

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση
επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών
αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Κ. Πατρίδας

Επιβλέπων: Επαμεινώνδας Κ. Βουτσάς,
Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

Περίληψη

Η μετάβαση προς σύγχρονες κοινωνίες με βιώσιμα χαρακτηριστικά προϋποθέτει την ορθή αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων και προώθηση της αειφόρου ανάπτυξης. Στο πλαίσιο αυτό προωθούνται νέες περιβαλλοντικές πολιτικές και διεθνείς συμφωνίες, με σκοπό τον περιορισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Στον ενεργειακό τομέα οι δράσεις εστιάζονται στην υποκατάσταση ορυκτών καυσίμων από ανανεώσιμα καύσιμα, την αξιοποίηση των ΑΠΕ και τον περιορισμό ρύπων.

Δεδομένου πως οι παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας, απαιτούν την κατανάλωση καυσίμων και συνοδεύονται από εκπομπές ρύπων, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην αξιοποίηση ενεργειακά αποδοτικών και «πράσινων» καυσίμων. Το υδρογόνο (H_2) αποτελεί ένα καύσιμο που συνδυάζει υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο και μηδενική παραγωγή ρύπων κατά την καύση του, με ιδιαίτερη σημασία στην προώθηση της «πράσινης» ενεργειακής μετάβασης. Ωστόσο, η θέση του καυσίμου υποβαθμίζεται, λόγω του αυξημένου κόστους αποθήκευσης και διανομής του. Στην παρούσα φάση, σημαντικοί πόροι διατίθενται στην ανάπτυξη βιώσιμων διεργασιών παραγωγής H_2 , ενώ ταυτόχρονα εξετάζονται εναλλακτικές ενώσεις που δύναται να λειτουργήσουν ως «φορείς H_2 ». Η αμμωνία (NH_3) αποτελεί έναν ιδανικό υποψήφιο συνδυάζοντας σημαντική περιεκτικότητα σε H_2 και υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Η βιομηχανική της παραγωγή είναι ευρεία, το δίκτυο διανομής ανεπτυγμένο και οι ιδιότητές της κατάλληλες για οικονομική αποθήκευση. Παρόλα αυτά, η κύρια διαδικασία παραγωγής NH_3 συνοδεύεται από έκλυση σημαντικής ποσότητας αέριων ρύπων.

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε η παραγωγή NH_3 προσομοιώνοντας τις βιομηχανικές διεργασίες σε εμπορικά λογισμικά μοντελοποίησης διεργασιών. Οι διεργασίες που μοντελοποιήθηκαν περιλάμβαναν την παραγωγή H_2 μέσω αναμόρφωσης φυσικού αερίου με ατμό (Steam Methane Reforming - SMR), καθαρισμό του μίγματος αερίων και σύνθεση NH_3 με ατμοσφαιρικό N_2 , μέσω της διεργασίας Haber – Bosch. Αρχικά, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, υπολογίστηκαν τα κόστη κεφαλαίου και λειτουργίας, ώστε να προσδιοριστεί η βιωσιμότητα επένδυσης βιομηχανικής παραγωγής NH_3 στην Ελλάδα. Τα αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης έδειξαν πως για ετήσια παραγωγή 145 kMT NH_3 το εκτιμώμενο κόστος κεφαλαίου είναι 95 εκ.€ και το εκτιμώμενο λειτουργικό κόστος 110 εκ.€/έτος. Παράλληλα, υπολογίστηκε έκλυση 140 kMT $CO_{2,eq}$ με εκτιμώμενο κόστος δικαιωμάτων εκπομπών CO_2 στα 12 εκ.€, για τρέχοντα δεδομένα αγοράς. Τα αποτελέσματα της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης

έδειξαν πως για μελέτη 20ετίας, η επένδυση κρίνεται βιώσιμη με ΚΠΑ περί τα 135 εκ. € και χρόνο αποπληρωμής 5,3 έτη. Ταυτόχρονα, η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε πως αναμενόμενες μεταβολές κύριων μεταβλητών κόστους δεν απειλούν τη βιωσιμότητα αυτής. Τελικά, διερευνήθηκε το αποτέλεσμα της εφαρμογής περαιτέρω τεχνικών περιορισμού εκπομπών CO₂ εξετάζοντας τα σενάρια δέσμευσης και αξιοποίησης CO₂ και παραγωγής H₂ με ηλεκτρόλυση. Στην πρώτη περίπτωση μελετήθηκε η δέσμευση της ποσότητας CO₂ που παράγονται κατά την καύση. Εκτιμήθηκε πως θα οδηγούσε σε μείωση του ετήσιου κόστους έως 12%, μειώνοντας το χρόνο αποπληρωμής στα 3,7 έτη, και αύξηση της ΚΠΑ στα 200 εκ.€. Ακολούθως, μελετήθηκε η παραγωγή H₂ με ηλεκτρόλυση που συνοδεύεται από μηδενική εκπομπή CO₂, εφόσον συνδυαστεί με κατανάλωση ηλεκτρισμού που προέρχεται από ΑΠΕ. Η συγκεκριμένη διεργασία συγκρίθηκε με την SMR και διαπιστώθηκε πως συνοδεύεται από αύξηση 60%-140% του κόστους υλών και ενέργειας για παραγωγή H₂ και αύξηση κόστους 70%-95% στη συνολική παραγωγή NH₃. Η υποκατάσταση της παραδοσιακής διεργασίας από ηλεκτρόλυση δεν κρίθηκε οικονομικά ωφέλιμη, ενώ παρουσιάστηκαν ορισμένα σενάρια στα οποία με μεταβολές σε πρώτες ύλες και ενέργεια θα μπορούσαν δυνητικά να την καταστήσουν ανταγωνιστική.

Λέξεις-κλειδιά: αμμωνία, φορέας υδρογόνου, προσομοίωση, αξιολόγηση επένδυσης, εκπομπές CO₂

Abstract

The transition to modern societies with sustainable characteristics presupposes the correct use of energy resources and the promotion of sustainable development. In this context, new environmental policies and international agreements are promoted to limit the environmental footprint. In the energy sector, the actions are focused on the substitution of fossil fuels, utilization of energy, and limitation of resources consumption.

Given that conventional processes of energy production and management require the consumption of materials and are accompanied by emissions, the interest is focused on energy-efficient and "green" materials. Hydrogen (H_2) is a fuel that combines a high energy content and zero emissions when it is burned, with particular importance in the promotion of the "green" energy transition. However, the value of the fuel is reduced due to the increased costs of storage and distribution. While significant resources are available for the development of viable H_2 production processes, alternative compounds that may function as « H_2 carriers» are simultaneously being considered. Ammonia (NH_3) constitutes an ideal candidate combining significant content of H_2 and high energy content. Its industrial production is broad, its distribution network is well-developed, and its properties are suitable for economic storage. However, the main pathway of NH_3 production is accompanied by releasing a significant number of gaseous pollutants.

In this paper, the production of NH_3 was studied by simulating industrial processes in commercial process modelling software. The processes that have been simulated include the production of H_2 through steam reforming of natural gas (SMR), purification of the gas mixture and NH_3 synthesis with atmospheric N_2 , through the Haber-Bosch process. Initially, using simulation's results, capital and operating costs were calculated in order to determine the viability of the industrial production of NH_3 investment in Greece. The results of the economic evaluation showed that for an annual production of 145 kMT NH_3 the estimated capital cost was 95 m€, while estimated operating cost was 110 m€/year. At the same time, the release of 140 kMT $CO_{2,eq}$ was calculated with an estimated cost of CO_2 emission rights at 12 m€, applying current market data. The results of the technical-economic assessment showed that for a 20-year study, the investment is sustainable with an NPV of 135 m€ and payback time of 5,3 years. At the same time, the sensitivity analysis showed that expected changes in main cost variables do not threaten its viability. Finally, the effect of applying CO_2 emissions reduction techniques was investigated by considering the scenarios of CO_2 capture and utilization and H_2 production by electrolysis. In

the first case, capturing CO₂ produced during combustion of natural gas. It was estimated that it could lead to a reduction in annual costs by 25%, reducing the payback time to 3,7 years, and an increase in NPV to 200 m€. Next study included, the production of H₂ by electrolysis accompanied by zero CO₂ emission if combined with electricity coming from RES. This particular process was compared to SMR and found to be accompanied by a 60%-140% increase in material and energy costs for H₂ production and a 70%-95% cost increase in total NH₃ production. Substitution of the traditional process by electrolysis was not considered economically beneficial, while some scenarios were presented where in materials and energy costs could potentially make it competitive.

