

Θερμοδυναμική, Οικονομική και Περιβαλλοντική Ανάλυση Ατμοηλεκτρικής Μονάδας Λιγνίτη με Κατακράτηση Άνθρακα Κορωνάιος Χ., Κοσμίδου Μ., Γρηγοριάδης Θ.

Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θύρα 483, 54124 Θεσσαλονίκη
Email: koroneos@aix.meng.auth.gr

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία ερευνάται η δυνατότητα προσθήκης συστημάτων διαχωρισμού και κατακράτησης CO₂ από τα καυσαέρια (CCS), στους υφιστάμενους λιγνιτικούς ατμοηλεκτρικούς σταθμούς του ελληνικού ενεργειακού δικτύου. Μέσω της εξεργειακής και οικονομικής ανάλυσης παρατηρείται ότι είναι δυνατή η προσθήκη του συστήματος δέσμευσης CO₂ από τα καυσαέρια με απορρόφηση με τη χρήση μονοαιθανολαμίνης (MEA). Η θεώρηση που γίνεται είναι πως η απορρόφηση του διοξειδίου του άνθρακα είναι κατά 90% από τα καυσαέρια. Η εργασία επικεντρώνεται στις επιπτώσεις από την ένταξη της μονάδας κατακράτησης (CCS) στον ΑΗΣ και στην απόδοση της μονάδας. Η προσθήκη αυτού του συστήματος μειώνει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, αλλά αυξάνει την παραγωγή του παραγόμενου CO₂/kWh με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η καθαρή εξεργειακή απόδοση του ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού και να αυξάνεται το κόστος. Από οικονομικής πλευράς, η σκοπιμότητα αυτού του συγκροτήματος εξαρτάται από την τιμή των εκπομπών CO₂ στην παγκόσμια αγορά καθώς και από άλλες κυρώσεις που μπορεί να προκύψουν από την τιμή άλλων πηγών ενέργειας πέραν του λιγνίτη. Με τα σημερινά δεδομένα, η κατασκευή και λειτουργία των συστημάτων CCS δεν είναι οικονομικά ωφέλιμη επιλογή. Σίγουρα δεν πρέπει να λησμονείται το γεγονός ότι η δραστική μείωση του διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον με την προσθήκη της μονάδας CCS. Ωστόσο, τα οφέλη που προέρχονται από τη δράση αυτή αντισταθμίζεται με την αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων. Επίσης, οι σημερινές τεχνολογίες αποθήκευσης δημιουργούν ερωτήματα σχετικά με την αξιοπιστία τους στην πάροδο του χρόνου.

1. Εισαγωγή

Από τα πρώτα χρόνια της βιομηχανικής επανάστασης, στα τέλη του 18ου αιώνα, μέχρι σήμερα συντελέστηκαν ριζικές αλλαγές στην οικονομική και κοινωνική δομή των ανεπτυγμένων κυρίως αλλά και των υπολοίπων χωρών. Οι αλλαγές αυτές βασίστηκαν στην επιστημονική και τεχνολογική πρόοδο και στην κατανάλωση φυσικών πόρων και επηρέασαν δραματικά κάθε πτυχή της κοινωνίας και της ανθρώπινης δραστηριότητας. Οι ενεργειακοί πόροι που χρησιμοποιήσε ο άνθρωπος είναι τα κάθε μορφής ορυκτά καύσιμα που υπάρχουν στον πλανήτη. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις όμως που συνόδευσαν τη βιομηχανική και οικονομική ανάπτυξη άρχισαν να γίνονται αντιληπτές μόλις στα μέσα του 20^{ου} αιώνα, όταν άρχισαν να είναι απτά τα πρώτα συμπτώματα όπως η όξινη βροχή, η τάση αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη κ.λ.π. Από τότε και έπειτα ένα μεγάλο μέρος της κοινωνίας έστρεψε το ενδιαφέρον του προς την κατεύθυνση αυτή όπως και ένα μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας ασχολήθηκε με τα περιβαλλοντικά προβλήματα του πλανήτη. Όπως είναι γνωστό, ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα της γης είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Για το φαινόμενο αυτό ευθύνονται οι εκπομπές του CO₂ και των υπολοίπων «αερίων του θερμοκηπίου». Η ανάγκη μείωσης των εκπομπών αυτών είναι άμεση και επιτακτική. Για το σκοπό αυτό η διεθνής κοινότητα έχει υιοθετήσει μια σειρά δράσεων που στοχεύουν στη μείωση των εκπομπών στις διαδικασίες παραγωγής ενέργειας [1], βελτίωση της απόδοσης στην κατανάλωση ενέργειας, την εξοικονόμηση ενέργειας, την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή και την τεχνολογική εξέλιξη της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [2].

Στο πλαίσιο της μείωσης των αερίων εκπομπών από την παραγωγή ενέργειας και από άλλες βιομηχανικές διαδικασίες έχουν αναπτυχθεί ορισμένες τεχνολογίες για τη μείωση των εκπομπών CO₂ από μεγάλους βιομηχανικούς λέβητες (>20MW) που χρησιμοποιούν ως καύσιμο διάφορες

μορφές άνθρακα (λιθάνθρακα, λιγνίτη, ξυλίτη κ.λ.π). Οι τεχνολογίες αυτές χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες [3]:

- Αυτές που γίνεται διαχωρισμός του άνθρακα πριν την καύση του καυσίμου.
- Αυτές που η καύση γίνεται με καθαρό οξυγόνο
- Αυτές που γίνεται διαχωρισμός και κατακράτηση του CO₂ από τα καυσαέρια (μετά την καύση).

Στην εργασία αυτή γίνεται αναφορά στις τεχνολογίες αυτές και εξετάζονται οι επιπτώσεις που θα έχει η προσθήκη ενός συγκροτήματος διαχωρισμού και κατακράτησης του CO₂ σε έναν υφιστάμενο θερμοηλεκτρικό σταθμό που λειτουργεί με κονιορτοποιημένο λιγνίτη. Η κατανάλωση ενέργειας σε μια χώρα έχει άμεση σχέση με την ποιότητα ζωής (βιοτικό επίπεδο) των κατοίκων της. Τις τελευταίες δεκαετίες στις αναπτυγμένες χώρες κρίνεται αναγκαία η εξοικονόμηση ενέργειας, ιδιαιτέρως σε αυτές που δεν έχουν δικούς της συμβατικούς πόρους και είναι αναγκασμένες να καταφεύγουν στην εξαγορά αυτών. Σήμερα, ένας από τους κύριους παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν στις συζητήσεις της βιώσιμης ανάπτυξης είναι η ενέργεια, και ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα είναι η απαίτηση για έναν ανεφοδιασμό της ενέργειας που να είναι πλήρως βιώσιμος και να εξασφαλίζονται η αποτελεσματική και αποδοτική χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων. Ένας τέτοιος ανεφοδιασμός μακροπρόθεσμα πρέπει να είναι εύκολα διαθέσιμος με λογικό κόστος, να είναι βιώσιμος και να είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί για όλους τους απαραίτητους στόχους χωρίς να έχει τις αρνητικές κοινωνικές επιδράσεις. Για αυτό υπάρχει μια στενή επαφή μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της βιώσιμης ανάπτυξης. Σήμερα η καθημερινή κατανάλωση πετρελαίου παγκοσμίως είναι 76 εκατομμύριο βαρέλια. Παρά τις καλά γνωστές συνέπειες της καύσης υδρογονανθράλων στο περιβάλλον, η χρήση πετρελαίου αναμένεται για να αυξηθεί σε 123 εκατομμύριο βαρέλια ανά ημέρα μέχρι το έτος 2025 [4]. Κρίνεται αναγκαία η υποκατάσταση του καυσίμου με άλλα που θα παράγουν λιγότερους ρύπους, αλλά συγχρόνως απαραίτητη είναι και η εξοικονόμηση ενέργειας (οικονομία στην κατανάλωση). Εκτός όμως των παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση και με την υποκατάσταση της ενέργειας που παράγεται από συμβατικά καύσιμα, με ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από τις βιομηχανικές διεργασίες πριν τα αέρια φθάσουν την ατμόσφαιρα. Η τεχνολογία κατακράτησης του άνθρακα (CCS) θα βοηθήσει ιδιαίτερα τις χώρες που εξαρτώνται από τον άνθρακα, όπως η Κίνα και η Ινδία, για τη μείωση των εκπομπών μακράς διάρκειας. Μέχρι το 2015, προγραμματίζεται να λειτουργήσουν 12 μεγάλης κλίμακας μονάδες επίδειξης στην ΕΕ και το σύστημα CCS να καταστεί υποχρεωτικό για όλες τις νέες μονάδες άνθρακα και φυσικού αερίου αρχής γενομένης από το έτος 2020.

