έργο για την κυκλοφορία του στις σωληνώσεις της εγκατάστασης.

Χρησιμοποιούνται θερμικά έλαια/λάδια (thermal oils) , είτε ορυκτέλαια είτε συνθετικά, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν συνθετικά έλαια μπορούν αν λειτουργήσουν έως του 400 °C, ενώ με τα ορυκτέλαια έως τους 300 °C. Το κόστος, βέβαια, των συνθετικών ελαίων σε συνδυασμό με την ανάγκη για αντικατάσταση τους ανά τακτά χρονικά διαστήματα, αποτελούν σημαντικά μειονεκτήματα. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι η οξείδωση που μπορεί να προκληθεί όταν το θερμό έλαιο έρθει σε επαφή με τον αέρα. Από την άλλη πλευρά η χρήση ορυκτελαίων μπορεί να συνδυαστεί με σύστημα άμεσης αποθήκευσης ενέργειας με το ίδιο το εργαζόμενο μέσο.

3.2.2.5 Αποθήκευση ενέργειας

Το ζήτημα της αποθήκευσης της ενέργειας που παράγεται από τους παραβολικούς συλλέκτες είναι πολύ σημαντικό διότι μια κατάλληλη αποθήκευση της ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας πέραν των ωρών πρόσπτωσης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (δηλαδή τη νύχτα). Είναι απαραίτητο σύστημα για μεγάλες εγκαταστάσεις εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Βασικός τρόπος αποθήκευσης είναι με δεξαμενή που αποθηκεύεται πεπιεσμένο νερό ή κάποιο θερμικό έλαιο, αφού έχουν θερμανθεί ώστε να αποθηκεύεται θερμική ενέργεια για επιπλέον ώρες λειτουργίας. Άλλος τρόπος αποθήκευσης είναι η χρήση τετηγμένων αλάτων στη δεξαμενή για αποθήκευση ενέργειας, διότι είναι δυνατή η αποθήκευση σε υψηλότερες θερμοκρασίες, 450 με 550°C κάτι το οποίο οδηγεί σε υψηλότερη απόδοση στο κύκλο Rankine. Η τυπική σύσταση ενός τέτοιου άλατος είναι 60% NaNO_3 και 40% KNO_3 . Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο κίνδυνος κρυστάλλωσης του μετάλλου σε χαμηλές θερμοκρασίες [83].

Στην άμεση αποθήκευση το εργαζόμενο ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας επιλέγεται να έχει χαμηλότερη θερμοκρασία τήξης ώστε να γίνεται αποδοτική η λειτουργία του παραβολικού συλλέκτη. Το πρόβλημα σε αυτό είναι πως η θερμοκρασία δεν μπορεί να μειωθεί κάτω από τους 120°C. Βασικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός, πως δεν υπάρχει το κόστος του εναλλάκτη θερμότητας και πως επιτυγχάνεται υψηλή θερμοκρασία στο κύκλο Rankine. Στην έμμεση αποθήκευση υπάρχουν διαφορετικά εργαζόμενα μέσα στο κύκλωμα των συλλεκτών και στο κύκλωμα αποθήκευσης κάτι το οποίο επιτάσσει τη χρήση ενός ακριβού εναλλάκτη θερμότητας. Πιο συγκεκριμένα, στο σύστημα των συλλεκτών χρησιμοποιείται ως εργαζόμενο μέσο κάποιο θερμικό έλαιο ενώ στο σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιείται συνήθως ως ρευστό μέσο αποθήκευσης θερμότητας τετηγμένο άλας. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι η βελτιστοποίηση στην αποθήκευση της θερμότητας [82].

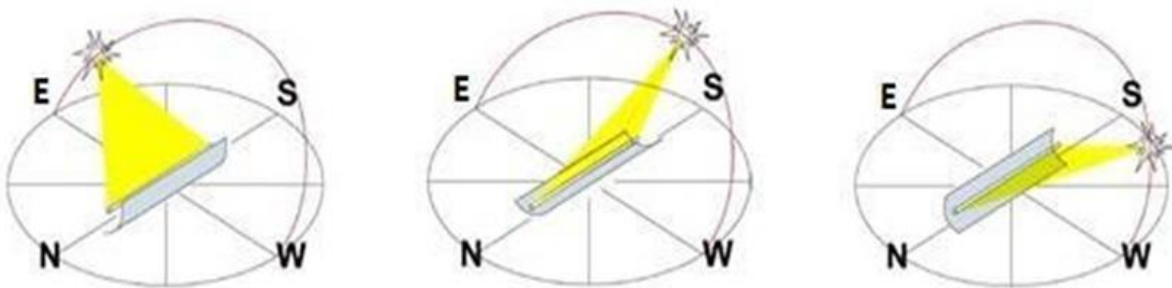


Σχήμα 3.8 : Απλοποιημένο διάγραμμα συγκεντρωτικού ηλιοθερμικού εργοστασίου ισχύος (CSP plant) με παραβολικούς κούλους συλλέκτες (parabolic trough collectors) [85].

3.2.2.6 Σύστημα εντοπισμού πορείας ήλιου (tracking system)

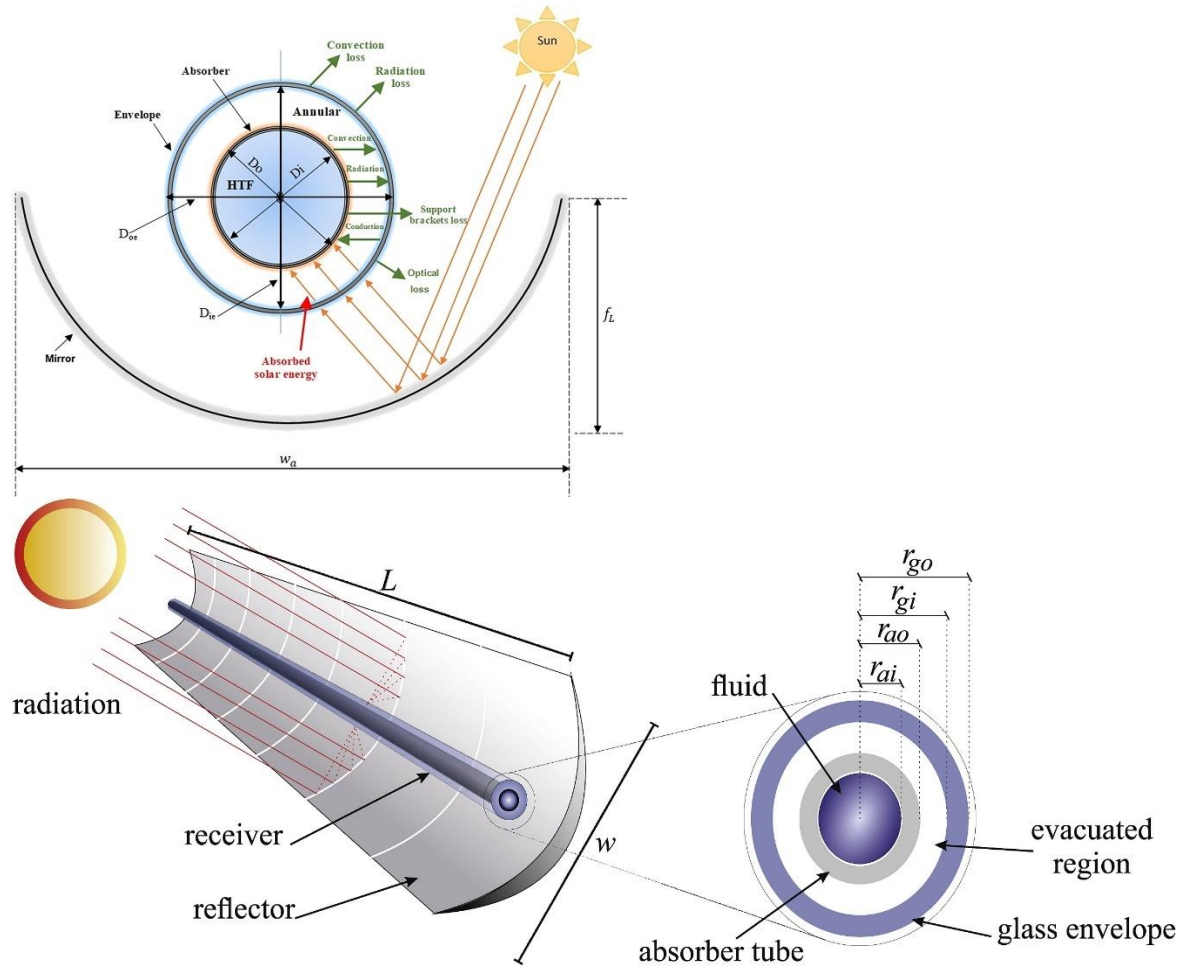
Για τη βέλτιστη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας ένα σύστημα εντοπισμού του ήλιου είναι αναγκαίο σε κάθε εγκατάσταση παραβολικών συλλεκτών, ώστε να είναι γνωστή η θέση του κάθε χρονική στιγμή.

Συνήθως στις εγκαταστάσεις εφαρμόζεται παρακολούθηση του ηλίου σε μια μόνο κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει, ότι ο άξονας του συλλέκτη τοποθετείται σε μια κατεύθυνση και η παρακολούθηση γίνεται στην κάθετη κατεύθυνση αυτή. Έτσι, στο ένα σύστημα τοποθετείται ο άξονας του συλλέκτη στη διεύθυνση Ανατολής-Δύσης (E-W orientation) με παρακολούθηση στον άξονα Βορρά-Νότου (N-S tracking) και στο δεύτερο ο άξονας του συλλέκτη τοποθετείται στη διεύθυνση Βορρά-Νότου (N-S orientation) με παρακολούθηση στον άξονα Ανατολής-Δύσης (A-W tracking) [85] (βλ. Σχήμα 3.9) .



Σχήμα 3.9: Λειτουργία συστήματος παρακολούθησης του ηλίου με τον άξονα τοποθετημένο στη διεύθυνση Βορρά-Νότου [87].

3.2.2.7 Οπτική Ανάλυση



Σχήμα 3.10:

Η συνολική επιφάνεια του παραβολικού συλλέκτη δίνεται από τη σχέση

$$A = W \cdot L \tag{3.1}$$

Όπου W το πλάτος του συλλέκτη και L το μήκος του συλλέκτη (βλ. Σχήμα 3.10).

Ο λόγος συγκέντρωσης του παραβολικού συλλέκτη C είναι ο λόγος της επιφάνειας του ανοίγματος προς την επιφάνεια του δέκτη :

$$C = \frac{A}{A_a} = \frac{W \cdot L}{\pi \cdot D_{ao} \cdot L} = \frac{W}{\pi \cdot D_{ao}} \quad (3.2)$$

με

$$D_{ao} = 2 \cdot r_{ao} \quad (3.3)$$

όπου r_{ao} η ακτίνα του απορροφητή (βλ. Σχήμα 3.10).

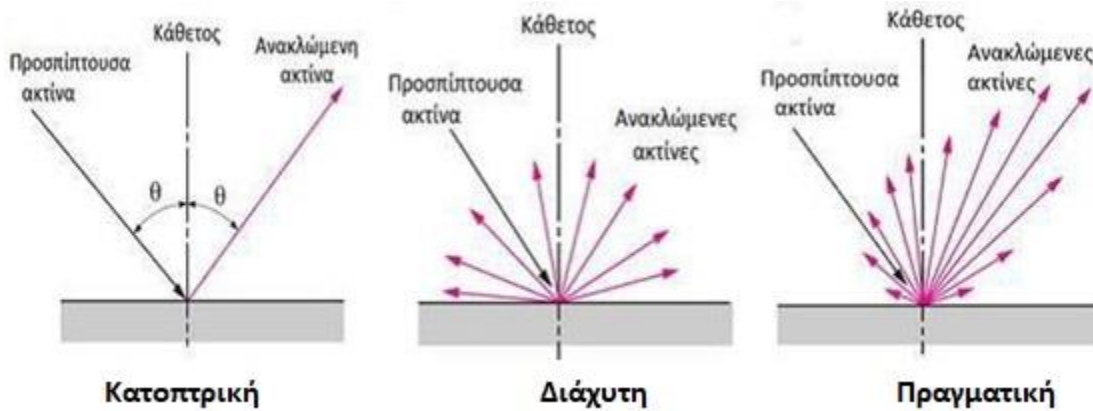
Οπτικό βαθμό απόδοσης, η_{opt} , ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τον απορροφητήρα, δηλαδή:

$$\eta_{opt} = \frac{\text{ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τον απορροφητήρα}}{\text{ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο κάτοπτρο}} = \frac{Q_{absorbed}}{Q_{solar}} \quad (3.4)$$

Με τυπικές τιμές 70%-80%. Ο οπτικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται αρχικά από την ανακλαστικότητα, ρ , του ανακλαστήρα που δείχνει πόσο αποτελεσματικά ή πιο σωστά κατοπτρικά έγινε η ανάκλαση στο κάτοπτρο και ορίζεται ως:

$$\rho = \frac{\text{ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται κατοπτρικά στο κάτοπτρο}}{\text{ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο κάτοπτρο}} \quad (3.5)$$

Εδώ πρέπει να γίνει μια επεξήγηση ως προς τον ορισμό της κατοπτρικότητας, ότι ορίζει κατά πόσο μια ακτίνα ανακλάται κατοπτρικά δηλαδή δεν διαχέεται αφού προσπίπτει σε μια επιφάνεια (βλ.Σχήμα 3.11)



Σχήμα 3.11: Τρόποι ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο κάτοπτρο [82].

Άλλο μέγεθος που επηρεάζει τον οπτικό βαθμό απόδοσης είναι ο *βαθμός σύλληψης*, γ , που εκφράζει το ποσοστό των ακτίνων οι οποίες αφού ανακλαστούν στον κάτοπτρο, φτάνουν τελικά στο δέκτη. Εξαρτάται από τις ατέλειες στην επιφάνεια του ανακλαστήρα, σφάλματα στο σύστημα παρακολούθησης του ήλιου, το μέγεθος του δέκτη και φυσικά στον κωνικό τρόπο που ανακλώνονται οι ακτίνες από το κάτοπτρο που αναπόφευκτα οδηγεί σε απώλειες.

$$\gamma = \frac{\text{ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο δέκτη}}{\text{ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται στο κάτοπτρο}} \quad (3.6)$$

Επίσης σε σημαντικές οπτικές απώλειες οδηγεί το γινόμενο, $(\tau\alpha)$, της διαπερατότητας του καλύμματος (με τυπικές τιμές 95%) επί την απορροφητικότητα του απορροφητήρα (95%), με σχέση:

$$(\tau\alpha) = \frac{\text{ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από τον απορροφητήρα}}{\text{ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο δέκτη}} \quad (3.7)$$

Όταν η γωνία πρόσπτωσης αλλάζει τότε ο οπτικός βαθμός απόδοσης μειώνεται διότι οι ανακλάσεις δεν γίνονται τόσο αποδοτικά. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η γωνία θ είναι συνήθως κατά την επιμήκη διάσταση του συλλέκτη (longitude solar angle) [2.69]. Ο παρακάτω τύπος περιλαμβάνει και απώλειες λόγω της προσπίπτουσας γωνίας θ , απώλειες συνημίτονου. Επίσης περιλαμβάνονται απώλειες σκίασης από την πλάγια μεριά [2.37].

$$\eta_{opt}(\theta) = \rho \cdot \gamma_0 \cdot (\tau\alpha) \cdot [(1 - A_f \cdot \tan(\theta)) \cdot \cos(\theta)] \quad (3.8)$$

όπου γ_0 ο βαθμός σύλληψης για γωνία πρόσπτωσης μηδέν και A_f γεωμετρικός παράγοντας που καθορίζει τις απώλειες και ορίζεται ως εξής:

$$A_f = \frac{\frac{2}{3}W \cdot h + f \cdot W \cdot \left(1 + \frac{W^2}{48 \cdot f^2}\right)}{A_a} \quad (3.9)$$

Τελικά, επιτυγχάνεται, τουλάχιστον θεωρητικά, ο μέγιστος οπτικός βαθμός απόδοσης του συλλέκτη όταν η γωνία πρόσπτωσης $\theta=0^\circ$ και δίνεται ως:

$$\eta_{opt,max} = \rho \cdot \gamma_0 \cdot (\tau\alpha) \quad (3.10)$$

Φυσικά στην πράξη η γωνία πρόσπτωσης θ δεν είναι μηδέν και ανάλογα με το σύστημα παρακολούθησης του ήλιου, το οποίο έχει άξονα συλλέκτη στη διεύθυνση Βορρά-Νότου και περιστροφική κίνηση Ανατολή-Δύση, είναι:

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_z) \cdot \cos(\omega) + \cos(\delta) \cdot \sin^2(\omega) \quad (3.11)$$

Ο τροποποιητής γωνίας πρόσπτωσης, $X(\theta)$, υπολογίζεται ως [94]:

$$X(\theta) = \cos(\theta) - \frac{f}{L} \cdot \left(1 + \frac{W^2}{48f^2}\right) \cdot \sin(\theta) \quad (3.12)$$

Οπότε ο οπτικός βαθμός μπορεί να υπολογιστεί επίσης ως:

$$\eta_{opt} = X(\theta) \cdot \eta_{opt,max} \quad (3.13)$$

3.2.2.8 Θερμική και Ενεργειακή Ανάλυση

Η ωφέλιμη θερμότητα από τον παραβολικό κοίλο συλλέκτη (PTC), η οποία είναι η διαφορά της θερμοκρασίας εξόδου-εισόδου του ρευστού μεταφοράς θερμότητας (HTF) που ρέει στο σωλήνα του απορροφητή, υπολογίζεται από τη σχέση [88]:

$$Q_u = m_f \cdot C_p \cdot (T_{out} - T_{in}) \quad (3.14)$$

Η ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται ο παραβολικός κοίλος συλλέκτης είναι [90]:

$$Q_s = A_{ac} \cdot G_B \quad (3.15)$$

Ο λόγος της ωφέλιμης θερμότητας από το παραβολικό κούλο συλλέκτη προς τη διαθέσιμη άμεση δέσμη ακτινοβολία υπαγορεύει τη θερμική απόδοση [88]:

$$n_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (3.16)$$

Οι θερμικές απώλειες, Q_{loss} , του απορροφητικού σωλήνα υπολογίζονται από τη σχέση [89]:

$$Q_{loss} = A_{ro} \cdot A_{ro} \cdot (T_{rm} - T_{amb}) \quad (3.17)$$

Οι θερμικές απώλειες του καλύμματος του απορροφητή είναι οι απώλειες ακτινοβολίας του καλύμματος και εκφράζονται από τη σχέση [90]:

$$Q_{loss} = A_{ro} \cdot \sigma \cdot \left(\frac{T_{rm}^4 - T_{amb}^4}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1 - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{co}} \cdot \frac{A_{ri}}{A_{co}}} \right) \quad (3.18)$$

Στις συνθήκες σταθερής κατάστασης, οι απώλειες από το κάλυμμα προς τον απορροφητή προς το περιβάλλον είναι ίσες με τις απώλειες από τον απορροφητή προς το κάλυμμα. Η θερμική σχέση του καλύμματος με το περιβάλλον περιλαμβάνει τόσο τις απώλειες συναγωγής όσο και τις απώλειες ακτινοβολίας ως εξής [90]:

$$Q_{loss} = A_{co} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_c (T_c^4 - T_{sky}^4) + A_{co} \cdot h_{out} \cdot (T_{rm} - T_{amb}) \quad (3.19)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το κάλυμμα στον απορροφητή, h_{out} , υπολογίζεται από τη σχέση [91]:

$$h_{out} = 4 \cdot V_{wind}^{0.58} \cdot D_{co}^{-0.48} \quad (3.20)$$

Η θερμοκρασία του ουρανού, T_{sky} , δίνεται από τη σχέση [92]:

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{amb}^{1.5}$$

Η απορροφημένη θερμική ενέργεια, Q_{abs} , μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Q_{abs} = Q_u + Q_{loss} \quad (3.21)$$

Επίσης η ωφέλιμη θερμότητα, Q_u , μπορεί να εκφραστεί ως:

$$Q_u = A_{ro} \cdot h \cdot (T_r - T_{fm}) \quad (3.22)$$

Όπου ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας, h , υπολογίζεται [90]:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_{ri}}$$

Αντίστοιχα, ο αριθμός Nusselt για τη ροή του ρευστού μεταφοράς θερμότητας στη περιοχή τυρβώσους ροής του PTC υπολογίζεται:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (3.23)$$

Τελικά από όλες τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει συνδυαστικά:

$$\eta_{th} = X(\theta) \cdot \eta_{opt_max} - U_L \cdot \left(\frac{T_{rm} - T_{amb}}{C \cdot G_B} \right) \quad (3.24)$$

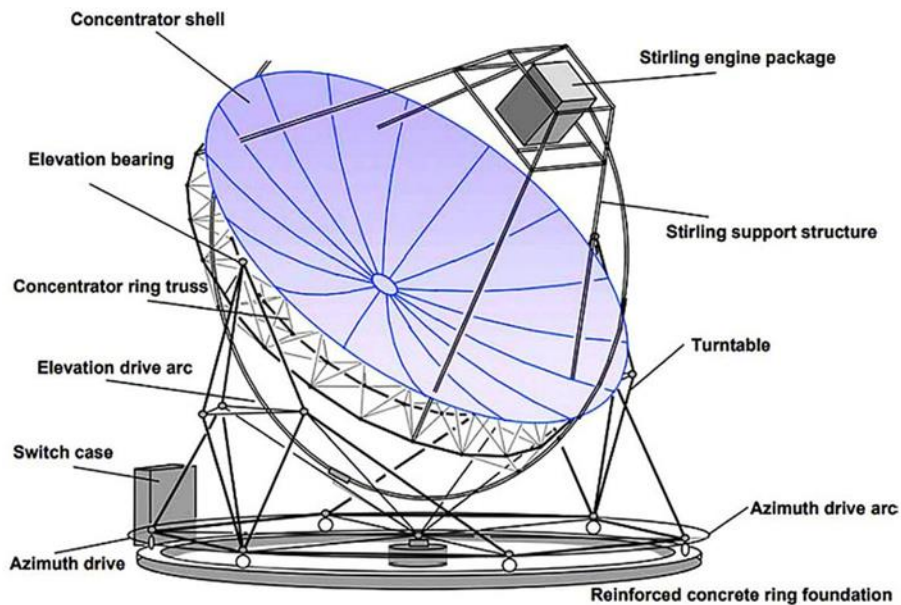
3.2.3 Παραβολικός Δίσκος-Μηχανή (Parabolic Dish-Engine)



Εικόνα 3.3: Ο ηλιακός συλλέκτης παραβολικού πιάτου EuroDish Stirling. Μερικά χαρακτηριστικά: διάμετρος 8,5 m, επιφάνεια 56,7 m², μέσος συντελεστής συγκέντρωσης 2500 [94].

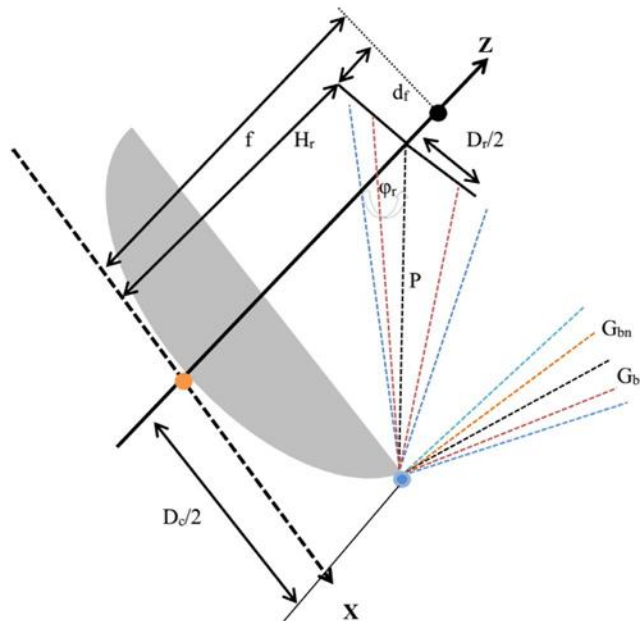
Στο σύστημα ηλιακού παραβολικού δίσκου, χρησιμοποιείται ένας παραβολικός ανακλαστήρας σημειακής εστίασης στη μορφή πιάτου/δίσκου που αντανακλά την ηλιακή ακτινοβολία σε ένα δέκτη στο εστιακό σημείο. Στο εστιακό σημείο, για αποτελεσματική μετατροπή ισχύος, τοποθετείται ένας κινητήρας κύκλου Stirling ή κύκλου Brayton μαζί με μια ηλεκτρική γεννήτρια για τη χρήση της συγκεντρωμένης θερμότητας στο δέκτη. Η μηχανή Stirling και ο δέκτης τοποθετούνται στο εστιακό σημείο του δίσκου για να λαμβάνεται η μέγιστη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία. Η λειτουργία του θερμικού δέκτη είναι να διασφαλίζει την ομοιόμορφη κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην πλευρά εισόδου της μηχανής Stirling. Μερικές φορές, μια ηλεκτρογεννήτρια ενσωματώνεται μηχανικά με το σύστημα Stirling για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, ο παραβολικός ηλιακός δίσκος στρέφεται αυτόματα προς τον ήλιο χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό ηλιακής παρακολούθησης. Η ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται συνεχώς στο εστιακό σημείο του παραβολικού δίσκου, όπου είναι τοποθετημένη η μηχανή Stirling [95]. Το σύστημα Stirling με ηλιακό πιάτο αποτελείται πάντα από τρία κύρια μέρη:

- (1) Το παραβολικό ηλιακό πιάτο και τη μηχανική δομή στήριξής του.
- (2) Ο θερμικός δέκτης είναι τοποθετημένος στην κάτω πλευρά του κινητήρα Stirling.
- (3) Ο μηχανισμός παρακολούθησης του ήλιου.



Σχήμα 3.12: Το σύστημα παραβολικού δίσκου "EURODISH", που έχει χωρητικότητα 10 kW. Αποτελείται από αζιμουθιακή κίνηση (azimuth drive), θήκη μεταγωγής (switching case), τόξο κίνησης αζιμούθιου (azimuth drive arc), θεμέλιο (foundation), κίνηση ανύψωσης (elevation drive), περιστρεφόμενο δίσκο (turntable), δοκό δακτυλίου συγκεντρωτή (concentrator ring truss), έδρανο ανύψωσης (elevation bearing), συγκεντρωτή κέλυφος (concentrator shell), δομή στήριξης Stirling (Stirling support structure) και κινητήρα Stirling (Stirling engine) [97].

Το οπτικο-γεωμετρικό μοντέλο ορίζει τις γεωμετρικές παραμέτρους ως εξής: τη διάμετρο συγκέντρωσης (D_c), διάμετρος δέκτη (D_r), η απόσταση του δέκτη από το σημείο εστίασης (d_f), η εστιακή απόσταση (f), βέλτιστο ύψος δέκτη (H_r), η πλευρική απόσταση μεταξύ του σημείου εστίασης του δέκτη (P) και της γωνίας χείλους (φ_r) [βλ. Σχήμα 3.13]. Το φ_r χαρακτηρίζει τη γωνία μεταξύ των αξόνων για το σύστημα συλλέκτη/δέκτη. Η γεωμετρία εγκάρσιας διατομής του ανακλαστήρα/δίσκου έχει καθορισθεί μέσω της εστιακής απόστασης και της γωνίας χείλους. Η συγκέντρωση DNI σε ένα μόνο σημείο στο βέλτιστο ύψος του δέκτη (H_r) παρουσιάζει ένα εστιακό σημείο και κερδίζει πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω της τεράστιας θερμοκρασίας, η επιφάνεια του δέκτη προκαλεί παραμόρφωση και επιτρέπει τη ροή ρευστού μεταφοράς θερμότητας. Ο δέκτης διατηρείται σε απόσταση (d_f) από το σημείο εστίασης για τον μετριασμό της υπερθέρμανσης του υλικού και την ομοιόμορφη DNI στην εστίαση σημείο εστίασης.



Σχήμα 3.13: Γεωμετρικοί παράμετροι παραβολικού δίσκου συλλέκτη [97].

3.2.3.1 Συγκεντρωτής (Concetrator)

Ο παραβολικός δίσκος ανακλά την ακτινοβολία στην κάτω πλευρά της μηχανής Stirling. Με τη χρήση σφυρήλατου μεταλλικού φύλλου, τα ανακλαστικά κάτοπτρα στερεώνονται σε μια δομή παραβολικού πιάτου. Οι πιο συνηθισμένοι δέκτες κοιλότητας που χρησιμοποιούνται σε ένα συγκεντρωτή παραβολικού πιάτου έχουν κυβικά, ημισφαιρικά, κωνικά, σπειροειδή ή κυλινδρικά σχήματα [96]. Ο λόγος συγκέντρωσης του ηλιακού συλλέκτη παραβολικού δίσκου είναι συνήθως υψηλός και υπερβαίνει το 100 αλλά είναι μικρότερος από 500. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τη δημιουργία υψηλών επιπέδων θερμοκρασίας στον συλλέκτη. Οι κύριες γεωμετρικές παράμετροι του συγκεντρωτή πιάτου, δηλαδή η διάμετρος του ανοίγματος, η εστιακή απόσταση και η γωνία χείλους, επηρεάζουν την οπτική απόδοση του θερμικού δέκτη [98]. Η διαστασιολόγηση του συμπυκνωτή παραβολικού δίσκου καθορίζεται από την ονομαστική ισχύ του κινητήρα Stirling που χρησιμοποιείται στο σύστημα ή την ισχύ εξόδου που παράγεται από το σύστημα. Επομένως, το μέγεθος της διαμέτρου εξαρτάται από την ισχύ που απαιτείται από το σύστημα. Όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ισχύς, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος που απαιτείται.

Γενικά, η διάμετρος ενός συλλέκτη παραβολικού δίσκου είναι περίπου 3 έως 10 m και περιέχει διάφορα τμήματα υαλοβάμβακα και διάφορα πρόσθετα ανακλαστικά υλικά. Το σχήμα ενός ιδανικού συγκεντρωτή είναι παραβολικό, αλλά λίγοι ηλιοθερμικοί συγκεντρωτικοί συλλέκτες

με σφαιρικά διαμορφωμένα ανακλαστικά κάτοπτρα έχουν κατά προσέγγιση αυτό το σχήμα. Επιπλέον, η βάση και άλλα εξαρτήματα συναρμολόγησης είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα.

3.2.3.2 Θερμικός δέκτης & Μηχανή Stirling

Για να επιτευχθεί η απαιτούμενη θερμοκρασία, η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας πρέπει να εστιαστεί στον δέκτη, ο οποίος τοποθετείται στο εστιακό σημείο του συγκεντρωτή. Γενικά, η ηλιακή θερμική μηχανή Stirling και οι πλάκες απορρόφησης θερμότητας τοποθετούνται στο εστιακό σημείο του δέκτη της κοιλότητας για τη συλλογή της μέγιστης ηλιακής θερμικής ενέργειας. Συνεπώς, για να μειωθούν οι απώλειες συναγωγής και ακτινοβολίας, ένας δέκτης κοιλότητας πρέπει να βρίσκεται στο εστιακό σημείο του πιάτου.

Ο κινητήρας Stirling είναι μια περίπλοκη μηχανή που αποτελείται από το δέκτη κοιλότητας για τη μετατροπή της ηλιακής θερμικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια. Λειτουργεί με τον κλειστό θερμικό κύκλο και απαιτεί ένα συμπιεσμένο εργαζόμενο ρευστό, όπως νερό, ήλιο, αέρα, άζωτο και υδρογόνο με κυκλική συμπίεση και διαστολή του εργαζόμενου ρευστού σε διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα. Η μηχανή Stirling λειτουργεί με τον ομώνυμο κύκλο, Stirling, ο οποίος αποτελείται από 2 ισόχωρες και 2 ισοθερμοκρασιακές μεταβολές. Τα έμβολα, ένα εργαλείο που εκτοπίζει τον αέρα (εκτοπιστής έμβολο) και ένα ειδικό έμβολο ισχύος, επηρεάζουν την κίνηση του υγρού μέσα στη μηχανή και οι εναλλάκτες θερμότητας επηρεάζουν τη μεταφορά θερμότητας από τις συσκευές προσθήκης και της απόρριψης θερμότητας καθώς και την εσωτερική ροή μέσα στη μηχανή. Όταν ψύχεται, τότε το ρευστό μεταφοράς θερμότητας συμπιέζεται. Από την άλλη, το εργαζόμενο ρευστό διαστέλλεται όταν θερμαίνεται και η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας ένα δυναμό (alternator). Γενικά, το υδρογόνο είναι το εργαζόμενο ρευστό για τις μηχανές Stirling άλφα ή βήτα.

Ο ηλιοθερμικός δέκτης είναι ένα βασικό στοιχείο για κάθε σύστημα ηλιακής μηχανής Stirling. Αποτελείται από έναν θερμικό απορροφητή και ένα άνοιγμα ή συλλεκτική επιφάνεια (aperture area). Το άνοιγμα του ηλιακού θερμικού δέκτη βρίσκεται στο εστιακό σημείο του παραβολικού ηλιακού πιάτου. Στους σύγχρονους ηλιακούς θερμικούς δέκτες, περιλαμβάνονται και οι δέκτες με σωλήνες θερμότητας. Επί του παρόντος, αυτοί οι δέκτες είναι οι πιο συνηθισμένοι και χρησιμοποιούν μείγμα νατρίου και καλίου ως υλικό μεταφοράς θερμότητας εντός του δέκτη [97].

Ο ηλιοθερμικός δέκτης προστίθεται συνήθως για να λαμβάνει το μέγιστη τιμή των συγκεντρωμένων ηλιακών θερμικών ακτινοβολιών από το παραβολικό ηλιακό πιάτο. Λειτουργεί ως θερμική πηγή για το εργαζόμενο ρευστό μέσω της μηχανής Stirling.

Γενικά, οι θερμικοί δέκτες κατανέμονται σε δύο κύριες κατηγορίες με βάση τη μέθοδο μεταφοράς θερμότητας. Ο πρωταρχικός τύπος είναι ο θερμικός αποδέκτης άμεσου φωτισμού-αποτελείται από το σύστημα Stirling σωλήνες θέρμανσης του κινητήρα για τη συλλογή της θερμικής ροής. Μπορεί επίσης να απορροφήσει την υψηλή τιμή της συγκεντρωμένης ηλιακής θερμικής ροής λόγω της υψηλής ικανότητας μεταφοράς θερμότητας του υδρογόνου και του ηλίου. Η έμμεση δέκτης θερμαίνει το HTF και επιτρέπει την αποσύνδεση της ηλιακής και των υποσυστημάτων ισχύος. Μια άλλη ηλιακή με βάση το θερμικός δέκτης είναι ένας έμμεσος θερμικός δέκτης- χρησιμοποιεί ένα μέσο ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Ο ηλιοθερμικός δέκτης προστίθεται συνήθως για να λαμβάνει το μέγιστη τιμή των συγκεντρωμένων ηλιακών θερμικών ακτινοβολιών από το παραβολικό ηλιακό πιάτο. Λειτουργεί ως θερμική πηγή για το έργο το ρευστό του SE

Η διάμετρος του δέκτη μπορεί να υπολογιστεί για το παραβολικό ηλιακό δίσκο χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.25) [100]. Το μέγεθος του δέκτη είναι άμεσα επηρεάζεται άμεσα από την διάμετρο (βλ. Εξίσωση 3.26).

$$D_{rec} = \frac{f \times \theta}{\cos\phi_{rim}(1 + \cos\phi_{rim})} \quad (3.25)$$

$$A_{rec} = \frac{\pi}{4} D_{rec}^2 \quad (3.26)$$

3.2.3.3 Παράμετροι Σχεδιασμού & Κατασκευής

Η επιλογή του υλικού για έναν συμπυκνωτή είναι κρίσιμο στοιχείο για το σχεδιασμό του συγκεντρωτή παραβολικού δίσκου ώστε να αντανakλά τη μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία στο δέκτη. Η ανακλαστικότητα κάθε ηλιακού συγκεντρωτή καθορίζει τη τιμή της ανακλώμενης ηλιακής θερμικής στον δέκτη (βλ. Πίνακα 3.1). Γενικά, στους ηλιακούς συγκεντρωτές, το αλουμίνιο ή ο άργυρος ως ανακλαστικές χρησιμοποιούνται στην μπροστινή πλευρά πλαστικών ή γυάλινων παραβολικών δίσκων. Προηγουμένως, τα λεπτά γυάλινα ανακλαστικά κάτοπτρα των 1, 2, ή 4 mm με ασημένια στιλβωμένη/γυαλισμένη (polished) επιφάνεια χρησιμοποιούνται για την αντανάκλαση του ηλιακού φωτός. Ορισμένοι ερευνητές ισχυρίστηκαν ότι η πιο σημαντική ανακλαστική απόδοση των ηλιακών ανακλαστών επιτυγχάνεται από το ασημένια κάτοπτρα για γυαλί πάχους 1 mm [99]. Λόγω του χαμηλού κόστους των πολυμερικών μεμβρανών, πολλοί σχεδιαστές χρησιμοποίησαν λεπτά στρώματα πολυμερούς καλυμμένα με ασήμι ή αλουμίνιο. Ενώ οι ερευνητές μελέτησαν επίσης τη βελτίωση της ανακλαστικότητας των κατόπτρων όπου οι γυαλί περιέχει μερικές αναλογίες σιδήρου.

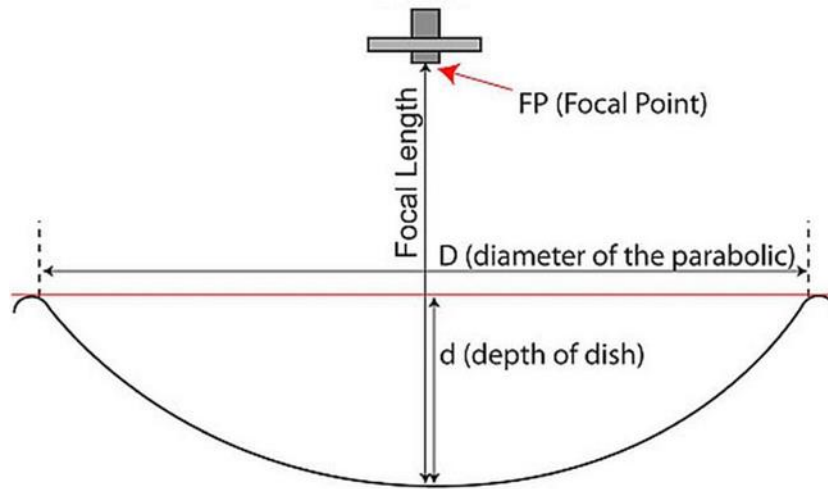
Model name	Manufacturer	Used material	Reflectivity (%)	Emissive (%)	Working temp (°C)
Kraft Paper SA-85	Ra Bar Products Inc 3-M	Aluminum	90	10	98
		Aluminum, Acrylic	98	2	95
ECP-305	3-M	Aluminum Acrylic, Silver	97	3	125
Acrylic Mirror	GCIIP	Silver, Acrylic	95	5	100
Clear-Dome	The Metalized Products	Polyethylene, Aluminum	97	3	100
Heat Shield I	The Metalized Products	Polyethylene, Aluminum	97	3	100
IBAD	IBAD	Alumina, Copper, Polymer, Silvered	97	3	95
CERMET	Sun Select	The Ceramic, metallic covering film	95	5	90

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των υλικών ηλιακού ανακλαστήρα [97].

Το μέγεθος κάθε ηλιακού δίσκου εξαρτάται από την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς από την μηχανή Stirling. Συνήθως, σχεδιάζεται για ηλιακές ακτινοβολίες 1 kW/m^2 [101]. Εάν η διάμετρος του συγκεντρωτή είναι μικρότερη από αυτή που απαιτείται σύμφωνα με τη ζήτηση ισχύος, η ισχύς εξόδου θα είναι μικρότερη. Εάν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη θερμότητα που συγκεντρώνεται στο εστιακό σημείο θα είναι υψηλότερη πέραν της θερμικού ορίου του υλικού. Αυτό μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο δέκτη ή στη μηχανή Stirling [101]. Το πως επηρεάζει η αύξηση της διαμέτρου έχει αποδειχθεί και πειραματικά, όταν η ετήσια παραγωγή ενέργειας αυξήθηκε από 1,945 σε 6,74 GWh/έτος όταν η διάμετρος του δίσκου αυξήθηκε από 3 σε 5 m [102]. Ακόμα όταν η διάμετρος του συλλέκτη αυξήθηκε από 4 σε 17 m, διατηρώντας όλους τους άλλους παράγοντες ίδιους, η ηλεκτρική ισχύς εξόδου αυξήθηκε από 2,26 σε 46,80 kW και η συνολική απόδοση αυξήθηκε από 17,98 σε 20,62% [105]. Γενικά, τα παραβολικά ηλιακά πιάτα έχουν διάμετρο από 1m έως 220 m και επιφάνεια από 5 m^2 έως 500 m^2 .

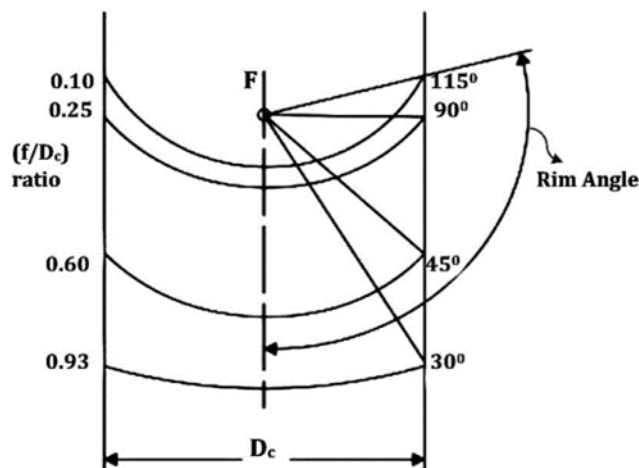
Η συλλεκτική επιφάνεια (aperture area) για κάθε παραβολικό συγκεντρωτή ηλιακού δίσκου μπορεί να υπολογισθεί ως ολόκληρη η επιφάνεια του συγκεντρωτικού πιάτου για την προσπίπτουσα θερμική ηλιακή ενέργεια [100]. Η διάσταση του παραβολικού ηλιακού δίσκου επηρεάζει την τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας που παρέχεται στον θερμικό δέκτη και κατά συνέπεια στην μηχανή Stirling. Ως εκ τούτου, η διαστασιολόγηση της συλλεκτικής επιφάνειας για κάθε ηλιακό παραβολικό δίσκο συλλέκτη προσδιορίζεται από :

$$A_c = \frac{\pi D_c^2}{4} \quad (3.27)$$



Σχήμα 3.14: Σχηματική αναπαράσταση ενός συγκεντρωτικού παραβολικού δίσκου [97].

Τα παραβολικά κάτοπτρα του συγκεντρωτικού πιάτου χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση της θερμικής ακτινοβολίας του πιάτου στο εστιακό του σημείο δηλ. δέκτης/μηχανή Stirling. Μαθηματικά, το εστιακό μήκος του παραβολικού ηλιακού δίσκου μπορεί να προσδιοριστεί με την εξίσωση (3.28). Η διαφορά για την τιμή του (f/D_c) για την ίδια διάμετρο δίσκου και κάποια διαφορετικές γωνίες χείλους (rim angle) απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (βλ. Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15: Γεωμετρικά στοιχεία παραβολικού δίσκου [97].

$$\frac{f}{D_c} = \frac{1}{4 \tan\left(\frac{\phi_{rim}}{2}\right)} \quad (3.28)$$

Η γωνία ϕ_{rim} , γωνία χείλους (*rim angle*) , ορίζεται ως η γωνία που δημιουργείται από τις προσπίπτουσες ηλιακές ακτινοβολίες στον ανακλαστήρα στο χείλος του συλλέκτη με τον κεντρικό άξονα (βλ. Σχήμα 3.15) . Μπορεί επίσης, να περιγραφεί η γωνία ϕ_{rim} , γωνία χείλους , ως δείκτης για την καμπυλότητα του ηλιακού παραβολικού δίσκου [103].