Keywords: ammonia, hydrogen carrier, simulation, investment evaluation, CO₂ emissions

Πρόλογος

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται να παρουσιαστεί μια ολοκληρωμένη πρόταση που αφορά σε επένδυση βιομηχανικής μονάδας παραγωγής αμμωνίας, στον ελληνικό χώρο, στηριζόμενη σε συμπεράσματα που προέρχονται από την μοντελοποίηση φυσικοχημικών διεργασιών και τεχνικές τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης επενδύσεων. Προκειμένου να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα αξιοποιήθηκαν βασικές αρχές της θεωρίας των διεργασιών, «καλών πρακτικών» και εμπειρικών μοντέλων που προέρχονται από τη βιομηχανία, αλλά και πρόσφατα δεδομένα της αγοράς ενέργειας και υλών. Η ανάλυση που λαμβάνει χώρα δεν είναι εξαντλητική, αλλά επιχειρείται να παρουσιαστούν απλοποιημένα και κατανοητά τα αποτελέσματα που αφορούν την επένδυση. Παράλληλα, η σύγκριση μιας συμβατικής τεχνικής με αναπτυσσόμενες, εναλλακτικές, διεργασίες προσφέρει μια σφαιρική αξιολόγηση των εναλλακτικών παραγωγής αμμωνίας, επισημαίνοντας πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθεμιάς.

Θα πρέπει αξίζει να σημειωθεί, πως η επιλογή του αντικείμενου συγκεκριμένης μελέτης, συνδυάζοντας θέματα μηχανικής, ενέργειας και χρηματοοικονομικής, πετυχαίνει το σκοπό του εν λόγω μεταπτυχιακού προγράμματος. Η επιτυχία στηρίζεται στην αξιοποίηση γνώσεων και μεθοδολογιών που αποκτήθηκαν στη διάρκεια των δύο ετών, ώστε να προσεγγίσει και να απαντήσει σε θέματα και προκλήσεις του αντικείμενου δραστηριότητάς του.

Η εν λόγω μελέτη πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Επαμεινώνδα Βουτσά, καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., αξιοποιώντας πόρους του Εργαστηρίου Θερμοδυναμικής και Φαινομένων Μεταφοράς της σχολής. Ευχαριστώ θερμά τον κύριο καθηγητή για το έντονο ενδιαφέρον, την υποστήριξη και το χρόνο που αφιέρωσε στο εν λόγω έργο. Επίσης, θα ήθελα να αποδώσω ιδιαίτερες ευχαριστίες για τη διαρκή υποστήριξη και τις ευκαιρίες που έχει προσφέρει στο πρόσωπό μου, ήδη από τα προπτυχιακά έτη.

Ευχαριστώ θερμά το εκπαιδευτικό προσωπικό, αλλά και τη γραμματεία του ΔΠΜΣ «Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα» για τη συνεργασία και το σημαντικό ακαδημαϊκό τους έργο.

Ολοκληρώνοντας, επιθυμώ να ευχαριστήσω ειδικά τους ιδιαίτερους ανθρώπους μου Κωνσταντίνο & Ελένη και Ιωάννα. Τους γονείς μου για το ήθος, τις αξίες που μου μετέδωσαν, αλλά και για τους ανιδιοτελείς κόπους τους, ώστε να πετύχω τις σπουδές μου και την επιστημονική μου εξέλιξη. Τη σύντροφό μου για την υποστήριξη, την καθαρή κρίση και την τρυφερότητά της.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	9
1.1	Σύγχρονες ενεργειακές προκλήσεις	9
1.2	Το υδρογόνου ως ενεργειακή ύλη	9
1.2.1	Βιομηχανική παραγωγή H_2 και αέριοι ρύποι	10
1.2.2	Αποθήκευση, μεταφορά και διαχείριση H_2	11
1.3	Η αμμωνία ως φορέας ενέργειας	12
1.4	Βιομηχανική παραγωγή αμμωνίας	13
1.4.1	Εκπομπές GHGs από την παραγωγή αμμωνίας	14
1.4.2	Παραγωγή αμμωνίας στην Ελλάδα	15
2	Μεθοδολογία.....	17
2.1	Περιγραφή προσομοίωσης	17
2.2	Περιγραφή τροφοδοσίας	18
2.3	Απομάκρυνση ενώσεων S_2 από το φυσικό αέριο	19
2.4	Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό	19
2.4.1	Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό – Περιγραφή διεργασίας.....	19
2.4.2	Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό – Ανάπτυξη προσομοίωσης	22
2.5	Μετατροπή CO	24
2.5.1	Μετατροπή CO – Περιγραφή διεργασίας.....	24
2.5.2	Μετατροπή CO – Ανάπτυξη προσομοίωσης	24
2.6	Απομάκρυνση CO_2	25
2.6.1	Απομάκρυνση CO_2 – Επεξεργασία τροφοδοσίας	25
2.6.2	Απομάκρυνση CO_2 σε μονάδες PSA	25
2.6.3	Απομάκρυνση CO_2 σε στήλες απορρόφησης.....	28
2.6.4	Απομάκρυνση CO_2 – Ανάπτυξη προσομοίωσης.....	29
2.7	Μετατροπή υπολείμματος CO και CO_2	30
2.7.1	Μετατροπή υπολείμματος CO και CO_2 – Περιγραφή διεργασίας.....	30
2.7.2	Μετατροπή υπολείμματος CO και CO_2 – Ανάπτυξη προσομοίωσης	31
2.8	Κύκλος σύνθεσης NH_3	31
2.8.1	Κύκλος σύνθεσης NH_3 – Περιγραφή διεργασίας	31
2.8.2	Κύκλος σύνθεσης NH_3 – Ανάπτυξη προσομοίωσης.....	33

