

Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
Σχολή Μηχανικών
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Ενέργειας



Δέσμευση εκπομπών CO₂ :
Τεχνολογίες Καταπολέμησης Κλιματικής Αλλαγής

Συγγραφέας:
Ρούσσης Ιωάννης, Α.Μ. 18392097

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σπυρόπουλος Γεώργιος

Αθήνα

Ιούλιος 2023

University of West Attica
School of engineering
Department of mechanical engineering
Energy sector



CO₂ Sequestration: Technologies to tackle climate change

Author:

Roussis Ioannis, R.N. 18392097

Supervisor Professor: Dr. Spyropoulos Georgios

Athens

July 2023

Τριμελής εξεταστική επιτροπή

α/α	Όνοματεπώνυμο	Υπογραφή
1	Σπυρόπουλος Γεώργιος	
2	Μουστρής Κωνσταντίνος	
3	Ζαφειράκης Δημήτριος	

Δήλωση συγγραφέα διπλωματικής εργασίας

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ρούσσης Ιωάννης του Βασιλείου, με αριθμό μητρώου 18392097 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών

Ρούσσης Ιωάννης



Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Με την περάτωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, Δρ. Σπυρόπουλο Γεώργιο, που μέσω του μαθήματος της «Ατμοσφαιρικής Ρύπανσης» μου έδωσε τόσο τον προβληματισμό όσο και την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο της δέσμευσης του διοξειδίου του άνθρακα.

Είμαι ευγνώμων για την συνεργασία μας καθώς και για τις υποδείξεις και τις συμβουλές που έλαβα με στόχο να ολοκληρώσω την κάτωθεν εργασία προσκομίζοντας γνώσεις που θα με ακολουθούν κατά την διάρκεια της καριέρας μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Καθηγητές μου καθ' όλη την διάρκεια της φοίτησής μου στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής και τους συμφοιτητές με τους οποίους συνεργάστηκα και στηρίχθηκα για να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τους συγγενείς μου και τους φίλους μου, που ήταν πάντα δίπλα μου στην φοιτητική μου σταδιοδρομία, στηρίζοντας και ενδυναμώνοντας με να συνεχίσω την πορεία μου.

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή, συνυφασμένη με την συνεχώς αυξανόμενη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα αποτελεί σημαντικό κίνδυνο για την βιωσιμότητα της ανθρωπότητας. Το γεγονός αυτό, αφενός κρίνει αναγκαία την απανθρακοποίηση του τρόπου ζωής μας, αφετέρου γίνεται η αφετηρία για τεχνολογίες που θα δεσμεύουν το CO₂ στις περιπτώσεις που η καύση συμβατικών καυσίμων προς παραγωγή ενέργειας και προϊόντων είναι αναπόφευκτη. Εγκαταστάσεις δέσμευσης, αποθήκευσης και χρησιμοποίησης του CO₂ που παράγεται από την καύση του άνθρακα και άλλων καυσίμων αποτελούν μια λύση του προβλήματος και χρησιμοποιούνται ήδη από το 1970. Ωστόσο, αντιμετωπίζουν το πρόβλημα ότι δεσμεύουν μέρος του διοξειδίου που παράγεται από την μονάδα καύσης και εγκαθίστανται πάντα εντός μονάδων παραγωγής. Μια νέα τεχνολογία καλείται να λύσει το παραπάνω πρόβλημα, δεσμεύοντας το διοξείδιο του άνθρακα απευθείας από τον αέρα ανεξάρτητα από το σημείο που βρίσκεται η ίδια η εγκατάσταση. Οι λεγόμενοι σταθμοί DAC (Direct Air Capture), λοιπόν, αποτελούν τη μελλοντική λύση για να επιτευχθούν οι Εθνικοί στόχοι σύμφωνα με την Συμφωνία του Παρισιού, ενώ μακροπρόθεσμα θα αποτελέσουν βασικό πυλώνα για την επίτευξη καθαρών μηδενικών εκπομπών CO₂. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα πραγματοποιηθεί ανάλυση των τεχνολογιών αυτών, ενώ παράλληλα θα παρουσιαστούν και τρόποι αποθήκευσης και αξιοποίησης του δεσμευμένου CO₂ προς ανάκτηση ενέργειας, παραγωγή καυσίμων και προϊόντων. Κατόπιν, ακολουθεί μία μελέτη για την τοποθέτηση μίας τεχνολογίας DAC στην Ελλάδα με σκοπό την δέσμευση ενός ποσού εκπομπών της χώρας, από τον τομέα μεταφορών.

Λέξεις Κλειδιά

Κλιματική αλλαγή, Διοξείδιο του άνθρακα, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Άμεση δέσμευση αέρα, Αποθήκευση και αξιοποίηση CO₂.

Abstract

Climate change, related to the ever-increasing concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere, is a major risk to the sustainability of humanity. This fact deems it necessary to decarbonize our way of life. Additionally, it serves as the starting point for technologies that can bind CO₂ in cases where the burning of conventional fuels for energy and product production is unavoidable. Installations for the capture, storage and utilization of CO₂ produced by the combustion of coal and other fuels have been a solution to this problem and have been in use since 1970. However, their disadvantage is that they capture only a portion of the dioxide produced by the combustion unit, and they need to be installed within the production units. A new technology, aiming to solve the aforementioned problem by directly capturing CO₂ from the air, regardless of its installation location, is called DAC (Direct Air Capture). DAC stations represent the future to achieve our goals in compliance with the Paris Agreement, and in the long term they will contribute to achieving net-zero CO₂ emissions. In this thesis, we will analyze these technologies and explore ways to store and utilize the captured CO₂ for energy recovery, fuel production and other products. Subsequently, a study will be conducted on the implementation of a DAC technology in Greece with the aim of capturing a quantity of the country's emissions by the transportation sector.

Key words

Climate change, Carbon dioxide, Renewable energy, Direct air capture, CO₂ storage and utilization.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	VII
Abstract	VIII
Λέξεις Κλειδιά.....	VII
Κατάλογος Σχημάτων	XII
Κατάλογος Πινάκων.....	XVI
1.1 Η κλιματική αλλαγή.....	1
1.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	2
1.3 Η συμφωνία του Παρισιού	4
1.4 Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών	5
1.5 Διαχείριση διοξειδίου του άνθρακα.....	6
1.5.1 Δέσμευση από ροές βιομηχανικών διεργασιών.....	8
1.5.2 Δέσμευση μετά την καύση	8
1.5.3 Δέσμευση με καύση οξυγόνου καυσίμου.....	8
1.5.4 Δέσμευση πριν την καύση	9
1.6 Τύποι τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα.....	10
1.6.1 Διαχωρισμός με απορροφητικά/διαλύτες	10
1.6.2 Διαχωρισμός με μεμβράνες	11
1.6.3 Απόσταξη ρεύματος υγροποιημένου αερίου και διαχωρισμός υπό ψύξη	12
1.7 Τρέχουσα τεχνολογική στάθμιση	13
1.7.1 Ηγετικές εταιρίες	15
1.7.1.1 Climeworks	15
1.7.1.2 Carbon Engineering	17
1.7.2 Μελλοντικά σενάρια.....	20
1.8 Αντικείμενο και σκοπός.....	21
2.1 Δέσμευση από τον αέρα.....	23
2.2 Τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα από τον αέρα	27

2.2.1	Υδατικά διαλύματα βάσης.....	27
2.2.2	Στερεά απορροφητικά.....	28
2.2.2.1	Υλικά φυσικής απορρόφησης	29
2.2.2.2	Χημική απορρόφηση: Υλικά τροποποιημένα με αμίνη.....	31
2.3	Μονάδες DAC (Direct air capture).....	33
2.3.1	Μονάδες DAC με στερεά απορροφητικά (S-DAC)	35
2.3.2	Μονάδες DAC με υγρά απορροφητικά (L-DAC)	37
2.3.3	Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών S-DAC και L-DAC... 38	
3.1	Αποθήκευση δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα.....	40
3.1.1	Αλατούχοι σχηματισμοί.....	40
3.1.2	Ταμειντήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου	40
3.1.3	Μη εξορύξιμες φλέβες άνθρακα.....	41
3.1.4	Σχηματισμοί από βασάλτη.....	41
3.1.5	Οργανικοί σχιστολιθικοί σχηματισμοί	41
3.2	Αξιοποίηση δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα	42
3.2.1	Φυσική αξιοποίηση.....	43
3.2.2	Χημική αξιοποίηση	44
3.2.3	Βιολογική αξιοποίηση	45
3.2.4	Αξιοποίηση με μεταλλοποίηση	46
4.1	Ενεργειακά χαρακτηριστικά μονάδων DAC	48
4.1.1	Ενεργειακή αξιολόγηση μονάδας S-DAC	48
4.1.2	Ενεργειακή αξιολόγηση μονάδας L-DAC.....	49
4.2	Οικονομικά χαρακτηριστικά μονάδων DAC	51
4.2.1	Οικονομική αξιολόγηση μονάδας S-DAC	51
4.2.2	Οικονομική αξιολόγηση μονάδας L-DAC	53
4.3	Μακροπρόθεσμες προδιαγραφές μονάδων DAC	55
4.4	Εκπομπές CO ₂ στην Ελλάδα	58

4.5	Κόστος Α.Π.Ε.	61
4.5.1	Αιολική ενέργεια	61
4.5.2	Ηλιακή ενέργεια	61
4.5.3	Γεωθερμική ενέργεια.....	62
4.5.4	Εξέλιξη κόστους Α.Π.Ε. στο μέλλον.....	63
4.5.5	Χωροθέτηση μονάδων Α.Π.Ε.....	64
4.6	Αποθήκευση CO ₂	65
5.1	Παραδοχές μελέτης.....	70
5.2	Στόχος εκτιμώμενων εκπομπών.....	71
5.3	Επιλογή τεχνολογίας S-DAC (Σενάριο 1)	73
5.4	Επιλογή τεχνολογίας L-DAC (Σενάριο 2).....	76
5.5	Αποθήκευση δεσμευμένου CO ₂	79
5.6	Επιλογή τοποθεσίας εγκατάστασης των μονάδων.....	83
5.6.1	Διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση	83
5.6.2	Απόσταση από γεωθερμικά πεδία	86
5.6.3	Απόσταση από χώρους υπόγειας αποθήκευσης	87
5.7	Απόσβεση επένδυσης.....	87
6.1	Αποτελέσματα και συμπεράσματα	90
6.2	Επίλογος.....	95
	Βιβλιογραφία.....	97

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Παγκόσμια θερμοκρασιακή διακύμανση (°C) σε σύγκριση με το μέσο όρο των ετών 1951-1980) (NASA, 2020).....	1
Σχήμα 2: Μοριακή δομή διοξειδίου του άνθρακα (alison, 2019).....	3
Σχήμα 3: Παγκόσμιες εκπομπές CO ₂ από την καύση ενέργειας και τις βιομηχανικές διεργασίες, 1900-2022 (“CO ₂ Emissions in 2022 – Analysis,”).....	3
Σχήμα 4: Ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην Ελλάδα από το 1970 έως το 2021 (Ian Tiseo, 2023a).	4
Σχήμα 5: Μέσες εκτιμώμενες τιμές άνθρακα παγκοσμίως ανά σύστημα εμπορίας (2022-2030) (Ian Tiseo, 2023b).....	6
Σχήμα 6: Δυναμικότητα έργων δέσμευσης CO ₂ μεγάλης κλίμακας για το διάστημα 2020-2030, λειτουργικά και προγραμματισμένα, (“Carbon capture, utilisation and storage - Fuels & Technologies - IEA,”).	7
Σχήμα 7: Επενδύσεις επιχειρηματικών κεφαλαίων σε νεοσύστατες επιχειρήσεις CCU, 2015-2021 (IEA, 2023).	7
Σχήμα 8: Συστήματα δέσμευσης CO ₂ (από BP).....	9
Σχήμα 9: Διαχωρισμός με απορροφητικά/διαλύτες (Hribernik, 2015).	10
Σχήμα 10: Διαχωρισμός με μεμβράνη (Bert Metz et al, 2005).	11
Σχήμα 11: Απόσταξη ρεύματος υγροποιημένου αερίου και διαχωρισμός υπό ψύξη (Bert Metz et al, 2005).....	12
Σχήμα 12: Διαδικασία συλλογής και γεωλογικής αποθήκευσης CO ₂ (Terlouw et al., 2021).....	13
Σχήμα 13: Η πρώτη βιομηχανικής κλίμακας μονάδα άμεσης δέσμευσης αέρα της Climework στο Hinwil (Climeworks, 2015).....	16

Σχήμα 14: Κύριος μηχανισμός δέσμευσης CO ₂ της Climeworks, (European Institute of Innovation & Technology, 2020).	17
Σχήμα 15: Κύριος μηχανισμός δέσμευσης CO ₂ της Carbon Engineering (POWER, 2015).....	18
Σχήμα 16: Κέντρο καινοτομίας της Carbon Engineering στο Squamish της Βρετανικής Κολομβίας, (Griffin, 2021)	19
Σχήμα 17: Ψηφιακή αναπαράσταση της εγκατάστασης DAC στο Τέξας, Ηνωμένες πολιτείες (Lust, 2022).	19
Σχήμα 18: Τρόπος λειτουργίας σταθμού S-DAC (Jennifer L., 2022).	23
Σχήμα 19: Τρόπος λειτουργίας σταθμού L-DAC (Jennifer L., 2022).	24
Σχήμα 20: Σχηματική αναπαράσταση κυψέλης για τεχνολογία ESA (Voskian and Hatton, 2019).....	25
Σχήμα 21: Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας m-DAC (Fujikawa et al., 2021).....	26
Σχήμα 22: Δομή των υλικών ενεργού άνθρακα (Mangold, 2011).....	29
Σχήμα 23: Μικροσκοπική δομή ενός πλαισίου ζεόλιθου (μορδενίτη) (François-Xavier Coudert, 2023).....	30
Σχήμα 24: Δομή μεταλλο-οργανικού πλαισίου (MOF) (Singh et al., 2021).	30
Σχήμα 25: Οι τρεις κατηγορίες τροποποιημένων απορροφητικών με αμίνη, (Didas et al., 2015).....	32
Σχήμα 26: Παγκόσμια λειτουργική ικανότητα DAC 2010-2021 (“Direct Air Capture – Analysis,”).....	34
Σχήμα 27: Προγραμματισμένα έργα DAC και σενάριο Net Zero σε MtCO ₂ που θα δεσμεύουν, 2020-2030 (“Direct Air Capture – Analysis,”).....	35
Σχήμα 28: Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα ροής διεργασίας για στερεό ροφητικό DAC (McQueen et al., 2021).....	36

Σχήμα 29: Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα ροής διεργασίας για τη διεργασία με διαλύτη (McQueen et al., 2021).....	38
Σχήμα 30: Τρόποι αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα σε μία μονάδα παραγωγής (Ali et al., 2022).....	42
Σχήμα 31: Κατάκλυση CO ₂ με έγχυση σε υπόγειο ταμιευτήρα πετρελαίου (Wang et al., 2020).....	43
Σχήμα 32: Μέθοδοι και προϊόντα χημικής αξιοποίησης CO ₂ (Mustafa et al., 2020).....	44
Σχήμα 33: Διάφορες βιολογικές διεργασίες που έχουν δυνατότητες για τη δέσμευση CO ₂ μαζί με τη βιώσιμη παραγωγή βιοενέργειας/χημικών προϊόντων (Kondaveeti et al., 2020).....	45
Σχήμα 34: Βασικές αρχές των μεθόδων άμεσης και έμμεσης ενανθράκωσης(Bodor et al., 2011).....	46
Σχήμα 35: Διάγραμμα βημάτων μεθοδολογίας	47
Σχήμα 36: Ενεργειακές απαιτήσεις για L-DAC με κύκλο ανθρακικού ασβεστίου (900°C).....	49
Σχήμα 37: Ανάπτυξη του κόστους επένδυσης L-DAC, S-DAC με βάση την καμπύλη εκμάθησης.	57
Σχήμα 38: Εκπομπές/απορροφήσεις αερίων θερμοκηπίου στην Ελλάδα.....	58
Σχήμα 39: Εξέλιξη εκπομπών CO ₂ ανά τομέα έως το έτος 2030, για το σενάριο επίτευξης στόχων.	60
Σχήμα 40: Εξέλιξη εκπομπών CO ₂ ανά τομέα έως το έτος 2030 για το σενάριο υφιστάμενων πολιτικών και μέτρων (χωρίς εκπομπές από διεθνείς αερομεταφορές).....	60
Σχήμα 41: Κύριοι προτεινόμενοι χώροι αποθήκευσης ενέργειας και CO ₂ υψηλής δυναμικότητας, (Arvanitis et al., 2020).....	65
Σχήμα 42: Δυνητικά κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης, βραχυπρόθεσμο σενάριο	67

Σχήμα 43: Δυνητικά κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης, μακροπρόθεσμο σενάριο ...	68
Σχήμα 44: Διάγραμμα βημάτων μελέτης περίπτωσης.....	69
Σχήμα 45: Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα (MtCO ₂ e), (European Parliament, 2021).....	71
Σχήμα 46: Συνολικές εκπομπές CO ₂ από επιβατικά αυτοκίνητα στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2030.....	72
Σχήμα 47: Πιθανές περιοχές αποθήκευσης και δυνητικά κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης, βραχυπρόθεσμο σενάριο.....	81
Σχήμα 48: Πιθανές περιοχές αποθήκευσης και δυνητικά κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης, μακροπρόθεσμο σενάριο.	82
Σχήμα 49: Γεωμορφολογικός χάρτης Ελλάδας, (Σαλονικίδης, 2018).....	85
Σχήμα 50: Γεωθερμικά πεδία και περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος στην Ελλάδα, (Andritsos et al., 2010).....	86
Σχήμα 51: Ενεργειακές απαιτήσεις τεχνολογιών S-DAC, L-DAC.	90
Σχήμα 52: Κόστη Α.Π.Ε. ανά τεχνολογία DAC.....	91
Σχήμα 53: Οικονομικά στοιχεία μονάδων DAC και μονάδων Α.Π.Ε.....	91
Σχήμα 54: Χωροθέτηση μονάδων Α.Π.Ε.	92
Σχήμα 55: Ποσοστά συμμετοχής κάθε τεχνολογία Α.Π.Ε. στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μονάδας S-DAC.....	92
Σχήμα 56: Ποσοστά συμμετοχής κάθε τεχνολογία Α.Π.Ε. στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μονάδας L-DAC.	93
Σχήμα 57: Κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης ανά σενάριο.	93
Σχήμα 58: Τελικές περιοχές εγκατάστασης μονάδων DAC.....	94
Σχήμα 59: Ανάλυση νεκρού σημείου επένδυσης.	94

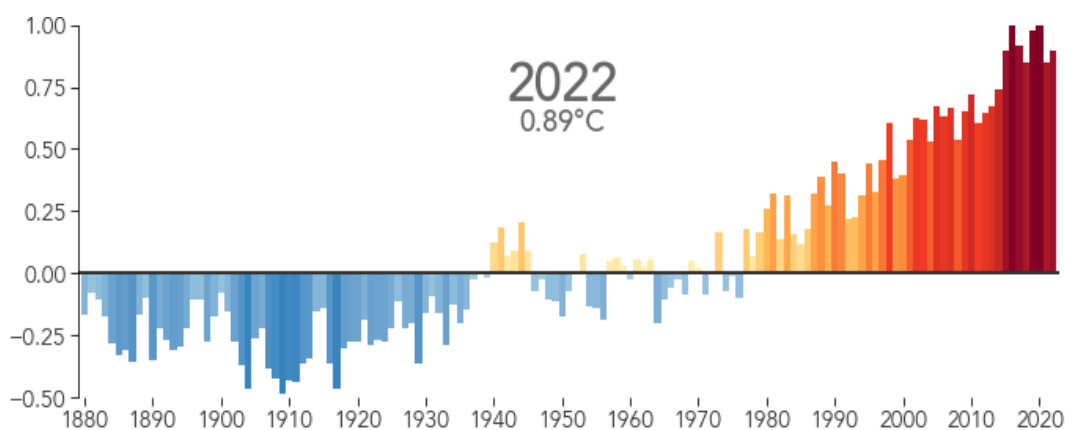
Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Λειτουργικές εγκαταστάσεις DAC και μελλοντικά πλάνα, (Ozkan et al., 2022).....	14
Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών DAC.	38
Πίνακας 3: Ενεργειακά χαρακτηριστικά μονάδων S-DAC, L-DAC.....	50
Πίνακας 4: Οικονομικά στοιχεία μίας μονάδας S-DAC όπως αναφέρθηκαν και υπολογίστηκαν εκ νέου	52
Πίνακας 5: Εκτιμώμενο κόστος κεφαλαίου (CAPEX) για ένα γενικό σύστημα L-DAC με δυναμικότητα 1 Mt/y απομάκρυνσης CO ₂	54
Πίνακας 6: Εκτιμώμενο λειτουργικό κόστος (OPEX) για ένα γενικό σύστημα L-DAC με δυναμικότητα 1 Mt/y απομάκρυνσης CO ₂	55
Πίνακας 7: Συντηρητικό και βασικό σενάριο για τη μείωση του CAPEX των S-DAC και L-DAC	56
Πίνακας 8: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και CO ₂ , 2020-2040, Ε.Σ.Ε.Κ.	59
Πίνακας 9: Τιμές κόστους εγκατάστασης αιολικών και ηλιακών έργων μέχρι σήμερα. 62	
Πίνακας 10: Τιμές κόστους εγκατάστασης αιολικών έργων τα έτη 2030 και 2050.....	63
Πίνακας 11: Απαιτούμενος χώρος για μονάδες Α.Π.Ε.....	64
Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά πιθανών τοποθεσιών αποθήκευσης CO ₂	66
Πίνακας 13: Παραδοχές μελέτης περίπτωσης	70
Πίνακας 14: Ενεργειακές απαιτήσεις από Α.Π.Ε. για την μονάδα S-DAC.....	74
Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας ενεργειακών απαιτήσεων, κόστους DAC, κόστους Α.Π.Ε. και χωροθέτησης Α.Π.Ε. για S-DAC	76
Πίνακας 16: Ενεργειακές απαιτήσεις από Α.Π.Ε. για την μονάδα L-DAC	77
Πίνακας 17: Συγκεντρωτικός πίνακας ενεργειακών απαιτήσεων, κόστους DAC, κόστους Α.Π.Ε. και χωροθέτησης Α.Π.Ε. για L-DAC	78
Πίνακας 18: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις τεχνολογίες S-DAC, L-DAC	79
Πίνακας 19: Κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης ανά περιοχή.....	80
Πίνακας 20: Απαιτήσεις σε έκταση γης για μονάδα DAC, (Institute, 2021)	84
Πίνακας 21: Συνολική έκταση γης για διαφορετικούς συνδυασμούς συστημάτων DAC και πηγών ενέργειας, (Lebling et al., 2022)	84

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Η κλιματική αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται σε μακροχρόνιες αλλαγές στα καιρικά φαινόμενα επηρεάζοντας την θερμοκρασία του πλανήτη. Ο ηλιακός κύκλος και άλλα φαινόμενα αποτελούν μέρος αυτών των μεταβολών και χαρακτηρίζονται ως φυσικές. Ωστόσο από την βιομηχανική επανάσταση και μετά, με την καύση ορυκτών (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.α.), οι παράγοντες της κλιματικής αλλαγής έγιναν κατά κύριο λόγο ανθρωπογενείς. Λόγω της καύσης των ορυκτών καυσίμων, η παραγωγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (και κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα και του μεθανίου) παγιδεύει την ακτινοβολία του ήλιου θερμαίνοντας τον πλανήτη. Παράλληλα, η χρήση των ορυκτών καυσίμων στα οχήματα και στην θέρμανση των κτηρίων, η υπερπαραγωγή προϊόντων και η υπερκατανάλωση εντείνουν το πρόβλημα, ενώ παράλληλα, η καταστροφή των δασικών εκτάσεων αποτρέπουν την ανακύκλωση των ρύπων με φυσικές διεργασίες (United Nations, 2023).



Σχήμα 1: Παγκόσμια θερμοκρασιακή διακύμανση (°C) σε σύγκριση με το μέσο όρο των ετών 1951-1980) (NASA, 2020).

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί αναμφίβολα μία πρόκληση για την ανθρωπότητα. Αυτό οφείλεται, μεταξύ άλλων, στις συνέπειες που θα έχει για τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη κοινωνία. Δυστυχώς, η κλιματική αλλαγή αποτελεί επίσης ένα πολύ δύσκολο πρόβλημα σε πολιτικό και κοινωνικό επίπεδο.

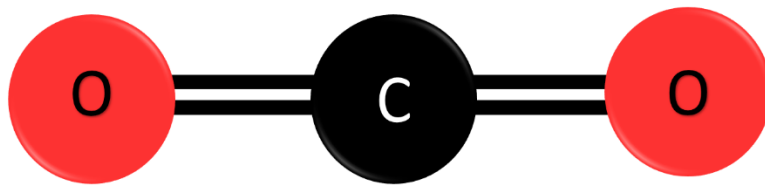
Ο μηχανισμός της κλιματικής αλλαγής λειτουργεί με αργούς ρυθμούς και σε διάστημα πολλών δεκαετιών με αποτέλεσμα οι άνθρωποι να μην μπορούν να δουν άμεσα τις επιπτώσεις της. Επομένως, η ανθρωπότητα έχοντας εξοικειωθεί στην χρήση ορυκτών καυσίμων και στην υπερκατανάλωση προϊόντων αδυνατούν να κινητοποιηθούν ενάντια στο πρόβλημα πόσο μάλλον να περιορίσουν τις συνήθειές τους προς όφελος του πλανήτη. Είναι σημαντικό λοιπόν, οι κυβερνήσεις και διάφοροι άλλοι φορείς να αναδείξουν το πρόβλημα με στόχο την ευαισθητοποίηση των πολιτών σχετικά με τους ανθρωπογενείς παράγοντες της κλιματικής αλλαγής (Joseph Alcamo, Jørgen E. Olesen, 2012).

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι:

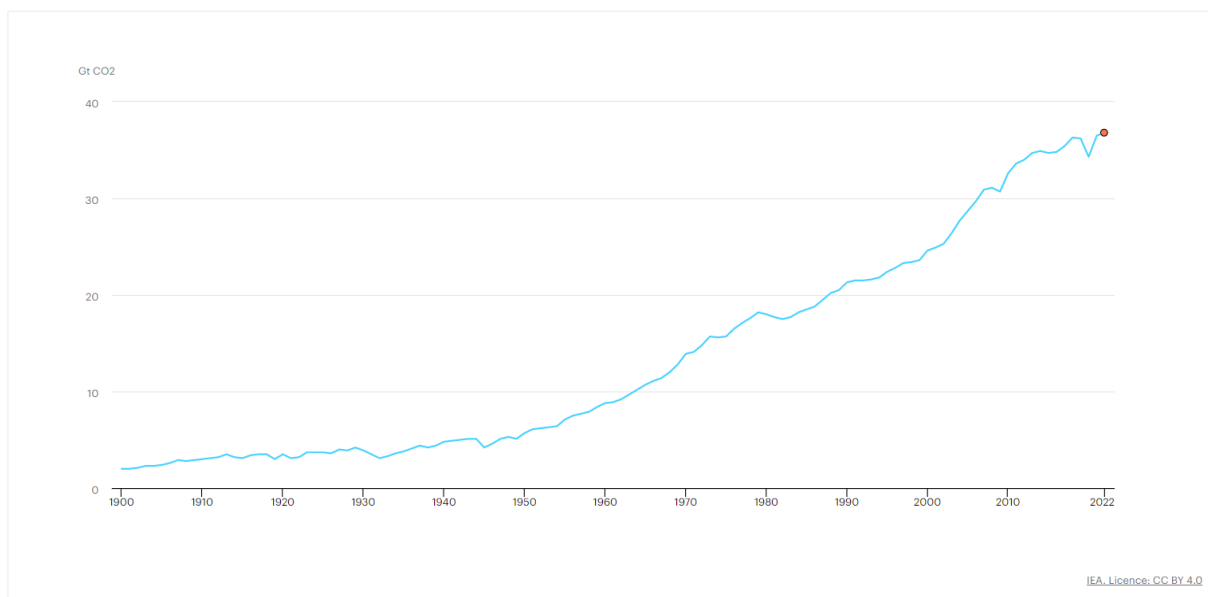
1. Υψηλές θερμοκρασίες
2. Ξηρασία και δασικές πυρκαγιές
3. Πλημμύρες
4. Άνοδος της στάθμης της θάλασσας
5. Λειψυδρία
6. Μείωση της βιοποικιλότητας
7. Κίνδυνοι στην υγεία των πολιτών, (“Συνέπειες της κλιματικής αλλαγής,”).

1.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αποτελεί το βασικότερο αέριο του θερμοκηπίου (Σχήμα 2) παγιδεύοντας σημαντικά ποσά θερμότητας από την ακτινοβολία του ήλιου στην επιφάνεια της γης. Προέρχεται από φυσικές διεργασίες όπως οι ηφαιστειακές εκρήξεις και η αναπνοή των οργανισμών αλλά και από ανθρωπογενείς διεργασίες όπως η εξόρυξη και η καύση ορυκτών καυσίμων και οι πυρκαγιές. Η βιομηχανική ανάπτυξη αποτέλεσε ορόσημο στην αύξηση των ανθρωπογενών εκπομπών CO₂, αυξάνοντας το ατμοσφαιρικό CO₂ κατά 50%, (Change). Αυτή η αύξηση παρουσιάζεται και σχηματικά στο Σχήμα 3.



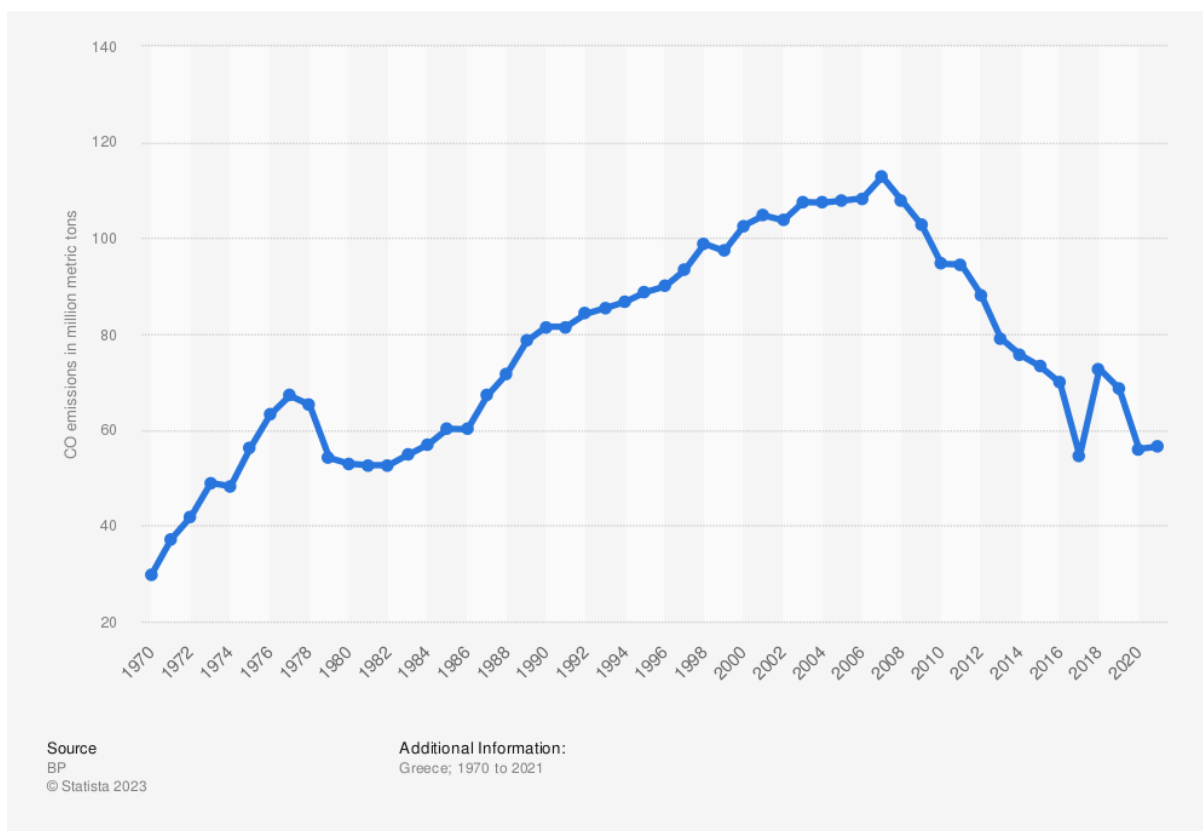
Σχήμα 2: Μοριακή δομή διοξειδίου του άνθρακα (alison, 2019).



Σχήμα 3: Παγκόσμιες εκπομπές CO₂ από την καύση ενέργειας και τις βιομηχανικές διεργασίες, 1900-2022 (“CO₂ Emissions in 2022 – Analysis,”).

Η φωτοσύνθεση, η βιοχημική διαδικασία με την οποία τα φυτά και ορισμένα μικρόβια δημιουργούν τροφή, καταναλώνει διοξείδιο του άνθρακα. Οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί όπως τα φυτά, χρησιμοποιούν το CO₂ σε συνδυασμό με νερό για να παράγουν τα απαραίτητα συστατικά για την βιωσιμότητά τους, ενώ παράλληλα εκπέμπουν οξυγόνο. Γίνεται αντιληπτό λοιπόν, ότι οι δασικές εκτάσεις και οι ωκεανοί αποτελούν πηγές συλλογής του CO₂ αφαιρώντας το κατά την διάρκεια της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης. Χάρη στην άνοδο αυτών των οργανισμών, η γη καταφέρνει να έχει την απαραίτητη ποσότητα οξυγόνου ώστε να ευδοκιμήσει η ζωή στον πλανήτη (“Carbon Dioxide | Center for Science Education,”).

Η συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα σύμφωνα με την τελευταία μέτρηση τον Μάη του 2023 βρίσκεται στην τιμή 421 ppm (μέρη ανά εκατομμύριο) (Change). Συγκριτικά, αξίζει να αναφερθεί πως πριν την βιομηχανική επανάσταση η τιμή αυτή κυμαινόταν γύρω στα 270 ppm. Επομένως, η συγκέντρωση του CO₂ έχει υποστεί μία αύξηση της τάξεως του 40% σε διάστημα δύο αιώνων από την αρχή της βιομηχανικής δραστηριότητας (“Carbon Dioxide | Center for Science Education,”). Παρακάτω (Σχήμα 4) διακρίνονται οι ετήσιες εκπομπές CO₂ στην Ελλάδα στην περίοδο 1970-2021:



Σχήμα 4: Ετήσιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην Ελλάδα από το 1970 έως το 2021 (Ian Tiseo, 2023a).

1.3 Η συμφωνία του Παρισιού

Η Συμφωνία του Παρισιού αποτελεί μία διεθνή συνθήκη η οποία αφορά την κλιματική αλλαγή και υπογράφηκε από 196 χώρες στο Παρίσι, στις 12 Δεκεμβρίου 2015 ενώ τέθηκε σε ισχύ στις 4 Νοεμβρίου του 2016. Το βασικό όριο που καθορίζεται από την συνθήκη αυτή είναι η συγκράτηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κάτω από 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Παρόλα αυτά, ένας πιο σημαντικός στόχος είναι η αύξηση να μην

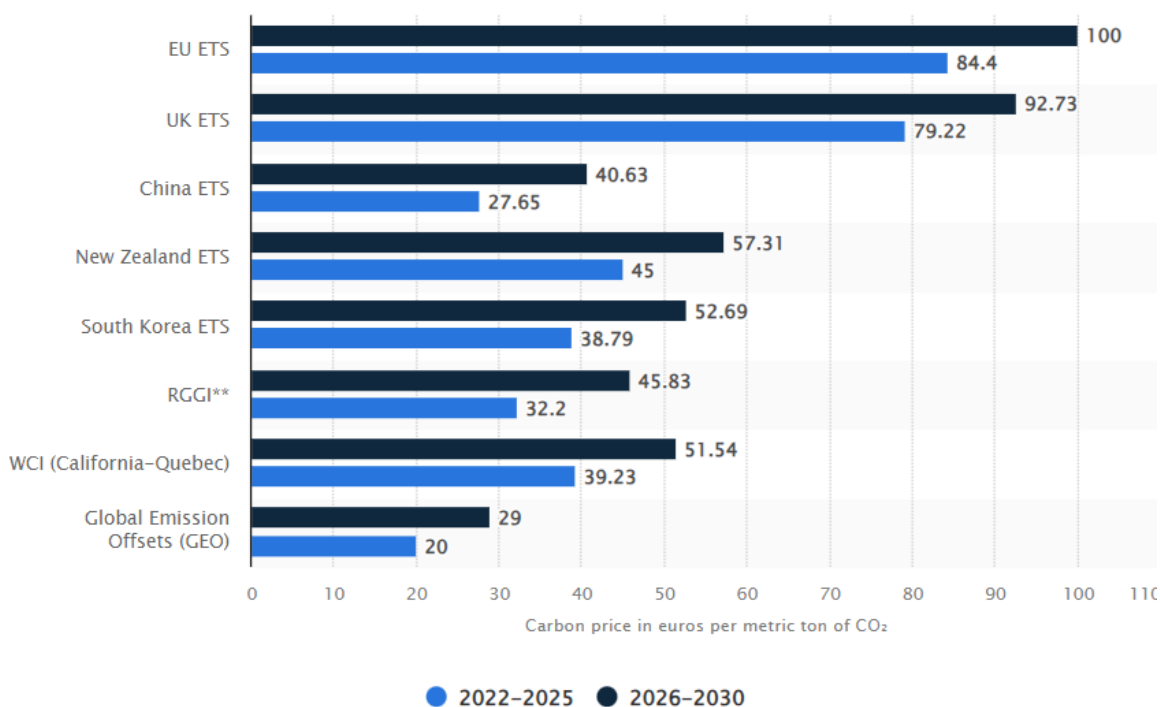
ξεπεράσει τον 1.5°C μέχρι το τέλος του αιώνα για την αποφυγή ακραίων καιρικών συνθηκών. Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, οι εκπομπές πρέπει να μειωθούν κατά 43% έως το 2030 αν θεωρηθεί ότι η κορύφωσή τους θα λάβει μέρος το έτος 2025, (“The Paris Agreement | UNFCCC,”).

Κριτήριο για να τεθεί σε ισχύ η Συμφωνία ήταν να υπογράψουν 55 χώρες των οποίων οι εκπομπές ισοδυναμούν με το 55% των συνολικών εκπομπών. Πιο συγκεκριμένα οι κυβερνήσεις αυτές συμφώνησαν:

1. Στην συγκράτηση της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κάτω από τους 2°C σε σχέση με τα επίπεδα πριν την βιομηχανική επανάσταση,
2. Στον περιορισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας στους 1,5°C,
3. Στην κορύφωση των εκπομπών όσο πιο σύντομα γίνεται
4. Να ληφθούν μέτρα το συντομότερο μετά την προαναφερθείσα κορύφωση ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι στο διάστημα 2050-2100, (“Paris Agreement,”).

1.4 Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών

Το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU ETS) αποτελεί το βασικό εργαλείο της Ε.Ε. για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η εμπορία ρύπων ξεκίνησε το 2005 και αποτελεί την πρώτη αγορά ανθρακούχων εκπομπών παγκοσμίως, θέτοντας το ανώτατο όριο σε ποσότητες CO₂ που μπορούν να εκπέμψουν οι βιομηχανίες. Ουσιαστικά, το συνολικό ποσό εκπομπών που έχει καθοριστεί από την Ε.Ε., διαχωρίζεται σε κάθε εταιρεία, η οποία έχει όριο δωρεάν δικαιωμάτων εκπομπών CO₂. Τα δικαιώματα αυτά, μπορούν να συναλλαχθούν μεταξύ εταιρειών (ΥΠΕΝ, 2023a). Μετά το ευρωπαϊκό σύστημα προέκυψαν και άλλα παρόμοια, όπως το UK ETS (για το Ηνωμένο Βασίλειο), China ETS (για την Κίνα) κ.α. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5) ποσοτικοποιούνται οι προβλεπόμενες τιμές άνθρακα ανά σύστημα για την περίοδο 2022-2030:



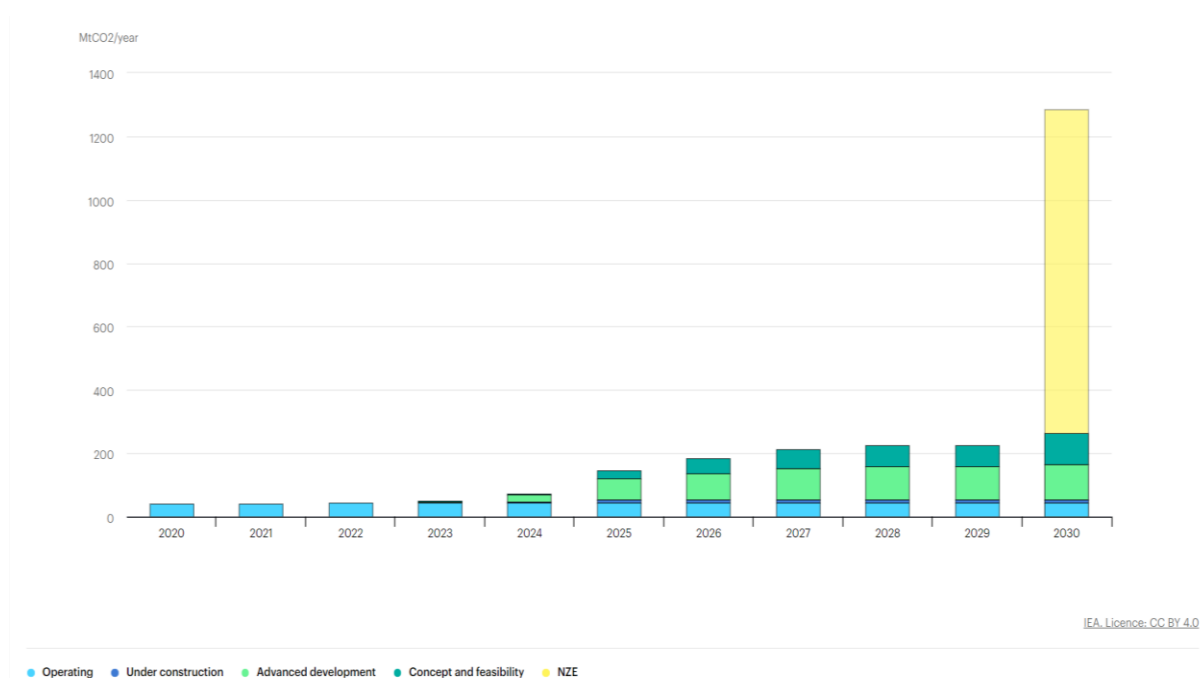
Σχήμα 5: Μέσες εκτιμώμενες τιμές άνθρακα παγκοσμίως ανά σύστημα εμπορίας (2022-2030) (Ian Tiseo, 2023b).

1.5 Διαχείριση διοξειδίου του άνθρακα

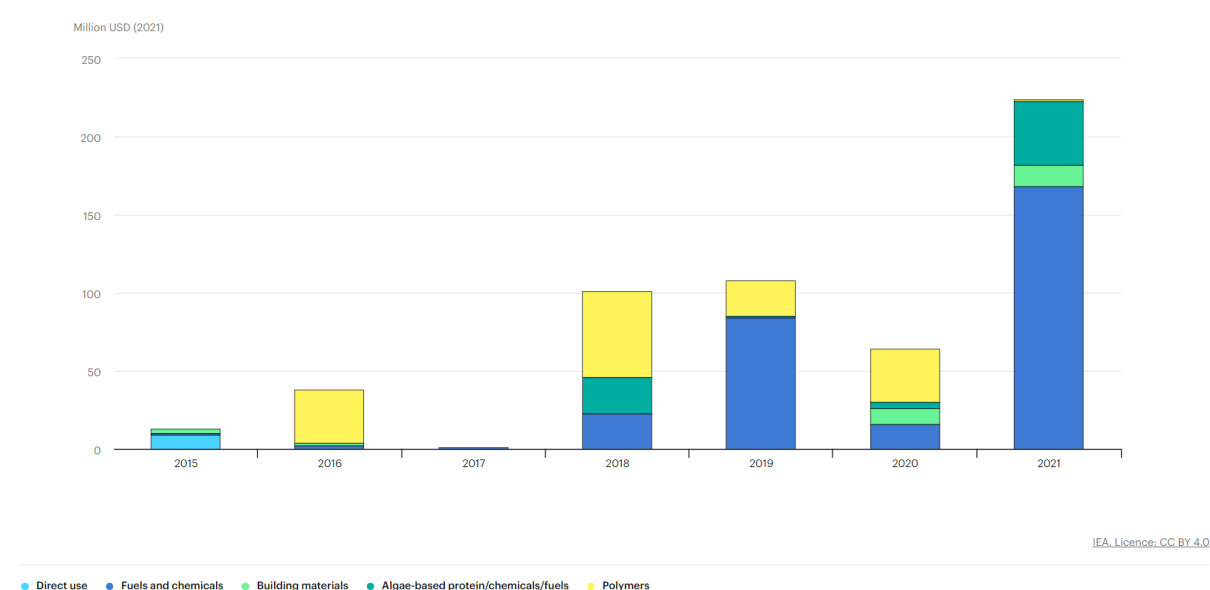
Η κύρια εφαρμογή της δέσμευσης του CO₂ είναι πιθανό να γίνει σε μεγάλες σημειακές πηγές: σταθμούς παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα, μονάδες επεξεργασίας καυσίμων και άλλες βιομηχανικές μονάδες, ιδίως για την παραγωγή σιδήρου, χάλυβα, τσιμέντου και χύδην χημικών προϊόντων. Στα Σχήματα 6 και 7 φαίνονται η δυναμικότητα των έργων δέσμευσης CO₂ έως το 2030 καθώς και οι επενδύσεις του κλάδου μέχρι το 2021.