2. Δέσμευση CO₂ από λιγνίτη και φυσικό αέριο στις ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες

Στα πλαίσια του πρωτοκόλλου του Κιότο, βάση του οποίου έχουν υιοθετηθεί μέτρα περιορισμού των εκπομπών για τα αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε διεθνές επίπεδο, η ανάγκη για μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς είναι επιτακτική [1]. Επιπλέον, η αναπτυσσόμενη αγορά CO₂ καθώς και το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη βέλτιστη ανάκτηση του πετρελαίου από τα κοιτάσματα του (EOR), αποτελούν το οικονομικό κίνητρο της μεσοπρόθεσμης εφαρμογής των τεχνολογιών δέσμευσης CO₂. Η δέσμευση και ασφαλής αποθήκευση του CO₂ επιτρέπει τη χρήση των ορυκτών καυσίμων, με παράλληλη μείωση των εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα, συνεισφέροντας στην αντιμετώπιση της κλιματικής μεταβολής. Σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν παγκοσμίως την κυρίαρχη πηγή πρωτογενούς ενέργειας, παρέχοντας πάνω από το 85% αυτής, και αναμένεται να παραμείνουν για τα επόμενα 50 χρόνια. Παρά τις σημαντικές προσπάθειες και επενδύσεις, από πολλά κράτη, για την προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την εξοικονόμηση ορυκτών καυσίμων, για την αντιμετώπιση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής θα χρειαστεί σημαντική συνεισφορά από τις τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης του CO₂. Οι τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂ από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, αναμένεται να συνεισφέρουν σημαντικά στη μείωση του φαινομένου του θερμοκηπίου σε παγκόσμια κλίμακα, λαμβάνοντας υπόψη ότι το παραγόμενο CO₂ από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς αποτελεί περίπου το 1/3 των συνολικών εκπομπών CO₂ στην ατμόσφαιρα [6]. Οι λόγοι που αναφέρθηκαν παραπάνω δικαιολογούν την έντονη ερευνητική

δραστηριότητα προς την κατεύθυνση απομόνωσης και δέσμευσης του CO₂ σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, εφόσον αναμένεται ότι θα κριθεί αναγκαία η εφαρμογή τεχνολογιών δέσμευσης CO₂ [7]. Οι κυριότερες εμπορικές ή υπό ανάπτυξη τεχνολογίες δέσμευσης CO₂ σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες [8]:

1. Διαχωρισμός CO₂ από το καυσαέριο
2. Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου
3. Παραγωγή καυσίμου που δεν περιέχει άνθρακα

2.1 Διαχωρισμός διοξειδίου του άνθρακα από το καυσαέριο

Οι ακόλουθες βασικές διεργασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απομάκρυνση του CO₂ από το καυσαέριο σε μεγάλη κλίμακα:

- Απορρόφηση (διαχωρισμός του CO₂ με υγρό διάλυμα σε στήλη απορρόφησης)
- Προσρόφηση (διαχωρισμός του CO₂ με προσρόφηση αυτού σε κάποιο στερεό)
- Μembrάνες (βάση της διαφορετικής διαπερατότητας των αερίων διαμέσου μεμβρανών)
- Κρυογενικές τεχνολογίες (Ψύξη ή συμπύκνωση του CO₂)

Από τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, η απορρόφηση είναι μια ώριμη εμπορικά διαθέσιμη τεχνολογία, ενώ οι υπόλοιπες διεργασίες δεν είναι ανεπτυγμένες σε στάδιο που να αποτελούν ελκυστικές εναλλακτικές λύσεις. Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν υδατικό διάλυμα MEA περιεκτικότητας 15-25% κ.β. για λόγους αποφυγής δημιουργίας συνθηκών διάβρωσης. Κατά τη λειτουργία του συστήματος απορρόφησης CO₂, το εισερχόμενο καυσαέριο στη στήλη απορρόφησης πρέπει να είναι ελεύθερο αερίων όπως SO₂, O₂, υδρογονάνθρακες καθώς και σωματίδια. Το CO₂ απορροφάται από το υγρό διάλυμα στη στήλη απορρόφησης που λειτουργεί σε θερμοκρασία 40-60°C. Το καυσαέριο και το υγρό διάλυμα έρχονται σε επαφή κατά αντιστροφή. Το καυσαέριο, πριν την είσοδό του στη στήλη, συμπιέζεται στα 1,3 bar και εισέρχεται από το κάτω μέρος. Το στάδιο της αναγέννησης του πλούσιου σε CO₂ διαλύματος πραγματοποιείται στους 120-150 °C και χαμηλές πιέσεις και στόχο έχει την απομάκρυνση του CO₂ από το διάλυμα απορρόφησης.

2.2 Καύση σε συνθήκες καθαρού οξυγόνου (oxy-fuel)

Στη τεχνολογία αυτή η καύση του στερεού καυσίμου, των υδρογονανθράκων ή του συνθετικού αερίου πραγματοποιείται με καθαρό οξυγόνο και το παραγόμενο καυσαέριο περιέχει κυρίως διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμό. Με ψύξη των καυσαερίων, το H₂O που περιέχεται στο καυσαέριο συμπυκνώνεται και παράγεται σχεδόν καθαρό αέριο CO₂. Στη συνέχεια, αυτό συμπιέζεται και μεταφέρεται στην περιοχή αποθήκευσης. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, αεριοστροβιλικές μονάδες και σταθμούς συνδυασμένου κύκλου με καύσιμο φυσικό αέριο ή ακόμα και σε συστήματα συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση. Επίσης, μπορεί να εφαρμοσθεί για οποιοδήποτε ορυκτό καύσιμο (στερεά καύσιμα, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο). Για την παραγωγή του οξυγόνου είναι απαραίτητη η χρήση μονάδας διαχωρισμού του αέρα (Air Separation Unit, ASU). Η κρυογονική μέθοδος είναι η πιο κατάλληλη τεχνολογία για το διαχωρισμό του αζώτου από τον αέρα. Η καύση με καθαρό οξυγόνο οδηγεί σε μη αποδεκτά υψηλή θερμοκρασία καύσης στην εστία. Για να μειωθεί η θερμοκρασία αυτή, τμήμα του καυσαερίου ανακυκλοφορεί στο θάλαμο καύσης. Στην περίπτωση εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής σε υφιστάμενο σταθμό, στον σχεδιασμό των μετατροπών θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η θερμοκρασία και η παροχή του καυσαερίου θα πρέπει να διατηρηθούν στα επίπεδα της συμβατικής καύσης με αέρα.

2.3 Αεριοποίηση λιγνίτη

Σύμφωνα με αυτή την τεχνολογία, ο άνθρακας απομακρύνεται από το καύσιμο πριν αυτό οδηγηθεί για καύση. Στην τυπική διαδικασία του συνδυασμένου κύκλου με αεριοποίηση (IGCC), το στερεό καύσιμο κονιορτοποιείται και διαλύεται σε νερό. Στη συνέχεια το διάλυμα θερμαίνεται με οξυγόνο ή αέρα περίπου στους 1300 K και παράγεται ένα αέριο μίγμα που αποτελείται κυρίως από

υδρογονάνθρακες και μονοξειδίο του άνθρακα. Ακολουθεί αντίδραση μετατροπής του μονοξειδίου του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό (CO shift). Η αντίδραση αυτή είναι εξώθερμη. Το αέριο καύσιμο που τελικά παράγεται περιέχει H₂ και CO₂. Λόγω της υψηλής μερικής πίεσης του CO₂ στο αέριο μίγμα, η μέθοδος της φυσικής απορρόφησης αποτελεί μια πιθανή λύση για το διαχωρισμό του CO₂ από το H₂ στο αέριο καύσιμο. Μεμβράνες διαχωρισμού του H₂ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν.

2.4 Αποθήκευση του CO₂

Μετά τη δέσμευση, το CO₂ μπορεί είτε να αποθηκευτεί είτε να ξαναχρησιμοποιηθεί (π.χ. ως πρόσθετο σε αναψυκτικά ή στα θερμοκήπια για να ενισχύσει την ανάπτυξη των φυτών). Επειδή η αγορά για την επαναχρησιμοποίηση του CO₂ είναι σήμερα περιορισμένη, η πλειονότητα του εξαγόμενου CO₂ πρέπει να αποθηκευτεί. Το CO₂ μπορεί να αποθηκευτεί σε γεωλογικούς σχηματισμούς (συμπεριλαμβάνονται οι εξαντλημένοι ταμειυτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου, βαθείς αλμυροί υδροφορείς και μη εξορυχθέντα στρώματα γαιανθράκων). Το CO₂ μπορεί επίσης να συγκρατηθεί υπό μορφή ορυκτών.