2.9	Κόστος κεφαλαίου επένδυσης.....	34
2.9.1	Κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού.....	35
2.9.2	Δευτερεύον κόστος εξοπλισμού.....	37
2.9.3	Υπολογισμός κεφαλαίου εξοπλισμού.....	38
2.10	Λειτουργικό κόστους επένδυσης.....	38
2.10.1	Περιγραφή λειτουργικού κόστους.....	38
2.10.2	Υπολογισμός σταθερού λειτουργικό κόστους.....	38
2.10.3	Υπολογισμός μεταβλητού λειτουργικό κόστους.....	39
2.11	Κόστος δικαιωμάτων εκπομπής CO ₂	40
2.12	Αξιολόγηση επένδυσης.....	41
2.13	Ανάλυση ευαισθησίας μελετώμενης επένδυσης.....	44
2.14	Περιορισμός περιβαλλοντικού αποτυπώματος παραγωγικής μονάδας.....	45
3	Αποτελέσματα.....	48
3.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης παραγωγικής διαδικασίας.....	48
3.2	Αποτελέσματα κόστους κεφαλαίου και λειτουργικού κόστους.....	51
3.3	Αποτελέσματα ανάλυσης αξιολόγησης επένδυσης.....	56
3.3.1	Ανάλυση περιβάλλοντος.....	60
3.4	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας επένδυσης.....	61
3.5	Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων για μείωση εκπομπών GHGs.....	65
3.5.1	Χρήση μεθόδων δέσμευσης και αξιοποίησης CO ₂	65
3.5.2	Ηλεκτρόλυση ως εναλλακτική μέθοδος παραγωγής «πράσινου» H ₂	67
4	Συμπεράσματα.....	72
5	Προτάσεις.....	74
6	Βιβλιογραφία.....	75
Παράρτημα Ι.....		78
Παράρτημα Ι.Ι – Απεικονίσεις μοντελοποίησης διεργασίας.....		78
Παράρτημα Ι.ΙΙ – Διαδικασία υπολογισμού πάχους τοιχωμάτων δοχείων πίεσης.....		82
Παράρτημα Ι.ΙΙΙ – Πίνακες τιμών παράγοντα κόστους εγκατεστημένου εξοπλισμού.....		85

1 Εισαγωγή

1.1 Σύγχρονες ενεργειακές προκλήσεις

Το ενεργειακό ζήτημα αποτελεί μια οικουμενική πρόκληση που λαμβάνει όλο και μεγαλύτερες διαστάσεις, καθώς αυξάνονται οι ανάγκες των ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων κοινωνιών. Η εξασφάλιση ενεργειακής επάρκειας σε συνδυασμό με την εξάντληση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, καθιστά αναγκαία την εξερεύνηση και αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Ακόμη, ο αντίκτυπος στο περιβάλλον από τις εκπομπές αερίων, ως συνέπεια της καύσης συμβατικών ορυκτών καυσίμων, αποτυπώνεται στην ταχεία εξέλιξη αρνητικών φαινομένων που σειριακά επιταχύνουν την υπερθέρμανση του πλανήτη και τη συνολική υποβάθμιση του οικοσυστήματος. Ιδιαίτερος προβληματισμός, μάλιστα, αναπτύσσεται γύρω από την έκλυση βλαβερών ρύπων όπως τα αέρια του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases – GHGs) που συμμετέχουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, ευνοώντας την υπερθέρμανση του πλανήτη.