Τα βασικότερα συστήματα δέσμευσης CO₂ από σημειακές πηγές όπως οι βιομηχανίες και τα εργοστάσια είναι:

- Δέσμευση σε ροές κατά την διάρκεια βιομηχανικών διεργασιών
- Δέσμευση μετά την καύση
- Δέσμευση με καύση οξυγόνου καυσίμου
- Δέσμευση πριν την καύση



Σχήμα 6: Δυναμικότητα έργων δέσμευσης CO₂ μεγάλης κλίμακας για το διάστημα 2020-2030, λειτουργικά και προγραμματισμένα, (“Carbon capture, utilisation and storage - Fuels & Technologies - IEA,”).



Σχήμα 7: Επενδύσεις επιχειρηματικών κεφαλαίων σε νεοσύστατες επιχειρήσεις CCU, 2015-2021 (IEA, 2023).

1.5.1 Δέσμευση από ροές βιομηχανικών διεργασιών

Το CO₂ δεσμεύεται από ροές βιομηχανικών διεργασιών εδώ και 80 χρόνια (Kohl and Nielsen, 1997) αν και το μεγαλύτερο μέρος του CO₂ διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα, επειδή δεν υπάρχει κίνητρο ή απαίτηση για την αποθήκευσή του. Δέσμευση από ροές βιομηχανικών διεργασιών μπορούν να χαρακτηριστούν οι διαδικασίες κατά τον καθαρισμό του φυσικού αερίου, η παραγωγή τσιμέντου και χάλυβα καθώς και οι διεργασίες ζύμωσης στην βιομηχανία τροφίμων και ποτών. Το CO₂ θα μπορούσε να συλληφθεί από αυτά τα ρεύματα χρησιμοποιώντας τεχνικές που είναι κοινές για τη δέσμευση μετά την καύση, τη δέσμευση με καύση οξυγόνου και τη δέσμευση πριν από την καύση (Bert Metz, et al, 2005).

1.5.2 Δέσμευση μετά την καύση

Η δέσμευση μετά την καύση αναφέρεται στην συλλογή του CO₂ που παράγονται από την καύση καυσίμων και βιομάζας. Μετά την καύση των παραπάνω, τα καυσαέρια δεν απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα αλλά περνούν μία διαδικασία καθαρισμού και απομάκρυνσης του CO₂. Το συλλεγμένο CO₂ οδηγείται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης ενώ τα «καθαρά» πλέον καυσαέρια απορρίπτονται στο περιβάλλον. Συνήθως χρησιμοποιείται μια χημική διεργασία απορρόφησης για το διαχωρισμό του CO₂, οι περιπτώσεις της οποίας θα αναλυθούν αργότερα (Bert Metz, et al, 2005).

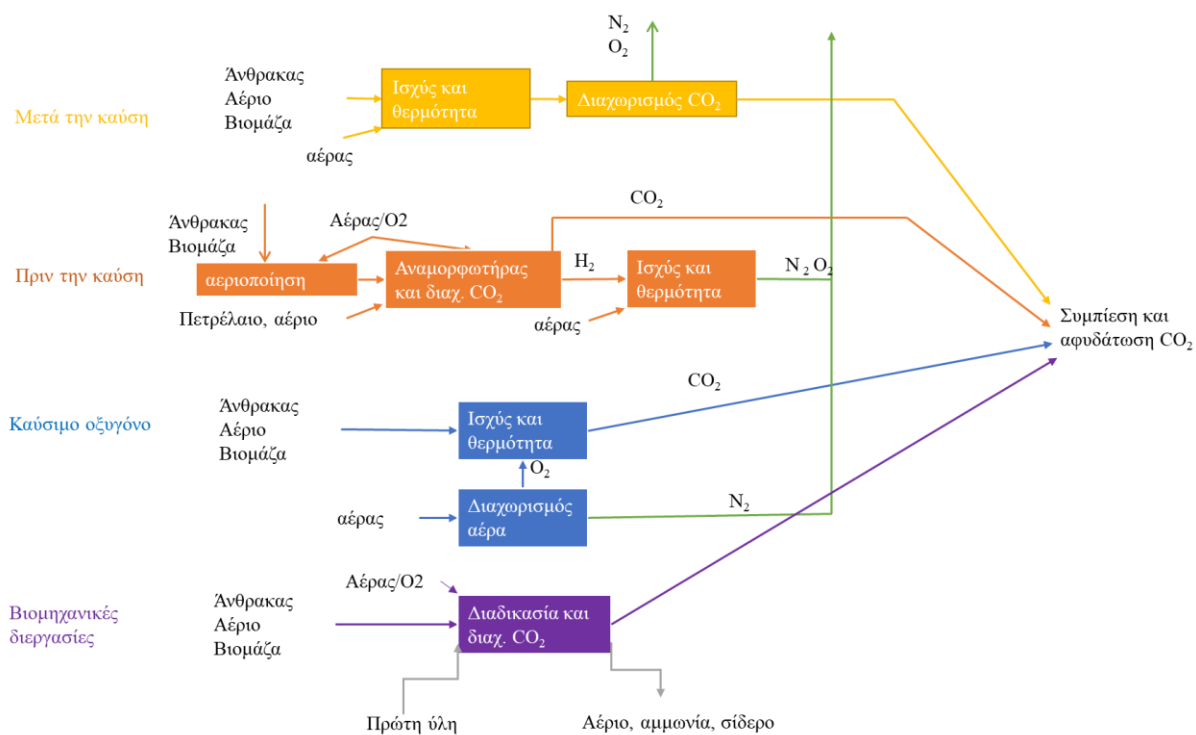
1.5.3 Δέσμευση με καύση οξυγόνου καυσίμου

Στην περίπτωση αυτή αξιοποιείται σχεδόν καθαρό οξυγόνο κατά την διαδικασία της καύσης και όχι αέρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα καυσαέρια να είναι κυρίως CO₂ και νερό. Επειδή χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο, η καύση γίνεται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες αλλά το καυσαέριο μπορεί να ανακυκλωθεί στον θάλαμο καύσης μετριάζοντας έτσι την θερμοκρασία. Σημειώνεται επίσης, ότι το οξυγόνο που χρησιμοποιείται παράγεται με μεθόδους διαχωρισμού αέρα σε χαμηλή θερμοκρασία ενώ παράλληλα αναπτύσσονται και νέες τεχνικές για την παροχή του οξυγόνου στο καύσιμο όπως οι κύκλοι χημικής ανακύκλωσης (Bert Metz, et al, 2005).

1.5.4 Δέσμευση πριν την καύση

Η δέσμευση πριν από την καύση περιλαμβάνει την αντίδραση ενός καυσίμου με οξυγόνο ή αέρα ή/και ατμό, ώστε να προκύψει κυρίως ένα "αέριο σύνθεσης (syngas)" ή "αέριο καυσίμου" που αποτελείται από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Με την χρήση ενός καταλυτικού αντιδραστήρα το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με ατμό παράγοντας CO₂ και υδρογόνο. Στη συνέχεια, το CO₂ απομονώνεται μέσω μίας διαδικασίας απορρόφησης και το καύσιμο πλούσιο σε υδρογόνο δύναται να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές όπως κλίβανους, αεριοστρόβιλους και κυσέλες καυσίμου (Bert Metz κ.ά., 2005).

Στο διάγραμμα ροής, (Σχήμα 8), παρουσιάζονται οι παραπάνω τεχνολογίες αναφέροντας περιληπτικά τι εισάγεται σε κάθε σύστημα και τι επιμέρους μεταβολές πραγματοποιούνται ώστε να καταλήξει το σύστημα στην τελική δέσμευση του CO₂.



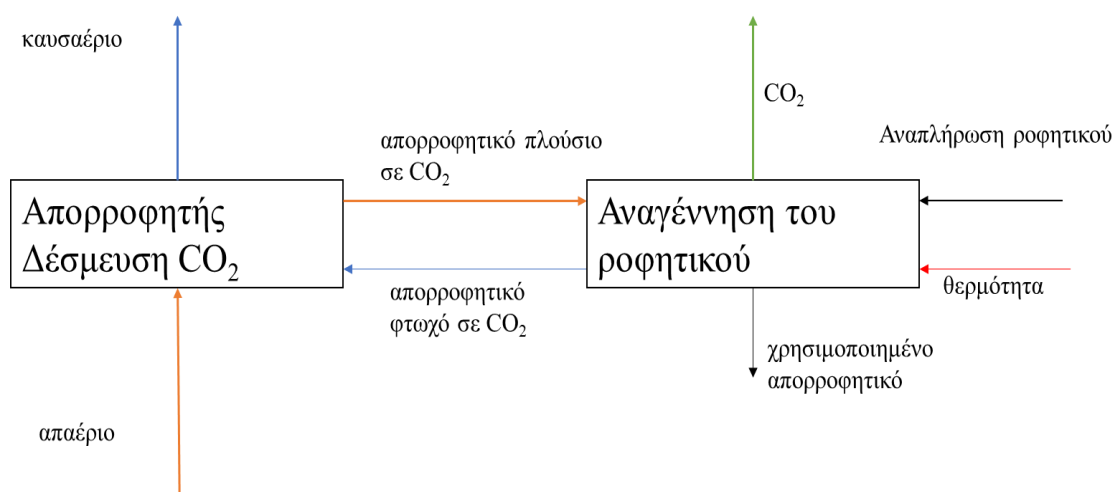
Σχήμα 8: Συστήματα δέσμευσης CO₂ (από BP).

1.6 Τύποι τεχνολογιών δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα

Πολλές από τις γνωστές τεχνολογίες διαχωρισμού αερίων, ενσωματώνονται στα βασικά συστήματα δέσμευσης CO₂ που προσδιορίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εξ' αυτών.

1.6.1 Διαχωρισμός με απορροφητικά/διαλύτες

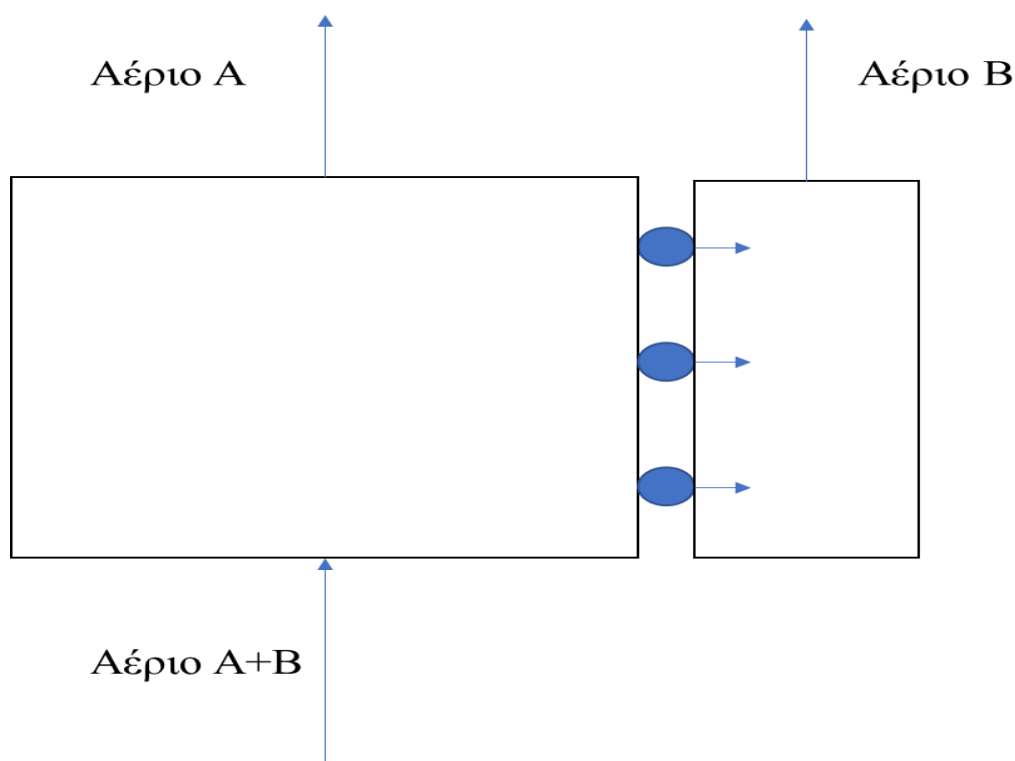
Στον διαχωρισμό με απορροφητικά ή διαλύτες, το αέριο που εμπεριέχει CO₂ έρχεται σε επαφή με ένα στερεό ή υγρό απορροφητικό. Στην περίπτωση του στερεού απορροφητικού, το CO₂ προσκολλάται πάνω στο απορροφητικό και κατόπιν απελευθερώνεται από αυτό μέσω θερμότητας (αναγέννηση). Μετά το πέρας της διαδικασίας αναγέννησης το απορροφητικό είναι έτοιμο για την δέσμευση νέου CO₂ δημιουργώντας έτσι μία κυκλική διαδικασία. Στην περίπτωση του υγρού απορροφητικού, ο υγρός διαλύτης που φέρει το δεσμευμένο CO₂ μεταφέρεται σε ένα δοχείο στο οποίο πραγματοποιείται διαδικασία αναγέννησης και απελευθερώνεται το CO₂, μετά από μείωση πίεσης. Απαιτείται πάντοτε μια αναπλήρωση απορροφητικού υλικού καθώς η φυσική μείωση της δραστηρότητας ή/και οι απώλειες υλικού πρέπει να αντισταθμίζονται. Σε άλλες περιπτώσεις, το CO₂ μπορεί να συλλεχθεί από ένα δοχείο στο οποίο αντιδρά ένα στερεό οξείδιο με κάποιο ορυκτό καύσιμο ή βιομάζα. Το εξαντλημένο απορροφητικό υλικό, οδηγείται στη συνέχεια σε ένα δεύτερο δοχείο, όπου οξειδώνεται για επαναχρησιμοποίηση. Στο στάδιο αυτό γίνεται και συμπλήρωση υλικού λόγω απωλειών. Παρακάτω φαίνεται η διαδικασία διαχωρισμού με απορροφητικά (Σχήμα 9) (Bert Metz, 2005).



Σχήμα 9: Διαχωρισμός με απορροφητικά/διαλύτες (Hribernik, 2015).

1.6.2 Διαχωρισμός με μεμβράνες

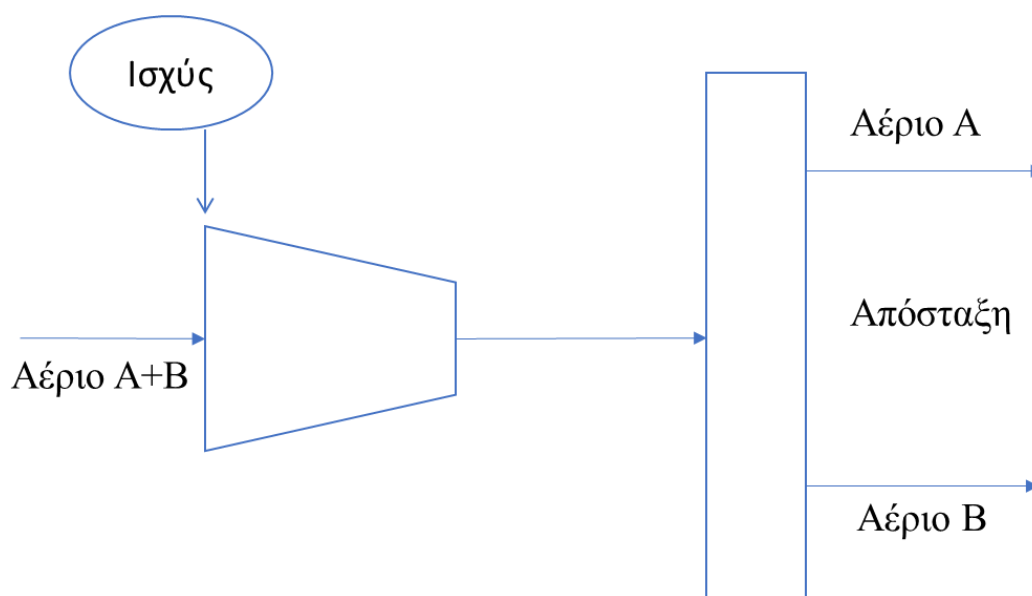
Στον διαχωρισμό με μεμβράνες, δίνεται η δυνατότητα επιλεκτικής διαπερατότητας για την απομάκρυνση συγκεκριμένων συστατικών από ένα αέριο. Η επιλεκτική ικανότητα κάθε μεμβράνης σχετίζεται κατά βάση με την φύση του υλικού ενώ παράλληλα σημαντικό ρόλο εξυπηρετεί και η ροή του αερίου κατά μήκος της μεμβράνης, η οποία καθορίζεται από την διαφορά πίεσης. Ως εκ τούτου, για το διαχωρισμό με μεμβράνες προτιμώνται συνήθως ρεύματα υψηλής πίεσης. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι υλικών μεμβρανών (πολυμερή, μεταλλικά, κεραμικά) που μπορούν να βρουν εφαρμογή σε συστήματα δέσμευσης CO₂ για τον προνομιακό διαχωρισμό H₂ από ένα ρεύμα αερίου καυσίμου, CO₂ από μια σειρά ρευμάτων διεργασιών ή O₂ από τον αέρα, με το διαχωρισμένο O₂ να βοηθά στη συνέχεια στην παραγωγή ενός ρεύματος CO₂ υψηλής συγκέντρωσης. Η χρήση της τεχνικής διαχωρισμού με μεμβράνες χρησιμοποιείται κατά κόρον στη βιομηχανία, ωστόσο δεν αποτελεί ακόμη καθιερωμένη και αξιόπιστη τεχνολογία για την δέσμευση CO₂. Το Σχήμα 10 περιγράφει τον διαχωρισμό με μεμβράνες, (Bert Metz, 2005).



Σχήμα 10: Διαχωρισμός με μεμβράνη (Bert Metz et al, 2005).

1.6.3 Απόσταξη ρεύματος υγροποιημένου αερίου και διαχωρισμός υπό ψύξη

Ένα αέριο μπορεί να γίνει υγρό με μια ακολουθία διαδικασιών συμπίεσης, ψύξης και διαστολής. Αφότου το αέριο βρεθεί σε υγρή κατάσταση, ο διαχωρισμός των συστατικών του πραγματοποιείται σε μία στήλη απόσταξης. Ο αέρας αποτελεί ένα αέριο, στο οποίο η διαδικασία αυτή βρίσκει εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα. Πιο συγκεκριμένα, το οξυγόνο διαχωρίζεται από τον αέρα και χρησιμοποιείται για την δέσμευση CO₂ (καύση με οξυγόνο και δέσμευση πριν την καύση). Το βασικότερο ζήτημα της τεχνικής αυτής είναι οι υψηλές ανάγκες οξυγόνου. Σημειώνεται πως η απόσταξη υγροποιημένου αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα αέρια για τον διαχωρισμό του CO₂ όπως, για παράδειγμα, για την απομάκρυνση από φυσικό αέριο. Στο Σχήμα 11 φαίνεται αρκετά απλοποιημένα η διαδικασία αυτή, (Bert Metz, 2005).



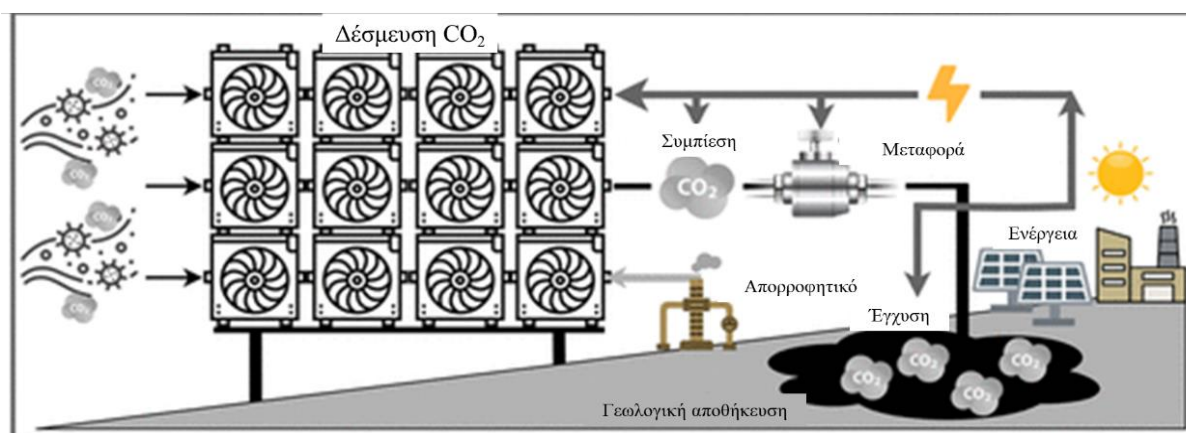
Σχήμα 11: Απόσταξη ρεύματος υγροποιημένου αερίου και διαχωρισμός υπό ψύξη (Bert Metz et al, 2005).

1.7 Τρέχουσα τεχνολογική στάθμιση

Με την κλιματική αλλαγή να εντείνεται και τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα όλο ένα και να αυξάνονται, γίνεται αντιληπτό ότι οι παραπάνω τεχνολογίες δεν αρκούν για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα. Για τον λόγο αυτό, η επιστημονική κοινότητα στρέφει το βλέμμα της σε νέα μονοπάτια περιορισμού της κλιματικής αλλαγής. Η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα απευθείας από τον αέρα, αν και ακόμη σε πρώιμο στάδιο εφαρμογής, αποτελεί μια λύση για τον τομέα δέσμευσης και αξιοποίησης του CO₂.

Αυτή τη στιγμή λειτουργούν παγκοσμίως 18 μονάδες άμεσης δέσμευσης αέρα, οι οποίες δεσμεύουν σχεδόν 0,01 εκατ. τόνους CO₂/έτος, ενώ μια μονάδα δέσμευσης 1 MtCO₂/έτος βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η άμεση δέσμευση αέρα μπορεί να καλύπτει σχεδόν 60 MtCO₂ ετησίως, αν μέχρι το 2050 τηρηθεί το σενάριο καθαρών μηδενικών εκπομπών. Για να είναι αυτό το σενάριο εφικτό όμως, θα πρέπει να εγκατασταθούν αρκετές μονάδες σε μεγάλη κλίμακα και να μειωθούν αρκετά τα οικονομικά και ενεργειακά κόστη των υπαρχόντων τεχνολογιών (“IEA – International Energy Agency,”).

Όλες αυτές οι μονάδες είναι μικρής κλίμακας και η μεγάλη πλειονότητά τους δεσμεύει το CO₂ για χρήση (για παράδειγμα, για την προσθήκη ανθρακικού στην βιομηχανία ποτών) ενώ δύο μονάδες αποθηκεύουν το δεσμευμένο CO₂ σε γεωλογικούς σχηματισμούς για απομάκρυνση (Σχήμα 12). Μόνο λίγες εμπορικές συμφωνίες έχουν συναφθεί για την πώληση ή την αποθήκευση του δεσμευμένου CO₂, ενώ οι υπόλοιπες μονάδες λειτουργούν για δοκιμαστικούς και επιδεικτικούς σκοπούς (“IEA – International Energy Agency,”). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τρέχουσες εγκαταστάσεις καθώς και τα μελλοντικά έργα των τεχνολογιών DAC:



Σχήμα 12: Διαδικασία συλλογής και γεωλογικής αποθήκευσης CO₂ (Terlouw et al., 2021).

Πίνακας 1: Λειτουργικές εγκαταστάσεις DAC και μελλοντικά πλάνα, (Ozkan et al., 2022)

Εταιρεία	Τύπος μονάδας / κατάσταση	Τοποθεσία	Δυναμικότητα (tCO ₂ /a)	Τύπος απορροφητικού	Πηγή θερμικής ενέργειας	Ημερομηνία λειτουργίας	
Climeworks	14 πιλοτικές και εμπορικές εγκαταστάσεις / σε λειτουργία	σε όλη την Ευρώπη	Καθαρά: 2.000	Στερεά	Γεωθερμία, απορριπτόμενη θερμότητα, κ.α.	2015-2020	
	Πιλοτική εγκατάσταση / σε λειτουργία	Καντον, Ζυρίχη	900		Αποτέφρωση αποβλήτων	2017	
	1 εμπορική εγκατάσταση / σε λειτουργία	Hellisheidi, Ισλανδία	4.000		Γεωθερμία	2021 (Climeworks, 2021)	
Carbon Engineering (Gallucci, 2021)	Πιλοτική εγκατάσταση / σε λειτουργία	Squamish, Βρετανική Κολομβία, Καναδάς	350	Υγρά	Φυσικό αέριο (John Baker, 2015)	2015	
	Κέντρο καινοτομίας / υπό κατασκευή	Squamish, Βρετανική Κολομβία, Καναδάς	1.500			2022 (Carbon Engineering, 2023)	
	Πιλοτική εγκατάσταση / υπό κατασκευή	Λεκάνη Περμίου, Τέξας, ΗΠΑ	1.000.000			Μέσα της δεκαετίας του 2020	
Global Thermostat (“Global Thermostat,” 2023)	Πιλοτική μονάδα (DAC + καυσαερίων) / μη λειτουργική	Παρκό Μελνο, Καλιφόρνια, ΗΠΑ	10.000	Άμεση δέσμευση από τον αέρα	Υπολειπόμενη θερμότητα από βιομηχανία (Siegel, 2018)	2013	
	Πιλοτική εγκατάσταση / μη λειτουργική	Huntsville, Αλαμπάμα, ΗΠΑ	4.000			2019	
	Πιλοτική μονάδα / σε σχεδιασμό	Μαγαγιάνες, Χιλή (Jeffrey Weir, 2023)	250 kg/h			Αιολική ενέργεια	2022 (Thompson, 2021)
	2 Πιλοτικές εγκαταστάσεις / υπό κατασκευή	Sapulpa, Οκλαχόμα, ΗΠΑ	2.000 / εγκατάσταση			Φυσικό αέριο	2021
Mechanical Tree	Πρωτότυπο / υπο κατασκευή	Αριζόνα, ΗΠΑ	30 tCO ₂ από ένα δέντρο	Απορροφητικά καθοδηγούμενα από υγρασία (Shi et al., 2020b)	Παθητικά DAC, Καμία χρήση ενέργειας	2022-23 (Bawden, 2021)	
	Εμπορικό συγκρότημα (Φάρμα) / σε σχεδιασμό	Παγκόσμια	4.000.000 / φάρμα			2ο μισό της δεκαετίας 2020	
Infinitree	Πιλοτική εγκατάσταση / σε λειτουργία	Νέα Υόρκη, ΗΠΑ	100	Ιοντοανταλλακτικό υλικό (“Technology,” 2017)	Μηχανισμός ταλάντευσης υγρασίας (“Technology,” 2017)	2014-2018	

Ένα βελτιωμένο επενδυτικό περιβάλλον οδήγησε σε ανακοινώσεις πολλών νέων έργων DAC το 2021, συμπεριλαμβανομένου του έργου Storegga Dreamcatcher (Ηνωμένο Βασίλειο- με στόχο την απομάκρυνση του άνθρακα) και του πιλοτικού εργοστασίου HIF Haru Oni eFuels (Χιλή- παραγωγή συνθετικών καυσίμων από υδρογόνο με βάση την ηλεκτρόλυση και το CO₂ που δεσμεύεται από τον αέρα). Επιπλέον, η κοινοπραξία Norsk e-Fuel AS στη Νορβηγία ανακοίνωσε την παραγωγή συνθετικών καυσίμων (έως 3 εκατομμύρια λίτρα) χρησιμοποιώντας δεσμευμένο, από μονάδες DAC, CO₂. Οι συνεργάτιδες εταιρίες 1PointFive και Carbon Engineering ανακοίνωσαν τον Ιούνιο του 2022 τα πλάνα τους για την ανάπτυξη 70 εγκαταστάσεων DAC μεγάλης κλίμακας (δυναμικότητας 1MtCO₂ ετησίως μέχρι το έτος 2035, ενώ παράλληλα η Climeworks ανακοίνωσε την κατασκευή της μονάδας Mammoth (δυναμικότητας 36.000 τόνους CO₂/έτος), η οποία αναμένεται να τεθεί σε λειτουργία έως το 2024 και θα αποτελέσει την μεγαλύτερη ως σήμερα μονάδα της εταιρείας (“Direct Air Capture – Analysis,” 2022)

1.7.1 Ηγετικές εταιρίες

Οι δύο βασικότερες εταιρείες που χρησιμοποιούν μονάδες DAC για την δέσμευση CO₂ είναι η Climeworks (Climeworks, 2023) και η Global Engineering (Carbon Engineering, 2023a). Οι εταιρείες αυτές είναι οι τεχνολογικοί πρωτοπόροι του κλάδου καθώς εδραιώθηκαν εξ’ αρχής στον τομέα και αναπτύσσονται συνεχώς με καινούργιες τεχνολογίες και καινοτομίες. Η Ελβετική Climeworks έθεσε σε λειτουργία την πρώτη της μονάδα DAC το 2017 ενώ σήμερα έχει εγκαταστήσει ήδη 15 μονάδες. Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί είναι αυτή των στερεών απορροφητικών με την χρήση φίλτρων. Επιπλέον, η Climeworks, βοηθά εταιρείες άλλων κλάδων όπως η Swarovski και το παντοπωλείο Ocado να μειώσουν τις εκπομπές CO₂. Από την άλλη μεριά, η εταιρεία Carbon Engineering με έδρα τον Καναδά αξιοποιεί μία τεχνολογία υγρών διαλυτών και αποτελεί τον κύριο συντελεστή στην εγκατάσταση της πρώτης μονάδας μεγάλης κλίμακας στην αμερικανική λεκάνη Permian, μια περιοχή παραγωγής σχιστολιθικού πετρελαίου και φυσικού αερίου μεταξύ Τέξας και Νέου Μεξικού. Η μονάδα σχεδιάζεται για να δεσμεύει και να αποθηκεύει 500.000 έως 1 εκατομμύριο τόνους CO₂ ετησίως στο υπέδαφος. Έχει αρχίσει η μηχανική μελέτη για μια άλλη μονάδα DAC της ίδιας κλίμακας που σχεδιάζεται για τη Σκωτία (Owen-Burge, 2022).

1.7.1.1 Climeworks

Σύμφωνα με την Climeworks η διαδικασία άμεσης δέσμευσης αέρα, κόστιζε το 2017 συνολικά 600 \$/tCO₂. Επιπλέον, η εταιρεία δήλωσε το 2019 ότι σκοπεύει να μειώσει το κόστος

της στα 200 \$/tCO₂ μέσα στην επόμενη πενταετία, (Giving Green, 2022). Το ποσό αυτό καλύπτεται εν μέρει από την πώληση του CO₂ σε εξωτερικό συνεργάτη. Η εταιρεία ευελπιστεί να μειώσει το κόστος αυτό στην τιμή των 100 \$/tCO₂ έως την πενταετία 2025-2030, ενώ παράλληλα θέτει ως στόχο την δέσμευση του 1% των παγκόσμιων εκπομπών ετησίως μέχρι το 2025 (Pearce, 2017).

Το 2017, η Climeworks έθεσε σε λειτουργία την πρώτη στον κόσμο "εμπορική" μονάδα άμεσης δέσμευσης CO₂ στο Hinwil της Ζυρίχης (Σχήμα 13). Η εταιρεία πουλάει το CO₂ που δεσμεύει η μονάδα αυτή, ωστόσο μέχρι στιγμής, η πώληση του CO₂ δεν αρκεί για την κάλυψη του κόστους της. Η μονάδα χρησιμοποιεί 0,5 MWh ηλεκτρικής ενέργειας και 2,5 MWh θερμότητας, σε θερμοκρασίες της τάξης των 100°C περίπου, για κάθε τόνο CO₂. Αυτή η ενεργειακή απαίτηση είναι περίπου ισοδύναμη με τις εκτιμήσεις των 12GJ/tCO₂, αν και η εταιρεία ελπίζει να μειώσει κατά 40% το ποσοστό αυτό σε περίπου 7GJ/tCO₂. Ο Christoph Gebald, ιδρυτής και CEO της εταιρείας, λέει ότι θα χρειαστεί αύξηση των ενεργειακών πόρων (αιολική και ηλιακή ενέργεια) για να επεκταθεί η άμεση δέσμευση, (Pearce, 2017).



Σχήμα 13: Η πρώτη βιομηχανικής κλίμακας μονάδα άμεσης δέσμευσης αέρα της Climeworks στο Hinwil (Climeworks, 2015).

Το μηχάνημα της Climeworks αποτελείται από τρεις υπομονάδες DAC, οι οποίες έχουν μέγεθος ενός container έκαστην και περιέχουν έξι φίλτρα για δέσμευση η κάθε μία. Μια μεγάλη δεξαμενή αποθήκευσης ζεστού νερού βρίσκεται παράλληλα, μαζί με δύο ακόμη εμπορευματοκιβώτια (container) που στεγάζουν εξοπλισμό ελέγχου. Η λειτουργία της βασίζεται σε έναν μηχανισμό προσρόφησης και απορρόφησης χρησιμοποιώντας ανεμιστήρες, οι οποίοι κατευθύνουν τον αέρα στο υλικό δέσμευσης, δηλαδή τα στερεά απορροφητικά. Αυτό με τη σειρά του παγιδεύει το CO₂ και το νερό. Κατόπιν, μέσω θερμότητας του απορροφητικού αποκολλάται το CO₂ από την επιφάνειά του και κατόπιν συλλέγεται. Παράλληλα το απορροφητικό αναγεννάται και είναι έτοιμο για επαναχρησιμοποίηση. Η δυναμικότητα των μηχανημάτων είναι της τάξης των 900 tCO₂ ετησίως (Pearce, 2017).



Σχήμα 14: Κύριος μηχανισμός δέσμευσης CO₂ της Climeworks, (European Institute of Innovation & Technology, 2020).

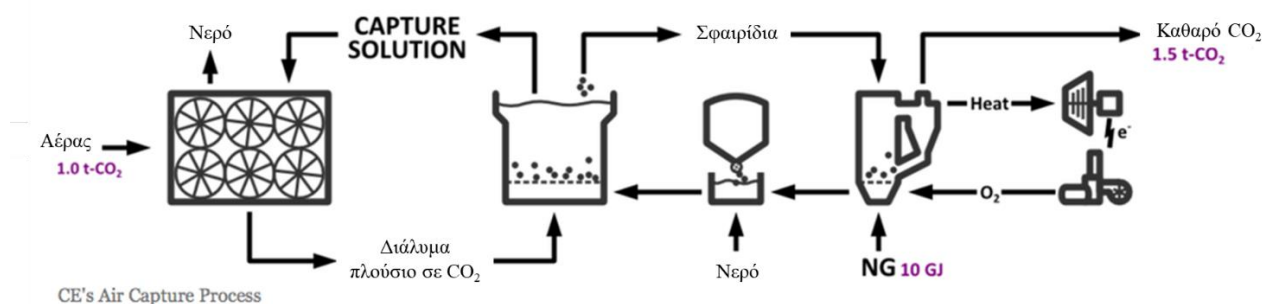
1.7.1.2 Carbon Engineering

Η Carbon Engineering ιδρύθηκε το 2009 στο Κάλγκαρι του Καναδά, από τον καθηγητή του Χάρβαρντ Ντέιβιντ Κιθ με σκοπό την ανάπτυξη και εμπορική αξιοποίηση προσιτής και εξαιρετικά επεκτάσιμης τεχνολογίας απομάκρυνσης άνθρακα. Η συνεργασία της με άλλες εταιρείες υπόσχεται την ανάπτυξη εγκαταστάσεων DAC μεγάλης κλίμακας σε αρκετές τοποθεσίες (Carbon Engineering, 2023).

Η πρώτη εγκατάσταση, είναι αυτή που προαναφέρθηκε στις ΗΠΑ και θα ολοκληρωθεί σε συνεργασία με την εταιρεία 1PointFive (1PointFive, 2023). Σύμφωνα με τα πλάνα, η

εγκατάσταση θα δεσμεύει 0.5MtCO₂ ετησίως με τα μελλοντικά σχέδια να προτείνουν μία επέκταση έως τον 1 MtCO₂. Η μονάδα αυτή αποτελεί τον πρόδρομο μίας ανερχόμενης βιομηχανίας στην οποία οι εγκαταστάσεις DAC μεγάλης κλίμακας θα λειτουργούν με την χρήση Α.Π.Ε. για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Carbon Engineering, 2023).

Το 2015, η Carbon Engineering κατασκεύασε μια ολοκληρωμένη πιλοτική μονάδα άμεσης δέσμευσης αέρα (Σχήμα 15) σχεδιάζοντας εξοπλισμό πιλοτικής κλίμακας για τις τέσσερις βασικές ενότητες της τεχνολογίας απομάκρυνσης CO₂ (τον επαφέα αέρα / ανεμιστήρα, τον αντιδραστήρα σφαιριδίων, την μονάδα σκλήρυνσης ή ατμοποιητής και τον καυστήρα οξυγόνου) (Carbon Engineering, 2023).



Σχήμα 15: Κύριος μηχανισμός δέσμευσης CO₂ της Carbon Engineering (POWER, 2015)

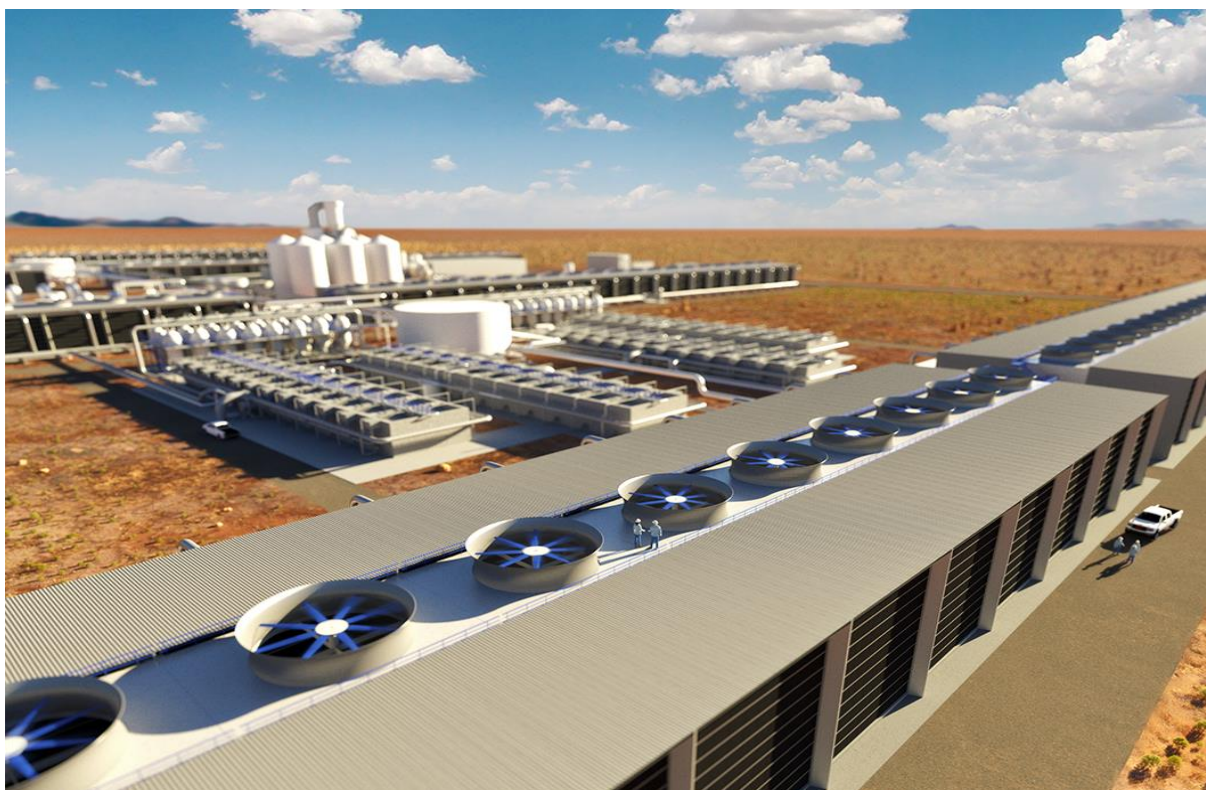
Το 2017, ενσωμάτωσε τη δυνατότητα σύνθεσης καυσίμων στην πιλοτική μονάδα, δημιουργώντας μια μονάδα Air To Fuels που βασίζεται εξ ολοκλήρου σε τεχνολογίες βιομηχανικής κλίμακας. Με την τεχνολογία αυτή, η εταιρεία δύναται να παράγει επιτόπου υγρά καύσιμα από το συλλεγμένο CO₂ (Carbon Engineering, 2023).

Το 2021, ιδρύθηκε το Κέντρο Καινοτομίας της Carbon Engineering (Σχήμα 16), δημιουργώντας τη μεγαλύτερη εξειδικευμένη εγκατάσταση έρευνας και ανάπτυξης (E&A) για την άμεση δέσμευση αέρα (Carbon Engineering, 2023).



Σχήμα 16: Κέντρο καινοτομίας της Carbon Engineering στο Squamish της Βρετανικής Κολομβίας, (Griffin, 2021)

Το 2022, η Carbon Engineering σε συνεργασία με την 1PointFive, ολοκλήρωσε τον μηχανολογικό σχεδιασμό για την αναφερθείσα μονάδα μεγάλης κλίμακας. Στην συνέχεια, ξεκίνησε και η κατασκευή της μονάδας. Η εγκατάσταση βρίσκεται στο Τέξας και αναπτύσσεται από την 1PointFive. Για να γίνει κατανοητή η κλίμακα της μονάδας, αξίζει να σημειωθεί ότι, όταν τεθεί σε πλήρη λειτουργία θα ξεπεράσει την δυναμικότητα των ήδη υπάρχουσών εγκαταστάσεων κατά 100 φορές (Σχήμα 17) (Carbon Engineering, 2023b).



Σχήμα 17: Ψηφιακή αναπαράσταση της εγκατάστασης DAC στο Τέξας, Ηνωμένες πολιτείες (Lust, 2022).

Σύμφωνα με το πλάνο της 1PointFive για ανάπτυξη 100 εγκαταστάσεων DAC μέχρι το 2035, δυναμικότητας 1 εκατομμύριο τόνους ετησίως. Το ποσό αυτό ισοδυναμεί με τις εκπομπές από περίπου 21,5 εκατομμύρια αυτοκίνητα η με την αναδάσωση κλίμακας περίπου 4 δισεκατομμυρίων δέντρων (Carbon Engineering, 2023b).

Η εταιρεία επίσης εκτιμά ότι με την αύξηση της ευαισθητοποίησης των χωρών και της ζήτησης στην εθελοντική αγορά μπορούν να αναπτυχθούν έως και 135 εγκαταστάσεις DAC έως το 2035 (Carbon Engineering, 2023b).

1.7.2 Μελλοντικά σενάρια

Η ανάπτυξη και η προσοχή που θα λάβουν οι τεχνολογίες DAC στις επόμενες δεκαετίες εξαρτώνται από τις πολιτικές και τα μέτρα μετριασμού της κλιματικής αλλαγής που θα ακολουθήσει η διεθνής κοινότητα. Στο φάσμα αυτών των πολιτικών, υπάρχει από την μία μεριά η επιλογή πραγματοποίησης ελάχιστων προσπαθειών για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, ενώ από την άλλη μεριά αναδεικνύεται μία πορεία άμεσης απαλλαγής από τον άνθρακα με σκοπό να επιτευχθούν η στόχοι της συμφωνίας του Παρισίου (Rogelj et al., 2018). Στην δεύτερη περίπτωση και σε ένα πλαίσιο πειστικών πολιτικών για το κλίμα, γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για ανάπτυξη τεχνολογιών αρνητικών εκπομπών (Anderson and Peters, 2016). Η έρευνα των (Shayegh et al., 2021), εξετάζει δύο πιθανά σενάρια κλιματικής αλλαγής τα οποία επηρεάζουν κατά συνέπεια την ανάπτυξη των τεχνολογιών DAC:

1. Πολιτική ως συνήθως (PAU – Politics As Usual): Στο σενάριο αυτό, οι πολιτικές που θα ακολουθηθούν στο μέλλον είναι συνυφασμένες με μία νέα διεθνή συμφωνία, τις Εθνικά Καθορισμένες Συνεισφορές (INDC, Intended Nationaly Determined Contributions) (Levin et al., 2015). Σημειώνεται ότι οι συνεισφορές INDC προβάλλουν ένα σενάριο αύξησης της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας κατά 2,6-3,1°C μέχρι το 2100 (Rogelj et al., 2016). Κατά συνέπεια, σύμφωνα με το σενάριο αυτό, η ανάπτυξη των DAC τα επόμενα χρόνια πρόκειται να καθορίζεται από επενδύσεις του ιδιωτικού τομέα καθώς και από κυβερνητικές αποφάσεις.
2. Αυστηρή κλιματική πολιτική σύμφωνη με τον στόχο των 2°C: Στο σενάριο αυτό, θα πραγματοποιηθούν διεθνείς κινητοποιήσεις με στόχο να μειωθούν οι εκπομπές CO₂ ακολουθώντας τα μέτρα που θέτει η συμφωνία του Παρισίου με στόχο την διατήρηση

της μέσης παγκόσμια θερμοκρασίας κάτω από τους 2°C σε σχέση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Για να πραγματοποιηθεί αυτό το σενάριο, απαιτείται η επίτευξη παγκόσμια ουδετερότητας ως προς τον άνθρακα μέχρι και την περίοδο 2050-2060 όπως ορίζει η IPCC (Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή), (Masson-Delmotte, Valérie, et al, 2018). Παράλληλα το σενάριο αυτό, βασίζεται στην ανάπτυξη τεχνολογιών αρνητικών εκπομπών, ιδίως μετά το 2030 για την επίτευξη των στόχων, (Rogelj et al., 2016). Στην περίπτωση αυτή, οι τεχνολογίες DAC και η ανάπτυξή τους, θα επηρεαστούν από τις πολιτικές που θα ακολουθήσουν οι κυβερνήσεις σε παγκόσμιο επίπεδο καθώς και από τις επιλογές που θα πραγματοποιηθούν μεταξύ άλλων τεχνολογιών αρνητικών εκπομπών (Shayegh et al., 2021).

