



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Τεχνολογίες Δέσμευσης και Αξιοποίησης Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂) – οι ευκαιρίες, οι προκλήσεις και η μελλοντική χρηματοοικονομική βιωσιμότητά τους

Technologies of Capture and Utilization of Carbon Dioxide (CO₂) – their opportunities, challenges, and their future financial viability



ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΤΟΥ

ΦΟΥΡΛΑΡΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων καθηγητής:

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΑΡΑΒΩΣΗΣ

Επιβλέπων βοηθός εκπόνησης διπλωματικής εργασίας:

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΣΤΕΝΟΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2022

Εντοπίζοντας το πρόβλημα ...

- Τα αέρια του θερμοκηπίου (Greenhouse gases – GHG) αποτελούν τα βασικά αίτια για την κλιματική αλλαγή, την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη και το λιώσιμο των πάγων
- Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και το μεθάνιο (CH₄) είναι τα θεμελιώδη GHG
- Στις 11 Μαΐου 2019 η συγκέντρωση CO₂ στην ατμόσφαιρα έφτασε τα 415,26 ppm για πρώτη φορά στην ανθρώπινη ιστορία. Ενδεικτικά πριν την βιομηχανική επανάσταση η συγκέντρωση ήταν στα 280 ppm



Σημαντικότερες νομοθετικές προσπάθειες καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής

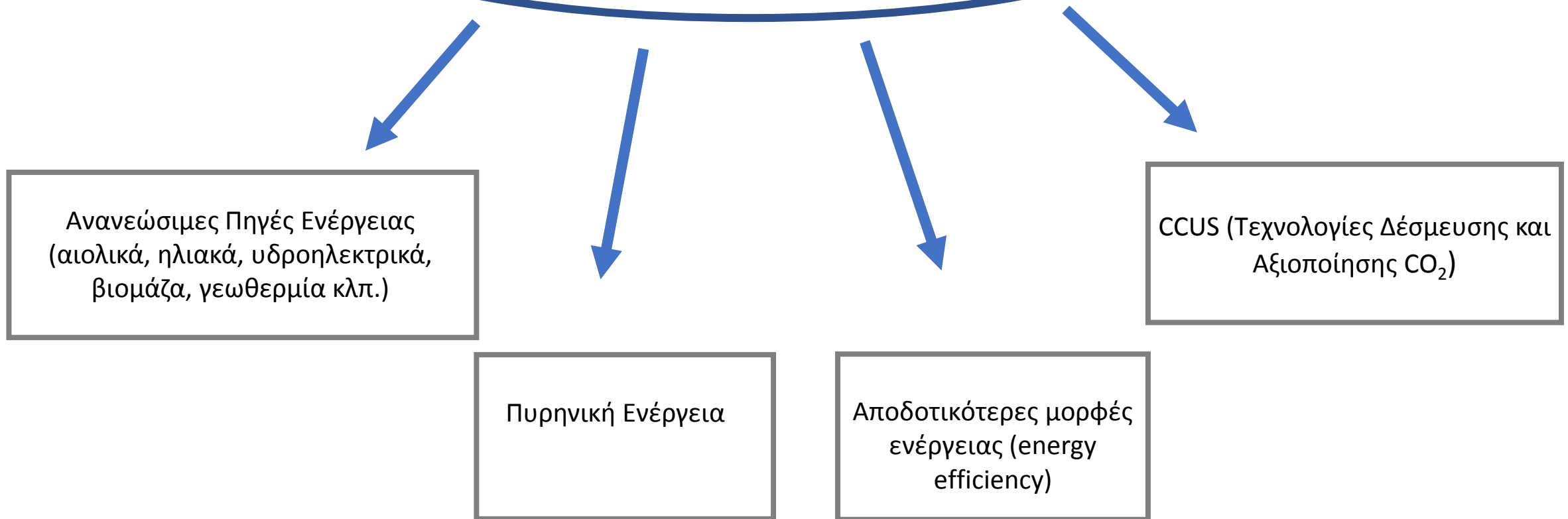
- Το πρωτόκολλο του Kyoto (1997)
- 21^ο Συνέδριο των Ηνωμένων Εθνών (COP 21 - UN Paris Agreement 2015)

Σημαντικότερα υποστηρικτικά εργαλεία των ανώτερων νομοθετικών προσπαθειών

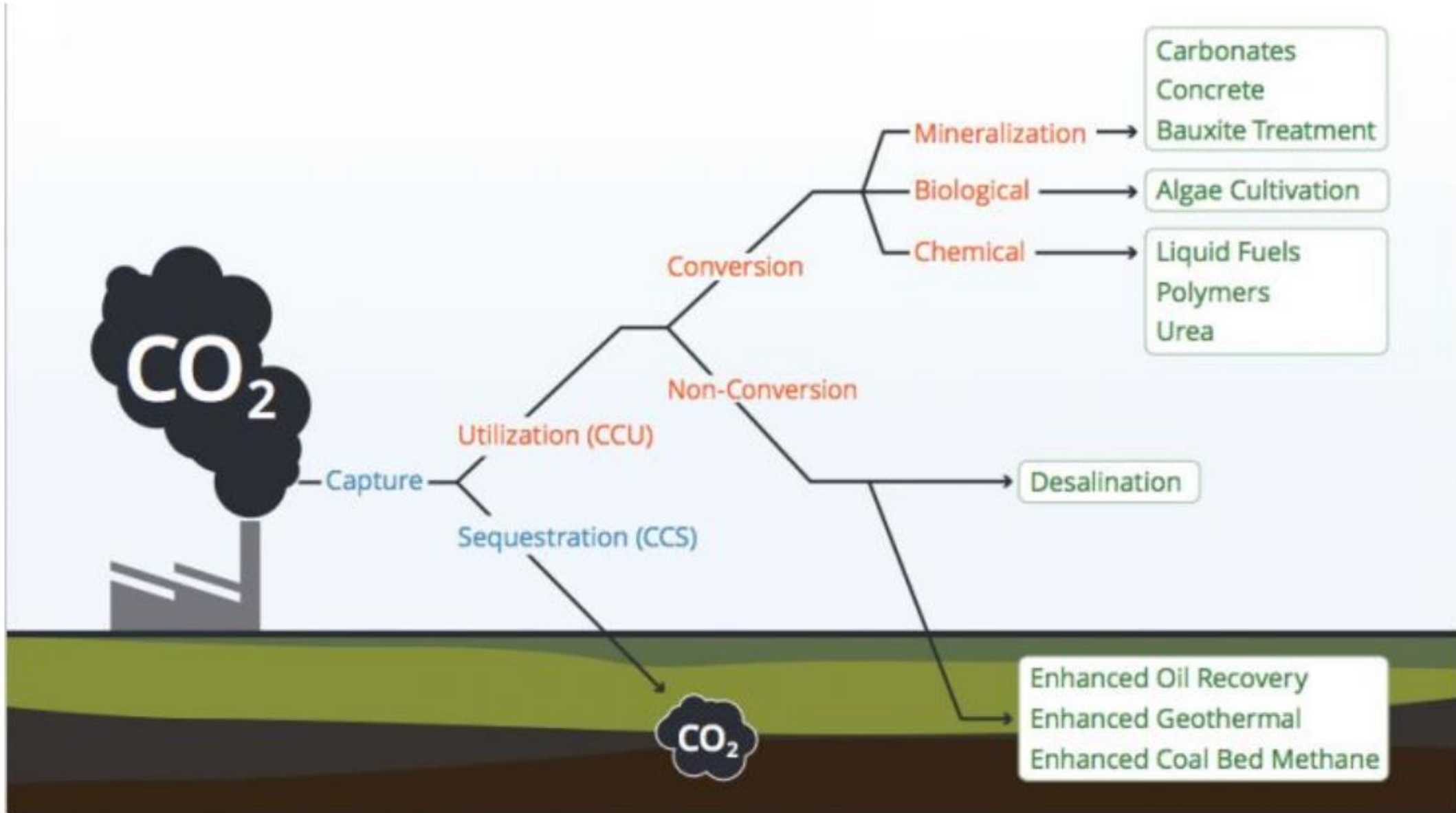
- Sustainable Development Goals –SDG's (UN General Assembly agenda for 2030) (2016)
- COP 26 (Glasgow 2021)