3. Περιγραφή λιγνιτικής ατμοηλεκτρικής μονάδας

Η περιγραφή που ακολουθεί περιορίζεται στα βασικά λειτουργικά συστήματα και στοιχεία μιας μονάδας τα οποία καθορίζουν τα λειτουργικά και ενεργειακά μεγέθη της μονάδας και επηρεάζονται ή έχουν σχέση με τις μετασκευές και προσθήκες που απαιτούνται για να γίνει η κατακράτηση και ο διαχωρισμός του CO₂. Τα υπόλοιπα συστήματα παραλείπονται διότι η περιγραφή τους δεν έχει πρακτική αξία για το αντικείμενο που εξετάζεται στην παρούσα εργασία και η αναφορά σε αυτά πιθανόν να δυσκολέψει τον αναγνώστη που δεν είναι εξοικειωμένος με τέτοιου είδους εγκαταστάσεις. Τέτοια συστήματα είναι: α) τα βοηθητικά συστήματα όπως το συγκρότημα επεξεργασίας νερού στο σύστημα ψύξης της γεννήτριας, οι αυτοματισμοί της μονάδας κ.λ.π. και β) ο εξοπλισμός που χρησιμεύει για τις διαδικασίες έναρξης ή παύσης της μονάδας. Τα βοηθητικά συστήματα, παρόλο που δεν αναλύονται, λαμβάνονται υπ' όψη στα ενεργειακά ισοζύγια. Η μονάδα που περιγράφεται παρακάτω και τα μεγέθη που δίνονται αναφέρονται στη ΜΟΝΑΔΑ 1 του ΑΗΣ Μελίτης – Αχλάδας στη Φλώρινα. Η μονάδα έχει ονομαστική ισχύ 330 MWeI [9], πίεση ατμού 240 atm και θερμοκρασία ατμού 540° C. Είναι μονάδα υπερκρίσιμου σημείου λειτουργίας, με σύστημα καύσης χαμηλών εκπομπών NO_x, έχει διάταξη αποθείωσης καυσαερίων και τεχνολογικά ανήκει στην τελευταία γενιά λιγνιτικών μονάδων. Η μονάδα αυτή είναι η νεότερη του Ελληνικού συστήματος (άρχισε να λειτουργεί το έτος 2006) και λόγω του τεχνολογικού της επιπέδου απαιτεί τις λιγότερες μετασκευές για την προσθήκη συγκροτήματος δεσμευσης CO₂, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες λιγνιτικές μονάδες του Ελλαδικού χώρου. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα βασικά λειτουργικά μεγέθη της μονάδας. Τα μεγέθη αυτά αναφέρονται σε φορτίο στροβίλου 100% (330 MWeI) με ποιότητα λιγνίτη τη βασική (η σύσταση και θερμογόνο δύναμη του καυσίμου δίνονται στον πίνακα 1), θερμοκρασία περιβάλλοντος 13° C και ατμοσφαιρική πίεση 976 mbar.

Πίνακας 1: Ανάλυση βασικής ποιότητας λιγνίτη

ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ	% κ.β.
Υγρασία	36,80
Τέφρα	27,36
Συνολικός άνθρακας (C)	22,58
Υδρογόνο (H)	2,07
Άζωτο (N)	0,37
Θείο (S)	0,94
Οξυγόνο (O)	9,88
Σύνολο	100

Πίνακας 2: Λειτουργικά μεγέθη της Μονάδας του ΑΗΣ Μελίτης (τα στοιχεία προέρχονται από τις μετρήσεις που έγιναν κατά την παραλαβή του σταθμού)

	Μονάδα	Τιμή
Ονομαστική Ισχύς Μονάδας	MW	330
Παράμετροι Λέβητα		
Ονομαστική Ατμοπαραγωγή	Kg/s	268,89
Μέγιστη συνεχής Ατμοπαραγωγή	Kg/s	282,40
Παροχή καυσίμου (Βασικό LHV: 7955 kJ/kg)	Kg/s	101,40
Παροχή θερμότητας	kJ/s	806637
Παροχή ολικού αέρα καύσης	LHV	337,50
Βαθμός απόδοσης λέβητα (LHV)		89,6%
Ειδική κατανάλωση θερμότητας	kJ/kWh	7784
Παράμετροι κύκλου ατμού		
Ονομαστική Ισχύς στην έξοδο της Γεννήτριας	MW	330
Θερμοκρασία ατμού πριν τη βαθμίδα υψηλής πίεσης	°C	540
Πίεση ατμού πριν τη βαθμίδα υψηλής πίεσης	bar	240
Πίεση κύριου ψυγείου	bar	0,0559
Πίεση στην έξοδο των τροφοδοτικών αντλιών	bar	292,5
Θερμοκρασία ψυκτικού νερού	°C	22
Παροχή ψυκτικού νερού	m ³ /s	10,57
Βαθμός απόδοσης κύκλου ατμού		46,2%
Εσωτερική κατανάλωση ενέργειας	MW	37,88
Ηλεκτρική ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο	MW	292,12
Βαθμός απόδοσης μονάδας (LHV)		36,21%
Καυσαέρια		
Συνολική παροχή καυσαερίων	Kg/s	554
Εκπομπές CO ₂	Kg/s	81,85
Ειδική εκπομπή καυσαερίων	Kg/kWh	1,009

Μία τυπική λιγνιτική μονάδα αποτελείται από τα εξής:

❖ Σύστημα τροφοδοσίας καυσίμου. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τους «**τροφοδότες του λιγνίτη**» οι οποίοι μεταφέρουν το καύσιμο (το οποίο είναι σε μορφή μεγάλων τεμαχίων) από τα «**σιλό λιγνίτη**» προς τους «**μύλους άλεσης**». Στην πορεία ο λιγνίτης προθερμαίνεται με ένα ρεύμα καυσαερίων και οδηγείται στους μύλους άλεσης, κονιορτοποιείται και εισάγεται στο λέβητα.

❖ Σύστημα αέρα καύσης. Αποτελείται από τους «**ανεμιστήρες αέρα καύσης**» (FDF) οι οποίοι οδηγούν τον ατμοσφαιρικό αέρα στους «**προθερμαντές αέρα καύσης με ατμό**» και σε δεύτερο στάδιο στους «**προθερμαντές αέρα καύσης με καυσαέρια**» (LUVO) όπου θερμαίνεται και στη συνέχεια διαμοιράζεται στους καυστήρες οι οποίοι αναμιγνύουν τον αλεσμένο λιγνίτη με τον αέρα και εκτοξεύουν το μίγμα στο λέβητα.

Ατμολέβητας. Ο ατμολέβητας είναι μια μεταλλική κατασκευή το ύψος της οποίας στις σύγχρονες μονάδες φτάνει τα εκατό (100) μέτρα. Στο χαμηλότερο μέρος του βρίσκεται η τεφρολεκάνη και το σύστημα αποκομιδής τέφρας και ανεμιστήρες ανακυκλοφορίας καυσαερίων. Σε ύψος περίπου 20 μέτρων γίνεται η εισαγωγή του μίγματος αέρα – λιγνίτη και εκεί αρχίζει η καύση (περιοχή της εστίας). Ψηλότερα υπάρχουν δέσμες σωλήνων (εναλλάκτες), τους οποίους συναντούν τα καυσαέρια στην πορεία τους και στους οποίους γίνεται η εναλλαγή της θερμότητας από τα καυσαέρια προς το νερό.

❖ Σύστημα ελκυσμού καυσαερίων – αποκομιδής ιπτάμενης τέφρας. Ο απαραίτητος ελκυσμός για την απομάκρυνση των καυσαερίων δημιουργείται από τους «**ανεμιστήρες καυσαερίων**» (IDF). Μέρος αυτού του συστήματος είναι και τα ηλεκτροστατικά φίλτρα που κατακρατούν την ιπτάμενη τέφρα.

❖ Συγκρότημα αποθείωσης. Όταν υπάρχει τέτοιο συγκρότημα τοποθετείται μετά από ηλεκτροστατικά φίλτρα της μονάδας και σκοπός του είναι να κατακρατάει τις ενώσεις του S₂ που υπάρχουν στα καυσαέρια. Ο ΑΗΣ Μελίτης είναι ο μοναδικός λιγνιτικός σταθμός στην Ελλάδα με τέτοιο συγκρότημα.

❖ Ατμοστρόβιλος - Γεννήτρια. Ο ατμοστρόβιλος με την γεννήτρια και τη διεγέρτρια της γεννήτριας είναι τοποθετημένοι σε κοινό ρότορα και είναι η «μηχανή» που μετατρέπει την

ενέργεια του ατμού σε μηχανική και κατόπιν ηλεκτρική ενέργεια. Ο ατμοστρόβιλος αποτελείται από τρεις (3) βαθμίδες α) βαθμίδα υψηλής πίεσης, βαθμίδα μέσης πίεσης και βαθμίδα χαμηλής πίεσης. Ο ρότορας περιστρέφεται με συχνότητα 50Hz και η τάση στην έξοδο της γεννήτριας είναι 20KV.

❖ Κύριος ψύκτης (συμπυκνωτής) και πύργος ψύξης. Στον κύριο ψύκτη γίνεται ψύξη και συμπύκνωση του ατμού που βγαίνει από το στρόβιλο. Η ψύξη επιτυγχάνεται με ένα κύκλωμα ψυκτικού νερού το οποίο απορρίπτει θερμότητα στο περιβάλλον από τον πύργο ψύξης.