1.8 Αντικείμενο και σκοπός

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η παρουσίαση της τεχνολογίας άμεσης δέσμευσης CO₂ από τον αέρα ως έναν τρόπο καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής. Η ανάλυση των τεχνολογιών DAC αποτελεί το κύριο κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, ενώ κατ' επέκταση αναλύονται οι τρόποι αποθήκευσης και αξιοποίησης του δεσμευμένου CO₂.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση και η κατανόηση της λειτουργίας των μονάδων DAC ώστε να πραγματοποιηθεί μία μελέτη περίπτωσης με στόχο την εγκατάσταση ορισμένων μονάδων στην Ελλάδα και την δέσμευση ενός ποσού CO₂ από τις συνολικές εκπομπές της χώρας κατά το έτος 2030. Στα πλαίσια της μελέτης θα πραγματοποιηθεί ενεργειακή και οικονομική αξιολόγηση δύο τεχνολογιών DAC καθώς και των μονάδων Α.Π.Ε. που θα τροφοδοτούν τα συστήματα αυτά. Στο τέλος θα γίνει μελέτη χωροθέτησης ώστε να προταθούν οι όποιες ενδεχόμενες τοποθεσίες για την εγκατάσταση των μονάδων ενώ θα πραγματοποιηθεί και ανάλυση του νεκρού σημείου επένδυσης

Κεφάλαιο 2: Δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από τον αέρα

Η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα από τον αέρα αποτελεί μία τεχνολογία μετριασμού της κλιματικής αλλαγής η οποία χρησιμοποιεί απορροφητικά και χημικές αντιδράσεις για να αποσπάσει ατμοσφαιρικό CO₂. Ανάλογα την τεχνολογία, ο αέρας κινείται προς μέσω των ανεμιστήρων προς την μονάδα απορρόφησης του CO₂ και μετά από μία σειρά χημικών αντιδράσεων ή άλλων διεργασιών, το CO₂ αποσπάται από τον αέρα, ο οποίος εξέρχεται από μία έξοδο, ενώ το CO₂ συλλέγεται μετά την έξοδο του «καθαρού» αέρα. Οι δύο επικρατέστερες τεχνολογίες απορροφητικών μέχρι σήμερα, διακρίνονται σε στερεού και υγρού τύπου απορροφητικά.

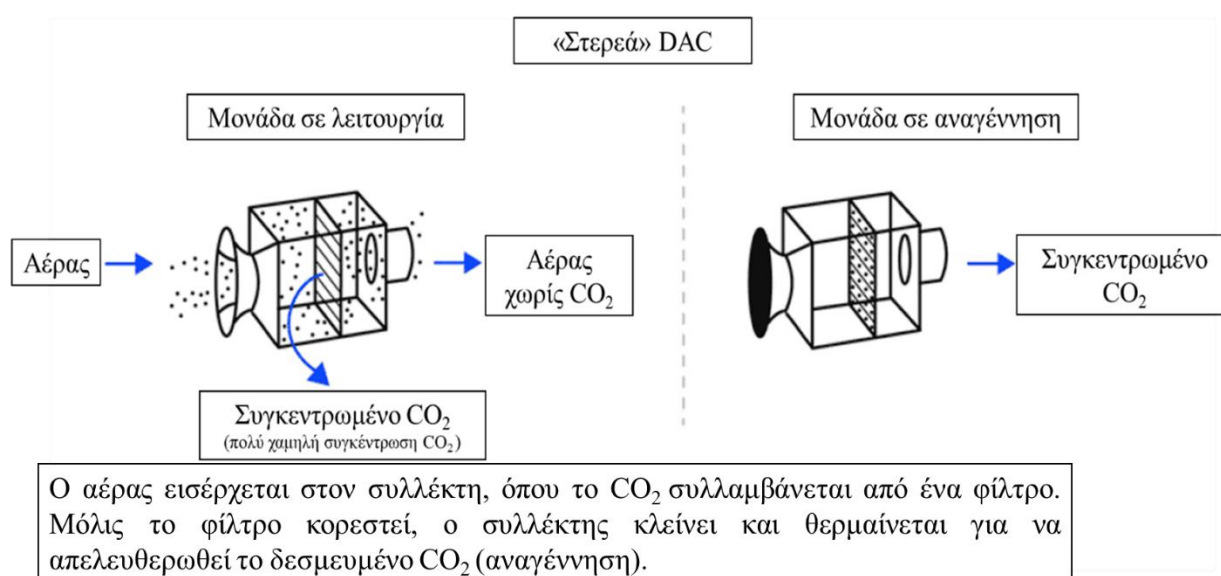
Τα υγρά απορροφητικά αποτελούνται από υγρούς διαλύτες που χρησιμοποιούν ένα διάλυμα ισχυρής βάσης και έπειτα από μία σειρά χημικών διεργασιών συλλέγουν το CO₂. Τα στερεά απορροφητικά, χρησιμοποιούν πορώδη υλικά, τα οποία, όταν έρθουν σε επαφή με τον αέρα, αντιδρούν με το CO₂, το οποίο και δεσμεύουν στην επιφάνειά τους (Lebling et al., 2022). Το CO₂ αποσπάται από το απορροφητικό στο οποίο έχει συλλεχθεί με την χρήση θερμότητας. Ουσιαστικά, μετά την έξοδο του αέρα (φτωχού σε CO₂) από το σύστημα, προσδίδεται θερμότητα ώστε να απελευθερωθεί το CO₂ από την επιφάνεια του στερεού απορροφητικού. Με τον τρόπο αυτό, όχι μόνο συλλέγεται το CO₂ αλλά παράλληλα αναγεννάται το απορροφητικό υλικό (η ισχυρή βάση ή το πορώδες υλικό, ανάλογα την τεχνολογία) και προετοιμάζεται για τον επόμενο κύκλο δέσμευσης. Σημειώνεται πως υπάρχουν και άλλες τεχνολογίες, οι οποίες, λόγω χάρη, χρησιμοποιούν ηλεκτροχημικές διεργασίες. Οι τεχνολογίες αυτές βρίσκονται στο στάδιο ανάπτυξης και στοχεύουν στην μείωση των ενεργειακών και οικονομικών αναγκών των δύο βασικών τεχνολογιών (Lebling κ.ά., 2022).

2.1 Δέσμευση από τον αέρα

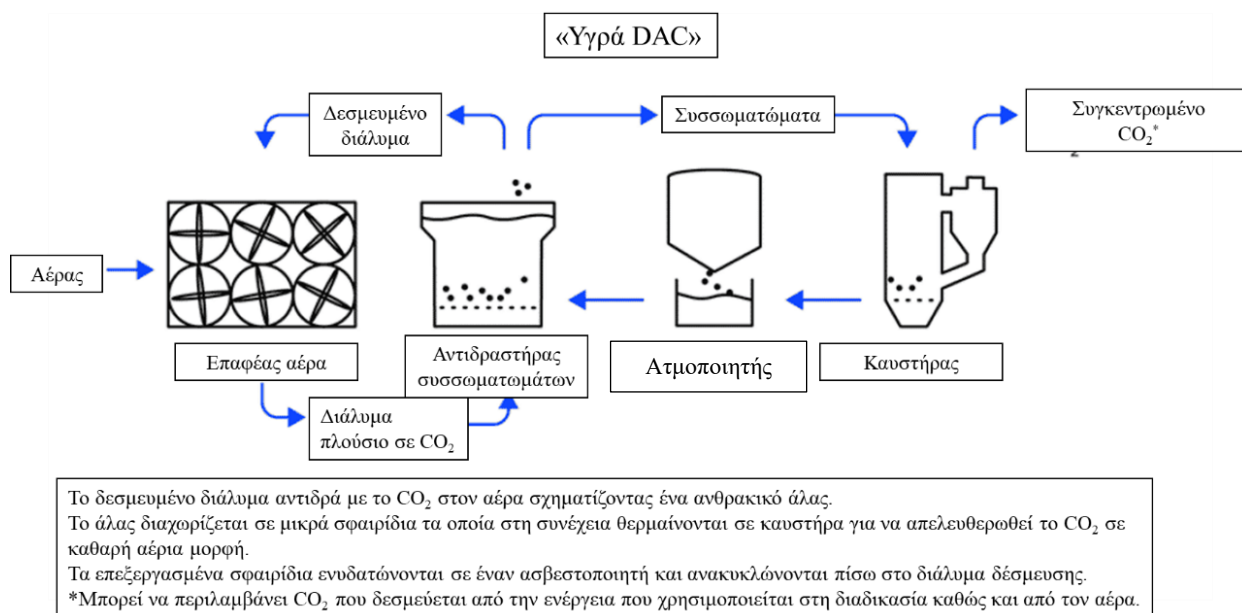
Οι τεχνολογίες DAC αποτελούνται από τρία βασικά στάδια: εισαγωγή, δέσμευση από ένα απορροφητικό μέσο και διαχωρισμός του CO₂ από το απορροφητικό μέσο. Στο στάδιο της εισαγωγής, χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες για την εισαγωγή αέρα με κατεύθυνση την μονάδα απορρόφησης, η οποία αποτελείται από την επιλεγμένη τεχνολογία απορροφητικών. Στο στάδιο της δέσμευσης, το ατμοσφαιρικό CO₂ απορροφάται από τον αέρα με μία διαδικασία ανάλογη της τεχνολογίας απορροφητικού που έχει επιλεγεί. Το τρίτο στάδιο, αποτελεί ο διαχωρισμός CO₂ από το απορροφητικό και η συλλογή του. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με θέρμανση του απορροφητικού, το οποίο, όπως προαναφέρθηκε, αναγεννάται και είναι έτοιμο για τον επόμενο κύκλο.

Οι δύο βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την άμεση δέσμευση CO₂ είναι τα «στερεά» DAC (S-DAC) και τα «υγρά» DAC (L-DAC). Η ονομασία τους προκύπτει από την φάση στην οποία βρίσκονται τα στοιχεία τα οποία δεσμεύουν το διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα από τα οποία μετά αυτό συλλέγεται προς αποθήκευση ή αξιοποίηση.

Πιο συγκεκριμένα, τα «στερεά» DAC βασίζονται στην τεχνολογία τους σε στερεού τύπου απορροφητικά σε περιβάλλον χαμηλής πίεσης (στο κενό) και σε μεσαίες τιμές θερμοκρασίας (80-120°C). Αντίθετα, τα «υγρά» DAC βασίζονται σε ένα υδατικό διάλυμα (π.χ. υδροξείδιο του καλίου), το οποίο απελευθερώνει το δεσμευμένο διοξείδιο του άνθρακα μέσω μια σειράς διαδικασιών σε υψηλές θερμοκρασίες (300-900°C) (“Direct Air Capture – Analysis,” 2022). Παρακάτω φαίνονται και σχηματικά οι διατάξεις S-DAC (Σχήμα 18) και L-DAC (Σχήμα 19).



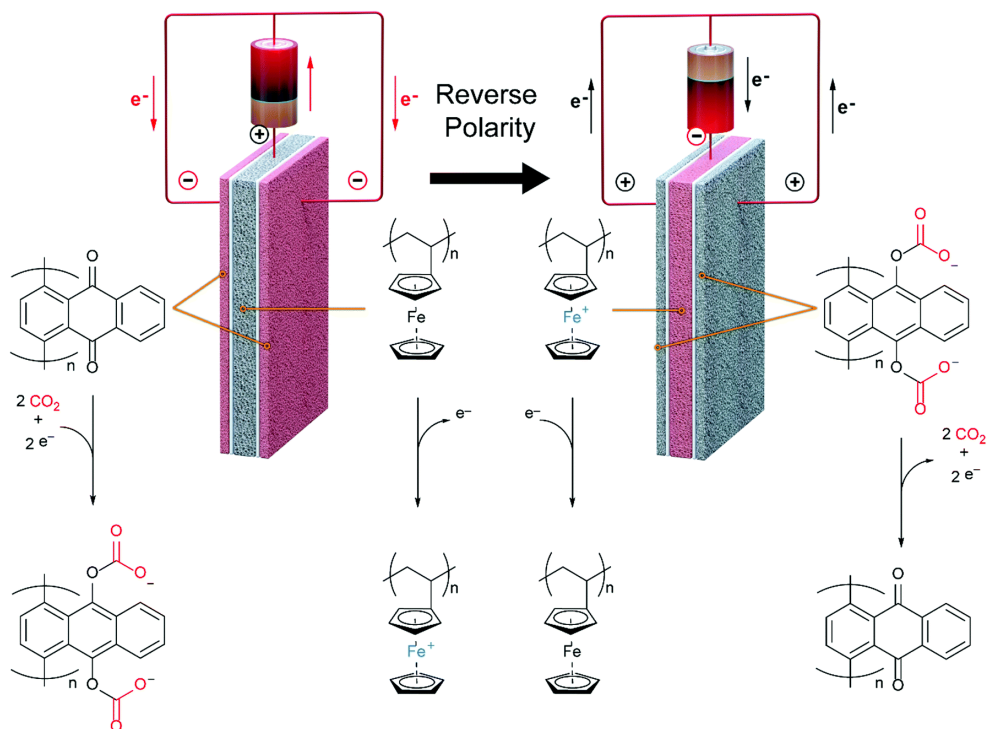
Σχήμα 18: Τρόπος λειτουργίας σταθμού S-DAC (Jennifer L., 2022).



Σχήμα 19: Τρόπος λειτουργίας σταθμού L-DAC (Jennifer L., 2022).

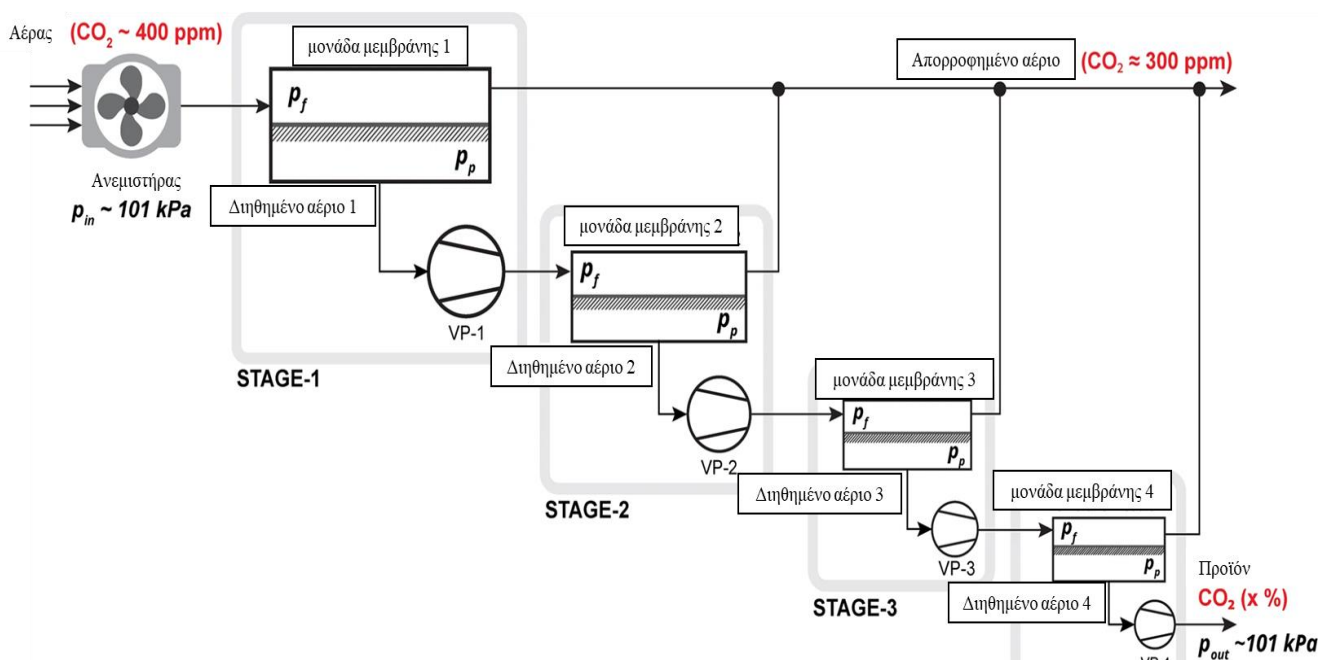
Ανεξάρτητα των παραπάνω τεχνολογιών, οι μονάδες DAC καταναλώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας κατά την λειτουργία τους, παρουσιάζοντας έτσι ένα πρόδηλο μειονέκτημα εν συγκρίσει με τις υπόλοιπες τεχνολογίες δέσμησης διοξειδίου του άνθρακα που αναλύθηκαν παραπάνω. Η κατανάλωση αυτή οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα είναι αρκετά υποπολλαπλάσια από αυτή, λόγω χάρη μετά την καύση άνθρακα σε μία μονάδα παραγωγής ενέργειας (“Direct Air Capture – Analysis,” 2022).

Με γνώμονα τον προβληματισμό αυτό, οι ερευνητές επικεντρώνονται στην ανάδειξη αποδοτικότερων απορροφητικών και διαλυτών, αναβαθμίζοντας παράλληλα την απόδοση των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην εγκατάσταση DAC. Παράλληλα όμως, κατά την προσπάθεια αυτή, αναδύονται και νέες τεχνολογίες δέσμησης όπως η προσρόφιση με ηλεκτρόλυση (ESA) και η χρήση μεμβρανών (m-DAC). Στην τεχνολογία ESA, (Voskian and Hatton, 2019), μία κυψέλη καταφέρνει να δεσμεύσει το διοξειδίου του άνθρακα έχοντας την παρακάτω μορφή: δύο υποστρώματα ηλεκτροδίων καθόδου (επικαλυμμένα με ένα σύνθετο υλικό νανοσωλήνων) στα οποία παρεμβάλλεται ένα υπόστρωμα ηλεκτροδίου ανόδου (επικαλυπτόμενο από σύνθετο υλικό σιδηροκενίου-CNT). Μεταξύ των ηλεκτροδίων υπάρχουν διαχωριστικές μεμβράνες. Τα ESA έχουν την παρακάτω μορφή (Σχήμα 20):



Σχήμα 20: Σχηματική αναπαράσταση κυψέλης για τεχνολογία ESA (Voskian and Hatton, 2019).

Από την άλλη μεριά, ενώ η χρήση μεμβρανών για την δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα μετά την καύση είναι αποδοτική, δεν φαίνεται να προκύπτουν τα ίδια αποτελέσματα και για τις μονάδες DAC (Castel et al., 2021;). Αυτό, οφείλεται στο γεγονός ότι σε σύγκριση με τις βιομηχανικές πηγές εκπομπής CO₂ (στις οποίες βρίσκεται σε υψηλές συγκεντρώσεις και πιέσεις), η πίεση του CO₂ στον αέρα είναι πολύ μικρή (40 Pa) για να περάσει αποτελεσματικά από τις μεμβράνες (Fujikawa et al., 2021). Ο διαχωρισμός, λοιπόν, του CO₂ σε μεγάλη κλίμακα με μεμβράνες δεν είναι ακόμη μια εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία, παρόλο που έχουν δαπανηθεί παγκοσμίως μεγάλα ποσά χρηματοδότησης για την E&A, ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν δημοσιευθεί αρκετά άρθρα που ασχολούνται με το θέμα αυτό (Castro-Muñoz et al., 2022). Στο Σχήμα 21, φαίνεται η μορφή ενός πρότυπου ερευνητικού μοντέλου m-DAC με την χρήση του λογισμικού για το φύλλο ροής.



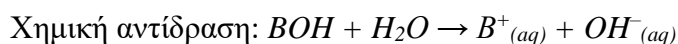
Σχήμα 21: Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας m-DAC (Fujikawa et al., 2021).

2.2 Τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα από τον αέρα

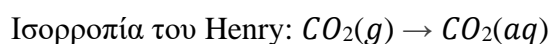
Στο Κεφάλαιο 1, έγινε αναφορά στις βασικές τεχνολογίες δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα από τον αέρα, δηλαδή την χρήση υδατικών διαλυμάτων ισχυρής βάσης και στερεών απορροφητικών. Οι δύο αυτές μέθοδοι αποτελούν τους κύριους πυλώνες της δέσμευσης CO₂ απευθείας από τον αέρα. Στην πρώτη, το αέριο CO₂ απορροφάται από έναν υγρό διαλύτη, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα αέριο ρεύμα εξόδου με μειωμένη περιεκτικότητα σε CO₂ και ένα υγρό ρεύμα εξόδου πλούσιο σε CO₂ (Holmes and Keith, 2012). Στην δεύτερη, χρησιμοποιούνται πορώδη υλικά, εμποτισμένα με κάποια ουσία, με την οποία αντιδρά το CO₂ και συλλέγεται αναλόγως (McQueen et al., 2021).

2.2.1 Υδατικά διαλύματα βάσης

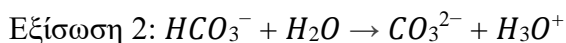
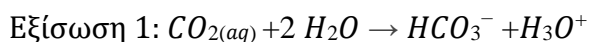
Στην τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται μια ισχυρή βάση, η οποία και διαλύεται πλήρως σε υδατικό διάλυμα με αποτέλεσμα να ιονίζεται πλήρως. Κατά αυτό τον τρόπο όλα τα μόρια του νερού μετατρέπονται σε ιόντα υδροξειδίου OH⁻ σύμφωνα με την παρακάτω χημική αντίδραση (Lee, 2021).



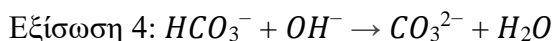
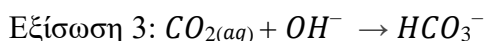
Η προσέγγιση αυτή σε μία μονάδα DAC απαιτεί ένα ισχυρό βασικό υδροξείδιο διάλυμα για την απορρόφηση του CO₂, (Socolow et al., 2011). Παράλληλα, ακολουθεί μία διαδικασία ανιονικής ανταλλαγής με σκοπό την παραγωγή κατακρημισμένων σφαιριδίων ανθρακικού ασβεστίου τα οποία είναι απαραίτητα στην ροή των χημικών αντιδράσεων της τεχνολογίας. Επιπλέον, απαιτούνται υψηλές θερμοκρασίες για την ανάκτηση του CO₂ από το κατακρημισμένο ανθρακικό ασβέστιο (McQueen et al., 2021). Τα βασικότερα διαλύματα ισχυρών βάσεων που χρησιμοποιούνται σε μονάδες απορρόφησης ατμοσφαιρικού CO₂ είναι το KOH ή το NaOH. Όταν ο αέρας έρθει σε επαφή με μια υδατική φάση, μια ισορροπία που μεταφράζει τη διάλυση της αέριου CO₂ (CO_{2(g)}) στην υδατική φάση μπορεί να δημιουργηθεί:



Το CO₂ παρουσιάζει όξινη συμπεριφορά σε υδατικά διαλύματα λόγω της ενυδάτωσής του σε ανθρακικό οξύ (H₂CO₃), ακολουθούμενη από τη σχετική ισορροπία οξέος-βάσης, (Wang et al., 2010). Ανάλογα με την τιμή pH του διαλύματος, ακολουθούν δύο διαφορετικά «μονοπάτια» για να περιγράψει η ενυδάτωση του CO₂ σε υδατικό διάλυμα. Για τιμές pH κάτω του 8, η επικρατούσα διαδρομή ονομάζεται η γραμμή του νερού (water path):



Η πρώτη ισορροπία αυτής της διαδρομής είναι ο συνδυασμός δύο άλλων βημάτων κατά τα οποία το φυσικά διαλυμένο CO₂ μετατρέπεται πρώτα σε H₂CO₃ και, στη συνέχεια, σε διττανθρακικά ιόντα (HCO³⁻). Ωστόσο, το ανθρακικό οξύ μετατρέπεται άμεσα καθώς δεν παρουσιάζει υγρή φάση με αποτέλεσμα η πρώτη ισορροπία να έχει την μορφή των εξισώσεων 1 και 2. Το δεύτερο «μονοπάτι» που περιγράφει την ενυδάτωση του CO₂ και ονομάζεται μονοπάτι υδροξειδίου, παρατηρείται για τιμές pH άνω του 10 (Εξίσωση 3 και 4):



Για τιμές pH μεταξύ 8 και 10, εμφανίζονται ταυτόχρονα και τα δύο μονοπάτια, (Rouxhet et al., 2022).

2.2.2 Στερεά απορροφητικά

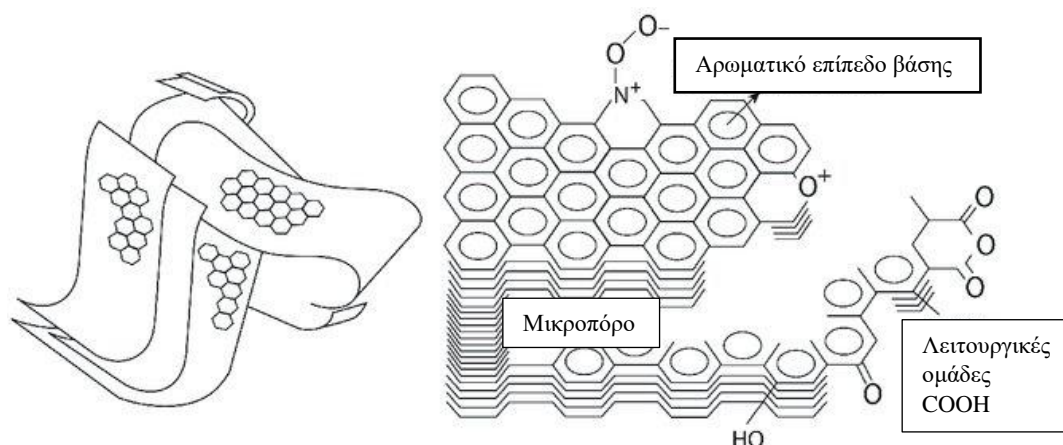
Οι περισσότερες τεχνολογίες άμεσης δέσμευσης αέρα χρησιμοποιούν απορροφητικά υλικά στερεής φύσεως. Δεδομένου ότι το CO₂ στον αέρα βρίσκεται σε πολύ μικρή συγκέντρωση, είναι σημαντικό να αποφευχθεί η δαπάνη μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για την δέσμευσή του. Για τον λόγο αυτό, τα απορροφητικά υλικά αποτελούν εξαιρετική λύση καθώς συγκρατούν το CO₂ χωρίς περαιτέρω κατανάλωση ενέργειας. Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας γίνεται κυρίως στο στάδιο απομάκρυνσης του CO₂ από το απορροφητικό υλικό (Shi et al., 2020a).

Στην περίπτωση των τεχνολογιών με στερεά απορροφητικά, ο αέρας εισέρχεται μέσω ανεμιστήρων σε μία σειρά από πορώδη υλικά με τα οποία αλληλοεπιδρά το CO₂, τα μόρια του οποίου απομακρύνονται από το μίγμα του αέρα. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα στερεά απορροφητικά έχουν την δυνατότητα να απομακρύνουν το CO₂ από αέρια μίγματα είτε με την χρήση ασθενών ενδομοριακών δυνάμεων (φυσική απορρόφηση) είτε μέσω ομοιοπολικών δεσμών (χημική απορρόφηση). Ορίζεται επιπλέον ως θερμότητα προσρόφησης η ισχύς του δεσμού μεταξύ του μορίου CO₂ και της επιφάνειας του απορροφητικού υλικού. Ουσιαστικά, όταν η θερμότητα προσρόφησης είναι μικρότερη από περίπου 15 kcal mol⁻¹ τότε πρόκειται για φυσική απορρόφηση ενώ για μεγαλύτερες τιμές πρόκειται για χημική απορρόφηση (Wilcox, 2012).

2.2.2.1 Υλικά φυσικής απορρόφησης

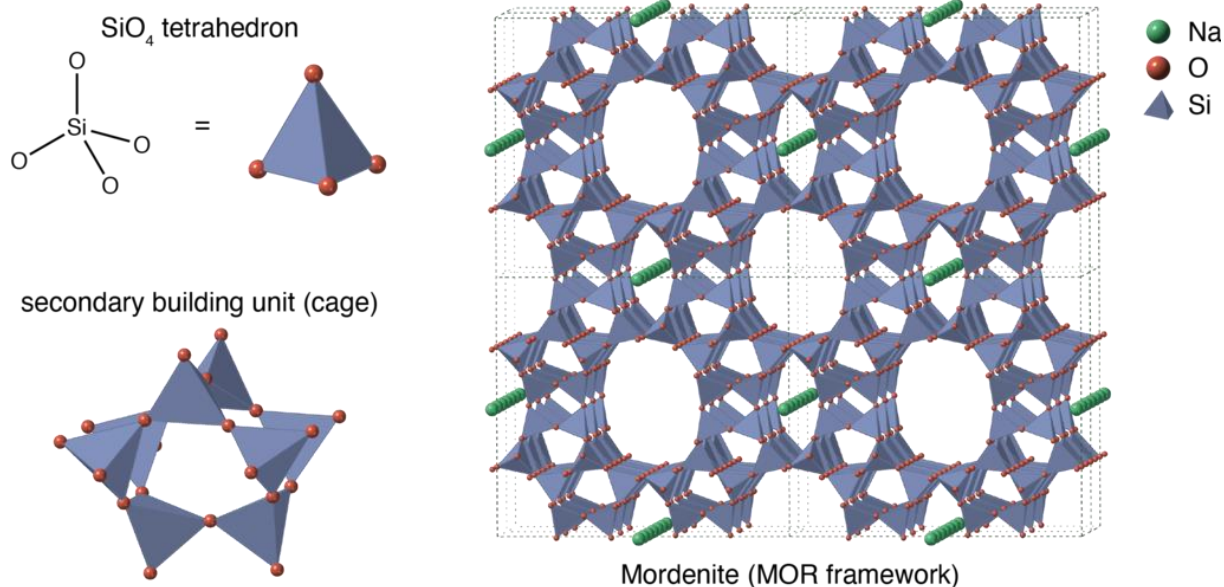
Στην φυσική απορρόφηση, επικρατούν φυσικές αλληλεπιδράσεις για την δέσμευση του CO₂ με αποτέλεσμα η διαδικασία να λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια ενός απορροφητικού υλικού (Oschatz and Antonietti, 2018). Οι μεγάλες επιφάνειες είναι επιθυμητές, όπως σε υλικά με υψηλό πορώδες ή νανομετρικές διαστάσεις. Παρακάτω αναλύονται τα πιο σημαντικά:

1. **Ενεργός άνθρακας:** Είναι ένα ευρέως διαθέσιμο υλικό χαμηλού κόστους με θερμική σταθερότητα. Παρασκευάζεται σε δύο βασικά στάδια: την ενανθράκωση και την ενεργοποίηση. Σε υψηλές πιέσεις, ο ενεργός άνθρακας (Σχήμα 22) παρουσιάζει υψηλή χωρητικότητα με αποτέλεσμα να είναι ιδανικός για απορρόφηση υπό πίεση (pressure-swing sorption – PSA). Επιπλέον, μπορεί να αναγεννηθεί εύκολα και η διαδικασία απορρόφησης είναι σχεδόν πλήρως αντιστρεπτή. Τέλος, σημειώνεται πως η υγρασία στο ρεύμα τροφοδοσίας μπορεί να μειώσει την απόδοσή του (Lopes et al., 2009).



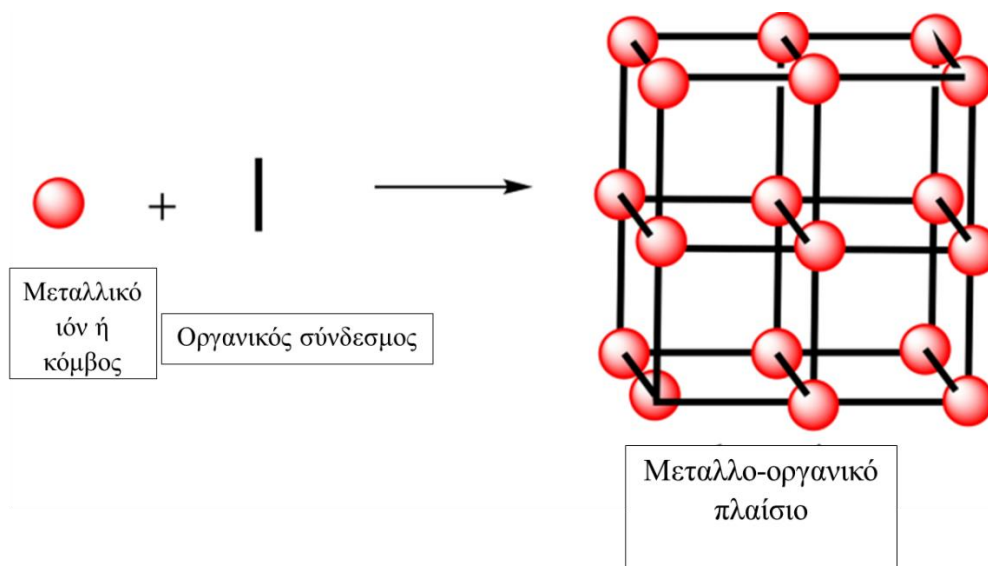
Σχήμα 22: Δομή των υλικών ενεργού άνθρακα (Mangold, 2011)

2. **Ζεόλιθος:** Η δέσμευση CO₂ σε ζεόλιθους (Σχήμα 23) επηρεάζεται από το μέγεθος, την πυκνότητα του φορτίου και την κατανομή των κατιόντων στην πορώδη δομή, (Zhao et al., 1998). Η υγρασία και η υψηλή θερμοκρασία μειώνουν την αποδοτικότητα των ζεόλιθων, οι οποίοι δεν έχουν ακόμα αποδειχθεί καλά υλικά για την άμεση δέσμευση διοξειδίου από τον αέρα.



Σχήμα 23: Μικροσκοπική δομή ενός πλαισίου ζεόλιθου (μορδενίτη) (François-Xavier Coudert, 2023).

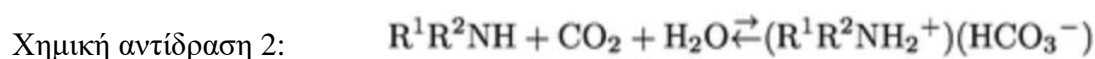
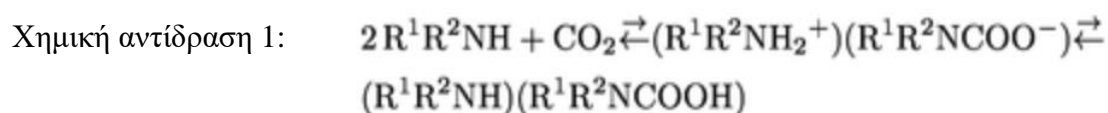
3. **Μεταλλο-οργανικά πλαίσια (MOFs):** Τα MOFs (Σχήμα 24) διακρίνονται για την ευελιξία τους ως προς το σχήμα, την δομή και το μέγεθος των πόρων και τις επιφανειακές ιδιότητες. Η απόδοσή τους επηρεάζεται από την θερμοκρασία και την υγρασία, ωστόσο έχουν επιδείξει αξιοσημείωτες επιδόσεις σε ρεύμα καθαρού CO₂ υψηλής πίεσης και όχι σε μίγματα αερίων όπως στην περίπτωση της άμεσης δέσμευσης από τον αέρα. Έτσι, καθίστανται κατάλληλα για αποθήκευση και όχι δέσμευση του CO₂ (Yu et al., 2012).



Σχήμα 24: Δομή μεταλλο-οργανικού πλαισίου (MOF) (Singh et al., 2021).

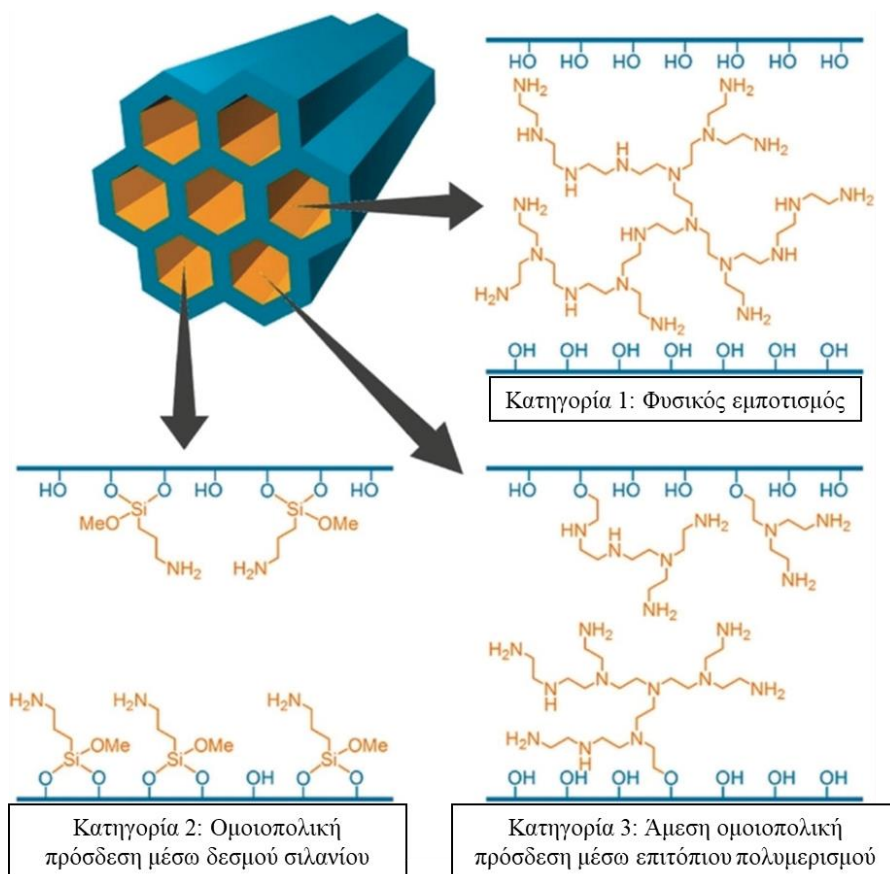
2.2.2.2 Χημική απορρόφηση: Υλικά τροποποιημένα με αμίνη

Με στόχο την μείωση της υψηλής θερμοχωρητικότητας και των απωλειών θερμότητας λόγω εξάτμισης που παρουσιάζουν οι αμίνες ως υγρά διαλύματα για την δέσμευση CO₂, έχει προταθεί η χρήση τους σε στερεά υποστρώματα (Shi et al., 2020a). Τα τροποποιημένα με αμίνες απορροφητικά υλικά έχουν ομάδες αμίνης φορτωμένες σε πορώδη υλικά για να προσλαμβάνουν CO₂ μέσω μίας χημικής αντίδρασης (Ünveren et al., 2017). Οι παρακάτω χημικές αντιδράσεις δείχνουν πώς οι δευτερεύουσες αμίνες αντιδρούν με το CO₂ υπό ξηρές και υγρές συνθήκες αντίστοιχα (Dutcher et al., 2015) :



Τα τροποποιημένα με αμίνη απορροφητικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες βάσει της μεθόδου παρασκευής τους (Σχήμα 25):

1. **Κατηγορία 1:** Τα απορροφητικά κατηγορίας 1 παρασκευάζονται με φυσικό εμπότισμό αμινών στα πορώδη υλικά. Αποδίδουν καλά εάν η οργανική φάση έχει χαμηλό ιξώδες και τα απορροφητικά έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτογενείς και δευτερογενείς ομάδες αμινών.
2. **Κατηγορία 2:** Τα απορροφητικά κατηγορίας 2 παρασκευάζονται με χημικό εμβολιασμό της λειτουργικής ομάδας αμίνης στην επιφάνεια του φορέα, σταθεροποιώντας έτσι το απορροφητικό κατά τη διάρκεια της αναγέννησης. Πιο συγκεκριμένα παράγονται με δύο μεθόδους: χημικές αντιδράσεις σιλανίου και δέσμευση σε παράγοντες σύζευξης.
3. **Κατηγορία 3:** Τα απορροφητικά κατηγορίας 3 αποτελούνται από έναν ανόργανο φορέα και ένα χημικά εμβολιασμένο συστατικό πολυαμίνης που παρασκευάζεται μέσω πολυμερισμού μονομερών της αμίνης, (Shi et al., 2020a).



Σχήμα 25: Οι τρεις κατηγορίες τροποποιημένων απορροφητικών με αμίνη, (Didas et al., 2015).

Σημειώνεται ότι η κατηγορία 1 έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από την κατηγορία 2 λόγω υψηλότερης περιεκτικότητας σε αμίνες. Επιπλέον η λειτουργική ικανότητα της κατηγορίας 3 είναι υψηλότερη από αυτή της κατηγορίας 2, λόγω του μεγαλύτερου αριθμού αμινών στα υλικά HAS (υπερδιακλαδισμένη αμινοπυρίτιδα - hyperbranched aminosilica). Τέλος, η κατηγορία 3 παρουσιάζει εξαιρετικές ιδιότητες αναγέννησης ως συνέπεια της ομοιοπολικής πρόσδεσης των αμινών στα απορροφητικά υλικά (Choi et al., 2011).

2.3 Μονάδες DAC (Direct air capture)

Μεταξύ των τρόπων αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και της υπερθέρμανσης του πλανήτη παρουσιάζονται τέσσερις προσεγγίσεις. Αυτές είναι: η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, η γεωμηχανική, ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής και η βιομηχανική διαχείριση του άνθρακα (ICM).

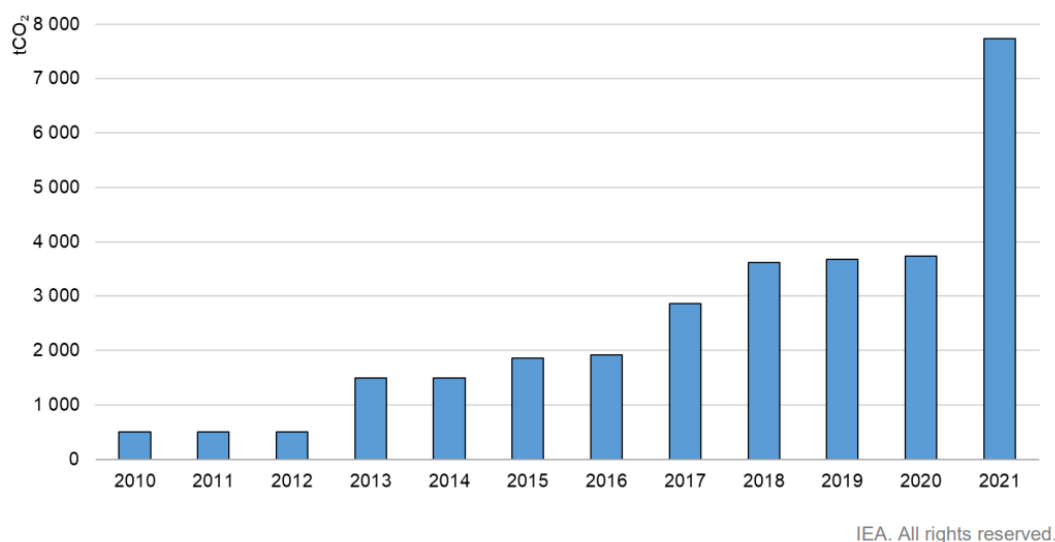
- **Προσαρμογή** είναι απλά η συμβίωση και η τροποποίηση του ανθρώπου γύρω από την κλιματική αλλαγή, όπως για παράδειγμα η κατασκευή φραγμάτων για την αντιμετώπιση της ανόδου της στάθμης της θάλασσας.
- Η **γεωμηχανική** αποτελεί στην ουσία έναν τεχνητή αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής με ανθρώπινα μέσα. Περιλαμβάνει στην ουσία την εφαρμογή τεχνολογιών οι οποίες μεταποιούν το φυσικό περιβάλλον με αποτέλεσμα να εξουδετερώνονται οι πηγές υπερθέρμανσης του πλανήτη. Μία τεχνική της γεωμηχανικής είναι η μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας με την χρήση κατάλληλων μηχανημάτων και τεχνολογιών.
- Ο **μετριασμός**, είναι η αποφυγή της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και η μετατροφή σε πηγές ενέργειας χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (π.χ. πυρηνική, αιολική ή ηλιακή ενέργεια).
- Η τελευταία προσέγγιση (**ICM**), αντιμετωπίζει την συνεχή κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ενώ παράλληλα δεσμεύει το συνοδευόμενο CO₂ προς αποθήκευση (CCS – Carbon Capture and Storage) ή για χρήση (CCU – Carbon Capture and Utilization) με σκοπό την αντιμετώπιση των προβλεπόμενων μελλοντικών προκλήσεων που θα επιφέρει η κλιματική αλλαγή (Keith, 2000).