Ο γεωμετρικός συντελεστής συγκέντρωσης είναι ένα βασικός μέγεθος για κάθε συγκεντρωτικό ηλιοθερμικό συλλέκτη. Στην πραγματικότητα, ο λόγος συγκέντρωσης για κάθε ηλιακό συγκεντρωτή μπορεί να οριστεί ως το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στον συγκεντρωτή προ τις ηλιακές θερμικές ακτινοβολίες που αναμένονται από τον δέκτη :

$$C_{flux} = \frac{I_{ap}}{I_{abs}} \quad (3.29)$$

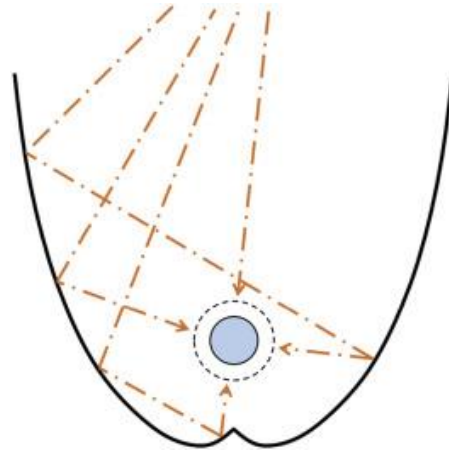
όπου C_{flux} είναι ο λόγος της πυκνότητας ενέργειας-ροής. Καθώς η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι δύσκολο να μετρηθεί και κυμαίνεται καθ' όλη τη διάρκεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ως εκ τούτου, δεν είναι εύκολη υπόθεση η εύρεση της συγκέντρωσης μέσω της εξίσωσης (3.29). Προκειμένου να μειωθεί αυτή η πολυπλοκότητα, η ιδέα του γεωμετρικού λόγου συγκέντρωσης C_r παρουσιάστηκε στην εξίσωση (3.30). Μπορεί να οριστεί ως ο λόγος του της συλλεκτικής επιφάνειας του δίσκου προς την επιφάνεια του θερμικού δέκτη :

$$C_r = \frac{A_c}{A_r} \quad (3.30)$$

3.2.4 Σύνθετοι Παραβολικοί Συλλέκτες (Compound Parabolic Collectors)

Οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες (Compound Parabolic Collectors) ανήκουν κι αυτοί στην κατηγορία των συγκεντρωτικών συλλεκτών, χωρίς όμως να έχουν έντονο κυρτωτικό σχήμα, καθώς ο λόγος συγκέντρωσής του είναι συνήθως χαμηλός, κυμαινόμενος κάτω από το 5 (2,37 έως 2,97). Αυτός ο συλλέκτης λαμβάνει διάφορες μορφές. Το χαρακτηριστικό του είναι ότι έχει υψηλή απόδοση, ιδίως όταν συνδυάζεται με σωλήνα κενού. Η ικανότητά του να λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες τον καθιστά ελκυστική τεχνολογία. Ο κατάλληλος σχεδιασμός του κατόπτρου επιτρέπει αποδοτική λειτουργία χωρίς την ανάγκη παρακολούθησης της κίνησης του ήλιου, αντιπροσωπεύοντας σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους επιμήκεις παραβολικούς συλλέκτες, όπου η παρακολούθηση του ήλιου είναι αναγκαία. Η χρήση

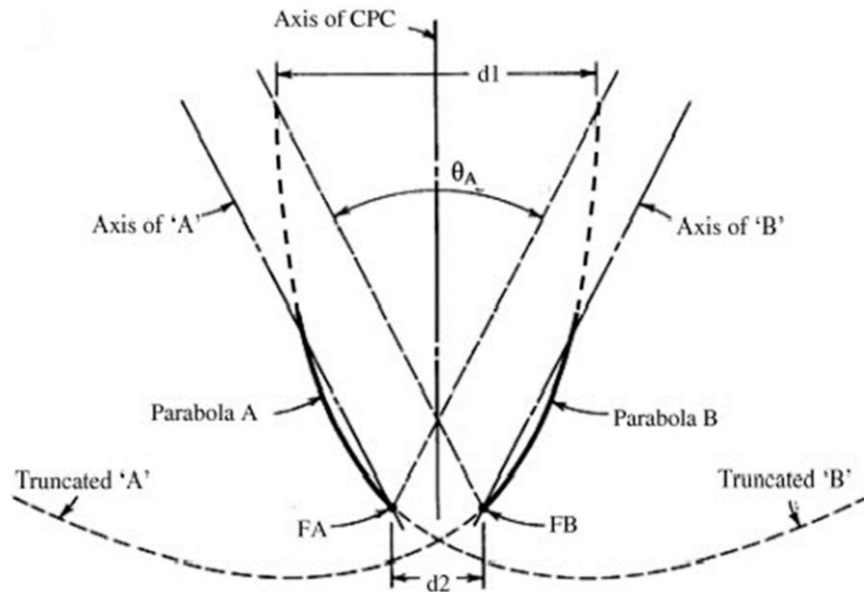
ασύμμετρων κατόπτρων ή βελτιστοποιημένων συνολικά αποτελεί τρόπο για να αποφευχθεί η ανάγκη χρήσης συστημάτων παρακολούθησης.



Σχήμα 3.16: Πλάγια τομή αναπαράσταση σύνθετου διδιάστατου παραβολικού συμμετρικού συλλέκτη.

Οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες ανήκουν σε μια κατηγορία συγκεντρωτών που ονομάζονται μη απεικονιστικοί συγκεντρωτές. Αυτοί οι συγκεντρωτές επιτρέπουν τον σχεδιασμό οπτικών συστημάτων που μπορούν να επιτύχουν τις μέγιστες γεωμετρικές συγκεντρώσεις που επιτρέπουν οι νόμοι της φυσικής διατήρησης για ένα δεδομένο γωνιακό πεδίο. Σε αντίθεση με τους συγκεντρωτές απεικόνισης ή εστίασης, οι συγκεντρωτές που βασίζονται σε μη απεικονιστικά οπτικά συστήματα είναι σε θέση να επιτύχουν μέτρια επίπεδα συγκέντρωσης χωρίς να παρακολουθούν τον ήλιο. Οι μη απεικονιστικοί οπτικοί συγκεντρωτές σχεδιάζονται με βάση την αρχή των ακραίων ακτίνων, η οποία υποστηρίζει ότι οι ηλιακές ακτίνες που προέρχονται από τις ακμές της πηγής εστιάζονται στις ακμές της επιφάνειας του στόχου [1]. Έτσι, όλες οι ακτίνες που βρίσκονται εντός μιας δεδομένης γωνίας αποδοχής έχουν την ευκαιρία να φθάσουν στον δέκτη.

Στην απλούστερη μορφή του, ο σύνθετος παραβολικός συλλέκτης αποτελείται από δύο παραβολικά ανακλαστικά τμήματα που κατευθύνουν τις ηλιακές ακτίνες που φθάνουν στο άνοιγμα εισόδου σε μια επιφάνεια δέκτη που βρίσκεται στο άνοιγμα εξόδου [105]. Το αριστερό και το δεξί τμήμα του σύνθετου παραβολικού συλλέκτης είναι τμήματα δύο παραβολών, ενώ ο δέκτης τοποθετείται μεταξύ των σημείων εστίασης αυτών των παραβολών. Οι άξονες των παραβολικών τμημάτων είναι προσανατολισμένοι μακριά από τον άξονα του σύνθετου παραβολικού συλλέκτη κατά ένα γωνιακό εύρος, γνωστό ως μισή γωνία αποδοχής, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Η ηλιακή ακτινοβολία που εμπίπτει σε αυτό το γωνιακό εύρος του σύνθετου παραβολικού συλλέκτη θα διανύσει όλη τη διαδρομή για να φτάσει στο δέκτη, απευθείας ή μετά από μία ή περισσότερες ανακλάσεις



Σχήμα 3.17: Όψη ενός συμμετρικού διδιάστατου σύνθετου παραβολικού συλλέκτη (2D CPC) [106].

Η διαδικασία σχεδιασμού ενός ιδανικού σύνθετου παραβολικού συλλέκτη ξεκινά με τον καθορισμό των τιμών της ημιγωνίας αποδοχής και του πλάτους του επίπεδου δέκτη. Το προκύπτον πλάτος του ανοίγματος εισόδου και το συνολικό ύψος του σύνθετου παραβολικού συλλέκτη υπολογίζονται στη συνέχεια με τη χρήση των εξισώσεων που προέκυψαν από τον Winston και τους συναδέλφους του ερευνητές [107]. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται το σύνολο των συντεταγμένων για έναν από τους παραβολικούς ανακλαστήρες στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων [12]. Ο παραβολικός ανακλαστήρας της άλλης πλευράς είναι απλώς το είδωλο του αντίστοιχου [1] σε ένα συμμετρικό σύνθετο παραβολικό συλλέκτη.

Οι σύνθετοι παραβολικοί συλλέκτες κατηγοριοποιούνται γενικά σε δισδιάστατους (2D) και τρισδιάστατους (3D) ή συμμετρικούς και ασύμμετρους τύπους [108]. Ο διδιάστατος CPC έχει σχήμα κούλου κυλίνδρου που σχηματίζεται με τη μετατόπιση της πρωτογενούς γεωμετρίας κάθετα στη σελίδα, ενώ ο 3D CPC λαμβάνεται με την περιστροφή ενός 2D CPC γύρω από τον άξονα συμμετρίας του. Ο συμμετρικός διδιάστατος είναι η βασική γεωμετρία σύνθετου παραβολικού συλλέκτη, ενώ όλες οι άλλες παραλλαγές μπορούν να προκύψουν από αυτό το βασικό σχήμα. Η ταξινόμηση των CPC παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18. Ενώ ο λόγος συγκέντρωσης ενός συμμετρικού CPC είναι σταθερός για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης εντός του εύρους γωνιών αποδοχής του, ένα ασύμμετρο σύνθετο παραβολικό συλλέκτη διαθέτει μεταβλητό λόγο συγκέντρωσης λόγω του γεγονότος ότι οι ημίσεια γωνία αποδοχής για τον αριστερό και τον δεξιό παραβολικό ανακλαστήρα δεν είναι οι ίδιες [109]. Για το λόγο αυτό δεν είναι γεωμετρικά συμμετρικός γύρω από τον κεντρικό του άξονα. Ένα τρισδιάστατο CPC προκαλεί αύξηση του γεωμετρικού λόγου συγκέντρωσης σε σύγκριση με το διδιάστατο CPC, εξαιτίας του οποίου το μέγεθος των ηλιακών κυψελών μειώνεται περαιτέρω για δεδομένη

ισχύ. Ωστόσο, το κυκλικό σχήμα των ανοιγμάτων εισόδου και εξόδου του 3D CPC λειτουργεί ως πηγή απωλειών. Επιπλέον, το κυκλικό σχήμα του τρισδιάστατου CPC προκαλεί επίσης εμπόδια στην ενσωμάτωσή του με τις εμπορικά διαθέσιμες ηλιακές κυψέλες πυριτίου τετραγωνικού σχήματος. Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί του τρισδιάστατου CPC, έχει προταθεί ένα τροποποιημένο κυκλικό 3D CPC, το *crossed CPC*, με τετράγωνα ανοίγματα αποδοχής και εξόδου [20].



Σχήμα 3.18: Ταξινόμηση των σύνθετων παραβολικών συλλεκτών με βάση το σχήμα και τη συμμετρία.

3.2.5 Πύργος Ηλιακής Ισχύος (Solar Power Tower)



Οι πύργοι ηλιακής ισχύος (solar power towers) ή αλλιώς συστήματα κεντρικού ηλιακού δέκτη (central receiver), αποτελούν την πιο υποσχόμενη τεχνολογία συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων. Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οι ηλιακοί πύργοι ισχύος έχουν βρει προς το παρόν, περιορισμένη εφαρμογή ως εμπορικά εκμεταλλεύσιμες ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις. Στο άμεσο μέλλον, αυτό μπορεί να αλλάξει, εφόσον εφαρμοστούν βιομηχανικές αλυσίδες μεγάλης κλίμακας στην κατασκευή των εξαρτημάτων τους, καθιστώντας τους ανταγωνιστικούς, ενώ και η έρευνα σε αυτή την τεχνολογία είναι συνεχής, αποδίδοντας διαρκώς αποδοτικότερα και βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους κατασκευής και λειτουργίας τους [110,111].

Σε ότι αφορά τη λειτουργία, η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται μέσω της ανάκλασής της από εκατοντάδες ή και χιλιάδες ηλιοστάτες, ανακλαστικά κάτοπτρα, που βρίσκονται σε γεωγραφικά καθορισμένη διάταξη μεταξύ τους. Διαθέτουν ανεξάρτητο σύστημα περιστροφής, ώστε να ακολουθεί ο κάθε ηλιοστάτης ξεχωριστά και με ακρίβεια την τροχιά του ήλιου και να ανακλά τις ακτίνες του στο ίδιο εστιακό σημείο (στην πραγματικότητα σε μία πεπερασμένη περιοχή), συγκεντρώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία στην κορυφή του ηλιακού πύργου. Ο πύργος είναι μεταλλικής ήτσιμεντένιας κατασκευής, στην κορυφή του οποίου είναι τοποθετημένος ο ηλιακός δέκτης. Από την επιφάνεια του δέκτη διέρχονται πολλές σωληνώσεις, μέσα από τις οποίες διέρχεται το ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας, το οποίο θερμαίνεται

από τη συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια και μεταφέρεται σε εναλλάκτη θερμότητας για τη μεταφορά θερμότητας στο ρευστό λειτουργίας του κύκλου ισχύος και την παραγωγή ατμού. Σε άλλες διατάξεις, το ρευστό μέσο, ατμός συγκεκριμένα, ρέει στις σωληνώσεις του δέκτη και θερμαίνεται άμεσα χωρίς την ανάγκη ύπαρξης εναλλάκτη. Ο ατμός στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας μέσω μιας ατμοηλεκτρικής μονάδας όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια, για βιομηχανικές διεργασίες που απαιτούν τη χρήση υπέρθερμου συμπιεσμένου ατμού. Σε πολλούς από τους πύργους ηλιακής ισχύος χρησιμοποιούνται και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας καθώς και συστήματα εφεδρικής καύσης συμβατικών ορυκτών καυσίμων (π.χ. φυσικό αέριο), για την αδιάκοπη τροφοδότηση του δικτύου με ηλεκτρική ισχύ.

3.2.5.1 Ηλιοστατικό πεδίο (Heliostat Field)

Η βασική λειτουργία του ηλιοστατικού πεδίου επικεντρώνεται στην παρακολούθηση και συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας προς τον κεντρικό ηλιακό δέκτη στην κορυφή του πύργου. Αυτό απαιτεί τον καθορισμό του χώρου που οι ηλιοστάτες καταλαμβάνουν στο έδαφος, στην περιοχή γύρω από τον ηλιακό πύργο. Οι δύο γενικές διατάξεις που συναντώνται είναι:

- η περιβάλλουσα διάταξη (Surrounding Field Layout)
- η διάταξη πεδίου βόρεια του πύργου (North Field Layout)

Οι δύο βασικές διατάξεις ηλιοστατικών πεδίων, για τις οποίες γίνεται λόγος, φαίνονται χαρακτηριστικά στα παρακάτω σχήματα:



Εικόνα 3.5: Περιβάλλουσα Διάταξη Ηλιοστατικού Πεδίου του σταθμού Gemasolar, στη Σεβίλλη Ισπανίας [112].



Εικόνα 3.6: Διάταξη Ηλιοστατικού Πεδίου Βόρεια του Πύργου (North Field Layout) του σταθμού PS10, στη Σεβίλλη Ισπανίας.

Τα βόρεια του πύργου πεδία παρουσιάζουν γενικά καλύτερη απόδοση, ωστόσο όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ισχύς της εγκατάστασης, τόσο περισσότεροι ηλιοστάτες απαιτούνται [113]. Έτσι, σε ένα μεγάλο πεδίο με διάταξη βόρεια του πύργου, αρκετοί καθρέφτες θα ήταν αναγκαίο να τοποθετηθούν σε πολύ μακρινές θέσεις με χαμηλή απόδοση λόγω της ατμοσφαιρικής απορρόφησης. Στην περιβάλλουσα διάταξη απεναντίας, οι ηλιοστάτες τοποθετούνται σε κοντινότερες αποστάσεις και παρόλη την αύξηση των απωλειών συνημιτόνου, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του πεδίου είναι μεγαλύτερος. Ο συνολικός οπτικός βαθμός απόδοσης, η_{opt} , μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\eta_{opt} = \eta_{cos} \cdot \eta_{reflect} \cdot \eta_{shadow} \cdot \eta_{block} \cdot \eta_{attenuation} \cdot \eta_{spillage} \quad (3.31)$$

Όπου

- η_{cos} είναι η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας, ανάλογη με το συνημίτονο της γωνίας μεταξύ των ηλιακών ακτίνων και της κανονικής επιφάνειας του ηλιοστάτη,
- $\eta_{reflect}$ είναι η μέση ανακλαστικότητα του κατόπτρου.
- η_{shadow} σχετίζεται με τις απώλειες σκίασης, λόγω της σκιάς που ρίχνει ένα κάτοπτρο στα κάτοπτρα πίσω του και λαμβάνει υπόψη τη σκιά του πύργου του δέκτη σε ολόκληρο το ηλιακό πεδίο.
- η_{block} αφορά τις απώλειες αποκλεισμού/μπλοκαρίσματος, λόγω της ακτινοβολίας που ανακλάται από έναν ηλιοστάτη στο πίσω μέρος ενός άλλου ηλιοστάτη.
- $\eta_{attenuation}$ λαμβάνει υπόψη την ατμοσφαιρική εξασθένηση της ακτινοβολίας μεταξύ του ηλιοστάτη και του δέκτη.
- $\eta_{spillage}$ αντιπροσωπεύει το κλάσμα του ανακλώμενου ενεργειακού σημείου που προσπίπτει στην επιφάνεια του δέκτη [113].

Έτσι, έχει υπολογιστεί πειραματικά και θεωρητικά ότι οι διατάξεις ηλιακού πεδίου βόρεια του πύργου είναι αποδοτικότερες οπτικά από αυτές που είναι περιβάλλουσες (βλ. Πίνακα 3.2).

	PS10 (North Field Layout)		Gemasolar (Surrounding Field Layout)	
	Ονομαστική	Ετήσια	Ονομαστική	Ετήσια
η_{\cos} (%)	92.34	84.4	81.44	76.62
η_{reflect} (%)	88	88	93	93
η_{shadow} (%)	99.93	96.56	99.83	94.84
η_{block} (%)	99.24	99.09	99.63	98.44
$\eta_{\text{attenuation}}$ (%)	95.44	95.5	95.04	95.03
η_{spillage} (%)	99.34	99.39	95.53	95.08
$\eta_{\text{absorbance}}$ (%)	98	98	97	97
η_{optical} (%)	74.87	66.1	66.34	58.31
η_{defocus} (%)		97.9		86.47

Πίνακας 3.2: Ονομαστική και ετήσια οπτική απόδοση του PS10 (Διάταξη βόρεια του πύργου) και του Gemasolar (Διάταξη περιβάλλουσα του πύργου) [113].

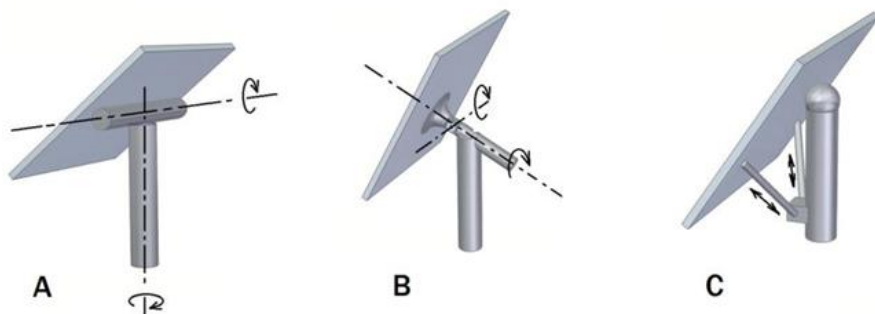
Στις εγκαταστάσεις με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ συνηθίζεται να χρησιμοποιείται η περιβάλλουσα διάταξη, ενώ για μικρότερη ισχύ, προτιμάται τις περισσότερες φορές η διάταξη των ηλιοστατών βόρεια του πύργου

Η τιμή της ονομαστικής ισχύος της εγκατάστασης, που αποτελεί τη διαχωριστική γραμμή για την επιλογή της μίας ή της άλλης διάταξης, βρέθηκε περί τα 90 MWe [114]. Για ηλιακούς σταθμούς ισχύος κάτω των 90 MWe, χωρίς σύστημα αποθήκευσης, είναι προτιμητέα η διάταξη ηλιοστατών βόρεια του πύργου. Στην περίπτωση όμως, όπου η ισχύς του σταθμού υπερβαίνει τα 90 MWe, η επιλογή της περιβάλλουσας διάταξης γύρω από τον πύργο φαίνεται πιο κατάλληλη. Σε περιπτώσεις, όμως, όπου υπάρχει σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, η διαχωριστική γραμμή μετακινείται προς μικρότερες τιμές ισχύος. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις όπου η ικανότητα αποθήκευσης φτάνει στις 6 ώρες, η ονομαστική ισχύς περίπου 50 MWe αποτελεί το όριο για την επιλογή της κατάλληλης διάταξης [110]. Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η διάταξη με τους ηλιοστάτες βόρεια του πύργου επιδεικνύει βελτιωμένη απόδοση κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ η περιβάλλουσα διάταξη επιτυγχάνει τη μέγιστη απόδοση της κατά τους θερινούς μήνες.

3.2.5.2 Σχεδιασμός και Παράμετροι Ηλιοστάτη

Ο ηλιοστάτης είναι ουσιαστικά ένα μηχανικά ενεργοποιούμενο κάτοπτρο που χρησιμοποιείται σε συστήματα πύργων ηλιακής ενέργειας. Το σύστημα κίνησης πρέπει να είναι σε θέση να εκτελεί πολύ αργές κινήσεις με μεγάλους λόγους μείωσης, για να παρακολουθεί με μεγάλη ακρίβεια την πορεία του ήλιου. Ακόμα και μια μικρή γωνιακή απόκλιση στην κίνηση ενός απομακρυσμένου ηλιοστάτη μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στο αποτύπωμα των ανακλώμενων ακτίνων στον δέκτη. Επιπλέον, πρέπει να προσφέρει τη δυνατότητα σχετικά γρήγορης επαναφοράς στην ανενεργή οριζόντια θέση, είτε λόγω κακών καιρικών συνθηκών είτε λόγω ανάγκης απενεργοποίησης από τον κεντρικό ηλιακό δέκτη.

Οι ηλιοστάτες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε ως *σειριακοί* είτε ως *παράλληλοι*, ανάλογα με την τοποθέτηση των μηχανισμών κίνησης. Σε έναν σειριακού τύπου ηλιοστάτη, οι μηχανισμοί κίνησης τοποθετούνται σειριακά. Ο μηχανισμός *ανύψωσης αζιμούθιου* (*azimuth elevation*) είναι αυτού του τύπου (βλ. Εικόνα 3.3), καθώς και ο νέος ηλιοστάτης *ευθυγράμμισης στόχου* (*target aligned*) (βλ. Εικόνα 3.3). Το πλεονέκτημα είναι ο απλός σχεδιασμός και ο απλός έλεγχος, ενώ στα μειονεκτήματα περιλαμβάνεται η μειωμένη σταθερότητα. Η άλλη προσέγγιση είναι ένας *παράλληλος* τύπου ηλιοστάτης, όπου τουλάχιστον δύο μηχανισμοί βρίσκονται σε επαφή τόσο με τη μονάδα κάτοπτρου όσο και με το έδαφος ταυτόχρονα (βλ. Εικόνα 3.3). Το πλεονέκτημα με αυτόν τον τύπο κίνησης είναι η αυξημένη σταθερότητα. Ο έλεγχος πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να χειρίζεται κλειστούς βρόχους στον μηχανισμό, από όπου υπάρχουν περισσότεροι από ένας τρόποι για να φτάσει από το έδαφος στο κάτοπτρο [116]. Όλες αυτές οι κατασκευές έχουν προταθεί για ηλιακούς πύργους σε εμπορική κλίμακα και μέχρι στιγμής ο μηχανισμός *ανύψωσης αζιμούθιου* είναι η κυρίαρχη επιλογή που έχει εφαρμοστεί σε μεγαλύτερα έργα. Ο ηλιοστάτης *ευθυγράμμισης στόχου* έχει οπτικά πλεονεκτήματα έναντι του τύπου *ανύψωσης αζιμούθιου* και επιτρέπει ένα πυκνότερο πεδίο ηλιοστάτη (περίπου διπλάσια πυκνότητα) [117]. Ως εκ τούτου, αυτός ο τύπος ηλιοστάτη φαίνεται ενδιαφέρον.



Εικόνα 3.3: Τύποι μηχανισμού ηλιοστάτη, Α) Αζιμούθιου-Ανύψωσης, Β) Ευθυγράμμισης Στόχου, Γ) Παράλληλος [115].

Ο σειριακού τύπου ηλιοστάτης είναι ο καθιερωμένος τύπος ηλιοστάτη. Ο πιο συνηθισμένος σχεδιασμός είναι μια βάση τοποθετημένη σε ένα σημείο, στην κορυφή του οποίου υπάρχει μια μονάδα κίνησης/μηχανισμού (motor-module) που περιέχει τόσο την κίνηση αζιμούθιου όσο και την κίνηση ανύψωσης. Ένας σωλήνας ροπής (μακρύς χαλύβδινος σωλήνας) είναι στερεωμένος σε αυτή τη μονάδα κίνησης, η οποία είναι ίση με τον άξονα ανύψωσης. Κάθετα προς τον άξονα ανύψωσης, μια δομή δοκού συνδέει το κάτοπτρο με τον σωλήνα ροπής. Σε ηλιοστάτες μεγάλου μεγέθους, χρησιμοποιείται ένα δεύτερο πλέγμα δοκών μεταξύ του κατοπτρικού γυαλιού και του δικτυώματος.

Κάθε ηλιοστάτης σκοπό έχει, με την αυτόνομη κίνησή του σε σχέση με τους υπόλοιπους του πεδίου, να ευθυγραμμίζει την ανακλαστική του επιφάνεια κατά τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας στον κεντρικό δέκτη στην κορυφή του ηλιακού πύργου. Για να διασφαλιστεί η ακριβής κατεύθυνση της ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας προς τον κεντρικό δέκτη, το διάνυσμα που είναι κάθετο στην επιφάνεια του κάθε ηλιοστάτη πρέπει να διχοτομεί διαρκώς τη γωνία που σχηματίζουν η ευθεία που ενώνει το κέντρο του ηλιοστάτη με το κέντρο του ηλιακού δέκτη και η ευθεία που ενώνει το κέντρο του ηλιοστάτη με τον ήλιο [110].

Σε ότι αφορά το κατασκευαστικό κομμάτι του κατοπτρου υπάρχουν δύο τύποι:

Ηλιοστάτες επίπεδου γυαλιού/μετάλλου (flat glass/metal heliostats): Η ανακλαστική επιφάνεια αποτελείται από υλικό υψηλού δείκτη ανάκλασης, τοποθετημένο κάτω από γυάλινη επιφάνεια χαμηλής περιεκτικότητας σε σίδηρο και υψηλής διαπερατότητας. Αυτή η επιφάνεια επικολλάται με κατάλληλη συγκολλητική ουσία σε μεταλλική βάση στήριξης, η οποία παράλληλα διαμορφώνει τη γεωμετρία του ηλιοστάτη. Για την προστασία του ανακλαστικού στρώματος από διάβρωση και υποβάθμιση, είτε τοποθετείται μια δεύτερη στρώση γυαλιού στο πίσω μέρος του πρώτου φύλλου γυαλιού είτε το πίσω μέρος της γυάλινης επιφάνειας βάφεται με προστατευτικό χρώμα. Η συνολική επιφάνεια ανάκλασης αποτελείται από ένα ή περισσότερα τέτοια κάτοπτρα. Επίσης, το γυαλί έχει τη δυνατότητα της εύκολης σχετικά κάμψης κατά μήκος ενός άξονα.

Ηλιοστάτες τεντωμένης μεμβράνης (stretched membrane heliostats): Σε αυτούς, η ανακλαστική επιφάνεια σχηματίζεται από μια εκτεταμένη μεμβράνη. Η τεχνολογία αναπτύχθηκε το 1980 και αποτελείται από μια εύκαμπτη μεμβράνη από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα, πάνω στην οποία είναι στερεωμένο ανακλαστικό υλικό. Η τάση της μεμβράνης μπορεί να ρυθμιστεί με αντλία κενού/ανεμιστήρα ή με μηχανικό γραμμικό κινητήρα/ενεργοποιητή, ώστε να μεταβάλλεται η εστιακή απόσταση. Οι ηλιοστάτες τεντωμένης μεμβράνης μπορούν να έχουν διάφορα μεγέθη, καθώς έχουν κατασκευαστεί πρωτότυπα από 50 m² έως 150 m². Συνήθως έχουν κυκλικό σχήμα. Η τεχνολογία ευνοεί μικρότερη δομή στήριξης, καθώς και έναν ελαφρύ ηλιοστάτη. Το βάρος ενός ηλιοστάτη SM είναι περίπου το μισό ενός ηλιοστάτη από επίπεδο γυαλί. Όμως το κόστος της μεμβράνης ήταν

σημαντικά υψηλότερο από τον ηλιοστάτη επίπεδου γυαλιού και ο ηλιοστάτης τεντωμένης μεμβράνης ήταν περίπου 20 % ακριβότερος από τον τύπο επίπεδου γυαλιού [118]. Ωστόσο, όταν συμπεριλήφθηκε η βελτιωμένη απόδοση του ηλιοστάτη τεντωμένης μεμβράνης κατά τη λειτουργία, το κόστος ήταν αρκετά παρόμοιο κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους [118]. Εδώ και μερικά χρόνια το ενδιαφέρον για την τεχνολογία τεντωμένης μεμβράνης έχει μειωθεί ριζικά και για πολλούς ηλιακούς μηχανικούς η τεχνολογία τεντωμένης μεμβράνης δεν αποτελεί πλέον επιλογή [119].

Ανεξαρτήτως της κατασκευαστικής τους διαμόρφωσης, ένας καλά σχεδιασμένος ηλιοστάτης πρέπει να εκδηλώνει υψηλή ανακλαστικότητα, χαμηλό σχετικό βάρος και αντοχή στη φθορά που προκαλείται από όλα τα πιθανά καιρικά φαινόμενα. Ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια καιρικών αντοχών για τον σχεδιασμό ενός ηλιοστάτη αποτελεί η αντίστασή του στον άνεμο. Τυπικά απαιτούνται για την εύρυθμη λειτουργία του ηλιοστάτη αντοχή για μέσες ταχύτητες άνεμου έως 12-14 m/s, την αντοχή του χωρίς ζημιά για ταχύτητες έως 22 m/s και τη δυνατότητα να πάρει θέση αδράνειας-οριζόντια θέση (κάτοπτρο παράλληλο στο έδαφος ώστε να ελαχιστοποιούνται οι καταπονήσεις) για ταχύτητες έως 40 m/s. Τέλος, η ικανότητα επιβίωσης σε χαλάζι είναι σημαντική (τυπικό κριτήριο επιβίωσης: διάμετρος χαλαζόπτωσης 19mm και ταχύτητα 20m/s) [110].

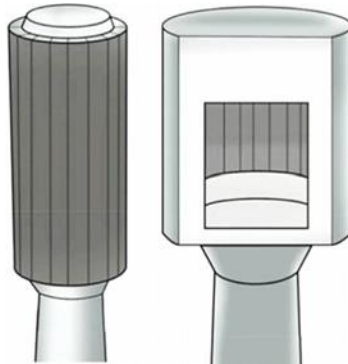
3.2.5.3 Δέκτης

Στους σταθμούς ηλιακού πύργου, ο δέκτης βρίσκεται τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου. Το ύψος του πύργου άρα και του δέκτη καθορίζεται από το μέγεθος του ηλιοστατικού πεδίου. Όσο πιο μεγάλο το ύψος του πύργου τόσο πιο μεγάλο και το μέγεθος του ηλιοστατικού πεδίου, ώστε οι ηλιοστάτες που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τον πύργο (κεντρικό δέκτη) να ανακλούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία στο δέκτη. Το μέγεθος του ηλιακού δέκτη εξαρτάται από τη ζητούμενη παραγόμενη ενέργεια, με περιορισμούς που προκύπτουν από τη μέγιστη ροή θερμότητας και τις απώλειες διαρροής. Ο σχεδιασμός του απαιτεί ανάλυση ακρίβειας και βελτιστοποίηση λόγω του σημαντικού κόστους (περίπου 15% του συνολικού κεφαλαίου της συνολικής εγκατάστασης) και της διάρκειας ζωής του λόγω μεταβατικών φαινομένων και θερμικών τάσεων στην επιφάνειά του. Είναι σημαντικό να επιλέγεται με προσοχή το μέγεθος, καθώς μικρότερη επιφάνεια σημαίνει μεγαλύτερη θερμική ροή αλλά και αυξημένες απώλειες. Η εισερχόμενη ροή θερμότητας πρέπει να είναι υψηλή για βέλτιστη απόδοση, αλλά περιορίζεται από τα υλικά που αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι τυπικές θερμοκρασίες λειτουργίας ενός κεντρικού ηλιακού δέκτη κυμαίνονται μεταξύ 300 και 1200 βαθμών Κελσίου, ενώ η εισερχόμενη ροή θερμότητας κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 200 και 1200 KW/m² [110]. Αυτές οι τιμές καθιστούν κρίσιμη την επιλογή υλικών για την κατασκευή του δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη τις υψηλές θερμοκρασίες και τις θερμικές πιέσεις.

Οι δέκτες που χρησιμοποιούνται στους σταθμούς με πύργο ισχύος είναι:

- Σωληνοειδής δέκτης (Tubular receiver). Ο οποίος με τη σειρά του ως τύπος διαχωρίζεται στις υποκατηγορίες των *Εξωτερικών Δεκτών (External Receiver)* και των *Δεκτών Κοιλότητας (Cavity Receiver)*.
- Ογκομετρικός Δέκτης (Volumetric Receiver).



Σχήμα 3.19: Σχηματική αναπαράσταση σωληνοειδούς δέκτη, εξωτερικού (αριστερά) και κοιλότητας (δεξιά) [121].

Οι σωληνοειδείς δέκτες κατηγοριοποιούνται γενικά σε εξωτερικούς και κοιλότητας δέκτες και ταξινομούνται περαιτέρω με βάση το υλικό του σωλήνα γεωμετρίας, τον ρυθμό ροής και την ταχύτητα, τη θερμοκρασία εισόδου και τη θερμοκρασία εξόδου του εργαζόμενου ρευστού (HTF). Η διάμετρος και το πάχος του σωλήνα σχεδιάζονται κατά τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας με τις ελάχιστες δυνατές απώλειες άντλησης. Οι μικρές διαμέτροι σωλήνων είναι πάντα ευεργετικές για τη συναγωγή. Ταυτόχρονα πρέπει να δοθεί προσοχή στο κόστος των υλικών και στις απώλειες άντλησης [120].

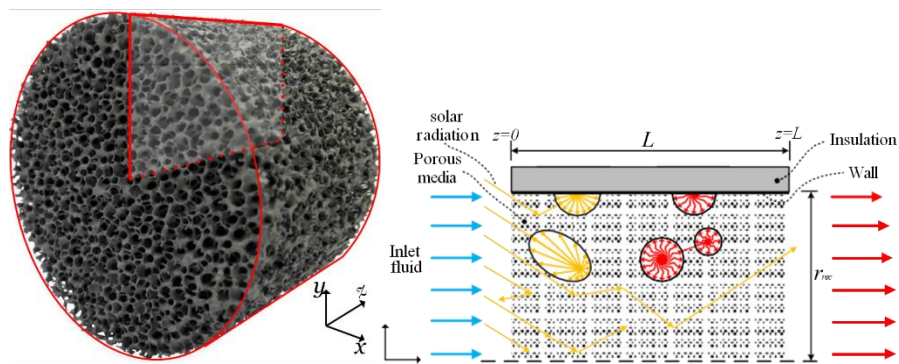
Οι σωληνοειδείς δέκτες χρησιμοποιούνται συχνότερα ως κεντρικοί δέκτες σε σταθμούς ηλιακού πύργου, όπου η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μεταφέρεται στο ρευστό μεταφοράς θερμότητας μέσω ενός μεταλλικού ή κεραμικού τοιχώματος. Έχουν χρησιμοποιηθεί και συμβατικές διατάξεις με μεταλλικές σωληνώσεις και νερό ή τετηγμένα άλατα ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας, ενώ η θερμοκρασία κυμαίνεται ανάμεσα σε 500-600 °C. Σπανιότερη είναι η χρήση σωληνοειδών δεκτών με αέρα ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας, όπου η θερμοκρασία φτάνει τους 800-900 °C.

Οι εξωτερικοί σωληνοειδείς δέκτες είναι ο συνηθέστερος δέκτης ηλιακού πύργου. Ο εξωτερικός δέκτης περιλαμβάνει επιφάνειες απορρόφησης για την ηλιακή ακτινοβολία, που είναι εκτεθειμένες στο περιβάλλον, οι οποίες αποτελούνται από πολλά παράλληλα μικρά πάνελ σωληνώσεων. Αυτοί οι σωλήνες συνδέονται με μια κοινή κεφαλή εισόδου και εξόδου,

μέσω των οποίων ρέει το εργαζόμενο ρευστό, μεταφέροντας τη θερμική ενέργεια που έχει απορροφηθεί από την εξωτερική τους επιφάνεια. Οι σωλήνες, συνήθως κατασκευασμένοι από κράματα νικελίου και ανοξείδωτο ατσάλι, επικαλύπτονται εξωτερικά με σκούρα βαφή υψηλής απορροφητικότητας, ενώ η διάμετρος τους κυμαίνεται σε 20-50 mm [110].

Ο δέκτης κοιλότητας χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες εμπορικές μονάδες ηλιακής ενέργειας πύργου (STP) και οι εν λόγω δέκτες οδηγούν γενικά σε χαμηλότερες θερμικές απώλειες ακτινοβολίας και συναγωγής

Σε σταθμούς μεγάλης ισχύος, όπου η διάταξη των ηλιοστατών είναι περιβάλλουσα του πύργου, τα πάνελ του δέκτη συνδέονται πλευρικά μεταξύ τους, σχηματίζοντας ένα πολύεδρο που προσεγγίζει γεωμετρικά μια κυλινδρική διάταξη (για αυτό λέγεται και κυλινδρικός δέκτης) . Ο λόγος ύψους προς διάμετρο ενός σωληνοειδούς εξωτερικού δέκτη κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 1:1 και 2:1. Σε μικρότερες εγκαταστάσεις με βόρεια διάταξη πεδίου, εάν χρησιμοποιηθεί εξωτερικός δέκτης, συνήθως συνιστάται η τομή ενός κυλινδρικού/σωληνοειδούς δέκτη, όπου έχουν αφαιρεθεί τα πάνελ σωλήνων με νότιο προσανατολισμό [110].



Σχήμα 3.20: Στοιχείο πορώδους ογκομετρικού δέκτη : ανοιχτή κυψέλης SiC κεραμικός αφρός (αριστερά), η τομή που απεικονίζει την ηλιακή ακτινοβολία και απορρόφηση, τη ροή το ρευστού και τη διαδικασία μεταφοράς θερμότητας (δεξιά) [123].

Οι ογκομετρικοί δέκτες είναι κατασκευές με πορώδη χαρακτηριστικά, οι οποίοι λειτουργούν ως εναλλάκτες θερμότητας. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας δεν γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια του απορροφητή, αλλά στο εσωτερικό. Το συνηθέστερο μέσο μεταφοράς θερμότητας που είναι ο αέρας, κατευθύνεται εντός της πορώδους κατασκευής και θερμαίνεται μέσω συναγωγής. Οι ογκομετρικοί δέκτες είναι συνήθως κατασκευασμένοι είτε από λεπτά ειδικά καλώδια , που είναι πεπλεγμένα μεταξύ τους ή τοποθετημένα σε στρώσεις, τέτοια ώστε να αντέχουν στις υψηλές θερμοκρασίες. Άλλοτε είναι κατασκευασμένα από μεταλλικές ή κεραμικές ανοικτές κυψέλες σε κατάλληλη διάταξη. Χαρακτηριστικό τους είναι το φαινόμενο ρευστό μεταφοράς θερμότητας του ογκομετρικού φαινομένου, κατά το οποίο η πλευρά του

απορροφητή που δέχεται την ακτινοβολία βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από το μέρος το οποίο εκπέμπει από τον απορροφητή. Κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας οι ογκομετρικοί δέκτες τείνουν να έχουν ασαφή κατανομή της ροής μάζας. Κατάλληλες ρυθμίσεις με στοιχεία διαμόρφωσης της ροής (π.χ. διατηρητικές πλάκες) τα οποία βρίσκονται τοποθετημένα πίσω από τον απορροφητή, η επιλογή των κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας κακής και το υλικό του απορροφητή μπορούν να περιορίσουν τέτοια φαινόμενα [121]. Στα πλεονεκτήματα των ογκομετρικών δεκτών γενικά συγκαταλέγονται η ελεύθερη διάθεση του αέρα και η έλλειψη κινδύνου στεροποίησης του ως εργαζόμενου ρευστού μέσου. Επίσης μπορούν να επιτευχθούν υψηλές θερμοκρασίες, με ένα πιο απλό σύστημα σε σχέση με άλλα, καθιστώντας το συνολικό θερμικό κύκλο αποδοτικότερο.

3.2.5.4 Εργαζόμενο μέσο μεταφοράς θερμότητας (HTF)

Τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας (HTF) διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη συλλογή ενέργειας από το ηλιακό πεδίο και τη μεταφορά της στον σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόδοση των συστημάτων ηλιακών πύργων επηρεάζεται άμεσα από τα ρευστά μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται στους ηλιακούς δέκτες. Επειδή το CSP χρησιμοποιεί πολλά ρευστά μεταφοράς θερμότητας για να λειτουργήσει, είναι κρίσιμο να διατηρηθεί το κόστος των ρευστών μεταφοράς θερμότητας όσο το δυνατόν χαμηλότερα, μεγιστοποιώντας παράλληλα την απόδοση. Εκτός από τη χρήση του ρευστού ως μέσου μεταφοράς θερμότητας από τον δέκτη στη γεννήτρια ατμού, το θερμό ρευστό μεταφοράς θερμότητας μπορεί επίσης να αποθηκευτεί σε μονωμένες δεξαμενές για παραγωγή ενέργειας ετεροχρονισμένα κατά τις περιόδους που δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία. Το νερό είναι ένα από τα ρευστά που χρησιμοποιούνται ως HTF λόγω των εξαιρετικών θερμικών ιδιοτήτων του, της διαθεσιμότητάς του και της περιβαλλοντικής του ασφάλειας. Ωστόσο, όταν απαιτείται υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, προτιμάται η χρήση άλλων HTF που έχουν υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας.

Αποδεικνύεται ότι η επιλογή του καλύτερου HTF αποτελεί βασική παράμετρο για τη διασφάλιση της αποδοτικής απόδοσης της μονάδας ηλιακού πύργου. Προκειμένου να επιλεγεί το κατάλληλο ρευστό για τη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ενέργεια, πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες. Σε αυτούς περιλαμβάνονται ο τύπος του δέκτη, το σύστημα αποθήκευσης και το αν το ρευστό θα τροφοδοτείται άμεσα ή έμμεσα στον κύκλο ισχύος.

Νερό/ατμός. Το νερό έχει καλές φυσικές ιδιότητες για να χρησιμοποιηθεί ως μέσο μεταφοράς θερμότητας λόγω της υψηλής ειδικής θερμότητας ($4185 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$), της διαθεσιμότητας, του χαμηλού ιξώδους, της μη τοξικότητας και του χαμηλού κόστους. Εάν το ρευστό του δέκτη είναι νερό/ατμός, ο ατμός μπορεί να τροφοδοτηθεί απευθείας στον ατμοστρόβιλο ως άμεση παραγωγή ατμού (direct steam generation DSG). Αν χρησιμοποιείται ένα από τα άλλα ρευστά στον δέκτη η θερμική ενέργεια του ρευστού πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε νερό/ατμό μέσω

εναλλακτών θερμότητας πριν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη γεννήτρια του στροβίλου.

Ωστόσο, υπάρχουν μειονεκτήματα με τη χρήση του νερού ως HTF, όπως η διαβρωτική του φύση και τα όρια θερμοκρασίας λειτουργίας του. Εκτός από αυτό, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν ο ήλιος δύει και τις συννεφιασμένες ημέρες, με αποτέλεσμα τη σπανιότερη χρήση νερού σε ηλιακούς πύργους.