❖ Προθερμαντές. Είναι εναλλάκτες στους οποίους γίνεται προθέρμανση του νερού πριν οδηγηθεί στο λέβητα. Η προθέρμανση γίνεται με ρεύματα ατμού που απομαστεύονται από διάφορα σημεία του κύκλου. Σκοπός των προθερμαντών είναι να βελτιώσουν το βαθμό απόδοσης του κύκλου Rankine. Υπάρχουν ανοιχτοί (με ανάμιξη των μαζών των δύο ρευμάτων εναλλαγής θερμότητας) και κλειστοί (χωρίς ανάμιξη) προθερμαντές.

❖ Κύριες αντλίες τροφοδοσίας. Οι αντλίες αυτές τροφοδοτούν το λέβητα με νερό υψηλής πίεσης. Είναι μεγάλου μεγέθους αντλίες και είναι αυτές που ανεβάζουν την πίεση του νερού στα 292 bar περίπου, πριν αυτό εισέλθει στο λέβητα.

❖ Κύριος μετασχηματιστής. Είναι ο μετασχηματιστής μέσω του οποίου συνδέεται ο σταθμός με το σύστημα μεταφοράς. Ο κύριος Μ/Σ ανυψώνει την τάση της γεννήτριας στην τιμή τάσης του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μονάδα λειτουργεί με κονιορτοποιημένο λιγνίτη. Το καύσιμο εκτοξεύεται από τους μύλους άλεσης στο λέβητα μαζί με θερμό αέρα. Η καύση παράγει την θερμότητα που απαιτείται για την παραγωγή υπέρθερμου και ανάθερμου ατμού. Η κατανάλωση καυσίμου είναι 360 tn/h, και η κατανάλωση αέρα 1215 tn/h.

Οι μετρήσεις που γίνονται από τη ΔΕΗ για τη σύσταση των καυσαερίων δίνονται σε κατ' όγκο σύσταση, χωρίς να δίνονται ακριβή στοιχεία για τη θερμοκρασία και την πίεση. Το μόνο στοιχείο που είναι ασφαλές είναι η συνολική παροχή των καυσαερίων μετά τα I.D. Fans (1.900.824 kg/h) και μετά την αποθείωση (FGD) (1.994.836 kg/h).

Η σύσταση των καυσαερίων, μετά και την αποθείωση, βάση της οποίας γίνεται η εκτίμηση των ενεργειακών μεγεθών της μονάδας δέσμευσης CO₂ είναι η παρακάτω:

Πίνακας 3: Σύσταση καυσαερίων μετά την αποθείωση

Συστατικό	Kg/hr	Kmoles/hr	Kmole %
CO ₂	294660	6696,0	9,12
O ₂	57744	1804,5	2,46
H ₂ O	318528	17696,0	24,1
N ₂	1319868	47138,1	64,23
SO ₂	4036	63,1	0,086
Σωματίδια	50 (mg/Nm ³)		
Σύνολο	1 994 836		

Η σύσταση αυτή υπολογίστηκε προσεγγιστικά από την κατ' όγκο σύσταση που δίνει η ΔΕΗ.

4 Διαδικασία δέσμευσης CO₂ με διάλυμα Μονοιθανολαμίνης (MEA)

Είναι γενικώς αποδεκτό ότι η πιο επιτυχημένη τεχνική δέσμευσης CO₂ από τα καυσαέρια σε θερμοηλεκτρικούς σταθμούς είναι η μέθοδος έκπλυσης με χημική απορρόφηση με Μονοιθανολαμίνη [10]. Η μέθοδος αυτή είναι δυνατό να δεσμεύσει ακόμα και 98% του διοξειδίου του άνθρακα από το καυσαέριο και να δώσει καθαρότητα τελικού προϊόντος πάνω από 99%. Τα περισσότερα συστήματα χρησιμοποιούν διάλυμα MEA σε νερό με περιεκτικότητα μόλις 15-30% κ.β. για λόγους αποφυγής δημιουργίας συνθηκών διάβρωσης. Για την ορθή λειτουργία του συστήματος απορρόφησης CO₂, το καυσαέριο που εισέρχεται στη στήλη απορρόφησης,

πρέπει να έχει περιεκτικότητα σε NO_x , SO_2 , O_2 , υδρογονάνθρακες και σωματίδια που δεν ξεπερνά κάποια ανώτατα όρια ώστε να μην καταστρέφεται το διάλυμα MEA και να μην δημιουργούνται επικαθήσεις ή διαβρώσεις. Το CO_2 απορροφάται από το υγρό διάλυμα μέσα στη στήλη απορρόφησης που λειτουργεί σε θερμοκρασία 40-60°C. Το καυσαέριο και το υγρό διάλυμα έρχονται σε επαφή κατ' αντιστροφή. Το καυσαέριο, πριν την είσοδό του στη στήλη, συμπιέζεται στα 1,3 bar και εισέρχεται από το κάτω μέρος. Το διάλυμα εισέρχεται στο άνω μέρος της στήλης απορρόφησης και κατευθύνεται προς τα κάτω. Το στάδιο της αναγέννησης του πλούσιου σε CO_2 διαλύματος πραγματοποιείται στους 120-150 °C και χαμηλές πιέσεις και στόχο έχει την απομάκρυνση του CO_2 από το διάλυμα απορρόφησης. Το διάλυμα, που δεν περιέχει πλέον CO_2 και αφού έχει θερμανθεί, επιστρέφει στη στήλη απορρόφησης, αφού αποδώσει τη θερμότητά του στο πλούσιο σε CO_2 ρεύμα του διαλύματος. Ο περιορισμός της θερμοκρασίας της διαδικασίας αναγέννησης οφείλεται στο γεγονός ότι σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 125°C δημιουργούνται συνθήκες αποσύνθεσης του διαλύματος αλκανοαμίνης. Η απαιτούμενη θερμότητα για την αναγέννηση του διαλύματος είναι περίπου 4 MJ ανά kg δεσμευμένου CO_2 και στην περίπτωση θερμοηλεκτρικού σταθμού προέρχεται από απομάστευση ατμού χαμηλής πίεσης. Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι η αναγέννηση του διαλύματος απορρόφησης πραγματοποιείται περίπου στους 150 °C, η απομάστευση γίνεται στα 5 bar. Σε ότι αφορά την απαιτούμενη ενέργεια για τη συμπίεση του καυσαερίου πριν αυτό εισέλθει στη στήλη απορρόφησης και την απαιτούμενη ενέργεια για την κυκλοφορία του διαλύματος στο σύστημα, αυτή ανέρχεται στα 0,11 MJ ανά kg δεσμευμένου CO_2 . Στη συνέχεια ακολουθεί συμπίεση, αφύγρανση και υγροποίηση του CO_2 . Κατά την εφαρμογή της μεθόδου χημικής απορρόφησης σε ατμοηλεκτρικό σταθμό, η παροχή ατμού στο στρόβιλο χαμηλής πίεσης μειώνεται κατά τα 2/3 περίπου. Η ενέργεια που καταναλώνεται αντιστοιχεί στο 80% της συνολικής ενέργειας που απαιτεί η διαδικασία της χημικής απορρόφησης. Τελικά, η παραγωγή ενέργειας μειώνεται κατά 20-25% και ο βαθμός απόδοσης του σταθμού κατά 11-14 εκατοστιαίες μονάδες. Για έναν τυπικό σταθμό, το ποσοστό απομάκρυνσης για οικονομική λειτουργία του συστήματος όταν η περιεκτικότητα του καυσαερίου σε CO_2 είναι 3%, είναι 85%, ενώ για περιεκτικότητα 8% αυτό είναι 90-92%. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση δέσμευσης του 90% του παραγομένου CO_2 .

4.1 Απαραίτητες επεμβάσεις στον εξοπλισμό του σταθμού

Επειδή το διάλυμα αμινών αντιδρά και υποβαθμίζεται με τα SO_2 , NO_x και O_2 πρέπει κατ' αρχήν να εξασφαλιστούν οι ανώτατες περιεκτικότητες των καυσαερίων σε αυτά, επίσης υπάρχει και ανώτερο επιτρεπόμενο όριο στα στερεά σωματίδια [11]. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να γίνουν μετατροπές και προσθήκες στο σύστημα καύσης, στον λέβητα, στα ηλεκτροστατικά φίλτρα και στη μονάδα αποθείωσης του σταθμού. Οι μετατροπές αυτές είναι απαραίτητες για να είναι συμβατός ο σταθμός με τη μονάδα δέσμευσης CO_2 . Επίσης, για την παροχή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας προς τη μονάδα δέσμευσης, θα πρέπει να γίνουν μετατροπές στον στρόβιλο (βαθμίδα χαμηλής πίεσης) ώστε να είναι δυνατή η απομάστευση του απαραίτητου ατμού [12].

