

Οι τεχνολογίες Carbon Capture Utilization and Sequestration (CCUS) βασικός πυλώνας της πράσινης μετάβασης

Γρηγόριος Παναγάκος, Επίκουρος καθηγητής.
Carnegie Mellon University, Chemical Engineering Department, PA, USA
Μέλος του ΤΕΣ ΕΠΕΒΚ

Η ενεργειακή μετάβαση σε μια εποχή μηδενικού αποτυπώματος της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον δεν μπορεί να ολοκληρωθεί αποκλειστικά με την εξάπλωση μιας και μοναδικής τεχνολογίας. Αντίθετα, έχει πλέον γίνει αντιληπτό από την επιστημονική κοινότητα και τους κοινωνικούς και πολιτικούς φορείς, ότι απαιτείται η πλήρης ανάπτυξη δέσμης τεχνολογιών που καθεμία γίνεται ανταγωνιστική και συνεισφέρει στο στόχο του περιορισμού των εκπομπών με διαφορετικούς μηχανισμούς και υπό διαφορετικές συνθήκες [1].

Οι τεχνολογίες CCUS περιλαμβάνονται ως βασικός πυλώνας επίτευξης των κλιματικών στόχων σε κάθε σχετική επιστημονική και τεχνοοικονομική μελέτη [2,3], αφού εξασφαλίζουν τη φιλική προς το περιβάλλον χρήση σημαντικών κλάδων της ανθρώπινης δραστηριότητας που δεν μπορούν άμεσα ή ακόμα και καθόλου να απεξαρτηθούν από τα ορυκτά καύσιμα και την εγγενή παραγωγή εκπομπών φαινομένου θερμοκηπίου (GHG). Είναι χαρακτηριστικό ότι τόσο στην Αμερική [4] όσο και στην Ευρώπη αλλά και σε όλη την υφήλιο δίνεται πολύ μεγάλη έμφαση στη δημιουργία όλων των κατάλληλων ερευνητικών και βιομηχανικών υποδομών αλλά και των νομοθετικών εργαλείων που θα φέρουν αυτή τη δέσμη τεχνολογιών σε ευρεία εμπορική χρήση το δυνατόν συντομότερο. Η ανάπτυξη σχετικού νομοθετικού πλαισίου και στην Ελλάδα είναι αδήριτη ανάγκη για να σηματοδοτηθεί η απαραίτητη σταθερότητα που προϋποθέτουν οι μεγάλες επενδύσεις που σχετίζονται με CCUS.

Οι λόγοι που επιβάλλουν τη χρήση της CCUS είναι περιληπτικά οι κάτωθι:

1. Η παγκόσμια πρακτική έχει αποδείξει ότι σε πολλές περιπτώσεις η τεχνολογία είναι βιώσιμη κι ανταγωνιστική παρά τις μεγάλες επενδύσεις που χρειάζονται, αφού επιτρέπει τη χρήση φθηνών καυσίμων. Το οικονομικό μοντέλο της CCUS γίνεται όλο και πιο βιώσιμο, όσο το κόστος εκπομπής άνθρακα αυξάνεται.
2. Η διαλειμματική φύση των ανανεώσιμων πηγών σε σχέση με τα καύσιμα άνθρακα, καθιστά απαραίτητη τη συνέχιση χρήσης σταθμών για παραγωγή ενέργειας, π.χ. Φ.Α. με CCUS.
3. Η γη που απαιτείται από τις ανανεώσιμες που δεν είναι πάντα διαθέσιμη (γη και ενεργειακή πυκνότητα τεχνολογίας) ενώ συχνά η χρήση γης για παραγωγή ενέργειας είναι ανταγωνιστική εκείνης για καλλιέργεια τροφής.
4. Επιτρέπει την παραγωγή σε μαζική κλίμακα υδρογόνου με χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα (μπλε υδρογόνο) το οποίο σε κάθε διεθνή ανάλυση είναι ο πυλώνας της ενεργειακής μετάβασης. Το υδρογόνο και τα καύσιμα «φορείς» ή «διανύσματα» υδρογόνου (H₂ vectors) θεωρούνται η κατάλληλη λύση για τη βαριά βιομηχανία, τη ναυτιλία και της μεταφορές που αντιμετωπίζουν δυσκολία σε εξηλεκτρισμό είτε λόγω πρόσβασης σε δίκτυα είτε λόγω τεχνολογίας [5].
5. Οι ανανεώσιμες χρησιμοποιούν νερό που δεν βρίσκεται πάντα και παντού εν αφθονία για να χρησιμοποιείται ως υλικό τροφοδοσίας για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου.
6. Η τεράστια κλίμακα των κρίσιμων υλικών (critical materials) που απαιτούνται για τις μπαταρίες και τα φωτοβολταϊκά και η αναμενόμενη αύξηση από την εξάπλωση αυτών των τεχνολογιών καθιστά αμφίβολη την μελλοντική δυνατότητα κάλυψης των αναγκών των απαραίτητων υλικών [6].
7. Η αδυναμία ή δυσκολία αντικατάστασης των τεχνολογιών που παράγουν εκπομπές στις βιομηχανίες τσιμέντου, σιδήρου και χάλυβα, και στις χημικές διεργασίες καθιστούν απαραίτητη την εφαρμογή CCUS για την αντιμετώπιση των εκπομπών από αυτές τις δραστηριότητες.
8. Προσφέρει ευελιξία στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.
9. Η αφαίρεση διοξειδίου από τον αέρα που εμφανίζεται πλέον ως αναγκαία δράση για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, βασίζεται πάνω σε τεχνολογίες CCUS [7–9].