Αέρας. Ένα άλλο ρευστό μεταφοράς θερμότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πύργους ηλιακής ενέργειας είναι ο αέρας. Μπορεί να θερμανθεί σε θερμοκρασία 1000 °C και ο θερμός αέρας χρησιμοποιείται απευθείας για την παραγωγή ατμού που κινεί έναν στρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας. Ο αέρας έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι είναι μη διαβρωτικός και ανθεκτικός στο πάγωμα και τον βρασμό. Επιπλέον, ο αέρας είναι ουσιαστικά δωρεάν, χωρίς κόστος, μη ρυπογόνος και δεν έχει υψηλότερο όριο θερμοκρασίας λειτουργίας. Επιπλέον, ο αέρας δεν χρειάζεται προηγούμενη προθέρμανση και ο θερμοδυναμικός κύκλος είναι πιο αποδοτικός. Ωστόσο, ο αέρας έχει χαμηλή θερμοχωρητικότητα και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει μειονέκτημα για τη χρήση του.

Υγρό νάτριο. Το υγρό νάτριο έχει υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας από τα τετηγμένα άλατα, άρα πιο αποδοτικό θερμικό κύκλο ενέργειας. Επιπλέον, έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, καθιστώντας τους δέκτες νατρίου καταλληλότερους για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών [121]. Ωστόσο, υπάρχει ζήτημα με τη χρήση νατρίου ως HTF, λόγω της αντιδραστικότητάς του με το νερό και τον αέρα και του κόστους του, καθώς θεωρείται σχετικά ακριβό, ειδικά αν χρησιμοποιείται στο σύστημα αποθήκευσης [124]. Μελέτες συνέκριναν την απόδοση του υγρού νατρίου, του τετηγμένου άλατος και του Hitec (7 % NaNO_3 , 53 % KNO_3 , 40 % NaNO_2). Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι το νάτριο προσφέρει υψηλότερη συνολική απόδοση λόγω του υψηλότερου συντελεστή μεταφοράς θερμότητας και της θερμικής αγωγιμότητάς του.

Υπερκρίσιμο CO_2 . Το υπερκρίσιμο CO_2 έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα εξαιρετικό HTF λόγω της μη διαβρωτικής του φύσης, της μη αναφλεξιμότητας, της μη τοξικότητας και της μη εκρηκτικής του φύσης. Επιπλέον, είναι άμεσα διαθέσιμο, φθινό και σταθερό σε υψηλές θερμοκρασίες. Το διοξείδιο του άνθρακα δρα ως υπερκρίσιμο ρευστό πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία των 31,1 °C και την κρίσιμη πίεση (7,38 MPa), όπου παρουσιάζει ενδιάμεσες ιδιότητες μεταξύ υγρού και αερίου [125]. Το υπερκρίσιμο CO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας του ηλιακού συλλέκτη και ως εργαζόμενο ρευστό του κύκλου θερμικής ισχύος. Ως αποτέλεσμα, δεν απαιτείται εναλλάκτης θερμότητας, επιτυγχάνοντας πιο αποδοτικές και λιγότερο πολύπλοκες μονάδες παραγωγής ενέργειας, ενώ λόγω των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του, το υπερκρίσιμο CO_2 σε έναν κύκλο Brayton μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τον ατμό και έχει τη δυνατότητα να είναι πιο αποδοτικό [126]. Μελέτες ως προς την αποδοτικότητα μιας μονάδας πύργου που χρησιμοποιεί υπερκρίσιμο CO_2 ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας σε δέκτη κοιλότητας με απόδοση δέκτη 72,5 %, συνέκριναν τον υπερκρίσιμο κύκλο ατμού και τον υπερκρίσιμο κύκλο CO_2 σε έναν

πύργο ηλιακής ενέργειας με άμεσο και σε άμεσο δέκτη ατμού/υπερκρίσιμου CO₂. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η χρήση CO₂ θα αποδώσει καλύτερα σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

Τα τετηγμένα άλατα είναι (molten salts) ένα από τα HTF που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις πύργων ηλιακής ενέργειας, όχι μόνο για τη μεταφορά του θερμική ενέργεια στον κύκλο ισχύος, αλλά και για την αποθήκευση της ενέργειας και τη χρήση της τη νύχτα ή τις συννεφιασμένες ημέρες για την αύξηση της απόδοσης της μονάδας. Το νιτρικό νάτριο, το νιτρικό κάλιο, το νιτρικό ασβέστιο και/ή το νιτρικό λίθιο είναι τα πιο κοινά συστατικά του τετηγμένου άλατος [127]. Ο κυλινδρικός δέκτης είναι ο τύπος δέκτη που χρησιμοποιείται όταν το λιωμένο άλας είναι το ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Το τετηγμένο άλας θερμαίνεται από την ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία από το ηλιοστατικό πεδίο από 290 °C σε 565 °C πριν εισέλθει στη δεξαμενή θερμικής αποθήκευσης. Για την παραγωγή ατμού, τα θερμαινόμενα άλατα διοχετεύονται από το σύστημα αποθήκευσης στον κύκλο ισχύος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύγκριση

Τα τετηγμένα/λιωμένα άλατα (molten salts) είναι ένα από τα πλέον διαδεδομένα HTF σήμερα λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, εκτός από τη χρήση τους ως μέσο αποθήκευσης. Ωστόσο, σε σύγκριση με το υγρό νάτριο με βάση μελέτες, το άλας παρουσιάζει χειρότερα αποτελέσματα και υψηλότερη θερμοκρασία και απόδοση. Η χρήση του αέρα έχει μεγάλες δυνατότητες ως HTF για πύργο ισχύος και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς υψηλή απόδοση σε σύγκριση με άλλα υγρά. Το υπερκρίσιμο CO₂ έχει χρησιμοποιηθεί ως HTF λόγω της χαμηλής κρίσιμης θερμοκρασίας και πίεσης και της ασφαλούς λειτουργίας του σε σύγκριση με το υγρό νάτριο. Με περισσότερη ανάπτυξη, δοκιμάζονται νέα HTF για τον ηλιακό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη μεγιστοποίηση της θερμικής απόδοσης του δέκτη και την επίτευξη υψηλότερης συνολικής απόδοσης της εγκατάστασης. Στο μέλλον, θα διερευνηθεί η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου και η βελτιστοποίηση των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με ηλιακούς πύργους με διαφορετικά HTF για διαφορετικές τοποθεσίες. Για τη διερεύνηση του κατάλληλου ρευστού μεταφοράς θερμότητας για τον ηλιακό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής πύργου

Το νερό, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως σε παλαιότερες μονάδες παραγωγής ενέργειας, προσφέρει καλές θερμικές ιδιότητες και υψηλή απόδοση του αποδέκτη έως και 89 %, ωστόσο συνδέονται με αυτό ορισμένες δυσκολίες. Το σημαντικότερο μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αποθήκευσης. Τα τετηγμένα άλατα είναι ένα από τα πλέον χρησιμοποιούμενα εργαζόμενα ρευστά σήμερα λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους και του γεγονότος ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο αποθήκευσης που προσφέρει υψηλότερη συνολική απόδοση της εγκατάστασης. Αν και το τετηγμένο άλας μπορεί να φτάσει σε υψηλές θερμοκρασίες, πρέπει να διατηρείται πάνω από τους 290 °C. Διαφορετικά, αρχίζει να στερεοποιείται. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να αποφεύγονται οι περιοχές με ψυχρό κλίμα. Από την άλλη, το υγρό νάτριο με υψηλή θερμική αγωγιμότητα και συντελεστή μεταφοράς θερμότητας μπορεί να προσφέρει υψηλότερη απόδοση του δέκτη και της εγκατάστασης-

ωστόσο, θα πρέπει να γίνεται καλός χειρισμός για να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία. Η χρήση του αέρα έχει μεγάλες δυνατότητες ως ρευστό μεταφοράς ισχύος για πύργο κεντρικού δέκτη λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας. Μπορεί να φθάσει τους 1090 °C σε περιοχές με υψηλή άμεση κανονική ακτινοβολία και πολλές ώρες ηλιοφάνειας. Βέβαια, η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και θερμοχωρητικότητα μπορεί να αποτελέσει πρόκληση. Το υπερκρίσιμο CO₂ εξετάστηκε πρόσφατα ως HTF και θα μπορούσε δυνητικά να επιτύχει υψηλές θερμοκρασίες έως και 1000 °C.

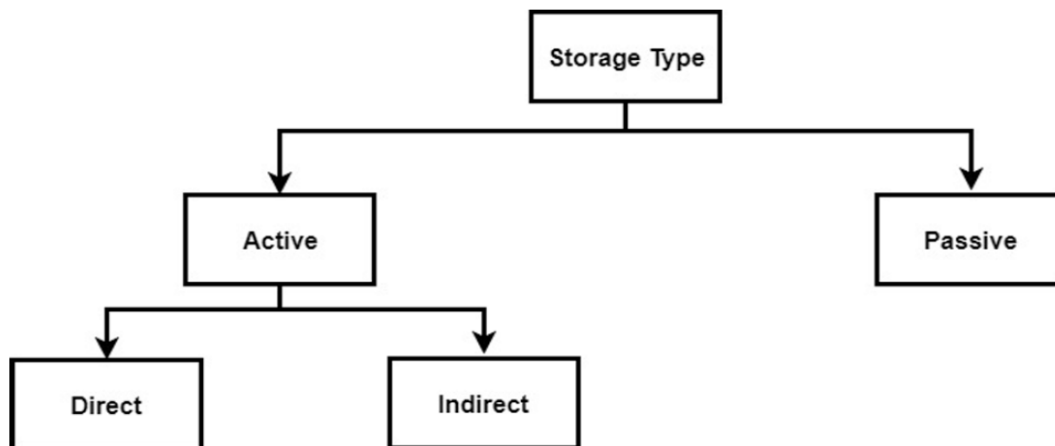
Αναφορές	HTF	T _{max} , °C	Τύπος δέκτη	Απόδοση δέκτη, %
[128]	Υπερκρίσιμο CO ₂	1000	Δέκτης κοιλότητας	72.5
[129]	Τετηγμένο άλας (60 % NaNO ₃ , 40 % KNO ₃)	560	Εξωτερικός δέκτης	87.67
[129]	Υγρό νάτριο	800	Εξωτερικός δέκτης	87.78
[130]	Αέρας	1090	Ογκομετρικός δέκτης	88
[131]	Νερό/ατμός	530 υπέρθερμος ατμός	Εξωτερικός δέκτης	89

4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (THERMAL ENERGY STORAGE)

Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας αποτελούν βασικό πλεονέκτημα και χαρακτηριστικό των Συγκεντρωτικών Ηλιοθερμικών Συστημάτων, που όμως χρησιμοποιούνται προαιρετικά. Όταν η θερμική ενέργεια που συγκεντρώνεται στον ηλιακό δέκτη, λόγω της υψηλής ηλιακής ενέργειας, υπερβαίνει την ενεργειακή απαίτηση του συστήματος για την λειτουργία σε συνθήκες πλήρους φορτίου, τότε αποθηκεύεται η περισσευούμενη θερμική ενέργεια. Έτσι σε συνθήκες που η άμεση ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι αρκετή, το σύστημα αποθήκευσης προσδίδει πίσω στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής προκειμένου να συνεχιστεί η λειτουργία του σταθμού. Ουσιαστικά λοιπόν, το σύστημα αποθήκευσης επιτρέπει στην εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής να προσαρμόζει την παροχή ρεύματος στις φάσεις ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος και όχι το αντίθετο.

Υπάρχουν δύο τρόποι με τους οποίους κατατάσσονται τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Ο ένας είναι με βάση το δοχείο ή το σχέδιο αποθήκευσης (storage concept) και ο δεύτερος με βάση το τύπο του υλικού αποθήκευσης, όπου στη συνέχεια με βάση το δοχείο έχουμε δύο κατηγορίες που διαχωρίζονται σε *ενεργητικά* ή *παθητικά*.

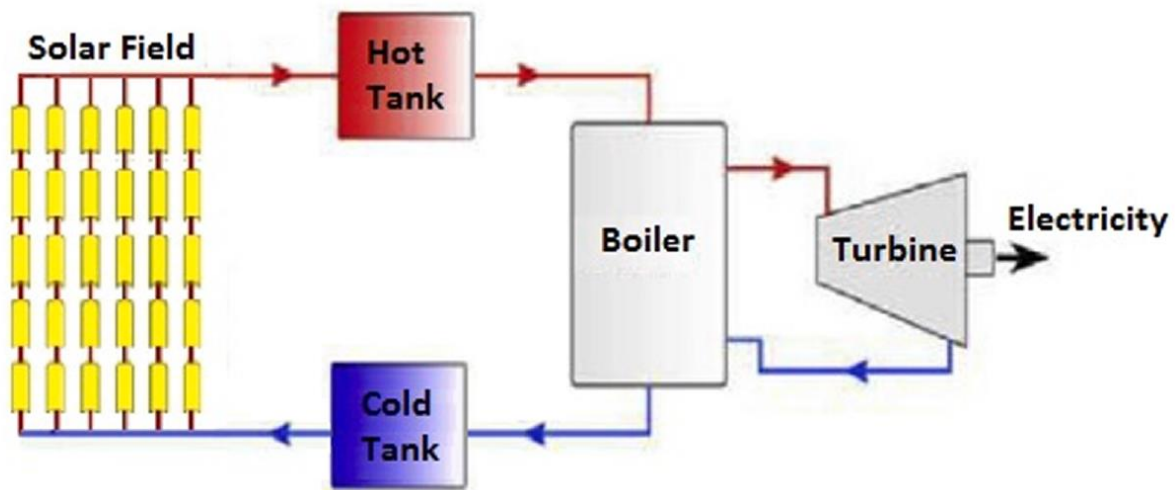
4.1 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΚΑΙ ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ



Σχήμ 3.5 : Ταξινόμηση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας [133]

Τα ενεργητικά συστήματα αποθήκευσης (ενός ή δύο δοχείων) μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω σε δύο ειδικότερες υποκατηγορίες, της άμεσης αποθήκευσης (*direct system*) ή της έμμεσης αποθήκευσης (*indirect system*).

4.1.1 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΑΜΕΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ(ACTIVE DIRECT TES SYSTEMS)



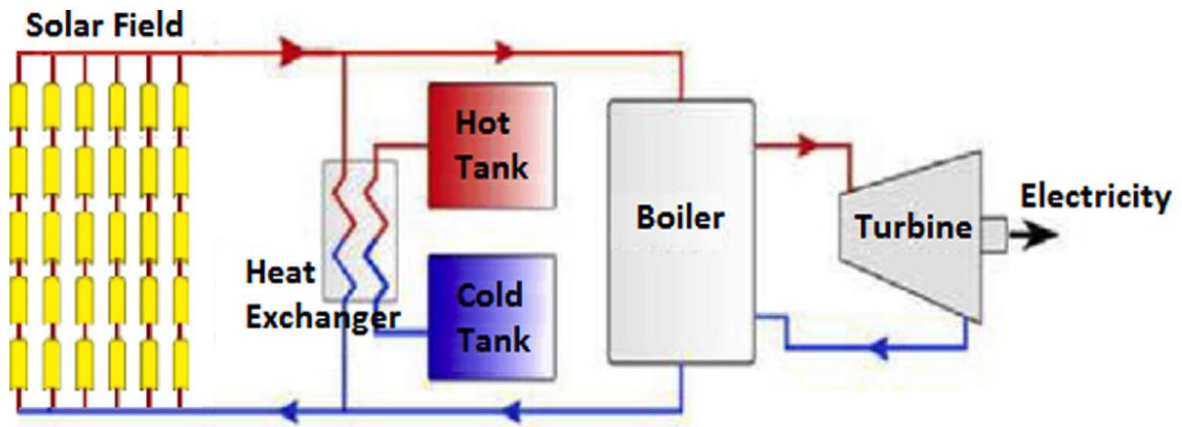
Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ΣΗΣ Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής με σύστημα άμεσης αποθήκευσης θερμικής ενέργειας δύο δοχείων (Dual-tank Direct TES).

Στα άμεσης αποθήκευσης θερμικής ενέργειας συστήματα δύο δοχείων (Dual-Tank direct TES System) μεταφέρεται το θερμό ρευστό που διακινεί την θερμότητα (Heat Thermal Fluid-HTF) άμεσα από το σύστημα στη θερμή δεξαμενή/δοχείο, με σκοπό να αξιοποιηθεί μετέπειτα της δύσης του ήλιου ή σε περίπτωση ανεπιθύμητων καιρικών συνθηκών. Το χαμηλής θερμοκρασίας ρευστό μεταφοράς θερμότητας που προέρχεται από το τμήμα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος αποθηκεύεται πρώτα στο ψυχρό δοχείο και έπειτα αντλείται και ξαναθερμαίνεται (βλ.Σχήμα 3.6) [134].

Στα άμεσα συστήματα αποθήκευσης επειδή χρησιμοποιείται το ίδιο μέσο για την μεταφορά της θερμότητας και την αποθήκευση εξαλείφεται η ανάγκη για οποιοδήποτε κοστοβόρο εναλλάκτη θερμότητας (όπως στα έμμεσης). Συγχρόνως, αποτελεί τεχνολογική πρόκληση το ίδιο ρευστό να μπορεί να συμβαδίσει με τις όλες τις απαιτήσεις του κυκλώματος-συστήματος. Όταν πρόκειται για υψηλότερες θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται συνήθως υγρά μέσα αποθήκευσης, όπως τα θερμικά λάδια (thermal oils) και τετηγμένα άλατα (molten salts).

Παρατηρείται συγκεκριμένα, σε μεγάλους σταθμούς τα τετηγμένα άλατα να αποτελούν την πιο πιθανή επιλογή επειδή είναι υγρά σε συνθήκες ατμοσφαιρική πίεση, έχουν χαμηλό κόστος σαν μέσα αποθήκευσης, ενώ οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι συμβατές με τη υψηλή πίεση και θερμοκρασία των σύγχρονων ατμοστρόβιλων. Το μειονέκτημα τους είναι ότι παγώνουν σε σχετικά υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας (120-220 °C), οπότε απαιτείται ειδική αντιψυκτική προστασία των σωληνώσεων κατά την διάρκεια της νύχτας αυξάνοντας τα κόστη συντήρησης [48]. Παράδειγμα εμπορικής χρήσης ενεργητικού σύστημα αποθήκευσης με δύο δοχεία και τετηγμένο άλας αποτελεί ο σταθμός Solar Two (1995, Έρημος Mojave), που χρησιμοποιεί συγκεκριμένα μίγμα συνδυασμού 60% νιτρικού νατρίου (NaNO_3) και 40% νιτρικού καλίου (KNO_3) [49].

4.1.2 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΑ ΕΜΜΕΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ACTIVE INDIRECT SYSTEMS)



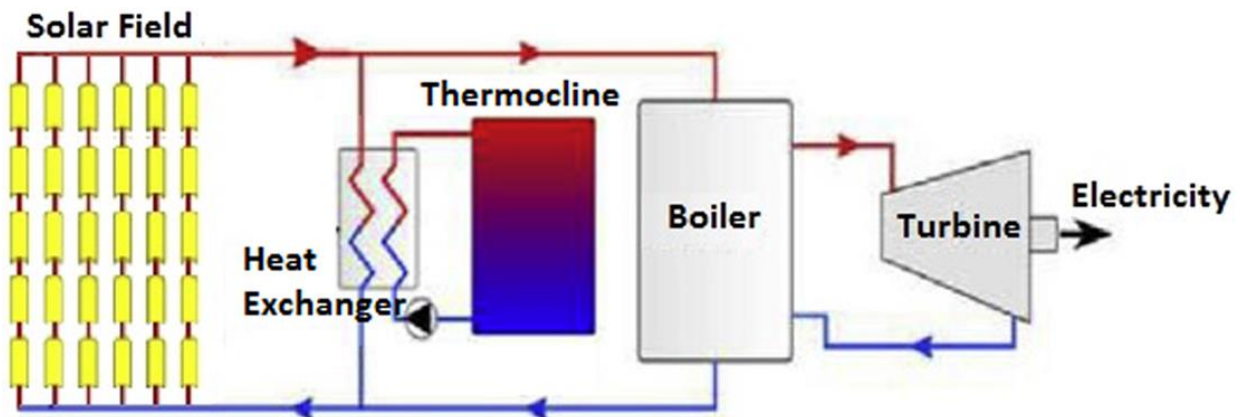
Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ΣΗΣ Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής με σύστημα έμμεσης αποθήκευσης θερμικής ενέργειας δύο δοχείων (Dual-tank Direct TES).

Στα ενεργητικά έμμεσης αποθήκευσης συστήματα δύο δοχείων, το ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF) δεν αποθηκεύει απευθείας τη θερμική ενέργεια, αλλά μεταφέρει έμμεσα τη θερμική του ενέργεια σε ένα άλλο ρευστό, το οποίο λειτουργεί ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας.

Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο ρευστό ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας (TES medium) είναι το τετηγμένο άλας, ενώ η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως σε σταθμούς παραβολικών κατόπτρων (PTC Plants) [134]. Η συγκεκριμένη διάταξη αποτελείται από δύο δοχεία, θεμέλια για τα δύο δοχεία, θερμική μόνωση, σωληνώσεις, αντλίες, ηλεκτρολογικό

εξοπλισμό και αντιψυκτικό έλεγχο. Κατά τη διάρκεια του κύκλου θερμικής φόρτισης, μέρος του ρευστού μεταφοράς θερμότητας από το ηλιακό πεδίο εισάγεται στη μονάδα του εναλλάκτη θερμότητας (βλ. Σχήμα 3.7). Συγχρόνως, το ρευστό μέσο αποθήκευσης θερμότητας μεταβαίνει από τη ψυχρή δεξαμενή στον εναλλάκτη θερμότητας. Το ρευστό μεταφοράς θερμότητας, αφού αποδίδει την θερμική ενέργειά του στο μέσο αποθήκευσης, μειώνει τη θερμοκρασία του ενώ αντίστροφα το ρευστό αποθήκευσης αυξάνει τη θερμοκρασία του. Το πλέον θερμό ρευστό μέσο αποθήκευσης μεταφέρεται στο θερμό δοχείο για αποθήκευση. Κατά τη φάση της θερμικής αποφόρτισης, το ρευστό από το θερμό δοχείο εισάγεται στον εναλλάκτη και μεταφέρει τη θερμική του ενέργεια στο ψυχρό, πλέον, ρευστό μεταφοράς θερμότητας, το οποίο εισχωρεί στον εναλλάκτη από την αντίθετη διαδρομή.

4.1.3 ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΜΜΕΣΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΟΝΟΥ ΔΟΧΕΙΟΥ-ΘΕΡΜΟΚΛΙΝΗΣ (SINGLE-TANK THERMOCLINE TES SYSTEM)

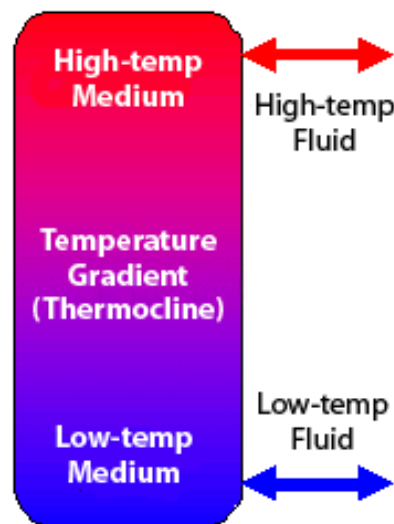


Σχήμα 3.8: Διάγραμμα ΣΗΣ Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής με σύστημα έμμεσης αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μονού δοχείου-θερμοκλίνης (single-tank thermocline TES system).

Στο ενεργητικό σύστημα έμμεσης αποθήκευσης ενέργειας μονού δοχείου-θερμοκλίνης, το ίδιο δοχείο περιέχει ταυτόχρονα και θερμά και ψυχρά ρευστά. Εντός του μονού δοχείου τα θερμά ρευστά διαχωρίζονται από τα ψυχρά μέσω των διαφορετικών θερμοκρασιακών στρωμάτων ή ζωνών. Αυτή η διαφορετική θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση δημιουργείται φυσικά λόγω των διαφορετικών πυκνοτήτων που έχει το θερμό ρευστό που βρίσκεται στα ανώτερα τμήματα του δοχείου από το ψυχρό που βρίσκεται στα κατώτερα (βλ. Σχήμα 3.9) και ονομάζεται *θερμοκλίνη* [134]. Τα ψυχρά και θερμά στρώματα ρευστού σαν σύνολο βρίσκονται σε ακινησία αλλά σε μια διαρκή εναλλαγή λειτουργίας μαζί με τη λειτουργία του θερμοηλιακού σταθμού. Κατά τη

διάρκεια του κύκλου φόρτισης (charging cycle), το θερμό ρευστό μεταφοράς θερμότητας (hot HTF), το οποίο έχει θερμανθεί στο ηλιακό πεδίο, εισάγεται στην κορυφή του δοχείου και η θερμοκλιτική-θερμοκρασιακή ζώνη μετακινείται προς τα κάτω. Κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης (discharging phase-cycle) το ψυχρό ρευστό εισάγεται στο κάτω μέρος του δοχείου, με αποτέλεσμα να ωθήσει το θερμό ρευστό μεταφοράς θερμότητας (παράλληλα είναι και ρευστό αποθήκευσης θερμότητας) προς τον κύκλο της παραγωγής ισχύος και η θερμοκρασιακή ζώνη ανεβαίνει πάλι προς τα πάνω.

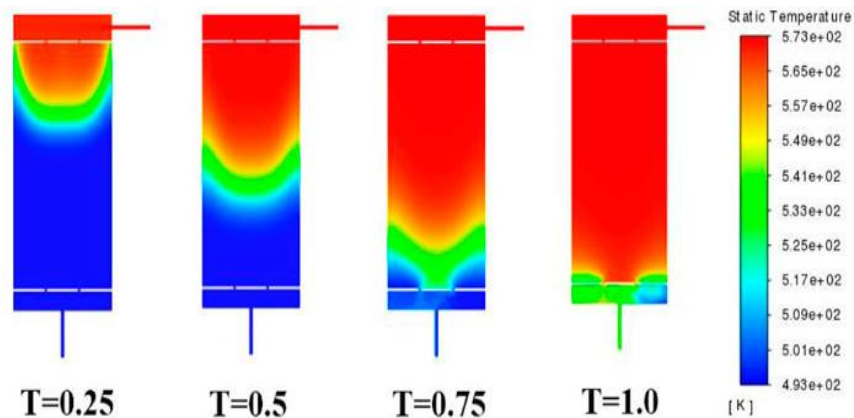
Η συγκεκριμένη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας είναι εξαιρετικά φθηνότερη (-35%) από την αντίστοιχη των δύο δοχείων, καθώς χρησιμοποιεί 70% λιγότερο ρευστό μεταφοράς θερμότητας καθώς χρησιμοποιεί φθηνά στερεά ή βιομηχανικά απόβλητα [137].



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα μονού δοχείου θερμοκλίνης αποθήκευσης ενέργειας [138].

Σε πραγματικές συνθήκες εφαρμογής της θερμοκλίνης, η απότομη εξάπλωση από την είσοδο στο κυρίως σώμα του δοχείου μπορεί να προκαλέσει μεγαλύτερη ταχύτητα ρευστού στη μεσαία και χαμηλή ταχύτητα στη περιφέρεια του δοχείου [139]. Η ανομοιομορφία στη ροή, οι τοπικές δίνες και επανακυκλοφορία προκαλούν την απότομη ανάμιξη θερμού και ψυχρού ρευστού και διαταράσσουν τη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση, με τελικό αποτέλεσμα τη μείωση της συνολικής απόδοσης αποθήκευσης του συστήματος [140]. Έτσι, σε επίπεδο μελέτης και κατασκευής, αποτελεί τεχνολογική πρόκληση η δυνατότητα ελέγχου της δυναμικής της εισαγωγής του ρευστού μεταφοράς θερμότητας κατά την αποφόρτιση και φόρτιση τέτοιου συστήματος. Κυρίως λοιπόν, οι μελέτες εστιάζουν στην προσπάθεια να δημιουργείται μια *ομοιόμορφη ταχύτητα* (uniform velocity) εισόδου ή ένα οριζόντιο μέτωπο ροής (horizontal flow front) όταν εισάγεται στο δοχείο (βλ. Σχήμα 3.10). Χρησιμοποιούνται για αυτό το λόγο συνήθως διανομείς ρευστών και στην είσοδο και στην έξοδο του δοχείου αντί για απλούς εγχυτήρες ή θύρες εκροής. Όμως πειράματα και μελέτες δείχνουν ότι παρόλες τις προσπάθειες ανάσχεσης

της μείωσης της απόδοσης αποθήκευσης και μεταφοράς θερμότητας, τα συστήματα θερμοκλίνης-μονού δοχείου καταφέρνουν να μεταφέρουν πίσω στο σύστημα παραγωγής ισχύος περίπου 64% της αποθηκευμένης θερμότητας, σε θερμοκρασίες άνω των 545°C, σε αντίθεση με τα συστήματα δύο δοχείων που μεταφέρουν σχεδόν το 100% [141].



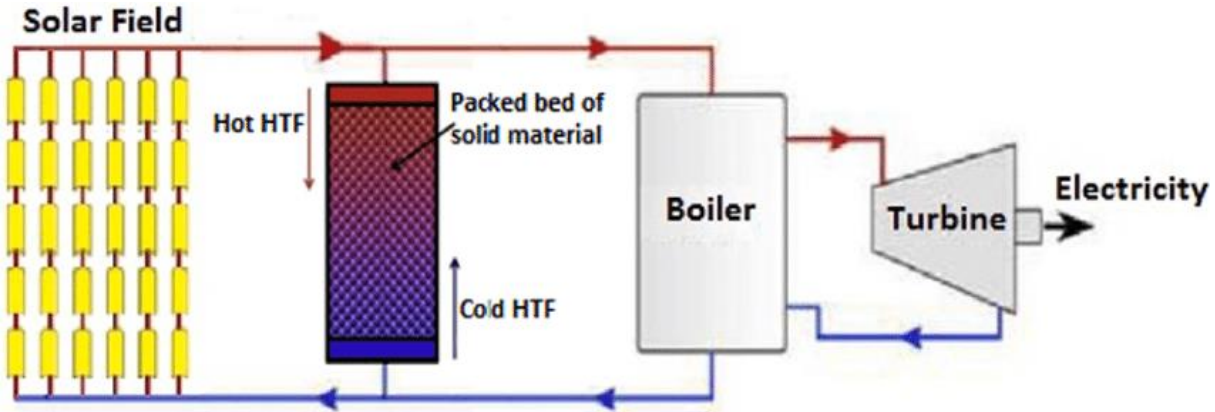
Σχήμα 3.10 : Σύγκριση της εξέλιξης του θερμοκρασιακού προφίλ εντός ενός δοχείου αποθήκευσης κατά τη διάρκεια φόρτισης, όταν χρησιμοποιείται διανομέας ρευστού (fluid distributor) [142].

4.1.4 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ PACKED BED(ΠΑΚΤΩΜΕΝΕΣ-ΣΚΕΠΑΣΜΕΝΕΣ ΚΛΙΝΕΣ)

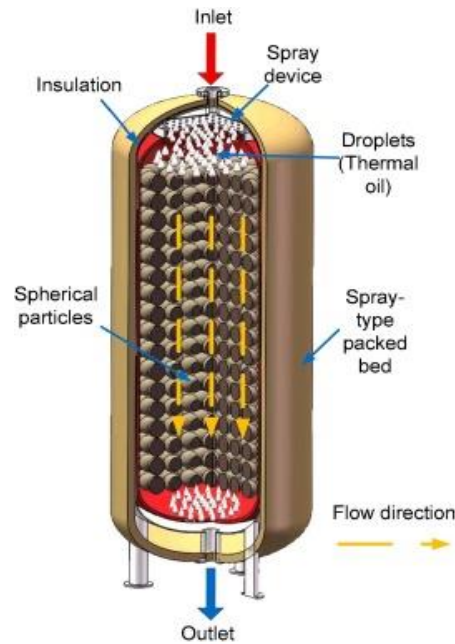
Γενικά, στα παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας το ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας διέρχεται μέσα από την εκάστοτε δεξαμενή αποθήκευσης φορτίζοντάς το, χωρίς το σύστημα αποθήκευσης να αναμειγνύεται σε επίπεδο χημικής σύστασης με το εργαζόμενο μέσο. Όπως είναι φυσικό τα παθητικά συστήματα αποτελούνται από στερεά υλικά.

Αυτά τα συστήματα αποθήκευσης αποτελούνται από μονωμένες δεξαμενές που περιέχουν ως μέσο αποθήκευσης διάφορα στερεά υλικά όπως άμμο, πέτρες, γύψο, χώμα, μικρά κομμάτια τσιμέντου, μεταλλικά κομμάτια, χαλίκι κ.ά [143]. Το σύστημα αποθήκευσης φορτίζεται και αποφορτίζεται ερχόμενο σε άμεση επαφή με το ρευστό μεταφοράς θερμότητας που κινείται στο υπόλοιπο σύστημα ισχύος. Συνεπώς δεν υπάρχει ανάγκη για το περιττό κόστος ενός εναλλάκτη θερμότητας. Όταν χρησιμοποιείται ρευστό μεταφοράς θερμότητας ένα υγρό (π.χ. θερμικό έλαιο, νερό), μέρος της συνολικής θερμικής ενέργειας αποθηκεύεται επίσης στο ρευστό και το συγκεκριμένο σύστημα αποθήκευσης ονομάζεται *διπλό σύστημα αποθήκευσης (dual storage system)* [134]. Όταν χρησιμοποιείται ένα αέριο ως μέσο μεταφοράς θερμότητας(π.χ. υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα, αέρας), τότε τα υλικά που περιέχονται

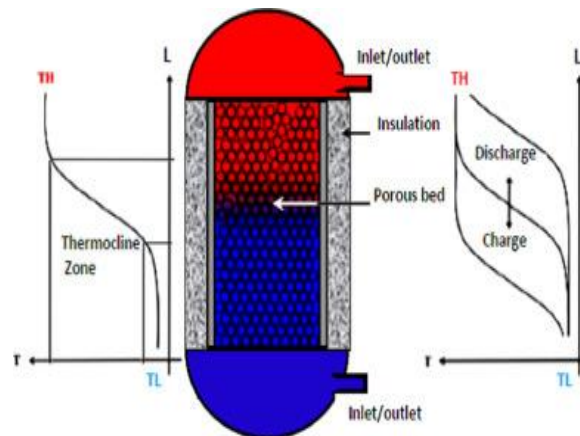
στο εσωτερικό της δεξαμενής-κλίνης είναι υπεύθυνα για την αποθήκευση του συνόλου της θερμικής ενέργειας (βλ. Σχήμα 3.11).



Γενικά, αυτά τα παθητικά συστήματα έχουν το πλεονέκτημα της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης κατά μήκος της διαδρομής φόρτισης/αποφόρτισης που διανύει το ρευστό μεταφοράς (βλ. Σχήμα 3.12). Όμως η θερμική σταθερότητα (thermal stability) των ουσιών που περιέχονται στη δεξαμενή περιορίζει το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας του συστήματος. Για παράδειγμα, τα συστήματα με υλικά όπως η άμμος και τα χαλίκια μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες 50°C-300°C [143].

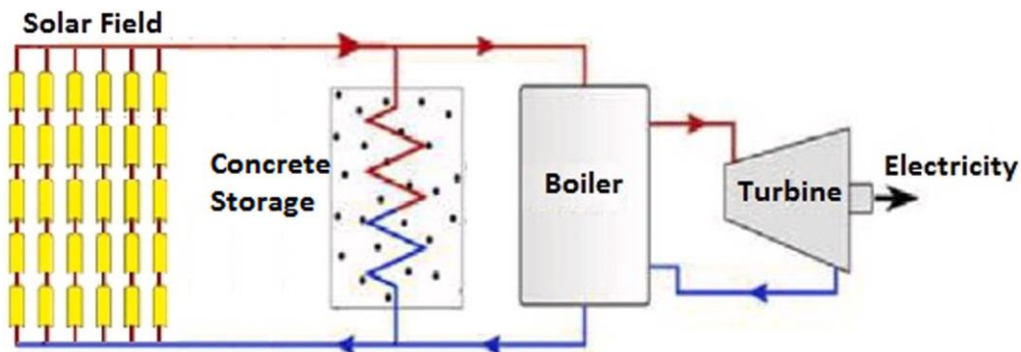


Σχήμα 3.11: Σχηματική αναπαράσταση παθητικού συστήματος με σφαιρικά σωματίδια packed bed [144].



Σχήμα 3.12: Σχηματική αναπαράσταση της θερμοκρασιακής διαστρωμάτωσης-θερμοκλίνης τύπου packed bed [145].

4.1.5 ΠΑΘΗΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΕΝΙΟΥ ΜΠΛΟΚ (CONCRETE BLOCKS BASED)



Σχήμα 3.13: Διάγραμμα ροής ενέργειας παθητικού συστήματος με σκυρόδεμα [47].

Η χρήση μεγάλου ενιαίου μπλοκ-κομματιού σκυροδέματος ως παθητικό σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον, καθώς οι μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος επιτρέπουν να τοποθετηθεί αυτόνομα χωρίς κάποια επιπλέον δεξαμενή, μειώνοντας το συνολικό κόστος. Εντός του σκυροδέματος είναι εγκατεστημένοι μεταλλικοί σωλήνες, που λειτουργούν ως εναλλάκτης θερμότητας, εντός των οποίων ρέει το ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας (HTF). Το ρευστό διαρρέοντας το εσωτερικό του σκυροδέματος, μεταφέρει θερμότητα στο σκυρόδεμα και το φορτίζει και το αποφορτίζει (βλ. Σχήμα 3.13).

Όμως αυτή η διαδικασία φόρτισης/αποφόρτισης έχει ως αρνητική παρενέργεια, την αλλαγή του όγκου των σωληνώσεων λόγω διαστολής και συστολής. Αυτή η αλλαγή στον όγκο έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα και σε περίπτωση σοβαρής διάβρωσης του, είναι αντικειμενικά δύσκολη η όποια αντικατάσταση των σωληνώσεων ή επιδιόρθωση των ρηγματώσεων.

Αντίθετα βέβαια, το σκυρόδεμα ως υλικό έχει εξαιρετικά πλεονεκτήματα καθώς είναι μη-ανάφλεκτο, μη-τοξικό, φθηνό, εύκολο στην κατασκευή και με ανώτερες μηχανικές ιδιότητες και αντοχές.

4.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΚΑΙ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Με βάση τον τύπο του υλικού θερμικής αποθήκευσης, τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES systems) διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες :

- Συστήματα αποθήκευσης αισθητής θερμότητας
- Συστήματα αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας

4.2.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΙΣΘΗΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (SENSIBLE HEAT STORAGE SYSTEMS)

Στα συγκεκριμένα συστήματα, το υλικό αποθήκευσης αποθηκεύει την θερμική ενέργεια στην ειδική θερμοχωρητικότητά του (C_p), η οποία το χαρακτηρίζει. Η θερμική ενέργεια η οποία αποθηκεύεται στη μορφή της αισθητής θερμότητας εκφράζεται ως:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4.1)$$

Όπου, m (kg) είναι η μάζα, C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) και ΔT είναι η διαφορά θερμοκρασίας κατά την διαδικασία της ενεργειακής φόρτισης. Κατά τη διάρκεια της απορρόφησης θερμικής ενέργειας, παρόλο που το υλικό εμφανίζει αύξηση της θερμοκρασίας του, δεν υπάρχει καμία αλλαγή φάσης. Αυτό παράλληλα σημαίνει ότι η ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται είναι ανάλογη της πυκνότητας, του όγκου, της ειδικής θερμότητας και της θερμοκρασίας του υλικού αποθήκευσης.

Τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι θερμικά σταθερά σε υψηλές θερμοκρασίες και ως εκ τούτου είναι τα πιο χρησιμοποιούμενα υλικά για θερμική αποθήκευση σε εγκαταστάσεις υψηλών θερμοκρασιών. Τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι συνήθως υλικά χαμηλού εμπορικού κόστους αγοράς, με εξαίρεση τα υγρά μέταλλα και τα θερμικά έλαια. Το κύριο μειονέκτημα των υλικών αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι η σταθερότητα της θερμοκρασίας κατά την εκφόρτιση. Καθώς η εκφόρτιση συνεχίζεται, η θερμοκρασία εξόδου του HTF αρχίζει σταδιακά να μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

Επίσης, σε σύγκριση με τη λανθάνουσα θερμότητα, η ειδική θερμοχωρητικότητα τέτοιων υλικών είναι 50-100 φορές μικρότερη και επομένως η πυκνότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας είναι μικρότερη. Ωστόσο, τα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας μπορούν ακόμη να διαθέτουν μεγάλη πυκνότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με το μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας και την υψηλή πυκνότητά τους ως υλικά.

Επικρατέστερα υλικά αποθήκευσης αισθητής θερμότητας είναι το νερό, τα θερμικά λάδια, τα τετηγμένα άλατα, τα υγρά μέταλλα, το τσιμέντο, η άμμος και οι πέτρες.

4.2.1.1 Νερό

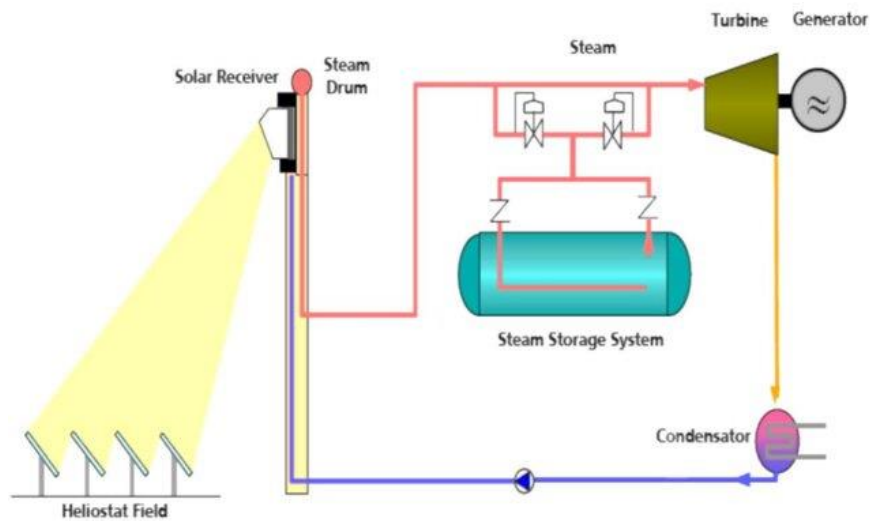
Τα κύρια πλεονεκτήματά χρήσης του νερού είναι η υψηλή ειδική θερμότητα ($4183 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), είναι μη τοξικό, φιλικό προς το περιβάλλον, φθινό, συνήθως εύκολα προσβάσιμο και απολύτως ακίνδυνο για τον άνθρωπο.

Βέβαια, μεγάλο πλεονέκτημα του νερού αποτελεί, στην περίπτωση γενικά των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και ως ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας (HTF) και ως υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES material) κυκλοφορώντας εύκολα εντός των σωληνώσεων των σταθμών. Χρησιμοποιώντας, ουσιαστικά άμεσης αποθήκευσης σύστημα μέσω του νερού, εξαλείφεται η ανάγκη για χρήση ενδιάμεσου και κοστοβόρου μέσου μεταφοράς θερμότητας. Στην περίπτωση των άμεσων ατμοπαραγωγών (Direct Steam Generation) λοιπόν, ο ατμός που παράγεται στο δέκτη κατευθύνεται άμεσα στη γεννήτρια ηλεκτροπαραγωγής χωρίς την ανάγκη οποιοσδήποτε εναλλάκτη ενδιάμεσα.