Μετατροπές για την βελτίωση της ποιότητας των καυσαερίων

Το NO_2 αντιδρά με την αμίνη, την καταστρέφει και συνεπώς πρέπει να περιοριστεί η παρουσία του στα καυσαέρια. Η μέγιστη περιεκτικότητα σε NO_2 που είναι ανεκτή από τη διαδικασία είναι 40 mg/Nm³ (6% O_2 v/v dry) που αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα NO_x 600 mg/Nm³. Για τον έλεγχο των NO_x και του O_2 στα καυσαέρια θα πρέπει να ληφθούν σχετικά μέτρα. Τέτοια είναι:

- Μετασκευές εντός του λέβητα. α) αντικατάσταση των καυστήρων με **καυστήρες χαμηλών NO_x** και β) **μετατροπή του συστήματος αέρα καύσης σε σύστημα δύο σταδίων.**
- Εγκατάσταση συστήματος **SCR (Selective Catalytic Reduction)** για τη περαιτέρω μείωση των NO_x .

Ο λέβητας του ΑΗΣ Μελίτης έχει εκ' κατασκευής καυστήρες χαμηλών NO_x οι οποίοι δημιουργούν υποστοιχειομετρική ζώνη καύσης η οποία περιβάλλεται από μια ζώνη μετάκαυσης. Ωστόσο δεν υπάρχουν στοιχεία για την περιεκτικότητα των NO_x στα καυσαέρια και συνεπώς δεν είναι σαφές εάν απαιτείται η προσθήκη συστήματος SCR. Η μέγιστη περιεκτικότητα των

καυσαερίων σε SO₂ δεν πρέπει να ξεπερνά τα 30 mg/Nm³ (6% O₂ v/v dry), όριο το οποίο είναι κατά πολύ χαμηλότερο από το όριο που επιβάλλει η Ευρωπαϊκή νομοθεσία προστασίας του περιβάλλοντος και σημαίνει ότι η υφισταμένη μονάδα αποθείωσης δεν επαρκεί. Αυτό φαίνεται και από τον πίνακα με τη σύσταση των καυσαερίων (SO₂: 400 mg/Nm³). Για την περαιτέρω μείωση του SO₂ πρέπει να εγκατασταθεί δευτεροβάθμια μονάδα αποθείωσης. Για τον έλεγχο το O₂ στα καυσαερία πρέπει να εξασφαλιστεί η σωστή περίσσεια αέρα στον λέβητα και να ληφθούν μέτρα για τον έλεγχο του παρασιτικού αέρα στον λέβητα, εάν αυτός ξεπερνάει την αρχική τιμή σχεδιασμού του λέβητα (στους λέβητες, λόγω της ελαφρά αρνητικής πίεσης που έχουν, πάντα υπάρχει παρασιτικός αέρας ο οποίος λαμβάνεται υπ' όψη κατά το σχεδιασμό τους).

Μετατροπές στον στρόβιλο.

Για την τροφοδοσία της μονάδας δέσμωσης απαιτείται θερμική ενέργεια για το Reboiler του διαχωριστή και τον αναγεννητή του διαλύματος ΜΕΑ και ηλεκτρική ενέργεια για τους ηλεκτροκινητήρες των ανεμιστήρων, των αντλιών και των συμπιεστών όλης της μονάδας. Οι ανάγκες της διαδικασίας απορρόφησης και υγροποίησης σε ενεργεία είναι:

Πίνακας 4: Ενεργειακές απαιτήσεις απορρόφησης και υγροποίησης

Δεσμευόμενο CO ₂	tn/day	6365
Δεσμευόμενο CO ₂	Kg/sec	73,67
Θερμική ενέργεια	kJ/kg CO ₂ *	3600
Ατμός στον διαχωριστή	Kg/ kg CO ₂ *	135,9
Πίεση ατμού	bar	3,2
Θερμοκρασία ατμού	°C	135
Απαιτούμενο διάλυμα	Lt/ kg CO ₂ *	17,04
Ηλεκτρική ενέργεια	MW	45,8
Ψυκτικό νερό	M ³ /tn CO ₂ *	46

* Αναφέρεται στην ποσότητα CO₂ που δεσμεύεται

Για την κάλυψη των αναγκών θερμικής ενέργειας (Πίνακας 4) πρέπει να ληφθεί ένα ρεύμα ατμού από τη βαθμίδα μέσης πίεσης του στρόβιλου. Εάν γίνει όμως κάτι τέτοιο, δεδομένου ότι α) το ρεύμα αυτό αντιστοιχεί στο 50% περίπου της συνολικής ατμοπαραγωγής και στο σύνολο της ποσότητας του ατμού που πάει στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης και β) τα χαρακτηριστικά του ατμού στην έξοδο της χαμηλής πίεσης πρέπει να είναι P=3,2 bar και T= 135° C, πρέπει να καταργηθεί η υπάρχουσα βαθμίδα χαμηλής πίεσης, διότι δεν θα μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά με τα νέα δεδομένα του ατμού. Η λύση που εξετάζεται είναι η τοποθέτηση ενός νέου στρόβιλου χαμηλής πίεσης, ο οποίος θα λειτουργεί ανεξάρτητα από τον παλιό, θα έχει δική του γεννήτρια και θα είναι κατάλληλος για λειτουργία στις νέες συνθήκες. Ο στρόβιλος αυτός στην έξοδό του θα δίνει ατμό με τα χαρακτηριστικά που χρειάζεται η διαδικασία απορρόφησης – διαχωρισμού και η ισχύς του θα είναι περίπου 40 MW.

Μετατροπές στο κύκλωμα του ψυκτικού νερού.

Στο κύκλωμα του νερού ψήξης καθώς και στον καθαρισμό νερού δεν θα χρειαστούν μεταβολές στη δυναμικότητα διότι το πλεόνασμα νερού που προκύπτει από τη μείωση της απαιτούμενης ψυκτικής ισχύος στον κύκλο ατμού μεταφέρεται στο συγκρότημα δέσμωσης του CO₂. Θα χρειαστούν μόνο κατασκευές σωληνώσεων προς το συγκρότημα αυτό για την τροφοδοσία του με ψυκτικό νερό.

5. Σύστημα δέσμωσης και υγροποίησης του CO₂

Αυτό το τμήμα περιγράφει ένα προηγμένο συστήματα αμινών δέσμωσης και απομάκρυνσης του CO₂ που εξετάζεται σ' αυτήν την εργασία. Οι πληροφορίες και τα τεχνικά στοιχεία που ακολουθούν έχουν ληφθεί από τις δημοσιεύσεις της International Energy Agency (IEA) και του National Energy Technology Laboratory (NETL) των Ηνωμένων Πολιτειών και βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα από εγκαταστάσεις δέσμωσης και απορρόφησης CO₂ που έχουν υλοποιηθεί

στα πλαίσια ερευνητικών προγραμμάτων από διεθνείς φορείς και κατασκευαστικές εταιρείες του τομέα ενέργειας. Η τεχνολογία αμινών που παρουσιάζεται είναι παρόμοια με τις υπάρχουσες διαδικασίες αμινών ΜΕΑ. Σ' αυτή τη διαδικασία είναι ανεκτή η παρουσία οξυγόνου στα καυσαέρια καθώς επίσης και ένα περιορισμένο ποσό SO₂ [11, 12, 13]. Η διαδικασία χρησιμοποιεί έναν οξυγόνο-ενεργοποιημένο ανασταλτικό παράγοντα διάβρωσης, ο οποίος εμποδίζει επίσης και την αποικοδόμηση των αμινών. Ο χαμηλός βαθμός διάβρωσης και η ελάχιστη απώλεια του διαλύτη που χρησιμοποιείται για να απορροφήσει το CO₂ προάγουν την οικονομική και αξιόπιστη λειτουργία του συγκροτήματος. Η περίπτωση που εξετάζεται προβλέπει δέσμευση του 90% του CO₂ των καυσαερίων, γεγονός που απαιτεί επεξεργασία όλης της παροχής καυσαερίων. Πληροφοριακά αναφέρεται ότι υπάρχουν μελέτες και για μικρότερα ποσοστά δέσμευσης CO₂. Για επίπεδα δέσμευσης 70%, 50%, και 30% υπάρχουν δύο δυνατότητες: α) επεξεργασία μέρους του ρεύματος καυσαερίων και παράκαμψη του υπολοίπου ρεύματος κατευθείαν στην καμινάδα. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει στο συγκρότημα δέσμευσης και διαχωρισμού να έχει μικρότερο μέγεθος και μικρότερο κόστος β) διέλευση όλου του ρεύματος καυσαερίων από το συγκρότημα δέσμευσης και διαχωρισμού, στην περίπτωση όμως αυτή το διάλυμα αμινών έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως και οι υπόλοιπες παράμετροι της εγκατάστασης που οδηγεί στην μικρότερη απορρόφηση. Η μέθοδος μειονεκτεί στο ότι απαιτεί μεγάλο μεγέθους απορροφητή και σύστημα αναγέννησης αμινών, το οποίο είναι σημαντικά δαπανηρότερο από την πρώτη μέθοδο της παράκαμψης μέρους των καυσαερίων. Δεδομένου ότι το σύστημα καυσαερίων του σταθμού περιλαμβάνει ανεμιστήρες (IDF), τα λειτουργικά μεγέθη της πίεσης του συστήματος καυσαερίων του υπάρχοντος εξοπλισμού του σταθμού δεν αλλάζουν από την υφιστάμενη κατάσταση. Για την κυκλοφορία των καυσαερίων από το δευτεροβάθμια μονάδα απθείωσης μέχρι τη στήλη απορρόφησης του CO₂, απαιτείται αύξηση της πίεσης κατά 0,1 bar. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση ενός φυσητήρα σταθερής ταχύτητας. Το σύστημα κατακράτησης CO₂ αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- Προεπεξεργασία καυσαερίων
- Απορρόφηση
- Διαχωρισμός
- Συμπύεση, αφύγρανση και υγροποίηση του CO₂
- Ξήρανση

5.1 Απόδοση του συγκροτήματος δέσμευσης CO₂

Η αναμενόμενη αποδοτικότητα του συστήματος [12] παρουσιάζεται στον πίνακα 5. Έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει 100% απομάκρυνση του αζώτου και του νερού. Το υλικό που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του συστήματος δέσμευσης CO₂, είναι ως επί το πλείστον ΜΕΑ (Πίνακας 6) σε συνδυασμό με Na₂CO₃, αντιδιαβρωτικό αναστολέα, μοριακό κόσκινο (Silica gel), και ενεργό άνθρακα.