10. Προσφέρει προοπτική δίκαιης οικονομικής μετάβασης σε περιοχές που έχουν απώλειες θέσεων εργασίας λόγω της πράσινης ενεργειακής μετάβασης.

11. Δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας υψηλής αξίας. Οι εγκαταστάσεις CCUS είναι μεγάλα μηχανολογικά και κατασκευαστικά έργα που χρειάζονται χρόνια για να υλοποιηθεί ο σχεδιασμός, η ανάθεση και η κατασκευή τους. Απαιτούν ένα σημαντικό εργατικό κι εξειδικευμένο δυναμικό ανάπτυξης και κατασκευής το οποίο χρειάζεται δεξιότητες παρόμοιες με αυτές της τεχνολογίας των ορυκτών καυσίμων [5].

Η γεωλογική μόνιμη αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα είναι εφικτή αφού υπάρχει γεωλογικό δυναμικό αποθήκευσης που υπερεπαρκεί για τις ανάγκες της χώρας. Με βάση τη βιβλιογραφία, μέρη στα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί αποθήκευση είναι 1. Η Μεσοελληνική αύλακα (Σχηματισμοί Πενταλόφου κι Εππαχωρίου), 2. Η περιοχή της Δυτικής Θεσσαλονίκης 3. Ο Πρίνος 4. Τα ορυχεία λιγνίτη που έχουν εκσκαφτεί σε βάθος. Το 2019 το CO₂ που εξέπεμψε η Ελλάδα ήταν 65.74Mt (ήτοι 0.2% των παγκόσμιων εκπομπών). Μόνο στην Μεσοελληνική αύλακα έχει εκτιμηθεί από τις γεωτρήσεις της περιοχής και μοντελοποίηση ότι μπορεί να υπάρχει δυναμικό αποθήκευσης της τάξης των 5,824 Gt CO₂ στον σχηματισμό Πενταλόφου και 728Gt CO₂ στο σχηματισμό του Εππαχωρίου [10]. Νεότεροι υπολογισμοί που συμπεριλαμβάνουν και στατιστική αβεβαιότητα είναι πιο συντηρητικοί αλλά και πάλι ευοίωνοι [11].

Η εξάρτηση της Ελλάδας από το Φ.Α. η οποία μάλιστα έχει σχεδιασθεί να αυξηθεί τις επόμενες δεκαετίες, είναι σημαντική παράμετρος του ενεργειακού μας μίγματος [12]. Αυτό σημαίνει ότι παρότι οι εκπομπές θα είναι σημαντικά λιγότερες από το προηγούμενο καθεστώς (κατά μέσο όρο οι εκπομπές άνθρακα ενός θερμικού εργοστασίου λιγνίτη είναι 3-4 φορές μεγαλύτερες από αυτές ενός συνδυασμένου κύκλου), εν τούτοις δεν έχουν εξαλειφθεί και οι στόχοι κλιματικής ουδετερότητας δεν μπορούν επιτευχθούν άνευ ταυτόχρονης χρήσης του Φ.Α. με CCUS και δράσεις συγκράτησης του μεθανίου. Και φυσικά ο εξηλεκτρισμός της κίνησης αν η ενέργεια δεν προέρχεται από ανανεώσιμες μορφές, δεν είναι «πράσιнос».