Γίνεται αντιληπτό, ότι ο καταλληλότερος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι ο συνδυασμός όλων των παραπάνω τεχνολογιών και τρόπων, αλλά σημειώνεται ότι ορισμένοι τρόποι απαιτούν πιο αυστηρά μέτρα από πολιτικής άποψης για την εφαρμογή τους (Campbell, 2019; Sodiq et al., 2023). Η τελευταία (ICM), όμως, είναι μια στρατηγική, η εφαρμογή της οποίας απαιτεί περισσότερο τεχνικές δεσμεύσεις παρά πολιτικές.

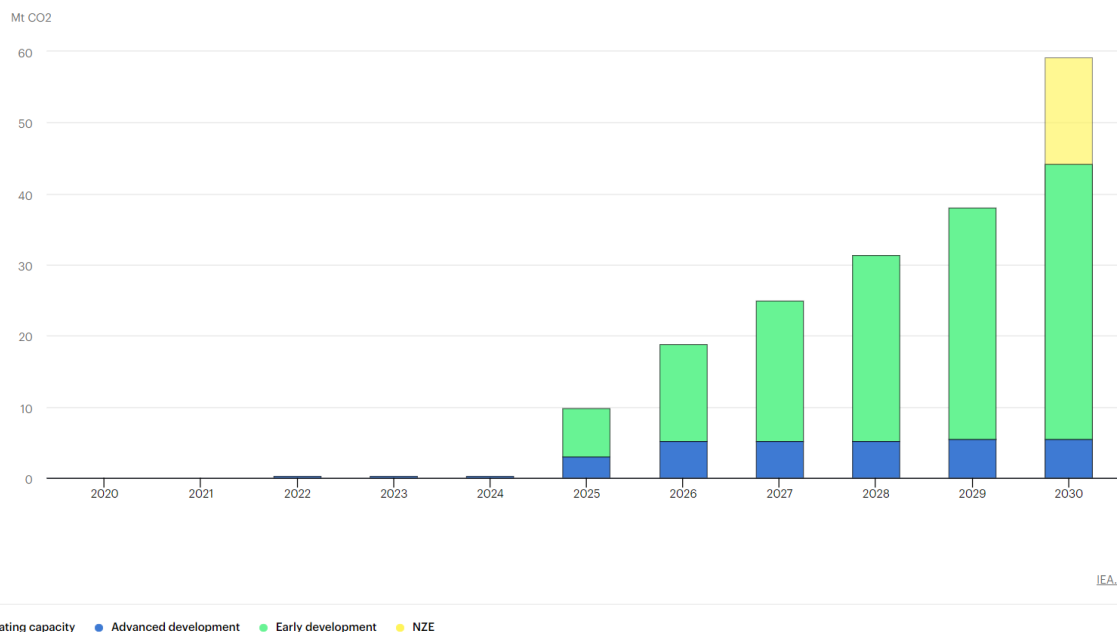
Ακόμη και σε μία ιδανική βιομηχανική εγκατάσταση, στην οποία το 100% του παραγόμενου ρύπου δεσμεύεται επιτόπου, η εφαρμογή τεχνολογίας τερματικού σταθμού είναι δύσκολο να εφαρμοστεί στον τομέα μεταφορών, ο οποίος είναι υπεύθυνος για το 50% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG) (Leeson et al., 2017; Seipp et al.,

2017). Τα παραπάνω στοιχεία, επισημαίνουν την ανάγκη εύρεσης νέων τεχνολογιών για την μείωση των εκπομπών του CO₂. Η επιστροφή των συγκεντρώσεων CO₂ σε προβιομηχανικά επίπεδα είναι σχεδόν αδύνατη, αλλά η διατήρηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη σε 1.5°C υψηλότερα είναι εφικτή με την υιοθέτηση επιθετικών τεχνολογιών απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα (CDR – Content Disarm and Reconstruction), με στόχο να εξασφαλίσουν την απομάκρυνση 100-1000 Gt CO₂ έως το 2100, (Rogelj et al., 2018, p. 2).

Η άμεση δέσμευση αέρα (DAC) βρίσκεται ανάμεσα σε αυτές τις τεχνολογίες και αποτελεί μία σημαντική τεχνική απομάκρυνσης του CO₂. Βασικότερο προτέρημά της είναι ότι μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε καθώς δεσμεύει απευθείας από τον αέρα και είναι ανεξάρτητη από την προέλευση των εκπομπών. Κατά αυτό τον τρόπο, μπορεί κάλλιστα να επιλεγεί για την εγκατάσταση της, μία τοποθεσία που προσφέρει φθηνή ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (Sodiq et al., 2023). Παρακάτω θα αναλυθούν οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες DAC, καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους τμημάτων των εκάστοτε μονάδων. Στα Σχήματα 26 και 27 παρουσιάζονται η λειτουργική ικανότητα των DAC ως τώρα και τα προγραμματισμένα έργα. Στο Σχήμα 27, ως NZE αποτελεί ένα κανονιστικό σενάριο του IEA που δείχνει μια πορεία για τον παγκόσμιο ενεργειακό τομέα με σκοπό της καθαρά μηδενικές εκπομπές CO₂ έως το 2050.



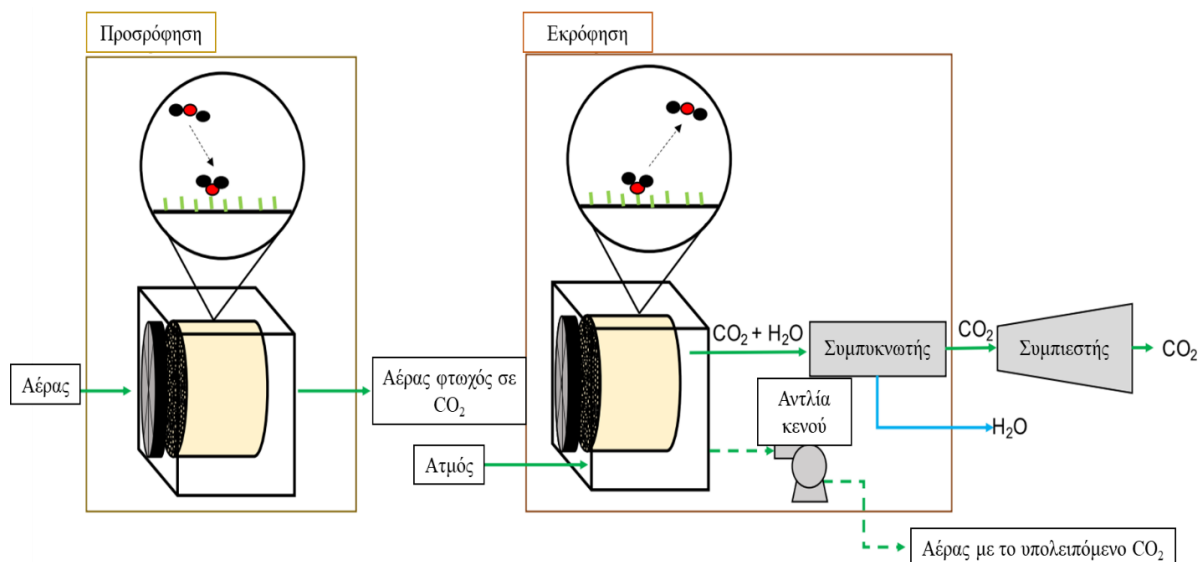
Σχήμα 26: Παγκόσμια λειτουργική ικανότητα DAC 2010-2021 (“Direct Air Capture – Analysis,”).



Σχήμα 27: Προγραμματισμένα έργα DAC και σενάριο Net Zero σε MtCO₂ που θα δεσμεύουν, 2020-2030 (“Direct Air Capture – Analysis,”).

2.3.1 Μονάδες DAC με στερεά απορροφητικά (S-DAC)

Τα συστήματα άμεσης δέσμευσης αέρα με στερεά προσροφητικά υλικά έχουν δύο κύριες διεργασίες: προσρόφηση και εκρόφηση και λειτουργούν κυκλικά. Σε αυτά τα συστήματα, ακολουθείται η διαδικασία η οποία έχει ήδη προαναφερθεί στο Υποκεφάλαιο 2.2.2., δηλαδή ο αέρας εισέρχεται μέσω ανεμιστήρα και το CO₂ προσκολλά στο απορροφητικό υλικό, ενώ κατόπιν ακολουθεί το στάδιο της αναγέννησης, ώστε να συλλεχθεί το CO₂ και να προετοιμαστεί το απορροφητικό υλικό για τον επόμενο κύκλο. Τέλος, το απορροφητικό υλικό ψύχεται ώστε να ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 28:



Σχήμα 28: Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα ροής διεργασίας για στερεό ροφητικό DAC (McQueen et al., 2021).

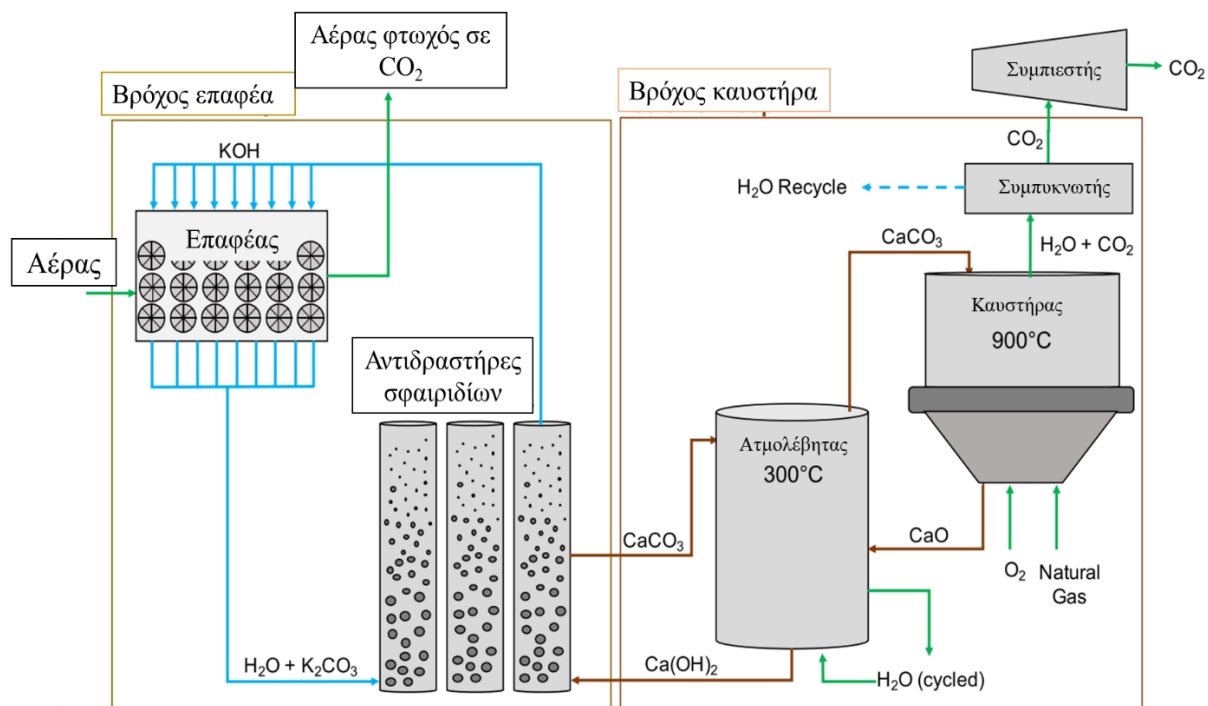
Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με το Σχήμα 26, ο αέρας ωθείται μέσω της μονάδας επαφής με ανεμιστήρες και το CO₂ προσροφάται στο στερεό απορροφητικό υλικό σε συνθήκες περιβάλλοντος. Αφού το στερεό προσροφητικό συλλέξει την μέγιστη ποσότητα με CO₂, η διαδικασία μεταβαίνει στο στάδιο της εκρόφησης. Στο στάδιο αυτό, ο ανεμιστήρας παύει να λειτουργεί και το σύστημα απομονώνεται από το περιβάλλον. Με την χρήση μίας αντλίας κενού (η οποία λειτουργεί στα 30 mbar) ο αέρας απομακρύνεται από το σύστημα ενώ παράλληλα με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση των θερμικών απαιτήσεων της αναγέννησης. Κατόπιν, με την χρήση ατμού θερμαίνεται το απορροφητικό υλικό σε θερμοκρασίες της τάξης των 80 – 120 °C ξεκινώντας το στάδιο συλλογής και αναγέννησης. Στο διάστημα αυτό, ο ατμός ενισχύει την συλλογή του CO₂ που δέσμευσαν τα απορροφητικά. Το CO₂ στην συνέχεια διαχωρίζεται από το νερό στο συμπυκνωτή και μέσω συμπίεσης οδηγείται προς μεταφορά και κατόπιν αποθήκευση ή αξιοποίηση (Beuttler et al., 2019; Fasihi et al., 2019; Gebald et al., 2013; McQueen et al., 2021).

2.3.2 Μονάδες DAC με υγρά απορροφητικά (L-DAC)

Ένα σύστημα DAC με υγρά απορροφητικά αποτελείται από δύο βασικούς βρόχους: τον βρόχο του επαφέα και τον βρόχο του καυστήρα. Αρχικά στο βρόχο του επαφέα, ο αέρας εισέρχεται οριζόντια μέσω μακροσκελών μονάδων επαφέα [περίπου $200\text{m} \times 20\text{m} \times (5-8)\text{m}$] (Holmes and Keith, 2012). Σημειώνεται ότι για την δέσμευση $1\text{Mt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$ απαιτούνται 10 τέτοιες μονάδες.

Η διαδικασία ξεκινάει όταν ο αέρας δεσμεύεται από έναν ανεμιστήρα σε μία οριζόντια ροή και εξέρχεται κατακόρυφα, παρόμοια με έναν πύργο ψύξης (Griffin, 2020). Στους επαφείς, το εισερχόμενο CO_2 που περιέχεται στον αέρα αντιδρά με ένα διάλυμα KOH που ρέει κατακόρυφα μέσω ενός του υλικού πλήρωσης με αποτέλεσμα να σχηματιστούν ανθρακικά άλατα καλίου σε διάλυμα (K_2CO_3). Στην έξοδο από τον επαφέα, το παραγόμενο διάλυμα εισέρχεται μέσω αντλίας στην κεντρική μονάδα αναγέννησης.

Στο σημείο αυτό, το K_2CO_3 μέσω ανιονικής ανταλλαγής με υδροξείδιο του ασβεστίου [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] που βρίσκεται στους αντιδραστήρες σφαιριδίων, σχηματίζει τελικά ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) ενώ το αρχικό διάλυμα KOH αναγεννάται και επιστρέφει στο στάδιο των επαφών. Το παραγόμενο CaCO_3 από τους αντιδραστήρες σφαιριδίων διοχετεύεται, στη συνέχεια, σε μια μονάδα ατμολέβητα. Στο στάδιο αυτό αξιοποιείται η θερμότητα του καυστήρα με σκοπό την ξήρανση του CaCO_3 . Κατόπιν, το CaCO_3 οδηγείται στον καυστήρα όπου και θερμαίνεται στους 900°C και υφίσταται αποσύνθεση προς σχηματισμό οξειδίου του ασβεστίου (CaO), H_2O και CO_2 . Σημειώνεται πως ο καυστήρας χρησιμοποιεί φυσικό αέριο και οξυγόνο για την λειτουργία του και την άνοδο της θερμοκρασίας στους 900°C η οποία είναι κατάλληλη για την δημιουργία ενός μίγματος CO_2 και νερού. Παράλληλα, το CaO οδηγείται πίσω στον ατμολέβητα όπου και ενυδατώνεται παράγοντας έτσι το απαραίτητο $\text{Ca}(\text{OH})_2$ το οποίο στέλνεται στους αντιδραστήρες σφαιριδίων προς ανιονική ανταλλαγή για τον επόμενο κύκλο. Τέλος, το αέριο που παράχθηκε στον καυστήρα από την αποσύνθεση του CaCO_3 , συμπυκνώνεται προς απομάκρυνση του νερού ενώ το τελικό CO_2 συμπιέζεται και συλλέγεται προς αποθήκευση ή αξιοποίηση (McQueen et al., 2021). Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 29) παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της παραπάνω διαδικασίας.



Σχήμα 29: Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα ροής διεργασίας για τη διεργασία με διαλύτη (McQueen et al., 2021).

2.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών S-DAC και L-DAC.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) συγκεντρώνονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο τεχνολογιών βάσει του Διεθνή Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency, 2022).

Πίνακας 2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τεχνολογιών DAC.

	S-DAC	L-DAC
Πλεονεκτήματα	Πιθανή παραγωγή νερού	Λιγότερο ενεργοβόρα
	Λιγότερη ένταση κεφαλαίου	Δέσμευση σε μεγάλη κλίμακα
	Αρθρωτή τεχνολογία	Βασίζεται σε εμπορικούς διαλύτες
	Βασίζεται σε ενέργεια χαμηλών εκπομπών	Τεχνολογία από προ-υπάρχουσες μονάδες
	Καινοτόμα με πιθανότητα μείωσης κόστους	
Μειονεκτήματα	Πιο ενεργοβόρα	Περισσότερη ένταση κεφαλαίου
	Χειροκίνητη συντήρηση για αντικατάσταση απορροφητικού	Βασίζεται στο φυσικό αέριο για αναγέννηση διαλύτη

Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί η αρθρωτότητα των δύο τεχνολογιών καθώς αποτελεί σημαντική διαφορά τους και μπορεί να επηρεάσει τα οικονομικά στοιχεία ανάλογα με την κλίμακα της κάθε μονάδας. Η αρθρωτότητα αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να χωρίζεται σε επιμέρους μικρότερες, αυτόνομες και λειτουργικές υπομονάδες. Η ικανότητα αυτή, δίνει την δυνατότητα μαζικής παραγωγής και γρήγορης βελτίωσης στον σχεδιασμό και την κατασκευή. Η τεχνολογία στερεών απορροφητικών, παρουσιάζει μεγάλη αρθρωτότητα σε σχέση με την τεχνολογία υγρών διαλυτών με μία μεμονωμένη μονάδα επαφής να μπορεί να δεσμεύσει περίπου 50 tCO₂/έτος. Οι υπομονάδα αυτή συνδέεται με ίδιες παρόμοιες ώστε να κλιμακωθεί η τεχνολογία. Αντίθετα, η τεχνολογία L-DAC παρουσιάζει πολύ μικρότερη αρθρωτότητα, λόγω της ολοκληρωμένης φύσης των συστημάτων τα οποία τροφοδοτούν διαλύματα από το ένα στο άλλο. Ο αντιδραστήρας σφαιριδίων και ο επαφείας αέρα που χρησιμοποιούνται, μπορούν να κλιμακωθούν ώστε να επιτύχουν ελάχιστες δυναμικότητες περίπου 10 ktCO₂/έτος, με κόστος κεφαλαίου περίπου σταθερό μέχρι και τους 100 ktCO₂. Έτσι, τα L-DAC εμφανίζουν σημαντικές οικονομίες κλίμακας πάνω από αυτό το σημείο λόγω του μεγαλύτερου εξοπλισμού διεργασίας, όπως ο καυστήρας και ο ατμοποιητής, φτάνοντας σε οικονομικό βέλτιστο επίπεδο σε περίπου 1 MtCO₂/έτος. Για τον λόγο αυτό, σε μεγάλης κλίμακας μονάδες, η τεχνολογία υγρών διαλυτών παρουσιάζει πλεονέκτημα.

Μία ακόμη διαφορά των δύο τεχνολογιών αποτελεί η θερμοκρασία που χρειάζονται για την αναγέννηση των απορροφητικών. Η τεχνολογία S-DAC απαιτεί περίπου 100°C σε αντίθεση με την τεχνολογία L-DAC που απαιτεί 900°C. Το γεγονός αυτό, δίνει ένα ενεργειακό προβάδισμα στην πρώτη, καθώς δίνεται η δυνατότητα χρήσης απορριπτόμενης ενέργειας από την βιομηχανία και τις ανανεώσιμες πηγές (Dustin Stolz, 2022).

Τέλος, οι δύο τεχνολογίες διαφέρουν στις απαιτήσεις νερού με την τεχνολογία S-DAC να απαιτεί -2 έως 0 tH₂O/tCO₂ (ουσιαστικά δεν απαιτεί νερό κατά την διαδικασία, ενώ παράλληλα παράγει νερό μετά την συμπύκνωση του CO₂), ενώ η τεχνολογία L-DAC απαιτεί 0-50 tH₂O/tCO₂ καθώς η διαδικασία της περιλαμβάνει την χρήση διαλυμάτων για την απόσπαση του CO₂ από τον αέρα.

Κεφάλαιο 3: Αποθήκευση και αξιοποίηση δεσμευμένου CO₂

3.1 Αποθήκευση δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα

Στο πέρας της διαδικασίας δέσμευσης του CO₂ με μία από τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, ακολουθεί η αποθήκευσή του. Η διαδικασία αυτή γίνεται συνήθως σε φυσικές δεξαμενές όπως ωκεάνια, εδαφολογικά και γεωλογικά στρώματα, ενώ ενδέχεται να υπάρχουν και τεχνητές δεξαμενές που προκύπτουν από ανθρωπογενείς διεργασίες (McLaughlin et al., 2023)

3.1.1 Αλατούχοι σχηματισμοί

Οι αλατούχοι σχηματισμοί είναι πορώδεις σχηματισμοί γεμάτοι με άλμη, ή αλμυρό νερό, και εκτείνονται σε μεγάλους όγκους βαθιά στο υπέδαφος. Οι αλατούχοι σχηματισμοί με επίπεδα δεσμευμένων στερεών μεγαλύτερα των 10.000 ppm αποτελούν την βασικότερη επιλογή των τεχνολογιών δέσμευσης CO₂. Αυτό, είναι αποτέλεσμα διάφορων ερευνών, οι οποίες έδειξαν ότι οι αλατούχοι σχηματισμοί έχουν τον μεγαλύτερο δυνητικό όγκο για αποθήκευση CO₂ σε σχέση με όλες τις άλλες επιλογές αποθήκευσης (NETL).

3.1.2 Ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου

Αρκετή προσοχή ως μέρος αποθήκευσης δεσμευμένου CO₂ έχει δοθεί και στα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου από τα οποία έχει ήδη εξαχθεί το ορυκτό καύσιμο. Οι σχηματισμοί αυτοί αποτελούν έναν κενό διαπερατό και πορώδη όγκο ο οποίος μπορεί να εκμεταλλευτεί για την απόρριψη του CO₂. Οι σχηματισμοί αυτοί αποδεικνύονται κατάλληλοι καθώς έχουν συγκρατήσει για εκατομμύρια χρόνια τους υδρογονάνθρακες που συλλέχθηκαν άρα κατά συνέπεια είναι κατάλληλοι και για την αποθήκευση του CO₂ (NETL).

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως κατά παρόμοιο τρόπο μπορεί να ενισχυθεί η παραγωγή πετρελαίου χρησιμοποιώντας την έγχυση CO₂. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ενισχυμένη ανάκτηση πετρελαίου (EOR) και πραγματοποιείται με την ώθηση ρευστού CO₂ σε πηγάδια παραγωγής μη εξορύξιμου πετρελαίου. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση κοιτασμάτων φυσικού αερίου με την ενισχυμένη ανάκτηση φυσικού αερίου (EGR) αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ενέχει περιβαλλοντικά ρίσκα καθώς μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω παραγωγή ορυκτών καυσίμων άρα και περισσότερων εκπομπών CO₂ (NETL).

3.1.3 Μη εξορύξιμες φλέβες άνθρακα

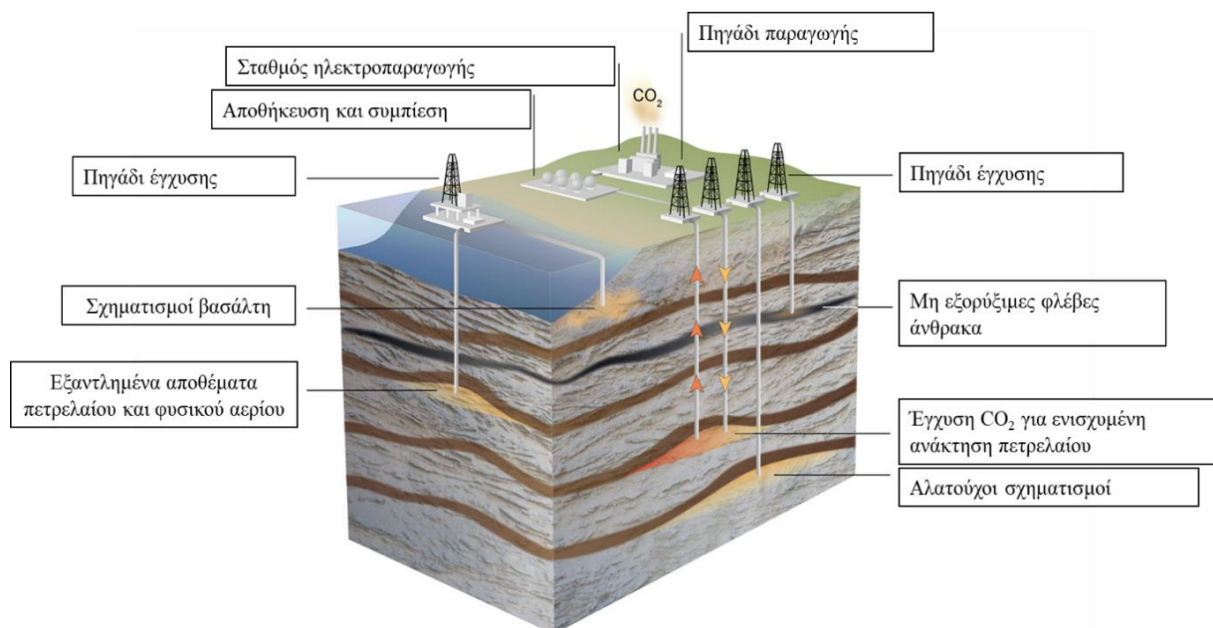
Ο άνθρακας που θεωρείται μη εκμεταλλεύσιμος λόγω γεωλογικών, τεχνολογικών και οικονομικών παραγόντων (συνήθως είναι πολύ βαθύς, πολύ λεπτός ή δεν έχει την εσωτερική συνέχεια για να εξορυχθεί οικονομικά) μπορεί ακόμη να χρησιμεύσει ως χώρος αποθήκευσης CO₂. Οι δύο παράγοντες που κρίνουν αν ένα κοιτάσμα άνθρακα είναι κατάλληλο για αποθήκευση CO₂ είναι η σωστή διαπερατότητα και να μην είναι εξορύξιμο το περιεχόμενο. Στις φλέβες άνθρακα ενδέχεται να υπάρχουν και κοιτάσματα μεθανίου (CH₄). Η εξόρυξη του μεθανίου αυτού αποτελεί μία διαδικασία που ονομάζεται ενισχυμένη ανάκτηση μεθανίου ανθρακικών κοιτασμάτων (ECBM). Ο τρόπος αποθήκευσης του διοξειδίου του άνθρακα στις ανθρακικές φλέβες γίνεται χημικά με διαδικασίες προσρόφησης ή προσκόλλησης στο επιφανειακό στρώμα του άνθρακα. Κατά αυτό τον τρόπο το CO₂ αποθηκεύεται μόνιμα (NETL).

3.1.4 Σχηματισμοί από βασάλτη

Ο βασάλτης είναι ένας σχηματισμός προερχόμενος από ποσά λάβας τα οποία ψύχθηκαν και απέκτησαν στερεά μορφή. Ο τρόπος εναπόθεσης του CO₂ σε τέτοιους σχηματισμούς γίνεται χημικά με την αντίδρασή του με το μαγνήσιο και το ασβέστιο που περιέχει ο βασάλτης. Κατά αυτόν τον τρόπο σχηματίζονται μορφές ανθρακικών ορυκτών ασβεστίτη και δολομίτη (NETL).

3.1.5 Οργανικοί σχιστολιθικοί σχηματισμοί

Οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί είναι συνήθως σχηματισμοί χαμηλού πορώδους και χαμηλής διαπερατότητας, οι οποίοι ενδείκνυνται καλύτερα ως ζώνες περιορισμού. Παρόλα αυτά, κάποιοι σχιστολιθικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτή του άνθρακα και μπορούν να αντιδράσουν χημικά με το CO₂ ενώ παράλληλα απελευθερώνουν μεθάνιο (NETL). Το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 30) συνοψίζει τους τρόπους αποθήκευσης του CO₂:



Σχήμα 30: Τρόποι αποθήκευσης διοξειδίου του άνθρακα σε μία μονάδα παραγωγής (Ali et al., 2022)

3.2 Αξιοποίηση δεσμευμένου διοξειδίου του άνθρακα

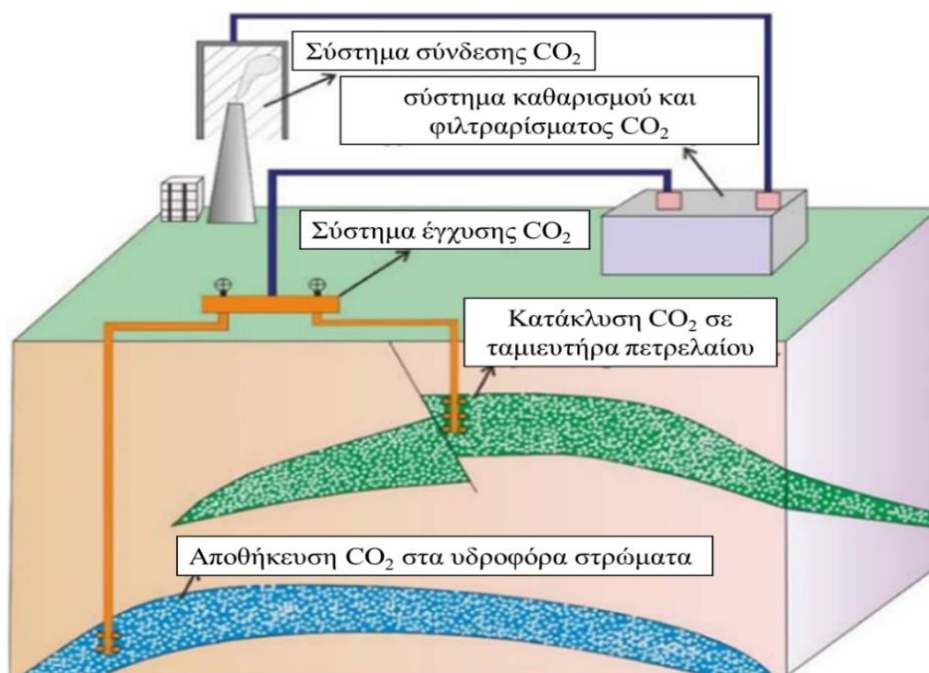
Είναι προφανές ότι η αποθήκευση του δεσμευμένου CO₂ αποτελεί μία λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος, καθώς όχι μόνο διαχειρίζεται το διοξείδιο του άνθρακα μετά την διαδικασία της δέσμευσης αλλά μπορεί να συμβάλλει και στην ανάκτηση ενέργειας, δηλαδή πετρελαίου και φυσικού αερίου που είναι παγιδευμένα σε γεωλογικούς σχηματισμούς και κρίνονται ως μη ανακτήσιμα με συμβατικούς τρόπους. Ωστόσο, η αποθήκευση του CO₂ (CCS) κρίνεται αρκετά κοστοβόρα λύση ενώ παράλληλα τις περισσότερες περιπτώσεις δεν επιφέρει κανένα κέρδος. Παράλληλα, η διάθεση του CO₂ στο υπέδαφος ενέχει κινδύνους και αβεβαιότητα καθώς υπάρχει συνεχώς μια πιθανότητα διαρροής εφόσον η μορφολογία του υπεδάφους δεν παραμένει στάσιμη.

Για τους παραπάνω λόγους, η έρευνα και η βιομηχανία στρέφονται κυρίως στην αξιοποίηση του CO₂ (CCUS). Με τον τρόπο αυτό όχι μόνο αντιμετωπίζεται το πρόβλημα διαχείρισης του δεσμευμένου CO₂ αλλά προκύπτουν και οικονομικά οφέλη (Fu et al., 2022). Αξίζει να σημειωθεί ότι το CCUS αδυνατεί να αντιμετωπίσει πλήρως τις εκπομπές του CO₂ από την ατμόσφαιρα ενώ παράλληλα ενδέχεται να απελευθερώσει εκ νέου CO₂ με την ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται κατά τις διαδικασίες (Gabrielli et al., 2020). Η αξιοποίηση του CO₂ μπορεί λοιπόν να διαχωριστεί σε τέσσερις κύριους τομείς: την φυσική

αξιοποίηση, την χημική αξιοποίηση, την βιολογική αξιοποίηση και την αξιοποίηση με μεταλλοποίηση (Fu et al., 2022 from Godin et al., 2021; Kamkeng et al., 2021).

3.2.1 Φυσική αξιοποίηση

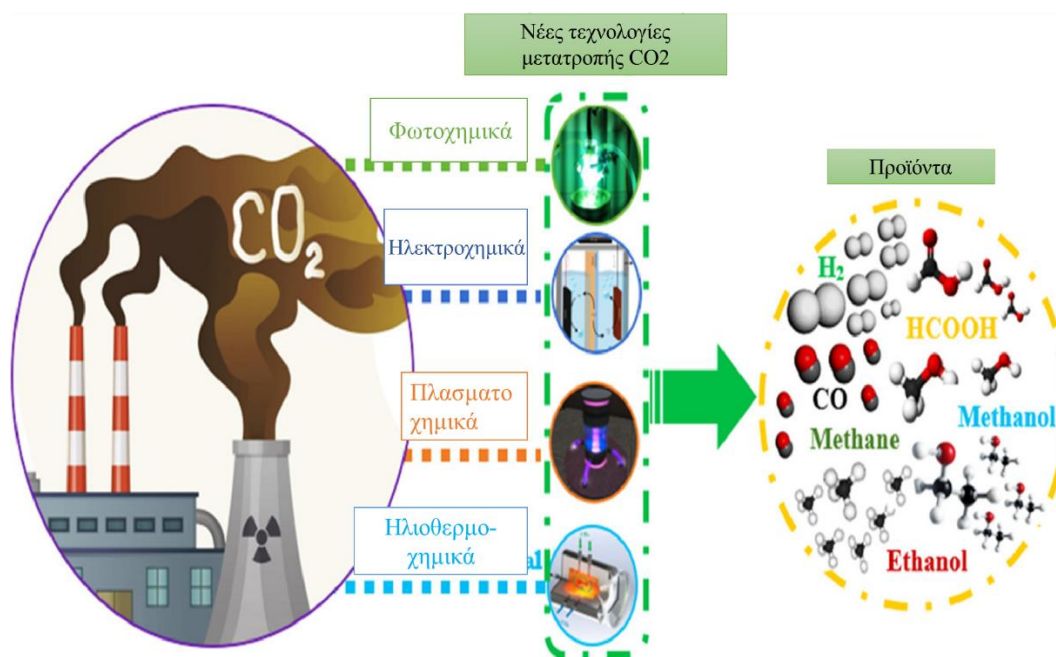
Η φυσική αξιοποίηση χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους τομείς από καθημερινά προϊόντα έως την εξόρυξη καυσίμων και τις συγκολλήσεις. Πιο συγκεκριμένα το CO₂ αξιοποιείται φυσικά σε βιομηχανίες μύρας και αναψυκτικών ενώ παράλληλα εντείνει τη φρεσκάδα των προϊόντων στη βιομηχανία των φρέσκων κατεψυγμένων τροφίμων μειώνοντας την αναπαραγωγή βακτηρίων που αλλοιώνουν την ποιότητα των λαχανικών και των φρούτων (Weng, 2005). Επιπροσθέτως, το CO₂ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αέριο στις συγκολλήσεις προσφέροντας αποτελεσματικότητα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Dai et al., 2017). Ακόμη, η κατάκλυση με CO₂ χρησιμοποιεί μια διαδικασία έγχυσης του σε έναν υπόγειο σχηματισμό στο οποίο υπάρχει πετρέλαιο ή φυσικό αέριο, αυξάνοντας την ρευστότητά τους και ενισχύοντας την ανάκτησή τους (Ort Jr. and Taber, 1984). Τέλος το CO₂ μπορεί να αξιοποιηθεί στην υπερκρίσιμη του κατάσταση ως καθαριστικό μέσο, ως εκχυλιστικό μέσο σε τεχνολογίες διαχωρισμού όπως η εκχύλιση με υπερκρίσιμα ρευστά και ως μέσο θραύσης για μη συμβατικούς ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου (Liao, 2021). Στο Σχήμα 31 απεικονίζονται τα είδη φυσικής αξιοποίησης:



Σχήμα 31: Κατάκλυση CO₂ με έγχυση σε υπόγειο ταμιευτήρα πετρελαίου (Wang et al., 2020).

3.2.2 Χημική αξιοποίηση

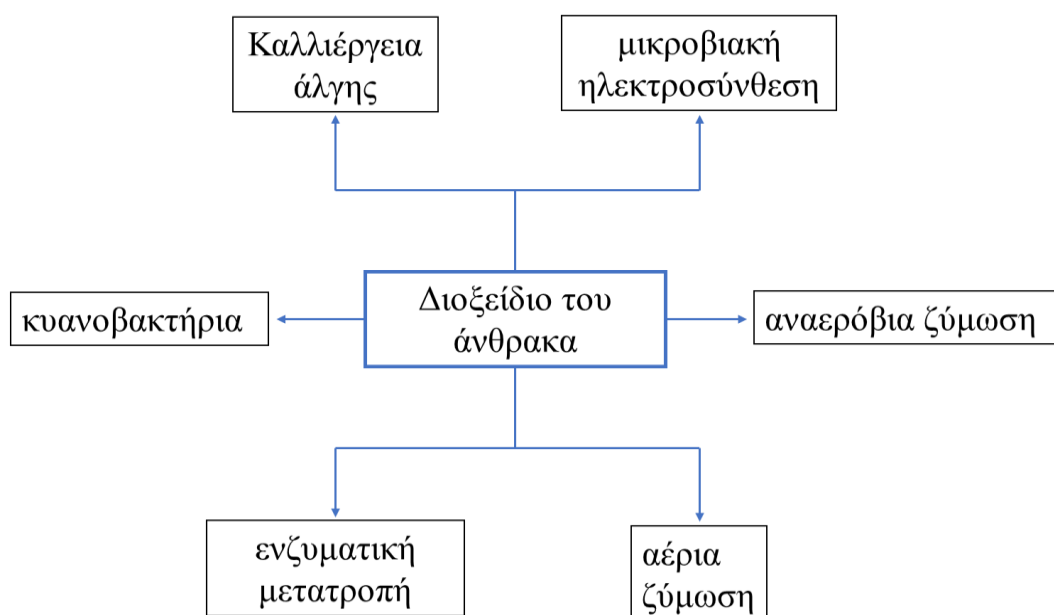
Το διοξείδιο του άνθρακα, πέρα από την φυσική του αξιοποίηση αποτελεί μία σημαντική πρώτη ύλη στη χημική βιομηχανία. Αρχικά, χρησιμοποιείται στα συνθετικά χημικά και κυρίως στη παραγωγή ουρίας μέσω της αντίδρασής του με την αμμωνία (Shi et al., 2019) και σαλικυλικού οξέος με τη σύνθεση CO₂ και φαινόλης σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση (Iijima and Yamaguchi, 2008). Στον κλάδο της χημικής αξιοποίησης εντάσσεται και η σύνθεση οργανικών καυσίμων με τη χρήση του δεσμευμένου CO₂. Τα οργανικά καύσιμα που μπορούν να παραχθούν είναι το μεθάνιο, η μεθανόλη, το μυρμηκικό οξύ και ο διμεθυλαιθέρας. Τα καύσιμα αυτά, σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα θεωρούνται «πράσινα» καθώς η υδρογόνωση με CO₂ δεν παράγει επιπρόσθετες εκπομπές CO₂ μετά τη χρήση τους. Τέλος, το διοξείδιο του άνθρακα μπορεί να συνθέσει διάφορα πολυμερή. Αξιοποιώντας λοιπόν το δεσμευμένο CO₂ μπορεί να παραχθεί πολυκαρβονικό το οποίο είναι ένα δυνητικά βιώσιμο πλαστικό (Zhao et al., 2020) και πολουρεθάνη που χρησιμοποιείται για την κατασκευή αφρών, πλαστικών σφουγγαριών κ.α. όπως φαίνεται και στο Σχήμα 32:



Σχήμα 32: Μέθοδοι και προϊόντα χημικής αξιοποίησης CO₂ (Mustafa et al., 2020).

3.2.3 Βιολογική αξιοποίηση

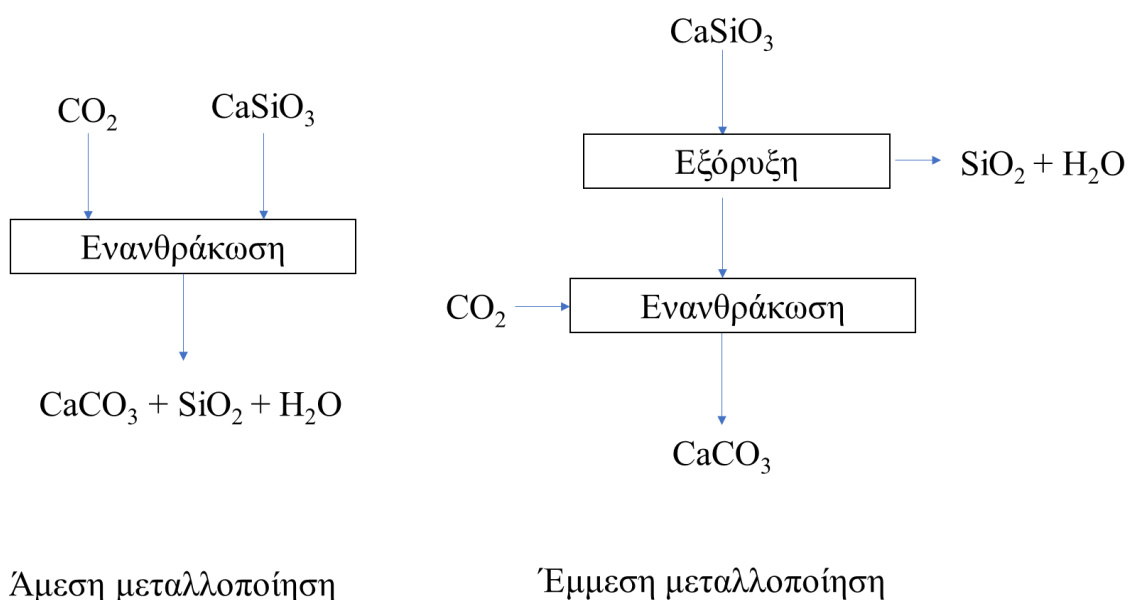
Με την βιολογική αξιοποίηση του CO₂ σχεδιάζονται τεχνητά φωτοσυνθετικά συστήματα. Η χρήση του CO₂ ως φυτικό αέριο λίπασμα αυξάνει την απόδοση των φυτών, ενώ είναι απλή στη λειτουργία και έχει χαμηλό κόστος, (Yuan, 2010). Επιπλέον, αρκετά ελκυστική επιλογή για την αξιοποίηση του CO₂ αποτελεί η καλλιέργεια μικροάλγης για την μετατροπή της σε βιοκαύσιμο, (Razzak et al., 2013). Οι βιολογικές διεργασίες παρουσιάζονται στο Σχήμα 33:



Σχήμα 33: Διάφορες βιολογικές διεργασίες που έχουν δυνατότητες για τη δέσμευση CO₂ μαζί με τη βιώσιμη παραγωγή βιοενέργειας/χημικών προϊόντων (Kondaveeti et al., 2020).