Ήδη από το 1995, οπότε και ο 1^{ος} νόμος για την κλιματική αλλαγή τέθηκε σε εφαρμογή (ΟΗΕ), πολλές ακόμη πρωτοβουλίες ακολούθησαν, με σημαντικότερη αυτών, τη Συμφωνία του Παρισιού για το Κλίμα (2021). Σήμερα, η ΕΕ έχει θέσει τους στόχους για μηδενισμό των εκπομπών GHG έως το 2050 (Net Zero 50). Στο πλαίσιο αυτό λαμβάνονται πρωτοβουλίες και αναπτύσσονται ερευνητικές δραστηριότητες στην κατεύθυνση αξιοποίησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), αλλά και την υποκατάσταση των κυριότερων καυσίμων (υδρογονανθράκων και στερεών καυσίμων) με «καθαρότερα», όπως το υδρογόνο (H₂).¹

Η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος συνηθισμένων βιομηχανικών παραγωγικών διαδικασιών προωθείται με έντονο τρόπο, μέσω κοινοτικών και εθνικών πολιτικών. Η μεταστροφή σε έναν κόσμο απαλλαγμένο από βλαβερούς ρύπους, όπου οι ύλες θα αξιοποιούνται στο μεγαλύτερο βαθμό και οι κοινωνίες θα απολαμβάνουν ένα καλύτερο βιοτικό επίπεδο, φαίνεται να αποτελεί το ζητούμενο των σύγχρονων ανεπτυγμένων χωρών.

1.2 Το υδρογόνο ως ενεργειακή ύλη

Μπροστά στην πρόκληση της εξάλειψης εκπομπών, ιδιαίτερα εκείνων που σχετίζονται με GHGs αναζητήθηκαν λύσεις και εναλλακτικές ενεργειακές ύλες προς αξιοποίηση. Το H₂ αποτελεί έναν ιδανικό υποψήφιο διότι συνδυάζει υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο (122 kJ/kg),

ευκολία παραγωγής και «καθαρότητα» ως καύσιμο, καθώς κατά την καύση του εκλύεται μόνο H_2O – σε μορφή υδρατμών. Η καύση του H_2 θεωρείται πλήρης, μπορεί να λάβει χώρα από αρχικό καύσιμο σε διάφορες φάσεις (υγρό – αέριο), ενώ υφιστάμενες εφαρμογές αξιοποιούν το H_2 ως καύσιμη ύλη (κελιά καυσίμου – fuel cells – ως καύσιμο οχημάτων). Η μεταφορά του H_2 , παρόλες τις προκλήσεις που σημειώνει, αποτελεί μια γνωστή και εμπεδωμένη δραστηριότητα, που λαμβάνει χώρα για τη μεταφορά του καυσίμου, κυρίως για κάλυψη βιομηχανικών αναγκών. Το αέριο συγκεντρώνει, λοιπόν, τεράστιο ενδιαφέρον και η διάθεση υιοθέτησής του προς αντικατάσταση βασικών ορυκτών και στερεών καυσίμων αποτελεί μια σύγχρονη τάση. Παρόλα αυτά προκλήσεις συναντώνται τόσο στην παραγωγή, όσο και τη διαχείριση του.^{2,3}

1.2.1 Βιομηχανική παραγωγή H_2 και αέριοι ρύποι

Η παραγωγή του H_2 πραγματοποιείται κατά βάσει μέσω της διεργασίας αναμόρφωσης ατμού-μεθανίου (Steam-Methane-Reforming, SMR), όπου το φυσικό αέριο αποτελεί το βασικό αντιδρών. Ενδεικτικά αναφέρεται πως παγκοσμίως εκτιμάται ότι το 6% της παγκόσμιας κατανάλωσης φυσικού αερίου σχετίζεται με την παραγωγή H_2 . Ταυτόχρονα, το 51% του παραγόμενου H_2 χρησιμοποιείται στη βιομηχανία πετρελαίου, ενώ το 43% για παραγωγή αμμωνίας, κύρια για τη βιομηχανία λιπασμάτων. Η παγκόσμια ζήτηση για υδρογόνο εκτιμάται πως έχει ξεπεράσει τους 70 εκ. MT ετησίως.^{3,4}