Η Παγκόσμια Πολιτική Αντιμετώπισης των Αερίων του Θερμοκηπίου



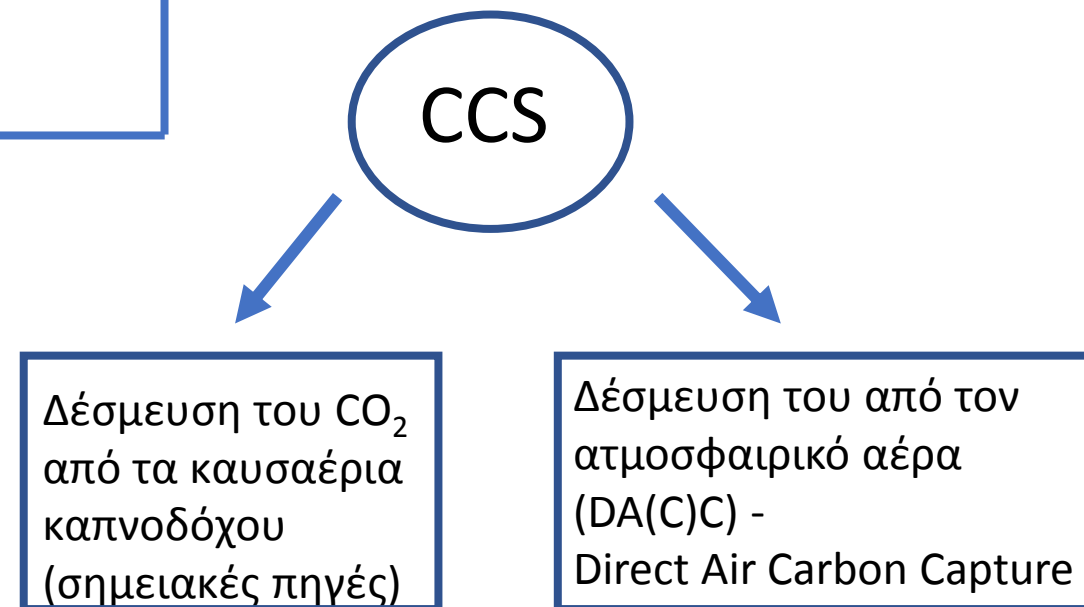
Διάγραμμα όλων των πιθανών διαθέσιμων επιλογών CCUS



- Δίνουν την δυνατότητα να συνεχίζεται η χρήση ορυκτών καυσίμων ενώ ταυτόχρονα μειώνονται οι εκπομπές ➡ προσφέρει την δυνατότητα να κλείσει τον κύκλο του άνθρακα
- Απουσία ανάγκης για μεταφορά CO₂ ενώ ταυτόχρονα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αντιστάθμιση (offsetting) εκπομπών CO₂ του τομέα των μεταφορών
- Προσφέρει την δυνατότητα για πολιτική ασφαλείας σε περίπτωση πιθανών διαρροών



Μονοπάτι επιλογών Δέσμευσης CCS

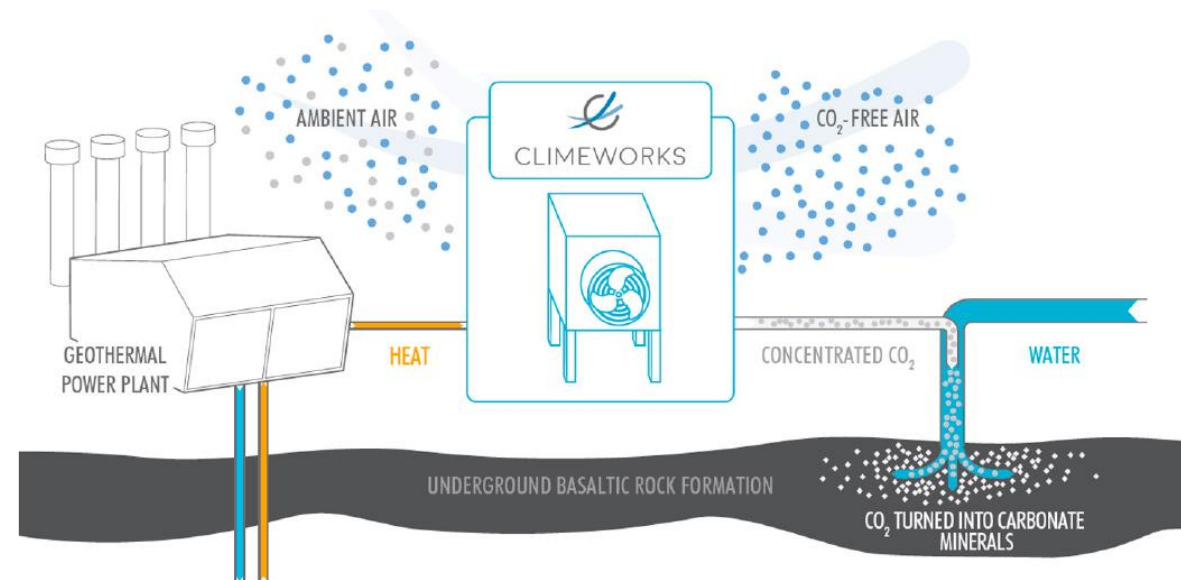




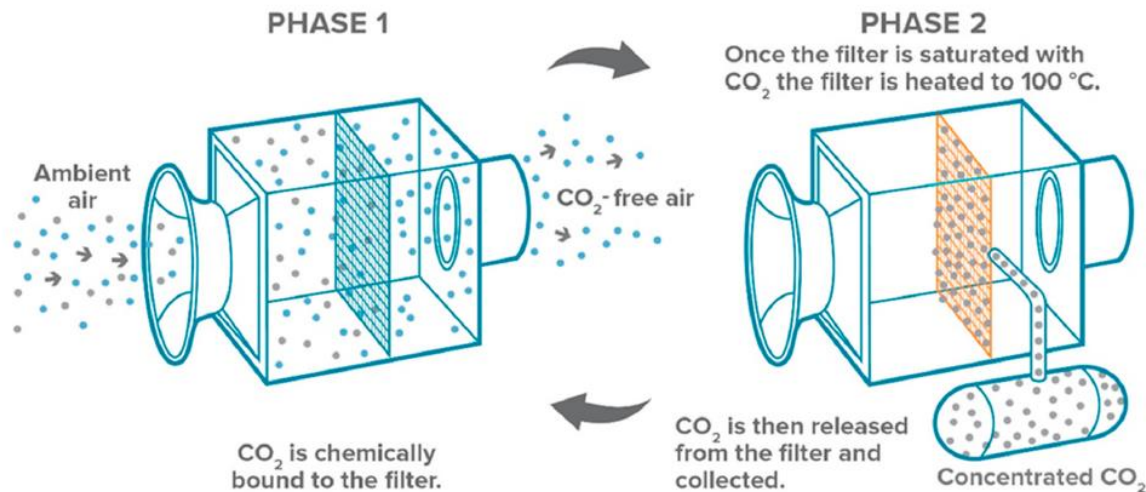
climeworks

Γενικά Στοιχεία

- Πρωτοπόρος εταιρεία στο DACC σε επίπεδο βιομηχανίας
- Ελβετική εταιρεία με τις εργασίες της να είναι στην Ισλανδία (Orca plant)
- Εκμεταλλεύεται την άφθονη γεωθερμική ενέργεια της Ισλανδίας
- Συνεργασία με την Carbfix με σκοπό την έγχυση CO₂ σε βασάλτες και την μόνιμη αποθήκευσή του μέσω μεταλλοποίησης στο υπέδαφος (Εγχεόμενο διάλυμα CO₂ με νερό)



Τεχνολογικά Στοιχεία



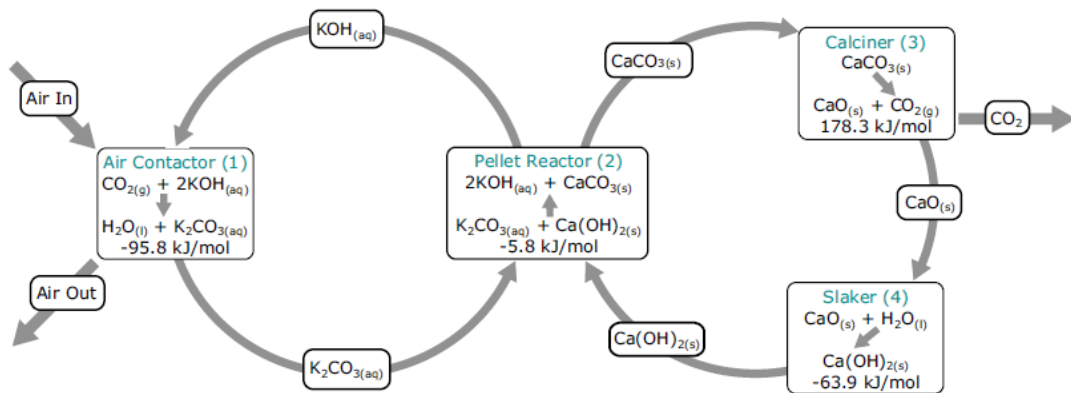
- Ένας CO₂ συλλέκτης της = 2000 δέντρα ως προς την ικανότητα απορρόφησης CO₂
- Κέρδισε τις εντυπώσεις με αποτέλεσμα να επιχορηγηθεί από την Microsoft για να πετύχει η τελευταία τους στόχους μηδενικών εκπομπών μέσω της διαδικασίας δέσμευσης της Climeworks
- Ικανότητα δέσμευσης = 4000 t CO₂ / χρόνο για το σύνολο του Orca plant της