Στους DSG (Direct Steam Generation) σταθμούς η μόνη εμπορική λύση είναι οι *συσσωρευτές ατμού*. Ο συσσωρευτής ατμού είναι ενεργητικό σύστημα άμεσης αποθήκευσης, όπου ο ατμός απευθείας αποθηκεύεται σε υψηλή πίεση σε υψηλή πίεση εντός δεξαμενών συσσώρευσης (βλ. Σχήμα 3.14). Οι ατμοσυσσωρευτές χρησιμοποιούν αποθήκευση αισθητής θερμότητας στη μορφή πεπιεσμένου κορεσμένου υγρού νερού, όπου η υγρή και η αέρια φάση βρίσκονται σε θερμοδυναμική ισορροπία [146]. Εκμεταλλεύονται την υψηλή ογκομετρική χωρητικότητα αποθήκευσης του υγρού νερού για αισθητή θερμότητα, που οφείλεται στην υψηλή ειδική θερμοχωρητικότητα [147]. Η ειδική ενεργειακή πυκνότητα του νερού/ατμού εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία που ποικίλλει ανάλογα τη πτώση πίεσης κατά τη φάση αποφόρτισης του συστήματος, με χαρακτηριστικές τιμές τελικά $20\text{-}30 \text{ kWh/m}^3$. Οι δύο πρώτοι σταθμοί που χρησιμοποίησαν ατμοσυσσωρευτή ως αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι οι σταθμοί PS10 και PS20 στην Ισπανία, ανοίγοντας το δρόμο για τη χρήση της τεχνολογίας της άμεσης ατμοπαραγωγής.



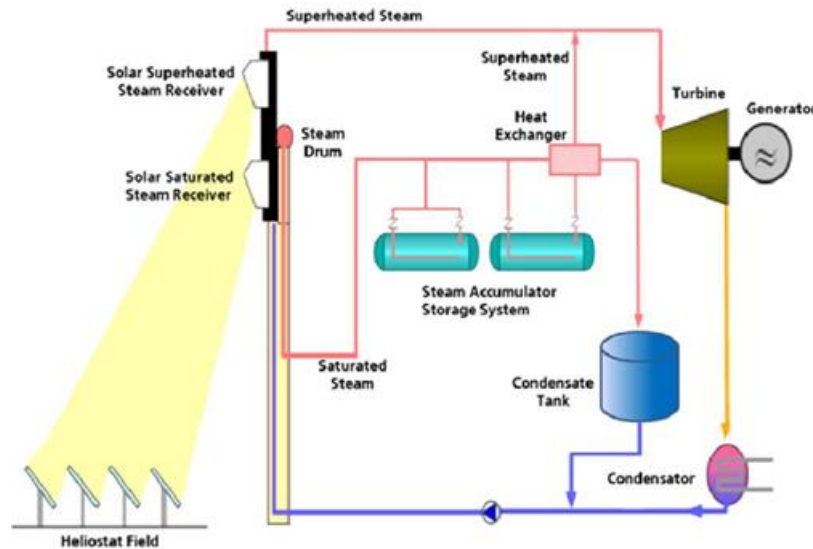
Εικόνα 5: Συσσωρευτές ατμού του σταθμού PS10 στη νότια Ισπανία, της εταιρείας Abengoa [148].



Σχήμα 3.15: Σχηματικό διάγραμμα ροής συστήματος σταθμού PS10[149]

Η επόμενη γενιά ηλιοθερμικών πύργων άμεσης ατμοπαραγωγής (δηλ. χρήση νερού/ατμού άμεσα) χρησιμοποιεί την τεχνολογία της *υπερθέρμανσης του ατμού*. Στη συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται ένας είδος δεύτερου δέκτη, του οποίου η λειτουργία είναι να αναθερμάνει τον ατμό που παράγεται από τον πρώτο δέκτη, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται υψηλότερες θερμοκρασίες (βλ.Σχήμα 3.16). Έτσι, αυξάνεται η απόδοση του κύκλου ισχύος

μέχρι 30%, σε σύγκριση με την προηγούμενη τεχνολογία του PS20, φτάνοντας τη θερμοκρασία έως 540° C και την πίεση των 130 bar [146].



Σχήμα 3.16: Σχηματικό διάγραμμα του σταθμού Khī Solar One 50 MW που χρησιμοποιεί ατμοσυσσωρευτές (Steam Accumulators) στο σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES system) [150].

4.2.1.2 Θερμικά Λάδια

Τα *θερμικά λάδια/έλαια* ή *διαθερμικά λάδια* είναι οργανικά υγρά με καλή ικανότητα μεταφοράς θερμότητας. Με τα σημερινά χρησιμοποιούμενα να είναι Diphenyl oxide/biphenyl. Τα θερμικά έλαια συνήθως είναι άχρωμα καθαρά υγρά. Λόγω του χαμηλού κινηματικού ιξώδους τους και των καλών ιδιοτήτων ροής, μπορούν να κυκλοφορήσουν εύκολα σε ένα σύστημα. Έτσι χρησιμοποιούνται και ως ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας (HTF) και ως υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES material). Το πλεονέκτημά τους έναντι του νερού/ατμού είναι, ότι παραμένουν σε υγρή κατάσταση σε θερμοκρασίες έως 250 °C σε ατμοσφαιρική πίεση. Τα θερμικά λάδια είναι λειτουργικά σε εύρος θερμοκρασίας 12°C -400°C , το οποίο συνεπάγεται μεγαλύτερο αύξηση (ΔT) της θερμοκρασίας κατά τη φάση φόρτισης και αναλογικά περισσότερη αποθηκευμένη θερμότητα (Q) (βλ. Εξίσωση 4.1).

Σε σύγκριση με το νερό, τα θερμικά έλαια έχουν χαμηλή πίεση εξάτμισης. Για παράδειγμα , το πιο ευρέως διαδεδομένο θερμό έλαιο, το DOWTHERM, σε θερμοκρασία 374°C έχει πίεση εξάτμισης 7,6 bar ενώ το νερό 221 bar. Καταλαβαίνει κανείς λοιπόν, ότι χαμηλή πίεση στη δεξαμενή και στα τοιχώματα των σωληνώσεων σημαίνει μικρότερες απαιτήσεις σε πάχος και κόστος των δεξαμενών και των σωληνώσεων. Βέβαια τα θερμικά έλαια υστερούν σε ότι αφορά

την θερμική αγωγιμότητα, π.χ. το Therminol-VP έχει τιμές θερμοπερατότητας 1000-3500 W/(m²K) [152].

Επίσης τα θερμικά λάδια έχουν ένα βασικό πλεονέκτημα έναντι των τετηγμένων αλάτων, ότι δεν παγώνουν στις σωληνώσεις καθώς το σημείο τήξης τους είναι στους 12°C, με αποτέλεσμα να μην απαιτείται αντιψυκτικός μηχανισμός [148].

Πρόβλημα αποτελεί για τα θερμικά λάδια η χαμηλή ειδική θερμοχωρητικότητα, περίπου 2Kj/kgK, και το γεγονός ότι είναι ακριβά στο εμπόριο (βλ. Πίνακα). Επίσης, σε υψηλές θερμοκρασίες άνω των ορίων λειτουργίας, τα θερμικά λάδια υποβαθμίζονται λόγω οξείδωσης που παράγει οξέα, τα οποία επιταχύνουν τη διάβρωση των σωληνώσεων και των δεξαμενών. Τα θερμικά λάδια ακόμα υποβαθμίζονται μακροπρόθεσμα αν λειτουργούν σε πολλούς επαναλαμβανόμενους κύκλους και εκτίθενται για πολλές ώρες σε υψηλές θερμοκρασίες.

Εμπορική ονομασία λαδιού	Therminol® VPe1	Xceltherm 600	Syltherm XLT	Dowtherm® A	Vegetable oil
Κατασκευαστής	Eastman chemical company	Radco industries	Dow chemical company	Dow chemical company	-
Συστατικό	Διφαινυλαιθέρας/Οξείδιο του διφαινυλίου	Παραφινικό ορυκτέλαιο	Πολυδιμεθυλοσλοξάνιο/διμεθικόνη (PDMS)	Διφαινυλαιθέρας/Οξείδιο του διφαινυλίου	Τριγλυκερίδια/Ελεύθερα λιπαρά οξέα
Μέγιστη μέση (bulk) Θερμοκρασία (°C)	400	316	260	400	-
Σημείο τήξης (°C)	12	-	-111	12	-
Ατμοσφαιρικό σημείο βρασμού (C)	257	301	200	257	295
Κινηματικό ιξώδες (mm ² s ⁻¹) σε 20 C	2.48	15.5	1.1	2.56	30
Πυκνότητα (kg m ⁻³) σε 40 C	1068	841	834	1043	926
Πυκνότητα (kg m ⁻³) σε 210 °C	904	736	660	897	802
Θερμική αγωγιμότητα (W m ⁻¹ K ⁻¹) σε 210 °C	0.11	0.12	0.06	0.1083	0.11
Ειδική θερμοχωρητικότητα (kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹) 210 °C	2.075	2.643	2.171	1.63	2.509
Θερμοχωρητικότητα (kJ m ⁻³ °C ⁻¹) σε 210 °C	1876	1945	1433	1462	2012
Κόστος (€/t)	25,000	-	29,400	-	835
Ενεργειακό κόστος ανά θερμοκρασιακή διαφορά ΔT=100 °C (€/kWh)	464	-	573	-	12

4.2.1.3 Τετηγμένα άλατα (molten salts)

Τα τετηγμένα άλατα (molten salts) είναι τα κατ' εξοχήν ρευστά μέσα μεταφοράς θερμότητας και μέσα αποθήκευσης θερμότητας, όταν στο ηλιοθερμικό σύστημα η θερμοκρασία ξεπερνάει το όριο των θερμικών λαδιών, δηλαδή τους 400°C. Κυρίως στους σταθμούς τύπου ηλιοθερμικού πύργου και παραβολικού-δίσκου συλλέκτη η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 400°C, οπότε τα τετηγμένα άλατα είναι πλέον η πιο καθιερωμένη επιλογή ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας. Έχουν υψηλή θερμοχωρητικότητα, υψηλό σημείο βρασμού και πολύ υψηλή θερμική σταθερότητα. Η τάση ατμών τους είναι σχεδόν μηδενική και αμελητέα. Το υψηλότερο σημείο βρασμού και η θερμική σταθερότητα σημαίνει ότι μπορούν να διατηρήσουν πολύ υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, γεγονός που βελτιώνει τη θερμικό βαθμό απόδοσης του κύκλου Rankine όλου του συστήματος. Συνεπώς, έχουμε υψηλότερη θερμοκρασιακή διαφορά ΔT (στην εξίσωση (4.1)) και μεγαλύτερη αποθήκευση θερμότητας. Σήμερα, το υψηλότερο θερμοκρασιακό όριο λειτουργίας για τα λιωμένα άλατα είναι γύρω στους 565 °C [153]. Συγχρόνως, είναι σχετικά φθηνά, εύκολα διαθέσιμα, μη τοξικά και μη εύφλεκτα.

Βέβαια, υπάρχουν ορισμένες τεχνικές προκλήσεις που απαιτούνται να υπερκεραστούν.

Τα τετηγμένα άλατα έχουν υψηλό σημείο τήξης (>200 °C) με αποτέλεσμα να παγώνουν στους αγωγούς, όταν δεν υπάρχει αρκετή θερμότητα από την ηλιακή ενέργεια (π.χ τη νύχτα). Καθώς, τα ευτηκτικά μείγματα δύο ή περισσότερων αλάτων βοηθούν στη μείωση του σημείου τήξης, διατηρώντας παράλληλα ένα πολύ υψηλό σημείο βρασμού, συνήθως επιλέγονται για αποθήκευση αισθητής θερμοκρασίας (latent heat storage) σε μορφή τετηγμένου άλατος.

Άλας/ευτηκτικό	HITEC, NaNO ₃ eKNO ₃ e NaNO ₂ (7-53-40)	HITEC XL, NaNO ₃ .KNO ₃ .Ca(NO ₃) ₂ (7-45-48)	Ηλιακό άλας, NaNO ₃ .KNO ₃ (50-50)	LiNO ₃
Σημείο τήξης (°C)	142	120	220	250
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	535	500	600	600
Ειδική θερμότητα (kJ/kg ⁻¹ °C ⁻¹)	1.561	1.447	1.5	-
Πυκνότητα σε υγρή φάση (kg m ⁻³)	1640	1992	1899	2380

Θερμική αγωγιμότητα($W m^{-1} K^{-1}$)	0.6	0.519	0.55	-
Αισθητή θερμοχωρητικότητα($kJ kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$) 210 $^\circ C$	2.56	2.9	2.8	-
Κόστος (\$/kg)	-	1.19	-	-

Το τριμερές μείγμα αλάτων HITEC (53% KNO_3 , 7% $NaNO_3$ και 40% $NaNO_2$) με σημείο τήξης κοντά στους 142 $^\circ C$ είναι σήμερα πολύ διαδεδομένο στη χρήση του σε συγκεντρωτικά ηλιοθερμικά συστήματα [154]. Το καθαρό KNO_3 έχει σημείο τήξης 334 $^\circ C$ και το καθαρό $NaNO_3$ έχει σημείο τήξης 307 $^\circ C$. Το δυαδικό μείγμα τους, που ονομάζεται *ηλιακό άλας (Solar Salt)* (60% $NaNO_3$ και 40% KNO_3), έχει σημείο τήξης 220 $^\circ C$ (βλ. Πίνακα 4.2). Το μείγμα αυτό αλάτων έχει υψηλό ιξώδες σε σύγκριση με τα θερμικά έλαια και το νερό. Ως εκ τούτου, έχουν κακές ιδιότητες ροής, οι οποίες αυξάνουν το κόστος άντλησης. Τα τετηγμένα άλατα έχουν μέτρια χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας, καθώς η θερμική αγωγιμότητα είναι χαμηλή (περίπου 0,5 W/mK) και ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας τους που κυμαίνεται μεταξύ 3600 $Wm^{-2}K^{-1}$ - 6700 $Wm^{-2}K^{-1}$ για το ηλιακό άλας και για το HITEC μεταξύ 1500 $Wm^{-2}K^{-1}$ - 4000 $Wm^{-2}K^{-1}$ [152].

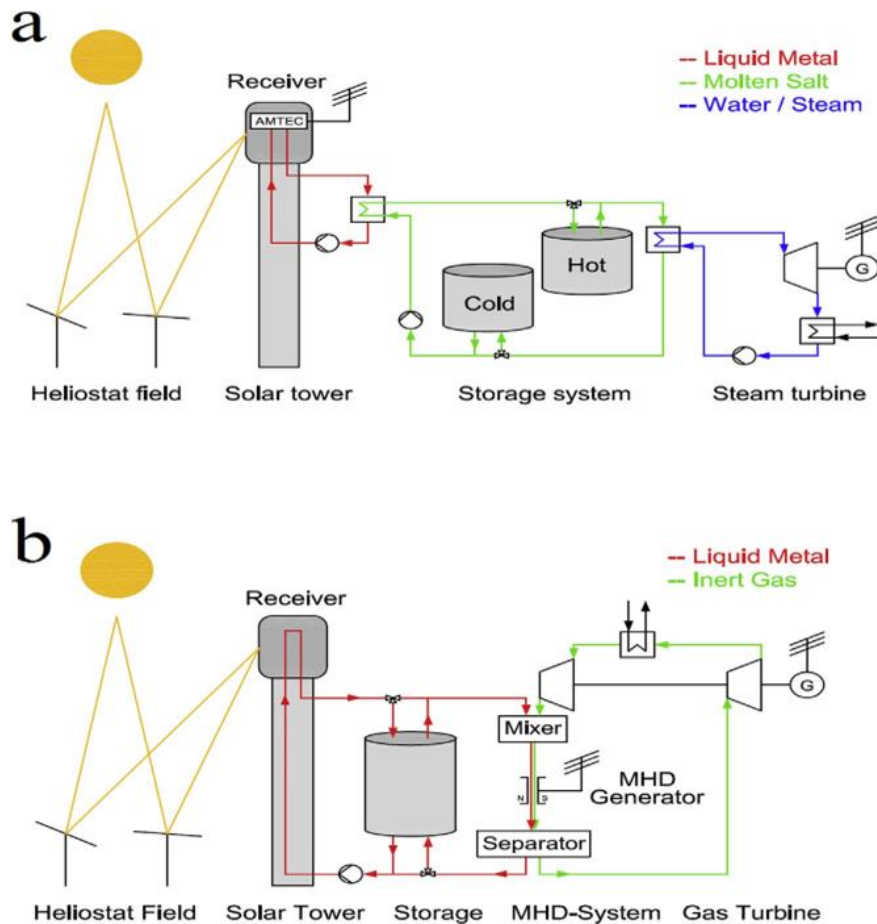
Επιπλέον, η θερμοβαθμίδα στους σωλήνες ανταλλαγής θερμότητας είναι υψηλή και θα προκαλέσει θερμά σημεία θερμότητας (hot spots) στα τοιχώματα των σωλήνων. Συγκεκριμένη μελέτη για τους δέκτες ηλιοθερμικών πύργων διαπίστωσε ότι η μέγιστη θερμοκρασία στο εξωτερικό τοίχωμα του σωλήνα κυμαίνεται μεταξύ 580 $^\circ C$ - 675 $^\circ C$, την ίδια ώρα που η θερμοκρασία του τετηγμένου άλατος που ρέει αυξήθηκε από 290 $^\circ C$ στην είσοδο σε 565 $^\circ C$ στην έξοδο. Τελικά, θερμοβαθμίδες στα τοιχώματα του σωλήνα του δέκτη προκαλούν πλαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες είναι συσσωρευτικές, με αποτέλεσμα οι σωλήνες να αστοχήσουν/τρυπήσουν λόγω κόπωσης χαμηλού κύκλου (low cycle fatigue) [143],[155].

4.2.1.4 Υγρά μέταλλα

Ορισμένα μέταλλα, τα οποία φέρουν ως χαρακτηριστικά σημεία τήξης χαμηλές θερμοκρασίες κοντά στην ατμοσφαιρική θερμοκρασία και συγχρόνως υψηλά σημεία βρασμού, είναι κατάλληλα για χρήση ως ρευστά μέσα μεταφοράς θερμότητας (HTF) σε ηλιοθερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Έτσι, μπορούν να μην αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της τήξης σε χαμηλές θερμοκρασίες (όταν κρυώνει το ηλιοθερμικό σύστημα) και να έχουν μηδενική τάση ατμών (vapor pressure) σε υψηλές θερμοκρασίες. Φυσικά, με τη λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες επιτυγχάνεται μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιακής διαφοράς ΔT (βλ. Εξίσωση 4.1), συνεπώς μεγαλύτερη αποθήκευση αισθητής θερμότητας Q και φυσικά επιτυγχάνεται συνολικά στο σύστημα υψηλότερος βαθμός απόδοσης του θερμικού κύκλου μέχρι και 50%.

Συγχρόνως, τα τοιχώματα των σωληνώσεων του ηλιακού δέκτη εμφανίζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες και αντίστοιχα χαμηλότερες θερμοβαθμίδες και απώλειες θερμικές απώλειες προς το περιβάλλον [143].

Όμως, τα υγρά μέταλλα, σε επίπεδο εμπορικού κόστους, είναι πολύ ακριβά και με διαβρωτικές τάσεις. Ορισμένα από αυτά μάλιστα (π.χ. Νάτριο) είναι εύφλεκτα και τοξικά (βλ. Πίνακα 4.3).



: Συγκεντρωτικός ηλιοθερμικός σταθμός με χρήση υγρού μετάλλου : a) Ως δέκτη με άλας ως μέσο αποθήκευσης θερμότητας & b) Ως μέσο άμεσης αποθήκευσης θερμότητας σύστημα (direct TES system) [157].

Μέταλλο	Νάτριο (Na)	Νάτριο (22.2%)-Κάλιο (77.8%) ευτηκτικό (NaK)	Μόλυβδος(44.5%)-βισμούθιο(55.5%) ευτηκτικό (LBE)
---------	-------------	--	--

Σημείο τήξης (°C)	98	-12,6	125
Σημείο βρασμού (°C)	883	785	1533
Ειδική θερμότητα (kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	1,3	0,89	0,14
Πυκνότητα (kg·m ⁻³)	1042	780	10300
Θερμική αγωγιμότητα (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	64,9	26,3	14,9
Αισθητή θερμοχωρητικότητα (mJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	1,354	0,694	1,44
Κόστος (\$/kg)	2	2	13

4.2.1.5 Άμμος, πέτρα κ.ά. φυσικά γαιώδη υλικά

Υλικά, που φυσικά βρίσκονται διαθέσιμα στην επιφάνεια της γης, όπως άμμος, πέτρες, χαλίκι κ.ά. χρησιμοποιούνται ως μέσο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας (sensible heat storage). Είναι τα πλέον κατάλληλα υλικά για πλήρωση δεξαμενής συστημάτων μονού δοχείου-θερμοκλίνης, όπου διατάσσονται σε δομή πακτωμένης κλίνης (packed bed). Όπως γνωρίζουμε (βλ. Κεφάλαιο 4.1), το ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας ρέει διαμέσου της πακτωμένης κλίνης και μεταφέρει θερμική ενέργεια με άμεση επαφή. Οι πέτρες διαφόρων σχημάτων (π.χ. πέμπλες, βράχοι, χαλίκια) χρησιμοποιούνται ως υλικό πλήρωσης σε δομή πακτωμένης κλίνης ενώ τα μικρότερου διαμετρήματος αμμώδη υλικά, 0,074mm-4,5mm, σε υγροποιημένες κλίνες (fluidized bed).

Πρωταρχικό πλεονέκτημα των γαιωδών υλικών είναι η διαθεσιμότητά τους, άρα και το χαμηλό κόστος τους. Είναι επίσης μη τοξικά και μη εύφλεκτα. Φυσικά, η χρήση τους ως μέσο άμεσης αποθήκευσης θερμότητας απαλλάσσει την εγκατάσταση από κοστοβόρους εναλλάκτες θερμότητας. Τα πιο διαδεδομένα ρευστά μέσα μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται για άμεση επαφή με τα γαιώδη υλικά είναι τα θερμικά λάδια σε μεγάλα συγκεντρωτικά ηλιοθερμικά συστήματα, με αποτέλεσμα να απαιτείται ακόμα και 80% λιγότερο ρευστό για τον κύκλο φόρτισης του δοχείου [69].

Σε ότι αφορά συγκεκριμένα υλικά, οι μελέτες καταδεικνύουν ότι όλοι οι τύποι πετρών έχουν παρόμοια θερμικά χαρακτηριστικά και είναι κατάλληλοι ως υλικά πλήρωσης για θερμοκρασίες έως 350°C. Η καλύτερη θεωρείται ο χαλαζίτης με θερμική αγωγιμότητα υψηλή, 7 (W/mK), και θερμοχωρητικότητα 3822 kJ/m³K [56].

Η άμμος κυρίως αποτελείται από χαλαζία με υψηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο (SiO₂), άνω του 90%. Η άμμος λοιπόν, και άλλα μικροσωματίδια όπως οξειδίο του αργιλίου (Al₂O₃), καρβίδιο του πυριτίου (SiC), στεγνή σκόνη τσιμέντου και άνθρακας χρησιμοποιούνται και ως μέσο αποθήκευσης αισθητής θερμότητας (sensible heat storage) και ως ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας (HTF). Αυτά τα συστήματα στερεών σωματιδίων είναι θερμικά σταθερά ακόμα και

σε θερμοκρασίες άνω των 1100°C . Καθώς, μπορούν να αποθηκεύσουν θερμική ενέργεια σε μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασίας , τα στερεά αυτά επιτρέπουν τη χρήση του κύκλου Brayton για βελτιωμένη αποδοτικότητα στη μετατροπή θερμότητας σε ωφέλιμη ενέργεια.

Πέτρα	Γρανίτης	Χαλαζίτης	Μάρμαρο	Βασάλτης	Κερατίτης
Είδος	Εκρηξιγενές	Μεταμορφωσιγενές	Μεταμορφωσιγενές	Εκρηξιγενές	Μεταμορφωσιγενές
Πορώδες (%)	1,02-2,87	0,22-22,1	0,40-0,65	0,65-0,81	0,8-2,3
Πυκνότητα (kg/m ³)	2530-2620	2210-2770	2510-2860	2610-2670	2400-2800
Μονοαξονική θλιπτική αντοχή (MPa)	100-300	100-350	150-300	50-200	100-200
Ειδική θερμότητα (kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹) στους 20 C	0.6-1.2	0.8-0.9	0,7-1	1,47	0,7-0,9
Θερμική αγωγιμότητα (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	2,8	2	7,7	3,2	1,5
Χωρητικότητα αισθητής θερμότητας (kJ·m ⁻³ ·°C ⁻¹)	1440-2880	1750-2500	3822	1680-2520	2560-2880
Σκληρότητα	Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Χαμηλή-Μέση	Μέση-Υψηλή	Μέση
Βασικά συστατικά	SiO ₂ (69%) Al ₂ O ₃ (14%)	SiO ₂ (94%)	CaO(54%)	SiO ₂ (47%) Al ₂ O ₃ (17%) Fe ₂ O ₃ (10%) CaO(13%)	SiO ₂ (63%) Al ₂ O ₃ (21%)

4.2.1.6 Μπλοκ από σκυρόδεμα (Concrete blocks)

Όπως αναφέρθηκε (βλ. Κεφάλαιο 4.1.5.), ένα μεγάλο ενιαίο μπλοκ-κομμάτι σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παθητικό σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με τη μορφή αισθητής θερμότητας. Καθώς οι μηχανικές αντοχές του τσιμέντου επιτρέπουν να τοποθετηθεί αυτόνομα χωρίς κάποια επιπλέον δεξαμενή που να το περικλείει, μειώνοντας το συνολικό κόστος. Επίσης, έχει ευκολία στην κατασκευή, είναι μη τοξικό και μη εύφλεκτο.

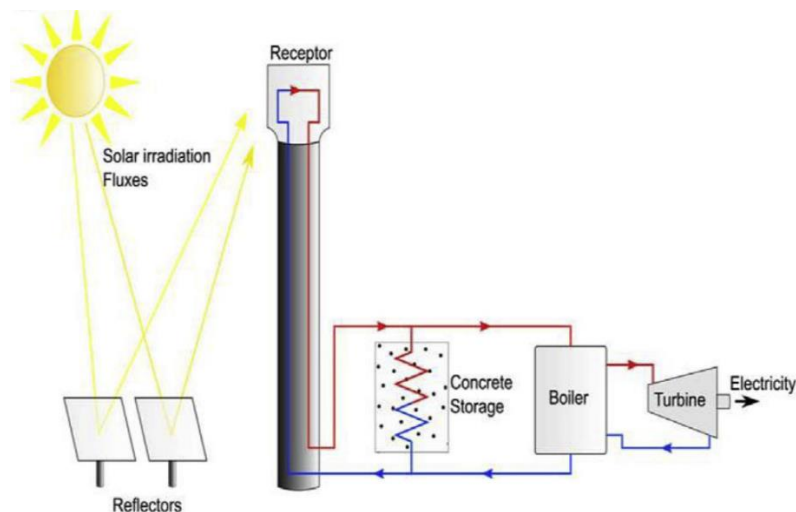
Το σκυρόδεμα είναι ένα μίγμα τσιμέντου, χαλικιού και άμμου. Τα χαλίκια έχουν τη μεταλλική σύσταση του τύπου της πέτρας. Η άμμος είναι κυρίως μέταλλευμα χαλαζία, το οποίο είναι κατά 90% διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂). Το τσιμέντο είναι αυτό που δρα ως συγκολλητική ουσία.

Το ρευστό διαρρέοντας το εσωτερικό του τσιμέντου, μεταφέρει θερμότητα στο τσιμέντο και το φορτίζει και το αποφορτίζει (βλ. Σχήμα 4.16).

Το πιο διαδεδομένο είδος τσιμέντου, το *Portland*, έχει ως κύρια συστατικά και κατά περιεκτικότητα του οξείδιο του ασβεστίου (CaO) 69%, οξείδιο του πυριτίου 19% (SiO₂), οξείδιο του αργιλίου (Al₂O₃) 6%, τριοξείδιο του θείου (SO₃) 1.5-4.5% κ.ά. Κατά τη διάρκεια της φάσης σκλήρυνσης το τσιμέντο υπόκειται σε ενυδάτωση. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σκλήρυνσης το τσιμέντο ενυδατώνεται και σχηματίζει φάσεις τσιμέντου όπως ένυδρο πυριτικό

ασβέστιο (CeSeH), ένυδρο πυριτικό ασβέστιο αλουμίνας (C-A-S-H), πορτλαντίτη ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) κ.λ.π. Κατά τη διάρκεια της απορρόφησης θερμότητας καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, πολλές αλλαγές όπως αφυδάτωση ($105\text{ }^\circ\text{C}$ - $440\text{ }^\circ\text{C}$, φάση CeSeH), αφυδροξυλίωση ($440\text{ }^\circ\text{C}$ - $580\text{ }^\circ\text{C}$, φάση του πορτλαντίτη), αποανθρακοποίηση ($560\text{ }^\circ\text{C}$ - $1000\text{ }^\circ\text{C}$), αλλαγές φάσεων (π.χ.: χαλαζία) κ.λ.π. συμβαίνουν μέσα στο σκυρόδεμα [183]. Οι αλλαγές αυτές έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό υπολειμμάτων CaO , τα οποία μπορούν εύκολα να επανενυδατωθούν και πάλι κατά τη διαδικασία ψύξης απορροφώντας υγρασία από την ατμόσφαιρα με επακόλουθο τη διόγκωση της σκληρής πάστας, η οποία προκαλεί ρωγμές λόγω μικρών μεταβολών του όγκου και επαναλαμβανόμενων θερμικών κύκλων. Το σκυρόδεμα έχει ειδική θερμότητα κοντά στα $0,7\text{ kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ και θερμική αγωγιμότητα κοντά στα $0,5\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Όμως αυτή η διαδικασία φόρτισης/αποφόρτισης έχει ως αρνητική παρενέργεια, την αλλαγή του όγκου των σωληνώσεων λόγω διαστολής και συστολής. Αυτή η αλλαγή στον όγκο έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ρηγματώσεις στο σκυρόδεμα και σε περίπτωση σοβαρής διάβρωσης του, είναι αντικειμενικά δύσκολη η όποια αντικατάσταση των σωληνώσεων ή επιδιόρθωση των ρηγματώσεων.

Αντίθετα βέβαια, το τσιμέντο ως υλικό έχει εξαιρετικά πλεονεκτήματα καθώς είναι μη-εύφλεκτο, μη-τοξικό, φθηνό, εύκολο στην κατασκευή και με ανώτερες μηχανικές ιδιότητες και αντοχές. Μπλοκ σκυροδέματος από συνηθισμένο τσιμέντο Πόρτλαντ έχουν δοκιμαστεί για αποθήκευση θερμικής ενέργειας γενικά μέσης θερμοκρασίας με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας γύρω στους $400\text{ }^\circ\text{C}$.



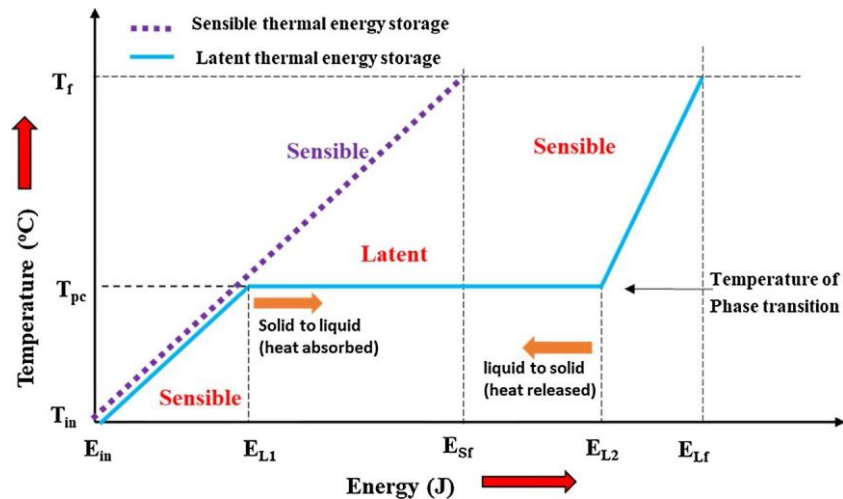
Σχήμα 4.16: Συγκεντρωτικός Θερμοηλιακός Σταθμός με σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας τσιμεντένιου μπλοκ [158].

4.2.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (LATENT HEAT STORAGE SYSTEMS)

Αυτά τα υλικά αποθήκευσης αποθηκεύουν θερμότητα στη λανθάνουσα θερμότητά τους κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας σταθερής θερμοκρασίας, όπως η αλλαγή φάσης. Συνήθως χρησιμοποιείται η αλλαγή φάσης μεταξύ στερεού και υγρού. Χρησιμοποιούνται επίσης αλλαγές φάσης στερεού-στερεού. Αν και για την αλλαγή φάσης στερεού-στερεού η ειδική λανθάνουσα θερμότητα είναι μικρότερη, αλλά έχει πλεονεκτήματα όπως η μη διαρροή και η μη ανάγκη για εγκιβωτισμό κ.λπ. Η αλλαγή φάσης υγρού-αερίου έχει την υψηλότερη λανθάνουσα θερμότητα αλλαγής φάσης [159]. Ωστόσο, η τεράστια μεταβολή του όγκου των υλικών αποθήκευσης αποτελεί πρόβλημα και ως εκ τούτου δεν χρησιμοποιείται γενικά. Η θερμική ενέργεια που, γενικά, αποθηκεύεται από τη λανθάνουσα θερμότητα μπορεί να εκφραστεί ως εξής

$$Q = m \cdot L \quad (4.2)$$

Όπου m είναι η μάζα (kg) και L είναι η ειδική λανθάνουσα θερμότητα ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$).



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα Ενέργειας-Θερμοκρασίας στην αλλαγή φάσης [160].

Σε αντίθεση με το υλικό αποθήκευσης αισθητής θερμότητας, στο υλικό αλλαγής φάσης (Phase Change Material PCM) η ενέργεια αποθηκεύεται ή αφαιρείται όταν υπάρχει μετάβαση φάσης στο υλικό (στερεό-υγρό, υγρό-αέριο και στερεό-αέριο). Με την αύξηση της θερμοκρασίας, το PCM αρχίζει να απορροφά θερμότητα όπως το αισθητό υλικό μέχρι τη θερμοκρασία μετάβασης φάσης, μετά την οποία οι χημικοί δεσμοί στο υλικό σπάνε και το PCM απορροφά τεράστια ενέργεια σε σταθερή θερμοκρασία (βλ. Σχήμα 4.17). Η ενέργεια που αποθηκεύεται κατά τη μετάβαση φάσης είναι γνωστή ως λανθάνουσα θερμότητα. Μια πιο ειδική σχέση που δίνει το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα λανθάνουσας αποθήκευσης με PCM

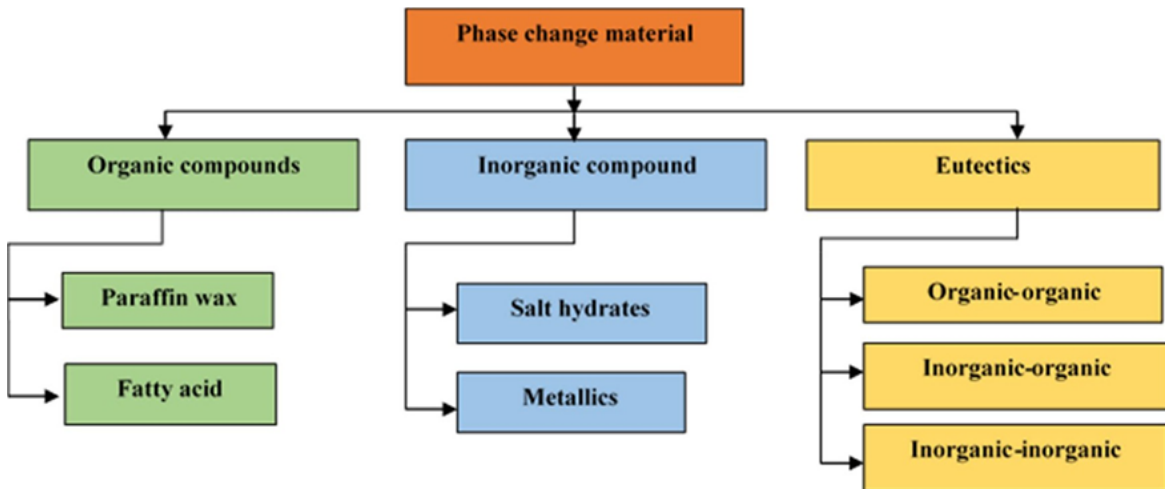
$$Q = \int_{T_1}^{T_m} mC_p dT + ma_m\Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \quad (4.2)$$

Όπου m είναι η μάζα του υλικού αλλαγής φάσης (kg), C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$), T είναι η θερμοκρασία (K), a_m είναι το κλάσμα τήγματος του υλικού αλλαγής φάσης και Δh_m είναι η ενθαλπία τήξης ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Η εξίσωση έχει τρία μέρη με το πρώτο μέρος να αντιπροσωπεύει την αισθητή θερμότητα που αποθηκεύεται στη στερεά φάση, το δεύτερο μέρος αντιπροσωπεύει τη λανθάνουσα θερμότητα τήξης και το τρίτο μέρος αντιπροσωπεύει την αισθητή θερμότητα που αποθηκεύεται στο υλικό αλλαγής φάσης στην υγρή φάση.

Μερικά κύρια πλεονεκτήματα των συστημάτων αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας είναι [25] (i) υψηλή ειδική θερμότητα σύντηξης (ii) ικανότητα αποθήκευσης τεράστιας ενέργειας με μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας, επομένως υψηλή πυκνότητα αποθήκευσης. Το PCM έχει πολλαπλάσια αποθηκευτική ικανότητα σε σύγκριση με τα υλικά αισθητής θερμότητας που κυμαίνεται από 50 έως 150 kWh/t με απόδοση μεταξύ 75 και 90%. Σε διαφορετικό εύρος θερμοκρασιών, πολλά PCM (οργανικά PCM, ανόργανα PCM και ευτηκτικά PCM) είναι διαθέσιμα με βάση τις χημικές τους ιδιότητες. Για την περίπτωση των μη καθαρών PCM, η μετάβαση φάσης του PCM δεν πραγματοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία, ενώ πραγματοποιείται σε κάποιο εύρος θερμοκρασιών. Προκειμένου να είναι το καταλληλότερο για αποθήκευση θερμικής ενέργειας, το PCM πρέπει να επιτυγχάνει ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες.

Ιδιότητα	Επιθυμητή απόδοση	Παρατηρήσεις
Θερμοφυσικές ιδιότητες	Υψηλή πυκνότητα & λανθάνουσα θερμότητα σύντηξης	Αποθήκευση/απελευθέρωση μεγάλης ποσότητας ενέργειας σε μικρό όγκο
	Υψηλή ειδική θερμότητα	Σημαντική αποθήκευση αισθητής θερμότητας
	Υψηλή θερμική αγωγιμότητα	Βελτίωση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα αποθήκευσης
	Συγκλίνουσα τήξη	Πλήρης τήξη του PCM
	Μικρή μεταβολή όγκου κατά τη μετάβαση φάσης	Μηχανική και χημική σταθερότητα του δοχείου αποθήκευσης
	Χαμηλή υπερψύξη	Η υπερψύξη εμποδίζει την πλήρη ανάκτηση της αποθηκευμένης ενέργειας
Κινητικές ιδιότητες	Υψηλός ρυθμός πυρηνοποίησης	Αποφυγή αλλαγών στη στοιχειομετρική σύνθεση

	Υψηλός ρυθμός ανάπτυξης κρυστάλλων	Συνάντηση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας ανάκτησης του συστήματος
Χημικές ιδιότητες	Χημική σταθερότητα	Ίδιες θερμοχημικές ιδιότητες του PCM ακόμη και μετά από πολλαπλές φορτίσεις και εκφορτίσεις κύκλου
	Μη ευαίσθησία στη χημική αποσύνθεση	Μακροχρόνια σταθερότητα του συστήματος
	Μη διαβρωτική συμπεριφορά στο υλικό κατασκευής	Μακροχρόνια σταθερότητα του δοχείου αποθήκευσης και αποφυγή διαρροής του δοχείου
	Μη τοξική, μη εύφλεκτη συμπεριφορά	Ασφάλεια του συστήματος και του περιβάλλοντος εργασίας
Οικονομικές ιδιότητες	Οικονομική αποδοτικότητα.	Ανταγωνιστική με άλλες επιλογές αποθήκευσης ενέργειας
	Μεγάλη διάρκεια ζωής	Αποφυγή τακτικής αντικατάστασης και συντήρησης του υλικού αποθήκευσης
	Εμπορική διαθεσιμότητα σε αφθονία	Φθηνή και εύκολα διαθέσιμη



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα γενικής ταξινόμησης των υλικών αλλαγής φάσης (PCM) [161].

4.2.2.1 Οργανικά (Organic)

Πολλά οργανικά υλικά διαθέτουν μοναδική ποιότητα να έχουν τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης στερεού-υγρού μέσα ή κοντά στο εύρος θερμικής άνεσης του ανθρώπου (δηλ. μεταξύ 18 °C και 30 °C). Επιπλέον τα οργανικά υλικά είναι χημικά σταθερά, μη τοξικά, μη διαβρωτικά και είναι

εύκολα διαθέσιμα στη φύση. Ως εκ τούτου, τα οργανικά υλικά είναι τα πλέον χρησιμοποιούμενα υλικά TES για θερμική άνεση σε κτίρια, υφάσματα κ.λπ. Ωστόσο, αποσυντίθενται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και η θερμική τους αγωγιμότητα είναι πολύ χαμηλή. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες οργανικών υλικών για TES.

Παραφίνες (Paraffin). Οι παραφίνες είναι το οργανικό υλικό αποθήκευσης θερμικής ενέργειας που χρησιμοποιείται περισσότερο σε εμπορικές εφαρμογές. Οι παραφίνες είναι κορεσμένοι αλειφατικοί υδρογονάνθρακες n-αλκανίου και συμβολίζεται με γενικό τύπο $(\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{(n-2)}-\text{CH}_3)$ όπου n είναι ο αριθμός των ατόμων άνθρακα. Το σημείο τήξης τους αυξάνεται με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα του σκελετού [162]. Για τις εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας συνήθως χρησιμοποιείται παραφίνη από n-πενταδεκάνιο (n = 15, σημείο τήξης 10 °C) έως n-τριακοντάνιο (n = 30, σημείο τήξης 65 °C). Υπό συνθήκες περιβάλλοντος, τα n-αλκάνια κάτω από n= 16, συνήθως, υπάρχουν σε υγρή φάση και τα n πάνω από 16 υπάρχουν ως κερί σαν στερεά φάση. Τα n-οκταδεκάνια (n = 18) είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενα παραφίνες σε ερευνητικές εργασίες και το σημείο τήξης του είναι στους 28°C [162]. Ωστόσο, η καθαρή παραφίνη χρειάζεται υψηλή ανανέωση και είναι ακριβή. Αντ' αυτού, ένα φθηνότερο τεχνικό κερί παραφίνης, το οποίο είναι παραπροϊόν της αναδόμησης του πετρελαίου, χρησιμοποιείται ως υλικό αλλαγής φάσης σε πρακτικές εφαρμογές αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας. Τα τεχνικής ποιότητας παραφινικά κεριά είναι, βασικά, μίγματα παραφινών, που έχουν διαφορετικό αριθμό ατόμων άνθρακα. Διατίθενται σε θερμοκρασίες τήξης μεταξύ 5 °C -100 °C. Για παράδειγμα, το *Rubitherm RT5* είναι ένα εμπορικό προϊόν της *Schumann Sasol GmbH* στο Αμβούργο της Γερμανίας, το οποίο βασίζεται σε προϊόν που προκύπτει από παραγωγή διύλισης. Αποτελείται από κεριά παραφίνης με κατανομή άνθρακα ως : C14(33,4 %κ.β.), C15(47,3 % κ.β.), C16(16,3 % κ.β.), C17(2,6 % κ.β.) και C18(0,4 % κ.β.). Η στερεά παραφίνη (technical grade paraffin) λιώνει σε ένα εύρος θερμοκρασιών και όχι σε μία συγκεκριμένη μόνο θερμοκρασία. Το σημείο ψύξης του RT5 είναι 7 °C και το εύρος τήξης το υλικού κυμαίνεται μεταξύ 4 °C-6 °C [163]. Η παραφίνη έχει πλεονεκτήματα όπως η χαμηλή υπερθέρμανση, είναι άοσμη, συμβατή με μεταλλικούς περιέκτες, χημική σταθερότητα και δεν υφίσταται διαχωρισμό φάσεων κλπ [163]. Ωστόσο, έχουν μερικά μειονεκτήματα όπως μεγάλη αλλαγή όγκου (=10%) κατά την αλλαγή φάσης, χαμηλή πυκνότητα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα κ.λπ. [163].