Πίνακας 5: Αναμενόμενη απόδοση του συγκροτήματος.

	Πριν τον απορροφητή	Προς την καμινάδα	Δεσμευμένες μάζες
Συστατικό	moles/hr	moles/hr	moles/hr
CO ₂	6695,30	667,53	6027,77
H ₂ O	17696,00	26302,33	751,70
N ₂	47121,31	47121,31	0
O ₂	1804,50	1804,50	0
Σύνολο	73317,11	75895,67	6779,47

Επίσης για τη λειτουργία του συγκροτήματος εκτός από ενέργεια νερό τροφοδοσίας και ψυκτικό νερό καταναλώνονται και χημικές ουσίες στις διεργασίες που γίνονται. Οι χημικές ουσίες αυτές δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6: Χρήση χημικών ουσιών

Χημική ουσία	Ποσότητα Kg/day
ΜΕΑ	10 430

Na ₂ CO ₃	1055
Αντιδιαβρωτικός αναστολέας	470
Διατομίτης (90% πυρίτιο, αλουμίνα, οξείδιο του σιδήρου)	210
Μοριακό φίλτρο (Silica gel)	115
Ενεργός Άνθρακας	700

6. Αποτελέσματα

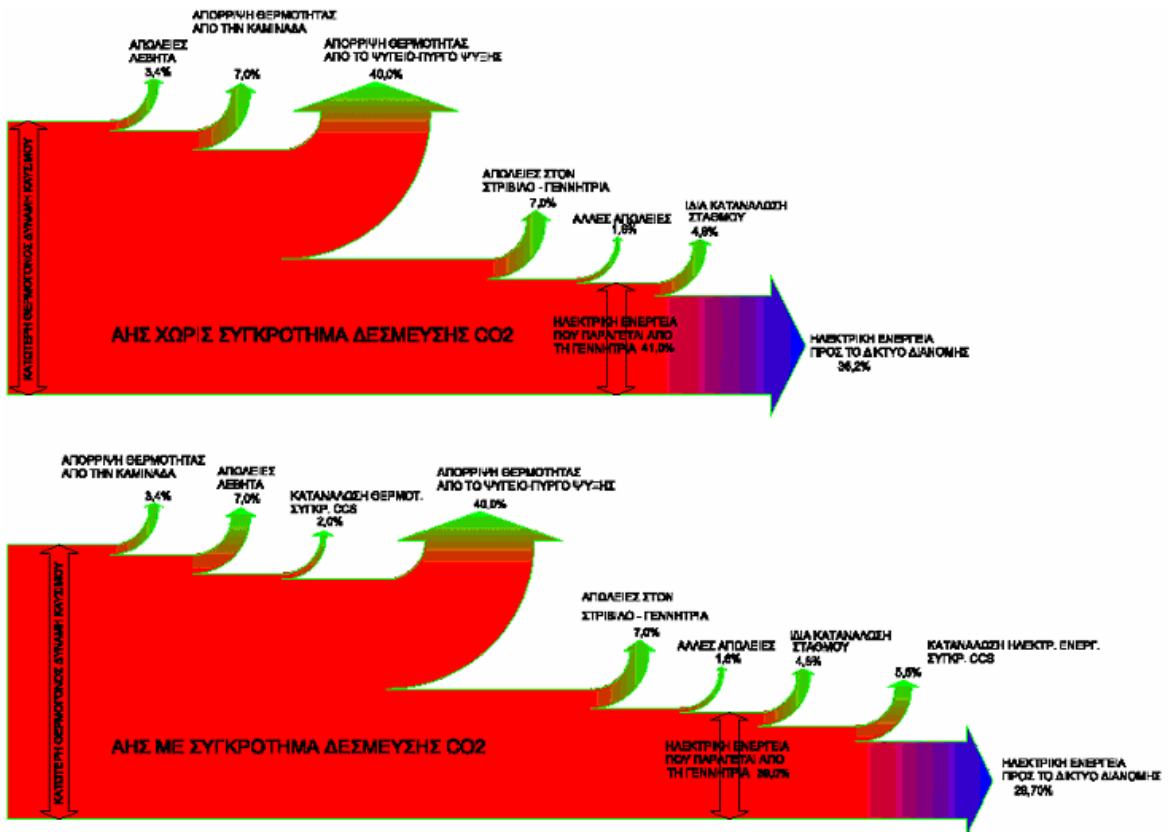
Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η διεργασία κατακράτησης του CO₂ από τα καυσαέρια ενός λιγνιτικού ατμοηλεκτρικού σταθμού, οι τεχνικές προϋποθέσεις για την λειτουργία του, ο τρόπος λειτουργίας του, η ενέργεια που χρειάζεται, και η απόδοσή του. Με βάση αυτά τα στοιχεία παρουσιάζεται στον πίνακα 7 η απόδοση του ΑΗΣ πριν και μετά την προσθήκη του συγκροτήματος CO₂. Να σημειωθεί εδώ ότι στον πίνακα 7 δεν έχει ληφθεί υπ' όψιν η ενέργεια που απαιτείται για τη μεταφορά και συμπίεση του διοξειδίου στο υπέδαφος και η οποία πρέπει να αφαιρεθεί από την καθαρή ενέργεια που παρέχει ο σταθμός στο δίκτυο. Αυτό έγινε διότι στις μελέτες που έχουν δημοσιευθεί για την αποθήκευση του υγροποιημένου CO₂ δεν αναφέρονται ποσοτικά στοιχεία για την ενέργεια που απαιτείται στη διαδικασία αυτή.

Πίνακας 7: Συγκριτικός πίνακας των ενεργειακών και τεχνικών παραμέτρων των δύο υποθέσεων

	Παράμετρος	Μονάδες	ΑΗΣ ΜΕΛΙΤΗΣ Χωρίς CCS	ΑΗΣ ΜΕΛΙΤΗΣ Με CCS
ΛΕΒΗΤΑΣ	Παραγωγή ατμού	Kg/hr	268	268
	Πίεση ατμού	bar	240	240
	Θερμοκρασία ατμού	°C	540	540
	Θερμοκρασία ανάθερμου	°C	540	540
	Βαθμός απόδοσης Λέβητα	%	89,6	89,6
	Κατανάλωση λιγνίτη (LHV:7955 kJ/kg)	tn/hr	365	365
Κύκλος Ισχύος ατμού	Ισχύς εξόδου υφιστάμενης γεννήτριας	MW	330	275
	Ισχύς εξόδου νέου στροβίλου Χ.Π.	MW	-	40
	Συνολική Ισχύς εξόδου του σταθμού	MW	330	315
	Ειδική κατανάλωση θερμότητας	kJ/kWh	7784	8054
	Βαθμός απόδοσης κύκλου ατμού	%	46,2	44,7
	Ιδιοκατανάλωση σταθμού	MW	37,88	37,88
	Ιδιοκατανάλωση συγκροτήματος CCS	MW	-	45,80
	Καθαρή Ισχύς Σταθμού προς το δίκτυο	MW	292,12	231,32
Απόδοση Σταθμού	Εξεργειακός Βαθμός απόδοσης (LHV)	%	36,21	28,68
	Μείωση βαθμού απόδοσης	Μονάδες %	0	7,53
	Μείωση παραγωγής	%	0	20,8
Εκπομπές CO₂	Παραγόμενο CO ₂	Kg/hr	294660	294660
	Ειδική Παραγωγή CO ₂	Kg/kWh	1,019	1,274
	Δεσμευόμενο CO ₂	Kg/hr	0	265194
	Ποσοστό δέσμευσης CO ₂	%	0	90
	Εκπεμπόμενο CO ₂	Kg/hr	294660	29466