Παρόλο που οι υφιστάμενες διεργασίες αποτελούν μια ικανοποιητική και ευρέως αξιοποιήσιμη μέθοδο παραγωγής H_2 δε συμβαδίζουν με την απαίτηση για παραγωγή ενός ενεργειακού πόρου με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός πως η παραγωγή H_2 με τις παραδοσιακές μεθόδους εκτιμάται πως συνοδεύεται από την έκλυση 1000 $MT_{CO_2,eq}/year$ παγκοσμίως. Μάλιστα, η συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία εκτιμάται πως οδηγεί σε έκλυση του 2% των ετήσιων εκπομπών GHGs. Η ανησυχία για τα αρνητικά αποτελέσματα που συνοδεύουν αυτή την κυρίαρχη δραστηριότητα ενίσχυσε την έρευνα για την ανάπτυξη εναλλακτικών, «πράσινων» μεθόδων και την αξιοποίηση νέων παραγωγικών μονοπατιών.³

Στην προσπάθεια εξάλειψης των εκλυόμενων GHGs αναπτύσσονται και αναβαθμίζονται τεχνικές που αξιοποιούν, κατά κύριο λόγο, τη διεργασία της ηλεκτρόλυσης ύδατος για την παραγωγή H_2 . Πρόκειται για τέσσερις βασικές μεθόδους ηλεκτρόλυσης προς παραγωγή H_2 : Ηλεκτρόλυση αλκαλικού ύδατος (Alkaline Water Electrolysis, AWE), ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane, PEM), ηλεκτρόλυση σε κελί στερεού οξειδίου (Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC) και ηλεκτρόλυση μεμβράνης ανταλλαγής ανιόντων (Anion

Exchange Membrane, AEM). Από τις μεθόδους αυτές οι δύο ευρύτερα χρησιμοποιούμενες είναι οι AWE και PEM. Στηρίζονται στην ηλεκτρόλυση νερού προς διαχωρισμό των ατόμων του μορίου και απομόνωση H_2 . Το βασικό πλεονέκτημα της ηλεκτρόλυσης συναντάται στην εξάρτηση μόνο από νερό και προσφορά ηλεκτρισμού, άρα στη μη χρήση ενώσεων του άνθρακα (C). Εάν μάλιστα ο ηλεκτρισμός προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τότε το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, σε εκπομπές GHGs, της μεθόδου είναι μηδενικό. Βασικό μειονεκτήματα της ηλεκτρόλυσης αποτελεί το υψηλότερο παραγωγικό κόστος ανά ποσότητα παραγόμενου H_2 , συγκριτικά με τη μέθοδο SMR. Εκτεταμένες προσπάθειες και η ανάπτυξη ερευνητικών λύσεων εστιάζουν στη μείωση τόσο του κεφαλαιακού κόστους τέτοιων μονάδων, όσο και την αύξηση της απόδοσής τους.^{2,3,5}

1.2.2 Αποθήκευση, μεταφορά και διαχείριση H_2

Η συνολική διαχείριση του H_2 διέπεται από αυστηρά πρωτόκολλα ως προς την ασφάλεια. Αυτό οφείλεται στις χαρακτηριστικές φυσικοχημικές του ιδιότητες που το καθιστούν ένα έντονα δραστικό αέριο. Μερικές από τις ιδιότητες που καθιστούν το H_2 επικίνδυνο είναι: το ευρύ φάσμα συγκεντρώσεων όπου είναι εύφλεκτο, η έντονη τάση διείσδυσης και δημιουργίας πόρων σε υλικά, ενώ ο εντοπισμός του είναι δυσχερής, καθώς αποτελεί ένα άχρωμο και άοσμο αέριο. Η ανησυχία σχετικά με την ασφάλεια στις μεταφορές, λόγω των ιδιαίτερων αυτών χαρακτηριστικών, υποβαθμίζει σημαντικά τη χρήση του H_2 ως ένα καύσιμο, εφόσον δε διαμορφωθεί ένα αυστηρό, ως προς τα θέματα ασφάλειας, μεταφορικό δίκτυο. Ταυτόχρονα, οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό μεταφοράς αυξάνονται σημαντικά, αυξάνοντας το κόστος της δραστηριότητας.^{2,3,6}