3.2.4 Αξιοποίηση με μεταλλοποίηση

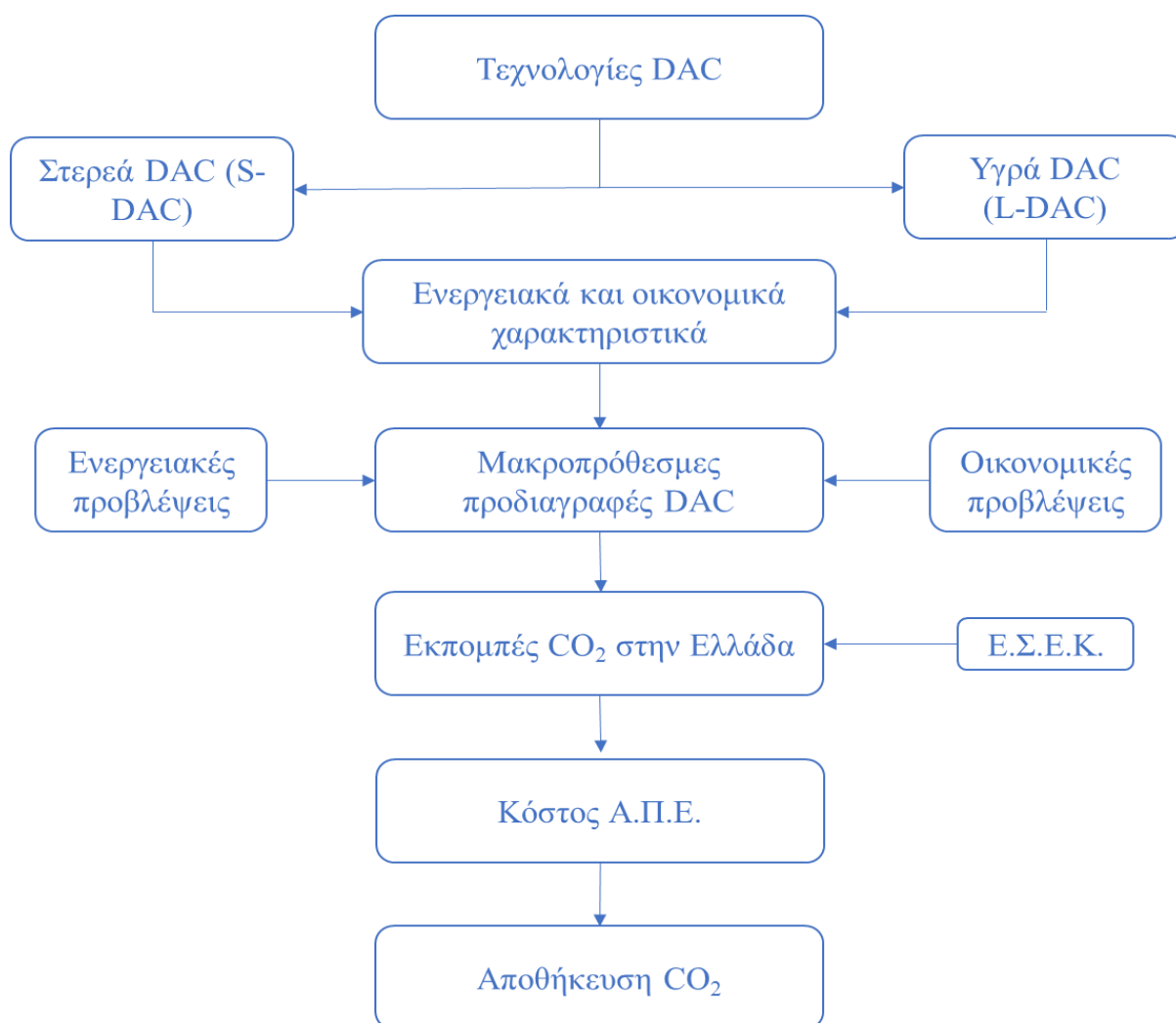
Η αξιοποίηση με μεταλλοποίηση μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες, την άμεση και έμμεση μεταλλοποίηση. Η πρώτη μιμείται την διαδικασία διάβρωσης των ορυκτών στη φύση, ώστε οι ανόργανες πρώτες ύλες να αντιδρούν απευθείας με το CO_2 (Liu et al., 2021). Η δεύτερη αποτελεί μία διαδικασία μετατροπής των ανόργανων πρώτων υλών σε προϊόντα. Η μετατροπή αυτή γίνεται με την χρήση χημικών και έπειτα με την αντίδραση με το CO_2 (Ren et al., 2020). Στην παραπάνω διαδικασία μπορούν να αξιοποιηθούν φυσικά πυριτικά μεταλλεύματα και αλκαλικά οξείδια σε ουσίες όπως το CaO και το MgO , τα οποία αντιδρώντας με το CO_2 σχηματίζουν σταθερά ανόργανα ανθρακικά άλατα όπως φαίνεται στο Σχήμα 34 (Zhang et al., 2020).



Σχήμα 34: Βασικές αρχές των μεθόδων άμεσης και έμμεσης ενανθράκωσης (Bodor et al., 2011).

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και με σκοπό την εγκατάσταση μίας ή περισσότερων μονάδων άμεσης δέσμευσης CO₂ στην Ελλάδα, το κεφάλαιο της μεθοδολογίας θα αποτελέσει έναν χάρτη των οικονομικών και ενεργειακών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών DAC (S-DAC, L-DAC). Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά στις εκπομπές CO₂ στην Ελλάδα ανά τομέα καθώς και στις μελλοντικές δεσμεύσεις της χώρας, στο πλαίσιο περιορισμού των εκπομπών CO₂. Επιπλέον, θα αναλυθούν τα κόστη των μονάδων Α.Π.Ε. που θα τροφοδοτούν τις εγκαταστάσεις DAC, η αποθήκευση του CO₂ καθώς και το κόστος της και τέλος θα αξιολογηθεί η απόσβεση της επένδυσης με ανάλυση νεκρού σημείου (break-even point). Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 35) φαίνεται η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί στο παρόν κεφάλαιο.



Σχήμα 35: Διάγραμμα βημάτων μεθοδολογίας

4.1 Ενεργειακά χαρακτηριστικά μονάδων DAC

Τόσο η προσέγγιση DAC με στερεό απορροφητικό όσο και η προσέγγιση DAC με υγρό διαλύτη απαιτούν περίπου 80% θερμική ενέργεια και 20% ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία, (McQueen et al., 2020). Και οι δύο τεχνολογίες απαιτούν ποσό θερμικής ενέργειας με σκοπό την αναγέννηση του εκάστοτε απορροφητικού που χρησιμοποιούν και την επανέναρξη της διαδικασίας δέσμευσης. Στη περίπτωση των στερεών απορροφητικών, οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτουν σε μεγάλο βαθμό από τη τροφοδοσία των ανεμιστήρων. Επιπλέον, ηλεκτρική ενέργεια απαιτείται για τη λειτουργία των αντλιών κενού, οι οποίες όπως προαναφέρθηκε, απομακρύνουν τον αέρα κατά τη διαδικασία αναγέννησης. Στην περίπτωση των υγρών διαλυτών, οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτουν για την κάλυψη της λειτουργίας των ανεμιστήρων του επαφέα καθώς και για τους αντιδραστήρες σφαιριδίων, την θέρμανση του ατμολέβητα, και τις μονάδες φίλτρων (Keith et al., 2018). Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των ενεργειακών χαρακτηριστικών των υπό εξέταση τεχνολογιών άμεσης δέσμευσης CO₂.

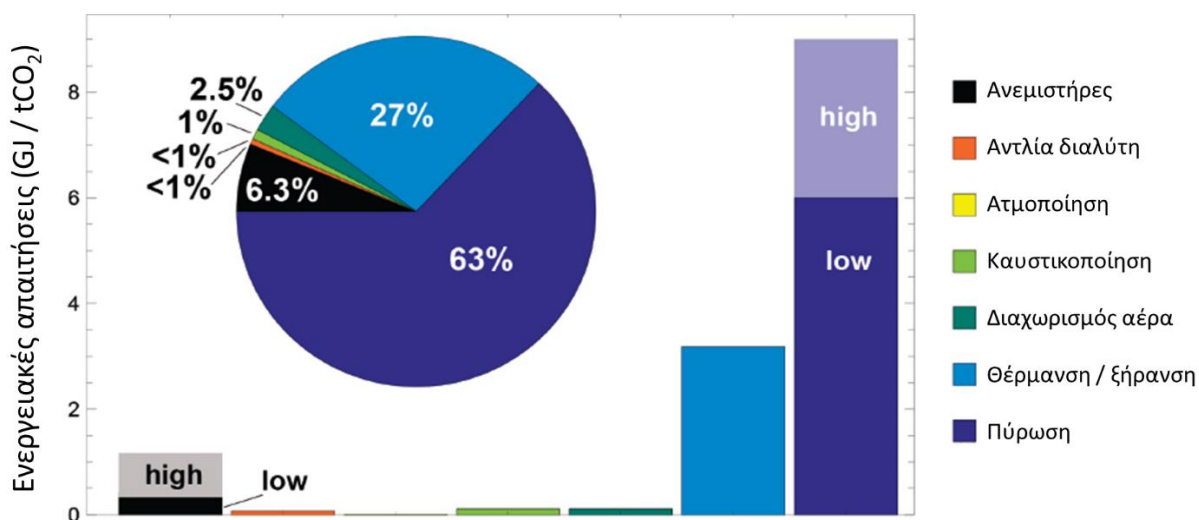
4.1.1 Ενεργειακή αξιολόγηση μονάδας S-DAC

Πιο συγκεκριμένα, οι προβλέψεις με βάση τις τρέχουσες τεχνολογικές παραδοχές δείχνουν πώς η τεχνολογία S-DAC απαιτεί περίπου 2000 kWh (7,2 GJ) ανά τόνο CO₂. Η τιμή αυτή χωρίζεται σε 400 kWh (1,44 GJ) ηλεκτρική και 1600 kWh/t CO₂ (5,76 GJ) θερμική ενέργεια (Beuttler et al., 2019). Παράλληλα, σύμφωνα με μελέτες, χρησιμοποιώντας απορροφητικά που απαιτούν χαμηλότερη ενέργεια αναγέννησης έχουν εκτιμηθεί ότι μειώνουν τις απαιτήσεις θερμικής ενέργειας στις 830 kWh/tCO₂ (3 GJ/tCO₂) (Sadiq et al., 2020), ενώ ορισμένα απορροφητικά υποστηρίζουν χαμηλή ενέργεια αναγέννησης της τάξης των 280 kWh/tCO₂ (1 GJ/tCO₂), (Sinha and Realf, 2019). Μία ακόμη έρευνα (*Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration*, 2019) υπολογίζει αναλυτικά τις ενεργειακές ανάγκες των μονάδων S-DAC καταλήγοντας σε ένα εύρος τιμών 3,4-4,8 GJ/tCO₂ θερμική και 0,55-1.12GJ/tCO₂ ηλεκτρική ενέργεια. Μία πιο πρόσφατη έρευνα (McQueen et al., 2021) μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης υπολογίζει 6 GJ/tCO₂ και 1,5 GJ/tCO₂ θερμικές και ηλεκτρικές απαιτήσεις αντίστοιχα. Τέλος, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency, 2022) εκτιμά τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες της μονάδας S-DAC μεταξύ 7,2 και 9,5 GJ/tCO₂.

4.1.2 Ενεργειακή αξιολόγηση μονάδας L-DAC

Στην περίπτωση των μονάδων με υγρούς διαλύτες οι απαιτήσεις σε θερμική ενέργεια κυμαίνονται από 1460-2250 kWh / tCO₂ (5,25-8,1 GJ / tCO₂), ανάλογα με την έκταση θερμότητας από τη διαδικασία πύρωσης. Παράλληλα, οι ηλεκτρικές ανάγκες είναι 361-500 kWh / tCO₂ (αντίστοιχα 1,3-1,8 GJ / tCO₂). Αυτό το εύρος τιμών προκύπτει βάσει των αλλαγών στον τρόπο λειτουργίας του επαφέα καθώς και στις διακυμάνσεις κατά την πλήρωση υλικού (Keith et al., 2018; Socolow et al., 2011).

Μια ακόμη έρευνα (*Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration*, 2019), εκτιμά αναλυτικότερα τις ενεργειακές απαιτήσεις των L-DAC, σύμφωνα με την οποία, οι ανάγκες ανέρχονται σε 0,74-1,66 GJ / tCO₂ και 9,18-12,18 GJ/t CO₂, για τις απαιτήσεις ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, αντίστοιχα. Από την μία μεριά, οι ανεμιστήρες, οι αντλίες, ο ατμολέβητας, ο καυστικοποιητής και οι μονάδες διαχωρισμού του αέρα λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια, ενώ από την άλλη ο θερμαντήρας/στεγνωτήρας και ο καυστήρας αξιοποιούν θερμική ενέργεια για την λειτουργία τους. Ειδικότερα, η πιο ενεργοβόρα διεργασία είναι αυτή της θερμικής αναγέννησης του CaO και η παραγωγή CO₂ υψηλής καθαρότητας ακολουθούμενη από το στάδιο της θέρμανσης και ξήρανσης του CaCO₃. Στον παρακάτω σχήμα (Σχήμα 36) διακρίνονται τα ποσοστά και τα ποσά ενέργειας που απαιτούν οι επιμέρους διαδικασίες.



Σχήμα 36: Ενεργειακές απαιτήσεις για L-DAC με κύκλο ανθρακικού ασβεστίου (900°C).

Επιπλέον, σημαντική πληροφορία αποτελεί το γεγονός, ότι τα στάδια αυτά μειώνουν συλλογικά το καθαρό CO₂ που δεσμεύεται σε 0,11-0,42 εκατ. tCO₂ ετησίως, εάν

χρησιμοποιείται φυσικό αέριο ως πηγή θερμικής ενέργειας, και 0-0,11 εκατ. tCO₂ ετησίως για τον άνθρακα. Με άλλα λόγια, η χρήση άνθρακα ως θερμικής πηγής ενέργειας οδηγεί σε σχεδόν ισοδύναμες εκπομπές CO₂ με αυτές που δεσμεύονται.

Στην ίδια έρευνα που αναφέρθηκε για την τεχνολογία S-DAC οι (McQueen et al., 2021) εκτιμούν τις ενεργειακές απαιτήσεις των μονάδων L-DAC στα 5,25-8,1 GJ/tCO₂ (θερμική ενέργεια) και 1,3-1,8 GJ/tCO₂ (ηλεκτρική ενέργεια). Τέλος, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency, 2022) εκτιμά τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες της μονάδας L-DAC μεταξύ 5,5 και 8,8 GJ/tCO₂. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3) παρουσιάζονται αναλυτικά τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των μονάδων S-DAC και L-DAC με τις πηγές από τις οποίες αντλήθηκαν τα δεδομένα.

Πίνακας 3: Ενεργειακά χαρακτηριστικά μονάδων S-DAC, L-DAC

Τεχνολογία	Θερμική Ενέργεια	Ηλεκτρική Ενέργεια	Πηγή
S-DAC	1600 kWh/tCO ₂ (5,76 GJ)	400 kWh/tCO ₂ (1.44 GJ)	(Beuttler et al., 2019)
	830 kWh/tCO ₂ (3 GJ)	-	(Sadiq et al., 2020)
	230 kWh/tCO ₂ (1 GJ)	-	(Sinha and Realf, 2019)
	3,4-4,8 GJ/tCO ₂	0,55-1.12GJ/tCO ₂	(<i>Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration</i> , 2019)
	6 GJ/tCO ₂	1.5 GJ/tCO ₂	(McQueen et al., 2021)
	7.2-9,5 GJ/tCO₂		(International Energy Agency, 2022)
L-DAC	1460-2250 kWh/tCO ₂ (5,25-8,1 GJ)	361-500 kWh/tCO ₂ (1,3-1,8 GJ)	(Keith et al., 2018; Socolow et al., 2011)
	9,18-12,18 GJ/tCO ₂	0,74-1,66 GJ/tCO ₂	(<i>Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration</i> , 2019)
	5,25-8,1 GJ/tCO ₂	1,3-1,8 GJ/tCO ₂	(McQueen et al., 2021)
	5,5-8,8 GJ/tCO₂		(International Energy Agency, 2022)

Όπως παρατηρείται στον παραπάνω πίνακα, τα ποσά των ενεργειακών απαιτήσεων των δύο τεχνολογιών ποικίλουν ανάλογα με την εκάστοτε έρευνα. Στις παλαιότερες έρευνες, το 2019 και 2020, φαίνεται ότι η τεχνολογία S-DAC είναι λιγότερο ενεργοβόρα από την τεχνολογία L-DAC. Ωστόσο, στις πιο πρόσφατες μελέτες, το 2021 και 2022, φαίνεται ότι συμβαίνει το αντίθετο. Ακολουθώντας την πιο πρόσφατη έρευνα (International Energy Agency, 2022), προκύπτει ότι η τεχνολογία S-DAC απαιτεί κατά μέσο όρο 8,35 GJ/tCO₂, ενώ η τεχνολογία L-DAC απαιτεί 7,15 GJ/tCO₂.

4.2 Οικονομικά χαρακτηριστικά μονάδων DAC

Το κόστος μίας μονάδας DAC εξαρτάται από την τεχνολογία δέσμευσης, το ενεργειακό κόστος, τη διαμόρφωση της μονάδας και της οικονομικές παραδοχές. Η εγκατάσταση της μονάδας σε περιοχή με υψηλό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και με την χρήση των βέλτιστων διαθέσιμων τεχνολογιών για την παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, αποτελούν μεταβλητές που ενδέχεται να ρίξουν το κόστος στα 100\$ / tCO₂ μέχρι το 2030. Ωστόσο, η δυνατότητα μείωσης του κόστους σε αυτά τα επίπεδα θα εξαρτηθεί σε μεγάλο βαθμό από την αυξημένη δημόσια και ιδιωτική υποστήριξη της καινοτομίας και της ανάπτυξης, (Executive summary – Direct Air Capture, 2022). Παρακάτω θα πραγματοποιηθεί μία βιβλιογραφική ανασκόπηση των οικονομικών χαρακτηριστικών των υπό εξέταση τεχνολογιών άμεσης δέσμευσης CO₂.

4.2.1 Οικονομική αξιολόγηση μονάδας S-DAC

Αναφορικά με τα οικονομικά χαρακτηριστικά μίας μονάδας S-DAC, μία ομάδα ερευνητών από το Πανεπιστήμιο LUT της Φιλανδίας, συνοψίζουν τα δεδομένα εταιρειών και προηγούμενων ερευνητών στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4) (Fasihi et al., 2019):

Πίνακας 4: Οικονομικά στοιχεία μίας μονάδας S-DAC όπως αναφέρθηκαν και υπολογίστηκαν εκ νέου

Δυναμικότητα	CAPEX	OPEX	Ηλεκτρικές ανάγκες	Αναφερόμενος χρόνος του κόστους	Δηλωθέν κόστος	Επανυπολογισμός του κόστους	Αναφορές
tCO ₂ /a	€/tCO ₂ ·a	%	kWhel/t	Έτος	€/tCO ₂	€/tCO ₂	(T. Roestenberg, 2015)
3600	1220	-	694	2015	-	244, 203 ¹	(Antecy)
360000	730	-	694	2015	-	177, 135 ¹	(Eli Kintisch, 2014), (Ping E. et. al, 2018a), (Ping E. et. al, 2018b)
-	-	-	150-260	πρώτη εγκατάσταση	<113	-	
-	-	-	150-260	n/a	11-38	-	(Global Thermostat)
300	-	-	200-300	2014	-	-	(Global Thermostat)
-	-	-	-	μεγάλης κλίμακας εγκατάσταση	75	-	
360000	730	4	250	2020	-	155, 120 ¹	(Fasihi et al., 2019)

¹ Με την χρήση απορριπτόμενης θερμότητας.

Μία ακόμη έρευνα, (Erans et al., 2022), εξέτασε τον σχεδιασμό της διαδικασίας που αναπτύχθηκε από την Climeworks και την Global Thermostat. Η οικονομική αξιολόγηση της S-DAC έδειξε ότι μια πρώτη στο είδος της μονάδα θα οδηγήσει σε κόστος απομάκρυνσης CO₂ 730€/tCO₂, με επιτόκιο προεξόφλησης 7% (κεφαλαιακή επιβάρυνση 9,4% σε 20 χρόνια ζωής). Καθώς η τεχνολογία ωριμάζει, το κόστος προβλέπεται να μειωθεί σε 189-338€/tCO₂ το 2030, 110-237€/tCO₂ το 2040 και 84-199€/tCO₂ το 2050, υποθέτοντας ένα συντηρητικό ποσοστό μάθησης 10-15%. Είναι σημαντικό ότι, εάν η S-DAC ενσωματωθεί θερμικά στην παραγωγή καυσίμων και χημικών προϊόντων, το κόστος απομάκρυνσης του CO₂ προβλέπεται να μειωθεί σημαντικά σε 133€/tCO₂ το 2020, 60€/tCO₂ το 2030, 40€/tCO₂ το 2040 και 32€/tCO₂ το 2050. Τα στοιχεία αυτά υποδηλώνουν ότι το S-DAC θα πρέπει να προσφέρει καλύτερες οικονομικές επιδόσεις σε σύγκριση με το L-DAC και, ως εκ τούτου, μπορεί να καταστεί προτιμώμενη επιλογή μακροπρόθεσμα.

Τέλος, μία ακόμη ομάδα ερευνητών (McQueen et al., 2020) εξέτασαν μία μονάδα S-DAC που χρησιμοποιεί έναν μονολιθικό επαφά με λειτουργικό στερεό απορροφητικό. Η μελέτη τους έδειξε ότι το κόστος δέσμευσης του CO₂ κυμαινόταν μεταξύ 205 /tCO₂, 223 /tCO₂ και 233 \$/tCO₂ για το σύστημα που κινείται από γεωθερμία, φυσικό αέριο και πυρηνική μονάδα, αντίστοιχα. Παρά το παρόμοιο κόστος, οι περιπτώσεις της γεωθερμίας και της πυρηνικής ενέργειας οδήγησαν σε σημαντικά χαμηλότερο αποτύπωμα άνθρακα της διαδικασίας, μειώνοντας την ένταση του άνθρακα από 0,65 τόνους εκπεμπόμενου CO₂ ανά tCO₂ που δεσμεύεται σε 0,29 τόνους εκπεμπόμενου CO₂ ανά tCO₂, που δεσμεύεται. Αυτό σημαίνει ότι για να εκπληρώσουν τα συστήματα DAC πραγματικά τον σχεδιαστικό τους σκοπό, θα πρέπει να κινούνται μέσω πηγών ενέργειας χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

4.2.2 Οικονομική αξιολόγηση μονάδας L-DAC

Σύμφωνα με τον Thorin Daniel κ.α., (Daniel et al., 2022) η οικονομική αξιολόγηση μίας μονάδας L-DAC χωρίζεται αρχικά σε δύο μέρη: το κόστος κεφαλαίου και το λειτουργικό κόστος. Αρχικά στο κόστος κεφαλαίου, χρησιμοποιείται μία σειρά εξισώσεων για τον υπολογισμό του κόστους αγορασθέντος εξοπλισμού (PEC), του κόστους προμήθειας και εγκατάστασης του εξοπλισμού (ISBL) και του κόστους ανάπτυξης και σχεδιασμού εκτός εγκατάστασης και απρόβλεπτων δαπανών (OSBL). Βάσει αυτών και εξαιρουμένου του ηλεκτρολύτη της εγκατάστασης, το συνολικό PEC εκτιμάται σε περίπου 220 εκατ. δολάρια, το οποίο δίνει ένα ISBL άνω των 700 εκατ. δολαρίων. Το OSBL είναι συνεπώς περίπου \$1,3 δισ, πριν από την τελική προσθήκη του κεφαλαίου κίνησης 10% για ένα συνολικό κόστος \$1,46 δισ. Με την προσθήκη του κόστους του ηλεκτρολύτη σε \$ 1,9 δισ. οι συνολικές κεφαλαιουχικές δαπάνες της μονάδας (CAPEX) ανέρχονται σε περίπου \$3,4 δισ. Κατόπιν, γίνεται ο υπολογισμός του λειτουργικού κόστους. Το κόστος για τις πρώτες ύλες και τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας της μονάδας αποτελεί τη μεταβλητή λειτουργική δαπάνη (OPEX_{var}), ενώ η λειτουργία, η συντήρηση και άλλες χρεώσεις ανεξάρτητες από τον ρυθμό λειτουργίας αποτελούν τη σταθερή λειτουργική δαπάνη (OPEX_{fix}). Το κόστος OPEX_{var} περιλαμβάνει τις πρώτες ύλες (π.χ. σπόρους KOH και CaCO₃) και τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας (π.χ. καύσιμα, νερό τροφοδοσίας διεργασίας, ψύξης και λέβητα, ατμό, ηλεκτρική ενέργεια και αέρα οργάνων) και υπολογίζεται συνολικά στα \$669 εκατ. ετησίως. Το OPEX_{fix} περιλαμβάνει την εργασία, τη συντήρηση, τους φόρους και τα ενοίκια, λαμβάνεται ως 4% του συνολικού CAPEX, δηλαδή \$135 εκατ. ετησίως.

Μία ακόμη έρευνα, (*Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration*, 2019), αξιοποιώντας τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν στον Πίνακα 3, παραθέτει συγκεντρωτικά τα παρακάτω οικονομικά δεδομένα (Πίνακες 5 και 6) για μία μονάδα L-DAC με δυναμικότητα απομάκρυνσης 1 Mt CO₂ ετησίως

Πίνακας 5: Εκτιμώμενο κόστος κεφαλαίου (CAPEX) για ένα γενικό σύστημα L-DAC με δυναμικότητα 1 Mt/y απομάκρυνσης CO₂

Κεφαλαιακές δαπάνες (CAPEX)		
	Κόστος (\$M)	Σχόλια
Σειρά ανεμιστήρων	210-420	Πηγή: (Holmes and Keith, 2012)
Ατμοποιητής, καυστικοποιητής	130-195	Πηγή: (Socolow et al., 2011)
Μονάδα διαχωρισμού αέρα και συμπυκνωτής	65-100	Πηγή: (Rubin et al., 2007)
Καυστήρας με καύση οξυγόνου	270-540	Πηγή: (Socolow et al., 2011)
Υποσύνολο CAPEX (\$M)	675-1255	
CAPEX Ετησίως (\$M/y)	81-151	Υποτιθέμενη διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων 30 έτη και συντελεστή σταθερής επιβάρυνσης 12%.

Πίνακας 6: Εκτιμώμενο λειτουργικό κόστος (OPEX) για ένα γενικό σύστημα L-DAC με δυναμικότητα 1 Mt/y απομάκρυνσης CO₂

Λειτουργικές δαπάνες (OPEX)		
	Κόστος (\$M/έτος)	Σχόλια
Συντήρηση	18-33	Το εύρος υπολογίζεται ως 0,03 της συνολικής κεφαλαιακής απαίτησης.
Εργατικό δυναμικό	6-10	Το εύρος υπολογίζεται ως 0,30 του κόστους συντήρησης.
Απομάκρυνση αποβλήτων	5-7	Πηγή: (Rubin et al., 2007)
Φυσικό αέριο	25-35	Υποθέτοντας κόστος φυσικού αερίου 3,25 \$/GJ.
Άνθρακας	18-15	Υποθέτοντας ότι το 2016 ο μέσος όρος του ασφαλούχου άνθρακα στις ΗΠΑ ήταν 2,33 δολάρια/GJ.
Ηλεκτρισμός	12-28	Υποτιθέμενη διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων 30 έτη και συντελεστή σταθερής επιβάρυνσης 12%.
Υποσύνολο OPEX (Φ.Α.)	66-113	
Υποσύνολο OPEX (άνθρακας)	59-103	

4.3 Μακροπρόθεσμες προδιαγραφές μονάδων DAC

Οι προβλέψεις που έχουν πραγματοποιηθεί αναφορικά με τα κόστη (\$/tCO₂ ή €/tCO₂) και την αναβάθμιση της τεχνολογίας των DAC σε μεγάλης κλίμακας μονάδες MtCO₂/έτος) είναι αρκετά ικανοποιητικές και αισιόδοξες. Οι ερευνητές του Πανεπιστημίου LUT, (Fasihi et al., 2019), που αναφέρθηκαν προηγουμένως, παρουσιάζουν αναλυτικά μία σειρά προβλέψεων για την περίοδο 2020-2050. Αρχικά, αξιοποιούν την τυπική προσέγγιση της καμπύλης μάθησης και τις εξισώσεις της, σύμφωνα με τους (Caldera and Breyer, 2017), εφαρμόζοντας την για την ανάπτυξη του κόστους κεφαλαίου των μονάδων DAC. Κατόπιν υποθέτουν δύο σενάρια, το συντηρητικό και το βασικό:

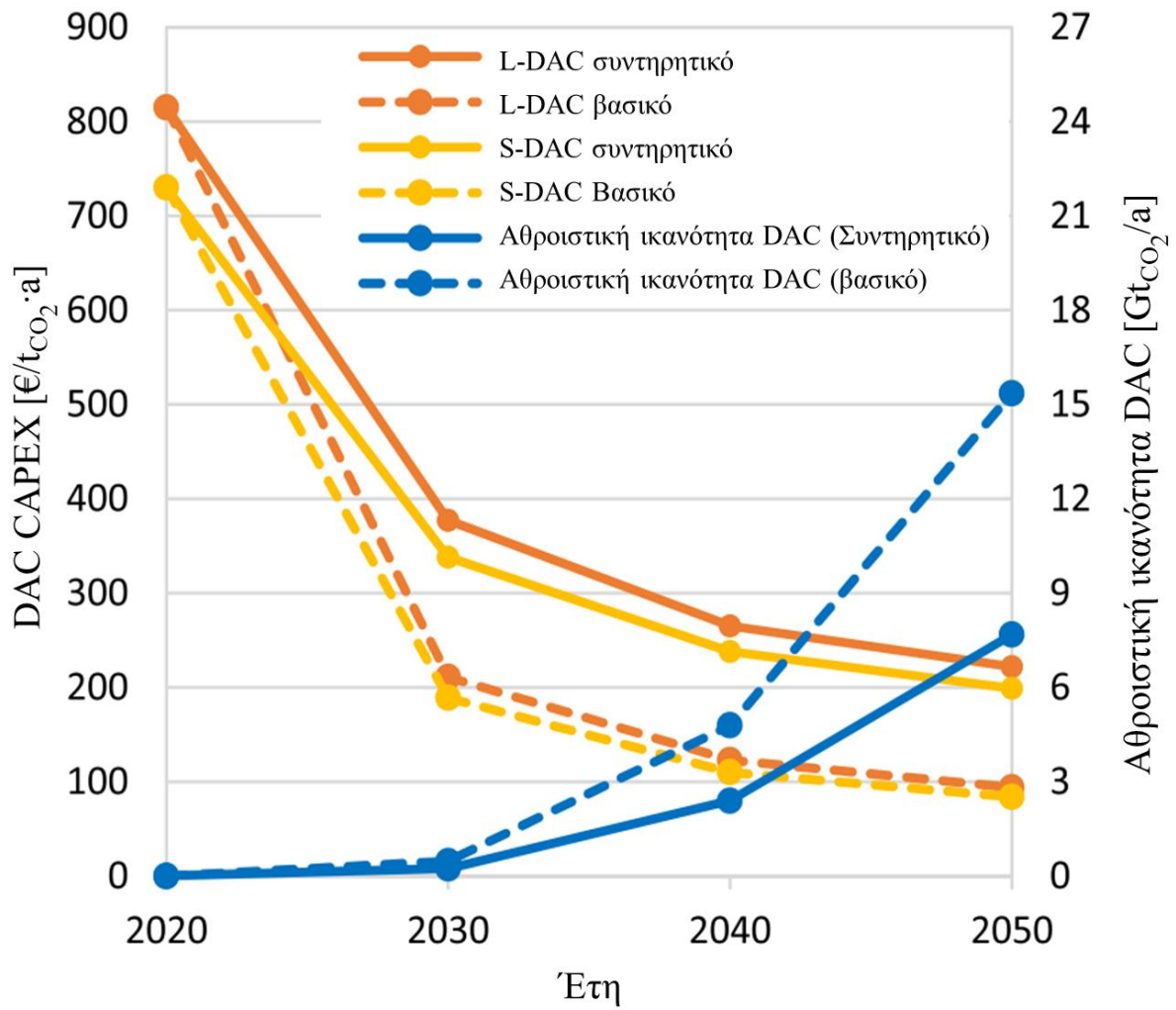
1. Το **συντηρητικό σενάριο** υποθέτει ότι η αθροιστική ζήτηση δυναμικότητας των DAC υλοποιείται μόνο κατά 50% λόγω της καθυστερημένης εκτέλεσης της Συμφωνίας του Παρισιού και ότι ο ρυθμός μάθησης των DAC, δηλαδή η μείωση

του κόστους τους με την αύξηση των εγκατεστημένων μονάδων, είναι 10%, σύμφωνα με τους (Nemet and Brandt, 2012; Rubin et al., 2007).

2. Το .προϋποθέτει την αποτελεσματική εκτέλεση των Συμφωνία του Παρισιού χωρίς καθυστέρηση, που οδηγεί σε καθαρές μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από το ενεργειακό σύστημα και σε ήδη δρομολογημένη απομάκρυνση του CO₂. Το ποσοστό μάθησης της DAC θεωρείται ότι είναι 15%, το οποίο αντιστοιχεί καλύτερα με τα ειδικά τεχνολογικά χαρακτηριστικά των συστημάτων DAC από μεγάλης κλίμακας κεντρικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα που αποτελούν τη βάση για τον υποτιθέμενο ρυθμό εκμάθησης 10%, (Nemet and Brandt, 2012). Με τις παραπάνω παραδοχές, λοιπόν, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 7, Σχήμα 37):

Πίνακας 7: Συντηρητικό και βασικό σενάριο για τη μείωση του CAPEX των S-DAC και L-DAC

Παράμετρος	Μονάδα μέτρησης	2020	2030	2040	2050
CO₂, DAC, Σύνολο	MtCO ₂ /έτος	3	473	4791	15356
Συντηρητικό σενάριο	MtCO ₂ /έτος	1,5	237	2396	7678
Βασικό σενάριο	MtCO ₂ /έτος	1,5	473	4791	15356
Αθροιστική δυναμικότητα (συντηρητική/βασική περίπτωση)	MtCO ₂ /έτος	1,5/1,5	237/473	2397/4793	7679/15357
CAPEX S-DAC (συντηρητικό/βασικό σενάριο)	€/tCO ₂	730	338/189	237/110	199/84
CAPEX L-DAC (συντηρητικό/βασικό σενάριο)	€/tCO ₂	815	378/211	265/122	222/93

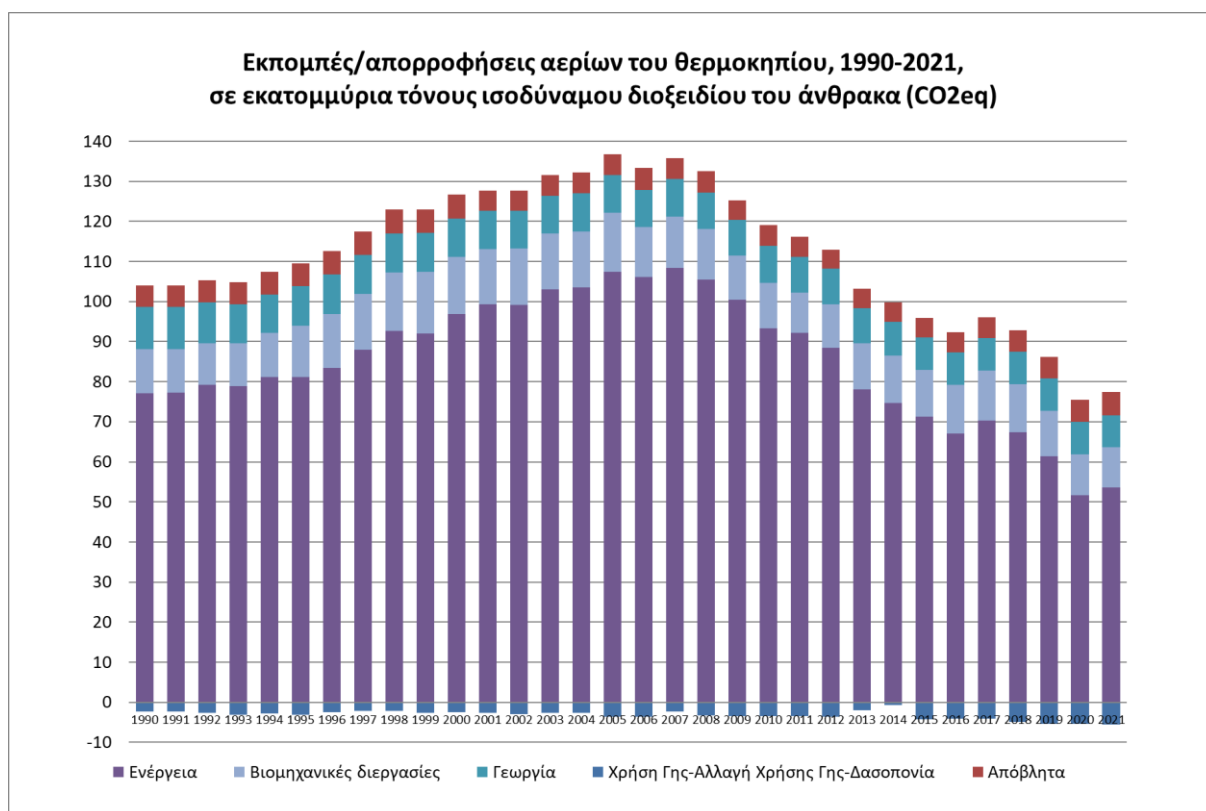


Σχήμα 37: Ανάπτυξη του κόστους επένδυσης L-DAC, S-DAC με βάση την καμπύλη εκμάθησης.

4.4 Εκπομπές CO₂ στην Ελλάδα

Έχοντας αναλύσει τα οικονομικά και ενεργειακά χαρακτηριστικά των μονάδων DAC και έχοντας μία εικόνα του κόστους των εγκαταστάσεων για τις επόμενες δεκαετίες, ακολουθεί η μελέτη των εκπομπών του ρύπου σε ελλαδικό πλαίσιο. Η μελέτη αυτή στοχεύει στην επιλογή του ποσοστού των συνολικών εκπομπών το οποίο πρόκειται να δεσμευτεί από την τεχνολογία.

Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, (ΥΠΕΝ, 2023b), οι ετήσιες απογραφές εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και άλλων αερίων αποτελούν ένα απαραίτητο εργαλείο στη χάραξη περιβαλλοντικής πολιτικής και συνεισφέρουν στη διαδικασία παρακολούθησης των μέτρων που σχετίζονται με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 38) φαίνεται η εξέλιξη των εκπομπών/απορροφήσεων των αερίων θερμοκηπίου (1990-2021):



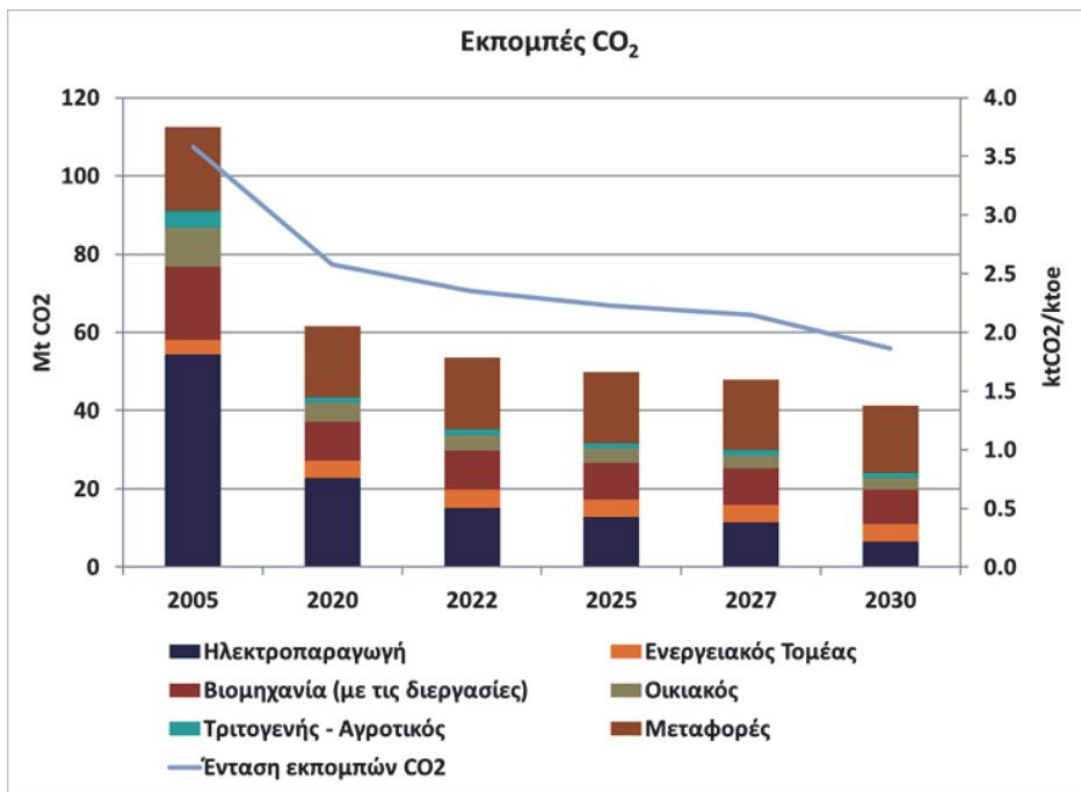
Σχήμα 38: Εκπομπές/απορροφήσεις αερίων θερμοκηπίου στην Ελλάδα.

Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (Ε.Σ.Ε.Κ) αποτελεί για την Ελληνική Κυβέρνηση ένα Στρατηγικό Σχέδιο για τα θέματα του Κλίματος και της Ενέργειας. Σε αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά βήματα για την επίτευξη συγκριμένων ενεργειακών και κλιματικών στόχων έως το έτος 2030. Το Ε.Σ.Ε.Κ. παρουσιάζει και αναλύει προτεραιότητες και μέτρα πολιτικής σε ένα ευρύ φάσμα αναπτυξιακών και οικονομικών δραστηριοτήτων προς όφελος της Ελληνικής κοινωνίας, καθιστώντας το κείμενο αναφοράς για την επόμενη δεκαετία. Παράλληλα το Ε.Σ.Ε.Κ. αποτελεί και το πρώτο στάδιο για την μακροχρόνια στρατηγική αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής και διαχείρισης της ενέργειας για το έτος 2050. Το Ε.Σ.Ε.Κ., ουσιαστικά, αποτελεί το ελληνικό πλάνο στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού στόχου για βιώσιμη μετάβαση σε μία οικονομία κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050.

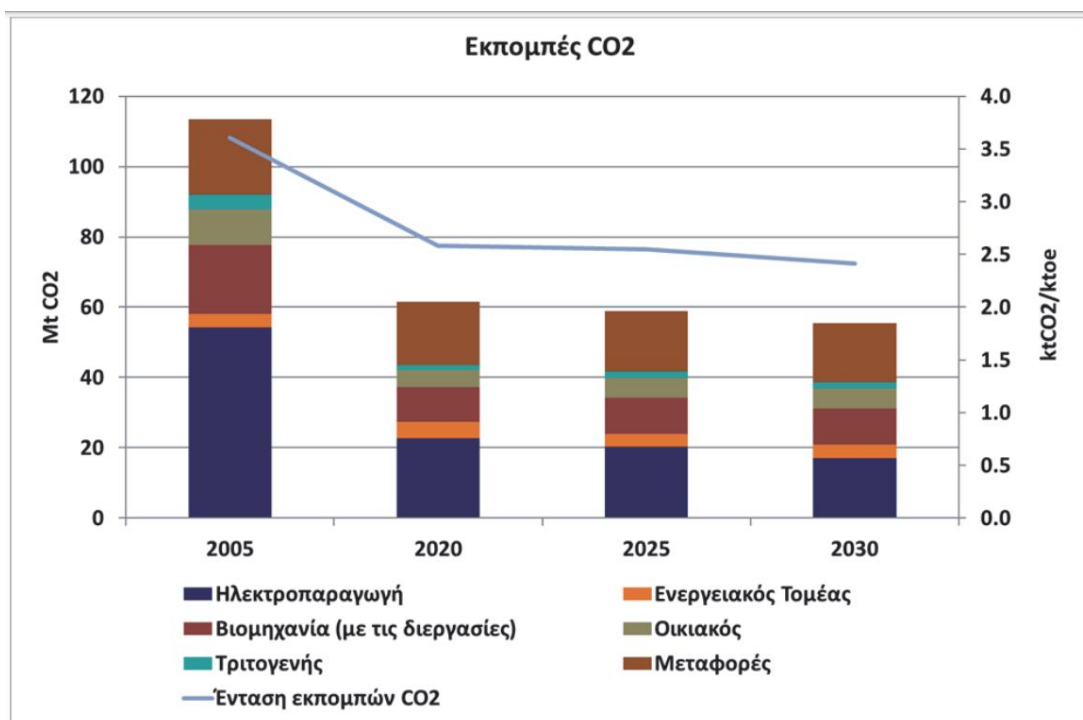
Σύμφωνα με το Ε.Σ.Ε.Κ., (ΥΠΕΝ, 2023c), θα ενισχυθούν οι εφαρμογές μετριασμού της κλιματικής αλλαγής και θα δοθεί έμφαση στις καινοτόμες τεχνικές δέσμευσης και επαναχρησιμοποίησης CO₂. Η παραπάνω συνθήκη, είναι αρκετά σημαντική για την παρούσα μελέτη καθώς γίνεται αντιληπτό, το γεγονός ότι η Ελλάδα δεν παραβλέπει το ενδεχόμενο δέσμευσης CO₂ ως μέθοδο καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής. Τα Σχήματα 39 και 40 παρουσιάζουν την εξέλιξη των εκπομπών CO₂ σε 2 σενάρια.