Περαιτέρω, η παραγωγή τσιμέντου, προϊόντων χάλυβα και πλαστικών που παράγουν επίσης εγγενώς CO₂ στην ελληνική βιομηχανία, είτε δεν έχουν προς το παρόν εναλλακτικές (τσιμέντο) είτε αυτές είναι κοστοβόρες και σε πειραματικά στάδια. Άλλη μια βιομηχανία της Ελλάδας που επηρεάζεται άμεσα από την πολιτική σε σχέση με τις εκπομπές είναι η ναυτιλία. Ο παγκόσμιος οργανισμός ναυτιλίας εξήγγειλε το 2018 την υιοθέτηση πολιτικών μειώσεων των εκπομπών στη ναυτιλία στο 50% ως το 2050 μέχρι πλήρους εξαλείψεως μέχρι το τέλος του αιώνα. Η ελληνική ναυτιλία έχει να κάνει αγώνα δρόμου για την ανάπτυξη κι εγκατάσταση τεχνολογιών που θα αντιμετωπίζουν τις εκπομπές GHG. Οι αερομεταφορές είναι ακόμα ένα πεδίο που είναι εξαιρετικά δύσκολη η αντικατάσταση των συμβατικών καυσίμων.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, προκρίνουμε τις παρακάτω ερευνητικές κατευθύνσεις με τους οποίους η έρευνα μπορεί να στηρίξει την εφαρμογή των τεχνολογιών CCUS στην Ελλάδα:

1. Σημειακές πηγές εκπομπών. α. Εργοστάσια Φ.Α. για ευέλικτη λειτουργία (flexible operation) εντός ενός δυναμικού συστήματος που ενσωματώνει πολλές πηγές ενέργειας με απόκριση σε πραγματικό χρόνο. β. Τσιμεντοβιομηχανία, βιομηχανία σιδήρου και χάλυβα, πετροχημική βιομηχανία γ. Εναπομένουσες μηχανές ντίζελ ή θερμικοί σταθμοί σε νησιά που καλύπτουν διακοπές ρεύματος ή άλλες ανάγκες κλπ
2. Μετατροπή-Χρήση CO₂ σε νέα υλικά π.χ. με χρήση μεθόδων ορυκτοποίησης, βιοκαύσιμα, κλπ.
3. Αξιοπίστη μεταφορά κι αποθήκευση CO₂.
4. Υδρογόνο με Διαχείριση άνθρακα (Μπλε H₂)
5. Αγροτικός τομέας και καλλιέργειες.
6. Απομάκρυνση Διοξειδίου Άνθρακα- Βιομάζα με CCS (BECCS). Η κλιματική μοντελοποίηση δείχνει ότι είναι εξαιρετικά απίθανο να επιτευχθεί ο στόχος της συγκράτησης της θερμοκρασίας στα επιθυμητά επίπεδα. Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση νέας τεχνολογίας για τα ελληνικά δεδομένα είναι ο συνδυασμός της αεριοποίησης βιομάζας μαζί με CCS με μεθοδολογία ανάλογη με την πολιτεία της Καλιφόρνια [13].
7. Διαχείριση Απορριμμάτων- Waste-to-Energy με CCUS. Η μέθοδος WtE επιφέρει σημαντικό περιορισμό εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μιας και αποφεύγεται ο σχηματισμός αερίων υγειονομικούς ταφής μέσω της αποτέφρωσης των οργανικών ενώσεων που παράγουν μεθάνιο. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε χώρες όπως η ΗΠΑ και η Σουηδία.
8. Βελτιστοποίηση αλυσίδας αξίας και logistics προϊόντων άνθρακα και CCUS με ιδιαίτερη έμφαση στις θαλάσσιες μεταφορές.

Για να μπορέσει η Ελλάδα να λάβει όχι απλά μέρος αλλά να είναι συνδιαμορφώτρια των εξελίξεων στον σημαντικό χώρο των CCUS απαιτείται να υπάρξει ανάλογη πολιτική βούληση και στήριξη. Υπάρχουν στην χώρα μας πολλοί αξιόλογοι ερευνητές που κάνουν έρευνα στο χώρο. Προτείνουμε τις παρακάτω δράσεις που θα έδιναν μεγάλη ώθηση:

• Εθνική συμμετοχή της Ελλάδας στο δίκτυο ERIC-ECCSEL. Τα οφέλη από τη συμμετοχή θα είναι πολλαπλά. Ενδεικτικά: ανάπτυξη τεχνολογίας, δημιουργία νησίδων αριστείας, άμεση σύνδεση με εγχώρια βιομηχανική ανάπτυξη, κατάρτιση νέων μηχανικών κι επιστημόνων κι εξειδικευμένου προσωπικού, δημιουργία θέσεων εργασίας, αύξηση της ανταγωνιστικότητας των ελληνικών ιδρυμάτων κ.α. Αξίζει να σημειωθεί το αίτημα αυτό το θεωρούν πολύ σημαντικό και οι ερευνητικοί φορείς αλλά και η βιομηχανία.