Η χαμηλή πυκνότητα του H_2 σε συνδυασμό με την υψηλή τάση ατμών καθιστούν την αποθήκευση του H_2 δύσκολη και ενεργειακά απαιτητική. Δηλαδή, οι απαιτήσεις σε ενέργεια για συμπίεση του καυσίμου, ώστε στον ίδιο όγκο αποθηκευτικού χώρου να περιέχεται μεγαλύτερη ποσότητα (μάζα) αυτού είναι ιδιαίτερα υψηλές, συγκρινόμενες με τις μηδενικές, πρακτικά απαιτήσεις, για αποθήκευση συμβατικών υγρών καυσίμων.⁶

Τα παραπάνω στοιχεία είναι ικανά να υποβαθμίσουν το ρόλο του H_2 , ως μια ικανή και κατάλληλη πηγή ενέργειας, μπροστά στην επιχειρούμενη ενεργειακή και «πράσινη» μετάβαση. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να διερευνηθεί η αξιοποίηση εναλλακτικών μέσων ως φορείς H_2 και ενεργείας που θα προσφέρουν λύσεις στις προκλήσεις που σημειώνονται από τη φύση του H_2 , διατηρώντας ωστόσο τα οφέλη από την έμμεση αξιοποίησή του. Χαρακτηριστικά σημειώνεται

πως κατά την υγροποίηση του H_2 με σκοπό την αποθήκευσή του δαπανάται το 40% της περιεχόμενης ενέργειας στο μόριο.^{2,7}

1.3 Η αμμωνία ως φορέας ενέργειας

Η NH_3 μπορεί να αξιοποιηθεί ως ενεργειακή ύλη απευθείας ως καύσιμο ή υπό την έννοια του φορέα ενέργειας ή υδρογόνου. Το ενεργειακό περιεχόμενο του μορίου ανά μονάδα όγκου είναι ιδιαίτερα υψηλό, ενώ πρόκειται για ένα «καθαρό» μόριο απ' όπου απουσιάζουν ενώσεις άνθρακα. Επίσης, η περιεκτικότητα κ.β. σε H_2 , περίπου 17,65%, είναι υψηλότερη σε σχέση με άλλες σημαντικές ουσίες υποψήφιες ως φορείς ενέργειας, όπως η μεθανόλη (12,5%).^{1,7}

Η αποθήκευση και μεταφορά της αμμωνίας εμφανίζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με το H_2 . Αφενός απαιτείται σχετικά χαμηλή προσφορά ενέργειας για συμπίεση ή ψύξη της ουσίας, καθώς σε χαμηλή πίεση και ήπια θερμοκρασία υγροποιείται. Ακόμη, η αποθήκευσή της NH_3 κρίνεται πιο ασφαλής, λόγω της χαμηλής τάσης ατμών και του υψηλού σημείου βρασμού, που εμφανίζει. Αξίζει να σημειωθεί πως, γενικότερα, η ευρεία χρήση της αμμωνίας, σε διαφορετικές εφαρμογές, έχει συντελέσει στην ανάπτυξη ενός εκτεταμένου δικτύου μεταφοράς και αποθήκευσης, ενώ υπάρχει ήδη σχετική τεχνογνωσία. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται ορισμένες βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες επιλεγμένων ενεργειακών υλών.⁷

Πίνακας 1. Βασικές ιδιότητες καυσίμων υδρογόνου (αέριο-υγρό) και αμμωνίας (αέρια)

Παράμετρος	Υγρό υδρογόνο	Υγρή αμμωνία	Μεθυλοκυκλοεξάνιο	Μεθανόλη
Σημείο βρασμού (°C) @ 1 atm	-253	-33	101	64,7
Περιεχόμενο υδρογόνου (wt.%)	100	17,8	6,16	12,5
Πυκνότητα υδρογόνου (kg/m ³)	70,9	121	47,1	-
Κατωτέρα Θερμογόνος Δύναμη (MJ/kg)	120	18,6	-	19,9
Κατωτέρα Θερμογόνος Δύναμη (MJ/m ³)	8,5	12,7	-	15,6
Ενέργεια αποδέσμευσης H ₂ (kJ/mol _{H₂})	0,907	30,6	67,5	-

1.4 Βιομηχανική παραγωγή αμμωνίας

Η αμμωνία αποτελεί μία από τις ουσίες με την υψηλότερη ζήτηση, καθιστώντας τη βιομηχανική παραγωγή της τη δεύτερη υψηλότερη (230 εκ. MT/έτος), παγκοσμίως, το 2021. Η παραγωγή της αμμωνίας, έχει συνδεθεί σε κύριο βαθμό με τις απαιτήσεις της βιομηχανίας λιπασμάτων. Η παραγόμενη αμμωνία χρησιμοποιείται, σχεδόν κατά 40% για τη σύνθεση ουρίας, κατά 35% για παραγωγή διάφορων τύπων λιπασμάτων, ενώ εκτιμάται πως μόλις το 20% αξιοποιείται για άλλους σκοπούς (εκρηκτικές ύλες 5%, χημικές ύλες, ψυκτικά μέσα κ.ά. 15%).^{8,9}