Μη παραφίνες (Non-Paraffin). Τα οργανικά υλικά μη-παραφίνης επεκτείνουν περαιτέρω το εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης που είναι διαθέσιμο για τους σκοπούς αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες υποκατηγορίες:

- Λιπαρά οξέα

Τα λιπαρά οξέα περιέχουν μια καρβοξυλική (COOH) λειτουργική ομάδα στην αλειφατική αλυσίδα. Έχουν γενικό τύπο R-COOH όπου το R αντιπροσωπεύει μια αλκυλομάδα. Τα λιπαρά οξέα μπορούν να ληφθούν από φυσικά έλαια, διαθέτουν χαμηλό κόστος, υπερθέρμανση,

χημική σταθερότητα και δεν υφίστανται διαχωρισμό φάσεων κ.λπ. Μπορούν να αποτελέσουν φθηνότερη εναλλακτική λύση σε σχέση με τις δαπανηρές καθαρές παραφίνες με απότομο σημείο τήξης. Λιπαρά οξέα όπως το λαυρικό οξύ (lauric acid) απαντώνται σε φυσικά προϊόντα όπως το λάδι καρύδας και ως εκ τούτου μπορούν να εξαχθούν από τέτοιες ανανεώσιμες πηγές με χαμηλότερο κόστος. Ωστόσο, έχουν μερικά μειονεκτήματα όπως οσμή, χαμηλή πυκνότητα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, μεγάλη αλλαγή όγκου (= 10%) κατά την αλλαγή φάσης κ.λπ. Τα λιπαρά οξέα έχουν απότομα σημεία τήξης. Το σημείο τήξης των λιπαρών οξέων αυξάνεται με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα στην αλυσίδα του σκελετού. Τα λιπαρά οξέα είναι ασθενή οξέα και η οξύτητά τους μειώνεται με τον αριθμό των ατόμων άνθρακα. Τα κορεσμένα λιπαρά οξέα έχουν γενικό τύπο $(\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{(n-2)}-\text{COOH})$. Τα κορεσμένα λιπαρά οξέα μεταξύ 8 και 18 ατόμων άνθρακα έχουν την κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης εντός του εύρους θερμικών εφαρμογών χαμηλής θερμοκρασίας. Συνήθως για εφαρμογές αποθήκευσης θερμικής ενέργειας εξετάζονται κορεσμένα λιπαρά οξέα από το καπρυλικό οξύ ($n = 8$, σημείο τήξης 16°C) έως το στεατικό οξύ ($n = 18$, σημείο τήξης 69°C) [165]. Τα ακόρεστα λιπαρά οξέα έχουν συνήθως χαμηλή θερμοκρασία αλλαγής φάσης, αν και μερικά όπως το ελαϊκό οξύ (oleic acid) $(\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH})$ έχουν κατάλληλη θερμοκρασία αλλαγής φάσης στους 14°C .

- Εστέρες

Συνήθως οι εστέρες λιπαρών οξέων χρησιμοποιούνται για αποθήκευση θερμικής ενέργειας, που έχουν γενικό τύπο R-COO-R^1 , όπου τα R και R¹ αντιπροσωπεύουν αλκυλικές ομάδες [162]. Συντίθενται από καρβοξυλικά οξέα και αλκοόλες με μια ισορροπημένη, καταλυτική αντίδραση που ονομάζεται *εστεροποίηση*, όπου χρησιμοποιούνται καταλύτες όπως το θειικό οξύ [165]. Η εστεροποίηση είναι μια αντιστρεπτή αντίδραση και ως εκ τούτου, για να εξαναγκαστεί η κατεύθυνση της αντίδρασης προς την κατεύθυνση των εστέρων, χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως η απομάκρυνση του νερού ή η χρήση περίσσειας αλκοόλης. Η εστεροποίηση είναι ένα άλλο χρήσιμο εργαλείο που έχουμε στη διάθεσή μας για να τροποποιήσουμε τις θερμοφυσικές ιδιότητες των λιπαρών οξέων ανάλογα με τις ανάγκες μας. Για παράδειγμα, λιπαρά οξέα όπως το στεατικό οξύ (= 69°C) και το παλμιντικό οξύ (= 62°C) έχουν υψηλή θερμοκρασία για αλλαγή φάσης, ενώ οι εστέρες όπως το στεατικό μεθύλιο (= 39°C) και παλμιτικό μεθύλιο (= 29°C) έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία αλλαγής φάσης κοντά στη ζώνη θερμικής άνεσης του ανθρώπου [162]. Οι εστέρες έχουν χαμηλή υπερψύξη, χημική σταθερότητα και δεν υφίστανται διαχωρισμό φάσεων κ.λπ. Ωστόσο, έχουν μερικά μειονεκτήματα, καθώς είναι ακριβοί, έχουν κακή οσμή, χαμηλή πυκνότητα, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα κ.λπ.

- Αλκοόλες

Μεταξύ των οργανικών υλικών αλλαγής φάσης, οι πολυαλκοόλες (sugar alcohols) έχουν τα υψηλότερα σημεία τήξης και την υψηλότερη λανθάνουσα θερμότητα. Οι θερμοκρασίες αλλαγής φάσης τους τις καθιστούν κατάλληλα μέσα αποθήκευσης θερμότητας για εφαρμογές μεσαίων θερμοκρασιών ($90^\circ\text{C}-250^\circ\text{C}$), όπως ηλιακούς θερμαντήρες ή ανάκτηση θερμότητας αποβλήτων [166]. Οι αλκοόλες είναι μη τοξικά, χαμηλού κόστους PCM. Οι αλκοόλες παρουσιάζουν πολυμορφισμό και μπορούν να υπάρχουν σε δύο ή περισσότερες κρυσταλλικές

καταστάσεις. Λόγω του πολυμορφισμού, η χρήση των αλκοολών για αποθήκευση θερμικής ενέργειας επηρεάζεται σημαντικά. Οι διάφορες μορφές πολύμορφων μπορεί να έχουν σημαντικές διαφορές στις φυσικοχημικές ιδιότητες, όπως στη D-μαννιτόλη που σε διαφορετικούς ρυθμούς θέρμανσης έχει διαφορετικές ενθαλπίες αλλαγής φάσης [166,167]. Επιπλέον, η γαλακτιτόλη (galactitol) ($C_6H_{14}O_6$) και η D-μαννιτόλη έδειξαν κακή σταθερότητα κατά την ανακύκλωση λόγω οξείδωσης από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας, η οποία είχε ως αποτέλεσμα αλλαγές στη θερμοκρασία αλλαγής φάσης και μη σταθερό υλικό με χαμηλότερη αποθηκευτική ικανότητα [166]. Θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα κατά το σχεδιασμό του δοχείου για την αποφυγή έκθεσης του υλικού αλλαγής φάσης των πολυαλκοολών στο ατμοσφαιρικό οξυγόνο. Επομένως, εάν οι αλκοόλες ζάχαρης πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως PCM, η κυκλική και η χημική σταθερότητα είναι οι κύριοι παράγοντες που πρέπει να ελεγχθούν.

- Γλυκόλες

Μεταξύ των γλυκολών, η πολυαιθυλενογλυκόλη (PEG) έχει δυνατότητες για αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η πολυαιθυλενογλυκόλη είναι ένα γραμμικό πολυμερές με γενικό τύπο $H-(O-CH_2-CH_2)_n-H$. Η πολυαιθυλενογλυκόλη διατίθεται σε ένα ευρύ φάσμα μοριακών βαρών από PEG400 έως PEG100000000, όπου ο αριθμός στην ονομασία αντιπροσωπεύει το μέσο μοριακό βάρος. Η θερμοκρασία αλλαγής φάσης του PEG είναι κοντά στη θερμοκρασία δωματίου και αυξάνεται με το μοριακό βάρος του πολυμερούς. Το PEG είναι μοναδικό από άλλα οργανικά PCM στο ότι διαλύεται στο νερό, ενώ άλλα είναι υδρόφοβα στη φύση τους. Ένα σημαντικό πρόβλημα με το PEG είναι ότι έχει το υψηλότερο υπερθέρμανση μεταξύ όλων των οργανικών PCM. Η διαφορά μεταξύ του σημείου τήξης και του σημείου κατάψυξης μπορεί να φτάσει τους $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, η οποία δεν είναι επιθυμητή.

4.2.2.2 Ανόργανα (Inorganic)

Τα κατάλληλα ανόργανα υλικά επιλέγονται για μια δεδομένη θερμοκρασία λειτουργίας του συστήματος με βάση τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης τους. Τα ανόργανα υλικά αποθήκευσης θερμικής ενέργειας λειτουργούν συνήθως σε υψηλές θερμοκρασίες, όπου τα οργανικά υλικά θα είχαν αποσυντεθεί θερμικά.

- Άλατα

Τα άλατα έχουν υψηλά σημεία τήξης και επομένως είναι κατάλληλα για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε υψηλές θερμοκρασίες. Προηγουμένως αναφέρθηκαν άλατα και ευτηκτικά άλατα με χαμηλότερα σημεία τήξης, τα οποία χρησιμοποιούν την αισθητή θερμοχωρητικότητά τους σε υγρή φάση για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας (βλ. Ενότητα 4.2.1.3). Βέβαια, η επιλογή ενός κατάλληλου άλατος με σημείο τήξης εντός του εύρους θερμοκρασιών λειτουργίας της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ογκομετρική ικανότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας. Για παράδειγμα, σε

ένα εύρος λειτουργίας μεταξύ 300 °C και 500 °C, επιλέγοντας LiNO_3 (σημείο τήξης: 250 °C) μόνο η αισθητή θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας και θα δώσει ογκομετρική αποθηκευτική ικανότητα περίπου 440 MJ/m³ [162]. Επιλέγοντας όμως, KNO_3 (σημείο τήξης: 335 °C) τόσο η αισθητή όσο και η λανθάνουσα θερμότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας και θα δώσει ογκομετρική αποθηκευτική ικανότητα περίπου 935 MJ/m³ [162]. Επομένως, όταν άλας απαιτείται για την θερμική αποθήκευση, η χρήση της λανθάνουσας θερμότητας είναι μια καλή επιλογή. Σε γενικές γραμμές, τα καθαρά άλατα και τα ευτηκτικά άλατα με σημείο τήξης άνω των 250 °C επιλέγονται για την αποθήκευση λανθάνουσας θερμότητας και χρησιμοποιούνται ως υλικά αλλαγής φάσης. Ωστόσο, η χρήση λανθάνουσας θερμότητας θα απαιτούσε αναγκαστικά τη θέρμανση του υλικού στερεάς φάσης μέχρι και τη διαδικασία τήξης. Στη στερεά φάση η μεταφορά θερμότητας μέσω του υλικού αλλαγής φάσης γίνεται μόνο με αγωγιμότητα, ενώ στην υγρή φάση η μεταφορά θερμότητας μέσω του υλικού μπορεί να γίνει τόσο με αγωγιμότητα όσο και με συναγωγή. Τα ανόργανα άλατα έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα στο εύρος μεταξύ 0,5 W/mK - 1 W/mK [162]. Επομένως, για τη χρήση των αλάτων ως μέσο αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας είναι πολύ σημαντική [168]. Τα άλατα είναι διαφόρων τύπων, όπως νιτρικά, υδροξείδια, χλωριούχα, ανθρακικά, θειικά και φθοριούχα. Μεταξύ αυτών τα νιτρικά άλατα έχουν τις χαμηλότερες θερμοκρασίες τήξης και είναι επί του παρόντος τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα άλατα και ευτηκτικά άλατα στις εγκαταστάσεις συγκεντρωτικών συλλεκτών. Τα υδροξείδια έχουν μεσαίο γενικά σημείο τήξης μεταξύ 250 °C - 600 °C [162]. Τα χλωρίδια, τα ανθρακικά, τα θειικά και τα φθοριούχα κ.λπ. έχουν υψηλά σημεία τήξης άνω των 600 °C.

- Ευτηκτικά άλατος (salt eutectics)

Τα καθαρά άλατα έχουν προκαθορισμένες θερμικές ιδιότητες και χάρις τα ευτηκτικά έχουμε τη δυνατότητα να τροποποιήσουμε τις ιδιότητες των καθαρών αλάτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις της θερμικής αποθήκευσης και λειτουργίας. Έτσι, για παράδειγμα μειώνεται το σημείο τήξης των καθαρών αλάτων για τον έλεγχο του προβλήματος παγώματος του τετηγμένου άλατος ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας στις εγκαταστάσεις. Επίσης, τα ευτηκτικά έχουν έντονα σημεία τήξης. Καθώς υπάρχει μεγάλος αριθμός διαθέσιμων ειδών καθαρών αλάτων, με αποτέλεσμα να υπάρχει ακόμη μεγαλύτερος αριθμός πιθανών ευτηκτικών συνδυασμών, τα ευτηκτικά μίγματα έχουν επεκτείνει το εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης των υλικών.

Μελέτες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ενώ είναι δυνατή η πρόβλεψη ιδιοτήτων όπως η ευτηκτική σύνθεση και η πυκνότητα με ικανοποιητική ακρίβεια, ιδιότητες όπως η λανθάνουσα θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν με ακρίβεια [169].

- Υδρίτες άλατος (salt hydrates)

Οι υδρίτες αλάτων είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα ανόργανα υλικά αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε εμπορικές εφαρμογές [162]. Οι υδρίτες άλατος είναι τα μόνα ανόργανα υλικά αλλαγής φάσης που λειτουργούν στις εφαρμογές χαμηλής θερμοκρασίας ανθρώπινης

θερμικής άνεσης. Οι υδρίτες άλατος αντιπροσωπεύονται από τον γενικό τύπο "άνυδρο άλας. nH_2O ". Το εξαϋδρικό χλωριούχο ασβέστιο ($CaCl_2$)- $6H_2O$ είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος υδρίτης άλατος σε πρακτική χρήση. Το σημείο τήξης στους $28\text{ }^\circ\text{C}$ - $30\text{ }^\circ\text{C}$ είναι άνετη θερμοκρασία για τον άνθρωπο και έχει μεγάλη ειδική λανθάνουσα θερμότητα $190,8\text{ kJ/kg}$. Οι υδρίτες άλατος έχουν τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με κάθε άλας αλλαγής φάσης. Ένα από τα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζουν αυτού του τύπου υλικά αλλαγής φάσης είναι η ασύμβατη τήξη και ο διαχωρισμός φάσεων. Κατά τη διάρκεια της θερμικής φόρτισης οι υδρίτες άλατος θα απορροφήσουν θερμότητα και θα υποστούν είτε μερική είτε πλήρη αφυδάτωση.

Αφύγρανση : *άνυδρο άλας.* $nH_2O \rightarrow$ *άνυδρο άλας* + $n \cdot H_2O$

Μερική αφύγρανση : *άνυδρο άλας.* $nH_2O \rightarrow$ *άνυδρο άλας.* mH_2O + $(n - m) \cdot H_2O$

Μετά από πλήρη αφυδάτωση, εάν το άνυδρο άλας είναι πλήρως διαλυτό στο νερό κρυστάλλωσης, τότε πρόκειται για σύμμορφη τήξη. Εάν το άνυδρο άλας είναι μερικώς διαλυτό στο νερό κρυστάλλωσης, τότε πρόκειται για ασύμμετρη τήξη [162]. Σε ένα σενάριο μερικής αφυδάτωσης το ένυδρο άλας διασπάται σε ένα χαμηλότερο ένυδρο άλας το οποίο παραμένει στη στερεά φάση. Αυτό το σενάριο ονομάζεται ημ-σύμμορφη τήξη. Είναι επιθυμητό να έχουμε σύμμορφη τήξη, διαφορετικά η διαφορά πυκνότητας μεταξύ του νερού και των συστατικών άλατος του υδρίτη άλατος οδηγεί σε διαχωρισμό και το PCM του υδρίτη άλατος θα χάνει σταδιακά τη λανθάνουσα θερμότητά του με την αύξηση των θερμικών κύκλων [170].

- Μέταλλα και κράματα

Τα πλεονεκτήματα των μετάλλων και των κραμάτων τους ως υλικά αλλαγής φάσης είναι η υψηλότερη ανά μονάδα όγκου ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας και η υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Τα μέταλλα και τα κράματα είναι ακριβά, αλλά όταν ο όγκος είναι το κριτήριο είναι η καλύτερη επιλογή για αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Τα μέταλλα και τα κράματα έχουν χαμηλή ικανότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ανά μονάδα βάρους. Έτσι, έχουν το μειονέκτημα του υπερβολικού βάρους [171]. Το νάτριο (Na) είναι ένα καλό υλικό αποθήκευσης αισθητής θερμότητας ως υγρό μέταλλο, αλλά η λανθάνουσα θερμότητά του είναι πολύ χαμηλή (113 kJ/kg) και η θερμοκρασία τήξης ($97\text{ }^\circ\text{C}$) είναι επίσης πολύ χαμηλή. Επομένως, το νάτριο δεν είναι ιδανικό υλικό αλλαγής φάσης αν και θεωρείται καλό ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας (HTF) και αποθήκευσης αισθητής θερμότητας (sensible heat). Αν και τα μέταλλα και τα κράματα έχουν μεγάλες δυνατότητες ως υλικά αλλαγής φάσης αποθήκευσης υψηλής θερμοκρασίας, υπάρχουν όμως πολλά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Τα μέταλλα και τα κράματα μετά από επαναλαμβανόμενους θερμικούς κύκλους μπορούν να υποστούν αλλαγή στη μικροδομή τους λόγω κατακρήμνισης, οξειδωσης, διαχωρισμού κ.λ.π. [162]. Αυτό μπορεί να αλλάξει τις ιδιότητές τους, συμπεριλαμβανομένων των θερμοκρασιών αλλαγής φάσης και της λανθάνουσας θερμότητας. Απαιτούν αδρανή ατμόσφαιρα για την αποφυγή της οξειδωσης, αλλά αυτά τα ίδια αδρανή αέρια μπορεί να απορροφηθούν από τα μέταλλα κατά τη διάρκεια των κύκλων τήξης και στερεοποίησης και αυτά τα αέρια μπορούν να επηρεάσουν

τις θερμοφυσικές ιδιότητες των μετάλλων και των κραμάτων [162]. Τα μέταλλα και κράματα αλλαγής φάσης μπορεί να περιέχονται είτε σε μεταλλικό είτε σε κεραμικό δοχείο. Οι διαφορές στον συντελεστή θερμικής διαστολής μπορούν να προκαλέσουν τάσεις και ρήξεις στα δοχεία. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μακροενθυλάκωση (macro-encapsulation) με μεταλλικά δοχεία ή επικαλύψεις οξειδίων [171]. Η υπερψύξη είναι η οποία μπορεί να φθάσει τους 100 °C για ομογενή πυρηνοποίηση στα μέταλλα Mg και Al.

4.2.3 ΧΗΜΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Τα συστήματα χημικής αποθήκευσης θερμότητας χρησιμοποιούν αντιστρεπτές αντιδράσεις που περιλαμβάνουν απορρόφηση και απελευθέρωση θερμότητας με σκοπό την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Διαθέτουν μεσαίο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας 200°C-400°C. Η χημική αποθήκευση θερμότητας είναι μια εξαιρετική εναλλακτική λύση σε σχέση με τις παραδοσιακές αποθηκεύσεις αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας, καθώς παρέχει μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας, μεγαλύτερο χρόνο αποθήκευσης και χαμηλότερες θερμικές απώλειες. Η χημική ή θερμοχημική αποθήκευση θερμότητας βασίζεται στην αντιστρεπτή χημική αντίδραση:



που επιτρέπει την απορρόφηση θερμότητας κατά τη διάρκεια μιας ενδόθερμης διαδικασίας αποσύνθεσης. Η αντίστροφη αντίδραση σύνθεσης είναι εξώθερμη και έχει ως αποτέλεσμα την επιστροφή της αποθηκευμένης θερμότητας. Η θερμοκρασία μετάβασης T^* μπορεί να εκτιμηθεί υπό την προϋπόθεση ότι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs .

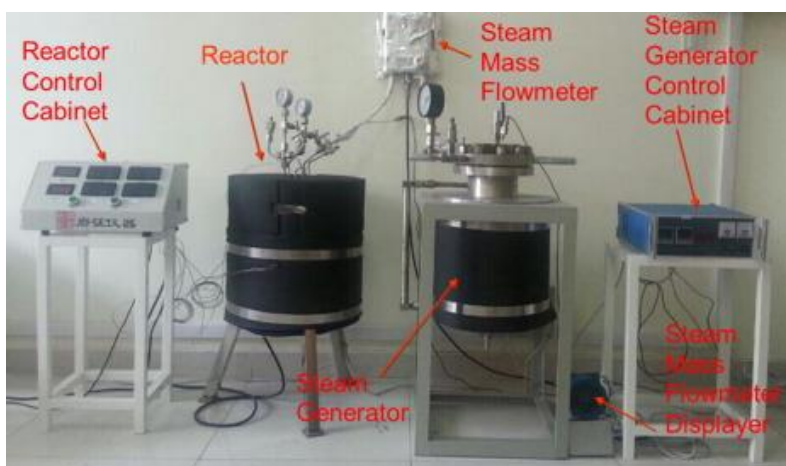
Η κατεύθυνση της αντίδρασης εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία. Θεωρητικά η θερμοκρασία μετάβασης για δεδομένη τυπική πίεση μπορεί να προκύψει με την έννοια της ελεύθερης ενέργειας του Gibb [172]. Χρησιμοποιώντας τη συνθήκη θερμοδυναμικής ισορροπίας για τη μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας του Gibb ως μηδέν, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για τη θερμοκρασία μετάβασης T^* .

$$\Delta G(T^*) = 0 \quad (4.4)$$

$$\Delta G(T^*) = \Delta H(T^*) - \Delta S(T^*) \cdot T^* \quad (4.5)$$

$$T^* = \frac{\Delta H(T^*)}{\Delta S(T^*)} \quad (4.6)$$

Όταν $T > T^*$ κυριαρχεί η αποσύνθεση και συμβαίνει η θερμική φόρτιση. Όταν $T < T^*$ κυριαρχεί η σύνθεση και συμβαίνει η θερμική εκφόρτιση. Για παράδειγμα, σε πίεση 0,024 bar, το σύστημα $\text{Ca}(\text{OH})_2$ έχει θερμοκρασία μετάβασης $T^* = 362^\circ\text{C}$ [172]. Όμως, το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ προκειμένου να αφυγραίνεται με αποδεκτό ρυθμό θερμικής φόρτισης, χρειάζεται θερμοκρασία $T > 390^\circ\text{C}$, η οποία αποτελεί υπέρβαση της θερμοκρασίας $\Delta T > 28^\circ\text{C}$ σε σχέση με τη θερμοκρασία μετάβασης της αντίδρασης. Ομοίως, η επανενυδάτωση για να συμβεί με αποδεκτό ρυθμό θερμικής εκφόρτισης χρειάζεται θερμοκρασία $T < 290^\circ\text{C}$, δηλαδή $\Delta T > 70^\circ\text{C}$ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία μετάβασης της αντίδρασης.



Εικόνα 4.6: Συσκευές δοκιμών χημικής αποθήκευσης θερμότητας [173]

Στην *Εικόνα 4.6* παρουσιάζεται η διάταξη δοκιμής για τη χημική αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Διαθέτει κυρίως έναν αντιδραστήρα όπου περιέχεται το υλικό χημικής αποθήκευσης και μια ατμογεννήτρια. Καθώς μειώνεται η πίεση στον αντιδραστήρα, μειώνεται και η θερμοκρασία μετάβασης (T^*) της χημικής αντίδρασης. Η πίεση του αντιδραστήρα διατηρείται με τη χρήση αντλίας κενού. Επομένως, ρυθμίζοντας την πίεση της αέριας φάσης μέσω της αντλίας κενού, μπορούν να ελεγχθούν οι θερμοκρασίες φόρτισης και εκφόρτισης. Η θερμοκρασία της ατμογεννήτριας ελέγχεται ώστε να διατηρείται το νερό σε μορφή ατμού. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης το χημικό υλικό αποθήκευσης θερμότητας αποσυντίθεται και οι υδρατμοί διαφεύγουν. Πρόσθετο σημαντικό χαρακτηριστικό της χημικής αποθήκευσης θερμότητας είναι ότι μετά τη διαδικασία φόρτισης τα αποσυντιθέμενα προϊόντα αποθηκεύονται χωριστά για μεγάλο χρονικό διάστημα και έρχονται σε επαφή μεταξύ τους όταν απαιτείται θερμική εκφόρτιση, έτσι έχουμε μια μεγάλη περίοδο αποθήκευσης χωρίς απώλειες θερμότητας. Η χημική αποθήκευση θερμικής ενέργειας παρέχει την υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας από όλες τις τεχνολογίες.

Η χημική αποθήκευση θερμικής ενέργειας έχει πλεονεκτήματα όπως η υψηλότερη πυκνότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (τόσο ανά μονάδα μάζας όσο και ανά μονάδα όγκου), η

μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με χαμηλές απώλειες θερμότητας κ.λπ. Ωστόσο, υπάρχουν μερικές τεχνικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει η χημική αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, όταν λαμβάνει χώρα αποσύνθεση, το υλικό αποθήκευσης όπως το $Mg(OH)_2$ μπορεί να υποστεί πυροσυσσωμάτωση και ανάπτυξη κόκκων με αποτέλεσμα τη μείωση του πορώδους. Κατά την εκφόρτιση, αυτό εμποδίζει τη διαδικασία επανενυδάτωσης. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι ο ρυθμός της αντίδρασης αφυδάτωσης είναι αργός. Επιχειρήθηκαν διάφορες προσεγγίσεις για την αύξηση του ρυθμού φόρτισης όπως σύνθετα νανοπλακίδια γραφίτη [174], πρόσμιξη με λίθιο [173], πρόσμιξη με νιτρικά άλατα [175] κ.λπ. και παρατηρήθηκαν βελτιώσεις. Ωστόσο, η χημική αποθήκευση θερμικής ενέργειας βρίσκεται ακόμη σε εργαστηριακό στάδιο και οι εμπορικές εφαρμογές απαιτούν περαιτέρω αναβάθμιση της τεχνολογίας μέσω της ερευνητικής μελέτης και πειραματικής εφαρμογής.

5. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Το παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα υφίσταται σημαντικές αλλαγές καθώς κινούμαστε προς μια οικονομία με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Πράγματι, ο αδιαμφισβήτητος αντίκτυπος των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στις κλιματικές αλλαγές αναγκάζει τις χώρες σε όλο τον κόσμο να προωθήσουν σταδιακά τις τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, λόγω της εγγενούς μεταβλητότητας και στοχαστικότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκών), η εισαγωγή τους σε μεγάλη κλίμακα έχει αποτελέσει πρόκληση για τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς οι απροσδόκητες αλλαγές στην τοπική μετεωρολογία μπορούν να μεταβάλουν σημαντικά την παραγωγή μέσω αιολικής και ηλιακής ενέργειας (φωτοβολταϊκών). Έτσι, η εισαγωγή περισσότερων μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, δηλαδή η παραγωγή αιολικής και φωτοβολταϊκής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα ασκεί πίεση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκεντρωτική ηλιακή ενέργεια (CSP) είναι μια τεχνολογία που προσφέρει λύση στο πρόβλημα αυτό, διότι σε αντίθεση με τους συμβατικούς φωτοβολταϊκούς σταθμούς, οι σταθμοί CSP μπορούν να ενσωματώσουν συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES), ώστε να μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια όποτε χρειάζεται - ημέρα και νύχτα, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Αυτό καθιστά τις μονάδες CSP μια πολύ πιο υποσχόμενη λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα από την ηλιακή ενέργεια και, ως εκ τούτου, την πλέον κατάλληλη τεχνολογία για την προώθηση της μαζικής διεύθυνσης της ηλιακής ενέργειας στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

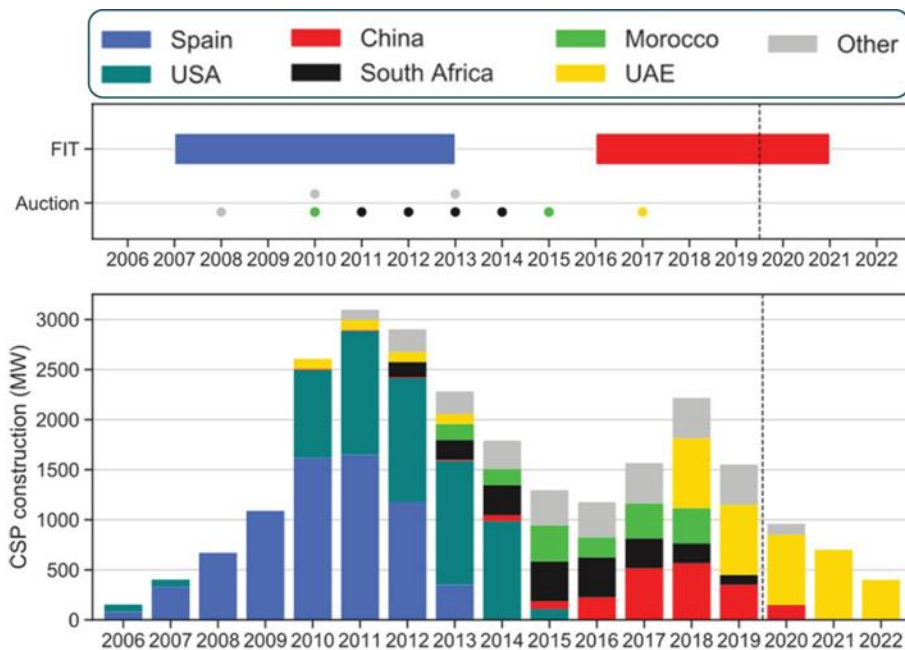
5.1 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΑΓΟΡΑ

5.1.1 Η ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Η ιστορική εξέλιξη των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (CSP) χαρακτηρίζεται από έντονες διακυμάνσεις σε μια ακολουθία κύκλων έκρηξης-κατάρρευσης που πυροδοτούνται από αλλαγές στην υποστήριξη της εθνικής πολιτικής [177]. Το πρώτο κύμα ανάπτυξης της CSP έλαβε χώρα στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1980, όταν οι ομοσπονδιακές και πολιτειακές πολιτικές και τα φορολογικά κίνητρα οδήγησαν στην κατασκευή εννέα μονάδων CSP δυναμικότητας παραγωγής περίπου 350 MW μεταξύ 1984 και 1991 [178]. Η πτώση των τιμών της ενέργειας (ορυκτών καυσίμων) και η μείωση των κινήτρων εμπόδισαν την περαιτέρω ανάπτυξη μονάδων

CSP στις Ηνωμένες Πολιτείες. Στα έτη 1995-2005, υπήρξε μια περίοδος εμπορικής και κατασκευαστικής αδράνειας, καθώς δεν κατασκευάστηκε καμία μονάδα CSP παγκοσμίως.

Η δεύτερη σημαντική ανάπτυξη των σταθμών CSP ήρθε με την εισαγωγή της νομοθεσίας για τα τιμολόγια τροφοδότησης (*feed-in-tariff* FIT) για έργα CSP στην Ισπανία το 2007 [178]. Η νομοθεσία επέτρεπε 25ετή συμβόλαια παράδοσης με υψηλό σταθερό ποσοστό τιμολόγησης ή με σταθερή προσαύξηση επί της τιμολόγησης του χρόνου παράδοσης της αγοράς [179]. Αυτό οδήγησε στην κατασκευή περίπου 50 μονάδων CSP στη Νότια Ισπανία στα έτη 2007-2013 με συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 2300 MW. Τον Ιανουάριο του 2012, το πρόγραμμα *feed-in tariff* (FiT) ακυρώθηκε από την κυβέρνηση για τους νέους αιτούντες και τον Ιούνιο του 2013, ένας νέος νόμος που εκδόθηκε από την ισπανική κυβέρνηση αντικατέστησε το τιμολόγιο τροφοδότησης με μια συμπληρωματική πληρωμή που προστίθεται στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στην πιάνα για να παρέχει στους επενδυτές μια εύλογη κερδοφορία 7,5 % κατά τη διάρκεια ζωής του έργου και ισχύει για τις μονάδες που βρίσκονται ήδη σε λειτουργία [178]. Το αποτέλεσμα ήταν να μην κατασκευαστούν νέες μονάδες CSP στο επόμενο διάστημα (βλ. Σχήμα 5.1). Το FIT ήταν σταθερό και έτσι δεν ενθάρρυνε τη μείωση του κόστους ή την βελτίωση της παραγωγής κατά τη διάρκεια των προτιμώμενων περιόδων. Ωστόσο, το FIT απέδειξε ότι η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας CSP ήταν δυνατή όταν υπάρχει κατάλληλη και σταθερή πολιτική.



Σχήμα 5.1: Η ιστορική εξέλιξη κατασκευής μονάδων CSP(κάτω) και οι πολιτικές που τις καθόρισαν (πάνω) ανά τον κόσμο [177,178].

Το επόμενο μεγάλο κύμα που ξεκίνησε το 2013 ήταν η διεθνής αύξηση των μονάδων CSP, ο οποίος χαρακτηρίζεται από την επέκταση πρώτα στις Η.Π.Α. (η οποία στη συνέχεια σταμάτησε, μετά από αβεβαιότητα σχετικά με τη μελλοντική πολιτική υποστήριξη) και στη συνέχεια σε αναδυόμενες χώρες όπως η Νότια Αφρική, το Μαρόκο, το Ισραήλ και το Κουβέιτ μέσω ανταγωνιστικών διαδικασιών υποβολής προσφορών. Πολλά από αυτά τα έργα ενθάρρυναν τη χρήση της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, ώστε η ηλιακή παραγωγή να μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμη ωφέλιμα σε περιόδους υψηλότερων αναγκών. Επόμενη εξέλιξη εμπορικά των έργων CSP ήρθε τον Σεπτέμβριο του 2016, όταν η Κίνα υιοθέτησε την προσέγγιση FIT για την οικονομική στήριξη της κατασκευής 20 μονάδων CSP (1,35 GW) έως το τέλος του 2018 ως βήμα προς τον στόχο των 5 GW CSP στο πλαίσιο του 13ου πενταετούς εθνικού σχεδίου[180]. Τα παραδείγματα αυτά καταδεικνύουν ότι η αστάθεια της πολιτικής δυσχεραίνει την ανάπτυξη των CSP λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος που απαιτείται για την ανάπτυξη, τη χρηματοδότηση και την κατασκευή έργων CSP. Αν και μέχρι σήμερα έχει σημειωθεί σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων CSP, η τεχνολογία CSP εξακολουθεί να είναι μια σχετικά ανώριμη τεχνολογία. Οι ανώριμες τεχνολογίες βασίζονται συνήθως σε κίνητρα πολιτικής για τη μείωση του κινδύνου του ιδιωτικού τομέα και την ενθάρρυνση των επιστημόνων να αναπτύξουν τη νέα τεχνολογία. Τα εν εξελίξει έργα CSP βασίζονται σε γενναϊόδωρα FIT (Κίνα, Ισραήλ) και στην πρόσβαση σε χρηματοδότηση χαμηλού κόστους (Μέση Ανατολή και Αφρική) [178].

5.1.2 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΑΘΜΩΝ CSP ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΣ

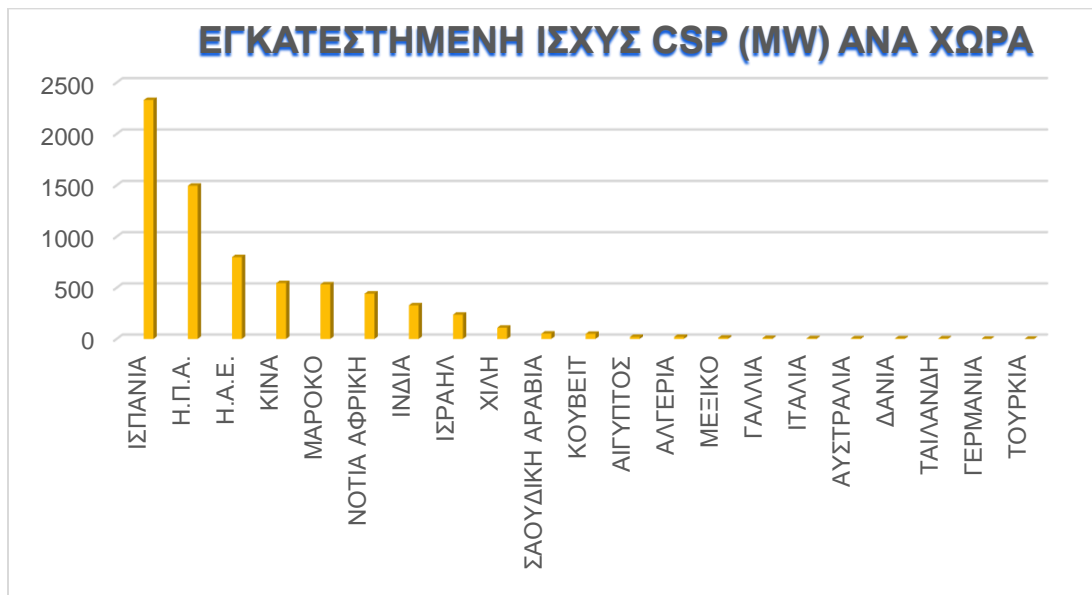
Με βάση την πρόσφατη έκθεση του *Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (IEA)* για τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (CSP) υποστηρίζεται, ότι μέχρι το 2050, με την κατάλληλη κυβερνητική υποστήριξη, τα CSP θα μπορούσαν να παράγουν το 11,3% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, με 9,6% από καθαρή ηλιακή ενέργεια και 1,7% από εφεδρικά ορυκτά καύσιμα ή βιομάζα. Επίσης, έχει χαρτογραφηθεί ότι η Βόρεια Αμερική είναι η μεγαλύτερη περιοχή παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από CSP, και στη συνέχεια η Αφρική, η Ινδία και η Μέση Ανατολή [176]. Επιπλέον, η Βόρεια Αφρική έχει μεγάλες δυνατότητες να γίνει προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία αντισταθμίζει το πρόσθετο κόστος που προκαλείται από τις πρόσθετες γραμμές μεταφοράς. Ο IEA διευκρίνισε επίσης ότι η CSP θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε διάφορες εφαρμογές αφαλάτωσης νερού υψηλής θερμοκρασίας σε άνυδρες χώρες.

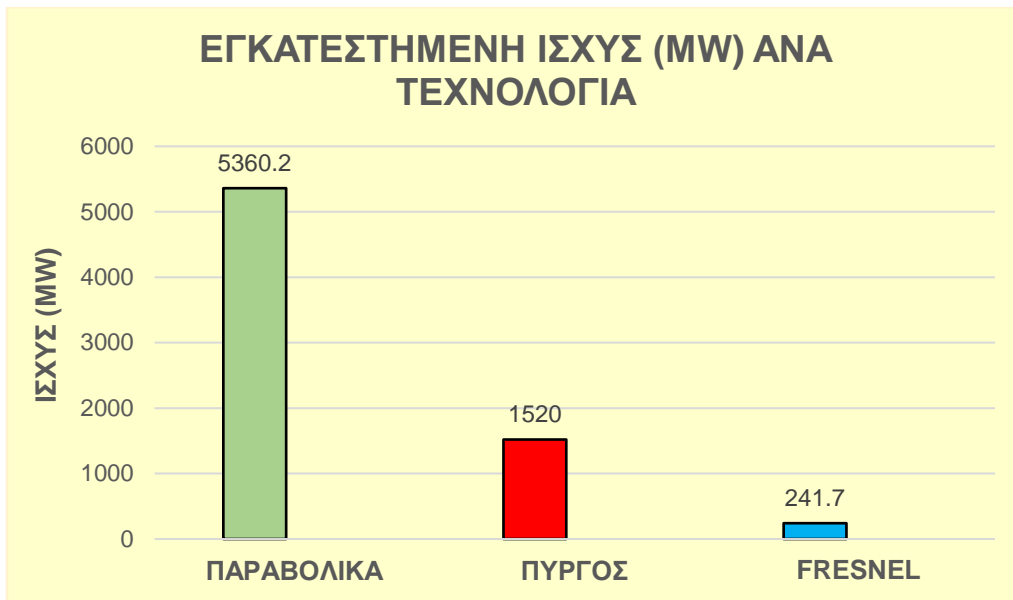
Πολλά έργα CSP έχουν αναπτυχθεί σε όλο τον κόσμο, υπάρχουν 154 έργα σε όλο τον κόσμο, με 116 σε λειτουργία, 20 πλέον μη λειτουργικά ή παροπλισμένα, και 18 υπό κατασκευή για να αρχίσουν να λειτουργούν το 2024 και το 2025. Η Ισπανία, οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Κίνα είναι οι κορυφαίες χώρες στην κατασκευή και τη λειτουργία μονάδων CSP. Η Ισπανία έχει τη

μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ με περισσότερα από 2,3 GW και 51 έργα που έχουν κατασκευαστεί σε όλη τη χώρα, τα οποία είναι όλα σε λειτουργία. Εν τω μεταξύ, η Κίνα διαθέτει 596 MW εγκατεστημένης ισχύος και πολλά έργα βρίσκονται ακόμη υπό κατασκευή. Αντίθετα, οι ΗΠΑ ενώ έχουν υλοποιήσει περισσότερα από 26 έργα σε όλη τη χώρα, είναι σε λειτουργία 1,5 GW ισχύος καθώς πολλά έργα παροπλίστηκαν για διάφορους λόγους. Στο Πίνακα 5.2 συγκρίνεται η εγκατεστημένη ισχύς για κάθε χώρα παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων όλων των σταθμών παραγωγής που βρίσκονται υπό κατασκευή. (Οι πληροφορίες αυτές ελήφθησαν από την επίσημη ιστοσελίδα του *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*). Επίσης, τα στοιχεία που δίνονται παρακάτω βασίζονται σε αυτά τα στοιχεία.

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι οι συλλέκτες παραβολικών κοίλων (PTC), με 82 έργα λειτουργικά ή υπό κατασκευή, και ακολουθούν οι ηλιοθερμικοί πύργοι με 30 λειτουργικούς σταθμούς, οι γραμμικοί ανακλαστήρες Fresnel με 9 έργα, και έργα δίσκων δεν υπάρχουν σήμερα σε λειτουργία (μόνο δύο τα οποία είναι παροπλισμένα). Περίπου το 75% της εγκατεστημένης ισχύος χρησιμοποιεί την τεχνολογία παραβολικών κοίλων (PTC). Επιπλέον, η τεχνολογία γραμμικών ανακλαστήρων Fresnel βρέθηκε να έχει τον μεγαλύτερο συντελεστή χρήσης γης μεταξύ των άλλων τεχνολογιών.

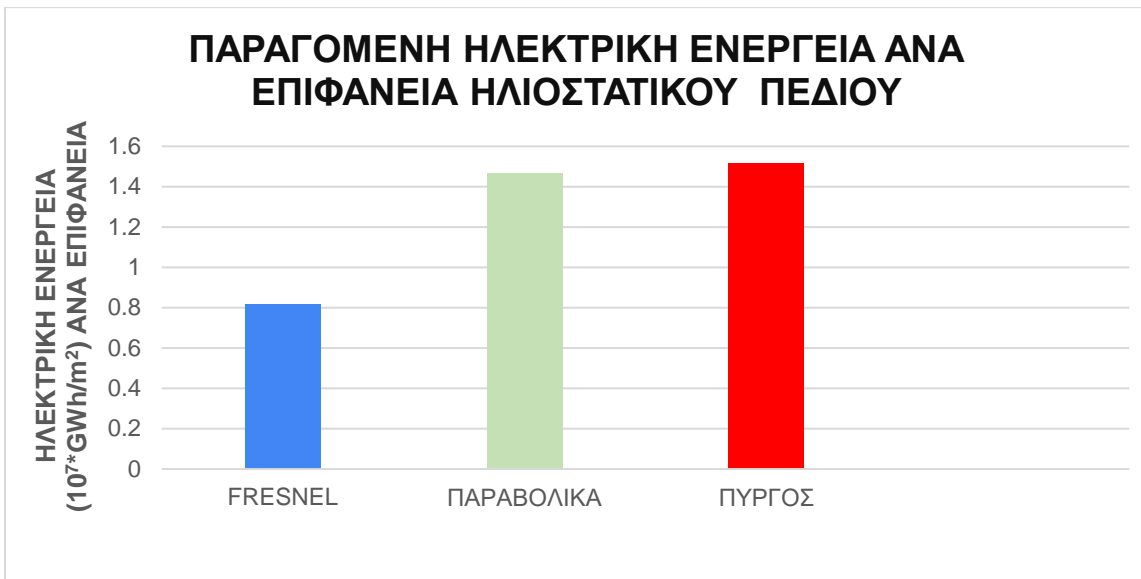
Στα Σχήματα 5.3.α & 5.4.β παρουσιάζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς για κάθε τεχνολογία για 134 διαφορετικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Εμφανίζεται ένα υψηλό δυναμικό χρήσης της CSP παραβολικού τύπου σε σύγκριση με τα άλλα συστήματα.