6+

• Διευρυμένη συμμετοχή σε ερευνητικά δίκτυα όπως το Accelerating Carbon Capture and Storage (ACT)

• Δημιουργία διμερών ερευνητικών αποστολών και συνεργασιών με χώρες πρωτοπόρες του χώρου (ΗΠΑ, Νορβηγία, Ολλανδία κλπ).

Τέλος προτείνουμε 3 ακόμα ερευνητικές κατευθύνσεις οι οποίες έχουν άμεση σχέση και συνδυάζονται με το πρόβλημα της διαχείρισης του άνθρακα.

- Δέσμευση μεθανίου Methane Mitigation (upstream, midstream emissions).
- Κυκλική οικονομία ειδικά σε σχέση με τον άνθρακα και την στήριξη των περιοχών της Δυτικής Μακεδονίας.
- Αξιοποίηση λιγνίτη άνευ καύσης π.χ. γραφένιο για ελαφρές κατασκευές και της τέφρας του για ανάκτηση σπανίων γαιών και κρίσιμων στοιχείων[14].

Ενδεικτικά έργα τα οποία μπορούν να αποτελέσουν εμβληματικές δράσεις CCUS στην Ελλάδα, οι οποίες θα οδηγήσουν σε **άμεσες επενδύσεις** και θα έχουν ανάγκη από τις ερευνητικές κατευθύνσεις που προαναφέρθηκαν:

• **Η περίπτωση θερμικών σταθμών.** Εμπειριστωμένες μελέτες έχουν δείξει ότι μια ολοκληρωμένη λύση δέσμευσης, μεταφοράς κι αποθήκευσης φαίνεται να είναι τεχνολογικά και οικονομικά εφικτή [15]. Η δέσμευση μπορεί να υλοποιηθεί με τις τρέχουσες βέλτιστες πρακτικές διαλυτών. Η μεταφορά με αγωγό μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορα μοντέλα που θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν αποθήκευση στην ξηρά π.χ. με μεταφορά με αγωγό προς την περιοχή των Γρεβενών (μεσοελληνική αύλακα) ή υποθαλάσσια.

• **Δημιουργία σταθμών μπλε υδρογόνου και μεθανόλης** δίπλα σε σημειακές, κυρίως μελλοντικές, πηγές διοξειδίου, ξεκινώντας από αυτές που θα είναι κοντύτερα σε χώρους αποθήκευσης στη Μακεδονία και τη Θράκη.

• **Μελέτη και κατασκευή συστημάτων μεμβρανών για τη δέσμευση σε πλοία.** Η ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας θα δώσει μεγάλη ώθηση στην Ελληνική ναυτιλία της οποίας η επίδραση στην οικονομία είναι σημαντική.

• **Έργο WtE με CCUS και Έργο BECCS**

ERIC-ECCSEL

Το European Carbon Dioxide Capture and Storage Laboratory (ECCSEL) είναι μια κατανεμημένη, ολοκληρωμένη ερευνητική υποδομή που περιλαμβάνει διασυνδεδεμένες διακρατικές επιστημονικές εγκαταστάσεις και εθνικούς κόμβους [16]. Η Κοινοπραξία Ευρωπαϊκής Ερευνητικής Υποδομής (ERIC) είναι μια πλήρης νομική οντότητα βάσει του δικαίου της ΕΕ, με στόχο τη δημιουργία και λειτουργία, μέσω των μελών της, μιας ερευνητικής υποδομής ευρωπαϊκής σημασίας σε μη οικονομική βάση. Το ECCSEL προσφέρει ανοιχτή πρόσβαση σε περισσότερες από 80 παγκοσμίου επιπέδου ερευνητικές εγκαταστάσεις CCUS σε όλη την Ευρώπη. Οι ερευνητικές εγκαταστάσεις σε όλη την αλυσίδα αξίας CCUS καλύπτονται μέσω του ECCSEL, για παράδειγμα: μεμβράνες, ολοκληρωμένα συστήματα CCUS, πίεση/έγχυση, μετανάστευση, ασφάλεια/αντιμετώπιση προβλημάτων, μεταφορά και ακεραιότητα αγωγών CO₂, αποστολή CO₂, έξυπνες ενσωματώσεις με δέσμευση άνθρακα και επαναχρησιμοποίηση σε πολύτιμα προϊόντα. Το ECCSEL συντονίζει την ευρωπαϊκή ανάπτυξη των εγκαταστάσεων και των υπηρεσιών τους για την κάλυψη των προσδιορισμένων αναγκών. Η ερευνητική υποδομή απευθύνεται επίσης στη σχετική βιομηχανία και τις ερευνητικές κοινότητες για να καθορίσουν τις ανάγκες τους για ερευνητική υποδομή για να καταστεί δυνατή η πλήρης ανάπτυξη του CCUS στην Ευρώπη.