Πίνακας 8: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου και CO₂, 2020-2040, Ε.Σ.Ε.Κ.

Δείκτης	2020	2022	2025	2027	2030	2035	2040
Συνολικές Εκπομπές ΑΘΚ μη συμπ. των διεθνών αερομεταφορών (Mt CO₂eq)	82	73	69	67	61	58	55
Εκπομπές ΣΕΔΕ	36	28	26	24	19	17	16
Εκπομπές εκτός ΣΕΔΕ	46	45	44	43	42	41	38
Εκπομπές CO₂ ανά τομέα (MtCO₂)							
Ηλεκτροπαραγωγή	22.6	15.1	12.7	11.4	6.6	4.8	4.0
Ενεργειακός Τομέας	4.7	4.6	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2
Βιομηχανία (με τις διεργασίες)	9.9	9.9	9.4	9.3	8.8	8.7	9.0
Οικιακός	4.9	4.0	3.5	3.3	2.9	2.9	2.5
Τριτογενής/Αγροτικός	1.4	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2
Μεταφορές	18.1	18.3	18.1	17.9	17.2	16.1	15.3
Λοιπές εκπομπές (εκπομπές CO₂ και άλλα ΑΕΘ) (MtCO₂eq)	20.0	19.8	19.5	19.4	19.3	19.6	18.6



Σχήμα 39: Εξέλιξη εκπομπών CO₂ ανά τομέα έως το έτος 2030, για το σενάριο επίτευξης στόχων.



Σχήμα 40: Εξέλιξη εκπομπών CO₂ ανά τομέα έως το έτος 2030 για το σενάριο υφιστάμενων πολιτικών και μέτρων (χωρίς εκπομπές από διεθνείς αερομεταφορές).

4.5 Κόστος Α.Π.Ε.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) αποτελούν κομβικό κομμάτι για την αποτελεσματικότητα των μονάδων DAC καθώς παράγουν ενέργεια χωρίς εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Είναι σημαντικό, κατά την εγκατάσταση μίας τεχνολογίας DAC, να λαμβάνεται υπόψιν και η ενέργεια με την οποία αυτή τροφοδοτείται, δηλαδή το ενεργειακό μίγμα της κατανάλωσης της μονάδας. Σκοπός είναι να χρησιμοποιείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό Α.Π.Ε. στο μίγμα ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει η DAC ώστε να δεσμεύει CO₂ χωρίς να παράγει έμμεσα λόγω της πηγής από την οποία προέρχεται η καταναλισκόμενη ενέργεια της εγκατάστασης.

4.5.1 Αιολική ενέργεια

Οι Α.Π.Ε. οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία των μονάδων DAC αποτελούν ένα επιπλέον κόστος το οποίο δεν είναι αμελητέο και πρέπει να αναλυθεί περαιτέρω. Πιο συγκεκριμένα, στον τομέα της αιολικής ενέργειας, για το έτος 2023, ένα τυπικό κόστος κυμαίνεται γύρω στα 1.3 εκατομμύρια \$/MW ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται. Επιπλέον, οι περισσότερες εμπορικές ανεμογεννήτριες έχουν δυναμικότητα 2-3 MW και το κόστους κυμαίνεται σε 2,6-4 εκατομμύρια \$, ενώ απαιτούν κατά μέσο όρο 45.000 \$ για την λειτουργία και την συντήρησή τους (τιμές Η.Π.Α.) (Taryani, 2023). Στον Ελλαδικό χώρο, το κόστος ενός αιολικού πάρκου ισχύος 1,2 MW ανέρχεται στα 1.850.000 € και αποτελείται από δύο ανεμογεννήτριες 0.9 και 0.3 MW (OAS, 2021).

4.5.2 Ηλιακή ενέργεια

Όσο αναφορά την ηλιακή ενέργεια στην Ελλάδα, ο Σύνδεσμος Παραγωγών Ενέργειας με Φωτοβολταϊκά (Σ.Π.Ε.Φ., 2023) εκτιμά ότι το κόστος των φωτοβολταϊκών καθορίζεται ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης. Έτσι προκύπτουν τρεις κατηγορίες με βάση την ισχύ της εγκατάστασης. Οι κατηγορίες αυτές αφορούν εγκαταστάσεις μικρότερες από 1 MW, από 1-10 MW και μεγαλύτερες των 10 MW. Ο σύνδεσμος Σ.Π.Ε.Φ. υποστηρίζει ότι για τις παραπάνω κατηγορίες τα κόστη κυμαίνονται στα 800.000, 600.000 και 500.000 €/MW αντίστοιχα. Σημειώνεται επιπλέον ότι για ένα πάρκο 400kW το κόστος προ ΦΠΑ φθάνει τις 250.000 € ενώ προστίθεται και ένα ποσό 50.000-90.000 € για να πληρούνται οι όροι σύνδεσης

του Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε. (Κώστας Δεληγιάννης, 2021). Επιπλέον, μια ακόμη πηγή (Reuters, 2023) αναφέρει την εγκατάσταση πέντε φωτοβολταϊκών πάρκων στην Ελλάδα ισχύος 200 MW με το κόστος να ανέρχεται στα 180 εκατομμύρια ευρώ, δηλαδή 900.000 €/MW. Συνοψίζοντας, το κόστος για την εγκατάσταση ενός ηλιακού πάρκου 1MW κυμαίνεται μεταξύ 500.000 και 1.000.000 ευρώ. Τα παραπάνω δεδομένα των Α.Π.Ε. συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9):

Πίνακας 9: Τιμές κόστους εγκατάστασης αιολικών και ηλιακών έργων μέχρι σήμερα.

Ενέργεια	Ισχύς	Κόστος εγκατάστασης		Πηγή
		\$ / MW	€ / MW	
Αιολική	1 MW	1.300.000	-	(Taryani, 2023)
	2-3 MW	2.600.000-4.000.000	-	
	1,2 MW	-	1.850.000	(OAS, 2021)
Ηλιακή	<1 MW	-	800.000	(Κώστας Δεληγιάννης, 2021)
	1-10 MW	-	600.000	
	> 1 MW	-	500.000	
	400 kW	-	250.000	
	200 MW	-	180.000.000	(Reuters, 2023)

4.5.3 Γεωθερμική ενέργεια

Το κόστος της γεωθερμίας στην Ελλάδα κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30 € ανά MWh. Η τιμή αυτή εξαρτάται από την χρήση και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε ταμιευτήρα. Επιπλέον, το επενδυτικό κόστος μίας γεωθερμικής μονάδας υπολογίζεται περίπου στα 150.000-300.000 €/MW_{th} (Papachristou et al., 2021).

4.5.4 Εξέλιξη κόστους Α.Π.Ε. στο μέλλον

Πέρα από τα παραπάνω νούμερα, τα οποία αφορούν τα κόστη των Α.Π.Ε. έως και σήμερα, πρέπει να αναφερθεί η εξέλιξη του κόστους τους τα επόμενα χρόνια. Το βήμα αυτό, είναι σημαντικό καθώς η μελέτη περίπτωσης που ακολουθεί (Κεφάλαιο 5) αφορά το έτος 2030. Κατά συνέπεια, οι τιμές κόστους πρέπει να είναι οι προβλεπόμενες για το έκαστο έτος και όχι οι σημερινές. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 10) φαίνονται τα δεδομένα για έτη 2030 και 2050 αναφορικά με τα κόστη της αιολική και ηλιακής ενέργειας, όπως προέκυψαν από βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Πίνακας 10: Τιμές κόστους εγκατάστασης αιολικών έργων τα έτη 2030 και 2050

Τύπος έργου	Κόστος κεφαλαίου το 2030		Κόστος κεφαλαίου το 2050		Πηγή
	\$/kW	€/kW	\$/kW	€/kW	
Χερσαίο αιολικό	800-1.350	-	600-1000	-	(IRENA, 2019a)
	1.109-1.288	-	601-964	-	(Lowe and Drummond, 2022)
	-	938-1.213	-	819-1.118	(Sens et al., 2022)
Υπεράκτιο αιολικό	1.700-3.200	-	1.400-2.800	-	(IRENA, 2019a)
	2.004-2.809	-	722-1.735	-	(Lowe and Drummond, 2022)
	-	1734-2.568	-	1.416-2.359	(Sens et al., 2022)
Φωτοβολταϊκά	340-834		165-481		(IRENA, 2019b)
	544-747		212-479		(Lowe and Drummond, 2022)
		246-432		174-330	(Sens et al., 2022)

4.5.5 Χωροθέτηση μονάδων Α.Π.Ε.

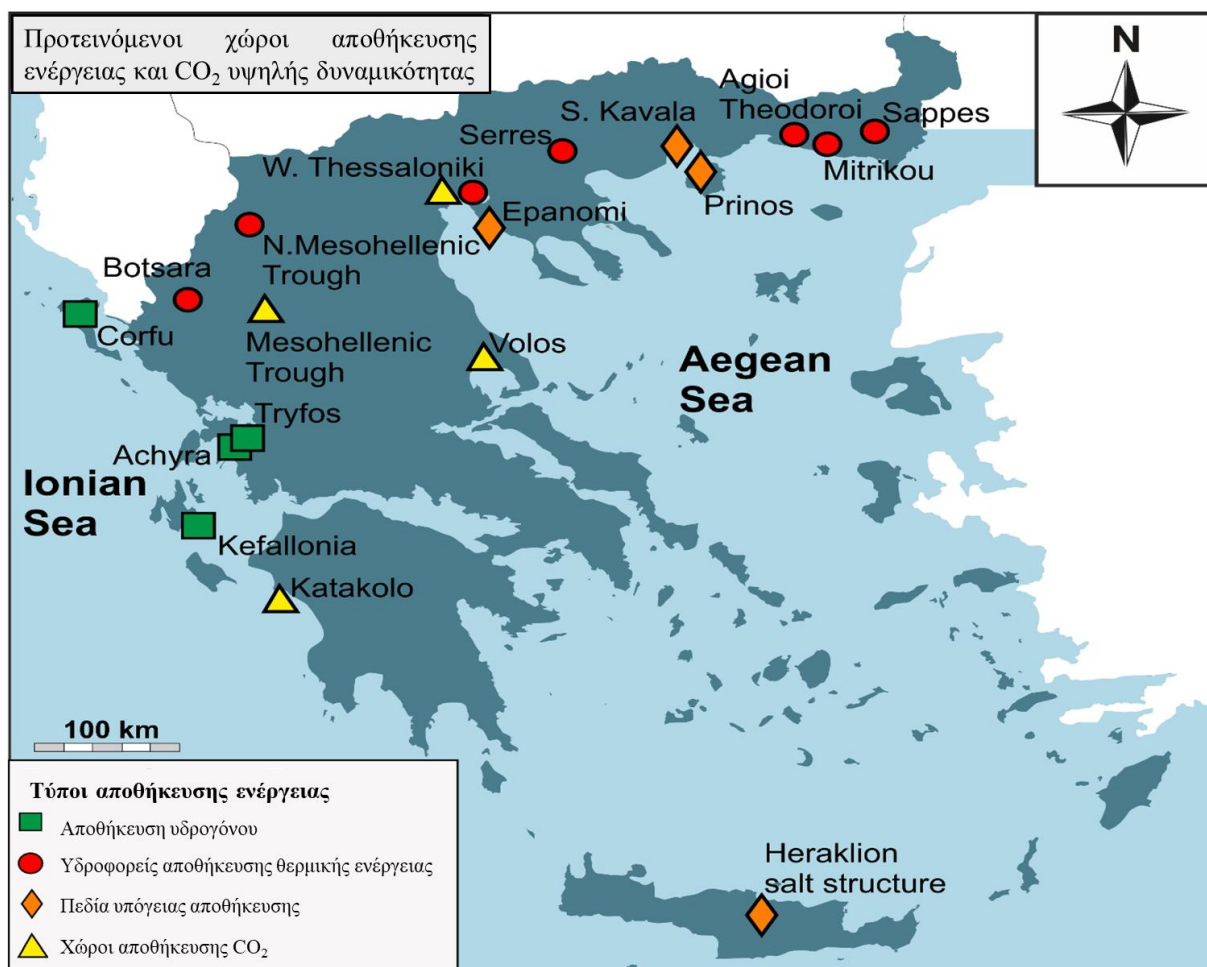
Πέρα από τα οικονομικά χαρακτηριστικά των μονάδων Α.Π.Ε. που θα χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία των μονάδων DAC είναι σημαντικό να αναφερθεί και ο απαιτούμενος χώρος για την εγκατάστασή τους. Σημειώνεται πως ο χώρος που θα καταλαμβάνουν οι μονάδες Α.Π.Ε. θα αποτελέσει μεταβλητή κατά την χωροθέτηση των μονάδων DAC κατά την μελέτη περίπτωσης. Σύμφωνα με την διαθέσιμη βιβλιογραφία (EPRI, 2012; NREL, 2023; SMU, 2023), συγκεντρώνονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 11) τα ποσά γης που απαιτεί κάθε τεχνολογία ανά MW εγκατεστημένης ισχύς.

Πίνακας 11: Απαιτούμενος χώρος για μονάδες Α.Π.Ε.

Τεχνολογία	Μέγεθος (km ² /MW)	Μέγεθος (km ² /GWh)	Πηγή
Φωτοβολταϊκά < 10kW	0,013		(NREL, 2023)
Φωτοβολταϊκά 10-100 kW	0,022		
Φωτοβολταϊκά 100-1000 kW	0,022		
Φωτοβολταϊκά 1-10 MW	0,025		(EPRI, 2012)
Φωτοβολταϊκά 1-20 MW		0,016	
Φωτοβολταϊκά >20 MW		0,014	
Ανεμογεννήτριες <10 kW	0,12		(NREL, 2023)
Ανεμογεννήτριες 10-100 kW	0,12		
Ανεμογεννήτριες 100-1000 kW	0,12		
Ανεμογεννήτριες 1-10 MW	0,18		
Ανεμογεννήτριες		0,097	(EPRI, 2012)
Γεωθερμία	0,04-0,032		(SMU, 2023)
		0,002-0,011	(EPRI, 2012)

4.6 Αποθήκευση CO₂

Η αποθήκευση του δεσμευμένου CO₂ αποτελεί το τελικό στάδιο του κύκλου της άμεσης δέσμευσης αέρα. Ως μέρος της διαδικασίας, είναι σημαντικό να αναλυθούν τα πιθανά σημεία απόθεσης του CO₂, η χωρητικότητά τους καθώς και το κόστος της αποθήκευσης το οποίο θα προστεθεί εν τέλει στο κόστος εγκατάστασης των μονάδων DAC. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 41) αναδεικνύονται τα πιθανά σημεία αποθήκευσης CO₂ στην Ελλάδα και στον Πίνακα 12 συγκεντρώνονται οι τιμές χωρητικότητας σε MtCO₂ για τα σημεία βάσει βιβλιογραφίας.



Σχήμα 41: Κύριοι προτεινόμενοι χώροι αποθήκευσης ενέργειας και CO₂ υψηλής δυναμικότητας (Arvanitis et al., 2020).

Πίνακας 12: Χαρακτηριστικά πιθανών τοποθεσιών αποθήκευσης CO₂

Τοποθεσία	Μορφολογία	Βάθος	Χωρητικότητα	Πηγή
Πρίνος (Θάσος)	Πετρελαιοπηγή	-	19 Mt	(Koukouzas et al., 2009)
	Αλατούχος υδροφόρος	2 km	1350 Mt	
Καλλιράχη (Θάσος)	Πετρελαιοπηγή	> 900 m	32 Mt	(Koukouzas et al., 2009)
Πτολεμαΐδα	Ανθρακικός υδροφόρος	> 800 m	-	(Koukouzas et al., 2009)
Μεσοελληνική κοιλάτητα	Αλατούχοι σχηματισμοί	> 1 km	728 Gt	(Tasianas and Koukouzas, 2016)
Λουδίας/Αγριοσυκιά (Λεκανοπέδιο Θεσσαλονίκης)	Αλατούχοι υδροφόροι ψαμμίτη	2.4 km	604 Mt	(Koukouzas et al., 2009)
Αλεξάνδρεια	Αλατούχοι σχηματισμοί	900 -1200 m	35 Mt	(Koukouzas et al., 2009)
Κατάκολο	Πετρελαιοπηγή	-	3.2 Mt	(Arvanitis et al., 2020)
Βόλος	Σχηματισμοί βασάλτη	0.3 km	43 Mt	(Arvanitis et al., 2020)

Από τις παραπάνω περιοχές του Πίνακα 11, οι καταλληλότερες για αποθήκευση CO₂ είναι οι ψαμμίτες της Μεσοελληνικής κοιλάτητας, οι βασάλτες του βόλου, οι αλατούχοι υδροφόροι της Θεσσαλονίκης και το εξαντλημένο κοίτασμα πετρελαίου του Πρίνου. Η επιλογή αυτές βασίζονται τόσο στην τοποθεσία των περιοχών όσο και στο γεγονός ότι οι σχηματισμοί των περιοχών αυτών είναι σχετικά έτοιμοι για την εφαρμογή τεχνικών αποθήκευσης CO₂ και μπορούν εν δυνάμει να αναπτυχθούν οικονομικά βιώσιμα σενάρια (Arvanitis et al., 2020).

Τα παρακάτω σχήματα (Σχήματα 42 και 43) παρουσιάζουν τα κόστη της μεταφοράς και αποθήκευσης του δεσμευμένου CO₂ χρησιμοποιώντας έναν θερμικό χάρτη. Παρουσιάζονται δύο σενάρια, ένα βραχυπρόθεσμο στο οποίο εμφανίζονται οι τιμές μόνο για τα προγραμματισμένα έργα αποθήκευσης (από τον Ιανουάριο του 2022) και ένα μακροπρόθεσμο στο οποίο λαμβάνονται υπόψη και περιοχές με χωρητικότητα αποθήκευσης άνω των 100 MtCO₂. Σημειώνεται πως και τα δύο σενάρια επιτρέπεται η κατασκευή νέων αγωγών μεταξύ

πηγής δέσμευσης και χώρου απόθεσης. Οι τιμές κόστους αναγράφονται πάνω στα σχήματα (Clean Air Task Force, 2023).



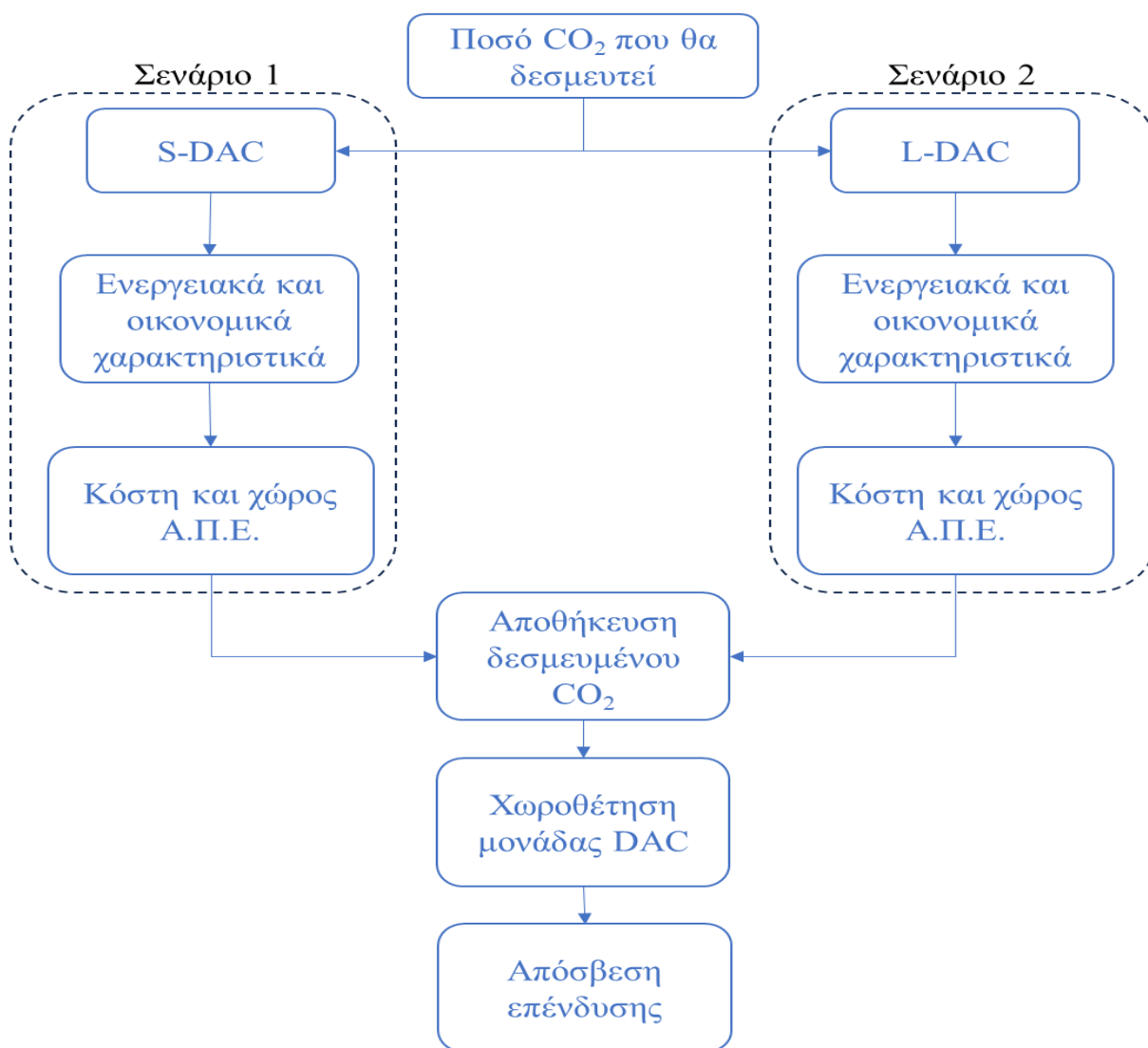
Σχήμα 42: Δυνητικά κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης, βραχυπρόθεσμο σενάριο



Σχήμα 43: Δυνητικά κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης, μακροπρόθεσμο σενάριο

Κεφάλαιο 5: Μελέτη Περίπτωσης

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μία μελέτη περίπτωσης με στόχο την εγκατάσταση της τεχνολογίας DAC στην Ελλάδα. Αρχικά, θα αναφερθούν οι παραδοχές βάσει των οποίων πραγματοποιείται η μελέτη. Κατόπιν, θα μελετηθούν 2 σενάρια, ένα για την τεχνολογία στερεών απορροφητικών S-DAC (Σενάριο 1) και ένα για την τεχνολογία υγρών διαλυτών L-DAC (Σενάριο 2). Αφού επιλεγεί το ποσό CO₂ που θα δεσμευτεί, θα υπολογιστούν οι ενεργειακές και οικονομικές ανάγκες κάθε τεχνολογίας, τα κόστη και ο απαιτούμενος χώρος για τις μονάδες Α.Π.Ε. Τέλος, θα πραγματοποιηθεί η χωροθέτηση των μονάδων DAC και θα υπολογιστούν τα κόστη αποθήκευσης του δεσμευμένου CO₂. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 44) διακρίνονται τα βήματα που θα ακολουθήσει η μελέτη.



Σχήμα 44: Διάγραμμα βημάτων μελέτης περίπτωσης

5.1 Παραδοχές μελέτης

Για την πραγματοποίηση της μελέτης, πρέπει πρώτα να γίνουν ορισμένες παραδοχές με σκοπό να καλυφθούν κάποια κενά, των οποίων η ανάλυση είναι αδύνατο να πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Οι παραδοχές είναι οι εξής:

Πίνακας 13: Παραδοχές μελέτης περίπτωσης

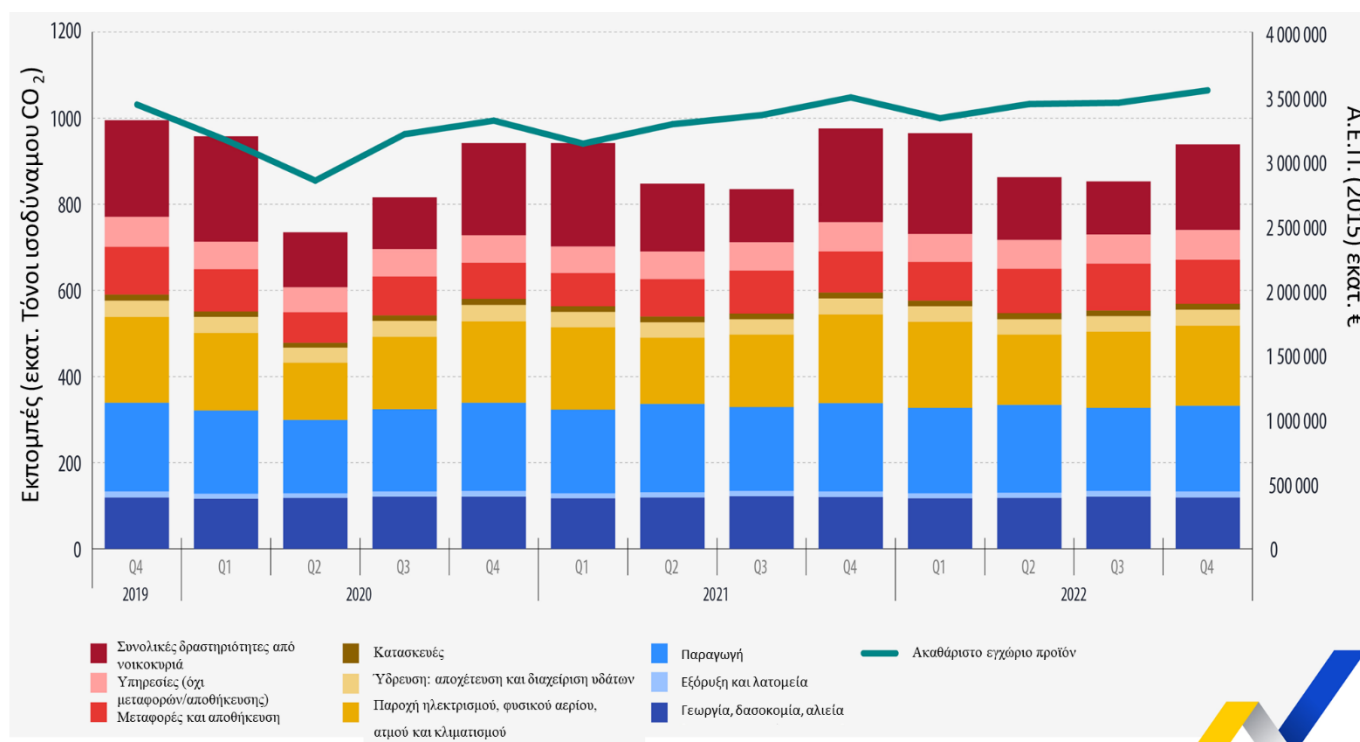
Ενεργειακές ανάγκες	Α.Π.Ε. (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, γεωθερμία και δωρεάν απορριπτόμενη θερμότητα)
Έτος εγκατάστασης	2030
Κόστος	Από πίνακες Κεφαλαίου 4
Δυναμικότητα μονάδων	0,36 MtCO ₂
Απόθεση CO ₂	Αποθήκευση σε υπόγειους σχηματισμούς
Τοπολογία μονάδων	Περιλαμβάνει χωροταξία μονάδας DAC και μονάδων Α.Π.Ε. συνδυαστικά

1. **Ενεργειακές Ανάγκες:** Ορίζεται ότι οι ενεργειακές ανάγκες των μονάδων θα προέρχονται εξ' ολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές. Μέρος της θερμικής ενέργειας των μονάδων θα καλυφθεί από γεωθερμία ενώ η ηλεκτρική ενέργεια θα καλυφθεί από ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά. Για τον λόγο αυτό, οι μονάδες που θα εγκατασταθούν, είναι σημαντικό να βρίσκονται κοντά σε γεωθερμικό πεδίο. Επιπλέον ορίζεται ότι τα ίδια ενεργειακά δεδομένα υφίστανται και για το έτος μελέτης, δηλαδή το 2030. Τέλος, σημειώνεται ότι στην περίπτωση των S-DAC ένα ποσοστό της θερμικής ενέργειας θα καλυφθεί από δωρεάν απορριπτόμενη ενέργεια. Το ποσοστό αυτό δεν θα αποτελεί παράγοντα κόστους κατά την οικονομική αξιολόγηση των τεχνολογιών.
2. **Έτος εγκατάστασης:** Ορίζεται ότι οι μονάδες θα εγκατασταθούν το έτος 2030.
3. **Κόστος:** Για τα οικονομικά χαρακτηριστικά των μονάδων θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές που προβλέπονται για το έτος 2030, βάσει του Πίνακα 8 κατά το βασικό σενάριο.
4. **Δυναμικότητα Μονάδας:** Οι μονάδες οι οποίες θα εγκατασταθούν έχουν δυναμικότητα δέσμευσης 0,36 MtCO₂/έτος. Η τιμή αυτή επιλέγεται καθώς έχει πραγματοποιηθεί έρευνα για μονάδες τέτοιας δυναμικότητας (Πίνακας 7) (Fasih et al., 2019).

5. **Απόθεση CO₂:** Το δεσμευμένο CO₂ θα οδηγηθεί προς αποθήκευση σε υπόγειους σχηματισμούς.
6. **Τοπολογία Μονάδας:** Ο διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση, αναφέρεται μόνο στην μονάδα DAC. Η τοποθεσία εγκατάστασης των μονάδων Α.Π.Ε. (Ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά) είναι ανεξάρτητη της χωροθέτησης της μονάδας DAC. Για τις μονάδες Α.Π.Ε. θα αναφερθούν τα ενεργειακά και οικονομικά χαρακτηριστικά τους καθώς και η απαιτούμενη έκταση γης, ώστε να μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις των μονάδων DAC.

5.2 Στόχος εκτιμώμενων εκπομπών

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην Ελλάδα αναμένεται να μειωθούν σε 60,6 MtCO₂ το 2030. Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του περιορισμού των σταθμών που λειτουργούν με ντίζελ. Παράλληλα, η κατάργηση του λιγνίτη σε συνδυασμό με την αυξανόμενη χρήση ΑΠΕ ενισχύουν την παραπάνω πρόβλεψη (Eurostat, 2022). Το Σχήμα 45 παρουσιάζει τις συνολικές εκπομπές GHG ανά τομέα σε εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου CO₂ για την περίοδο 2019-2022:

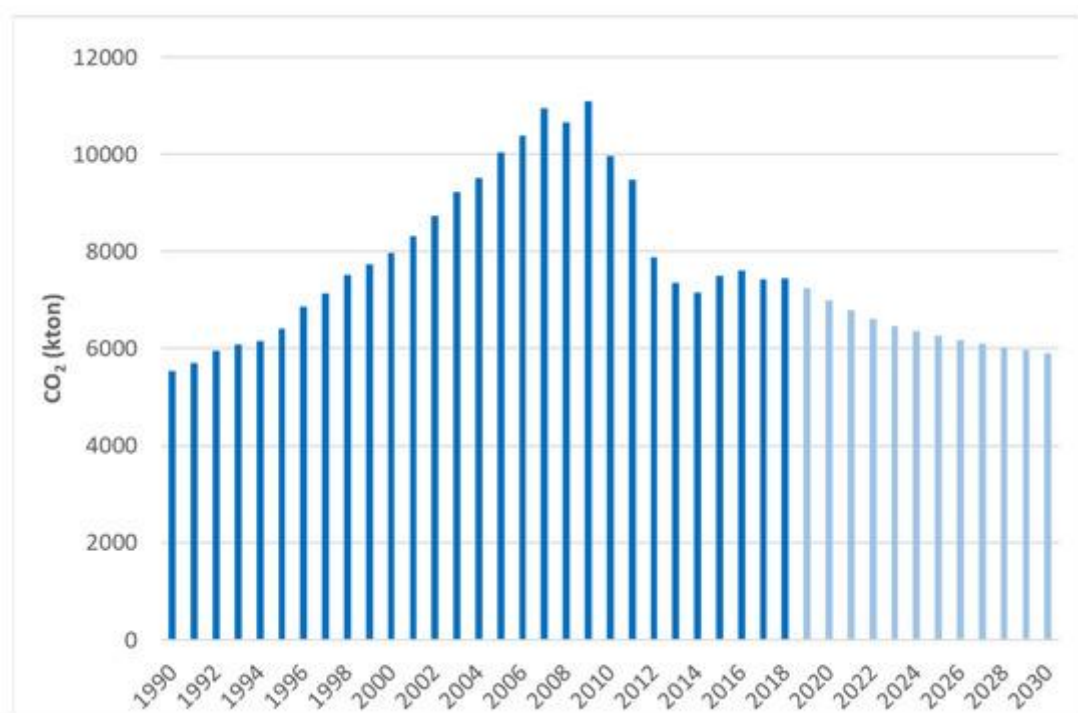


eurostat

Σχήμα 45: Συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου ανά τομέα (MtCO₂e), (European Parliament, 2021).

Στο παραπάνω σχήμα, παρατηρείται ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προέρχονται από βιομηχανικές διαδικασίες (παροχή ενέργειας, παραγωγή εξόρυξη). Στις περιπτώσεις αυτές, δίνεται η δυνατότητα χρήσης τεχνολογιών CCS όπως αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1.4. Το αμέσως μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών προέρχεται από τα νοικοκυριά και κατόπιν από τις μεταφορές, δηλαδή από τα οχήματα, τα πλοία και τα αεροπλάνα. Το δεύτερο, αποτελεί μία πηγή εκπομπών οι οποίες δεν δύναται να δεσμευτούν από τις τεχνολογίες του Κεφαλαίου 1.4. Ωστόσο, οι τεχνολογίες DAC, καθώς δεσμεύουν το CO₂ απευθείας από τον αέρα, μπορούν να καλύψουν τις εκπομπές όλων των κλάδων.

Μία ομάδα ερευνητών (Srygopoulos et al., 2022) αξιοποιώντας την μέθοδο διπλής εκθετικής εξομάλυνσης πετυχαίνει να προβλέψει τις εκπομπές του CO₂ έως το έτος 2030 από τα επιβατικά οχήματα. Στα αποτελέσματά τους, δίνουν και το παρακάτω σχήμα (Σχήμα 46) σύμφωνα με το οποίο οι εκπομπές CO₂ για τα επιβατικά αυτοκίνητα της Ελλάδας, το έτος 2030, θα είναι περίπου 6 Mt.



Σχήμα 46: Συνολικές εκπομπές CO₂ από επιβατικά αυτοκίνητα στην Ελλάδα για την περίοδο 1990-2030.

Οι μονάδες DAC οι οποίες θα εγκατασταθούν στην Ελλάδα, στοχεύουν να δεσμεύσουν ένα ποσοστό της τάξης του 12% από το σύνολο των εκπομπών των επιβατικών αυτοκινήτων. Το ποσοστό αυτό ισοδυναμεί με 0,72MtCO₂ και αποτελεί το 1,2% των συνολικών εκπομπών CO₂ για το έτος 2030 σύμφωνα με την παραπάνω εκτίμηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Έχοντας

θέσει ως παραδοχή ότι οι μονάδες θα είναι της τάξης του 0,5MtCO₂ η καθεμία, προκύπτει ότι θα εγκατασταθούν συνολικά δύο μονάδες DAC.

5.3 Επιλογή τεχνολογίας S-DAC (Σενάριο 1)

Ξεκινώντας από τα ενεργειακά χαρακτηριστικά, στην περίπτωση των S-DAC, γίνεται αξιοποίηση των δεδομένων του Πίνακα 3. Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ενέργειας κάθε τεχνολογίας θα χρησιμοποιηθούν οι μέσες τιμές του εύρους που δίνεται από τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας (International Energy Agency, 2022). Οι ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας με δυναμικότητα 0.36 MtCO₂ και τεχνολογίας S-DAC είναι:

- Ενεργειακές απαιτήσεις:

$$E_{S-DAC} = \frac{(7,2 + 9,5) \frac{GJ}{tCO_2}}{2} \rightarrow E_{S-DAC} = 8,35 \frac{GJ}{tCO_2} = 8,35 \frac{GJ}{tCO_2} \cdot 360.000 \frac{tCO_2}{\text{μονάδα}} \rightarrow$$

$$E_{S-DAC} = 3.006.000 \frac{GJ}{\text{μονάδα}} = 835 \frac{GWh}{\text{μονάδα}}$$

Κατόπιν, πραγματοποιείται ο υπολογισμός των οικονομικών χαρακτηριστικών ανά μονάδα 0.36 MtCO₂. Οι τιμές κόστους κεφαλαίου αντλούνται από τα δεδομένα του Πίνακα 7 (βασικό σενάριο). Αρχικά θα υπολογιστεί το κόστος κεφαλαίου με τα δεδομένα του έτους 2030 ενώ κατόπιν θα υπολογιστεί το λειτουργικό κόστος σαν ποσοστό του κόστους κεφαλαίου της τάξης του 4%. Σημειώνεται ότι το 4% επιλέχθηκε βάσει του Πίνακα 4 στην περίπτωση της μελέτης των Fasihi et al., 2019:

- Κόστος κεφαλαίου: $CAPEX_{S-DAC} = 189 \frac{\text{€}}{tCO_2} \cdot 360.000 \frac{tCO_2}{\text{μονάδα}} \rightarrow$

$$CAPEX_{S-DAC} = 68.040.000 \frac{\text{€}}{\text{μονάδα}}$$

- Λειτουργικό κόστος: $OPEX_{S-DAC} = 68.040.000 \text{ €} \cdot 4\% \rightarrow$

$$OPEX_{S-DAC} = 2.721.600 \frac{\text{€}}{\text{έτος}}$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το κόστος των Α.Π.Ε. οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των μονάδων DAC. Η απαιτούμενη ενέργεια θα καλύπτεται κατά 20% από ανεμογεννήτριες (ηλεκτρικές ανάγκες), 40% από φωτοβολταϊκά, 30% από γεωθερμία και 10% από δωρεάν απορριπτόμενη θερμότητα (θερμικές ανάγκες). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 14) αναγράφονται τα ποσοστά αυτά:

Πίνακας 14: Ενεργειακές απαιτήσεις από Α.Π.Ε. για την μονάδα S-DAC

Α.Π.Ε.	Ποσοστό	Ποσό	
		GJ	GWh
Ανεμογεννήτριες	20%	601.200	167
Φωτοβολταϊκά	40%	1.202.400	334
Γεωθερμία	30%	901.800	250,5
Δωρεάν απορριπτόμενη θερμότητα	10%	300.600	83,5
Σύνολο	100%	3.006.000	835

Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (IRENA, 2019a), ο συντελεστής δυναμικότητας των χερσαίων ανεμογεννητριών, το 2030, θα είναι μεταξύ 30% - 55%. Λαμβάνοντας την μέση τιμή των ποσοστών αυτών προκύπτει ένας συντελεστής δυναμικότητας 42,5%. Κατά συνέπεια, 1 MW ισχύς από ανεμογεννήτριες ισοδυναμεί με 3,3 GWh ενέργειας. Επιπλέον σύμφωνα με τον Πίνακα 11, το κόστος των χερσαίων ανεμογεννητριών κατά το έτος 2030 κυμαίνεται μεταξύ 938-1213 €/kW, με την μέση τιμή να καθορίζεται στα 1.076 €/kW. Άρα το κόστος των ανεμογεννητριών είναι:

$$\bullet \text{ Κόστος Ανεμογεννητριών: } CAPEX_{A/\Gamma} = \frac{167 \frac{GWh}{\text{μονάδα}}}{3,3 \frac{GWh}{MW}} \cdot 1.076.000 \frac{\text{€}}{MW} \rightarrow$$

$$CAPEX_{A/\Gamma} = 54.452.000 \text{ €/μονάδα}$$

Αναφορικά με την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά, σημειώνεται ότι 1 MW ισχύς από φωτοβολταϊκά ισοδυναμεί με 2.1 GWh ενέργειας (τιμή για το 2019) (FreeingEnergy, 2021). Η αντιστοιχία αυτή, θα θεωρηθεί ίδια και για το έτος 2030, καθώς δεν υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα για το έτος 2030. Επιπλέον, το κόστος των φωτοβολταϊκών για το έτος 2030 σύμφωνα με τον Πίνακα 11 κυμαίνεται μεταξύ 246-432 €/kW με την μέση να καθορίζεται στα 339 €/kW. Έτσι προκύπτει:

$$\bullet \text{ Κόστος Φωτοβολταϊκών: } CAPEX_{\Phi/B} = \frac{334 \frac{GWh}{\text{μονάδα}}}{2,1 \frac{GWh}{MW}} \cdot 339.000 \frac{\text{€}}{MW} \rightarrow$$

$$CAPEX_{\Phi/B} = 53.917.000 \text{ €/μονάδα}$$

Το κόστος της γεωθερμικής μονάδας υπολογίζεται σύμφωνα με της τιμές του Υποκεφαλαίου 4.5.3. Οι τιμές της γεωθερμίας καθορίζονται στα 10-30 €/MWh με την μέση τιμή να καθορίζεται στα 20 €/MWh. Προκύπτει:

- Κόστος γεωθερμίας $CAPEX_{Γεωθ.} = 20.000 \frac{\text{€}}{\text{GWh}} \cdot 250,5 \frac{\text{GWh}}{\text{μονάδα}} \rightarrow$

$$CAPEX_{Γεωθ.} = 5.010.000 \text{ €/μονάδα}$$

Τέλος υπολογίζονται τα λειτουργικά κόστη των μονάδων Α.Π.Ε. ως ένα ποσοστό 2% του αθροίσματος του κόστους επένδυσης:

$$OPEX_{Α.Π.Ε.} = (CAPEX_{Α/Γ} + CAPEX_{\Phi/B} + CAPEX_{Γεωθ.}) \cdot 2\% \rightarrow$$

$$OPEX_{Α.Π.Ε.} = 2.268.000 \text{ €/έτος}$$

Έχοντας ολοκληρώσει την οικονομική αξιολόγηση των Α.Π.Ε. πραγματοποιείται η χωροθέτησή τους. Τα αποτελέσματα θα προκύψουν βάσει του Πίνακα 12 για ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά >20 MW και γεωθερμικές μονάδες την μέση τιμή ανά GWh, δηλαδή 0,0065 km²/GWh. Σημειώνεται ότι βάσει των παραπάνω υπολογισμών, απαιτούνται 163 GWh ανεμογεννητριών, 298 GWh φωτοβολταϊκά και 912 GWh από γεωθερμία.

- Απαιτούμενος χώρος για Α/Γ: $S_{Α/Γ} = 167 \text{ GWh} \cdot 0,097 \frac{\text{km}^2}{\text{GWh}} \rightarrow$

$$L_{Α/Γ} = 16.2 \text{ km}^2$$

- Απαιτούμενος χώρος για Φ/Β: $S_{\Phi/B} = 334 \text{ GWh} \cdot 0,014 \frac{\text{km}^2}{\text{GWh}} \rightarrow$

$$L_{\Phi/B} = 4,7 \text{ km}^2$$

- Απαιτούμενος χώρος για γεωθερμία: $S_{Γεωθ.} = 250,5 \text{ GWh} \cdot 0,0065 \frac{\text{km}^2}{\text{GWh}} \rightarrow$

$$L_{Γεωθ.} = 1,6 \text{ km}^2$$

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 15) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την τεχνολογία S-DAC.

Πίνακας 15: Συγκεντρωτικός πίνακας ενεργειακών απαιτήσεων, κόστους DAC, κόστους Α.Π.Ε. και χωροθέτησης Α.Π.Ε. για S-DAC

Ενεργειακές απαιτήσεις (GJ/Μονάδα 0.36 Mt)	3.006.000
Κόστος κεφαλαίου (€/Μονάδα 0.36 Mt)	68.040.000
Λειτουργικό κόστος (€/Μονάδα 0.36 Mt)	2.721.600
Κόστος Α/Γ (€/Μονάδα 0.36 Mt)	54.452.000
Κόστος Φ/Β (€/Μονάδα 0.36 Mt)	53.917.000
Κόστος Γεωθερμίας (€/Μονάδα 0.36 Mt)	5.010.000
Λειτουργικά κόστη Α.Π.Ε. (€/έτος)	2.268.000
Χώρος για Α/Γ (km ²)	16,2
Χώρος για Φ/Β (km ²)	4,7
Χώρος για Γεωθερμία (km ²)	1,6

5.4 Επιλογή τεχνολογίας L-DAC (Σενάριο 2)

Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται τα δεδομένα για την τεχνολογία L-DAC. Για τον υπολογισμό των ενεργειακών απαιτήσεων της τεχνολογίας L-DAC γίνεται αξιοποίηση των δεδομένων του Πίνακα 3.

- Ενεργειακές απαιτήσεις:

$$E_{L-DAC} = \frac{(5,5 + 8,8) \frac{GJ}{tCO_2}}{2} = 7,15 \frac{GJ}{tCO_2} = 7,15 \frac{GJ}{tCO_2} \cdot 360.000 \frac{tCO_2}{\text{μονάδα}} \rightarrow$$

$$E_{S-DAC} = 2.574.000 \frac{GJ}{\text{μονάδα}} = 715 \frac{GWh}{\text{μονάδα}}$$

Κατόπιν, βάσει του Πίνακα 7 (βασικό σενάριο, έτος 2030) υπολογίζονται τα κόστη της μονάδας L-DAC κατά τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκαν και για την μονάδα S-DAC.