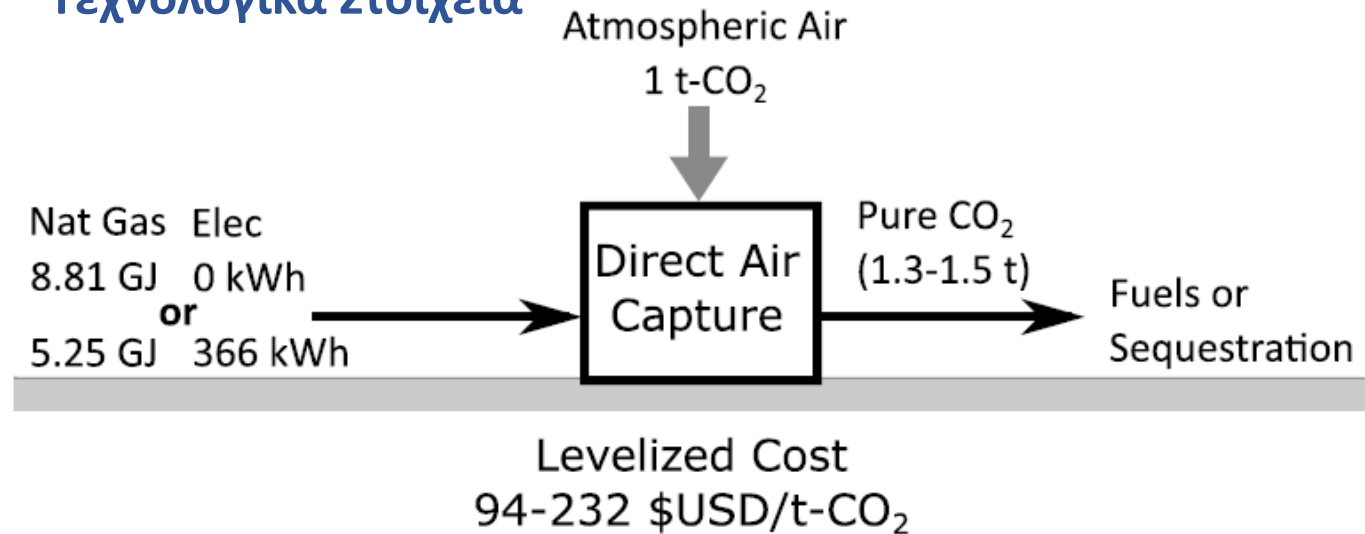
Carbon Engineering

Γενικά Στοιχεία

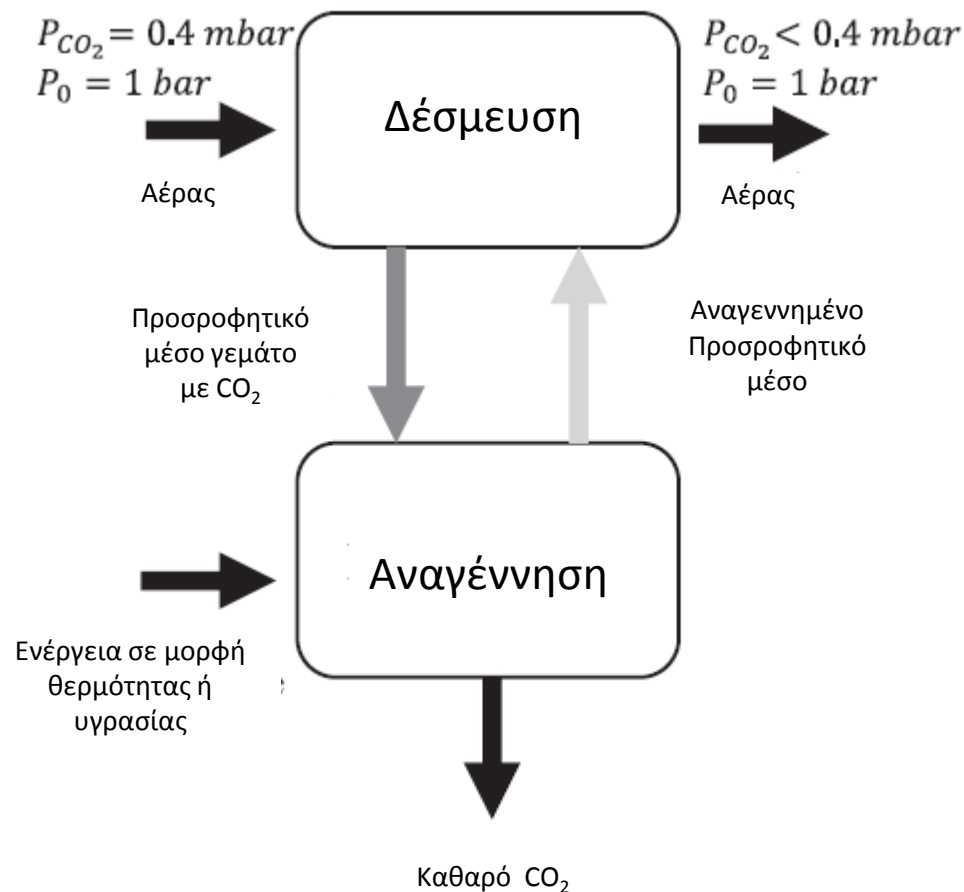
- Καναδική εταιρεία που επίσης δραστηριοποιείται στο DACC
- Χρησιμοποιείται υδάτινο προσροφητικό μέσο, και η δέσμευση CO_2 γίνεται μέσω δύο χημικών κύκλων/διεργασιών
- Πραγματοποιείται επίσης και δέσμευση με στόχο επιπλέον αξιοποίηση CO_2 (δρα και ως CCU)



Τεχνολογικά Στοιχεία



Επιλογή sorbent και διαδικασία αναγέννησης του



Γιατί επικράτησε η DAC (Direct Air Carbon Capture) ή απλώς DAC (Direct Air Capture) ως βασική CCS ;

- Απουσία κόστους μεταφοράς CO_2 για ενταφιασμό
- Η συγκέντρωση CO_2 στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι 2500:1 (moles αέρα/moles CO_2) [APA](#) δεν είναι βιώσιμη καμία τεχνολογία που προετοιμάζει ή προσδίδει ενέργεια στον προσροφούμενο αέρα πριν την διεργασία αναγέννησης ακυρώνοντας έτσι κάποια άλλη πιθανή τεχνολογία δέσμευσης από ατμοσφαιρικό αέρα

Τεχνοοικονομικά των DACC

- Καινοτόμα ιδέα που επιδέχεται μόνο βελτιώσεις
- Σύμφωνα με APS (American Physical Society) αν το κόστος ενταφιασμού είναι παραπάνω από 570 €/t CO_2 η τεχνολογία μακροπρόθεσμα είναι ασύμφορη
- Στόχος βιωσιμότητα όλων των DACC σε (€/ t CO_2): Levelized cost of capture < EU ETS carbon allowances (σε Ευρωπαϊκό επίπεδο)
- Ταμειακές ροές που λόγω ανάγκης εξωτερικής χρηματοδότησης μέχρι τώρα υπολογίζονται ως:
 $CF = P = Revenue - OPEX$

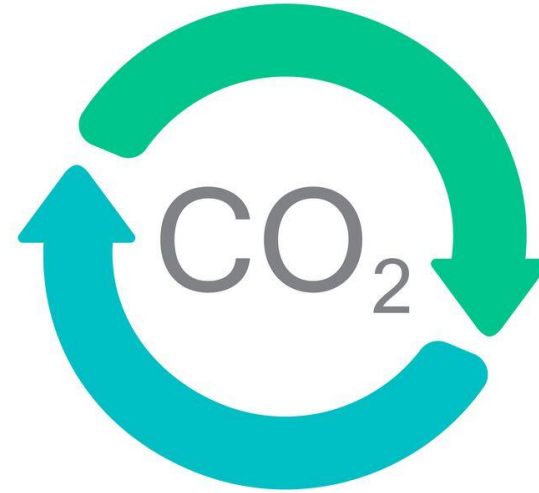
Σύγκριση των Climeworks και Carbon Engineering

Πίνακας	Climeworks	Carbon Engineering
CO ₂ δυνατότητα δέσμευσης (χιλιάδες t CO ₂ /έτος)	4	980
CO ₂ ποσοστό επανεκπομπής (%)	10	40
Κόστος Επένδυσης σταθμού (Μ €)	9.5	1.07
Ανηγμένο κόστος δέσμευσης (€ / t CO ₂)	1140	200
Ολοκλήρωση πλήρους δυναμικής σταθμού (έτος)	Τέλος 2021	Τέλος 2023

Τεχνολογίες Δέσμευσης και Αξιοποίησης CO₂ (CCU)

Βασικά πλεονεκτήματα των CCU:

- Προώθηση της κυκλικής οικονομίας
- Δημιουργία αξίας από απόβλητα

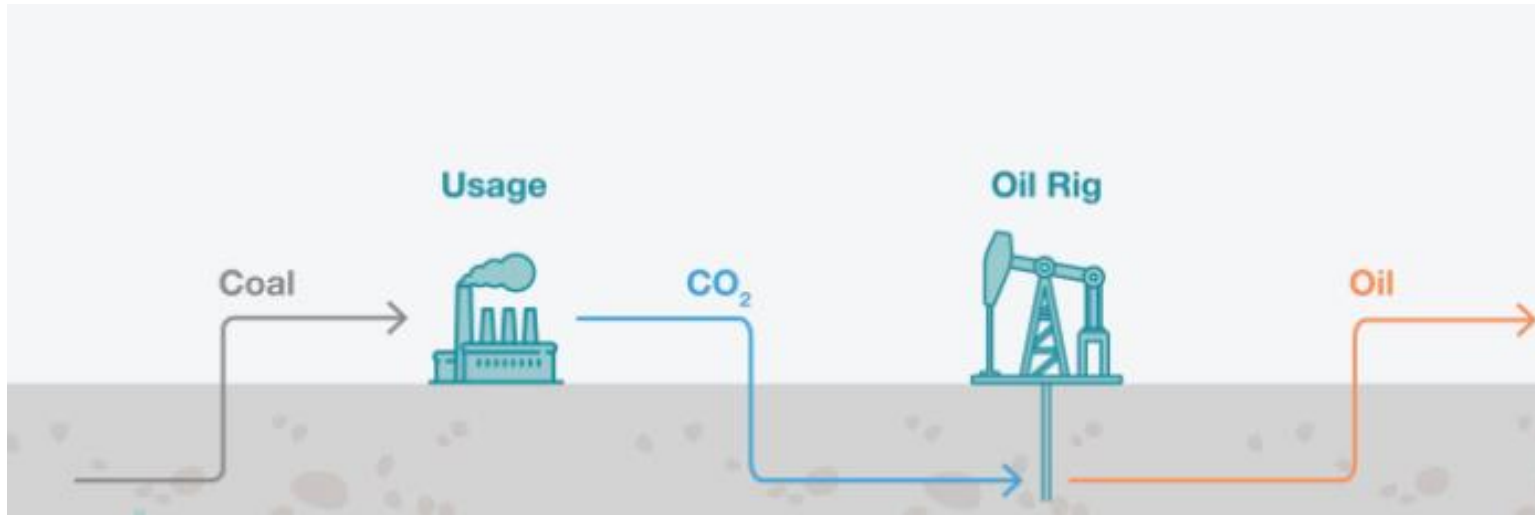


Βασικά μειονεκτήματα των CCU:

- Υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις μετατροπής
- Κόστη μεταφοράς CO₂



Enhanced Oil Recovery (EOR)



Γενικά Στοιχεία

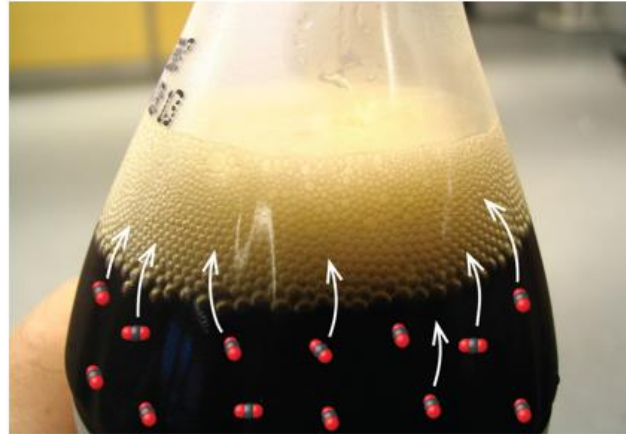
- Μέθοδος που χρησιμοποιείται για ανάκτηση πετρελαίου από σχεδόν «άδεια» κοιτάσματα
- Η πιο αναπτυγμένη τεχνολογία CCU μέχρι τώρα – κύρια εφαρμογή της στα ΗΑΕ
- Η έγχυση CO₂ μειώνει την συνεκτικότητα του εναπομένου πετρελαίου και έτσι ανακτάται πιο εύκολα βελτιώνοντας την παραγωγικότητα
- Μέσω αυτού μόνιμος ενταφιασμός CO₂ στο υπέδαφος

Βασικότεροι εξωγενείς παράγοντες που επηρεάζουν την επέκταση της τεχνολογίας EOR

- Παγκόσμια ζήτηση αργού πετρελαίου
- Ποσοστό σχεδόν εξαντλημένων κοιτασμάτων στην παραγωγή
- Παροχή και χαρακτηριστικά του προσφερόμενου CO₂

Απευθείας Χρήσεις CO₂

1. Σε θερμοκήπια -> Αύξηση ευκαρπίας κατά 50%
2. Σαν ψυκτικό μέσο (R744)
3. Σε αναψυκτικά
4. Σε πυροσβεστήρες
5. Σε φαρμακευτικές βιομηχανίες σαν διεγερτικό μέσο του αναπνευστικού συστήματος



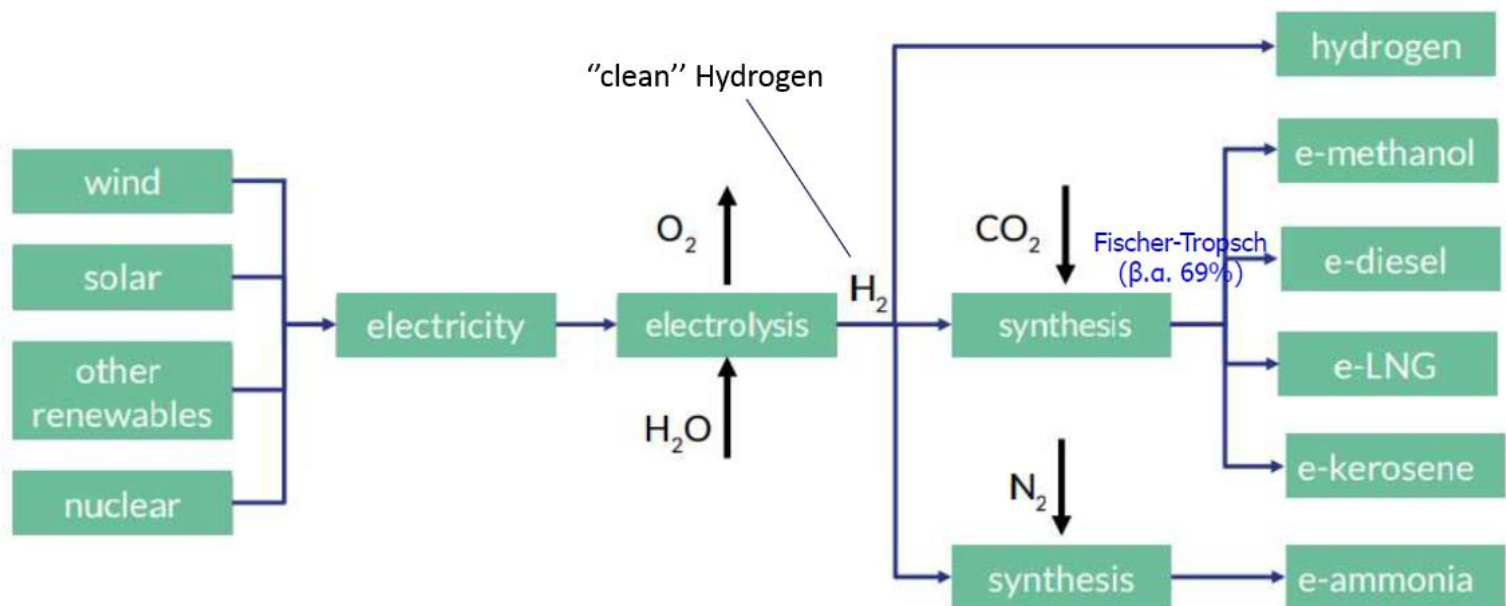
Απουσία κόστους μετατροπής

ΑΛΛΑ

Μηδενικό τεχνολογικό και περιβαλλοντικό όφελος από πιθανή παραγωγή μετα-προϊόντων



E-Fuels



Γενικά Στοιχεία

- Χημικός τύπος -> $C_xH_yO_z$
- Πρώτη ύλη για την δημιουργία τους CO₂ και H₂
- Μετατροπή μέσω χημικής διεργασίας Fischer-Tropsch

Ευκαιρίες για την ανάπτυξή τους

- Τα πλεονεκτήματα των υγρών καυσίμων (μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα)
- Εναλλακτική στην απανθρακοποίηση του τομέα των μεταφορών

Απαραίτητες Προϋποθέσεις για την ανάπτυξή τους

- Πράσινο υδρογόνο ως πρώτη ύλη αλλιώς ακυρώνει την δυνατότητα δέσμευσης CO₂ (μεγάλο ποσοστό επανεκπομπών από LCA)
- Καμία απαίτηση για νέες υποδομές ("drop-in" replacements)
- Ικανοποίηση τυπικών αριθμών RON, MON, CN

Βασικά εμπόδια

- Ευστάθεια μορίου CO₂ -> ενεργειακά απαιτητική διεργασία διάσπασης, δημιουργία ανεπιθύμητων παραπροϊόντων από τις παραπάνω καταλυτικές χημικές αντιδράσεις
- Κόστη παροχής και συμπίεσης H₂