Τέλος, συνοψίζουμε στον επόμενο πίνακα ξεχωριστά για τις περιοχές της δέσμευσης, της χρήσης και της αποθήκευσης αλλά διαθεματικά, τις ερευνητικές κατευθύνσεις στις οποίες πρέπει να κινηθούμε για να στηριχθεί η ανάπτυξη των τεχνολογιών CCUS:

Δέσμευση
<ul style="list-style-type: none">• Σχεδιασμός διαλυτών υψηλής απόδοσης για δέσμευση CO₂• Δημιουργία φιλικών προς το περιβάλλον διεργασιών διαλυτών για τη δέσμευση CO₂.• Σχεδιασμός προσαρμοσμένων ροφητικών υλικών• Ενσωμάτωση ροφητικών υλικών και διεργασιών• Κατανόηση των φαινομένων μεταφοράς σε υλικά μεμβράνης.• Σχεδιασμός αρχιτεκτονικών συστημάτων μεμβρανών.• Παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα με δέσμευση CO₂

Χρήση
<ul style="list-style-type: none"> • Σχεδιασμός πολύπλοκων διεπαφών για την ενίσχυση της ανάκτησης υδρογονανθράκων με την αποθήκευση άνθρακα • Αξιοποίηση του CO₂ με πρωτοποριακούς καταλυτικούς μετασχηματισμούς σε καύσιμα και χημικά • Δημιουργία νέων διαδρομών προς λειτουργικά υλικά με βάση τον άνθρακα από το CO₂ Σχεδιασμός και έλεγχος αλληλεπιδράσεων μοριακής κλίμακας για ηλεκτροχημικές και φωτοχημικές μετατροπή του CO₂ • Αξιοποίηση φαινομένων πολλαπλής κλίμακας για ηλεκτροχημικά και φωτοχημικά υψηλής απόδοσης μετατροπή του CO₂ • Επιτάχυνση της ανοργανοποίησης του άνθρακα αξιοποιώντας την πολυπλοκότητα των διεπαφών στερεού-υγρού • Προσαρμογή των ιδιοτήτων των υλικών για να καταστεί δυνατή η αποθήκευση άνθρακα στα προϊόντα • Προσαρμογή μικροβιακών και βιοεμπνευσμένων προσεγγίσεων για τη μετατροπή του CO₂ • Υβριδοποίηση ηλεκτροχημικών και βιολογικών διεργασιών για τη μετατροπή του CO₂ σε καύσιμα, χημικά και θρεπτικές ουσίες
Αποθήκευση
<ul style="list-style-type: none"> • Προώθηση της multiphysics και της multiscale ροής ρευστού για την επίτευξη χωρητικότητας μεγατόνων/έτος • Κατανόηση των ορίων δυναμικής πίεσης για εισπίεση (injection) CO₂ σε κλίμακα μεγατόνων • Βελτιστοποίηση της εισπίεσης CO₂ με έλεγχο του περιβάλλοντος κοντά στο φρεάτιο Ανάπτυξη έξυπνης παρακολούθησης χώρου αποθήκευσης • Πραγματοποίηση έξυπνης παρακολούθησης για την αξιολόγηση των ανωμαλιών και την παροχή βεβαιότητας καλής λειτουργίας • Ανάπτυξη χαρακτηρισμού συστημάτων σφαλμάτων και θραύσεων • Επίτευξη πρόβλεψης σεισμικού κινδύνου επόμενης γενιάς • Εντοπισμός, αξιολόγηση και αποκατάσταση υφιστάμενων και εγκαταλελειμμένων γεωτρήσεων • Καθιέρωση, επίδειξη και πρόβλεψη ακεραιότητας του χώρου αποθήκευσης.
Διαθεματική έρευνα
<ul style="list-style-type: none"> • Ανάπτυξη υπολογιστικών προσομοιώσεων μεγάλης κλίμακας • Ενσωμάτωση πειράματος, προσομοίωσης και machine learning σε πολλαπλές κλίμακες μήκους για ανακάλυψη υλικών και ανάπτυξη νέων διεργασιών • Σύζευξη βασικής επιστήμης και επιστημών μηχανικών για εντατική δέσμευση άνθρακα, καθαρισμό, μεταφορά, διαδικασίες χρήσης και αποθήκευσης • Ενσωμάτωση κοινωνικών πτυχών και φορέων στη λήψη αποφάσεων • Ιδιαίτερη μέριμνα για δημιουργία μεθολογιών επικοινωνίας πολιτικών που καθοδηγούνται από την επιστήμη και την τεχνολογία προς τους πολίτες και τους κοινωνικούς εταίρους (communicating science). • Ανάπτυξη εργαλείων για την ενσωμάτωση τεχνοοικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραμέτρων του κύκλου ζωής για την καθοδήγηση της βελτιστοποίησης του χαρτοφυλακίου τεχνολογίας