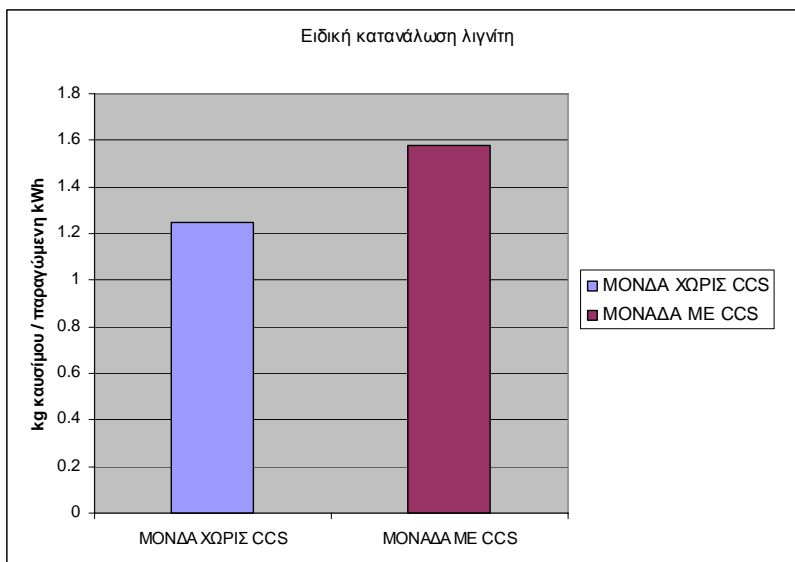
6.1 Επιπτώσεις στην απόδοση του σταθμού

Η προσθήκη του συγκροτήματος δέσμευσης του CO₂ στον ΑΗΣ θα έχει σημαντικά αρνητική επίδραση στο βαθμό απόδοσης της μονάδας και στην παραγωγή ενέργειας (Σχήμα 1). Το γεγονός αυτό βέβαια είναι αναμενόμενο από τη στιγμή που διαδικασία δέσμευσης υγροποίησης και αποθήκευσης του CO₂ είναι μια διαδικασία που καταναλώνει θερμική και ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να παράγει ενέργεια.



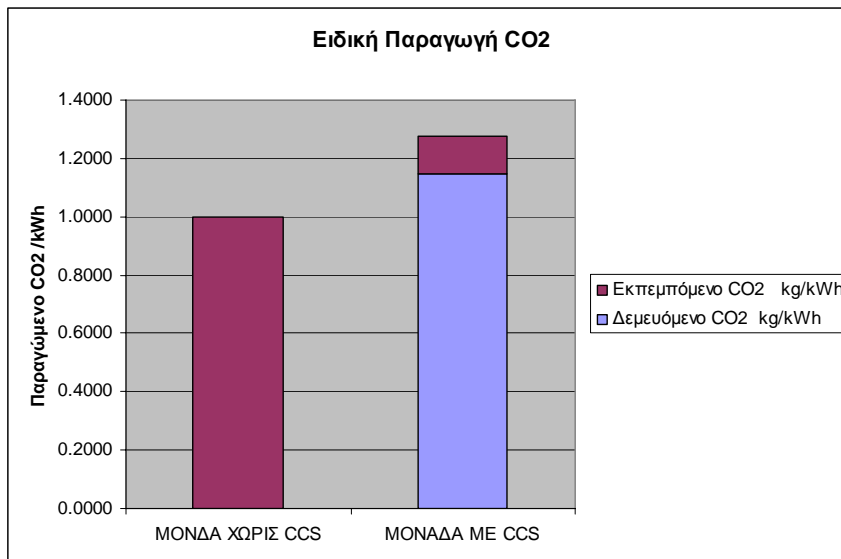
Σχήμα 1: Επιπτώσεις του συστήματος δέσμευσης CO2 στο σταθμό της Μελίτης

Αυτό σημαίνει ότι για να παραχθεί η ίδια ποσότητα ενέργειας πρέπει να καταναλωθεί μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου, άρα θα αυξηθεί ο ρυθμός κατανάλωσης φυσικών πόρων.



Σχήμα 2: Ειδική κατανάλωση λιγνίτη

Επίσης, όπως φαίνεται από τα σχήματα 1 και 2 θα αυξηθεί η ειδική παραγωγή CO₂. Βέβαια το 90% του διοξειδίου θα δεσμεύεται και τελικά το εκπεμπόμενο στην ατμόσφαιρα διοξείδιο θα μειωθεί σημαντικά.



Σχήμα 3: Ειδική παραγωγή CO₂

6.2 Επεμβάσεις στην υφιστάμενη εγκατάσταση

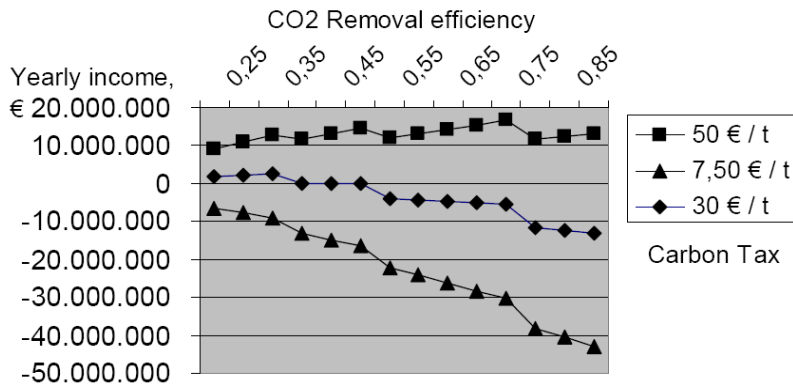
Στο κεφάλαιο 4 έγινε αναφορά στις μετατροπές και τις προσθήκες που πρέπει να γίνουν στον εξοπλισμό του σταθμού και οι οποίες αφορούν το σύστημα καύσης, το σύστημα καυσαερίων, την μονάδα αποθείωσης και το στρόβιλο. Οι επεμβάσεις αυτές δεν είναι δυνατόν να γίνουν στους υπόλοιπους λιγνιτικούς σταθμούς της Ελλάδας λόγω της ξεπερασμένης τεχνολογίας τους. Επίσης με τις επεμβάσεις αυτές θα απαιτηθούν και αλλαγές σε βοηθητικά συστήματα του σταθμού των οποίων η ανάλυση δεν εξυπηρετεί τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι θα χρειαστεί να τροποποιηθεί το κεντρικό σύστημα αυτοματισμών του σταθμού που είναι εξαιρετικά κρίσιμο για την ορθή λειτουργία όλης της εγκατάστασης.

6.3 Απαιτούμενος χώρος

Για την εγκατάσταση του συγκροτήματος κατακράτησης CO₂, της δευτεροβάθμιας αποθείωσης και ίσως του συστήματος SCR (για την περαιτέρω μείωση των NO_x) και των προσθηκών στα ηλεκτροστατικά φίλτρα, απαιτείται διαθέσιμος χώρος όσο το δυνατόν κοντά στην υφιστάμενη εγκατάσταση ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες απώλειες σε σωληνώσεις και αγωγούς.

6.4 Οικονομικές επιπτώσεις

Η προσθήκη του συγκροτήματος δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα μαζί με τις υπόλοιπες μετασκευές του υφιστάμενου εξοπλισμού που είναι απαραίτητες έχουν εκτιμώμενο κόστος περίπου 300.000.000 ευρώ. Το κόστος αυτό βασίστηκε στις πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις (Νοέμβριος 2007) του National Energy Technology Laboratory (NETL) of U.S. και μπορεί να αποκλίνει +/- 30% ανάλογα με την σταθμό. Πέρα από το κόστος της αρχικής επένδυσης όμως θα υπάρχει και κόστος λειτουργίας και συντήρησης της εγκατάστασης. Το κόστος αυτό θα επιβαρύνει την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος με περίπου 0,055 €/kWh. Το κόστος ανά tn δεσμευόμενου CO₂ είναι 30 €/tn και εκτιμάται ότι μέχρι το 2012 θα υπάξει ελάττωση στα 25€/tn λόγω της περαιτέρω βελτίωσης της απόδοσης της διαδικασίας. Από την άλλη πλευρά όμως η δέσμευση του διοξειδίου θα μειώσει το κόστος που καταβάλλεται για τα δικαιώματα εκπομπής ρύπων. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται κατά πόσο η δέσμευση διοξειδίου του άνθρακα θα έχει θετικό ή αρνητικό αποτέλεσμα στην οικονομική απόδοση του σταθμού σε σχέση με το ποσοστό κατακράτησης CO₂ και την τιμή/tn του CO₂ στην αγορά ρύπων.