- Κόστος κεφαλαίου: $CAPEX_{L-DAC} = 211 \frac{\text{€}}{tCO_2} \cdot 360.000 \frac{tCO_2}{\text{μονάδα}} \rightarrow$

$$CAPEX_{L-DAC} = 75.960.000 \text{ €/μονάδα}$$

- Λειτουργικό κόστος: $OPEX_{L-DAC} = 75.960.000 \text{ €} \cdot 4\% \rightarrow$

$$OPEX_{L-DAC} = 3.038.400 \text{ €/έτος}$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το κόστος των Α.Π.Ε. που θα τροφοδοτούν την μονάδα L-DAC. Όπως και με τις μονάδες S-DAC, έτσι και στις L-DAC, η θερμική ενέργεια θα καλύπτεται από έναν συνδυασμό φωτοβολταϊκών και γεωθερμίας σε ένα ποσοστό 50% - 30% αντίστοιχα. Η ηλεκτρική ενέργεια θα καλύπτεται από ανεμογεννήτριες, δηλαδή ένα ποσοστό 20%. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 16) αναγράφονται τα ποσοστά αυτά:

Πίνακας 16: Ενεργειακές απαιτήσεις από Α.Π.Ε. για την μονάδα L-DAC

Α.Π.Ε.	Ποσοστό	Απαιτούμενη ενέργεια	
		GJ	GWh
Ανεμογεννήτριες	20%	514800	143
Φωτοβολταϊκά	50%	1287000	357,5
Γεωθερμία	30%	772200	214,5
Σύνολο	100%	2574000	715

Χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραδοχές που λήφθηκαν κατά τον υπολογισμό των Α.Π.Ε. για S-DAC, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Κόστος Ανεμογεννητριών: $CAPEX_{A/\Gamma} = \frac{143 \frac{GWh}{\text{μονάδα}}}{3,3 \frac{GWh}}{\cdot} 1.076.000 \text{ €} \rightarrow$

$$CAPEX_{A/\Gamma} = 46.626.700 \text{ €/μονάδα}$$

- Κόστος Φωτοβολταϊκών: $CAPEX_{\Phi/B} = \frac{357,5 \frac{GWh}{\text{μονάδα}}}{2,1 \frac{GWh}{MW}} \cdot 339.000 \frac{\text{€}}{MW} \rightarrow$

$$CAPEX_{\Phi/B} = 57.710.700 \text{ €/μονάδα}$$

- Κόστος γεωθερμίας $CAPEX_{\Gamma\epsilon\omega\theta.} = 20.000 \frac{\text{€}}{GWh} \cdot 214,5 \frac{GWh}{\text{μονάδα}} \rightarrow$

$$CAPEX_{\Gamma\epsilon\omega\theta.} = 4.290.000 \text{ €/μονάδα}$$

- Λειτουργικά κόστη Α.Π.Ε.:

$$OPEX_{A.Π.Ε.} = (CAPEX_{A/\Gamma} + CAPEX_{\Phi/B} + CAPEX_{\Gamma\epsilon\omega\theta.}) \cdot 2\% \rightarrow$$

$$OPEX_{A.Π.Ε.} = 2.173.000 \text{ €/έτος}$$

Τέλος υπολογίζονται ο απαιτούμενος χώρος για τις μονάδες Α.Π.Ε. στην περίπτωση των L-DAC, με τον ίδιο τρόπο που υπολογίστηκε για την τεχνολογία S-DAC.

- Απαιτούμενος χώρος για Α/Γ: $S_{A/\Gamma} = 143 \text{ GWh} \cdot 0,097 \frac{\text{km}^2}{\text{GWh}} \rightarrow$

$$L_{A/\Gamma} = 13,9 \text{ km}^2$$

- Απαιτούμενος χώρος για Φ/Β: $S_{\Phi/B} = 357,5 \text{ GWh} \cdot 0,014 \frac{\text{km}^2}{\text{GWh}} \rightarrow$

$$L_{\Phi/B} = 5,0 \text{ km}^2$$

- Απαιτούμενος χώρος για γεωθερμία: $S_{\Gamma\epsilon\omega\theta.} = 214,5 \text{ GWh} \cdot 0,0065 \frac{\text{km}^2}{\text{GWh}} \rightarrow$

$$L_{\Gamma\epsilon\omega\theta.} = 1,4 \text{ km}^2$$

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 17) παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την τεχνολογία S-DAC.

Πίνακας 17: Συγκεντρωτικός πίνακας ενεργειακών απαιτήσεων, κόστους DAC, κόστους Α.Π.Ε. και χωροθέτησης Α.Π.Ε. για L-DAC

Ενεργειακές απαιτήσεις (GJ/Μονάδα 0.36 Mt)	2.574.000
Κόστος κεφαλαίου (€/Μονάδα 0.36 Mt)	75.960.000
Λειτουργικό κόστος (€/Μονάδα 0.36 Mt)	3.038.400
Κόστος Α/Γ (€/Μονάδα 0.36 Mt)	46.626.700
Κόστος Φ/Β (€/Μονάδα 0.36 Mt)	57.710.700
Κόστος Γεωθερμίας (€/Μονάδα 0.36 Mt)	4.290.000
Λειτουργικά κόστη Α.Π.Ε. (€/έτος)	2.173.000
Χώρος για Α/Γ (km ²)	13,9
Χώρος για Φ/Β (km ²)	5,0
Χώρος για Γεωθερμία (km ²)	1,4

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 18) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας συγκεντρωτικά και για τις δύο πιθανές τεχνολογίες DAC (S-DAC, L-DAC). Όπως είναι προφανές, η τεχνολογία S-DAC είναι οικονομικότερη αλλά πιο ενεργοβόρα.

Πίνακας 18: Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τις τεχνολογίες S-DAC, L-DAC

	S-DAC	L-DAC
Ενεργειακές απαιτήσεις (GJ/Μονάδα 0.36 Mt)	3.006.000	2.574.000
Κόστος κεφαλαίου (€/Μονάδα 0.36 Mt)	68.040.000	75.960.000
Λειτουργικό κόστος (€/Μονάδα 0.36 Mt)	2.721.600	3.038.400
Κόστος Α/Γ (€/Μονάδα 0.36 Mt)	54.452.000	46.626.700
Κόστος Φ/Β (€/Μονάδα 0.36 Mt)	53.917.000	57.710.700
Κόστος Γεωθερμίας (€/Μονάδα 0.36 Mt)	5.010.000	4.290.000
Λειτουργικά κόστη Α.Π.Ε. (€/έτος)	2.268.000	2.173.000
Χώρος για Α/Γ (km ²)	16,2	13,9
Χώρος για Φ/Β (km ²)	4,7	5,0
Χώρος για Γεωθερμία (km ²)	1,6	1,4

5.5 Αποθήκευση δεσμευμένου CO₂

Κατά την αξιολόγηση της αποθήκευσης του CO₂ που θα δεσμευτεί από τις μονάδες DAC θα αναλυθούν οι περιπτώσεις που αναφέρθηκαν στον Πίνακα 13. Από αυτές θα εξαιρεθούν τα σημεία αποθήκευσης της Πτολεμαΐδας και του Κατάκολου, καθώς για την Πτολεμαΐδα δεν υπάρχουν δεδομένα αναφορικά με την αποθηκευτική ικανότητα της περιοχής, ενώ το Κατάκολο έχει μικρή αποθηκευτική ικανότητα (3,2 MtCO₂), γεγονός που καθιστά μη βιώσιμη την διάρκεια ζωής μίας μονάδας DAC στην περιοχή αυτή. Η αξιολόγηση που θα ακολουθήσει είναι οικονομικής φύσεως και θα βασιστεί στα Σχήματα 41 και 42. Κατά συνέπεια, θα προκύψουν δύο σενάρια, με δύο διαφορετικές τιμές κόστους ανά περιοχή. Στο πρώτο σενάριο, το βραχυπρόθεσμο (Σχήμα 41), εμφανίζονται οι τιμές για τα ήδη προγραμματισμένα έργα αποθήκευσης με αποτέλεσμα οι τιμές να είναι υψηλές ανά τόνο CO₂. Στο δεύτερο σενάριο, το μακροπρόθεσμο (Σχήμα 42), εμφανίζονται οι τιμές για περιοχές με χωρητικότητα αποθήκευσης άνω των 100 MtCO₂ και αποτελεί ένα πιο υποθετικό και αισιόδοξο σενάριο, με αποτέλεσμα οι τιμές αποθήκευσης ανά τόνο CO₂ να είναι μειωμένες συγκριτικά με το πρώτο σενάριο.

Για τον υπολογισμό του κόστους μεταφοράς και αποθήκευσης σε μία περιοχή, θα χρησιμοποιηθεί η εκάστοτε τιμή από τα σχήματα, η οποία θα πολλαπλασιαστεί με την δυναμικότητα της μονάδας DAC, δηλαδή με 360.000 tCO₂. Για παράδειγμα, στην πετρελαιοπηγή του Πρίνου, στην Θάσο, το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης υπολογίζεται ως εξής:

- Κόστος αποθήκευσης (Πρίνος - βραχυπρόθεσμο σενάριο): $S_{(Πρίνος),short} = 21 \frac{\text{€}}{tCO_2} \cdot 360.000 \frac{tCO_2}{\text{έτος} \cdot \text{μονάδα}} \rightarrow$

$$S_{(Πρίνος)} = 7.560.000 \frac{\text{€}}{\text{έτος} \cdot \text{μονάδα}}$$

- Κόστος αποθήκευσης (Πρίνος - μακροπρόθεσμο σενάριο): $S_{(Πρίνος),long} = 18 \frac{\text{€}}{tCO_2} \cdot 360.000 \frac{tCO_2}{\text{έτος} \cdot \text{μονάδα}} \rightarrow$

$$S_{(Πρίνος)} = 6.480.000 \frac{\text{€}}{\text{έτος} \cdot \text{μονάδα}}$$

Με τον ίδιο τρόπο, υπολογίζονται τα κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης για τις υπόλοιπες εξεταζόμενες περιοχές. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 19) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα. Τέλος, στα Σχήματα 47 και 48 φαίνονται οι πιθανές περιοχές αποθήκευσης στον χάρτη για τα δύο σενάρια. Σημειώνεται ότι, για της περιοχές: Μεσοελληνική κοιλάτητα, Λουδίας/Αγριοσυκιά, Αλεξάνδρεια και Βόλος, δίνεται η μέση τιμή του εύρους που ορίζει το Σχήμα 47.

Πίνακας 19: Κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης ανά περιοχή

Περιοχή	Κόστος (€/έτος)	
	Βραχυπρόθεσμο σενάριο	Μακροπρόθεσμο σενάριο
Πρίνος	7.560.000	6.480.000
Καλλιράχη	7.560.000	6.480.000
Μεσοελληνική κοιλάτητα	20.340.000	6.840.000
Λουδίας/Αγριοσυκιά	16.020.000	6.840.000
Αλεξάνδρεια	16.020.000	6.840.000
Βόλος	16.380.000	6.840.000



Σχήμα 47: Πιθανές περιοχές αποθήκευσης και δυνητικά κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης, βραχυπρόθεσμο σενάριο.



Σχήμα 48: Πιθανές περιοχές αποθήκευσης και δυνητικά κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης, μακροπρόθεσμο σενάριο.

5.6 Επιλογή τοποθεσίας εγκατάστασης των μονάδων

Η τεχνολογία DAC λόγω του ότι δεσμεύει το ατμοσφαιρικό CO₂ επιτρέπει την τοποθέτηση των μονάδων θεωρητικά σε οποιοδήποτε σημείο της χώρας προσφέροντας αρκετή ευελιξία κατά την επιλογή του χώρου εγκατάστασης. Ωστόσο, είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί μια τυπική διαδικασία χωροθέτησης με σκοπό να επιλεγούν δύο κατάλληλες τοποθεσίες οι οποίες θα εξυπηρετούν καλύτερα τις ανάγκες των εγκαταστάσεων. Για τον λόγο αυτό, η τοποθέτηση θα επιλεγεί βάσει των παρακάτω παραγόντων:

- Διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση
- Απόσταση από γεωθερμικά πεδία
- Απόσταση από χώρους υπόγειας αποθήκευσης

Στόχος της χωροθέτησης των μονάδων DAC είναι η τοποθέτησή τους σε περιοχές με αρκετό χώρο (π.χ. πεδιάδες) προς αξιοποίηση και με δυνατότητες επέκτασης της δυναμικότητας των μονάδων. Παράλληλα, παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή τοποθεσίας αποτελεί η απόσταση από γεωθερμικά πεδία, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ενέργειας και τα κόστη μεταφοράς της ενέργειας. Τέλος, ιδιαίτερο ρόλο στην τοποθέτηση των μονάδων διαδραματίζει η τοποθεσία αποθήκευσης του δεσμευμένου CO₂, καθώς αποτελεί σημαντικό παράγοντα κόστους.

5.6.1 Διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση

Μία εγκατάσταση DAC, απαιτεί αρκετά λιγότερο χώρο ανά δεσμευμένο tCO₂ σε σχέση με άλλες τεχνολογίες απομάκρυνσης CO₂ (όπως π.χ. η αναδάσωση). Εφόσον, στην παρούσα εργασία εξετάζεται μόνο ο χώρος της εγκατάστασης DAC, προκύπτει ότι μία μονάδα της εξεταζόμενης κλίμακας απαιτεί περίπου 0,2 km², (Institute, 2021) έως 0,5 km², (Lebling et al., 2022). Παράλληλα, οι Mihrimah Ozkan κ.α., (Ozkan et al., 2022), υποστηρίζουν ότι μία μονάδα DAC κλίμακας 1MtCO₂ απαιτεί περίπου 0,2 km². Τέλος συλλέχθηκαν από την βιβλιογραφία οι παρακάτω πίνακες (Πίνακας 20 και 21):

Πίνακας 20: Απαιτήσεις σε έκταση γης για μονάδα DAC, (Institute, 2021)

Τεχνολογία	Απαιτούμενη περιοχή (km ²) για δέσμευση 1MtCO ₂
L-DAC + Φ.Α. με δέσμευση + αποθήκευση	0,007-0,4
L-DAC + Φωτοβολταϊκά	1,4-1,8
L-DAC + Γεωθερμία	0,2-0,6
S-DAC + Φωτοβολταϊκά	1,6-2
S-DAC + Γεωθερμία	0,2
Αναδάσωση	862

Sources: NASEM 2019, Keith et al. 2018, Landon et al. 2017, U.S. DOE 2019, Beuttler et al. 2019; reforestation numbers based on Cook Patton et al. 2020.



WORLD RESOURCES INSTITUTE

2021.30

Πίνακας 21: Συνολική έκταση γης για διαφορετικούς συνδυασμούς συστημάτων DAC και πηγών ενέργειας, (Lebling et al., 2022)

Σύστημα DAC και πηγή ενέργειας	Έκταση μονάδας DAC (km ²)	Έκταση πηγής ενέργειας (km ²)	Συνολική έκταση γης για μονάδα 1MtCO ₂ / έτος (km ²)
L-DAC + Φ.Α. + αποθήκευση	0,4		0,4
L-DAC + Φ.Α. + αποθήκευση + Φωτοβολταϊκά	0,4	7,1	7,5
L-DAC + Φ.Α. + αποθήκευση + Γεωθερμία	0,4	1,5	1,9
L-DAC + Φ.Α. + αποθήκευση + Ανεμογεννήτριες	0,4	13,6	14,00
S-DAC + Φ.Α. + αποθήκευση	0,5		0,5
S-DAC + Φωτοβολταϊκά	0,5	34,2	34,7
S-DAC + Γεωθερμία	0,5	7	7,5
S-DAC + Ανεμογεννήτριες	0,5	65,6	66,0

Sources: Carbon Engineering 2020; Stevens et al. 2017; Beuttler et al. 2019; Keith et al. 2018; Uzor 2022; U.S. DOE n.d.; Merrill 2021



WORLD RESOURCES INSTITUTE

Βάσει των πινάκων, και μεταξύ των τιμών 0,2 και 0,5 km², επιλέγεται η τιμή 0,5 km²/MtCO₂ για λόγους ασφάλειας καθώς είναι προτιμότερο να υπερδιαστασιοποιηθεί η εγκατάσταση ώστε να υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης σε μεταγενέστερες μελέτες. Προκύπτει ότι οι μονάδες που θα εγκατασταθούν απαιτούν 0.18 km²/μονάδα.

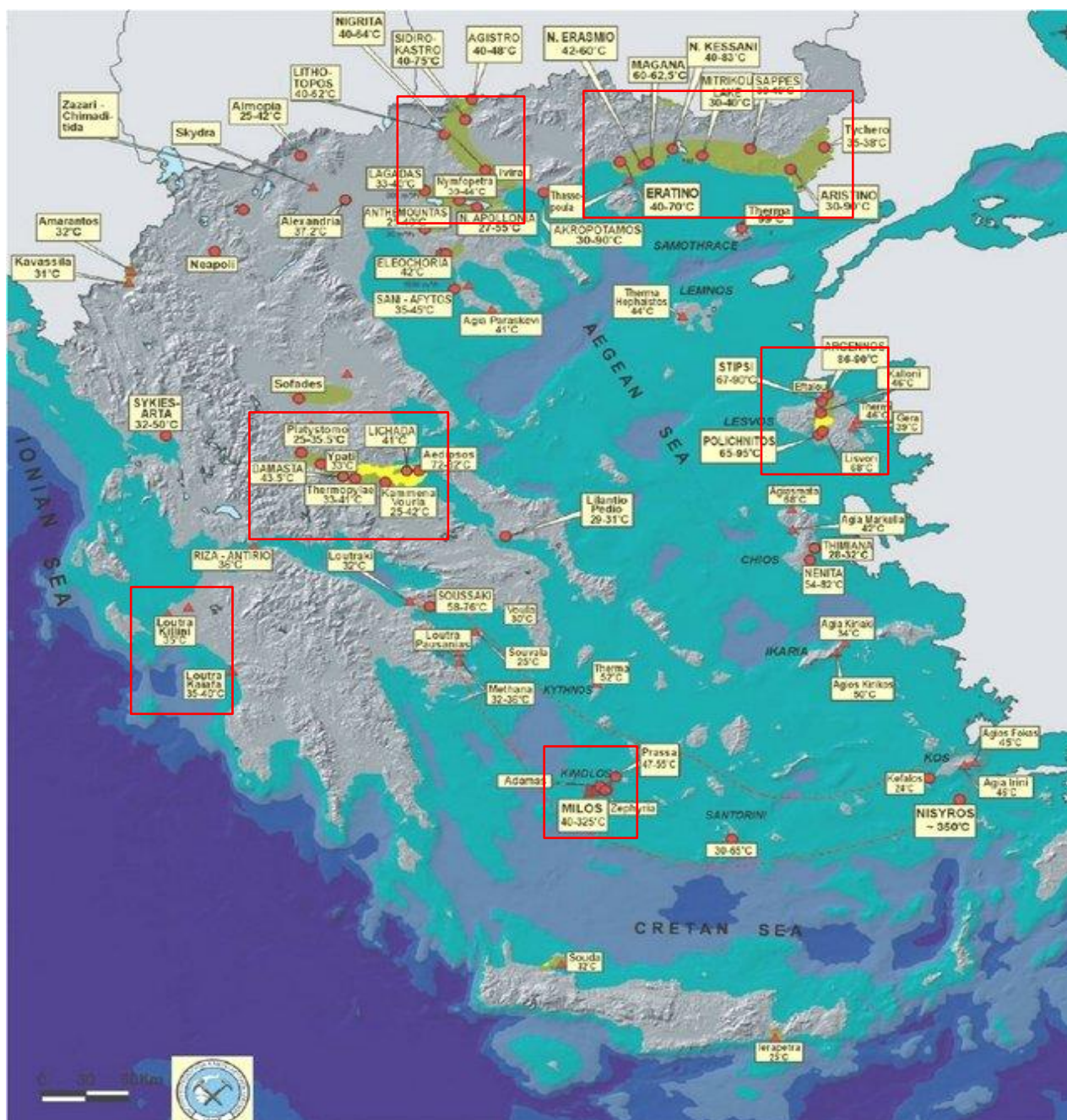
Ιδανικά, η περιοχή εγκατάστασης των μονάδων πρέπει να αποτελεί πεδιάδα με άφθονο χώρο για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία της δέσμευσης του CO₂. Για τον λόγο αυτό παρατίθεται ο γεωμορφολογικός χάρτης της Ελλάδος (Σχήμα 49) στον οποίο σημειώνονται με ορθογώνιο σχήμα οι καταλληλότερες περιοχές για την τοποθέτηση των μονάδων.



Σχήμα 49: Γεωμορφολογικός χάρτης Ελλάδας, (Σαλονικίδης, 2018).

5.6.2 Απόσταση από γεωθερμικά πεδία

Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι η γεωθερμική ενέργεια συμπεριλαμβάνεται στην εθνική στρατηγική για την ενέργεια και το κλίμα (Ε.Σ.Ε.Κ.) και μέχρι το 2030 η Ελλάδα προβλέπει την παραγωγή 0,1 GW ενέργειας από γεωθερμία, (Μαριάννα Τζαννέ, 2023). Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 50) φαίνονται τα γεωθερμικά πεδία της Ελλάδος, ενώ σε ορθογώνια βρίσκονται τα πιθανά σημεία τοποθέτησης των μονάδων DAC.



Σχήμα 50: Γεωθερμικά πεδία και περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος στην Ελλάδα (Andritsos et al., 2010).

5.6.3 Απόσταση από χώρους υπόγειας αποθήκευσης

Πέρα από την απόσταση από γεωθερμικά πεδία, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν και η απόσταση από χώρους υπόγειας αποθήκευσης με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν τα κόστη μεταφοράς του δεσμευμένου CO₂ από την μονάδα DAC μέχρι τον τελικό τόπο αποθήκευσης τους. Οι δυνητικές περιοχές αποθήκευσης είναι σημειωμένες στα Σχήματα 47 και 48 του Υποκεφαλαίου 5.5.

Συγκρίνοντας τις επιλεγμένες περιοχές των παραπάνω σχημάτων (Σχήμα 47-48, 49 και 50) σε συνδυασμό με τα κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης ανά περιοχή (Πίνακας αποφασίζονται οι τελικές τοποθεσίες εγκατάστασης των μονάδων οι οποίες είναι οι εξής: Η πρώτη μονάδα θα εγκατασταθεί δυτικά της Καβάλας καθώς υπάρχει ο απαραίτητος χώρος, τα γεωθερμικά πεδία Ερατεινό και Ν. Εράσμιο μπορούν να καλύπτουν της ανάγκες σε γεωθερμία και η αποθήκευση θα πραγματοποιείται στο νησί της Θάσου, στην περιοχή του Πρίνου, η οποία έχει χαμηλό κόστος αποθήκευσης. Η δεύτερη μονάδα θα τοποθετηθεί στην πεδιάδα μεταξύ Βόλου, Καρδίτσας και Λαμίας, η οποία έχει γεωθερμικά πεδία (Θερμοπύλες, Πλατύστομο) καθώς και χώρο αποθήκευσης στην περιοχή του Βόλου.

5.7 Απόσβεση επένδυσης

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης και την εύρεση του νεκρού σημείου (break-even point) της επένδυσης θα συμπεριληφθούν όλα τα κόστη που προέκυψαν κατά την ανάλυση στα παραπάνω Υποκεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα θα αθροιστούν τα κόστη κεφαλαίου και κόστη Α.Π.Ε. ενώ το λειτουργικό κόστος της μονάδας DAC και των μονάδων Α.Π.Ε. καθώς και το κόστος αποθήκευσης και μεταφοράς θα υπολογιστούν για διάστημα 10 ετών. Επιπλέον, σύμφωνα με το Σχήμα 5, το κόστος του CO₂ το έτος 2030 θα είναι περίπου 100 €/tCO₂ όπως ορίζει το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών. Άρα οι μονάδες θα πουλούν το δεσμευμένο CO₂ σύμφωνα με την τιμή αυτή. Σημειώνεται πως για τον υπολογισμό του κόστους αποθήκευσης θα χρησιμοποιηθεί η τιμή για τον Πρίνο κατά το μακροπρόθεσμο σενάριο. Παρακάτω πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για την εύρεση του νεκρού σημείου της επένδυσης:

Στην περίπτωση των S-DAC:

- Σταθερό κόστος (Fixed Cost): $FC_{S-DAC} = \text{Κόστος κεφαλαίου DAC} + \text{Κόστος κεφαλαίου A.Π.Ε.} = 68.040.000 \text{ €} + 54.452.000 \text{ €} + 53.917.000 \text{ €} + 5.010.000 \text{ €} \rightarrow$

$$FC_{S-DAC} = 181.419.000 \text{ €}$$

- Μεταβλητά κόστη (Variable Costs): $VC_{S-DAC} = \text{Λειτουργικό κόστος DAC} + \text{Λειτουργικό κόστος A.Π.Ε.} + \text{Κόστος αποθήκευσης} = 2.721.600 \text{ €} + 2.268.000 \text{ €} + 6.480.000 \text{ €} \rightarrow$

$$VC_{S-DAC} = 11.469.600 \frac{\text{€}}{\text{έτος}}$$

- Έσοδα (Profit): $P_{S-DAC} = 100 \frac{\text{€}}{tCO_2} 360.000 \frac{tCO_2}{\text{έτος}} \rightarrow$

$$P_{S-DAC} = 36.000.000 \frac{\text{€}}{\text{έτος}}$$

- Νεκρό σημείο (Break Even Point): $BEP_{S-DAC} = \frac{\text{Σταθερό κόστος}}{\text{Έσοδα} - \text{Μεταβλητά κόστη}} = \frac{181.419.000 \text{ €}}{36.000.000 \frac{\text{€}}{\text{έτος}} - 11.469.600 \frac{\text{€}}{\text{έτος}}} \rightarrow$

$$BEP_{S-DAC} = 7,4 \text{ έτη}$$

Στην περίπτωση των L-DAC:

- Σταθερό κόστος (Fixed Cost): $FC_{S-DAC} = \text{Κόστος κεφαλαίου DAC} + \text{Κόστος κεφαλαίου A.Π.Ε.} = 75.960.000 \text{ €} + 46.626.700 \text{ €} + 57.710.700 \text{ €} + 4.290.000 \text{ €} \rightarrow$

$$FC_{S-DAC} = 184.587.400 \text{ €}$$

- Μεταβλητά κόστη (Variable Costs): $VC_{S-DAC} = \text{Λειτουργικό κόστος DAC} + \text{Λειτουργικό κόστος A.Π.Ε.} + \text{Κόστος αποθήκευσης} = 3.038.400 \text{ €} + 2.173.000 \text{ €} + 6.480.000 \text{ €} \rightarrow$

$$VC_{S-DAC} = 11.691.400 \frac{\text{€}}{\text{έτος}}$$

- Έσοδα (Profit): $P_{S-DAC} = 100 \frac{\text{€}}{tCO_2} 360.000 \frac{tCO_2}{\text{έτος}} \rightarrow$

$$P_{S-DAC} = 36.000.000 \frac{\text{€}}{\text{έτος}}$$

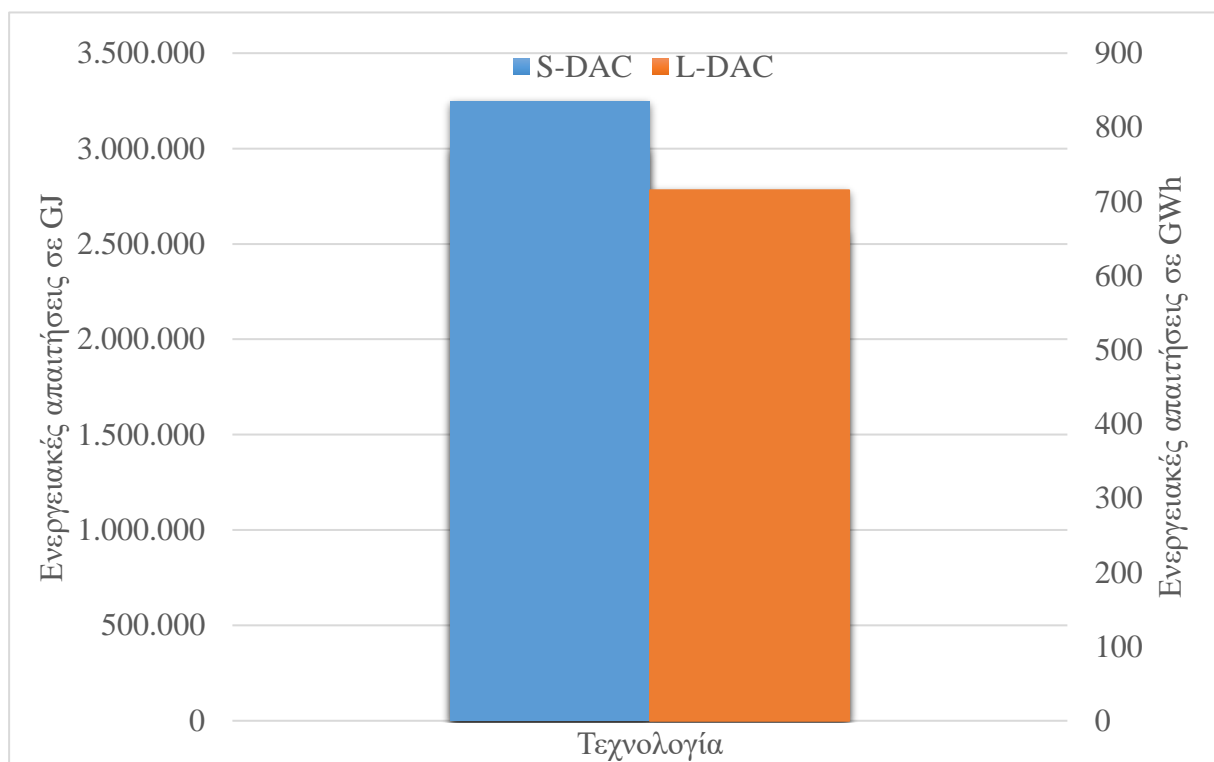
- Νεκρό σημείο (Break Even Point): $BEP_{S-DAC} = \frac{\text{Σταθερό κόστος}}{\text{Έσοδα} - \text{Μεταβλητά κόστη}} = \frac{184.587.400 \text{ €}}{36.000.000 \frac{\text{€}}{\text{έτος}} - 11.691.400 \frac{\text{€}}{\text{έτος}}} \rightarrow$

$$BEP_{S-DAC} = 7,6 \text{ έτη}$$

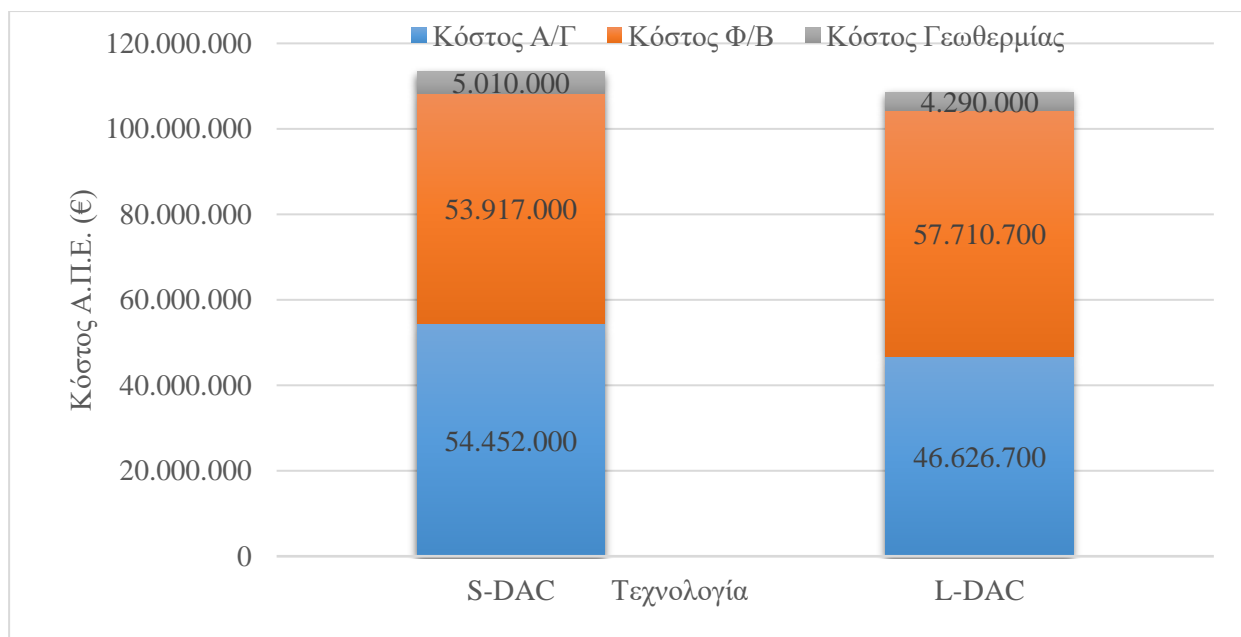
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

6.1 Αποτελέσματα και συμπεράσματα

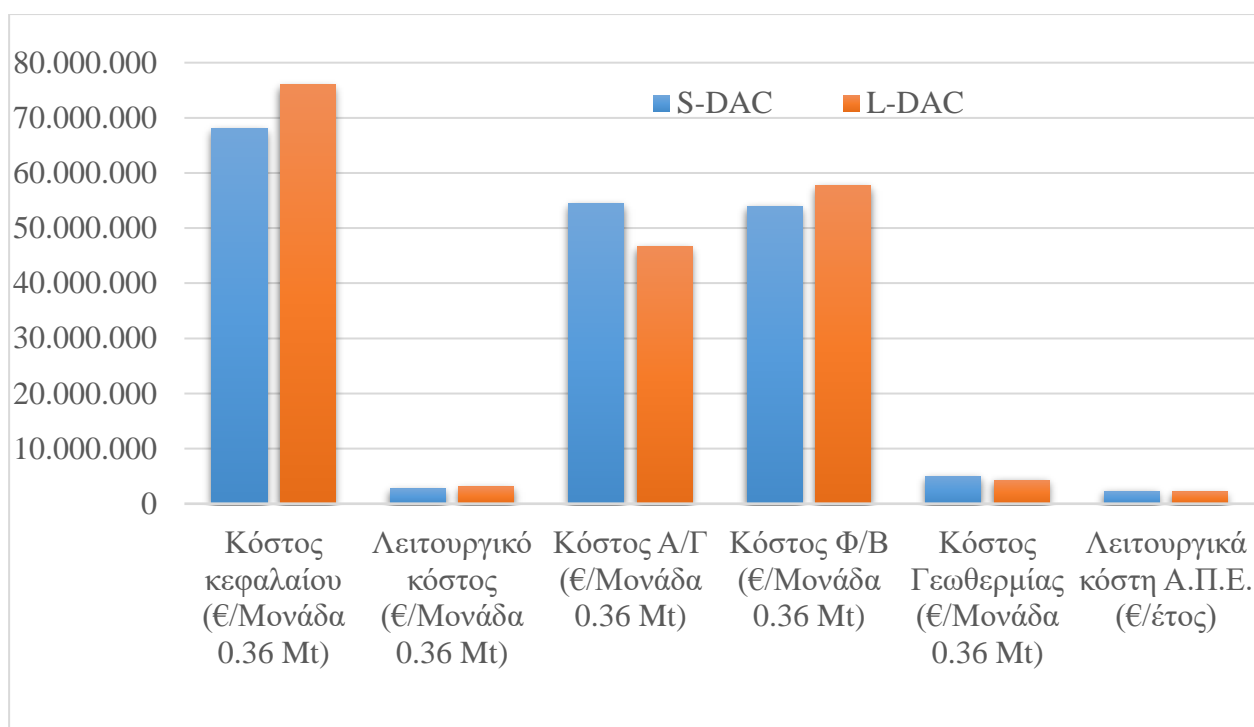
Στην παραπάνω μελέτη περίπτωσης, αφού τέθηκαν οι κατάλληλες παραδοχές για να διευκολυνθεί το κομμάτι της έρευνας, προέκυψαν αποτελέσματα αναφορικά με τα κόστη των τεχνολογιών DAC, των μονάδων Α.Π.Ε. και της μεταφοράς και αποθήκευσης του δεσμευμένου CO₂, ενώ παράλληλα εξετάστηκαν και πιθανές περιοχές υπόγειας αποθήκευσης του CO₂ στην Ελλάδα. Στα παρακάτω σχήματα συγκεντρώνονται γραφικά τα αποτελέσματα της μελέτης.



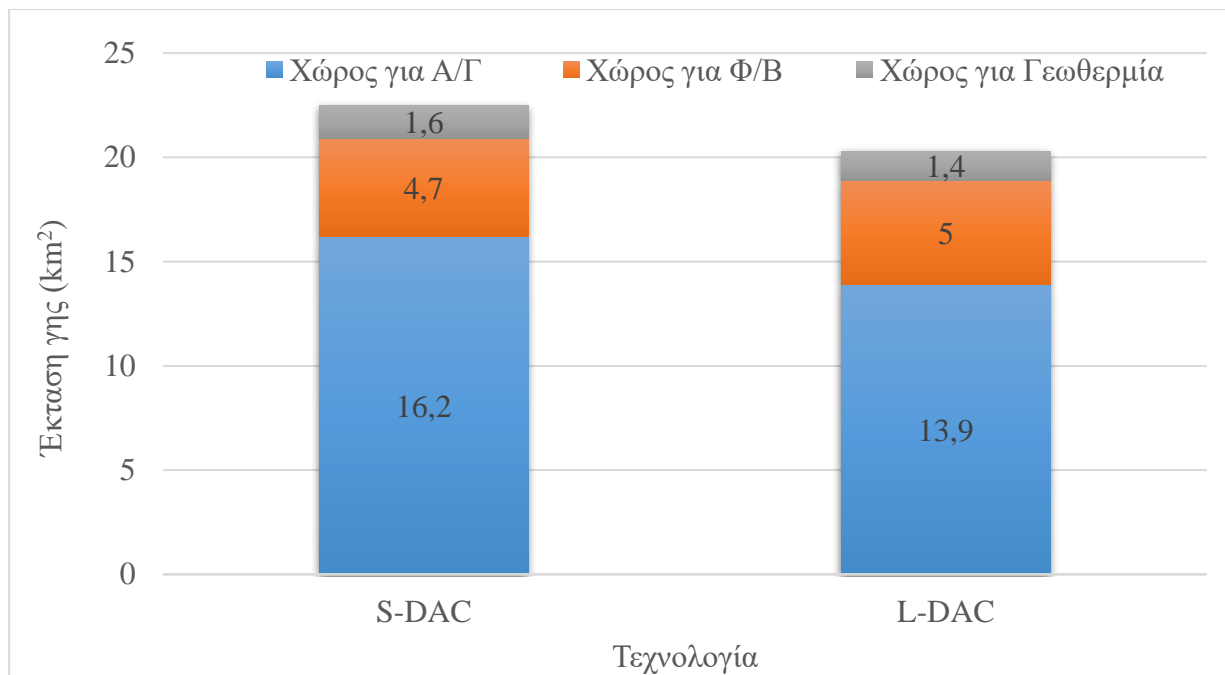
Σχήμα 51: Ενεργειακές απαιτήσεις τεχνολογιών S-DAC, L-DAC.



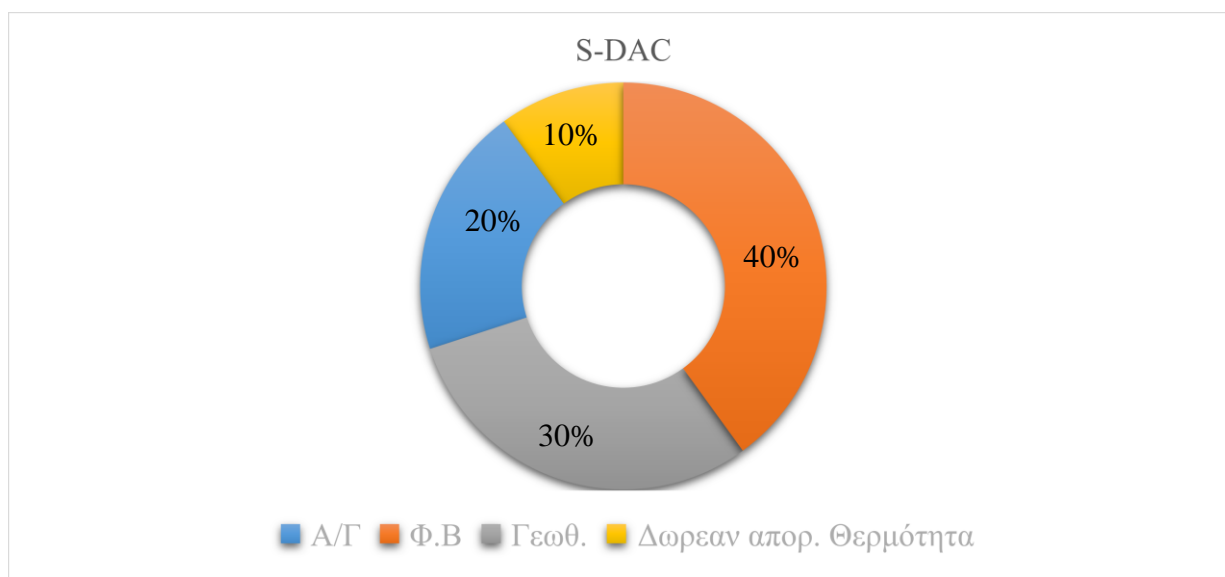
Σχήμα 52: Κόστη Α.Π.Ε. ανά τεχνολογία DAC.



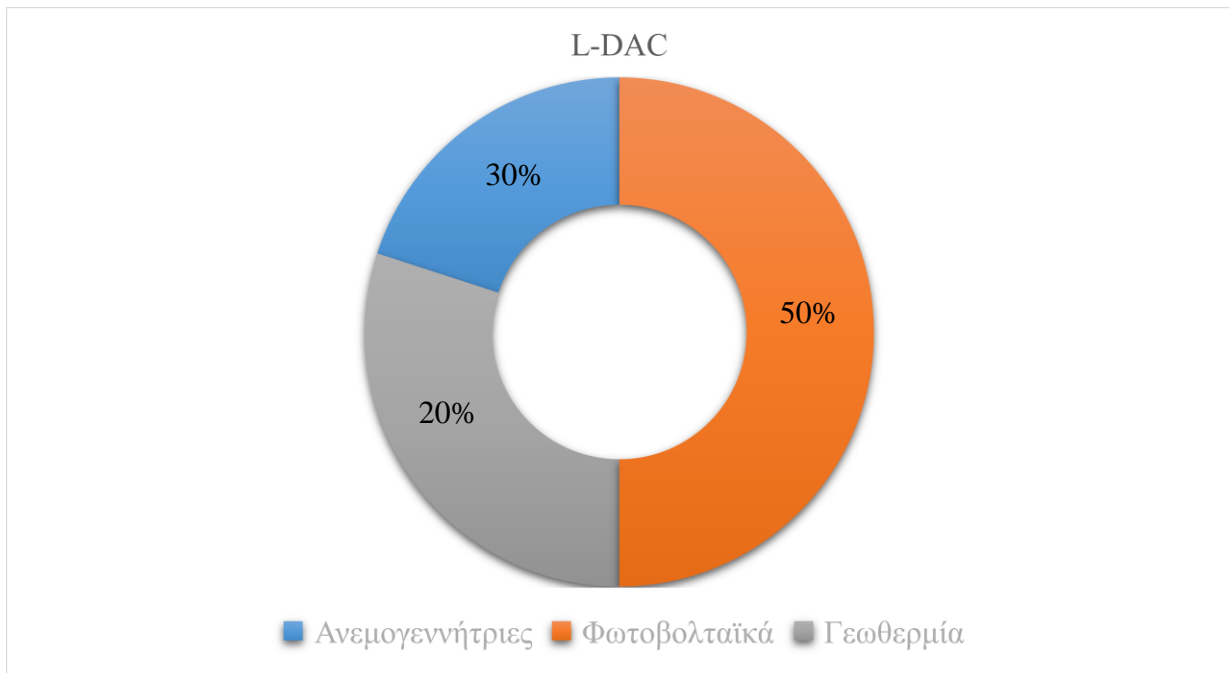
Σχήμα 53: Οικονομικά στοιχεία μονάδων DAC και μονάδων Α.Π.Ε.