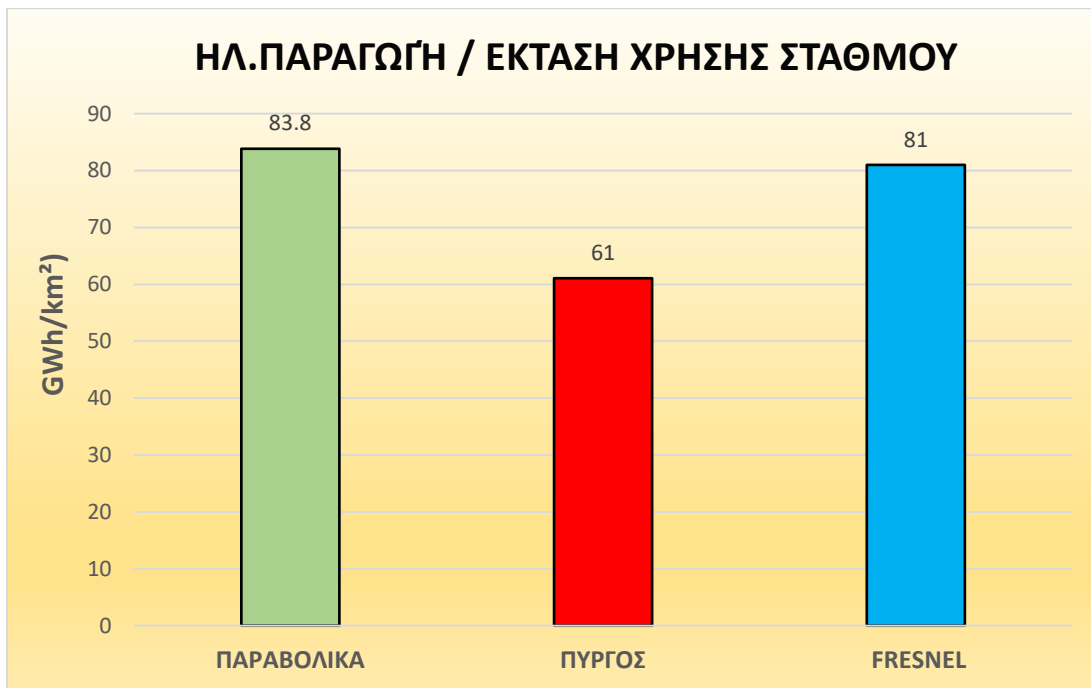


Σχήμα 5.3: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανα τεχνολογία σε MW (α) και ποσοστιαία (β). Πρόκειται για σταθμούς σε λειτουργία ή εν αναμονή λειτουργίας (υπό κατασκευή).

Περαιτέρω, τα Σχήματα 5.4 & 5.5 συγκρίνουν την μέση αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για 134 σταθμούς, λαμβάνοντας ως παράμετρο είτε την έκταση της εκμεταλλεύσιμης γης όλου του σταθμού συνολικά είτε τη συνολική επιφάνεια του ανοίγματος του ηλιοστατικού πεδίου. Ο χαμηλότερος βαθμός εκμετάλλευσης γης επιτυγχάνεται κατά μέσο όρο για τους ς πύργους ισχύος με παραγωγή περίπου 61 GWh/km². Οι σταθμοί με παραβολικά κούλα και γραμμικούς συλλέκτες Fresnel είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο εκμεταλλευσιμότητας της με 83 και 81 GWh/ km² αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4: Μέση αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (10⁷ *GWh) ανά μονάδα ανοίγματος επιφάνειας ηλιοστατικού πεδίου (m²)(aperture area).

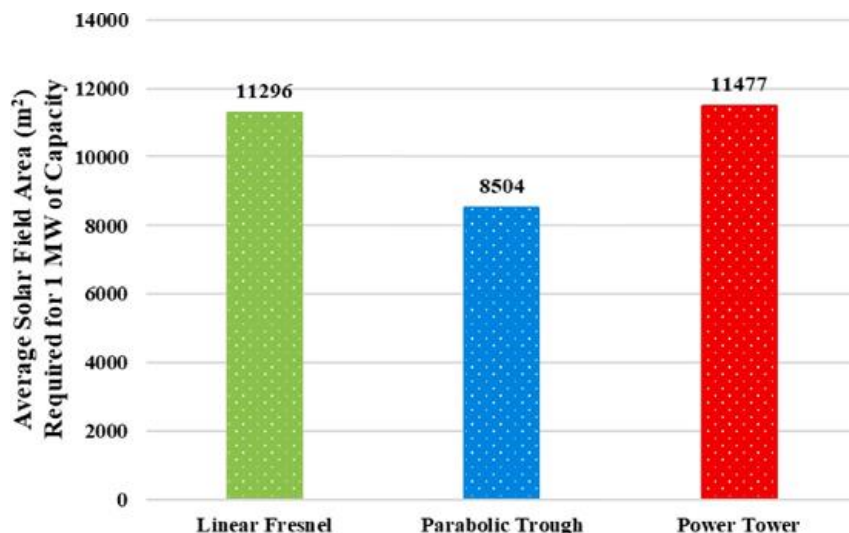


Σχήμα 5.5: Μέση Αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (GWh) ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο έκτασης του σταθμού συνολικά (km²).



Σχήμα 5.6: Μέση Αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Wh) ανά ηλιακή ενέργεια από την άμεση προσπίπτουσα ακτινοβολία (Wh). Ο λόγος αυτός δίνει βαθμό εκμετάλλευσης.

Σύμφωνα με άλλες μελέτες, για σύγκριση του συντελεστή χρήσης γης για 81 σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και τη μέση απαιτούμενη επιφάνεια ηλιακού πεδίου σε m² ανά 1 MW ισχύος για 110 σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, βρέθηκε ο χαμηλότερος συντελεστής χρήσης γης να επιτυγχάνεται πύργους ισχύος με αναλογία περίπου 18,6% και να ακολουθούν τα παραβολικά κοίλα με ποσοστό περίπου 25%. Ο υψηλότερος συντελεστής χρήσης γης επιτυγχάνεται από το γραμμικό Fresnel με ποσοστό περίπου 45,5%. Μπορεί επίσης να συναχθεί το συμπέρασμα ότι CSP με παραβολικά κοίλα χρειάζεται περίπου 8504 m² για κάθε 1 MW μόνο για το ηλιακό πεδίο (βλ. Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7: Μέση έκταση ηλιοστατικού πεδίου που απαιτείται για την ονομαστική ισχύ 1 MW.

Αυτό που παρατηρήθηκε και στη βιβλιογραφία αλλά και στους πίνακες 5.8, 5.9, 5.10 που συνέταξα, είναι ότι οι σταθμοί με κεντρικό δέκτη έχουν ως συνηθέστερο εργαζόμενο ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας (HTF) τετηγμένα άλατα, με θερμικό κύκλο Rankine, ως θερμοκρασία εισόδου τους 290 °C και θερμοκρασία εξόδου τους 565 °C. Τυπική ισχύς είναι τα 50 MW και δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας οι 15 ώρες.

Οι σταθμοί με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες έχουν ως συνηθέστερο εργαζόμενο ρευστό μέσο μεταφοράς θερμότητας θερμικά έλαια/λάδια, ως θερμικό κύκλο επίσης Steam Rankine, ενώ ως θερμοκρασία εισόδου τους 293 °C και θερμοκρασία εξόδου τους 393 °C. Τυπική ισχύς είναι τα 60 MW και δυνατότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας οι 7,6 ώρες. Τέλος, οι κατά πολύ λιγότεροι σε αριθμό σταθμοί με γραμμικούς συλλέκτες Fresnel χρησιμοποιούν πιο συχνά νερό ενώ δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για την εγκατεστημένη ισχύ τους καθώς υπάρχουν σταθμοί από 0,3 MW και 10 MW έως 50 και 125 MW χωρίς να παρατηρείται κάποια επανάληψη σε συγκεκριμένη ονομαστική ισχύ. Το ίδιο συμβαίνει και με τη δυνατότητα αποθήκευσης που κυμαίνεται από 0,5 ώρες έως και 16.

Παρακάτω έχει επισυναφθεί στον παρακάτω πίνακα με στόχο να συγκεντρώσει και να συγκρίνει τις καταγεγραμμένες βασικές παραμέτρους των σταθμών όπως αυτές εμφανίζονται στην ιστοσελίδα του NREL, με αυτές που καταγράφονται συνήθως στη βιβλιογραφία. Οι όποιες αποκλίσεις παρατηρήθηκαν αρχικά οφείλονται στην παλαιότητα των βιβλιογραφικών αναφορών και κατά δεύτερον ενδεχομένως σε αδυναμία είτε του μελετητή της βιβλιογραφίας είτε του NREL να έχει πρόσβαση σε αρκετά δεδομένα.

Παράμετροι	ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΑ	ΠΥΡΓΟΣ	FRESNEL	ΔΙΣΚΟΥ	ΑΝΑΦΟΡΑ
Λόγος Συγκέντρωσης	70-80	>1000	>60	>1300	[184]
Θερμοκρασίες λειτουργίας (°C)	200-400	300-1000	50-300	120-1500	[184]
Τυπική απόδοση (%)	18	25-28	12	30	[184]
Καταγεγραμμένη Μέγιστη απόδοση σταθμού (%)	14-20	23-35	18	30	[184]
Μέση ισχύς ανά σταθμό (MW)	71	51	37	0.01-0.025	Πίνακες NREL
Εγκατεστημένη ισχύς συνολικά (MW)	5360.2	1520	241.7	-	Πίνακες NREL
Μέσος συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας	30.79	36.15	38.28	-	Πίνακες NREL
Μέγιστος συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας	57.08	62.79	68.49	-	Πίνακες NREL

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΤΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (GWh/year)	ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (W/m ²)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (%)	LCOE (\$/kWh)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΔΕΚΤΗ (°C)	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΞΟΔΟΥ ΔΕΚΤΗ (°C)	ΚΥΚΛΟΣ ΙΣΧΥΟΣ	ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΡΕΥΣΤΟ	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ (hrs)	ΕΚΤΑΣΗ ΠΕΛΑΓΙΟΥ (m ²)
AIRLIGHT ENERGY AIT-BAHA	SOUSS-MACA, MOROCCO	2014	3		2200			270	570	ORGANIC RANKINE	ΑΕΡΑΣ	5	6159
ANDASOL 1	ANDALUSIA, SPAIN	2008	50	158	2260	36.073	0.29	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Dowtherm A)	7.5	510120
ANDASOL 2	ANDALUSIA, SPAIN	2008	50	158	2260	36.073	0.29	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Dowtherm A)	7.5	510120
ANDASOL 3	ANDALUSIA, SPAIN	2008	50	158	2260	36.073	0.29	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	7.5	510120
ARCHIMEDE	SYRACUSE, SICILY, ITALY	2010	4.7	9.2	1936	22.345					Molten Salt		
ACROSOL	ANDALUSIA, SPAIN	2011	50	175	2007	39.954		293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	510120
ARENALES	SEVILLA, SPAIN	2013	50	166	2064	37.900		293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	510120
ASE DEMO	UMBRIA, ITALY	2013	0.4	0.28	1527	7.991		290	550	Steam Rankine	Molten Salt	4.27	3398
ASHALIM PLOT A /NEGEV ENERGY	NEGEV DESERT, ISRAEL	2019	110	415	2393	43.068	0.21		383	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	4.5	4000000
ASTE 1A	CIUDAD REAL, SPAIN	2012	50	170	2104	38.813	0.17	290	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	8	510120
ASTE 1B	CIUDAD REAL, SPAIN	2012	50	170	2104	38.813	0.17	290	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	8	510120
ASTEXOL	EXTREMADURA, SPAIN		50	170	2055	38.813	0.16	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	8	510120
BOKPOORT	NORTHERN CAPE, SOUTH AFRICA	2016	50	230	2949	52.511	0.22			Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	9.3	588600
CASABLANCA	EXTREMADURA, SPAIN	2013	50	160	2064	36.530	0.27	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	510120
CGN DELINGHA	Qinghai, China	2018	50	199	1950	45.434	0.13	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)		620000
CSNP URAT	INNER MONGOLIA, CHINA	2020	100	350	2170	39.954	0.1			Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	10	1150000
ENERSTAR	VALENCIANA, SPAIN	2013	50	100	1992	22.831	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		339506
EXTRESOL 1	EXTREMADURA, SPAIN	2010	50	158	2096	36.073	0.25	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	510120
EXTRESOL 2	EXTREMADURA, SPAIN	2010	50	158	2096	36.073	0.25	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	510120
EXTRESOL 3	EXTREMADURA, SPAIN	2012	50	158	2096	36.073	0.25	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	510120
GENESIS SOLAR ENERGY PROJECT	CALIFORNIA, UNITED STATES	2014	250	580	2676	26.484	0.19		393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)		1928320
GODAWARI	RAJHASTAN, INDIA	2013	50	118	1667	26.941	0.11	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Dowtherm A)		392400
GUZMAN	CORDOBA, SPAIN	2012	50	104	2064	23.744	0.32	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Dowtherm A)		310406
HELIOENERGY 1	SEVILLA, SPAIN	2011	50	95	2159	21.689	0.34	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
HELIOENERGY 1	SEVILLA, SPAIN	2012	50	95	2068	21.689	0.31	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
HELIOS 1	CASTILLA, SPAIN	2012	50	97	2092	22.146	0.27	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
HELIOS 2	CASTILLA, SPAIN	2012	50	97	2092	22.146	0.27	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Xceltherm)		300000
HOLANIKU	HAWAII, USA	2009	2	4	-	22.831		93	176	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Xceltherm)		
IBERSOL	CIUDAD REAL, SPAIN	2009	50	103	2042	23.516	0.27	304	391	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Dowtherm A)		287760
ILANGA 1	NORTHERN CAPE, SOUTH AFRICA	2018	100	320	2937	36.530	0.19	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	4.5	869800
KATHU SOLAR PARK	NORTHERN CAPE, SOUTH AFRICA	2019	100	500	2830	57.078	0.16	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		
KAXU SOLAR ONE	NORTHERN CAPE, SOUTH AFRICA	2015	100	330	2963	37.671	0.24			Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	2.5	800000
KVK ENERGY SOLAR PROJECT	RAJASTHAN, INDIA	2013	100		1940						ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	4	
LA AFRICANA	CORDOBA, SPAIN	2012	50	170	2062	38.813	0.28	293	393	Steam Rankine		7.5	550000
LA DEHESA	EXTREMADURA, SPAIN	2011	50	175	2069	39.954	0.24			Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	552750
LA FLORIDA	EXTREMADURA, SPAIN	2010	50	175	2086	39.954	0.24	298	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	552750
LA RISCALVARADO	EXTREMADURA, SPAIN	2009	50	105	2085	23.973	0.3	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)		352854

LEBRUJA 1	SEVILLA, SPAIN	2011	50	120	2065	27.397	0.34		395	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)		412020
MAJADAS 1	EXTREMADURA, SPAIN	2010	50	104.5	2086	23.858	0.3		393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)		372240
MANCHASOL 1	CIUDAD REAL, SPAIN	2011	50	158	2107	36.073	0.25	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	510120
MANCHASOL 2	CIUDAD REAL, SPAIN	2011	50	159	2107	36.301	0.25	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	510120
MEGHA SOLAR PLANT	ANANTAPUR, INDIA	2014	50	110	1476	25.114	0.12	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)		366240
MOJAVE SOLAR PLANT	CALIFORNIA, UNITED STATES	2014	280	600	2888	24.462	0.24			Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)		1559347
MORON	ANDALUSIA, SPAIN	2012	50	100	2068	22.831	0.36	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		380000
NATIONAL SOLAR THERMAL POWER FACILITY	GURGAON, INDIA	2012	1					293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)		8000
NEVADA SOLAR ONE	NEVADA, UNITED STATES	2007	72	134	2625	21.246	0.2				ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Dowtherm A)	0.5	357200
NOOR ENERGY 1 / DEWA IV	DUBAI, UNITED ARAB EMIRATES	2022	600		1967						ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Dowtherm A)	11	
NOOR I	DRAA-TAFILLET, MOROCCO	2015	160	370	2497	26.398	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Dowtherm A)	3	1308000
NOOR II	DRAA-TAFILLET, MOROCCO	2018	200	600	2503	34.247	0.16	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	7	1779900
OLIVENZA 1	EXTREMADURA, SPAIN	2012	50	100	2053	22.831	0.34	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		402210
ORELLANA	EXTREMADURA, SPAIN	2012	50	118	2074	26.941	0.25	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		405500
PALMA DEL RIO I	ANDALUSIA, SPAIN	2011	50	114.5	2064	26.142	0.29		393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)		372240
PALMA DEL RIO II	ANDALUSIA, SPAIN	2010	50	115.5	2064	26.370	0.28		393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)		372240
SAGUARO	ARIZONA, UNITED STATES	2006	1	2		22.831		120	300	Organic Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Xceltherm)		10340
SHAGAYA	KUWAIT	2019	50	180		41.096	0.17			Steam Rankine		9	
SHAMS 1	ABU DHABI, UNITED ARAB EMIRATES	2013	100	210	2019	23.973	0.27	300	400	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)		627840
SOLABEN 1	EXTREMADURA, SPAIN	2013	50	100	2076	22.831	0.3	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
SOLABEN 2	EXTREMADURA, SPAIN	2012	50	100	2076	22.831	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
SOLABEN 3	EXTREMADURA, SPAIN	2012	50	100	2076	22.831	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
SOLABEN 6	EXTREMADURA, SPAIN	2013	50	100	2076	22.831	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
SOLACOR 1	ANDALUSIA, SPAIN	2012	50	100	2042	22.831	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
SOLACOR 2	ANDALUSIA, SPAIN	2012	50	100	2042	22.831	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
SOLANA	PHOENIX, ARIZONA, UNITED STATES	2013	250	944	2784	43.105	0.2	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)	6	2200000
SOLNOVA 1	SEVILLA, ANDALUSIA, SPAIN	2009	50	113.52	2076	25.918	0.3		393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
SOLNOVA 3	SEVILLA, ANDALUSIA, SPAIN	2009	50	113.52	2076	25.918	0.3		393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
SOLNOVA 4	SEVILLA, ANDALUSIA, SPAIN	2009	50	113.52	2076	25.918	0.3		393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		300000
STILLWATER GEOSOLAR HYBRID PLANT	NEVADA, UNITED STATES	2015	2	3		17.123				Organic Rankine	NEPO		
TERMESOL 50	CADIZ, ANDALUSIA, SPAIN	2011	50	175	2007	39.954	0.21	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide)	7.5	510120
TERMESOL 1	BADAJOS, EXTREMADURA, SPAIN	2013	50	180	2077	41.096	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	9	523200
TERMESOL 2	BADAJOS, EXTREMADURA, SPAIN	2013	50	180	2077	41.096	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	9	523200
THAI SOLAR ENERGY 1	KANCHANABURI, THAILAND	2012	5	8		18.265		201	340		NEPO		45000
XINA SOLAR ONE	NORTHERN CAPE, SOUTH AFRICA	2018	100	380	2960	43.379	0.2			Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι	5.5	850000
ISCC HASSI R' MEL	LAGHOUAT, ALGERIA	2011	20		2159	0.000		293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		183860
Aalborg CSP-Brønderslev	NORTH JUTLAND, DENMARK	2016	5.5		1025	0.000		252	312	Organic Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)		26929
Borges Termosolar	CATALONIA, SPAIN	2012	22.5		1878	0.000	0.42	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΑΑΔι		183120

Martin Next Generation Solar Energy Center	FLORIDA, UNITED STATES	2010	75	155	1799	23.592	0.3			Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ (Biphenyl/Diphenyl oxide: Dowtherm A)		464908
Agua Prieta II	SONORA, MEXICO	2017	12								ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ		85000
City of Medicine Hat ISCC Project	MEDICINE HAT, CANADA	2014	1.1	1.5							ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ (Biphenyl/Diphenyl oxide: Xceltherm)		5248
ISCC Ain Beni Mathar	ORIENTAL MOROCCO	2011	20	55	2072	31.393			393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)		183120
ISCC Green Duba 1	TABUK, SOUTH AFRICA	2023	43		2469	0.000				Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ		
ISCC Waad Al Shamal	WAAD AL SHAMAL, SAUDI ARABIA	2018	50		2521					Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ		
ISCC Kuraymat	KURAYMAT, EGYPT	2011	20	34	2154	19.406		293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)		130800
MEFITO		2023	600	944	2963	57.077625	0.1	304	570	-	0	11	4000000
MEZO		2012.49	70.7097222	182.8902	2175.7424	30.785630	0.247627	283.705	392.46667	-	-	6.873428571	580480.307
ΠΙΟ ΣΥΝΗΘΕΣ		2012	50	100	2076	22.8310502	0.28	293	393	Steam Rankine	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ	7.5	510120

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά των σταθμών με παραβολικούς κοίλους συλλέκτες παγκοσμίως [185].

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΕΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΤΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (MW) ₂	ΑΝΑΜΕΝΟΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (GWh/year)	ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (W/m ²)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (%)	LCOE (\$/kWh)	ΚΥΚΛΟΣ ΙΣΧΥΟΣ	ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΡΕΥΣΤΟ	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ (t/yr)	ΕΚΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ (m ²)	ΥΨΟΣ (m)
ACME SOLAR TOWER	RAJASTHAN INDIA	2011	2.5					STEAM RANKINE	NEPO		16222	
ASHALIM PLOT B/MEGALIM	ASHALIM, ISRAEL	2019	121	320	2393	30.190	0.23		NEPO		1052480	240
ATACAMA I / CERRO DOMINADOR	ANTOFAGASTA, CHILE	2021	110		3186	0.000		STEAM RANKINE	ΤΕΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΖ	17.5	1484000	243
BADALING DAHAN	BADALING, CHINA	2012	1	1.9	1290	21.689		STEAM RANKINE	NEPO		10000	118
CEEC HAMI	XINJIANG, CHINA	2019	50	198.4	1789	45.297	0.1			13	696751	220
CRESCENT DUNES	NEVADA, USA	2015	110	500	2734	51.889	0.18	STEAM RANKINE	ΤΕΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΖ	10	1197148	195
CRS SALES	SEVILLA, SPAIN	2012	5			0.000			ΤΕΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΖ		10560	
GEMASOLAR	SEVILLA, SPAIN	2011	20	110	2072	62.785	0.28	STEAM RANKINE	ΤΕΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΖ(SODIUM & POTASSIUM NITRATE)	15	304750	140
GENERATION 3 PARTICLE SANDIA	NEW MEXICO, USA	2025	1			0.000		sCO ₂ brayton	ΔΙΟΞΕΙΔΙΟ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ	6		60
GENERATION 3 PARTICLE SAUDI	WAAD AL-SHAMAL, SAUDI ARABIA	2026	2	6	2592	34.247		Air Brayton	WHITE SAND	6	16000	52
GREENWAY CSP MERSIN	MERSIN, TURKEY	2012	1.4			0.000		STEAM RANKINE	NEPO			
IVANPAH	CALIFORNIA, USA	2014	377	1079	2768	32.672	0.19	STEAM RANKINE	NEPO		2600000	140
JEMALONG	NEW SOUTH WALES, AUSTRALIA	2017	1.1	2.2		22.831	0.64		LIQUID SODIUM	3	15000	30
JULICH	RHINE-WESTFALIA, GERMANY	2008	1.5			0.000			ΑΕΡΑΣ	1.5	17650	60
KHI SOLAR ONE	NORTHERN CAPE, SOUTH AFRICA	2016	50	180	2952	41.096	0.22	STEAM RANKINE	NEPO/ΑΤΜΟΣ	2	576800	
LAKE CARCELLIGO	NEW SOUTH WALES, AUSTRALIA	2011	3			0.000		STEAM RANKINE	NEPO		6080	
LUNENG HAIKI	HAIKI, QINGHAI, CHINA	2019	50	160	1945	36.530	0.09	STEAM RANKINE	ΤΕΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΖ	12	610000	188

NATIONAL SOLAR THERMAL TEST FACILITY	NEW MEXICO, USA	1978	5			0.000						
NOOR ENERGY 1 / DEWA IV	DUBAI, UAE	2023	100		1967	0.000		STEAM RANKINE	TETHΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	15		
NOOR III	DRAA-TAFILALET, MOROCCO	2018	150	500	2508	38.052	0.15	STEAM RANKINE	TETHΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	7	1312000	
PLANTA SOLAR 10 - PS10	SEVILLA, SPAIN	2007	11	23.4	2076	24.284	0.21		NEPO	1	75000	
PLANTA SOLAR 20 - PS20	SEVILLA, SPAIN	2009	20	48	2076	27.397	0.26		NEPO	1	150000	165
POWER CHINA QINGHAI GONGHE	HAINAN, QINGHAI, CHINA	2019	50	157	1883	35.845	0.1	STEAM RANKINE	TETHΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	6	516000	
REDSTONE	NORTHERN CAPE, SOUTH AFRICA	2023	100	466		53.196	13		TETHΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	12		
SEDC	ISRAEL	2008	6			0.000			NEPO/ΑΤΜΟΣ			60
SHOUHANG DUNHUANG PHASE I	JIUQUAN, GANSU, CHINA	2016	10		1777	0.000			TETHΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	15	175375	
SHOUHANG DUNHUANG PHASE II	JIUQUAN, GANSU, CHINA	2018	100	483	1777	55.137	0.08	STEAM RANKINE	TETHΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	11	1400000	263
SUNDROP	PORT AUGUSTA, AUSTRALIA	2016	1.5	1.7		12.938		STEAM RANKINE	NEPO		51505	127
SUPCON DELINGHA 10 MW	HAIKI, QINGHAI, CHINA	2013	10	24	2043	27.397	0.09	STEAM RANKINE	NEPO	2	63000	
SUPCON DELINGHA 50 MW	HAIKI, QINGHAI, CHINA	2018	50	146	2043	33.333	0.09	STEAM RANKINE	TETHΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	7	542700	200
MAX		2026	377	1079	3186	62.7853	0.08	-	-	17.5	2600000	263
AVERAGE		2012	50.66	231.926	2203.7368	36.1476	0.994375	-	-	8.15	537459.2083	147.117

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά των σταθμών με πύργο ηλιακής ισχύος παγκοσμίως [185].

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΤΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (GWh/year)	ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (W/m ²)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (%)	LCOE (\$/kWh)	ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΡΕΥΣΤΟ	ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (hrs)	ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ (hrs)	ΕΚΤΑΣΗ ΠΕΔΙΟΥ (m ²)
Augustin Fresnel 1	OCCITANIE, FRANCE	2012	0.3		1800	0.000		ΝΕΡΟ		0.25	400
Dhursar	RAJASTHAN, INDIA	2014	125	280	1742	25.571	0.11	ΝΕΡΟ			
eLLO Solar Thermal Project	OCCITANIE, FRANCE	2019	9	20.2	1930	25.622		ΝΕΡΟ		3	153000
Huaqiang TeraSolar	ZHANGJIAKOU, CHINA	2018	15		1767	0.000	0.12		ΣΤΕΡΕΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	14	1700000
Lanzhou Dacheng 10MW	JIUQUAN, CHINA	2016	10	60	1786	68.493		ΤΕΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	ΤΕΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	16	
Lanzhou Dacheng 50MW	JIUQUAN, CHINA	2020	50	214	1786	48.858	0.1	ΤΕΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ	ΤΕΤΗΓΜΕΝΟ ΑΛΑΣ (ΑΜΕΣΗΣ 2 ΔΕΞΑΜΕΝΩΝ)	15	1270000
Puerto Errado 1	MURCIA, SPAIN	2009	1.4	2		16.308					
Puerto Errado 2	MURCIA, SPAIN	2012	30	49	1996	18.645	0.3	ΝΕΡΟ	ΘΕΡΜΟΚΛΙΝΗ	0.5	302000
Rende-CSP	CALABRIA, ITALY	2013	1	3		34.247		ΔΙΑΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ			9780
ΜΕΓΙΣΤΟ		2020	125	280	1996	68.493	0.1	0	0	16	1700000
ΜΕΣΟ		2015.3	36.67	113.525	1850.38	30.624	0.146	0	0	9.25	733597

Πίνακας 5.3: Χαρακτηριστικά των σταθμών με γραμμικούς συλλέκτες Fresnel παγκοσμίως [185].

5.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Κατά την περίοδο 2010-2022, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του κόστους για όλα τα νέα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας συμπεριλαμβανομένων και των σταθμών με συγκεντρωτικούς συλλέκτες (CSP). Το ισοσταθμισμένο μέσο κόστος μειώθηκε κατά 69%, περνώντας από 0,38 USD/kWh σε 0,118 USD/kWh (βλ. Πίνακα 5.4).

Το Levelized Cost of Energy (LCOE) ή ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας είναι ένα χρήσιμο μέγεθος για την αξιολόγηση της ανταγωνιστικότητας και της αποδοτικότητας των έργων παραγωγής ενέργειας, που πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη στις μελέτες και στην αγορά ενέργειας. Οι διακυμάνσεις του LCOE δεν αποτυπώνουν πλήρως την αξία μιας τεχνολογίας, καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη τις ευελιξίες που προσφέρει. Για παράδειγμα, η CSP με αποθήκευση μπορεί να εκμεταλλευτεί την υψηλή αξία της παραγωγής κατά τις περιόδους υψηλού κόστους ενέργειας, ανεξάρτητα από την ηλιοφάνεια.

Επίσης, το LCOE δεν λαμβάνει υπόψη πηγές εσόδων ή κόστους εκτός από την παραγωγή ενέργειας. Κάποιες τεχνολογίες, όπως η υδροηλεκτρική και η CSP με αποθήκευση, μπορούν να εξασφαλίσουν έσοδα από επικουρικές υπηρεσίες δικτύου σε μεταγενέστερο χρόνο.

Σε γενικές γραμμές, η CSP διανύει μια περίοδο αστάθειας, αλλά η εξέλιξη της τεχνολογίας και η υποστήριξη πολιτικών μπορεί να οδηγήσουν σε περαιτέρω ανάπτυξη.

TOTAL INSTALLED COSTS (USD/kW)		CAPACITY FACTOR (%)		LCOE (USD/KWh)		
2010	2022	2010	2022	2010	2022	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ
10082	4274	30	36	0.38	0.118	0.39345

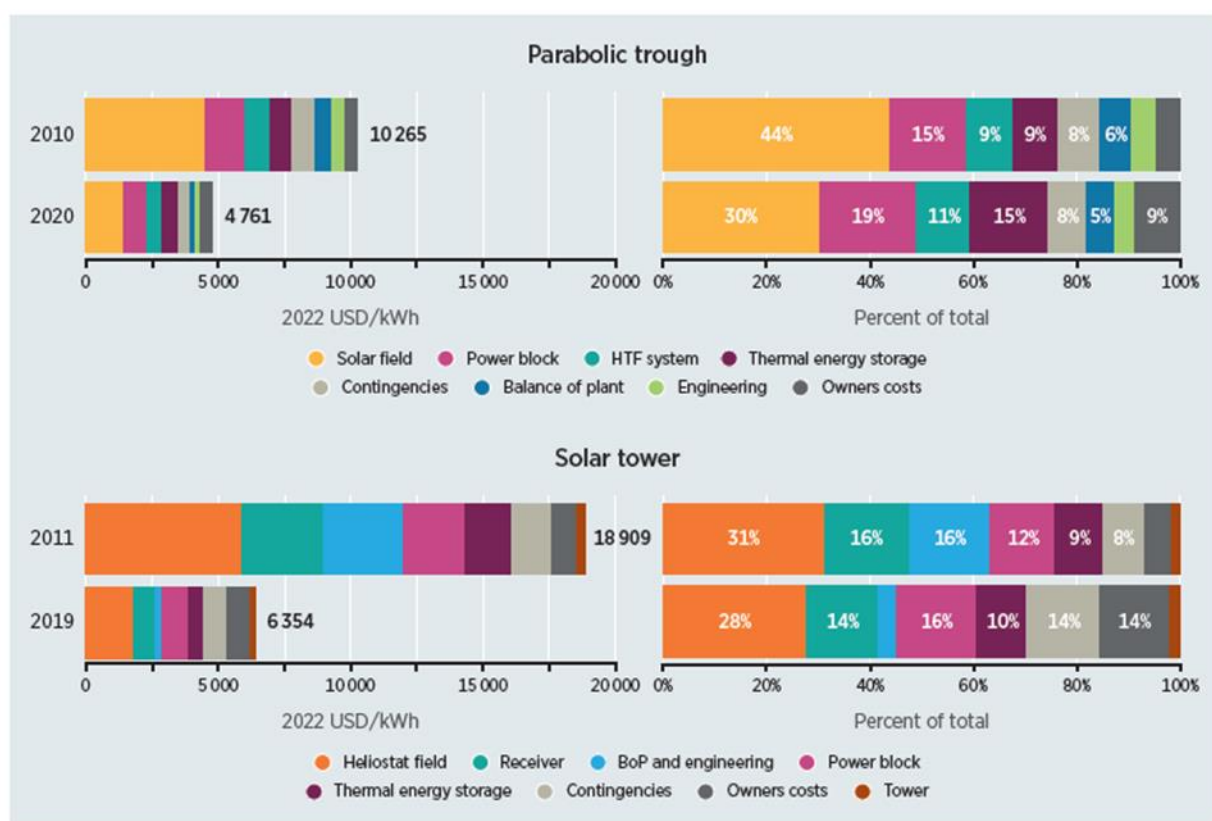
Πίνακας 5.4: Συνολικό κόστος εγκατάστασης, Συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας και LCOE από 2010 σε 2022. [186]

Η ανάπτυξη της CSP παραμένει ισχνή, με ούτε 0,1 GW να προστίθενται το 2022 και ακόμα λιγότερα, μόλις 243MW, ενώ η παγκόσμια συνολική εγκατεστημένη ισχύς να ανέρχεται σε 6,743 GW στο τέλος του 2023. Παρά τον χαμηλό ρυθμό ανάπτυξης, οι μειώσεις του κόστους ήταν σαφώς ορατές μεταξύ 2010 και 2020, παρά τη μεταβλητότητα. Ωστόσο, από το 2020 και μετά, η θέση σε λειτουργία έργων που είτε καθυστέρησαν είτε περιλάμβαναν νέους σχεδιασμούς είδε το παγκόσμιο σταθμισμένο μέσο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας να παραμένει στάσιμο. Ένα βασικό αίτιο αποτέλεσε η εξάπλωση του COVID-19 και η απότομη παύση λειτουργιών σε όλες τις πτυχές της οικονομικής και μη ζωής για πολλούς μήνες.

Μεταξύ 2010 και 2020, η μείωση του παγκόσμιου σταθμισμένου μέσου LCOE οφείλεται κυρίως στη μείωση του συνολικού κόστους εγκατάστασης (μείωση 64%), στους υψηλότερους συντελεστές δυναμικότητας (αύξηση 17%), στο χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (O&M) (μείωση 10%) και στη μείωση του ισοσταθμισμένου μέσου κόστους κεφαλαίου (μείωση 9%). Στο διάστημα αυτό επίσης, το μέσο παγκόσμιο συνολικό κόστος εγκατάστασης για CSP μειώθηκε σε 5079 USD/kW. Αυτό επιτεύχθηκε σε ένα περιβάλλον όπου οι δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας του έργου αυξάνονταν συνεχώς. Καθώς η τεχνολογία βελτιώθηκε, το κόστος για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας μειώθηκε και ο μέσος αριθμός ωρών αποθήκευσης για τα έργα που τέθηκαν σε λειτουργία αυξήθηκε. Σήμερα, οι μονάδες CSP περιλαμβάνουν σχεδόν αποκλειστικά και συστήματα θερμικής αποθήκευσης χαμηλού κόστους και μεγάλης διάρκειας. Πράγματι, αυτή είναι συνήθως η επιλογή με το χαμηλότερο κόστος και την υψηλότερη οικονομική υπεραξία, επειδή η αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι πλέον ένας οικονομικά αποδοτικός τρόπος για την αύξηση των συντελεστών ισχύος της CSP.

Στα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης των εγκαταστάσεων CSP, η προσθήκη αποθήκευσης θερμικής ενέργειας ήταν συχνά ασύμφορη και γενικά αδικαιολόγητη, οπότε η χρήση της ήταν περιορισμένη. Από το 2015, ωστόσο, σχεδόν κανένα έργο δεν έχει κατασκευαστεί ή σχεδιαστεί χωρίς αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Η προσθήκη της είναι πλέον ένας οικονομικά αποδοτικός τρόπος για την αύξηση των συντελεστών δυναμικότητας, ενώ συμβάλλει επίσης σε χαμηλότερο LCOE και σε μεγαλύτερη ευελιξία στην κατανομή κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Η μέση χωρητικότητα θερμικής αποθήκευσης για ηλιοθερμικούς σταθμούς στη βάση δεδομένων του IRENA για το κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αυξήθηκε από 3,5 σε 11 ώρες μεταξύ 2010 και 2020 [186]. Το έργο *Cerro Dominador 110 MW ST*, το οποίο τέθηκε σε λειτουργία το 2021 και βρίσκεται στην έρημο Atacama της Χιλής, διαθέτει χωρητικότητα αποθήκευσης 17,5 ωρών, που είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σε ένα σταθμό.



Σχήμα 5.8: Συνολικό κόστος εγκατάστασης ανά παράμετρο σταθμού CSP [186].

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης τόσο για τις μονάδες παραβολικών κοίλων όσο και για τις μονάδες ηλιακού πύργου κυριαρχείται από το κόστος των εξαρτημάτων που συνθέτουν το ηλιακό πεδίο. Το 2010, το κόστος του ηλιακού πεδίου μιας μονάδας παραβολικών κοίλων υπολογιζόταν σε 4503 USD/kW (44% του συνολικού κόστους εγκατάστασης), αλλά μέχρι το 2020, το ποσοστό αυτό είχε μειωθεί κατά 68% σε 1440 USD/kW (30% του συνολικού κόστους). Με μια τόσο σημαντική μείωση του κόστους για το ηλιακό πεδίο, άλλοι τομείς κόστους με μικρότερη μείωση είδαν το μερίδιό τους επί του συνολικού κόστους εγκατάστασης να αυξάνεται. Το μερίδιο του μπλοκ ισχύος, για παράδειγμα, αυξήθηκε από 15% το 2010 σε 19% το 2020, παρά το γεγονός ότι το κόστος του μειώθηκε κατά 40% την ίδια περίοδο, από 1 499 USD/kW σε 892 USD/kW. Το ίδιο ισχύει και για το σύστημα ρευστών μεταφοράς θερμότητας, το οποίο αύξησε το μερίδιό του από 9% σε 11%, παρά το γεγονός ότι το κόστος ανά kW μειώθηκε κατά 47% κατά την περίοδο 2010-2020, από 948 USD/kW σε 503 USD/kW. Αυτό συνέβη και για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Το μερίδιο αυτού του στοιχείου στο συνολικό κόστος εγκατάστασης αυξήθηκε από 9% το 2010 σε 15% το 2020, παρά το γεγονός ότι το ίδιο το κόστος μειώθηκε από 873 USD/kW σε 706 USD/kW. Ταυτόχρονα, κατά την ίδια περίοδο, το μερίδιο του κόστους του ιδιοκτήτη αυξήθηκε από 5% σε 9%, με μεταβολή της απόλυτης τιμής από 465 USD/kW σε 427 USD/kW (βλ. Σχήμα 5.8).

Κατά την περίοδο 2010-2020, το κόστος του υπολοίπου των εγκαταστάσεων, των τεχνικών έργων και των απρόβλεπτων δαπανών (Contingencies) για τις μονάδες παραβολικών κοίλων μειώθηκε κατά 60%, 64% και 57% αντίστοιχα.

Ως αποτέλεσμα, κατά την ίδια περίοδο, το μερίδιο του ισοζυγίου εγκαταστάσεων στο συνολικό κόστος εγκατάστασης μειώθηκε από 626 USD/kW (6% του συνόλου) σε 252 USD/kW (5%), ενώ το κόστος μηχανικής μειώθηκε από 507 USD/kW (5% του συνόλου) σε 180 USD/kW (4%). Ένα μέτρο για το πόσο πολύ έχει μειωθεί το σταθμισμένο μέσο συνολικό κόστος εγκατάστασης των σταθμών παραβολικών κοίλων είναι το γεγονός ότι το κόστος μόνο του ηλιακού πεδίου το 2010 ήταν μόνο 5% χαμηλότερο από το σταθμισμένο μέσο συνολικό κόστος εγκατάστασης το 2020 [186].

Για τους σταθμούς η, η σύγκριση αυτή είναι πολύ παρόμοια, με το κόστος του ηλιοστατικού πεδίου το 2010 να είναι μόνο 7% χαμηλότερο από τη σταθμισμένη μέση τιμή του συνολικού εγκατεστημένου κόστους ηλιακού πύργου το 2019. Κατά τη διάρκεια αυτής της δεκαετίας, η μείωση του κόστους του πεδίου ηλιοστάτη ήταν σημαντική, με το κόστος να μειώνεται κατά 70% μεταξύ 2011 και 2019, από 5 916 USD/kW σε 1 768 USD/kW. Αυτό οδήγησε στη μείωση του μεριδίου του πεδίου στο συνολικό κόστος εγκατάστασης από 31% σε 28%. Το κόστος του δέκτη μειώθηκε κατά 71% την περίοδο 2011-2019, από 3 069 USD/kW σε 876 USD/kW, με το μερίδιο του δέκτη στο συνολικό κόστος να μειώνεται από 16% σε 14%. Το ισοζύγιο εγκαταστάσεων και μηχανικής σημείωσε ωστόσο τη μεγαλύτερη μείωση, η οποία μειώθηκε κατά 93% κατά την ίδια περίοδο, από 3 001 USD/kW σε 219 USD/kW. Έτσι, το μερίδιο του παράγοντα αυτού στο συνολικό κόστος μειώθηκε από 16% σε μόλις 3% [186].

Οι απρόβλεπτες δαπάνες παραμένουν ένα σημαντικό στοιχείο του συνολικού κόστους για τους ηλιακούς πύργους. Αυτό συμβαίνει παρά τη μείωση του κόστους τους κατά 42% μεταξύ 2011 και 2019, από 1 520 USD/kW σε 878 USD/kW. Το 2019, οι απρόβλεπτες δαπάνες για τα STs αποτελούσαν το 14% του συνολικού κόστους. Για τους σταθμούς PTC, τα στοιχεία για το 2020 τοποθετούν το μερίδιο αυτό στο 8%. Τα απρόβλεπτα κόστη για ηλιακούς πύργους είναι συχνά υψηλότερα ανά κιλοβάτ, καθώς η εμπειρία με ηλιακούς πύργους παραμένει σχετικά περιορισμένη (αν και έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια). Ωστόσο, επειδή εξακολουθεί να υπάρχει μεγαλύτερη αβεβαιότητα όσον αφορά σταθμούς ηλιακών πύργων απ' ό,τι για τους σταθμούς παραβολικών κοίλων, το κόστος των ιδιοκτητών για τους ηλιακούς πύργους μειώθηκε μόνο κατά 12% μεταξύ 2011 και 2019, με το μερίδιό τους στο συνολικό κόστος να αυξάνεται σε 14% το 2019 (από 5% το 2010).

Μεταξύ του 2010 και του 2020, η σταθμισμένη μέση τιμή του συνολικού κόστους εγκατάστασης για τους σταθμούς CSP στη βάση δεδομένων του IRENA για το κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώθηκε κατά περίπου 50% και έφθασε τα 5 079 USD/kW. Το εν λόγω σχήμα μειώθηκε στη συνέχεια σε 4 274 USD/kW το 2022, το οποίο αντιπροσωπεύει μείωση 58% από το 2010.



Σχήμα 5.9: Συνολικά κόστη εγκατάστασης CSP ανά τεχνολογία, χωρητικότητα αποθήκευσης και μέγεθος ονομαστικής ισχύος [186].

Το συνολικό εγκατεστημένο κόστος αυξήθηκε σε 9 728 USD/kW το 2021, προτού μειωθεί σε 4 274 USD/kW το 2022.