Πολυμερή - Βιοκαύσιμα (biofuels) – Χημικά



Ζύμωση CO₂ με στόχο την παραγωγή βιοκαυσίμων (off-gas fermentation from CO₂ to biofuels) κυρίως για παραγωγή αιθανόλης από πηγές αποβλήτων άνθρακα

—twelve

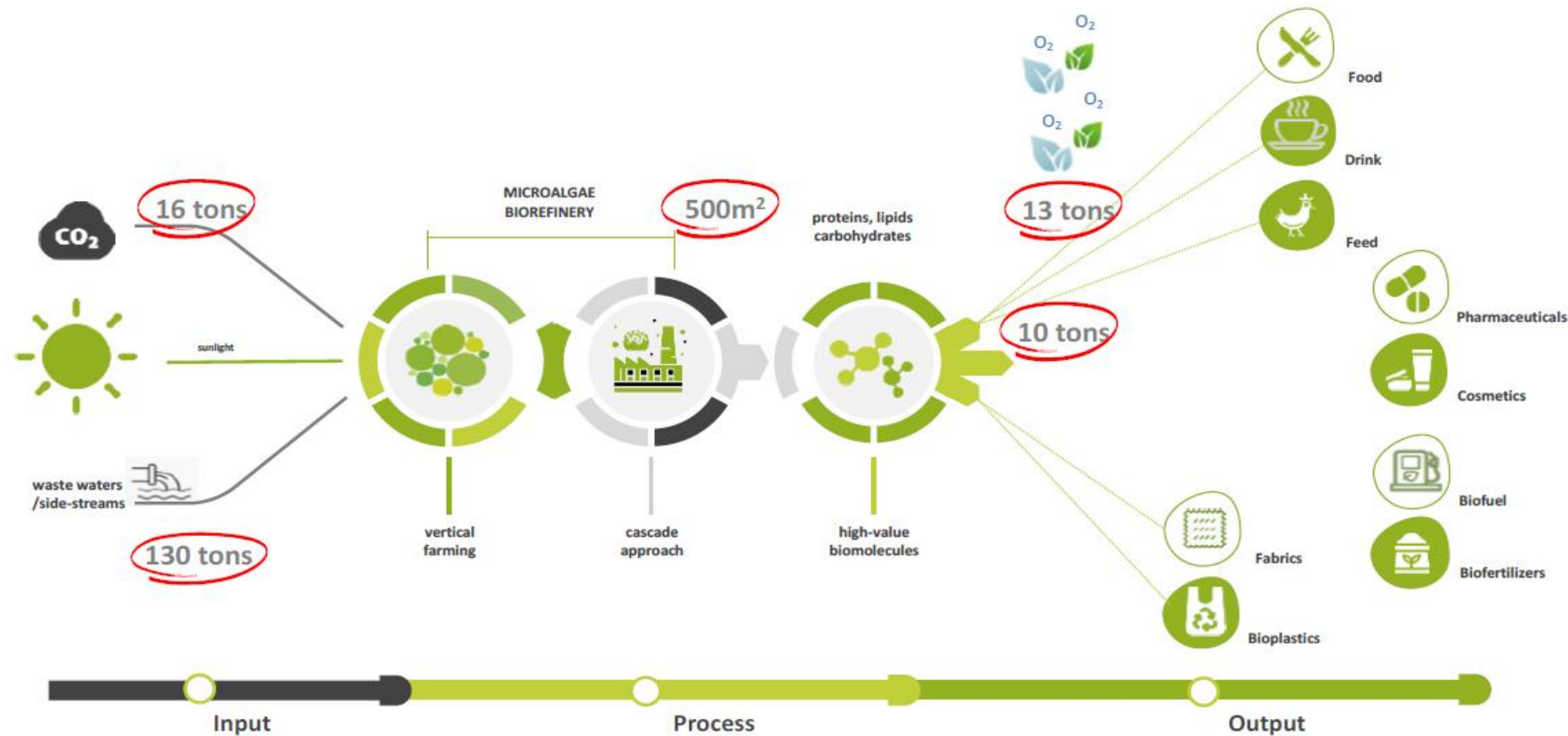


Μετατροπή CO₂ σε χημικά-οικοδομικά προϊόντα που συνήθως παράγονται από ορυκτά καύσιμα

- Συνεργασία τους με στόχο την μετατροπή CO₂ σε πολυπροπυλένιο
- 1,87 M € εξωγενής χρηματοδότηση με στόχο την επισημοποίηση της συνεργασίας (2019)



Εταιρεία Βιοτεχνολογίας - Solmeya



Βασικά Στοιχεία

- Σύστημα αεριοποίησης (off gas fermentation and gasification) σε σύζευξη με σύστημα κάθετης καλλιέργειας μικροφυκών (microalgae) που μετατρέπει CO₂ σε αξιοποιήσιμη ανώτερης πρωτεϊνικής αξίας βιομάζα
- Τελικά προϊόντα που ικανοποιούν 9 από τους 17 SDG's
- Ακόμα σε πιλοτική εφαρμογή στο «Εθνικό Κέντρο Έρευνας-Δημόκριτος» με στόχο σύντομη επεκτασιμότητα βιομηχανικά
- Χρησιμοποιεί αυτοτροφική, μιξοτροφική και ετεροτροφική καλλιέργεια microalgae

Σύγκριση Τεχνολογιών CCU

Κριτήρια Σύγκρισης

- 1) Ετοιμότητα Τεχνολογίας – Scalability
- 2) Εκπομπές GHG από την δέσμευση και μετατροπή του CO₂
- 3) Επίτευξη στόχων SDG's
- 4) Γεωγραφικοί και γεωλογικοί περιορισμοί
- 5) Κεφαλαιουχικά και λειτουργικά έξοδα



Πίνακας	Ανηγμένο Κόστος Αξιοποίησης (€ / t CO ₂)	Κόστος Επένδυσης (M €)
EOR	40 + 30	40, ένα δεν υποθέσουμε ένα ήδη υπάρχον κοίτασμα
Απευθείας Χρήσεις CO ₂	30	Υποθέτουμε προϋπάρχουσες υποδομές
E-fuels	278 + 30	0,95
LanzaTech - Twelve	80 + 30	300
Solmeya	18000 μέχρι και 250 + 30 (Εξαρτάται από την οικονομία κλίμακας, scalability)	2,2



Γενικά στοιχεία:

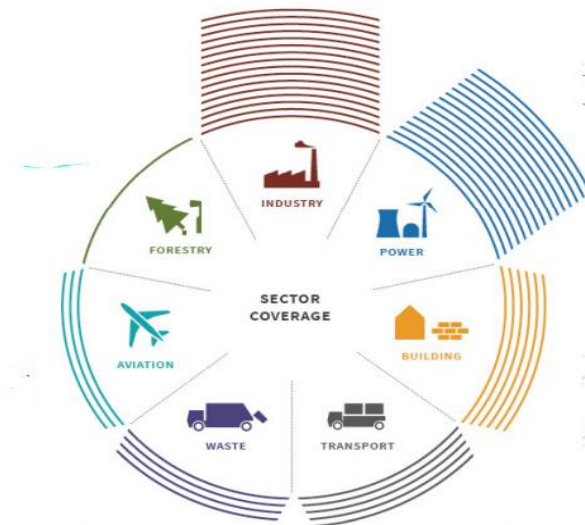
- 4 χρονικές φάσεις λειτουργίας (έναρξη το 2005), τώρα σε φάση 4 (2021-2030)
- Έκδοση νομοθεσιών σταθμών περι οδηγιών εκπομπών ρύπων, CO₂ και πιστοποίησης και ελέγχου τεχνολογιών δέσμευσης (CCS)

Τομείς Κάλυψης:

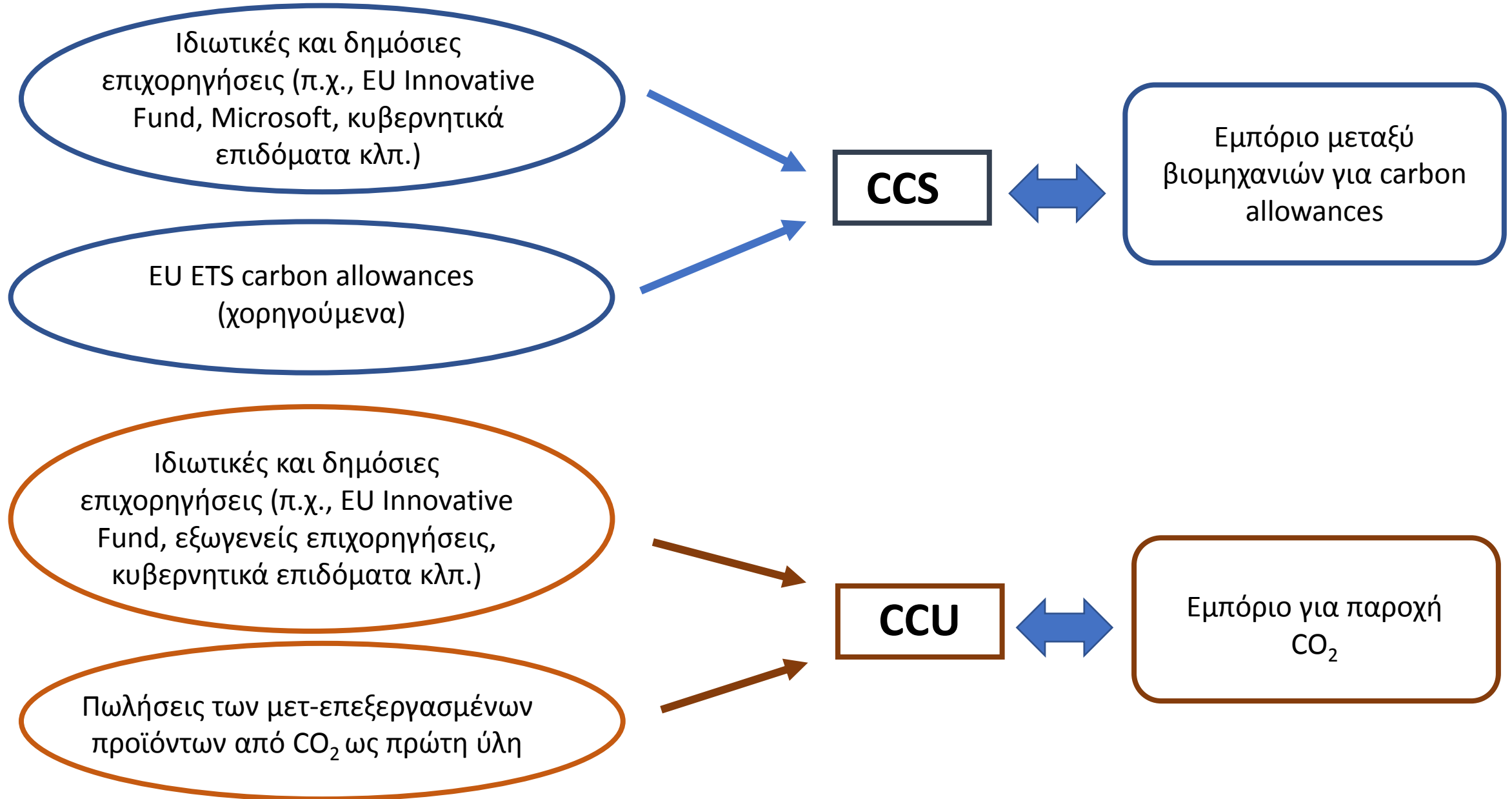
- Ηλεκτροπαραγωγή και παραγωγή θερμότητας
- Βιομηχανίες έντασης ενέργειας (energy intensive industries): διυλιστήρια, χαλυβουργεία, παραγωγές μετάλλων, τσιμέντου, γυαλιού, οργανικών χημικών κλπ.
- Αεροπλοΐα μέσα στην EEA (European Economic Area)
- CCS αλλά όχι CCU ακόμα (αναμένεται εντός του 2024)
- Ναυσιπλοΐα (ένταξη στις 1/12/2023)

Πως λειτουργεί ? – Βασικά στοιχεία:

- Λειτουργία με βάσει της αρχής “cap and trade”
- Carbon Credits (Πιστώσεις Άνθρακα)
- Carbon Allowances (Επιδόματα Άνθρακα)
- Penalties from noncompliance (Πέναλτι για μη συμμόρφωση)



Ροή Εσόδων για CCUS

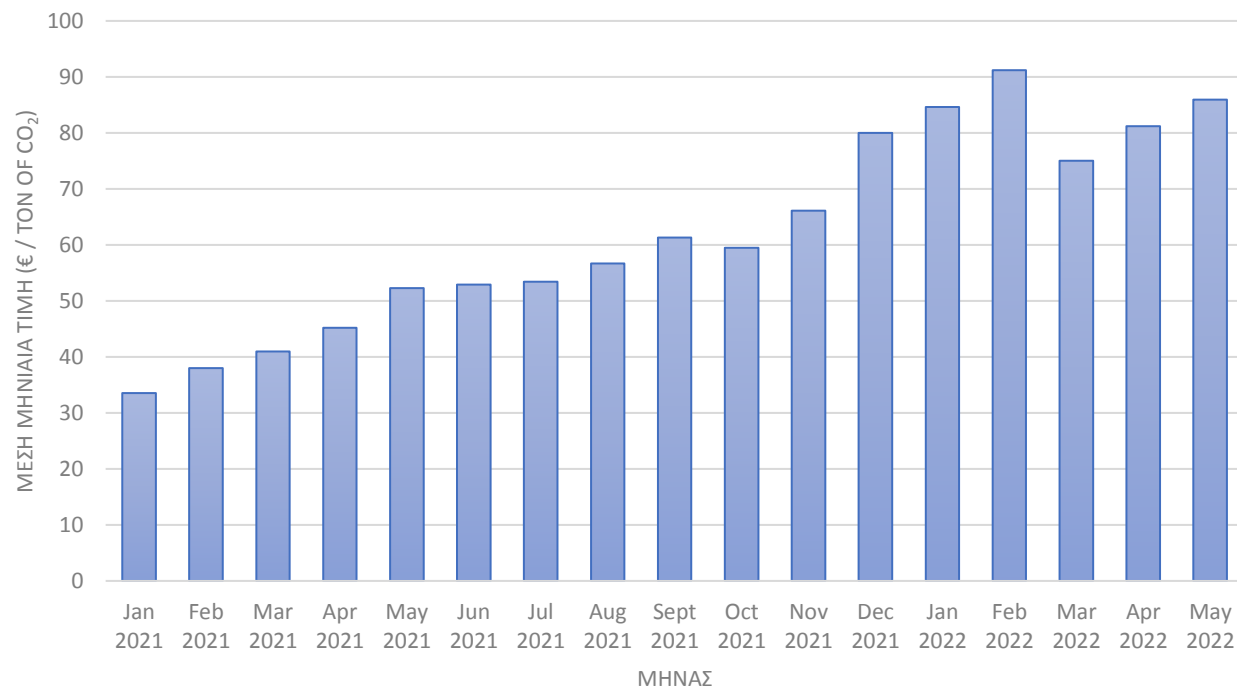


EU ETS Carbon Pricing (Κοστολογώντας τις εκπομπές CO₂)

The latest Carbon Pricing from EU ETS



Μέση μηνιαία carbon pricing

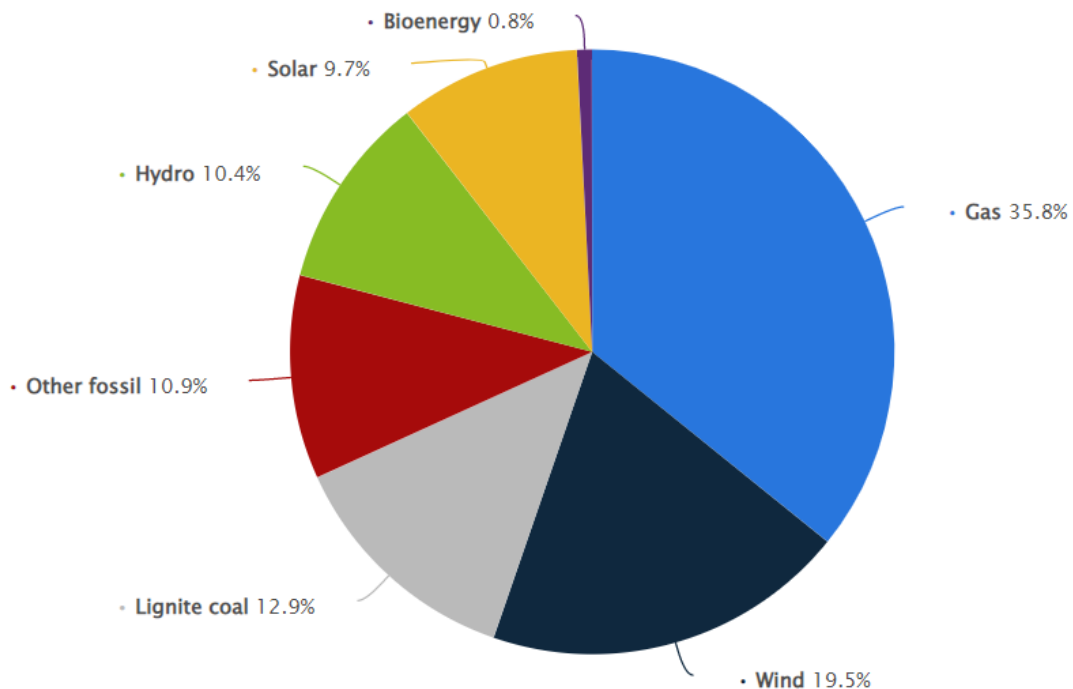


Βασικά Αποτελέσματα

- ❖ Ιστορική υψηλά τιμή στις 8/2/2022 σε τιμή 96,7 €/ t CO₂ (διαρκής ανοδική πορεία τιμών μέχρι τότε)
- ❖ Μετριοπαθή σενάρια εκτιμούν πως το 2030 η τιμή θα είναι κατά ελάχιστο 129 €/ t CO₂
- ❖ Κριτήριο χρηματοοικονομικής βιωσιμότητας: Ανηγμένο Κόστος Δέσμευσης ή Μετατροπής (€/ t CO₂) < EU ETS carbon allowances (€/ t CO₂) -> Δεν διαφαίνεται άμεσα τουλάχιστον για CCU
- ❖ Σταθερό ίσως και διευρυμένο μερίδιο αγοράς προσεχώς λόγω ανελαστικών εκπομπών από αεροπλοΐα και ναυσιπλοΐα