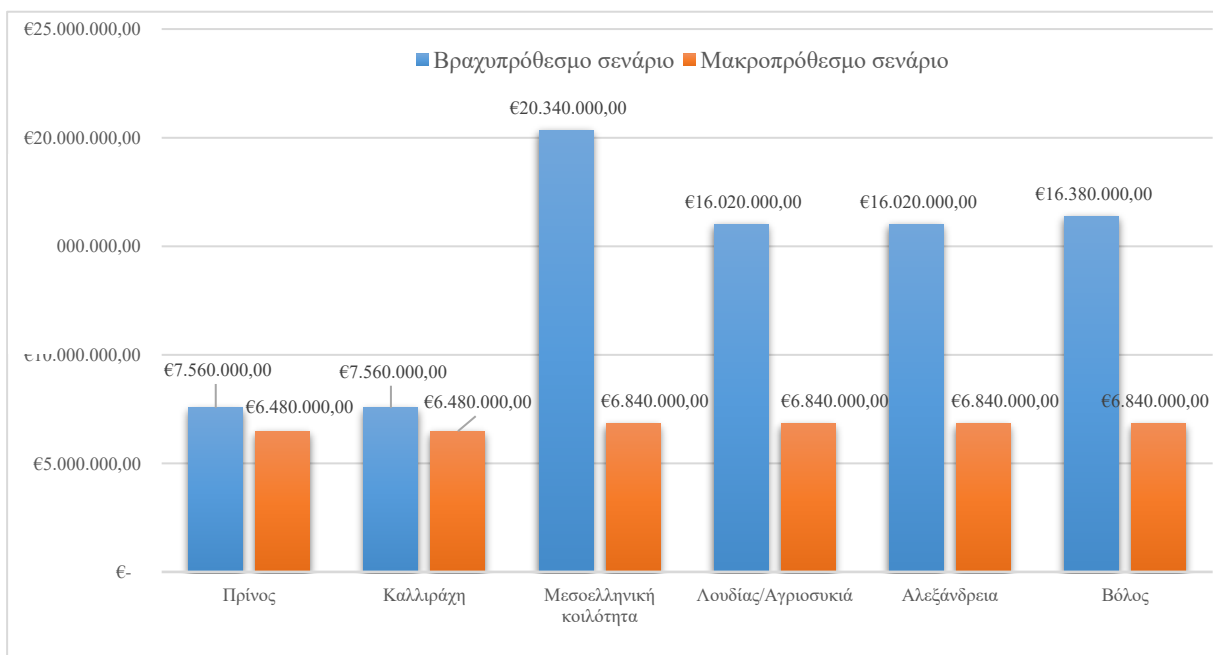
Σχήμα 54: Χωροθέτηση μονάδων Α.Π.Ε.



Σχήμα 55: Ποσοστά συμμετοχής κάθε τεχνολογία Α.Π.Ε. στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μονάδας S-DAC.



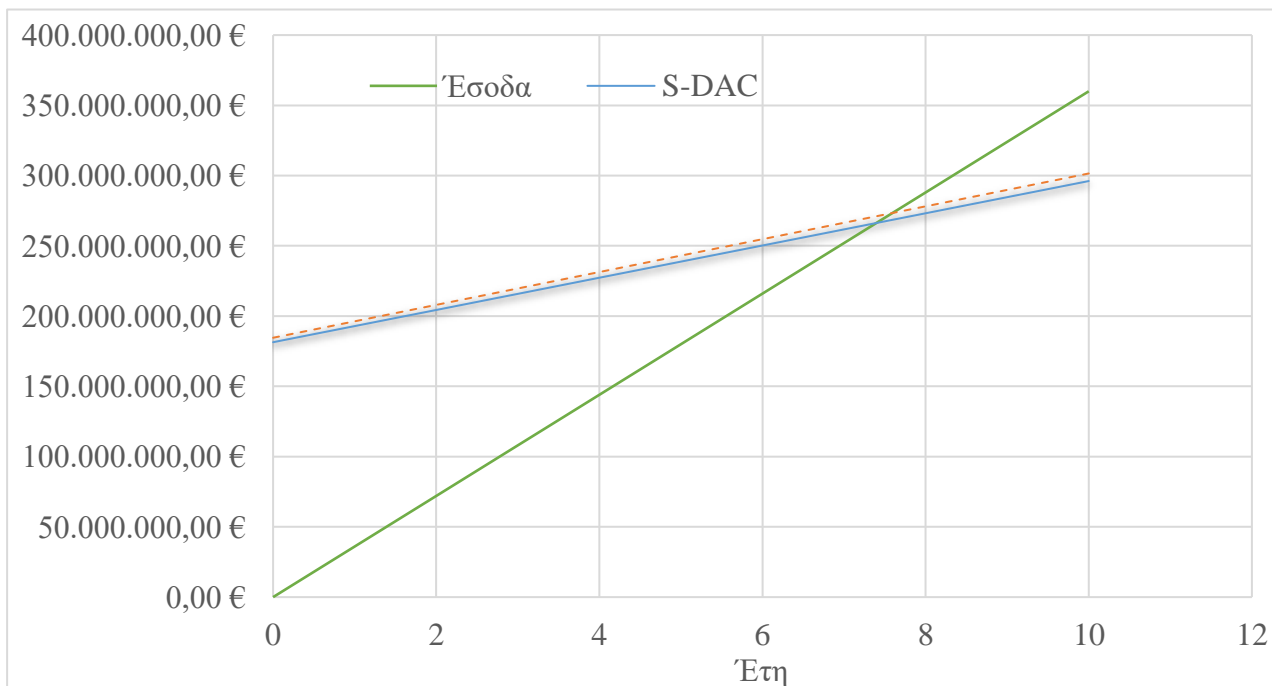
Σχήμα 56: Ποσοστά συμμετοχής κάθε τεχνολογία Α.Π.Ε. στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μονάδας L-DAC.



Σχήμα 57: Κόστη μεταφοράς και αποθήκευσης ανά σενάριο.



Σχήμα 58: Τελικές περιοχές εγκατάστασης μονάδων DAC.



Σχήμα 59: Ανάλυση νεκρού σημείου επένδυσης.

Σύμφωνα με το σχήμα 51 παρατηρείται ότι η τεχνολογία S-DAC έχει υψηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις συγκριτικά με την τεχνολογία L-DAC. Αυτό κατά συνέπεια θα επιφέρει μεγαλύτερες τιμές κόστους κεφαλαίου (Σχήμα 52) για τις μονάδες Α.Π.Ε. στην περίπτωση των S-DAC. Ωστόσο όπως φαίνεται στο Σχήμα 53, το κόστος κεφαλαίου της τεχνολογίας L-DAC είναι υψηλότερο κάτι που δικαιολογείται από τις τιμές κόστους ανά τόνο δεσμευμένου CO₂ που επιλέχθηκαν για το έτος 2030 βάσει του Πίνακα 7. Στο σχήμα 54, γίνεται αντιληπτό ότι οι ανεμογεννήτριες απαιτούν την περισσότερη έκταση γης για την εγκατάστασή τους, ενώ σειρά έχουν τα φωτοβολταϊκά και τέλος η γεωθερμία. Επιπλέον, στο ίδιο διάγραμμα αξίζει να σημειωθεί, ότι η τεχνολογία S-DAC θα χρειαστεί περισσότερο χώρο για την εγκατάσταση των μονάδων Α.Π.Ε. Επιπλέον, συγκρίνοντας τα διαγράμματα 55 και 56 φαίνεται ότι η τεχνολογία S-DAC έχει ένα ποσοστό δωρεάν απορριπτόμενης θερμότητας το οποίο είναι ανέφικτο να υπάρχει στην τεχνολογία L-DAC, ενώ και για τις δύο τεχνολογίες το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας καλύπτεται από φωτοβολταϊκά. Στο Σχήμα 57 αναγράφονται τα κόστη για την μεταφορά και αποθήκευση του δεσμευμένου CO₂, σύμφωνα με το οποίο, φθηνότερες περιοχές είναι ο Πρίνος και η Καλλιράχη, και πιο κοστοβόρα η Μεσοελληνική κοιλότητα (βραχυπρόθεσμο σενάριο. Στο μακροπρόθεσμο σενάριο, πάλι οικονομικότερες περιοχές είναι ο Πρίνος και η Καλλιράχη, ενώ οι υπόλοιπες εμφανίζουν την ίδια τιμή. Κατά συνέπεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 58 ορίζονται ως καταλληλότερες περιοχές για την εγκατάσταση των δύο μονάδων DAC, οι περιοχές του Βόλου και της Καβάλας (η αποθήκευση θα πραγματοποιείται στον Πρίνο). Τέλος, στο Σχήμα 59, παρατηρείται ότι και οι δύο τεχνολογίες φτάνουν το νεκρό σημείο επένδυσης την ίδια περίοδο, με την τεχνολογία S-DAC να προηγείται για 0.2 έτη.

6.2 Επίλογος

Ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής αποτελεί μονόδρομο για την συνέχιση της βιωσιμότητας του πλανήτη και αποτελεί ένα θέμα στο οποίο οφείλουν να συμβάλλουν όλες οι χώρες ανεξαρτήτου πολιτικής και οικονομικών φραγμών. Η Ελλάδα ως μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης πρέπει να συμβάλλει στην τήρηση των υπογραφέντων συμφωνιών (Συμφωνία του Παρισιού) και να τηρήσει τα απαραίτητα όρια εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Η τεχνολογία DAC έχοντας παρουσιάσει θετικά αποτελέσματα στην μείωση των εκπομπών CO₂ αποτελεί πλέον μία τεχνολογία η οποία πρέπει να τεθεί υπό διερεύνηση και να τοποθετηθεί στο χρονοδιάγραμμα των δράσεων καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής. Είναι προφανές, πως σαν τεχνολογία βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο, ωστόσο τόσο οι πιλοτικές

μονάδες όσο και οι εμπορικά λειτουργικές αποδεικνύουν συνεχώς την δυναμική τους ενώ παράλληλα οι έρευνες κατοχυρώνουν ότι στο μέλλον τα DAC θα αποτελούν μια οικονομικά και ενεργειακά βιώσιμη τεχνολογία δέσμευσης CO₂.

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν οι δύο βασικές τεχνολογίες DAC, αυτή των στερεών απορροφητικών (S-DAC) και αυτή των υγρών διαλυτών (L-DAC). Οι δύο αυτές τεχνολογίες αξιολογήθηκαν βάσει οικονομικών και ενεργειακών κριτηρίων, με στόχο την τοποθέτηση δύο για την δέσμευση ενός ποσού των εκπομπών της Ελλάδος, κατά το έτος 2030. Κατόπιν πραγματοποιήθηκε μία οικονομική αξιολόγηση και χωροθέτηση των μονάδων Α.Π.Ε. που θα καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες των μονάδων DAC. Επιπλέον αξιολογήθηκαν οι χώροι αποθήκευσης CO₂ που διαθέτει η χώρα βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε μία μελέτη χωροθέτησης, με σκοπό να επιλεγεί η κατάλληλη περιοχή και να εξυπηρετούνται οι ανάγκες για αποθήκευση και η χρήση γεωθερμίας. Τέλος, η μελέτη ολοκληρώθηκε με την ανάλυση νεκρού σημείου των δύο τεχνολογιών DAC συμπεριλαμβάνοντας όλα τα κόστη που αναλύθηκαν. Σημειώνεται πως κατά την μελέτη, πραγματοποιήθηκαν αρκετές παραδοχές ώστε να απλουστευτεί η έρευνα. Για τον λόγο αυτό, αναφέρεται πως η παρούσα εργασία αποτελεί την αφετηρία για την μελέτη των DAC στον Ελλαδικό χώρο και όχι μία συνολική έρευνα επιλογής τεχνολογίας και χωροθέτησης καθώς χρησιμοποιήθηκαν παραδοχές και προβλέψεις από άλλες έρευνες.

Βιβλιογραφία

- 1PointFive, 2023. DAC Technology [WWW Document]. 1PointFive. URL <https://www.1pointfive.com/dac-technology> (accessed 6.21.23).
- Ali, M., Jha, N.K., Pal, N., Keshavarz, A., Hoteit, H., Sarmadivaleh, M., 2022. Recent advances in carbon dioxide geological storage, experimental procedures, influencing parameters, and future outlook. *Earth-Science Reviews* 225, 103895. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103895>
- alison, 2019. Carbon Dioxide Measurement | How To [WWW Document]. Edinburgh Sensors. URL <https://edinburghsensors.com/news-and-events/carbon-dioxide-measurement-using-a-carbon-dioxide-sensor/> (accessed 6.16.23).
- Anderson, K., Peters, G., 2016. The trouble with negative emissions. *Science* 354, 182–183. <https://doi.org/10.1126/science.aah4567>
- Andritsos, N., Arvanitis, A., Papachristou, M., Fytikas, M., Dalampakis, P., 2010. Geothermal Activities in Greece During 2005-2009.
- Arvanitis, A., Koutsovitis, P., Koukouzas, N., Tyrologou, P., Karapanos, D., Karkalis, C., Pomonis, P., 2020. Potential Sites for Underground Energy and CO₂ Storage in Greece: A Geological and Petrological Approach. *Energies* 13, 2707. <https://doi.org/10.3390/en13112707>
- Bawden, T., 2021. Mechanical trees that suck CO₂ out of the atmosphere set for major first trial [WWW Document]. *inews.co.uk*. URL <https://inews.co.uk/news/environment/climate-change-mechanical-trees-suck-c02-out-atmosphere-trial-1361189> (accessed 6.21.23).
- Bert Metz, 2005. Carbon Dioxide Capture and Storage — IPCC. URL <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/> (accessed 3.17.23).
- Beuttler, C., Charles, L., Wurzbacher, J., 2019. The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions. *Frontiers in Climate* 1.
- Bodor, M., Vlad, M., Balta, S., 2011. Latest work on mineral carbonation of steelmaking slags for carbon dioxide trapping.
- Caldera, U., Breyer, C., 2017. Learning Curve for Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants: Capital Cost Trend of the Past, Present, and Future. *Water Resources Research* 53, 10523–10538. <https://doi.org/10.1002/2017WR021402>
- Campbell, J.S., 2019. Decomposition of carbonates in capture of carbon dioxide from ambient air. University of British Columbia. <https://doi.org/10.14288/1.0387012>
- Carbon capture, utilisation and storage - Fuels & Technologies - IEA [WWW Document], 2023. URL <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage> (accessed 6.16.23).
- Carbon Dioxide | Center for Science Education [WWW Document], n.d. URL <https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/carbon-dioxide> (accessed 6.16.23).
- Carbon Engineering, 2023a. Carbon Engineering | Direct Air Capture of CO₂ | Home [WWW Document]. Carbon Engineering. URL <https://carbonengineering.com/> (accessed 6.21.23).
- Carbon Engineering, 2023b. The Story Behind Carbon Engineering [WWW Document]. Carbon Engineering. URL <https://carbonengineering.com/our-story/> (accessed 6.21.23).
- Carbon Engineering, n.d. The Story Behind Carbon Engineering [WWW Document]. Carbon Engineering. URL <https://carbonengineering.com/our-story/> (accessed 6.21.23).
- Castel, C., Bounaceur, R., Favre, E., 2021. Membrane Processes for Direct Carbon Dioxide Capture From Air: Possibilities and Limitations. *Frontiers in Chemical Engineering* 3.

- Castro-Muñoz, R., Zamidi Ahmad, M., Malankowska, M., Coronas, J., 2022. A new relevant membrane application: CO₂ direct air capture (DAC). *Chemical Engineering Journal* 446, 137047. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137047>
- Change, N.G.C., n.d. Carbon Dioxide Concentration | NASA Global Climate Change [WWW Document]. *Climate Change: Vital Signs of the Planet*. URL <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide> (accessed 6.16.23).
- Choi, S., Drese, J.H., Eisenberger, P.M., Jones, C.W., 2011. Application of amine-tethered solid sorbents for direct CO₂ capture from the ambient air. *Environmental science & technology* 45, 2420–2427.
- Clean Air Task Force, 2023. The cost of carbon capture and storage in Europe [WWW Document]. Clean Air Task Force. URL <https://www.catf.us/ccs-cost-tool/> (accessed 7.10.23).
- Climeworks, 2023. Journey toward net zero with Climeworks' carbon removal service [WWW Document]. URL <https://climeworks.com/> (accessed 6.21.23).
- Climeworks, 2021. Climeworks launches Orca, the world's largest DAC and storage plant [WWW Document]. URL <https://climeworks.com/news/climeworks-launches-orca> (accessed 6.21.23).
- Climeworks, 2015. Climeworks' first industrial-scale direct air capture plant in Hinwil [WWW Document]. URL <https://climeworks.com/news/climeworks-ag-builds-first-commercial-scale-co2-capture> (accessed 5.2.23).
- CO₂ Emissions in 2022 – Analysis [WWW Document], n.d. . IEA. URL <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022> (accessed 4.27.23).
- Dai, Y., Du, M.Q., Guo, F.Y., 2017. Current Situation and Development of CO₂ Gas Shielded Welding. *Technol. Constr. Mater. Decor.* 42, 176–177.
- Daniel, T., Masini, A., Milne, C., Nourshagh, N., Iranpour, C., Xuan, J., 2022. Techno-economic Analysis of Direct Air Carbon Capture with CO₂ Utilisation. *Carbon Capture Science & Technology* 2, 100025. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2021.100025>
- Didas, S.A., Choi, S., Chaikittisilp, W., Jones, C.W., 2015. Amine–Oxide Hybrid Materials for CO₂ Capture from Ambient Air. *Acc. Chem. Res.* 48, 2680–2687. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5b00284>
- Direct Air Capture – Analysis [WWW Document], 2022. . IEA. URL <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture> (accessed 3.30.23).
- Direct Air Capture – Analysis [WWW Document], n.d. . IEA. URL <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture> (accessed 5.2.23).
- Dustin Stolz, 2022. Going Blue: A review of direct air capture [WWW Document]. ADI Analytics. URL <https://adi-analytics.com/2022/10/14/going-blue-a-review-of-direct-air-capture/> (accessed 7.15.23).
- Dutcher, B., Fan, M., Russell, A.G., 2015. Amine-Based CO₂ Capture Technology Development from the Beginning of 2013—A Review. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 7, 2137–2148. <https://doi.org/10.1021/am507465f>
- Eli Kintisch, 2014. Can Sucking CO₂ Out of the Atmosphere Really Work? [WWW Document]. MIT Technology Review. URL <https://www.technologyreview.com/2014/10/07/171023/can-sucking-co2-out-of-the-atmosphere-really-work/> (accessed 5.28.23).
- EPRI, 2012. Land Use for Wind, Solar, and Geothermal Electricity Generation Facilities in the United States [WWW Document]. URL <https://www.epri.com/research/products/1023819> (accessed 7.12.23).
- Erans, M., S. Sanz-Pérez, E., P. Hanak, D., Clulow, Z., M. Reiner, D., A. Mutch, G., 2022. Direct air capture: process technology, techno-economic and socio-political

- challenges. *Energy & Environmental Science* 15, 1360–1405.
<https://doi.org/10.1039/D1EE03523A>
- European Institute of Innovation & Technology, 2020. EIT Climate-KIC supported Climeworks raises over €67 million to expand its carbon dioxide removal capacities [WWW Document]. European Institute of Innovation & Technology (EIT). URL <https://eit.europa.eu/news-events/news/eit-climate-kic-supported-climeworks-raises-over-eu67-million-expand-its-carbon> (accessed 5.2.23).
- European Parliament, 2021. Climate action in Greece: Latest state of play | Think Tank | European Parliament [WWW Document]. URL [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2021\)690685](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2021)690685) (accessed 7.4.23).
- Eurostat, 2022. EU economy greenhouse gas emissions in Q2 2022 [WWW Document]. URL <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20221115-2> (accessed 7.14.23).
- Executive summary – Direct Air Capture 2022 – Analysis [WWW Document], n.d. . IEA. URL <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture-2022/executive-summary> (accessed 5.27.23).
- Fasihi, M., Efimova, O., Breyer, C., 2019. Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production* 224, 957–980.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- François-Xavier Coudert, 2023. Zeolite. Wikipedia.
- FreeingEnergy, 2021. How many MWh of solar energy comes from a MW of solar panels? [WWW Document]. Freeing Energy. URL <https://www.freeingenergy.com/math/solar-pv-gwh-per-mw-power-energy-mwh-m147/> (accessed 7.11.23).
- Fu, L., Ren, Z., Si, W., Ma, Q., Huang, W., Liao, K., Huang, Z., Wang, Y., Li, J., Xu, P., 2022. Research progress on CO₂ capture and utilization technology. *Journal of CO₂ Utilization* 66, 102260. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260>
- Fujikawa, S., Selyanchyn, R., Kunitake, T., 2021. A new strategy for membrane-based direct air capture. *Polym J* 53, 111–119. <https://doi.org/10.1038/s41428-020-00429-z>
- Gallucci, M., 2021. The Carbon-Sucking Fans of West Texas: It’s not enough to slash greenhouse gas emissions. Experts say we need direct-air capture. *IEEE Spectrum* 58, 48–49. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2021.9311453>
- Gebald, C., Wurzbacher, J.A., Tingaut, P., Steinfeld, A., 2013. Stability of Amine-Functionalized Cellulose during Temperature-Vacuum-Swing Cycling for CO₂ Capture from Air. *Environ. Sci. Technol.* 47, 10063–10070.
<https://doi.org/10.1021/es401731p>
- Giving Green, 2022. Climeworks [WWW Document]. Giving Green. URL <https://www.givinggreen.earth/carbon-offsets-research/climeworks> (accessed 6.21.23).
- Global Thermostat [WWW Document], n.d. URL <https://www.globalthermostat.com/> (accessed 6.21.23).
- Godin, J., Liu, W., Ren, S., Xu, C.C., 2021. Advances in recovery and utilization of carbon dioxide: A brief review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9, 105644.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105644>
- Griffin, H., 2021. Carbon Engineering Innovation Centre Update [WWW Document]. Carbon Engineering. URL <https://carbonengineering.com/news-updates/carbon-engineering-innovation-centre-update-3/> (accessed 5.2.23).
- Griffin, H., 2020. Oxy Low Carbon Ventures, Rusheen Capital Management create development company 1PointFive to deploy Carbon Engineering’s Direct Air Capture technology [WWW Document]. Carbon Engineering. URL

- <https://carbonengineering.com/news-updates/new-development-company-1pointfive-formed/> (accessed 4.28.23).
- Holmes, G., Keith, D.W., 2012. An air–liquid contactor for large-scale capture of CO₂ from air. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 370, 4380–4403. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0137>
- Hribernik, A., 2015. CO₂ CAPTURE AND ITS INFLUENCE ON ENERGY AND ECONOMIC EFFICIENCY OF A COAL FIRED POWER PLANT. *Environmental engineering and management journal* 14, 925–934.
- Ian Tiseo, 2023a. Greece: carbon dioxide emissions 1970-2021 [WWW Document]. Statista. URL <https://www.statista.com/statistics/449732/co2-emissions-greece/> (accessed 4.28.23).
- Ian Tiseo, 2023b. ETS carbon price expectations by system 2022-2030 [WWW Document]. Statista. URL <https://www.statista.com/statistics/1334906/average-carbon-price-projections-worldwide-by-region/> (accessed 7.15.23).
- IEA, 2023. Carbon capture, utilisation and storage [WWW Document]. IEA. URL <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/capacity-of-large-scale-co2-capture-projects-current-and-planned-vs-the-net-zero-scenario-2020-2030> (accessed 4.27.23).
- IEA – International Energy Agency [WWW Document], n.d. . IEA. URL <https://www.iea.org> (accessed 6.16.23).
- Iijima, T., Yamaguchi, T., 2008. K₂CO₃-catalyzed direct synthesis of salicylic acid from phenol and supercritical CO₂. *Applied Catalysis A: General* 345, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2008.03.037>
- Institute, W.R., 2021. Direct Air Capture: Resource Considerations and Costs for Carbon Removal. *Impakter*. URL <https://impakter.com/direct-air-capture-resource-considerations-and-costs-for-carbon-removal/> (accessed 6.12.23).
- International Energy Agency, 2022. Direct Air Capture: A key technology for net zero. OECD. <https://doi.org/10.1787/bbd20707-en>
- IRENA, 2019a. Future of wind [WWW Document]. URL <https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind> (accessed 7.5.23).
- IRENA, 2019b. Future of Photovoltaic [WWW Document]. URL <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic> (accessed 7.5.23).
- Jeffrey Weir, 2023. Global Thermostat to Supply Equipment Needed to Remove Atmospheric CO₂ for HIF’s Haru Oni eFuels Pilot Plant [WWW Document]. PRWeb. URL https://www.prweb.com/releases/global_thermostat_to_supply_equipment_needed_to_remove_atmospheric_co2_for_hifs_haru_oni_efuels_pilot_plant/prweb17898480.htm (accessed 6.21.23).
- Jennifer L., J., 2022. How Direct Air Capture Works (And 4 Important Things About It) [WWW Document]. Carbon Credits. URL <https://carboncredits.com/how-direct-air-capture-works-and-4-important-things-about-it/> (accessed 3.31.23).
- John Baker, 2015. Market outlook: Out of thin air. ICIS Explore. URL <https://www.icis.com/explore/resources/news/2015/08/09/9911665/market-outlook-out-of-thin-air> (accessed 6.21.23).
- Joseph Alcamo/Jørgen E. Olesen, 2012. Climate and Climate Change, in: *Life in Europe Under Climate Change*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 21–47. <https://doi.org/10.1002/9781118279380.ch2>
- Kamkeng, A.D.N., Wang, M., Hu, J., Du, W., Qian, F., 2021. Transformation technologies for CO₂ utilisation: Current status, challenges and future prospects. *Chemical Engineering Journal* 409, 128138. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128138>

- Keith, D.W., 2000. GEOENGINEERING THE CLIMATE: History and Prospect. Annual Review of Energy and the Environment 25, 245–284. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.245>
- Keith, D.W., Holmes, G., St. Angelo, D., Heidel, K., 2018. A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. Joule 2, 1573–1594. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.05.006>
- Kohl and Nielsen, 1997. Gas Purification - 5th Edition [WWW Document]. URL <https://www.elsevier.com/books/gas-purification/kohl/978-0-88415-220-0> (accessed 3.17.23).
- Kondaveeti, S., Abu-Reesh, I.M., Mohanakrishna, G., Bulut, M., Pant, D., 2020. Advanced Routes of Biological and Bio-electrocatalytic Carbon Dioxide (CO₂) Mitigation Toward Carbon Neutrality. Frontiers in Energy Research 8.
- Koukouzas, N., Ziogou, F., Gemeni, V., 2009. Preliminary assessment of CO₂ geological storage opportunities in Greece. International Journal of Greenhouse Gas Control 3, 502–513. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.10.005>
- Lebling, K., Leslie-Bole, H., Byrum, Z., Bridgwater, L., 2022. 6 Things to Know About Direct Air Capture.
- Lee, J., 2021. Strong Acids and Bases. ChemTalk. URL <https://chemistrytalk.org/strong-acids-bases/> (accessed 4.18.23).
- Leeson, D., Mac Dowell, N., Shah, N., Petit, C., Fennell, P.S., 2017. A Techno-economic analysis and systematic review of carbon capture and storage (CCS) applied to the iron and steel, cement, oil refining and pulp and paper industries, as well as other high purity sources. International Journal of Greenhouse Gas Control 61, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.020>
- Levin, K., Rich, D., Bonduki, Y., Comstock, M., Tirpak, D., Mcgray, H., Noble, I., Mogelgaard, K., Waskow, D., 2015. DESIGNING AND PREPARING INTENDED NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTIONS (INDCs).
- Liao, Y., 2021. Experimental research review of supercritical carbon dioxide fracturing technology. China Mine Eng. 50, 45–47.
- Liu, W., Teng, L., Rohani, S., Qin, Z., Zhao, B., Xu, C.C., Ren, S., Liu, Q., Liang, B., 2021. CO₂ mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments. Chemical Engineering Journal 416. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129093>
- Lopes, F.V., Grande, C.A., Ribeiro, A.M., Loureiro, J.M., Evaggelos, O., Nikolakis, V., Rodrigues, A.E., 2009. Adsorption of H₂, CO₂, CH₄, CO, N₂ and H₂O in activated carbon and zeolite for hydrogen production. Separation Science and Technology 44, 1045–1073.
- Lowe, R.J., Drummond, P., 2022. Solar, wind and logistic substitution in global energy supply to 2050 – Barriers and implications. Renewable and Sustainable Energy Reviews 153, 111720. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111720>
- Lust, C., 2022. Occidental, 1PointFive to Begin Construction of World’s Largest Direct Air Capture Plant in the Texas Permian Basin [WWW Document]. Carbon Engineering. URL <https://carbonengineering.com/news-updates/construction-direct-air-capture-texas/> (accessed 5.2.23).
- Mangold, K.-M., 2011. Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, J. Garche, C. Dyer, P. Moseley, Z. Ogumi, D. Rand, B. Scrosati (Eds.). Elsevier (2009). Journal of Power Sources 196, 4871–4872. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.040>
- Masson-Delmotte, Valérie, et al, 2018. Masson-Delmotte: Global warming of 1.5 C - Μελετητής Google [WWW Document]. URL https://scholar.google.com/scholar_lookup?publication_year=2018&title=Global+Warming+of+1.5+C%3A+An+IPCC+Special+Report+on+the+Impacts+of+Global+Warming

- ing+of+1.5+C+Above+Pre-industrial+Levels+and+Related+Global+Greenhouse+Gas+Emission+Pathways,+in+the+Context+of+Strengthening+the+Global+Response+to+the+Threat+of+Climate+Change,+Sustainable+Development,+and+Efforts+to+Eradicate+Poverty (accessed 5.2.23).
- McLaughlin, H., Littlefield, A.A., Menefee, M., Kinzer, A., Hull, T., Sovacool, B.K., Bazilian, M.D., Kim, J., Griffiths, S., 2023. Carbon capture utilization and storage in review: Sociotechnical implications for a carbon reliant world. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 177, 113215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113215>
- McQueen, N., Gomes, K.V., McCormick, C., Blumanthal, K., Pisciotta, M., Wilcox, J., 2021. A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future. *Prog. Energy* 3, 032001. <https://doi.org/10.1088/2516-1083/abf1ce>
- McQueen, N., Psarras, P., Pilorgé, H., Liguori, S., He, J., Yuan, M., Woodall, C.M., Kian, K., Pierpoint, L., Jurewicz, J., Lucas, J.M., Jacobson, R., Deich, N., Wilcox, J., 2020. Cost Analysis of Direct Air Capture and Sequestration Coupled to Low-Carbon Thermal Energy in the United States. *Environ. Sci. Technol.* 54, 7542–7551. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00476>
- Merkel, T.C., Lin, H., Wei, X., Baker, R., 2010. Power plant post-combustion carbon dioxide capture: An opportunity for membranes. *Journal of Membrane Science, Membranes and CO₂ Separation* 359, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.10.041>
- Mustafa, A., Lougou, B.G., Shuai, Y., Wang, Z., Tan, H., 2020. Current technology development for CO₂ utilization into solar fuels and chemicals: A review. *Journal of Energy Chemistry* 49, 96–123. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.01.023>
- NASA, 2020. World of Change: Global Temperatures [WWW Document]. URL <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures> (accessed 3.16.23).
- Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda, 2019. . National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/25259>
- Nemet, G.F., Brandt, A.R., 2012. Willingness to pay for a climate backstop: Liquid fuel producers and direct CO₂ air capture. *Energy Journal* 33, 53–82. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol33-No1-3>
- NETL, n.d. Carbon Storage FAQs [WWW Document]. netl.doe.gov. URL <https://netl.doe.gov/carbon-management/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs> (accessed 3.23.23).
- NREL, 2023. Land Use by System Technology [WWW Document]. URL <https://www.nrel.gov/analysis/tech-size.html> (accessed 7.10.23).
- OAS, 2021. Αιολικό Πάρκο 1,2MW. Οργανισμός Ανάπτυξης Σητείας. URL <https://oas.gr/wind-farm-12mw/> (accessed 7.5.23).
- Orr Jr., F.M., Taber, J.J., 1984. Use of carbon dioxide in enhanced oil recovery. *Science* 224, 563–569. <https://doi.org/10.1126/science.224.4649.563>
- Oschatz, M., Antonietti, M., 2018. A search for selectivity to enable CO₂ capture with porous adsorbents. *Energy & Environmental Science* 11, 57–70. <https://doi.org/10.1039/C7EE02110K>
- Owen-Burge, C., 2022. Companies are sucking carbon from the atmosphere using “direct air capture”. How does it work? [WWW Document]. *Climate Champions*. URL <https://climatechampions.unfccc.int/companies-are-sucking-carbon-from-the-atmosphere-using-direct-air-capture-how-does-it-work/> (accessed 5.2.23).
- Ozkan, M., Nayak, S.P., Ruiz, A.D., Jiang, W., 2022. Current status and pillars of direct air capture technologies. *iScience* 25, 103990. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103990>

- Papachristou, M., Dalampakis, P., Arvanitis, A., Mendrinou, D., Andritsos, N., 2021. Geothermal Developments in Greece - Country Update (2015-2020).
- Paris Agreement [WWW Document], n.d. URL https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_en (accessed 6.16.23).
- Pearce, R., 2017. The Swiss company hoping to capture 1% of global CO₂ emissions by 2025 [WWW Document]. Carbon Brief. URL <https://www.carbonbrief.org/swiss-company-hoping-capture-1-global-co2-emissions-2025/> (accessed 5.2.23).
- Ping E. et. al, 2018a. Ping: Global thermostat low cost direct air capture... - Μελετητής Google [WWW Document]. URL https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Global%20Thermostat%20low%20cost%20direct%20air%20capture%20technology&author=E.%20Ping&publication_year=2018 (accessed 5.28.23).
- Ping E. et. al, 2018b. Ping: Lowering the cost of direct air capture: pilot... - Μελετητής Google [WWW Document]. URL https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Lowering%20the%20cost%20of%20direct%20air%20capture%20pilot%20to%20commercial%20deployment&author=E.%20Ping&publication_year=2018 (accessed 5.28.23).
- POWER, 2015. Carbon Engineering Launches Novel Carbon Capture Pilot Project in Canada. POWER Magazine. URL <https://www.powermag.com/carbon-engineering-launches-novel-carbon-capture-pilot-project-in-canada/> (accessed 5.2.23).
- Razzak, S.A., Hossain, M.M., Lucky, R.A., Bassi, A.S., De Lasa, H., 2013. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27, 622–653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.063>
- Ren, J., Wang, T., Chen, Y., Wang, Y., Dong, Y., Du, S., Du, J., 2020. Research Status and Application Potential of CO₂ Mineralization. *Diqiu Kexue - Zhongguo Dizhi Daxue Xuebao/Earth Science - Journal of China University of Geosciences* 45, 2413–2425. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.027>
- Reuters, 2023. Public Power Corp, RWE to build five solar farms in Greece. Reuters.
- Rogelj, J., den Elzen, M., Höhne, N., Fransen, T., Fekete, H., Winkler, H., Schaeffer, R., Sha, F., Riahi, K., Meinshausen, M., 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature* 534, 631–639. <https://doi.org/10.1038/nature18307>
- Rogelj, J., Shindell, D., Jiang, K., Fifita, S., Forster, P., Ginzburg, V., Handa, C., Kheshgi, H., Kobayashi, S., Kriegler, E., Mundaca, L., Seferian, R., Vilarino, M.V., Calvin, K., Edelenbosch, O., Emmerling, J., Fuss, S., Gasser, T., Gillet, N., He, C., Hertwich, E., Höglund-Isaksson, L., Huppmann, D., Luderer, G., Markandya, A., McCollum, D., Millar, R., Meinshausen, M., Popp, A., Pereira, J., Purohit, P., Riahi, K., Ribes, A., Saunders, H., Schadel, C., Smith, C., Smith, P., Trutnevyte, E., Xiu, Y., Zickfeld, K., Zhou, W., 2018. Chapter 2: Mitigation pathways compatible with 1.5°C in the context of sustainable development. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Rouxhet, A., Kim, S., Leonard, G., 2022. Study of Direct Air Capture (DAC) Using a KOH/K₂CO₃ Absorbing Solution for CO₂ Capture. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4273837>
- Rubin, E., Chen, C., Rao, A., 2007. Cost and performance of fossil fuel power plants with CO₂ capture and storage. *Energy Policy* 35, 4444–4454. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.03.009>

- Sadiq, M.M., Konstas, K., Falcaro, P., Hill, A.J., Suzuki, K., Hill, M.R., 2020. Engineered Porous Nanocomposites That Deliver Remarkably Low Carbon Capture Energy Costs. *Cell Reports Physical Science* 1, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100070>
- Seipp, C.A., Williams, N.J., Kidder, M.K., Custelcean, R., 2017. CO₂ Capture from Ambient Air by Crystallization with a Guanidine Sorbent. *Angewandte Chemie - International Edition* 56, 1042–1045. <https://doi.org/10.1002/anie.201610916>
- Sens, L., Neuling, U., Kaltschmitt, M., 2022. Capital expenditure and levelized cost of electricity of photovoltaic plants and wind turbines – Development by 2050. *Renewable Energy* 185, 525–537. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.042>
- Shayegh, S., Bosetti, V., Tavoni, M., 2021. Future Prospects of Direct Air Capture Technologies: Insights From an Expert Elicitation Survey. *Frontiers in Climate* 3.
- Shi, J.G., Liu, Z.J., Liu, C.S., 2019. Advances in urea production technology using carbon dioxide. *Sino-Global Energy* 24, 68–79.
- Shi, X., Xiao, H., Azarabadi, H., Song, J., Wu, X., Chen, X., Lackner, K.S., 2020a. Sorbents for the Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *Angewandte Chemie International Edition* 59, 6984–7006. <https://doi.org/10.1002/anie.201906756>
- Shi, X., Xiao, H., Kanamori, K., Yonezu, A., Lackner, K.S., Chen, X., 2020b. Moisture-Driven CO₂ Sorbents. *Joule* 4, 1823–1837. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.005>
- Siegel, R.P., 2018. Affordable carbon capture with a soda on the side [WWW Document]. *Grist*. URL <https://grist.org/article/direct-air-carbon-capture-global-thermostat/> (accessed 6.21.23).
- Singh, C., Mukhopadhyay, S., Hod, I., 2021. Metal–organic framework derived nanomaterials for electrocatalysis: recent developments for CO₂ and N₂ reduction. *Nano Convergence* 8, 1. <https://doi.org/10.1186/s40580-020-00251-6>
- Sinha, A., Realff, M.J., 2019. A parametric study of the techno-economics of direct CO₂ air capture systems using solid adsorbents. *AIChE Journal* 65, e16607. <https://doi.org/10.1002/aic.16607>
- SMU, 2023. Why Use Geothermal Energy [WWW Document]. URL <https://www.smu.edu/Dedman/Academics/Departments/Earth-Sciences/Research/GeothermalLab/LabResearch/OilandGas/WhyUseGeothermalEnergy> (accessed 7.10.23).
- Socolow, R., Desmond, M., Aines, R., Blackstock, J., Bolland, O., Kaarsberg, T., Lewis, N., Mazzotti, M., Pfeiffer, A., Sawyer, K.R., Siirola, J., Smit, B., Wilcox, J., 2011. Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals: A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs.
- Sodiq, A., Abdullatif, Y., Aissa, B., Ostovar, A., Nassar, N., El-Naas, M., Amhamed, A., 2023. A review on progress made in direct air capture of CO₂. *Environmental Technology & Innovation* 29, 102991. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102991>
- Spyropoulos, G.C., Nastos, P.T., Moustiris, K.P., Chalvatzis, K.J., 2022. Transportation and Air Quality Perspectives and Projections in a Mediterranean Country, the Case of Greece. *Land* 11, 152. <https://doi.org/10.3390/land11020152>
- T. Roestenberg, 2015. Roestenberg: Design Study Report–ANTECY solar fuels... - Μελετητής Google [WWW Document]. URL https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Design%20Study%20Report%20-%20ANTECY%20Solar%20Fuels%20Development.%20Antecy.%20Hoevelaken%20C%20the%20Netherlands&publication_year=2015&author=T.%20Roestenberg (accessed 5.28.23).
- Taryani, K., 2023. Wind Turbine Cost: Worth The Million-Dollar Price In 2022? URL <https://weatherguardwind.com/how-much-does-wind-turbine-cost-worth-it/> (accessed 7.5.23).

- Tasianas, A., Koukouzas, N., 2016. CO₂ Storage Capacity Estimate in the Lithology of the Mesohellenic Trough, Greece. *Energy Procedia* 86, 334–341. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.01.034>
- Technology [WWW Document], 2017. . Infnitree LLC. URL <http://www.infnitree.com/technology> (accessed 6.21.23).
- Terlouw, T., Treyer, K., Bauer, C., Mazzotti, M., 2021. Life Cycle Assessment of Direct Air Carbon Capture and Storage with Low-Carbon Energy Sources. *Environ. Sci. Technol.* 55, 11397–11411. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03263>
- The Paris Agreement | UNFCCC [WWW Document], n.d. URL <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> (accessed 6.16.23).
- Thompson, C., 2021. Is sucking carbon out of the air the solution to our climate crisis? *Mother Jones*. URL <https://www.motherjones.com/environment/2021/10/sucking-carbon-engineering-global-thermostat-co2-direct-air-capture-climeworks-solution-climate-crisis-big-oil-boondoggle-ipcc/> (accessed 6.21.23).
- United Nations, U., 2023. What Is Climate Change? [WWW Document]. United Nations. URL <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change> (accessed 3.16.23).
- Ünveren, E.E., Monkul, B.Ö., Sariođlan, Ş., Karademir, N., Alper, E., 2017. Solid amine sorbents for CO₂ capture by chemical adsorption: A review. *Petroleum* 3, 37–50.
- Voskian, S., Hatton, T.A., 2019. Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture. *Energy Environ. Sci.* 12, 3530–3547. <https://doi.org/10.1039/C9EE02412C>
- Wang, J., Zhang, Y., Xie, J., 2020. Influencing factors and application prospects of CO₂ flooding in heterogeneous glutenite reservoirs. *Sci Rep* 10, 1839. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58792-z>
- Wang, X., Conway, W., Burns, R., McCann, N., Maeder, M., 2010. Comprehensive Study of the Hydration and Dehydration Reactions of Carbon Dioxide in Aqueous Solution. *J. Phys. Chem. A* 114, 1734–1740. <https://doi.org/10.1021/jp909019u>
- Weng, K.J., 2005. Application of carbon dioxide in food industry. *Light Text. Ind. Fujian* 7, 1–4.
- Wilcox, J., 2012. Carbon Capture. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2215-0>
- Yu, C.-H., Huang, C.-H., Tan, C.-S., 2012. A review of CO₂ capture by absorption and adsorption. *Aerosol and Air Quality Research* 12, 745–769.
- Yuan, Y.B., 2010. Application Technology of CO₂ Fertilizer in Solar Greenhouse. *Heilongjiang Agric. Sci.* 12, 179–180.
- Zhang, Z., Pan, S.-Y., Li, H., Cai, J., Olabi, A.G., Anthony, E.J., Manovic, V., 2020. Recent advances in carbon dioxide utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 125. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109799>
- Zhao, D., Cleare, K., Oliver, C., Ingram, C., Cook, D., Szostak, R., Kevan, L., 1998. Characteristics of the synthetic heulandite-clinoptilolite family of zeolites. *Microporous and Mesoporous Materials* 21, 371–379.
- Zhao, Leicheng, Rong, L., Zhao, Longfei, Yang, J., Wang, L., Sun, H., 2020. Plastics of the Future? The Impact of Biodegradable Polymers on the Environment, in: He, D., Luo, Y. (Eds.), *Microplastics in Terrestrial Environments: Emerging Contaminants and Major Challenges*, *The Handbook of Environmental Chemistry*. Springer International Publishing, Cham, pp. 423–445. https://doi.org/10.1007/698_2020_462
- Κώστας Δεληγιάννης, 2021. ΣΠΕΦ: Δεν είναι ίδιο το κόστος για μικρά και μεγάλα φωτοβολταϊκά – Να γίνουν τρεις κατηγορίες με WACC από 7% έως 9% [WWW Document]. URL <http://energypress.gr/news/spef-den-einai-idio-kostos-gia-mikra-kai-megala-fotovoltaika-na-ginoy-n-treis-katigories-me-wacc> (accessed 7.5.23).

- Μαριάννα Τζαννέ, 2023. Ανοίγει ξανά η αυλαία για τη γεωθερμία στην Ελλάδα [WWW Document]. Ειδήσεις για την Οικονομία | newmoney. URL <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/energeia/anigi-xana-i-avlea-gia-ti-geothermia-stin-ellada/> (accessed 6.12.23).
- Σαλονικίδης, Γ., 2018. Γεωμορφολογικός χάρτης της Ελλάδας – Γεωγραφικά διαμερίσματα [WWW Document]. e-Γεωγραφία. URL <https://e-geografia.eduportal.gr/geomorfologikos-chartis-tis-elladas-geografika-diamerismata/> (accessed 6.12.23).
- ΣΠΕΦ, 2023. Νέα του ΣΠΕΦ [WWW Document]. URL <http://spef.gr/index.php/el/> (accessed 7.5.23).
- Συνέπειες της κλιματικής αλλαγής [WWW Document], n.d. URL https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_el (accessed 6.16.23).
- ΥΠΕΝ, 2023a. Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών -. URL <https://ypen.gov.gr/perivallon/klimatiki-allagi/systima-eborias-dikaiomaton-ekpobon/> (accessed 7.15.23).
- ΥΠΕΝ, 2023b. Εκθέσεις και υφιστάμενη κατάσταση -. URL <https://ypen.gov.gr/perivallon/klimatiki-allagi/ektheseis-kai-yfistameni-katastasi/> (accessed 6.9.23).
- ΥΠΕΝ, 2023c. Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα -. URL <https://ypen.gov.gr/energeia/esek/> (accessed 7.4.23).