Το πρόγραμμα, το οποίο ξεκίνησε το 2016 στην Κίνα και αποσκοπούσε στην ανάπτυξη δυναμικότητας 1,35 GW, είχε αρχικά ως στόχο την ολοκλήρωσή του έως το 2018, αλλά αναμφίβολα το χρονοδιάγραμμα αυτό ήταν υπερβολικά φιλόδοξο. Με μέσο συνολικό κόστος εγκατάστασης 5079 USD/kW το 2020, το κόστος ήταν 31% χαμηλότερο από τον ομέσο όρο των 782 USD/kW για τα έργα που τέθηκαν σε λειτουργία το 2019 [186].

Κατά τη διάρκεια του 2018 και του 2019, η βάση δεδομένων του IRENA για το κόστος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δείχνει ένα εύρος κόστους κεφαλαίου μεταξύ 3 571 USD/kW και 9 699 USD/kW για έργα CSP με χωρητικότητα αποθήκευσης μεταξύ τεσσάρων και οκτώ ωρών [186].

Με την ανάπτυξη κατά την περίοδο 2010-2012 να κυριαρχείται από την Ισπανία - και να αποτελείται κυρίως από μονάδες PTC - ο παγκόσμιος σταθμισμένος μέσος όρος LCOE ανά έργο μειώθηκε ελάχιστα, αν και εντός ενός διευρυνόμενου εύρους, καθώς νέα έργα τέθηκαν σε λειτουργία. Αυτό άλλαξε το 2013, όταν εμφανίστηκε μια σαφής πτωτική τάση στον LCOE των έργων, καθώς η αγορά διευρύνθηκε, αποκτήθηκε εμπειρία και άρχισαν να επιδρούν οι πιο ανταγωνιστικές προμήθειες. Αντί να οδηγούν τα αποτελέσματα της τεχνολογικής μάθησης από μόνα τους στη μείωση του LCOE των έργων από το 2013 και μετά, έπαιξε επίσης ρόλο η μετατόπιση της ανάπτυξης σε περιοχές με υψηλότερα DNI κατά την περίοδο 2013-2015 [189].

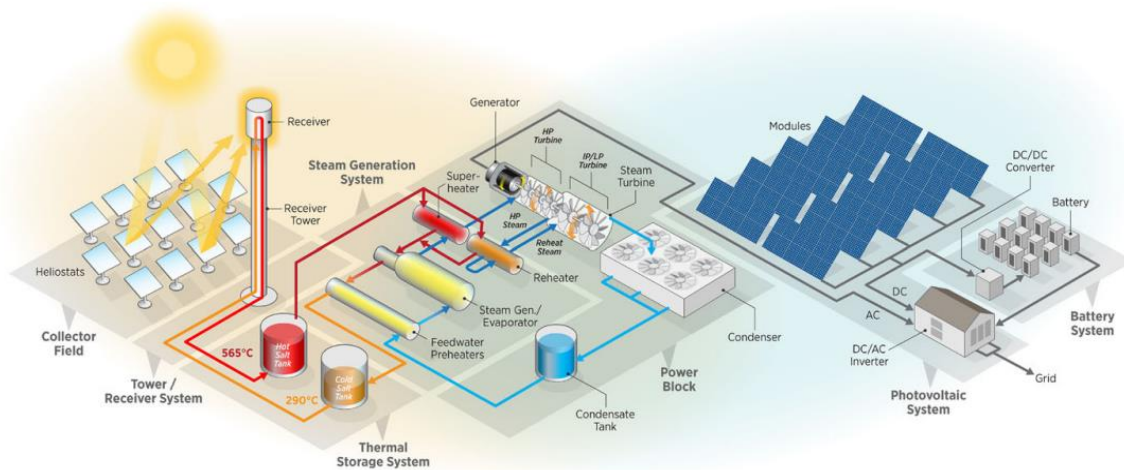
Κατά την περίοδο 2016 έως 2019, το κόστος συνέχισε να μειώνεται και η θέση σε λειτουργία έργων στην Κίνα έγινε εμφανής, με τα έργα που τέθηκαν σε λειτουργία εκεί το 2018 και μετά να επιτυγχάνουν εκτιμώμενο LCOE μεταξύ 0,08 USD/kWh και 0,14 USD/kWh. Κατά τη διάρκεια του 2022, η ανάπτυξη μετατοπίστηκε στην Κίνα, και με τη χαμηλότερη δομή του κόστους της είδε τη σταθμισμένη μέση τιμή του συνολικού εγκατεστημένου κόστους να μειώνεται στα 4 274 USD/kW.

5.3 ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ Α.Π.Ε. ΜΕ ΣΤΑΘΜΟΥΣ CSP

Στα υβριδικά συστήματα, τόσο οι ανεμογεννήτριες όσο και τα φωτοβολταϊκά αποθηκεύουν την ενέργειά τους στο TES του σταθμού CSP μέσω ενός ηλεκτρικού θερμαντήρα ή σε ένα ξεχωριστό σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, ώστε να αποφεύγονται πρακτικές περικοπές της ηλεκτρικής ενέργειας [103] και να κατανέμεται η ηλεκτρική ενέργεια ανάλογα με τις ανάγκες. Όταν υπάρχει έλλειμμα σε ένα είδος διαθέσιμων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, άλλες τεχνολογίες, όπως οι γεωθερμικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας, μπορούν να λειτουργούν παράλληλα με τους σταθμούς CSP για τη βελτίωση της απόδοσης. Η παραγωγή

ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά και αιολικά συστήματα ανακτάται από έναν μηχανισμό ηλεκτρικής θέρμανσης για τη θέρμανση του ηλιακού άλατος στο TES αμέσως μόλις αρχίσουν να λειτουργούν. Η θερμική ενέργεια από το σύστημα CSP και ο μηχανισμός ηλεκτρικής θέρμανσης που παράγεται από την απόρριψη ισχύος των φωτοβολταϊκών και αιολικών συστημάτων αποθηκεύονται αμφότερα στο TES. Η χωρητικότητα του TES μπορεί να ενισχυθεί εν τω μεταξύ για την αποθήκευση πρόσθετης θερμικής ενέργειας κατά τη διάρκεια κακοκαιρίας. Για την ικανοποίηση της ζήτησης φορτίου και την αντιμετώπιση της αναντιστοιχίας, το σύστημα CSP μπορεί να κατανέμει την ηλεκτρική ενέργεια με ευέλικτο τρόπο. Επί του παρόντος, υπάρχουν δύο υβριδικά έργα PV-CSP υπό κατασκευή στην Κίνα και τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται ορισμένες από τις προδιαγραφές αυτών των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

5.3.1 Υβριδικά CSP/Αιολικά, CSP/ΦΒ με αποθήκευση θερμικής ενέργειας



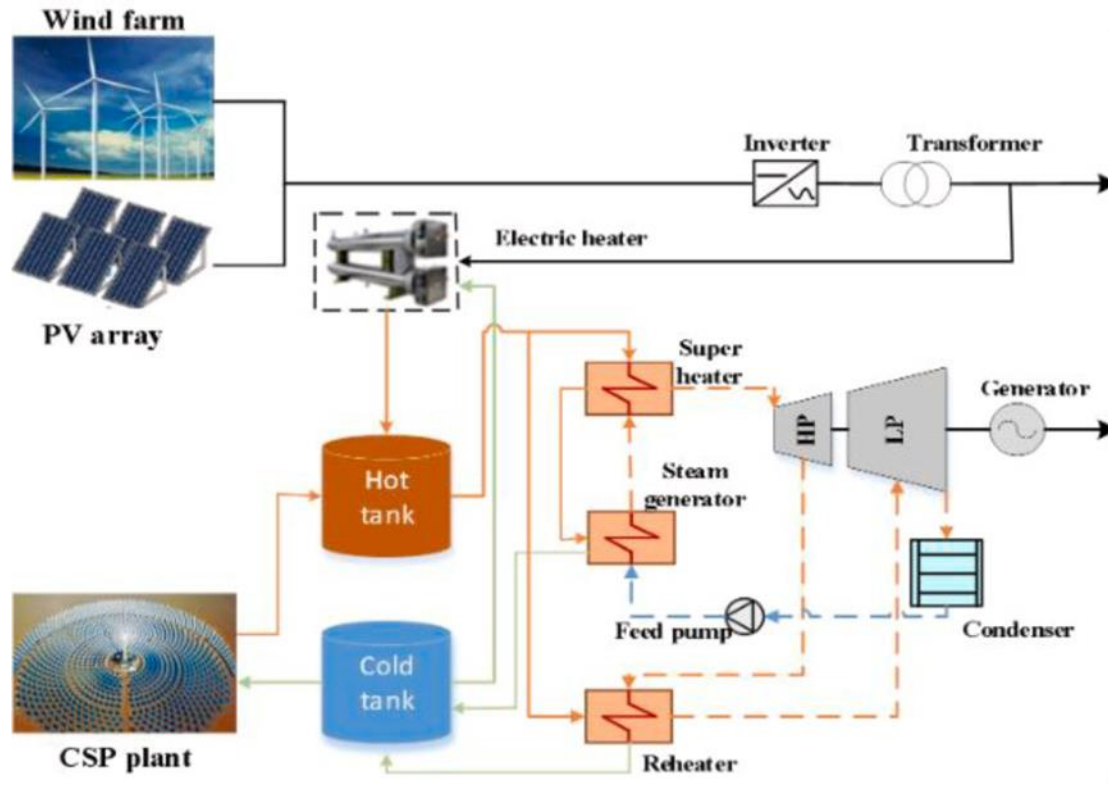
Σχήμα 5.10: Διαμόρφωση υβριδικού συστήματος CSP-Θερμ.Αποθήκευσης-Φ/Β-Μπαταρίας (γραφική απεικόνιση NREL/AI Hicks). Αριστερά, το σύστημα αποτελείται από μια μονάδα CSP με ηλιακό πύργο τετηγμένου άλατος, η οποία αποτελείται από ένα πεδίο ηλιοστάτη, δέκτη τετηγμένου άλατος, αποθήκευση θερμικής ενέργειας και έναν κύκλο ισχύος Rankine. Στα δεξιά, το σύστημα αποτελείται από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με αποθήκευση μπαταριών. Το σύστημα που απεικονίζεται δεν περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για τον έλεγχο ή τη λειτουργία [196].

Το έργο CSP 800 MW Midelt στο Μαρόκο είναι ο πρώτος υβριδικός σταθμός ΦΒ-CSP που χρησιμοποιεί ηλεκτρικό θερμαντήρα για την αποθήκευση της ενέργειας που παράγεται από Φ/Β. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ΦΒ θα χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του

λιωμένου άλατος και στη συνέχεια θα αποθηκευτεί στον TES. Αρχικά, το έργο επρόκειτο να ενσωματώσει φωτοβολταϊκά με μπαταρίες ως εφεδρικό σύστημα για την κάλυψη των αναγκών κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς και μια μονάδα CSP με θερμική αποθήκευση για την κάλυψη της νυχτερινής ζήτησης. Υπάρχει επίσης το CSP1 Sicily Partanna MS-LFR με 4.26 MW εγκατεστημένης ισχύος CSP, στη Σικελία της Ιταλίας. Κατασκευάζονται σήμερα παράλληλα τα CSP2 SOLINPAR Sicily Stromboli MS-LFR με 4 MW Fresnel, CSP3 BILANCIA Sicily MS-LFR με 4 MW Fresnel επίσης στη Σικελία.

Παρ' όλα αυτά, έχει αποδειχθεί ότι η χρήση της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και για τις δύο μονάδες μπορεί να μειώσει το LCOE του έργου σε 0,07 \$/kWh. Εάν η ενεργειακή ζήτηση είναι υψηλή σε σύγκριση με τη διαθέσιμη αποθήκευση ενέργειας και τους πρωτεύοντες πόρους, η υβριδική τεχνολογία CSP ικανοποιεί τις απαιτήσεις προβλεψιμότητας και αποσυνδεσιμότητας [195]. Μελέτες διαφορετικών διαμορφώσεων υβριδικού συστήματος CSP/ΦΒ και αποθήκευσης θερμότητας, με και χωρίς BESS (Battery Energy Storage System), χρησιμοποιώντας σταθερό επίπεδο και σύστημα παρακολούθησης για το φωτοβολταϊκό σύστημα διαπίστωσαν ότι η χαμηλότερη επιτευχθείσα LCOE του υβριδικού συστήματος βρέθηκε να είναι 0,0772 \$/kWh και 0,0750 \$/kWh για το σταθερό σύστημα και το σύστημα παρακολούθησης αντίστοιχα χωρίς τη χρήση BESS. Ωστόσο, η ενσωμάτωση του BESS στο υβριδικό σύστημα αύξησε τον συντελεστή δυναμικότητας του συστήματος κατά 7 έως 8% περίπου, αλλά αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση και του LCOE κατά 0,012 \$/kWh για το υβριδικό σύστημα. Οι C. A. Pan και F. Dinter [107] παρουσίασαν έναν υβριδικό σταθμό που συνδυάζει εγκαταστάσεις PV και CSP με κεντρικό δέκτη. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις μεμονωμένων εγκαταστάσεων ΦΒ και CSP και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα προσομοίωσης της προτεινόμενης υβριδικής εγκατάστασης CSP-ΦΒ. Σύμφωνα με τα ευρήματα, είναι δυνατή η αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας και των συντελεστών δυναμικότητας έως και 90%. Επιπλέον, το μέγεθος του συστήματος και οι δαπάνες μπορούν να μειωθούν. Τεχνοοικονομική ανάλυση σε ένα υβριδικό σύστημα PV-CSP για χρήση ως πηγή ενέργειας σε απομονωμένα μικροδίκτυα, παρουσίασε ότι το LCOE για το υβριδικό σύστημα ΦΒ-CSP είναι μόλις 2% υψηλότερη από την LCOE για το σύστημα Φ/Β-Μπαταρία. Το LCOE θα ήταν 3,43% χαμηλότερο εάν το ΦΒ-CSP χρησιμοποιούνταν με 50% υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας [197]. Επιπλέον, εάν η ζήτηση ξεπεράσει τα 500 kW, το σύστημα ΦΒ-LCOE CSP θα ήταν 26% φθηνότερο.

5.3.2 Υβριδικό CSP/ΦΒ/Αιολικά με αποθήκευση θερμότητας

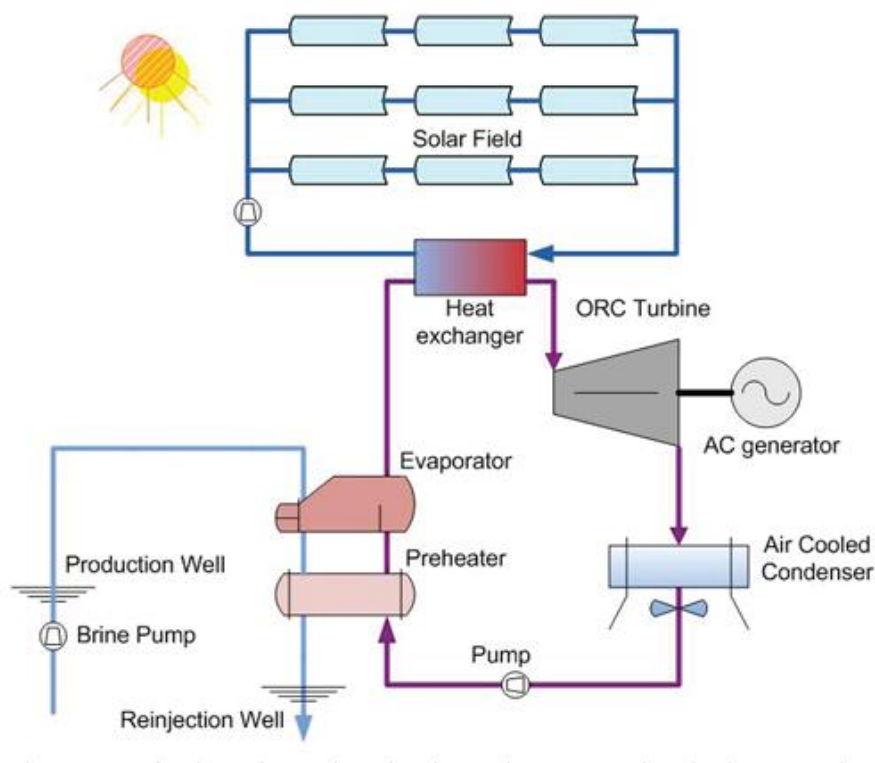


Σχήμα 5.11: Διάγραμμα υβριδικού συστήματος Αιολικού/Φωτοβολταϊκού/CSP [201].

Έχει αναπτυχθεί μια τεχνική, που ονομάζεται The Electric System Cascade Extended Analysis (ESCEA) για την αξιολόγηση του κατάλληλου μεγέθους ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά, αιολικά και CSP σε συνδυασμό με ταυτόχρονη θερμική αποθήκευση (TES) και αποθήκευση σε μπαταρίες (BESS) [200]. Η χωρητικότητα των διαφόρων στοιχείων παραγωγής και αποθήκευσης του συστήματος, καθώς και η ποσοστιαία συνεισφορά κάθε πηγής ενέργειας, καθορίζονται από τον αλγόριθμο ESCEA, ο οποίος προσφέρει όλες τις εφικτές εναλλακτικές λύσεις. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος επιλέγει τη βέλτιστη επιλογή, η οποία έχει τη χαμηλότερη LCOE. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε μελέτη περίπτωσης στην Ουϊδα του Μαρόκου με ηλεκτρικό φορτίο 50 MW, όπου μελετήθηκαν διάφορες διαμορφώσεις, συμπεριλαμβανομένων των CSP/PV/Wind με μπαταρίες και TES, αλλά με διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής για κάθε μονάδα παραγωγής ενέργειας. Ο αλγόριθμος έδειξε ότι η χαμηλότερη επιτεύξιμη LCOE ήταν 0,18 \$/kWh για το υβριδικό σύστημα CSP/PV/Wind με ποσοστό συμμετοχής 65,4%, 26,1% και 8,5% αντίστοιχα, με TES και BESS σε σύγκριση με άλλες 8 διαφορετικές διαμορφώσεις [176]. Εν τω μεταξύ, η

διαμόρφωση των Φ/Β με BESS και των Αιολικών με BESS πέτυχε 0,24 \$/kWh και 0,40 \$/kWh με αύξηση 33,3% και 122,2% με 0% πιθανότητα απώλειας παροχής ισχύος (LPSP). Διερεύνηση της τεχνοοικονομική σκοπιμότητας της σύζευξης TES με διάφορες διαμορφώσεις φωτοβολταϊκών, αιολικών και CSP στην Ιορδανία και διαπίστωσε ότι η διαλείπουσα φύση των ηλιακών και αιολικών πόρων αντισταθμίζεται με τη χρήση TES. Σε σύγκριση με τα άλλα σενάρια, η προσθήκη του TES στην σύστημα CSP/PV/Αιολικό παρήγαγε το χαμηλότερο LCOE 0,0485 \$/kWh και το υψηλότερο ποσοστό κλάσματος συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας 99,35% [202].

5.3.3 Υβριδική γεωθερμία/CSP με TES



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα υβριδικού συστήματος γεωθερμίας/CSP με το ηλιακό πεδίο να θερμαίνει το ρευστό του Organic Rankine κύκλου [198].

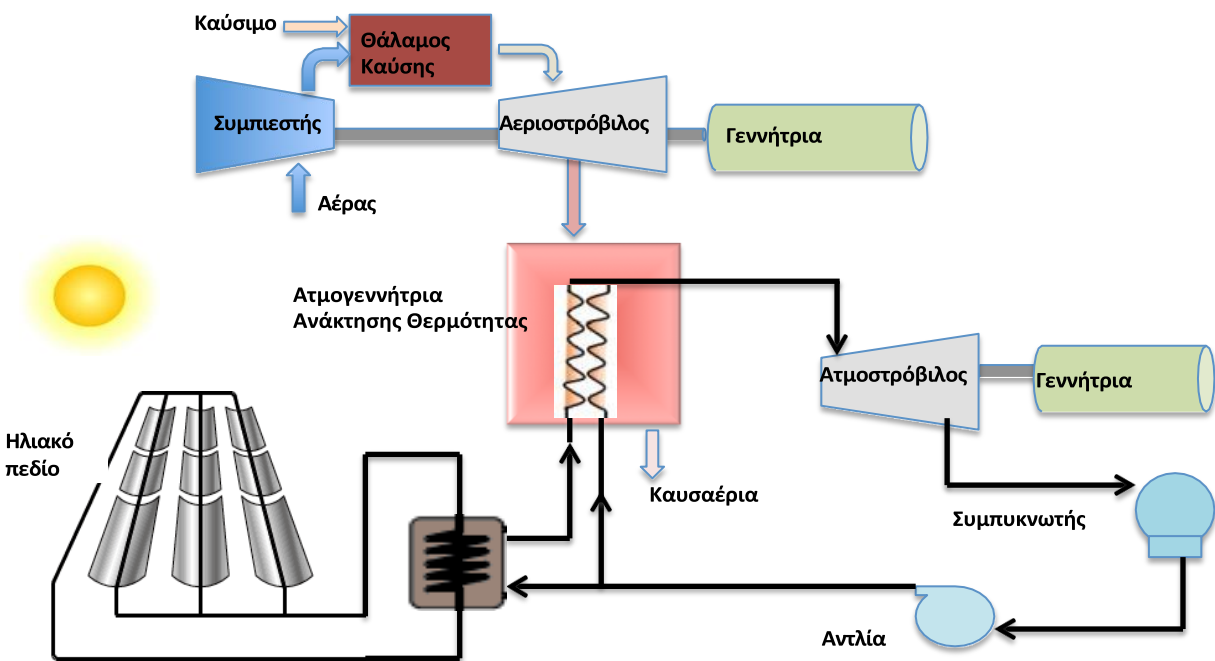
Στις εμπορικές τους εφαρμογές, οι τεχνολογίες γεωθερμίας και συγκεντρωτικής ηλιακής ενέργειας (CSP) χρησιμοποιούν συνήθως θερμότητα σε διάφορες θερμοκρασίες. Αυτό καθιστά δυνατή την υβριδοποίηση των γεωθερμικών κύκλων πυθμένα και των ηλιακών κύκλων κορυφής σε μέρη όπου υπάρχουν και οι δύο πόροι (βλ. Σχήμα 5.12). Έχει παρουσιαστεί στη βιβλιογραφικά οι τεχνικές και οικονομικές δυνατότητες του ηλιακού κύκλου αναπλήρωσης ατμού που προστίθεται σε έναν γεωθερμικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που δεν

αποδίδει επαρκώς και βρίσκεται στο Idaho των Ηνωμένων Πολιτειών [199]. Ο γεωθερμικός κύκλος επανέρχεται στη θέση σχεδιασμού του με την απορριπτόμενη θερμότητα από τον κύκλο συμπλήρωσης. Αυτή η υβριδική ιδέα ενισχύει την αποδοτικότητα και την παραγωγή ενέργειας του γεωθερμικού σταθμού, ενώ παράλληλα αξιοποιεί αποτελεσματικά τις υψηλές θερμοκρασίες που μπορούν να παραχθούν από τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα. Οι ερευνητές μελέτησαν την επίδραση της προσθήκης TES στο LCOE στο υβριδικό σύστημα ή την αντικατάστασή του με ισοδύναμο φωτοβολταϊκό σύστημα με BESS. Τα αποτελέσματα έδειξαν μια μικρή αύξηση του LCOE κατά 2,4%, αλλά με σημαντική αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας κατά 20,44% [198]. Εν τω μεταξύ, το φωτοβολταϊκό σύστημα με BESS παρείχε υψηλότερο LCOE κατά 46,09% από ό,τι η χρήση του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος με αποθήκευση θερμότητας. Παρόμοια μελέτη υβριδικής μονάδας γεωθερμίας/CSP για την προσθήκη ηλιακής θερμότητας για την αντιστάθμιση της μείωσης των γεωθερμικών πόρων για γεωθερμική μονάδα στην Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών παρουσίασε το υβριδικό σύστημα με μεγέθους 3 h και 10 h θερμική αποθήκευση και συγκρίθηκαν με ένα ισοδύναμο φωτοβολταϊκό σύστημα με BESS. Από τη σύγκριση διαπιστώθηκε ότι το υβριδικό σύστημα με 3 h αποθήκευση είχε 28% μειωμένη LCOE, ενώ ένα σύστημα με 10 h αποθήκευσης είχε 47% χαμηλότερη LCOE.

5.4 ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΗΛΙΑΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ (INTEGRATED SOLAR COMBINED CYCLE POWER PLANTS)

Ο ενσωματωμένος ηλιακός σταθμός συνδυασμένου κύκλου (ISCC) έχει εισαχθεί στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής ως μια τεχνολογία που έχει τη δυνατότητα να συμβάλει στη μείωση του κόστους της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας σταθμός ηλεκτροπαραγωγής ISCC συνδυάζει έναν σταθμό συγκεντρωτικής ηλιακής ισχύος (CSP) και έναν σταθμό ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (NGCC). Η ενέργεια CSP χρησιμοποιείται είτε για την παραγωγή πρόσθετου ατμού που ενσωματώνεται στον ατμοστρόβιλο του NGCC για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε για τη θέρμανση του συμπιεσμένου αέρα στον αεριοστρόβιλο πριν εισέλθει στον θάλαμο καύσης [187]. Οι μονάδες ISCC συμβάλλουν αποτελεσματικά στην ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας στο δίκτυο, παρακάμπτοντας τη μη κατανεμησιμότητα της CSP και παρέχοντας μειώσεις του λειτουργικού και επενδυτικού κόστους, καθώς και τη δυνατότητα αυξημένης λειτουργικής ευελιξίας σε σύγκριση με έναν αυτόνομο NGCC [188]. Η ιδέα του ISCC ως ηλιακού σταθμού παραβολικών κοίλων συλλεκτών που ενσωματώνεται σε σύγχρονους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προτάθηκε αρχικά στις αρχές της δεκαετίας του 1990 από την Luz Solar International, την κατασκευάστρια εταιρεία των σταθμών γούρνας SEGS στην Καλιφόρνια [188]. Η πρώτη μονάδα που υλοποίησε αυτή την ιδέα ήταν το έργο *Archimede* στη

Σικελία της Ιταλίας, το οποίο αποτελείται από δύο σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής συνδυασμένου κύκλου με καύσιμο φυσικό αέριο ισχύος 380 MW και ένα ηλιακό πεδίο παραβολικού κοίλου συλλέκτη 5 MWe που χρησιμοποιεί τετηγμένα άλατα ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας (HTF) [188]. Σήμερα το 2024, υπάρχουν τουλάχιστον 167MW, είτε υπό κατασκευή είτε υπό λειτουργία, θερμικών ηλιακών σταθμών ενσωματωμένων σε μονάδα συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου, συμπεριλαμβανομένου του ISCC Waad Al Shamal 50 MW στη Σ.Αραβία, Next Generation Solar Energy Center 75MW στο Indiantown της Φλόριντα, του ISCC Ain Beni Mathar 20MW στο Μαρόκο, του ISCC Hassi R'me 20MW στην Αλγερία, του ISCC Kuraymat 20MW στην Αίγυπτο και του ISCC Yazd 17MW στο Ιράν, του Dadri ISCC Plant στην Ινδία, του ISCC Ain Beni Mathar στο Μαρόκο και του ISCC Green Duba 1 στη Νότια Αφρική (βλ. Πίνακα 5.5).



Σχήμα 5.13: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος σταθμού CSP ενσωματωμένου σε NGCC [187].

Η παλαιότερη βιβλιογραφία αξιολογεί τα τεχνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα του ISCC, διερευνά διαφορετικές ηλιοθερμικές τεχνολογίες και συζητά εναλλακτικές ρυθμίσεις για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης. Αξιολογήθηκαν σε μελέτη όλες οι κατάλληλες τεχνολογίες CSs για ενσωμάτωση σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με κύκλο Rankine [190]. Η μελέτη κατέληξε

στο συμπέρασμα ότι τα συστήματα εστίασης γραμμής, όπως το Fresnel και το παραβολικό κοίλο είναι ιδανικά για την ενσωμάτωση ατμού χαμηλότερης θερμοκρασίας (<400°C), τα συστήματα Fresnel είναι επίσης τα καλύτερα για μεσαίες θερμοκρασίες (380°C έως 450°C), και οι ηλιακοί πύργοι άμεσης παραγωγής ατμού είναι οι καλύτεροι για υψηλότερες θερμοκρασίες (>450°C) [190]. Μελέτη δύο ολοκληρωμένων σχεδίων εγκαταστάσεων με τη χρήση λογισμικού μοντελοποίησης Gate Cycle κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ετήσια ηλιακή συνεισφορά έως και 12 % σε ένα ISCC θα πρέπει να προσφέρει οικονομικά πλεονεκτήματα σε σχέση με μια συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας μόνο με ηλιακή ενέργεια από παραβολικούς κοίλους συλλέκτες. Επίσης αποδείχθηκε και ότι η πιο αποδοτική χρήση της ηλιακής θερμικής ενέργειας είναι η παραγωγή κορεσμένου ατμού υψηλής πίεσης για προσθήκη στη γεννήτρια ατμού ανάκτησης θερμότητας [191]. Σε άλλη μελέτη αξιολόγησης διάφορων διαμορφώσεων ISCC με ηλιακούς συλλέκτες παραβολικών κοίλων διαπιστώθηκε ότι η διαμόρφωση άμεσης παραγωγής ατμού (DSG) είναι η καλύτερη επιλογή για την ενσωμάτωση της ηλιακής ενέργειας, αν και μπορεί να υπάρχουν προβλήματα με τον έλεγχο του ηλιακού πεδίου κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων ηλιακής ακτινοβολίας, διφασικής ροής στο εσωτερικό των σωλήνων του δέκτη και κλίσεων θερμοκρασίας στους σωλήνες του δέκτη. Μια τεχνικοοικονομική αξιολόγηση ενός ISCC που χρησιμοποιεί άμεση παραγωγή ατμού (DSG) σε συλλέκτες παραβολικού τύπου έδειξε τη μεγάλη επιρροή του μεγέθους του ηλιακού πεδίου ως συνάρτηση της δυναμικότητας του κύκλου ισχύος (δηλαδή του ηλιακού πολλαπλασίου) στην ημερήσια λειτουργία, την ετήσια απόδοση και την οικονομία μιας μονάδας DSG παραβολικού τύπου [192]. Επιπλέον πρόταση ήταν ένα νέο σύστημα ISCC με ηλιακή είσοδο DSG δύο σταδίων για την αύξηση του ηλιακού μεριδίου. Σε σύγκριση με μια μονάδα ISCC ενός σταδίου, διαπιστώθηκε ότι το ISCC δύο σταδίων παρέχει καλύτερη απόδοση και αυξημένη καθαρή απόδοση από ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια (έως και 30%) [193]. Πρόσφατη διερεύνηση αποτέλεσε η μελέτη της τεχνικής και οικονομική σκοπιμότητας της ενσωμάτωσης ενός συστήματος συλλέκτη παραβολικού (PTC) με ένα σύστημα συμπαραγωγής με αεριοστρόβιλο, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές παραγωγικές ικανότητες του αεριοστρόβιλου και περιοχές των PTC [194]. Κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα υβριδικά συστήματα με δυναμικότητα παραγωγής αεριοστρόβιλων μικρότερη από 110 MWe οδηγούν σε αμελητέα αύξηση του LCOE, αλλά είναι οικονομικά ελκυστικότερα σε σύγκριση με τη συμπαραγωγή σε συνδυασμό με τεχνολογία δέσμευσης CO₂. Τέλος, μια παγκόσμια τεχνική επισκόπηση των εγκαταστάσεων ISCC και της κατάστασης της σχετικής έρευνας, ανάπτυξης και ανάπτυξης (E&A) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι υπήρξε εκθετική αύξηση της έρευνας και ανάπτυξης (Research & Development) ειδικά για την τεχνολογία DSG- ISCC, η οποία μπορεί να προσφέρει καλύτερες επιδόσεις από τις ευρέως εγκατεστημένες εγκαταστάσεις παραβολικών κοίλων-ISCC [188].

Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά στοιχεία εγκατεστημένων σταθμών ISCC [185].

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΤΟΣ ΕΝΑΡΞΗΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (GWh/year)	ΗΛΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ (W/m ²)	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΙΜΟΤΗΤΑΣ (%)	ΕΡΓΑΖΟΜΕΝΟ ΡΕΥΣΤΟ	ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ (hrs)
Dadri ISCC Plant	INDIA	2019	14	14	1223		ΝΕΡΟ	
ISCC Ain Beni Mathar	ORIENTAL, MOROCCO	2011	20	55	2072	31.393	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)	183120
ISCC Green Duba 1	TABUK, SOUTH AFRICA	2023	43		2469		ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ	
Martin Next Generation Solar Energy Center	FLORIDA, UNITED STATES	2010	75	155	1799	23.592	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ (Dowtherm A)	464908
ISCC Waad Al Shamal	WAAD AL SHAMAL, SAUDI ARABIA	2018	50		2521		ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ	
ISCC Kuraymat	KURAYMAT, EGYPT	2011	20	34	2154	19.406	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ (Biphenyl/Diphenyl oxide: Therminol VP-1)	130800
ISCC HASSI R' MEL	LAGHOUAT, ALGERIA	2011	20		2159		ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ	183860
AVERAGE			34.57	64.50	2056	24.797	ΘΕΡΜΙΚΟ ΛΑΔΙ	240672

5.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ & ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

5.5.1.1 Γεωγραφική θέση με υψηλό επίπεδο άμεσης κανονικής ηλιακής ακτινοβολίας

Αν και όλες οι απαιτήσεις είναι απαραίτητες για τα έργα CSP, η πιο σημαντική είναι αναμφισβήτητη η τοποθεσία. Εάν το γεωγραφικό κλίμα δεν είναι κατάλληλο για την εγκατάσταση CSP, δεν υπάρχει κανένας λογικός λόγος να συμβεί. Περιοχές με χαμηλά επίπεδα DNI ή υψηλά επίπεδα διάχυτης ακτινοβολίας είναι ακατάλληλες για εγκαταστάσεις CSP, καθιστώντας ιδανικές τις τοποθεσίες που περιβάλλουν τον ισημερινό. Η ηλιακή ενέργεια υψηλής έντασης, υψηλής έκθεσης είναι ιδανική για κάθε τύπο CSP και θα αποδείξει ότι η εγκατάσταση είναι απολύτως οικονομικά αποδοτική.

5.5.1.2 Μεγάλες εκτάσεις γης

Αυτό το σημείο εξακολουθεί να βασίζεται στην τοποθεσία, αλλά εστιάζει σε μια διαφορετική περιβαλλοντική πτυχή. Οι ανάγκες σε γη ποικίλλουν ανάλογα με την τεχνολογία, μια τυπική μονάδα CSP απαιτεί 5 έως 10 στρέμματα γης ανά MW δυναμικότητας.

5.5.1.3 Κατανάλωση νερού ανά kWh και διαθεσιμότητα

Στην παραγωγή ενέργειας μέσω τεχνολογιών CSP, χρησιμοποιείται σημαντική ποσότητα νερού για διάφορους λόγους, όπως ως εργαζόμενο υγρό στον κύκλο παραγωγής ενέργειας Rankine με ατμό, για ψύξη και, ιδίως σε ξηρές και ημίξηρες συνθήκες, για τον καθαρισμό της σκόνης από τα κάτοπτρα (συλλέκτες). Η διαθεσιμότητα νερού αποτελεί πρόκληση για την κατασκευή οποιουδήποτε θερμοηλεκτρικού σταθμού παραγωγής ενέργειας, όχι μόνο για την CSP, σε άγονες και ημίξηρες περιοχές με υψηλή ζήτηση νερού. Οι εγκαταστάσεις CSP απαιτούν μεγάλη ποσότητα νερού για την παραγωγή ενέργειας. Το νερό αυτό χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των κατόπτρων, τη δημιουργία ατμού και την ψύξη όταν χρησιμοποιείται υγρή ψύξη [100]. Κατά συνέπεια, η πιο σημαντική πτυχή των απαιτήσεων που πρέπει να βελτιωθεί είναι η υγρή ψύξη. Η υγρή ψύξη απαιτεί σημαντικά περισσότερο νερό από την ξηρή ψύξη- ο σταθμός Noor 1 στο Μαρόκο χρησιμοποιεί περίπου το 74% της συνολικής κατανάλωσης νερού για τη διαδικασία υγρής ψύξης, όπως προκύπτει από πειραματικά δεδομένα του σταθμού [101]. Οι A. Liqreina κ.ά. [34] συνέκριναν τον σταθμό ηλεκτροπαραγωγής Andasol 1 στην Ισπανία που χρησιμοποιεί σύστημα υγρής ψύξης με τον πανομοιότυπο αλλά ξηρόψυκτο σταθμό ηλεκτροπαραγωγής στην Ιορδανία, και προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα: ο συνολικός

βαθμός απόδοσης του ξηρόψυκτου σταθμού στο Ma'an μειώνεται κατά 3,1% και η χρήση νερού μειώνεται κατά 92%. Η ενεργειακή απόδοση βελτιώθηκε κατά 21,8%, ενώ η LCOE μειώθηκε κατά 18,8%. Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης δείχνουν ότι οι ξηρόψυκτοι σταθμοί παραγωγής ενέργειας CSP σε τοποθεσίες με σημαντικά υψηλές τιμές DNI αποτελούν μια ελκυστική οικονομική και τεχνική εναλλακτική λύση που πρέπει να εξεταστεί κατά τη μελλοντική ανάπτυξη έργων.

Μία από τις βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει η εξάπλωση της CSP σε θερμές και ξηρές περιοχές είναι το απαιτούμενο νερό ψύξης για τη λειτουργία του μπλοκ ισχύος και τον καθαρισμό των κατόπτρων

5.5.1.4 Άμεση και εύκολη πρόσβαση στο δίκτυο

Η γη στην οποία βρίσκεται πρέπει να είναι κατάλληλη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με εύκολη πρόσβαση στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης του ηλεκτρικού δικτύου. Περιοχές με απαρχειωμένη πρόσβαση ή που είναι ήδη σε πλήρη δυναμικότητα είναι ακατάλληλες έως ότου το δίκτυο (SEIA, 2021). Ο κύριος περιορισμός για την επέκταση της CSP δεν είναι η διαθεσιμότητα της περιοχής που είναι κατάλληλη για τη λειτουργία, αλλά η απόσταση των τοποθεσιών από το κέντρο κατανάλωσης είναι ένα άλλο ζήτημα που εξακολουθεί να αντιμετωπίζει τις τεχνικές και οικονομικές ανησυχίες της συνεχούς μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.




5.5.1.5 Χρηματοδότηση

Εάν βρεθεί μια ιδανική τοποθεσία, τα όποια έργα εξακολουθούν να πρέπει να χρηματοδοτηθούν- είτε πρόκειται για εργολάβους είτε για μια ιδιωτική εταιρεία, το έργο πρέπει να έχει χρηματοδότηση. Αυτό, δυστυχώς, λειτουργεί συχνά ως εμπόδιο για την ανάπτυξη των CSP και της ίδιας της STE. Το κραχ του 2008 ήταν η αρχή αυτού του προβλήματος- οι επενδύσεις σε CSP ήταν υψηλές και οι κρατικές επιδοτήσεις προσφέρονταν σε πολλές χώρες πριν από το κραχ, αλλά τελείωσαν σχεδόν αμέσως. Τα συνεχιζόμενα οικονομικά προβλήματα δημιούργησαν πισωγυρίσματα για τον κλάδο, με την πρόσφατη πανδημία Covid-19 και την επακόλουθη οικονομική κατάρρευση να προκαλούν περαιτέρω αβεβαιότητα.

5.5.1.6 Κοινωνική αποδοχή

Ο παράγοντας αυτός δεν αποτελεί απαίτηση, αλλά βελτιώνει σημαντικά τις πιθανότητες υλοποίησης ενός επιτυχημένου έργου CSP. Παρόλο που οι αντιδράσεις των τοπικών κοινοτήτων στις εγκαταστάσεις CSP είναι συνήθως θετικές, μπορεί να υπάρξουν τριβές μεταξύ των κοινοτήτων και των κατασκευαστών. Για να ενθαρρυνθεί όχι μόνο μια ευκολότερη περίοδος κατασκευής, αλλά και για να χρησιμοποιηθεί ως απόδειξη ότι οι μονάδες CSP αποτελούν θετική προσθήκη για τις τοπικές κοινωνίες, θα πρέπει να αξιοποιηθεί κάθε ευκαιρία για την αποδοχή της κοινότητας.

5.5.2 3^{ης} ΓΕΝΙΑΣ ΣΤΑΘΜΟΙ CSP

Generation	1 st gen.	2 nd gen.	3 rd gen.
Receiver outlet temp.	~250 - 450 °C	~500 - 565 °C	~720 °C
Typical plant or technology	PTC, SPT, LFR 	PTC, SPT, LFR ~500 - 565 °C 	PDC 
Heat transfer medium	Oil or steam	Steam or salt	Gas, Salt, Particle, Gas
Thermal energy storage	Early designs: No or small Recent designs: Yes	Early designs: No or small Recent designs: Yes	No
Power cycle	Steam Rankine cycle		Stirling, Brayton cycle
Peak temp. of cycle	~240-440 °C	~480-550 °C	~720 °C
Design cycle eff.	~ 28-38%	~ 38-44%	~38%
Annual solar-electric eff.	~ 9-16%	~ 10-20%	~25%

Πίνακας 5.6: Οι 3 γενιές CSP και τα χαρακτηριστικά τους [203]

Οι μονάδες CSP της 3^{ης} Γενιάς ορίζονται επί του παρόντος ως η ενσωμάτωση των σύγχρονων HTF και των τεχνολογιών TES που βελτιώνουν την αξιοπιστία του συστήματος, την αποδοτικότητα, τη δυνατότητα κατανομής της ενέργειας και τη σταθερότητα του δικτύου μέσω μιας συνεργατικής λειτουργίας σε θερμοκρασίες άνω των 700 °C. Μέχρι σήμερα, η ανάπτυξη του κεντρικού άξονα για την 3^η Γενιά CSP επικεντρώνεται στην τεχνολογία κεντρικού δέκτη λόγω του υψηλού συντελεστή συγκέντρωσης και της δυνατότητας λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες. Το 2011 ανακοινώθηκαν μεγάλα έργα E&A παγκοσμίως σε διάφορες περιοχές όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Αυστραλία, η Ευρώπη και η Ασία για την ανάπτυξη μονάδων CSP Gen3 με υψηλή ενεργειακή απόδοση και χαμηλότερο ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE).

Το 2011, το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α ξεκίνησε την πρωτοβουλία *SunShot*, η οποία ανακοίνωσε επιθετικούς στόχους για την επίτευξη χαμηλότερου κόστους εξαρτημάτων και υψηλότερης απόδοσης του συστήματος. Το πρόγραμμα *SunShot* συνεχίζει να αντιμετωπίζει τα κενά γνώσης και τις προκλήσεις των επόμενων δεκαετιών[40,56]. Αυτοί οι στόχοι συνεπάγονται 45,65 % και 51,45 % μείωση του LCOE για διαμορφώσεις αιχμής και βασικού φορτίου με λιγότερες από 6 ώρες και περισσότερες από 12 ώρες TES, αντίστοιχα[57]. Η πρωτοβουλία *SunShot* προώθησε έναν οδικό χάρτη για την ανάπτυξη τεχνολογιών που μπορούν να λειτουργούν σε θερμοκρασίες άνω των 700 °C. Το πρόγραμμα χρηματοδότησης των συστημάτων CSP Gen3 ανακοινώθηκε από το DOE και ξεκίνησε το 2018, με βάση προηγούμενες

έρευνες και διδάγματα που αντλήθηκαν για τα CSP, καθορίζοντας στόχους για την επόμενη δεκαετία.

Οι προσπάθειες επικεντρώνονται στον εντοπισμό των κενών γνώσεων για κάθε διαδρομή, στην εκτίμηση των κινδύνων, στην ανάπτυξη και αξιολόγηση νέων τεχνολογιών ή στην ενίσχυση των υφιστάμενων για την ικανοποίηση των νέων απαιτήσεων των θερμικών κύκλων με θερμοκρασίες λειτουργίας άνω των 700 °C. Η φάση I επικεντρώθηκε στον εντοπισμό των κινδύνων και την εξάλειψή τους με την ανάπτυξη συγκεκριμένων στοιχείων. Αντίθετα, οι φάσεις II και III επικεντρώθηκαν στο σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου συστήματος με σύστημα TES ικανό να αντέχει σε HTs, καθώς και στη διαδικασία επιλογής της κατάλληλης τεχνολογίας για την κατασκευή μιας εγκατάστασης δοκιμών για τη δοκιμή εξαρτημάτων και συστημάτων σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας που είναι απαραίτητο για την προώθηση σε εμπορικές εγκαταστάσεις CSP Gen3 [181].