Πρώτος Κλιματικός Νόμος Ελλάδας (27/5/2022) – Ο δρόμος προς την ουδετερότητα άνθρακα

Το μείγμα ηλεκτροπαραγωγής για την Ελλάδα το 2021



Σημαντικότεροι κανονισμοί – στόχοι:

- 1) Ο λιγνίτης πρέπει να καταργηθεί σταδιακά ως το 2028
- 2) Η εγκατάσταση λεβήτων πετρελαίου με στόχους θέρμανσης θα απαγορεύεται το 2025



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ

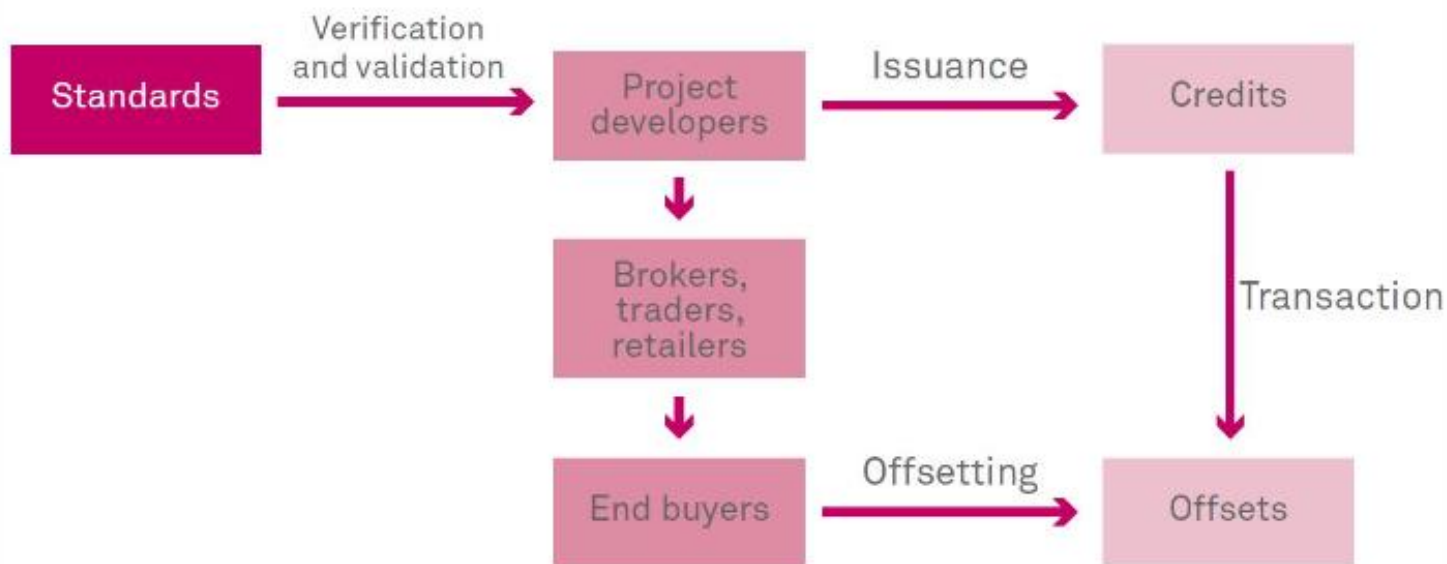
Έλλειμα ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή και θέρμανση



ΑΡΑ

Ευκαιρίες για ανάπτυξη, διεύρυνση και επιχορήγηση εφαρμογών CCUS

Voluntary Carbon Offset Markets – Αγορές Εθελοντικής Αντιστάθμισης Εκπομπών Άνθρακα



Βασικοί παίκτες:

- ✓ Κάτοχοι τεχνολογιών CCUS (project developers)
- ✓ Τελικοί Αγοραστές (end buyers - παραδείγματα χρηματοδοτήσεων Microsoft και BCG στην Climeworks)
- ✓ Μεσίτες και αξιολογητές (brokers, traders, retailers)
- ✓ Πρότυπα πιστοποίησης (standards)

PLATTS CARBON CREDIT PRICES



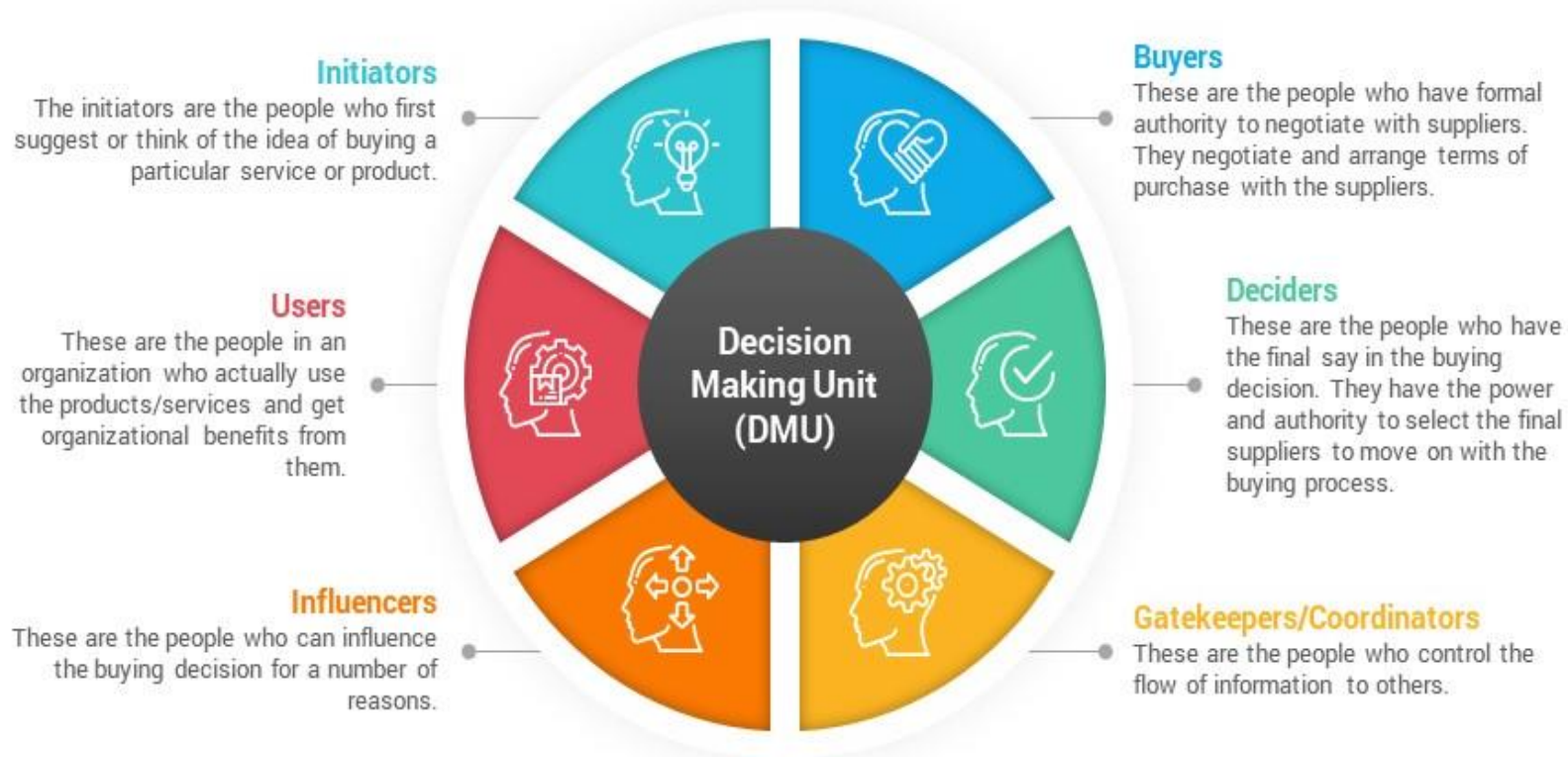
Σημαντικά στοιχεία της αγοράς αυτής:

- ✓ Οι τιμές ακολουθούν την τάση των EU ETS
- ✓ Απουσία υποχρεωτικότητας για εμπορία εκπομπών
- ✓ Βασίζεται στην επίδραση των αξιολογητών για το ύψος των επιχορηγήσεων ως carbon offsets
- ✓ Προσφέρει καλή φήμη περιβαλλοντικής συνείδησης στους end buyers