1. Pacala, S.; Socolow, R. Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. *Science* **2004**, *305*, 968–972, doi:10.1126/science.1100103.
2. International Energy Agency Global Energy Review 2021. **2021**, 36.
3. Hepburn, C.; Adlen, E.; Beddington, J.; Carter, E.A.; Fuss, S.; Mac Dowell, N.; Minx, J.C.; Smith, P.; Williams, C.K. The Technological and Economic Prospects for CO₂ Utilization and Removal. *Nature* **2019**, *575*, 87–97, doi:10.1038/s41586-019-1681-6.
4. Williams, J.H.; Jones, R.A.; Haley, B.; Kwok, G.; Hargreaves, J.; Farbes, J.; Torn, M.S. Carbon-Neutral Pathways for the United States. *AGU Advances* **2021**, *2*, doi:10.1029/2020AV000284.
5. Global CCS Institute *Global Status of CCS 2021*; 2021;
6. *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*; p. 287;.
7. Keith, D.W.; Holmes, G.; St. Angelo, D.; Heidel, K. A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere. *Joule* **2018**, *2*, 1573–1594, doi:10.1016/j.joule.2018.05.006.
8. Wilcox, J.; Psarras, P.C.; Liguori, S. Assessment of Reasonable Opportunities for Direct Air Capture. *Environ. Res. Lett.* **2017**, *12*, 065001, doi:10.1088/1748-9326/aa6de5.
9. Beuttler, C.; Charles, L.; Wurzbacher, J. The Role of Direct Air Capture in Mitigation of Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions. *Front. Clim.* **2019**, *1*, 10, doi:10.3389/fclim.2019.00010.
10. Tasianias, A.; Koukouzas, N. CO₂ Storage Capacity Estimate in the Lithology of the Mesohellenic Trough, Greece. *Energy Procedia* **2016**, *86*, 334–341, doi:10.1016/j.egypro.2016.01.034.
11. Koukouzas, N.; Tyrologou, P.; Karapanos, D.; Carneiro, J.; Pereira, P.; de Mesquita Lobo Veloso, F.; Koutsovitis, P.; Karkalis, C.; Manoukian, E.; Karametou, R. Carbon Capture, Utilisation and Storage as a Defense Tool against Climate Change: Current Developments in West Macedonia (Greece). *Energies* **2021**, *14*, 3321, doi:10.3390/en14113321.
12. Υπουργείο Περιβάλλοντος κι Ενέργειας *Εθνικό Σχέδιο Για Την Ενέργεια Και Το Κλίμα*; 2019;
13. Livermore Laboratory Foundation; the ClimateWorks Foundation *Getting to Neutral. Options for Negative Carbon Emissions in California*; 2020;
14. Koukouzas, N.; Kalaitzidis, S.; Koutsovitis, P.; Bouzinos, A.; Karkalis, C.; Tyrologou, P.; Karapanos, D. Physicochemical Properties and REE Distribution of the Northwest and Central Greece Coal Deposits: A Review. *Materials Proceedings* **2022**, *5*, 103, doi:10.3390/materproc2021005103.
15. Leonardo Technologies, Inc. *Assessment of Carbon Capture and Storage for Ptolemaida V*; 2021;
16. HomePage | ECCSEL Available online: <https://www.eccsel.org/> (accessed on 6 February 2022).