Ανεξάρτητα από τα παραπάνω, το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. ανακοίνωσε ότι η επιλογή στερεών σωματιδίων είναι η πιο υποσχόμενη για την επίτευξη των στόχων κόστους για το 2030 που προτείνονται από την πρωτοβουλία *SunShot* λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών (έως 1000 °C) που επιτυγχάνονται στο σύνολο CR στερεών σωματιδίων. Ως εκ τούτου, απένειμε 25 εκατ. δολάρια στην εταιρεία SNL για την κατασκευή, δοκιμή και επίδειξη μιας πιλοτικής μονάδας CSP στερεών σωματιδίων 3^{Hc} Γενιάς στο πλαίσιο του έργου *Gen3 Particle Pilot Plant (G3P3) USA*. Το έργο G3P3 USA αποσκοπεί στον μετριασμό των κρίσιμων κινδύνων που σχετίζονται με το σύστημα CSP με σωματίδια, λαμβάνοντας υπόψη την εμπειρία των φάσεων I και II και τα διδάγματα που αντλήθηκαν από το έργο *G3P3* του *King Saudi University*. Πρέπει να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένα πολλαπλάσιο θερμικό σύστημα CRS με σωματίδια κατερχόμενου βάρους μεγαβάτ, το οποίο θα λειτουργεί πάνω από 1000 ώρες/έτος, παρέχοντας 6 ώρες αποθήκευσης ενέργειας, χρησιμοποιώντας sCO_2 ή αέρα σε θερμοκρασία ≥ 700 °C. Τα συστήματα CSP Gen3 βρίσκονται πλέον στο επίκεντρο έρευνας αιχμής, έχοντας προσελκύσει την προσοχή σημαντικών διεθνών έργων και φορέων, όπως το σχέδιο έργου *Horizon 2020 (H2020)* της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ), ο Αυστραλιανός Οργανισμός Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ARENA) και ο *IEA*. Το 2012, ο ARENA εγκαινίασε το *Australian Solar Thermal Research Initiative (ASTRI)*, το οποίο στοχεύει στην ανάπτυξη συστημάτων CSP Gen3 και να θεωρηθεί ως στρατηγικός εταίρος για την ανάπτυξη τέτοιων έργων παγκοσμίως [206]. Η Κίνα έχει επίσης ξεκινήσει ορισμένες μελέτες για την τεχνολογία CSP Gen3 σχετικά με την αποθήκευση ενέργειας με χρήση χλωριούχων και ανθρακικών MS[46], ενώ παράλληλα ξεκίνησε το έργο *sCO₂ Solar Thermal Power Generation* μέσω του Εθνικού Προγράμματος Έρευνας και Ανάπτυξης (*National Key R&D Program*)[206].

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ingo Müller, *A History of thermodynamics : the doctrine of energy and entropy*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [2] V. Smil, “World History and Energy,” 2004.
- [3] S. C. Anton, “Natural history of Homo erectus,” *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 122, no. S37, pp. 126–170, 2003, doi: <https://doi.org/10.1002/ajpa.10399>.
- [4] A. C. Scott, W. G. Chaloner, C. M. Belcher, and C. I. Roos, “The interaction of fire and mankind: Introduction”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 371, no. 1696, p. 20150162, Jun. 2016, doi: <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0162>.
- [5] C. Darwin, *On the Origin of Species*. London: John Murray, 1859.
- [6] E. J. Hobsbawm and C. Wrigley, *Industry and empire : from 1750 to the present day*. New York: New Press, 1999.
- [7] P. P. Groumpos, “A Critical Historical and Scientific Overview of all Industrial Revolutions,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 13, pp. 464–471, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.492>.
- [8] Thomas Southcliffe Ashton, *The Industrial Revolution, 1760-1830*. Oxford University Press, USA, 1969.
- [9] E. Levasseur, *La population française*. Paris, France: Saint-Brieuc, 1889.
- [10] P. WARDE, “Energy consumption in England & Wales 1560-2000,” 2007. Available: https://histecon.fas.harvard.edu/energyhistory/data/Warde_Energy%20Consumption%20England.pdf
- [11] E. A. Wrigley, “Energy and the English Industrial Revolution,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 371, no. 1986, p. 20110568, Mar. 2013, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0568>.
- [12] J. Yang, Y. Yu, T. Ma, C. Zhang, and Q. Wang, “Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis,” *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, vol. 19, no. 3, pp. 256–264, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjpre.2021.12.028>.
- [13] P. O’Connor and C. Cleveland, “U.S. Energy Transitions 1780–2010,” *Energies*, vol. 7, no. 12, pp. 7955–7993, Nov. 2014, doi: <https://doi.org/10.3390/en7127955>.

- [14] B. R. Mitchell, International historical statistics The Americas, 1750-2005. Basingstoke, Hampshire ; New York Palgrave Macmillan, 2007.
- [15] V. Vactor and S. A, “Historical Perspective on Energy Transitions,” papers.ssrn.com, May 14, 2018. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3178176
- [16] “When Edison Lit Up Manhattan | New-York Historical Society,” www.nyhistory.org. <https://www.nyhistory.org/blogs/edison-lit-manhattan>
- [17] E. Institute, “Home,” Statistical review of world energy, 2023. <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- [18] Vaclav Smil, Energy transitions : global and national perspectives. Santa Barbara, California: Praeger, An Imprint Of Abc-Clio, Llc, 2017.
- [19] “Global primary energy consumption by source,” Our World in Data. <https://ourworldindata.org/grapher/global-energy-substitution>
- [20] S. Senior, “Issue paper: Definition of primary and secondary energy,” 2008. Available: https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/londongroup/meeting13/LG13_12a.pdf
- [21] “Primary, secondary, final, and useful energy: Why are there different ways of measuring energy?,” Our World in Data. <https://ourworldindata.org/energy-definitions>
- [22] “World Energy Statistics and Balances - Data product,” IEA, 2023. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>
- [23] Europa.eu, 2022. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_bal_c/default/table?lang=en
- [24] “Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (Δ.Ο.Ε.) .” <https://ypen.gov.gr/diethnis-organismos-energeias-d-o-e/>
- [25] “Energy efficiency indicators Database documentation,” <https://www.iea.org/countries/greece>, 2022.
- [26] “World total final consumption by source, 1971-2019 – Charts – Data & Statistics,” IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-total-final-consumption-by-source-1971-2019>
- [27] J. P. Holdren, “Population and the energy problem,” Population and Environment, vol. 12, no. 3, pp. 231–255, Mar. 1991, doi: <https://doi.org/10.1007/bf01357916>.
- [28] F. Wagner, “EPS-SIF Energy Summer School 2019: Concluding remarks,” EPJ Web of Conferences, vol. 246, p. 00022, 2020, doi: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202024600022>.

- [29] United Nations, “Population,” United Nations, 2022. <https://www.un.org/en/global-issues/population#:~:text=The%20world%20population%20is%20projected>
- [30] “Global Energy Consumption | EARTH 104: Earth and the Environment,” Psu.edu, 2010. <https://www.e-education.psu.edu/earth104/node/1347>
- [31] “Energy use per person,” Our World in Data. https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use?tab=chart&time=earliest..2022&country=~OWID_WRL (accessed Nov. 11, 2023).
- [32] “Years of fossil fuel reserves left,” Our World in Data, 2020. <https://ourworldindata.org/grapher/years-of-fossil-fuel-reserves-left>
- [33] “Causes of climate change,” climate.ec.europa.eu. https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en#:~:text=CO2%20produced%20by%20human
- [34] United Nations, “Causes and Effects of Climate Change,” United Nations, 2022. <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change#:~:text=Fossil%20fuels%20%E2%80%93%20coal%2C%20oil%20and>
- [35] IPCC, “Climate Change 2021: The Physical Science Basis,” www.ipcc.ch, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- [36] R. Betts, “Met Office: Atmospheric CO2 now hitting 50% higher than pre-industrial levels,” World Economic Forum, Mar. 22, 2021. <https://www.weforum.org/agenda/2021/03/met-office-atmospheric-co2-industrial-levels-environment-climate-change/>
- [37] “Chapter 3: Human Influence on the Climate System,” Ipcc.ch, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-3/>
- [38] R. U. Ayres, “On the practical limits to substitution,” *Ecological Economics*, vol. 61, no. 1, pp. 115–128, Feb. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.02.011>.
- [39] A. Månsson, “Energy, conflict and war: Towards a conceptual framework,” *Energy Research & Social Science*, vol. 4, pp. 106–116, Dec. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.10.004>.
- [40] F. Venn, *The Anglo-American oil war : international politics and the struggle for foreign petroleum, 1912-1945*. London, Uk: I. B. Tauris, 2015.
- [41] V. Smil, “War and Energy,” *ScienceDirect*, Jan. 01, 2004. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012176480X000164>
- [42] J. Lilliestam and S. Ellenbeck, “Energy security and renewable electricity trade—Will Desertec make Europe vulnerable to the ‘energy weapon’?,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 6, pp. 3380–3391, Jun. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.035>.

- [43] Van, Dr Kirsten Westphal, and D. Dries, *Global Energy Governance in a Multipolar World*. Ashgate Publishing, Ltd., 2013.
- [44] “National Security and the Threat of Climate Change,” *E-International Relations*, May 14, 2014. <https://www.e-ir.info/2014/05/14/national-security-and-the-threat-of-climate-change/>
- [45] P. Lujala, “The spoils of nature: Armed civil conflict and rebel access to natural resources,” *Journal of Peace Research*, vol. 47, no. 1, pp. 15–28, Jan. 2010, doi: <https://doi.org/10.1177/0022343309350015>.
- [46] Philippe le Billon, *Wars of Plunder*. Columbia University Press, 2012.
- [47] “Energy poverty,” [energy.ec.europa.eu](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumer-rights/energy-poverty_en#:~:text=Energy%20poverty%20occurs%20when%20a), 2023. https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumer-rights/energy-poverty_en#:~:text=Energy%20poverty%20occurs%20when%20a
- [48] H. Ritchie and M. Roser, “Causes of Death,” *Our World in Data*, Feb. 2018, Available: <https://ourworldindata.org/causes-of-death#risk-factors-for-death>
- [49] “Access to electricity vs. GDP per capita,” *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/grapher/access-to-electricity-vs-gdp-per-capita>
- [50] “Access to clean fuels for cooking vs. GDP per capita,” *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/grapher/access-to-clean-fuels-for-cooking-vs-gdp-per-capita>
- [51] D. Ivanova and R. Wood, “The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability,” *Global Sustainability*, vol. 3, 2020, doi: <https://doi.org/10.1017/sus.2020.12>.
- [52] “Share of children who are stunted vs. CO2 emissions per capita,” *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/grapher/share-of-children-who-are-stunted-vs-co-emissions-per-capita>
- [53] “Air mass (solar energy),” *Wikipedia*, Apr. 14, 2020. [https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_\(solar_energy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_(solar_energy))
- [54] “What is Earth’s Energy Budget? Five Questions with a Guy Who Knows - NASA,” Apr. 10, 2017. <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/langley/what-is-earths-energy-budget-five-questions-with-a-guy-who-knows/>
- [55] F. Babota and F. Babotă, “INCREASE ENERGY EFFICIENCY AND COMFORT IN HOMES BY INCORPORATING PASSIVE SOLAR DESIGN FEATURES INCREASE ENERGY EFFICIENCY AND COMFORT IN HOMES BY INCORPORATING PASSIVE SOLAR DESIGN FEATURES,” 2018.

- [56] “Direct Normal Irradiance,” PV Performance Modeling Collaborative (PVMPC). <https://pvpmmc.sandia.gov/modeling-guide/1-weather-design-inputs/irradiance-insolation/direct-normal-irradiance/> (accessed Jan. 13, 2024).
- [57] ISO 9488:2022 Solar energy Vocabulary, “ISO 9488:2022,” ISO, 2022. <https://www.iso.org/standard/74269.html>
- [58] The World Bank, “Global Solar Atlas,” globalsolaratlas.info, 2023. <https://globalsolaratlas.info/download/middle-east-and-north-africa>
- [59] Π. Τρικαλίτης, “Εισαγωγή-Ιστορική Αναδρομή.” Available: https://www.chemistry.uoc.gr/ptrikalitis/Published_Papers_PDF_Files/Thermoelectric_Lecture.pdf
- [60] Φ. Μαυροματάκης, “Ηλιακό και Φωτοβολταϊκό Δυναμικό,” [repository.edulll.gr](http://hdl.handle.net/10795/2421), Mar. 21, 2016. <http://hdl.handle.net/10795/2421>
- [61] D. Bedrosyan, “Understanding CO₂ Emissions from the Global Energy Sector Figure 1. CO₂ emissions by sector Figure 2. energy-related CO₂ emissions by country,” May 2014.
- [62] M. Balghouthi, S. E. Trabelsi, M. B. Amara, A. B. H. Ali, and A. Guizani, “Potential of concentrating solar power (CSP) technology in Tunisia and the possibility of interconnection with Europe,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 1227–1248, Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.052>.
- [63] H. Müller-Steinhagen, “Concentrating solar thermal power,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 371, no. 1996, p. 20110433, Aug. 2013, doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0433>.
- [64] F. Trieb, “Global Potential of Concentrating Solar Power,” 2009.
- [65] E. Shouman and H. Ezz, “FORECASTING TRANSITION ELECTRICITY SOLAR ENERGY FROM MENA TO EUROPE,” vol. 11, no. 5, 2016.
- [66] K. Mahdi and N. Bellel, “Development of a Spherical Solar Collector with a Cylindrical Receiver,” *Energy Procedia*, vol. 52, pp. 438–448, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.096>.
- [67] M. Bezaatpour and H. Rostamzadeh, “Design and evaluation of flat plate solar collector equipped with nanofluid, rotary tube, and magnetic field inducer in a cold region,” *Renewable Energy*, vol. 170, pp. 574–586, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.001>.
- [68] A. Sözen, T. Menlik, and S. Ünvar, “Determination of efficiency of flat-plate solar collectors using neural network approach,” *Expert Systems with Applications*, vol. 35, no. 4, pp. 1533–1539, Nov. 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.080>.

- [69] “FLT - Linear Fresnel Collector - manufacturer,” Soltigua - PV trackers, Solar Tracker Manufacturers, parabolic trough and linear Fresnel collectors. <https://www.soltigua.com/flt-introducion/>
- [70] S. Dabiri, “Introduction of solar collectors and energy and exergy analysis of a heliostat plant,” Jul. 2016.
- [71] M. M. Mokhtar, “Control of Solar Thermal Linear Fresnel Collector Plants in Single Phase and Direct Steam Generation Modes,” Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.5445/ir/1000089861>.
- [72] F. Eddhibi, M. Ben Amara, M. Balghouthi, L. Qoaider, and A. Guizani, “Analytic optical design of a Linear Fresnel solar collector with variable parameters,” *Journal of Materials and Environmental Sciences*, vol. 8, no. 11, 2017, Available: <http://www.jmaterenvironsci.com/>
- [73] N. Abed and I. Afgan, “An extensive review of various technologies for enhancing the thermal and optical performances of parabolic trough collectors,” *International Journal of Energy Research*, vol. 44, no. 7, pp. 5117–5164, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/er.5271>.
- [74] A. Fernández-García, E. Zarza, L. Valenzuela, and M. Pérez, “Parabolic-trough solar collectors and their applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 7, pp. 1695–1721, Sep. 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.012>.
- [75] D. Bishoyi and K. Sudhakar, “Modeling and performance simulation of 100 MW PTC based solar thermal power plant in Udaipur India,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 10, pp. 216–226, Sep. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.05.005>.
- [76] S. Karellas, A.-D. . Leontaritis, G. Panousis, E. Bellos, and E. Kakaras, “Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery systems in the cement industry,” *Energy*, vol. 58, pp. 147–156, Sep. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.097>.
- [77] G. K. Manikandan, S. Iniyar, and R. Goic, “Enhancing the optical and thermal efficiency of a parabolic trough collector – A review,” *Applied Energy*, vol. 235, pp. 1524–1540, Feb. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.048>.
- [78] S. A. Murtuza, H. V. Byregowda, M. M. A. H, and M. Imran, “Experimental and simulation studies of parabolic trough collector design for obtaining solar energy,” *Resource-Efficient Technologies*, vol. 3, no. 4, pp. 414–421, Dec. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2017.03.003>.
- [79] M. J. Brooks, I. Mills, and T. M. Harms, “Performance of a parabolic trough solar collector,” *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 17, no. 3, pp. 71–80, Aug. 2006, doi: <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2006/v17i3a3291>.

- [80] A. Geete, S. Kothari, and R. Sahu, “Experimental Analysis on Fabricated Parabolic Solar Collector with Various Flowing Fluids and Pipe Materials,” *International Journal of Renewable Energy Research*, no. v6i4, 2016, doi: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v6i4.4691.g6934>.
- [81] M. B. Elsheniti, A. Kotb, and O. Elsamni, “Thermal performance of a heat-pipe evacuated-tube solar collector at high inlet temperatures,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 154, pp. 315–325, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.106>.
- [82] Σ. Μπέλλος, “Αξιοποίηση και βελτιστοποίηση της χρήσης ηλιακών συστημάτων στα κτήρια,” Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Available: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/44026/solar_bellos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [83] H. Price et al., “Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 124, no. 2, pp. 109–125, May 2002, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1467922>.
- [84] S. Qazi, “Chapter 7 - Solar Thermal Electricity and Solar Insolation,” *ScienceDirect*, Jan. 01, 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128030226000071>
- [85] S. A. Kalogirou, “A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver,” *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 298–306, Dec. 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.023>.
- [86] “Solar Thermal Systems and Components,” www.aee-intec.at. <https://www.aee-intec.at/index.php?lang=en>
- [87] M. Günther, M. Joemann, and S. Csambor, *Advanced CSP Teaching Materials*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2011.
- [88] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Alternative designs of parabolic trough solar collectors,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 71, pp. 81–117, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.11.001>.
- [89] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Investigation of a star flow insert in a parabolic trough solar collector,” *Applied Energy*, vol. 224, pp. 86–102, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.099>.
- [90] E. Bellos and C. Tzivanidis, “Enhancing the Performance of Evacuated and Non-Evacuated Parabolic Trough Collectors Using Twisted Tape Inserts, Perforated Plate Inserts and Internally Finned Absorber,” *Energies*, vol. 11, no. 5, p. 1129, May 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/en11051129>.
- [91] N. C. Bhowmik and S. C. Mullick, “Calculation of tubular absorber heat loss factor,” *Solar Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 219–225, 1985, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(85\)90101-x](https://doi.org/10.1016/0038-092x(85)90101-x).

- [92] W. C. Swinbank, “Long-wave radiation from clear skies,” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 89, no. 381, pp. 339–348, Jul. 1963, doi: <https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>.
- [93] H. Gaul and A. Rabl, “Incidence-Angle Modifier and Average Optical Efficiency of Parabolic Trough Collectors,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 102, no. 1, pp. 16–21, Feb. 1980, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3266115>.
- [94] L. at E. Wikipedia, “Image by: Schlaich Bergermann und Partner and released into public domain at,” *Wikimedia Commons*, Jan. 10, 2006. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EuroDishSBP_front.jpg (accessed Feb. 16, 2024).
- [95] A. Sharma, “A comprehensive study of solar power in India and World,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1767–1776, May 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.12.017>.
- [96] E. Bellos, Z. Said, and C. Tzivanidis, “The use of nanofluids in solar concentrating technologies: A comprehensive review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, pp. 84–99, Sep. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.048>.
- [97] M. Z. Malik et al., “A review on design parameters and specifications of parabolic solar dish Stirling systems and their applications,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4128–4154, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.031>.
- [98] J. Yan, Z. Cheng, and Y. Peng, “Effects of geometrical parameters of a dish concentrator on the optical performance of a cavity receiver in a solar dish-Stirling system,” *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 6, pp. 2152–2168, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/er.3998>.
- [99] A. Poullikkas, G. Kourtis, and I. Hadjipaschalis, “Parametric analysis for the installation of solar dish technologies in Mediterranean regions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 2772–2783, Dec. 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.021>.
- [100] V. Thakkar, A. Doshi, and A. Rana, “Performance Analysis Methodology for Parabolic Dish Solar Concentrators for Process Heating Using Thermic Fluid Performance Analysis Methodology for Parabolic Dish Solar Concentrators for Process Heating Using Thermic Fluid,” *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, vol. 12, no. 1, pp. 101–114, 2015, doi: <https://doi.org/10.9790/1684-1212101114>.
- [101] C. Gan, M. Ruddin, and A. Ghani, “Development of Design Parameters for the Concentrator of Parabolic Dish (PD) Based Concentrating Solar Power (CSP) under Malaysia Environment,” 2017.

[102] E. Gholamalizadeh and J. D. C. Dong Chung, “Design of the Collector of a Solar Dish-Stirling System: A Case Study | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore,” [ieeexplore.ieee.org](https://ieeexplore.ieee.org/document/8055565), 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8055565> (accessed Feb. 19, 2024).

[103] P. R. Fraser, Stirling Dish System Performance Prediction Model. University of Wisconsin - Madison, 2008. Available: https://books.google.gr/books/about/Stirling_Dish_System_Performance_Predict.html?id=wpwMAQAAMAAJ&redir_esc=y

[104] J. J. O’Gallagher, Nonimaging Optics in Solar Energy. Morgan & Claypool Publishers, 2008. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-79420-9>.

[105] F. Masood, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, J. Akhter, and M. A. Alam, “A New Approach for Design Optimization and Parametric Analysis of Symmetric Compound Parabolic Concentrator for Photovoltaic Applications,” *Sustainability*, vol. 13, no. 9, p. 4606, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/su13094606>.

[106] A. S. Gudekar, A. S. Jadhav, S. V. Panse, J. B. Joshi, and A. B. Pandit, “Cost effective design of compound parabolic collector for steam generation,” *Solar Energy*, vol. 90, pp. 43–50, Apr. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.12.020>.

[107] R. Winston, J. C. Minano, and P. G. Benitez, Nonimaging Optics. Academic Press, 2005. Available: https://books.google.gr/books/about/Nonimaging_Optics.html?id=MliJHWwTnVQC&redir_esc=y

[108] A. Rabl, “Comparison of solar concentrators,” *Solar Energy*, vol. 18, no. 2, pp. 93–111, 1976, doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(76\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0038-092x(76)90043-8).

[109] I. Zanesco and E. Lorenzo, “Optimisation of an asymmetric static concentrator: the PEC-44D,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 10, no. 5, pp. 361–376, May 2002, doi: <https://doi.org/10.1002/pip.431>.

[110] Π. Δ. Λαμπρόπουλος, “Σχεδιασμός ηλιοστατικού πεδίου ηλιοθερμικής εγκατάστασης με κεντρικό ηλιακό δέκτη και προσδιορισμός της προς ατμοπαραγωγή θερμικής απολαβής,” [dspace.lib.ntua.gr](https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/8729), Jul. 19, 2013. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/8729> (accessed Feb. 20, 2024).

[111] Δ. Δάφλος, “ Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Συγκεντρωμένη Ηλιακή Ενέργεια. Σχεδιασμός Εγκατάστασης Συλλεκτών Παραβολικής Σκάφης για την υβριδοποίηση του ΑΗΣ της περιοχής Σορωνής Ρόδου,” ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:, 2012. Available: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/5987/daflosd_hybridization.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [112] “Gem solar power plant in Andalusia provides efficient clean energy | Livegreenblog,” Floornature.com. <https://www.floornature.com/blog/gemasolar-power-plant-in-andalusia-provides-efficient-clean-energy-7405/>
- [113] F. Rinaldi, M. Binotti, A. Giostri, and G. Manzolini, “Comparison of Linear and Point Focus Collectors in Solar Power Plants,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1491–1500, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.158>.
- [114] L. Crespo, F. Ramos, and F. Martinez, “Questions and Answers on Solar Central Receiver Plant Design by NSPOC,” Granada: SolarPACES, 2011.
- [115] N. Björkman, “HELIOSTAT DESIGN,” Master Thesis, KTH Industrial Engineering and Management Machine Design, 2014.
- [116] A. Ghosal, “Robotics: Fundamental Concepts and Analysis,” Semantic Scholar, Feb. 01, 2006. <https://www.semanticscholar.org/paper/Robotics%3A-Fundamental-Concepts-and-Analysis-Ghosal/9807b78e7ea0876e02bd3b4185ecf284db06c924>
- [117] L. L. Vant-Hull, “8 - Central tower concentrating solar power (CSP) systems,” ScienceDirect, Jan. 01, 2012. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978184569769350008X>
- [118] A. G. Pakhomov, J. F. Kolb, J. A. White, R. P. Joshi, S. Xiao, and K. H. Schoenbach, “Long-lasting plasma membrane permeabilization in mammalian cells by nanosecond pulsed electric field (nsPEF),” *Bioelectromagnetics*, vol. 28, no. 8, pp. 655–663, Dec. 2007, doi: <https://doi.org/10.1002/bem.20354>.
- [119] J. B. Blackmon, “17 - Heliostat size optimization for central receiver solar power plants,” ScienceDirect, Jan. 01, 2012. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781845697693500170?via%3Dihub>
- [120] K. Kulkarni, Sanjay Havaladar, and N. Bhattacharya, “Review on advance tubular receivers for central solar tower system,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1136, no. 1, pp. 012018–012018, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1136/1/012018>.
- [121] M. Zheng, J. Zapata, C.-A. Asselineau, J. Coventry, and J. Pye, “Analysis of tubular receivers for concentrating solar tower systems with a range of working fluids, in exergy-optimised flow-path configurations,” *Solar Energy*, vol. 211, pp. 999–1016, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.037>.
- [122] Β. Ν. Κρασσάς, “Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα: μια οικονομοτεχνική μελέτη για την Ελληνική Επικράτεια,” dspace.lib.ntua.gr, Mar. 15, 2011. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/3890?show=full>

- [123] G. Barreto, P. Canhoto, and M. Collares-Pereira, “Parametric analysis and optimisation of porous volumetric solar receivers made of open-cell SiC ceramic foam,” *Energy*, vol. 200, p. 117476, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117476>.
- [124] S. Polimeni, M. Binotti, L. Moretti, and G. Manzolini, “Comparison of sodium and KCl-MgCl₂ as heat transfer fluids in CSP solar tower with sCO₂ power cycles,” *Solar Energy*, vol. 162, pp. 510–524, Mar. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.046>.
- [125] F. M. Falahat and M. R. Goma, “A review study on solar tower using different heat transfer fluid,” *Technology audit and production reserves*, vol. 5, no. 1(67), pp. 38–43, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.267560>.
- [126] R. Aguilar, L. Valenzuela, A. L. Avila-Marin, and P. L. Garcia-Ybarra, “Simplified heat transfer model for parabolic trough solar collectors using supercritical CO₂,” *Energy Conversion and Management*, vol. 196, pp. 807–820, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.029>.
- [127] T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, and J.-F. Fourmigué, “A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems,” *Solar Energy*, vol. 153, pp. 628–654, Sep. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.032>.
- [128] I. Mubeen, M. S. Khan, M. Abid, T. A. H. Ratlamwala, and M. Yan, “Performance assessment of a solar tower assisted combined cycle power plant using supercritical carbon dioxide as a heat transfer fluid,” *International Journal of Exergy*, vol. 36, no. 1, p. 30, 2021, doi: <https://doi.org/10.1504/ijex.2021.10040963>.
- [129] G. Adiyaman, L. Çolak, and İ. Horuz, “The Impact of Heat Transfer Fluids on the Sustainable Solutions for Solar Power Tower,” 4th International Sustainable Buildings Symposium, 2019, pp. 647–660. Available: https://www.researchgate.net/publication/342787668_The_Impact_of_Heat_Transfer_Fluids_on_the_Sustainable_Solutions_for_Solar_Power_Tower
- [130] M. Saghafifar, K. Mohammadi, and K. Powell, “Design and analysis of a dual-receiver direct steam generator solar power tower plant with a flexible heliostat field,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 39, p. 100698, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100698>.
- [131] S. el Hassani, H. A. Lahoussine Ouali, and R. Raillani, “Thermal Performance of Solar Tower Using Air as Heat Transfer Fluid under MENA Region Climate | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore,” ieeexplore.ieee.org, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9163893> (accessed Feb. 26, 2024).

- [132] G. Angelini, A. Lucchini, and G. Manzolini, “Comparison of Thermocline Molten Salt Storage Performances to Commercial Two-tank Configuration,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 694–704, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.075>.
- [133] Samir Benammar, “A Review Study on the Modeling and Simulation of Solar Tower Power Plants,” *Journal of Solar Energy Research Updates*, vol. 7, pp. 100–121, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.31875/2410-2199.2020.07.9>.
- [134] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, “Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, no. 4, pp. 285–319, Aug. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.02.001>.
- [135] A. Bilal Awan, M. N. Khan, M. Zubair, and E. Bellos, “Commercial parabolic trough CSP plants: Research trends and technological advancements,” *Solar Energy*, vol. 211, pp. 1422–1458, Nov. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.072>.
- [136] Σ. Ιωάννης-Αθανάσιος, “Διπλωματική εργασία ‘Μελέτη καινοτόμων συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας για ηλιακά οδηγούμενο οργανικό κύκλο Rankine’ ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ,” 2021. Available: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/53257/Sarakatsanis_Thesis.pdf?sequence=1
- [137] “TheSolarProject,” *Wikipedia*, Feb. 18, 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/The_Solar_Project
- [138] A. S. Tijani and M. J. B. Jamarei, “Numerical investigation of thermal losses from air filled annulus of a parabolic trough solar collector,” *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Numerical-investigation-of-thermal-losses-from-air-Tijani-Jamarei/6992767f5a3b4e175df4937810b4a29c7b879fe8>
- [139] A. Allouis, “Concentrated Solar Power (CSP),” 2014.
- [140] W. Lou, Y. Fan, and L. Luo, “Single-tank thermal energy storage systems for concentrated solar power: Flow distribution optimization for thermocline evolution management,” *Journal of Energy Storage*, vol. 32, p. 101749, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101749>.
- [141] G. Li, “Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 897–923, Jan. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.006>.
- [142] J. Chen, Y. Zhang, C. Zou, X. Yulong, and Ouyang Yuming, “Thermal performance analysis of a thermocline storage tank with integrated annular distributors,” *Frontiers in Energy Research*, vol. 11, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1190760>.

- [143] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, “An overview of thermal energy storage systems,” *Energy*, vol. 144, pp. 341–378, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>.
- [144] N. Xie et al., “Spray-type packed bed concept for thermal energy storage: Liquid holdup and energy storage characteristics,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 160, p. 114082, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114082>.
- [145] Y. Filali Baba, A. Al Mers, A. Faik, and A. Bouatem, “New insight into thermocline packed bed energy storage systems: Fast algorithm for sizing,” *Journal of Energy Storage*, vol. 44, p. 103419, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103419>.
- [146] W. Goldstern, *Steam Storage Installations: Construction, Design, and Operation of Industrial Heat Accumulators*. Pergamon Press, 1970. Available: https://books.google.gr/books/about/Steam_Storage_Installations.html?id=DtA1AQAAIAAJ&redir_esc=y
- [147] W.-D. Steinmann and M. Eck, “Buffer storage for direct steam generation,” *Solar Energy*, vol. 80, no. 10, pp. 1277–1282, Oct. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.05.013>.
- [148] E. González-Roubaud, D. Pérez-Osorio, and C. Prieto, “Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 133–148, Dec. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.084>.
- [149] R. Osuna et al., “SolarPACES2006 A4-S3 PS10, CONSTRUCTION OF A 11MW SOLAR THERMAL TOWER PLANT IN SEVILLE, SPAIN,” Jan. 2006.
- [150] C. Prieto, D. Pérez Osorio, E. Gonzalez-Roubaud, S. Fereres, and L. F. Cabeza, “Advanced Concrete Steam Accumulation Tanks for Energy Storage for Solar Thermal Electricity,” *Energies*, vol. 14, no. 13, p. 3896, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/en14133896>.
- [151] E. S. Kenda, K. E. N’Tsoukpoe, I. W. K. Ouédraogo, Y. Coulibaly, X. Py, and F. M. A. W. Ouédraogo, “Jatropha curcas crude oil as heat transfer fluid or thermal energy storage material for concentrating solar power plants,” *Energy for Sustainable Development*, vol. 40, pp. 59–67, Oct. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.07.003>.
- [152] H. Benoit, L. Spreafico, D. Gauthier, and G. Flamant, “Review of heat transfer fluids in tube-receivers used in concentrating solar thermal systems: Properties and heat transfer coefficients,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 298–315, Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.059>.
- [153] R. Jacob, M. Belusko, A. Inés Fernández, L. F. Cabeza, W. Saman, and F. Bruno, “Embodied energy and cost of high temperature thermal energy storage systems for use with concentrated solar power plants,” *Applied Energy*, vol. 180, pp. 586–597, Oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.027>.

- [154] A. Gil et al., “State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 31–55, Jan. 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035>.
- [155] M. R. Rodríguez Sanchez, M. Venegas Bernal, C. Marugán Cruz, and D. Santana, “Thermal, mechanical and hydrodynamic analysis to optimize the design of molten salt central receivers of solar tower power plants,” *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, pp. 128–133, Mar. 2013, doi: <https://doi.org/10.24084/repqj11.238>.
- [156] N. Calvet et al., “Compatibility of a post-industrial ceramic with nitrate molten salts for use as filler material in a thermocline storage system,” *Applied Energy*, vol. 109, pp. 387–393, Sep. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.078>.
- [157] A. Fritsch, J. Flesch, V. Geza, Cs. Singer, R. Uhlig, and B. Hoffschmidt, “Conceptual Study of Central Receiver Systems with Liquid Metals as Efficient Heat Transfer Fluids,” *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 644–653, May 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.074>.
- [158] U. Pelay, L. Luo, Y. Fan, D. Stitou, and M. Rood, “Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 82–100, Nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.139>.
- [159] B. Cárdenas and N. León, “High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, no. C, pp. 724–737, 2013, Available: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v27y2013icp724-737.html>
- [160] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-68557-9>.
- [161] Ibrahim Dinçer and M. A. Rosen, *Thermal Energy Storage*. John Wiley and Sons, 2010.
- [162] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, “An overview of thermal energy storage systems,” *Energy*, vol. 144, pp. 341–378, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.037>.
- [163] B. He and F. Setterwall, “Technical grade paraffin waxes as phase change materials for cool thermal storage and cool storage systems capital cost estimation,” *Energy Conversion and Management*, vol. 43, no. 13, pp. 1709–1723, Sep. 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/s0196-8904\(01\)00005-x](https://doi.org/10.1016/s0196-8904(01)00005-x).
- [164] A. Stamatiou, M. Obermeyer, L. J. Fischer, P. Schuetz, and J. Worlitschek, “Investigation of unbranched, saturated, carboxylic esters as phase change materials,” *Renewable Energy*, vol. 108, pp. 401–409, Aug. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.056>.
- [165] Y. Yuan, N. Zhang, W. Tao, X. Cao, and Y. He, “Fatty acids as phase change materials: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 29, no. C, pp. 482–498, 2014,

Available:

https://econpapers.repec.org/article/eeerensus/v_3a29_3ay_3a2014_3ai_3ac_3ap_3a482-498.htm

[166] A. Solé, H. Neumann, S. Niedermaier, I. Martorell, P. Schossig, and L. F. Cabeza, “Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 126, pp. 125–134, Jul. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.03.020>.

[167] G. Kumaresan, R. Velraj, and S. Iniyan, “Thermal Analysis of D-mannitol for Use as Phase Change Material for Latent Heat Storage,” *scialert.net*, 2011. <https://scialert.net/abstract/?doi=jas.2011.3044.3048>

[168] Myers and D. Philip, “Additives for Heat Transfer Enhancement in High Temperature Thermal Energy Storage Media: Selection and Characterization,” Jan. 2015.

[169] Ralf Raud, R. Jacob, F. Bruno, G. Will, and T. A. Steinberg, “A critical review of eutectic salt property prediction for latent heat energy storage systems,” vol. 70, pp. 936–944, Apr. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.274>.

[170] H. Schmit, W. Pfeffer, and C. Rathgeber, “Calorimetric investigation of the concentration dependent enthalpy change around semicongruent melting $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,” *Thermochimica Acta*, vol. 635, pp. 26–33, Jul. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.04.023>.

[171] A. Inés Fernández, C. Barreneche, M. Belusko, M. Segarra, F. Bruno, and L. F. Cabeza, “Considerations for the use of metal alloys as phase change materials for high temperature applications,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 171, pp. 275–281, Nov. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.054>.

[172] Y. Kato, “CHEMICAL ENERGY CONVERSION TECHNOLOGIES FOR EFFICIENT ENERGY USE,” Springer eBooks, pp. 377–391, Mar. 2007, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5290-3_23.

[173] J. Yan and C. Y. Zhao, “Experimental study of $\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ in a fixed-bed reactor for thermochemical heat storage,” *Applied Energy*, vol. 175, pp. 277–284, Aug. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.038>.

[174] E. Mastronardo, L. Bonaccorsi, Y. Kato, E. Piperopoulos, and C. Milone, “Efficiency improvement of heat storage materials for $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}/\text{Mg}(\text{OH})_2$ chemical heat pumps,” *Applied Energy*, vol. 162, no. C, pp. 31–39, 2016, Available: https://econpapers.repec.org/article/eeeappene/v_3a162_3ay_3a2016_3ai_3ac_3ap_3a31-39.htm

[175] A. Shkatulov and Y. Aristov, “Modification of magnesium and calcium hydroxides with salts: An efficient way to advanced materials for storage of middle-temperature heat,” *Energy*, vol. 85, no. C, pp. 667–676, 2015, Available: <https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v85y2015icp667-676.html>

- [176] A. H. Alami et al., “Concentrating solar power (CSP) technologies: Status and analysis,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 18, p. 100340, May 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2023.100340>.
- [177] J. Lilliestam, L. Ollier, M. Labordena, S. Pfenninger, and R. Thonig, “The near- to mid-term outlook for concentrating solar power: mostly cloudy, chance of sun,” *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 16, no. 1, pp. 23–41, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/15567249.2020.1773580>.
- [178] M. Imran Khan, F. Asfand, and S. G. Al-Ghamdi, “Progress in research and technological advancements of commercial concentrated solar thermal power plants,” *Solar Energy*, vol. 249, pp. 183–226, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.041>.
- [179] M. Mehos et al., “Concentrating Solar Power Best Practices Study,” 2020. Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75763.pdf>
- [180] J. Gosens, C. Binz, and R. Lema, “China’s role in the next phase of the energy transition: Contributions to global niche formation in the Concentrated Solar Power sector,” *Environmental Innovation and Societal Transitions*, vol. 34, pp. 61–75, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.12.004>.
- [181] I. Arias, J. Cardemil, E. Zarza, L. Valenzuela, and R. Escobar, “Latest developments, assessments and research trends for next generation of concentrated solar power plants using liquid heat transfer fluids,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 168, p. 112844, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112844>.
- [182] “Global Solar Atlas,” globalsolaratlas.info. <https://globalsolaratlas.info/download/middle-east-and-north-africa>
- [183] S. M. Monteagudo, A. Moragues, J. C. Gálvez, M. J. Casati, and E. Reyes, “The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases,” *Thermochimica Acta*, vol. 592, pp. 37–51, Sep. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.08.008>.
- [184] M. S. Răboacă et al., “Concentrating Solar Power Technologies,” *Energies*, vol. 12, no. 6, p. 1048, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12061048>.
- [185] “Concentrating Solar Power Projects | Concentrating Solar Power Projects,” Nrel.gov, 2019. <https://solarpaces.nrel.gov/>
- [186] IRENA, “Renewable Power Generation Costs in 2022,” www.irena.org, Aug. 29, 2023. <https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022>

- [187] B. J. Alqahtani and D. Patiño-Echeverri, “Integrated Solar Combined Cycle Power Plants: Paving the way for thermal solar,” *Applied Energy*, vol. 169, pp. 927–936, May 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.083>.
- [188] O. Behar, A. Khellaf, K. Mohammedi, and S. Ait-Kaci, “A review of integrated solar combined cycle system (ISCCS) with a parabolic trough technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 223–250, Nov. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.066>.
- [189] J. Lilliestam, M. Labordena, A. Patt, and S. Pfenninger, “Empirically observed learning rates for concentrating solar power and their responses to regime change,” *Nature Energy*, vol. 2, no. 7, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.94>.
- [190] J. H. Peterseim, S. White, A. Tadros, and U. Hellwig, “Concentrated solar power hybrid plants, which technologies are best suited for hybridisation?,” *Renewable Energy*, vol. 57, pp. 520–532, Sep. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.014>.
- [191] B. Kelly, U. Herrmann, and Mary Jane Hale, “Optimization Studies for Integrated Solar Combined Cycle Systems,” Apr. 2001, doi: <https://doi.org/10.1115/sed2001-150>.
- [192] M. J. Montes, A. Rovira, M. Muñoz, and J. M. Martínez-Val, “Performance analysis of an Integrated Solar Combined Cycle using Direct Steam Generation in parabolic trough collectors,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 9, pp. 3228–3238, Sep. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.038>.
- [193] O. Siddiqui and I. Dincer, “Analysis and performance assessment of a new solar-based multigeneration system integrated with ammonia fuel cell and solid oxide fuel cell-gas turbine combined cycle,” *Journal of Power Sources*, vol. 370, pp. 138–154, Dec. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.10.008>.
- [194] E. M. A. Mokheimer, Y. N. Dabwan, M. A. Habib, S. A. M. Said, and F. A. Al-Sulaiman, “Development and assessment of integrating parabolic trough collectors with steam generation side of gas turbine cogeneration systems in Saudi Arabia,” *Applied Energy*, vol. 141, pp. 131–142, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.027>.
- [195] O. Ayadi and I. Alsahen, “Techno-Economic Assessment of Concentrating Solar Power and Wind Hybridization in Jordan,” *Journal of Ecological Engineering*, vol. 19, no. 2, pp. 16–23, Mar. 2018, doi: <https://doi.org/10.12911/22998993/81239>.
- [196] W. T. Hamilton, M. A. Husted, A. M. Newman, R. J. Braun, and M. J. Wagner, “Dispatch optimization of concentrating solar power with utility-scale photovoltaics,” *Optimization and Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 335–369, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s11081-019-09449-y>.

- [197] J. A. Aguilar-Jiménez et al., “Techno-economic analysis of a hybrid PV-CSP system with thermal energy storage applied to isolated microgrids,” *Solar Energy*, vol. 174, pp. 55–65, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.08.078>.
- [198] C. Turchi, G. Zhu, M. Wagner, T. Williams, and D. Wendt, “GEOTHERMAL / SOLAR HYBRID DESIGNS: USE OF GEOTHERMAL ENERGY FOR CSP FEEDWATER HEATING,” vol. 38, Oct. 2014.
- [199] J. D. McTigue, D. Wendt, K. Kitz, J. Gunderson, N. Kincaid, and G. Zhu, “Assessing geothermal/solar hybridization – Integrating a solar thermal topping cycle into a geothermal bottoming cycle with energy storage,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 171, p. 115121, May 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115121>.
- [200] M. Chennaif, H. Zahboune, M. Elhafyani, and S. Zouggar, “Electric System Cascade Extended Analysis for optimal sizing of an autonomous hybrid CSP/PV/wind system with Battery Energy Storage System and thermal energy storage,” *Energy*, vol. 227, p. 120444, Jul. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120444>.
- [201] “Multi-objective sizing of solar-wind-hydro hybrid power system with doubled energy storages under optimal coordinated operation strategy,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, doi: <https://doi.org/10.17775/cseejpes.2021.00190>.
- [202] M. Núñez-Regueiro, “Yaşlı Kadınlarda Üreme Sağlığı,” *DergiPark (Istanbul University)*, vol. 1, no. 1, Feb. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j>.
- [203] Y.-L. He et al., “Perspective of concentrating solar power,” *Energy*, vol. 198, p. 117373, May 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117373>.
- [204] “Gen3 CSP Summit 2021,” *Energy.gov*, 2021. <https://www.energy.gov/eere/solar/gen3-csp-summit-2021> (accessed Mar. 05, 2024).
- [205] C. Wood and K. Drewes, “Vast Solar: improving performance and reducing cost and risk using high temperature modular arrays and sodium heat transfer fluid.” Available: <https://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/Vast-Solar-improving-performance-and-reducing-cost-and-risk-using-high-temperature-modular-arrays-and-sodium-heat-transfer-fluid.pdf>
- [206] J. Wang, Y. Huang, J. Zang, and G. Liu, “Recent Research Progress on Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle in China,” *Volume 9: Oil and Gas Applications; Supercritical CO2 Power Cycles; Wind Energy*, Jun. 2015, doi: <https://doi.org/10.1115/gt2015-43938>.