Decision Making Model – Μοντέλο Λήψης Απόφασης

Decision Making Unit (DMU) Model

Individuals who make up the DMU



Παίκτες:

- ✓ Εμπνευστές
- ✓ Αγοραστές (υπεύθυνοι για διαπραγματεύσεις αγοράς με τους προμηθευτές)
- ✓ Χρήστες (τόσο υπάλληλοι όσο και πελάτες)
- ✓ Σύμβουλοι
- ✓ Υπεύθυνοι για την τελική απόφαση
- ✓ Συντονιστές (καθορίζουν την ροή πληροφορίας μεταξύ εμπνευστών και αγοραστών)

Case Study Scenario για ένα διυλιστήριο - Σενάριο Μελέτης Περίπτωσης (Επιρροή ESGs)

Corporate DMM tool based on ESG incentives

Business as usual

Corporate Loan Values		Loan Summary	
Corporate Debt amount	\$600.000.000,00	Monthly payment	\$11.530.060,93
Annual interest rate	5,75%	Number of payments	60
Loan period in years	5	Total interest	\$91.803.655,59
Start date of loan	7/7/22	Total cost of loan	\$691.803.655,59

CO ₂ emitted volumes (tons)	3.000.000
CO ₂ Credits (tons)	1.000.000
Carbon Allowances (tons)	2.000.000
Cost of Carbon Allowances (\$)	\$ 160.000.000,0

80,0 expected to get missed above - \$150 - \$200 / ton of CO₂ ... \$ 300.000.000,0 \$ 400.000.000,0

Green initiatives' affiliation

Annual interest rate	5,75%	lowered by 0,4% up to 2,0%	5,35%	3,75%
Basis Point:	575	lowered by 40 up to 200 bps	535	375
Corporate Debt	\$600.000.000,0		\$600.000.000,0	\$600.000.000,0
Bi-annual interest payments	\$69.180.365,6		\$68.515.213,8	\$65.894.106,0
Total interest	\$22.623.290,0		\$16.636.923,8	
Total cost of corporate Debt	\$691.803.655,6		\$668.515.213,8	\$658.941.059,8

Shares Price Performance	case by case estimated
Intangible Marketing benefits	case by case estimated
Land Value uplift	case by case estimated

5-years financial benefit only from the lowered interest rates

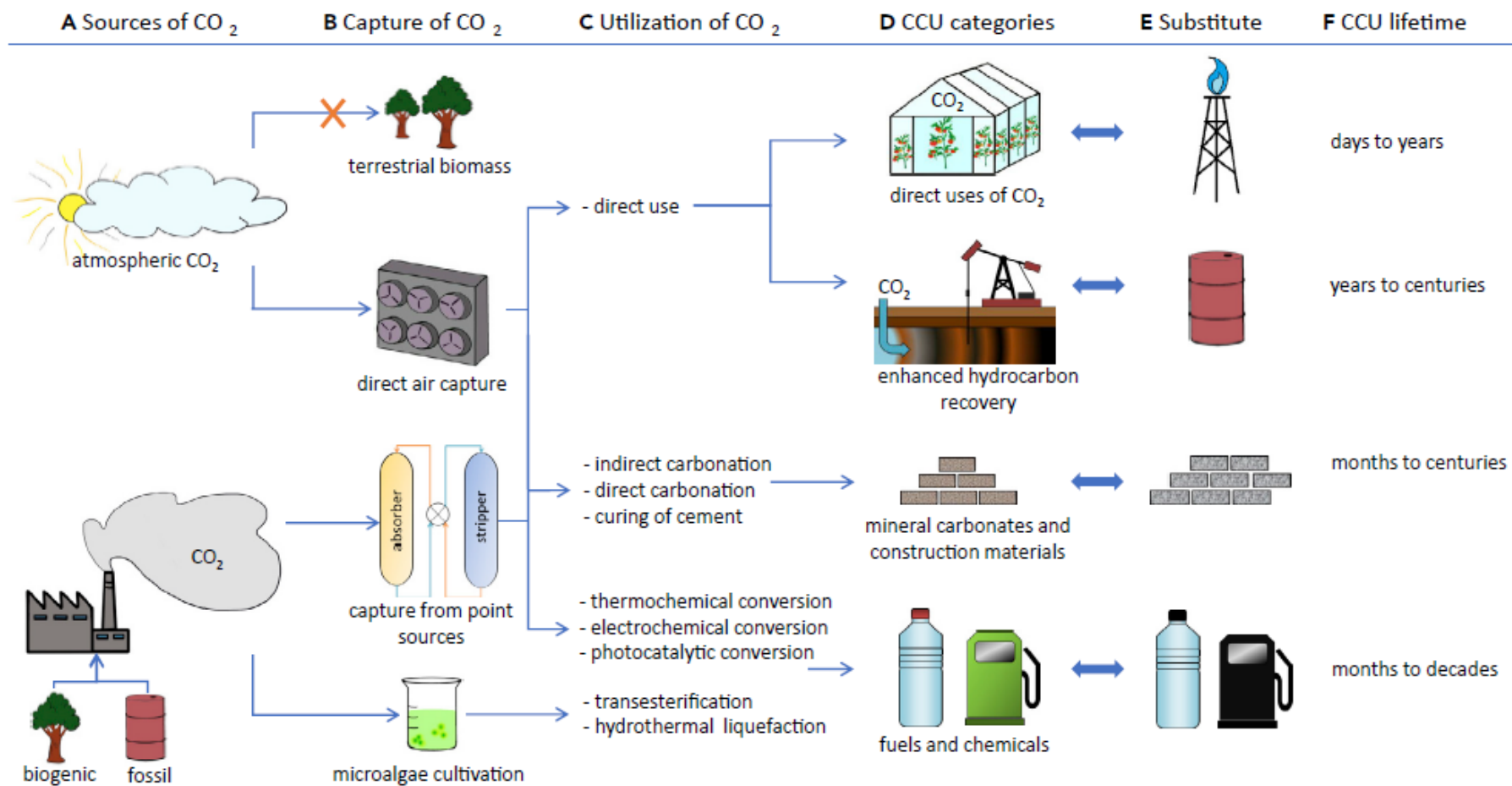
\$23.288.441,8	\$32.862.595,8
----------------	----------------

What is meant by 50 Basis Points? Since 1 Basis Point is equal to 0.01 %, 50 Basis point is equal to 0.5 percent.

Παράμετροι που επηρεάζουν το μοντέλο:

- ✓ CO₂ εκπομπές
- ✓ CO₂ credits
- ✓ CO₂ allowances
- ✓ Αξία γης
- ✓ ESGs
- ✓ Εταιρικό χρέος
- ✓ Υλικά και άυλα οφέλη (tangible and intangible benefits)
- ✓ Basic Points (δείκτης επιτοκίων)
- ✓ Εθνικό και Ευρωπαϊκός δείκτης προόδου και αναγκαιότητας

Σύνοψη των εξεταζόμενων Τεχνολογιών CCUS που καλύφθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία



Τελικά Συμπεράσματα

Ευκαιρίες για ανάπτυξη των CCUS:

- Νομικό και Οικονομικό Περιβάλλον
- Πρώθηση της κυκλικής οικονομίας
- Συμβολή στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα και μακροζωία
- Ευαισθητοποίηση του κόσμου για θέματα περιβάλλοντος

Κριτήρια επίτευξης στόχων προσέλκυσης επενδυτών:

- Γεωλογικοί Περιορισμοί
- Ετοιμότητα Τεχνολογίας - Scalability
- Έξοδα λειτουργικά και κεφαλαιουχικά
- Ποιότητα και ποσότητα οφελών της λειτουργίας των CCUS
- Κοινωνική αποδοχή και στήριξη
- Στοχευμένο Decision Making Model

Εμπόδια για την ανάπτυξη των CCUS:

- Χαμηλή τεχνολογική ετοιμότητα (scalability) ακόμα
- Πιθανή ανάγκη για δημιουργία νέων υποδομών
- Κίνδυνος από υψηλό ποσοστό επανεκπομπών που ακυρώνει την διαδικασία δέσμευσης
- Μη συμπερίληψη των CCU ακόμα στο νομοθετικό πλαίσιο των EU ETS
- Απουσία επαρκών προτύπων και πιστοποιήσεων για την καλλιέργεια εμπιστοσύνης από την πλειοψηφία της κοινωνίας για την επωφελία τέτοιων τεχνολογιών



Τεχνολογίες Δέσμευσης και Αξιοποίησης Διοξειδίου του Άνθρακα (CO₂) – οι ευκαιρίες, οι προκλήσεις και η μελλοντική χρηματοοικονομική βιωσιμότητά τους

Technologies of Capture and Utilization of Carbon Dioxide (CO₂) – their opportunities, challenges, and their future financial viability



Σας ευχαριστώ πολύ για τη προσοχή σας

Κωνσταντίνος Φούρλαρης - mc17003

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