Σχήμα 4: Η επίδραση της απομάκρυνσης του CO₂ για τις οικονομικές επιπτώσεις της εγκατάστασης

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4, η δέσμευση του διοξειδίου του άνθρακα θα έχει θετικό οικονομικό αποτέλεσμα για το σταθμό μόνο στην περίπτωση που η τιμή του στην αγορά ρύπων είναι περισσότερη από τα 30 €/tn και για ποσοστό δέσμευσης μικρότερο του 50% ή η τιμή φτάσει τα 50 €/tn οπότε θα είναι οικονομικά συμφέρουσα και η δέσμευση μεγαλύτερου ποσοστού του διοξειδίου. Πρέπει να αναφερθεί ότι βρίσκονται σε εξέλιξη πολλά ερευνητικά προγράμματα, που στόχο έχουν να βελτιώσουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας με αποτέλεσμα να είναι οικονομικότερη. Στην διαδικασία που παρουσιάστηκε εδώ το ποσό ενέργειας που απαιτείται είναι 3600 kJ/kg δεσμευμένου CO₂, ενώ έχει ήδη ανακοινωθεί ότι αυτό είναι εφικτό να μειωθεί σε 2800 kJ/kg δεσμευμένου CO₂. Επίσης όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο το κόστος ανά δεσμευόμενο τόνο CO₂ εκτιμάται ότι θα πέσει από 30 € σε 25€/ tn.

6.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συγκροτημάτων CCS

Από εξεργειακής πλευράς η δέσμευση του CO₂ αυξάνει τις απώλειες εξέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού και είναι προφανές ότι επιδεινώνει το τον εξεργειακό βαθμό απόδοσης των εγκαταστάσεων αφού δαπανάται ένα μέρος της ωφέλιμης ενέργειας για τη λειτουργία του εξοπλισμού δέσμευσης CO₂. Από την άλλη πλευρά βέβαια πρέπει να λάβουμε υπ' όψη το όφελος από τη μείωση του εκπεμπόμενου CO₂. Και εδώ όμως δημιουργούνται κάποια ζητήματα. α) Η εφαρμογή της δέσμευσης CO₂ σε μεγάλη κλίμακα θα αυξήσει το ρυθμό κατανάλωσης των συμβατικών ενεργειακών πόρων, γεγονός που δεν συμβαδίζει με τις αρχές της αειφορίας .

β) Το παραγόμενο CO₂ ανά μονάδα παραγόμενης kWh αυξάνεται με την προσθήκη του συτήματος δέσμευσης (στη συγκεκριμένη περίπτωση η αύξηση είναι 25%). Βέβαια στη δεύτερη περίπτωση το 90% του CO₂ δεσμεύεται και αποθηκεύεται σε γεωλογικούς σχηματισμούς.

γ) Ορισμένοι τρόποι γεωλογικής αποθήκευσης του διοξειδίου θεωρούνται πολύ ασφαλείς και έχουν δοκιμαστεί σε κανονική κλίμακα παραγωγής εδώ και αρκετά χρόνια. Οι υπόλοιποι τρόποι αποθήκευσης (γεωλογικοί και υποθαλάσσιοι) είναι ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.

δ) Η δυναμικότητα αποθήκευσης είναι επίσης πρόβλημα. Ειδικά για τον ελληνικό χώρο η κατάσταση είναι η εξής: Το σύνολο σχεδόν των λιγνιτικών μονάδων είναι εγκατεστημένες στο λεκανοπέδιο Πτολεμαΐδας – Φλώρινας όπου οι πιθανές θέσεις γεωλογικής αποθήκευσης είναι τα φτωχά και μη αξιοποιήσιμα κοιτάσματα λιγνίτη και ορισμένοι σχηματισμοί ασβεστούχων πετρωμάτων. Οι σχηματισμοί αυτοί όμως έχουν πολύ μικρή ικανότητα αποθήκευσης. Από έρευνες και μελέτες που έχουν γίνει έχουν εντοπιστεί ικανές «αποθήκες» στην περιοχή της Θεσσαλονίκης και του Θερμαϊκού κόλπου για υπόγεια αποθήκευση και στον Πρίνο της Θάσου. Οι θέσεις αυτές όμως βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από τους ΑΗΣ του λεκανοπεδίου Πτολεμαΐδας – Φλώρινας και απαιτούν μεγάλο κόστος κατασκευής αγωγών και αντίστοιχα μεγάλη κατανάλωση ενέργειας για τη μεταφορά του διοξειδίου.

ε) Μια εναλλακτική λύση για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου είναι η αναβάθμιση ή αντικατάσταση των παλαιότερων ΑΗΣ με νέους οι οποίοι θα έχουν σημαντικά καλύτερο βαθμό απόδοσης και άρα θα έχουν λιγότερες εκπομπές ανά παραγόμενη kWh.

στ) Τέλος πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι για τη λειτουργία συγκροτημάτων δέσμευσης του διοξειδίου με τη διαδικασία απορρόφησης με Μονοαιθανολαμίνη (MEA) απαιτείται κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων MEA σε καθημερινή βάση (για την περίπτωση που εξετάστηκε 10,43 tn/day).

Η ΜΕΑ έχει δείκτη επικινδυνότητας 3 για την υγεία και 2 για ευφλεκτότητα κατά NFPA, άρα είναι μία επικίνδυνη ουσία. Επίσης πρέπει να προβλεφθούν μέτρα για τη διαχείριση της αποβαλλομένης ΜΕΑ από τον αναγεννητή.

7. Συμπεράσματα

Η εγκατάσταση των συστημάτων δέσμευσης του CO₂ στην υπάρχουσα μονάδα ηλεκτροπαραγωγής είναι πολύ δύσκολη λόγω του γεγονότος ότι αυτές οι μονάδες δεν έχουν τις απαραίτητες τεχνικές προδιαγραφές. Η αποτελεσματικότητα του κόστους, εκτός από το κόστος κατασκευής και εκμετάλλευσης, καθορίζεται από το κόστος του CO₂ στην παγκόσμια αγορά εκπομπών και από άλλες οικονομικές κυρώσεις που ενδέχεται να προκύψουν, από την απαιτούμενη ενέργεια ανά μονάδα μάζας των δεσμευμένων ποσοτήτων CO₂ και από το ποσοστό άλλων πηγών ενέργειας, εκτός του λιγνίτη. Επίσης, για την οικονομική αξιολόγηση, η αντικατάσταση του ελλείμματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ληφθεί υπόψη. Επί του παρόντος, το ποσοστό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και η υπάρχουσα τεχνολογία καθιστούν ασύμφορη την εγκατάσταση διότι μειώνουν τις οικονομικές επιπτώσεις των σταθμών παραγωγής ενέργειας. Το προφανές πλεονέκτημα του συστήματος δέσμευσης CO₂ είναι η μείωση των εκπομπών στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα, υπάρχει η αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων. Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω το συμπέρασμα που βγαίνει είναι ότι οι τεχνολογίες δέσμευσης του CO₂, τόσο αυτή που εξετάστηκε σ' αυτήν την εργασία όσο και οι υπόλοιπες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα, δεν αποτελούν δελεαστική και αξιόλογη λύση για τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και την επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που έχουν τεθεί με διεθνείς συμφωνίες. Επίσης η γενικότερη φιλοσοφία αυτής της διαδικασίας, συνεχίζω να παράγω ρύπους αλλά τους αποθηκεύω, δεν συνάδει με καμία περιβαλλοντική πολιτική. Πιθανός στόχος αυτών των τεχνολογιών είναι η βραχυπρόθεσμη προσαρμογή, του τμήματος εκείνου της παγκόσμιας αγοράς ενέργειας που βασίζεται και έχει συμφέροντα στα στερεά ορυκτά καύσιμα, στα πλαίσια που έχουν τεθεί από τις διεθνείς συμφωνίες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

8. Βιβλιογραφία

- 1) Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, English Conference of the Parties, Third session Kyoto, 1-10 December 1997
- 2) "Future Climate Action beyond 2012", 9/2004, Background Document for the 14th September 2004 workshop on "Future Climate Action beyond 2012", DG Environment.
- 3) European Commission - Environment for Europeans - Magazine of the Directorate General Environment - Issue 26 March 2007.
- 4) INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, Key World Energy Statistics, IEA, 9, rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, www.iea.org
- 5) European Commission, http://cordis.europa.eu/fp7/energy/about-coal_en.html
- 6) National Energy Technology Laboratory (NETL), What are the costs and benefits of Carbon Capture and Sequestration?, http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/FAQs/benefits.html#
- 7) International Energy Agency (IEA), CO₂ Capture ready power plants, May 2007
- 8) National Energy Technology Laboratory (NETL) of U.S., Carbon Capture and Sequestration Systems Analysis Guidelines, April 2005.
- 9) Greek Public Power Corporation, <http://www.dei.gr/>
- 10) Hongyi Dang, Gary T. Rochelle, CO₂ Absorption Rate and Solubility in Monoethanolamine/Piperazine/Water, the First National Conference on Carbon Sequestration, Washington, DC, May 14-17, 2001
- 11) National Energy Technology Laboratory (NETL) of U.S., Carbon Dioxide Capture from Existing Coal-Fired Power Plants, Final Report (Revision date November 2007).

12) Engineering feasibility and economics of co2 capture on an existing coal-fired power plant,
Final Report, Alstom Power Inc. & Abb Lumus Global Inc.
International Energy Agency (IEA), CO2 Capture ready power plants, May 2007