Η πλέον διαδεδομένη βιομηχανική παραγωγική μέθοδος αμμωνίας στηρίζεται στην αξιοποίηση ορυκτών καυσίμων ως πρώτη ύλη. Συγκεκριμένα, τα ορυκτά καύσιμα αξιοποιούνται για την παραγωγή H₂, μέσω της διεργασίας αναμόρφωσης ατμού-μεθανίου (Steam-Methane-Reforming, SMR). Η παραγωγή H₂ με SMR οφείλεται για το 80% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της παραγωγικής διαδικασίας. Έως το 2022 το φυσικό αέριο χρησιμοποιούνταν για το 76% της παγκόσμιας παραγωγής H₂ προς σύνθεση αμμωνίας. Το υδρογόνο αντιδρά με άζωτο (N₂) που προέρχεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα προς σύνθεση του μορίου αμμωνίας, σύμφωνα με τη

διεργασία Haber – Bosch. Σε ορισμένες τροποποιήσεις της Haber – Bosch το N_2 προέρχεται από γεννήτριες αζώτου και τροφοδοτείται στο μίγμα αντιδρώντων αερίων στο τελικό βήμα σύνθεσης αμμωνίας. Βασικά μειονεκτήματα της συγκεκριμένης παραγωγικής διαδικασίας είναι οι σχετικά χαμηλές αποδόσεις (60%-65%), αλλά και η έκλυση σημαντικής ποσότητας GHGs κατά την παραγωγή H_2 .^{7,9,10}

1.4.1 Εκπομπές GHGs από την παραγωγή αμμωνίας

Η παραγωγή αμμωνίας σχετίζεται άμεσα με την παραγωγή H_2 , όπως προκύπτει από την τυπική παραγωγική διαδικασία της. Κατά συνέπεια οι προκλήσεις που αφορούν την παραγωγή του πρόδρομου αερίου, ως προς την έκλυση GHGs, συνοδεύουν τις διεργασίες σύνθεσης NH_3 .¹¹

Την τελευταία περίοδο η αξιοποίηση της ηλεκτρόλυσης προς παραγωγή H_2 συγκεντρώνει συνεχώς όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον ως μέρος της συνολικής διαδικασίας παραγωγής NH_3 . Το H_2 που παράγεται με ηλεκτρόλυση, αντιδρά με το N_2 , μέσω της Haber – Bosch ή τροποποιήσεις αυτής, προς σύνθεση NH_3 , σε μια συνολική διεργασία με μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.⁶

Η σύγχρονη τάση να χαρακτηριστούν οι διάφορες παραγόμενες ουσίες ανάλογα με το περιβαλλοντικό που συνοδεύει τη βιομηχανική διαδικασία παραγωγής τους προτείνει τη χρήση χρωμάτων για την περιγραφή τους. Στην περίπτωση της αμμωνίας έχουν διαμορφωθεί οι κάτωθι χαρακτηρισμοί:^{1,3,4}

- Γκρι (ή καφέ) Αμμωνία

Πρόκειται για αμμωνία που παράγεται μέσω της συμβατικής παραγωγικής διαδικασίας αξιοποιώντας την κύρια διεργασία Haber-Bosch. Η αμμωνία, σε αυτή την περίπτωση, παράγεται μέσω αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου (H_2) και αζώτου (N_2). Το υδρογόνο παράγεται, συνήθως, μέσω της αντίδρασης SMR, όπου ατμός αντιδρά με φυσικό αέριο. Το μίγμα των προϊόντων, υφίσταται επεξεργασία προκειμένου να απομονωθεί το H_2 , μέσω σειράς διεργασιών από τις οποίες εκλύονται CO_2 και CH_4 (αέρια GHGs). Το N_2 προέρχεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα και λαμβάνεται καθαρό ύστερα από διαχωρισμό.

- Μπλε Αμμωνία

Πρόκειται για αμμωνία η οποία έχει, συνήθως, παραχθεί με τη συμβατική διαδικασία, αλλά έχει δεσμευτεί το CO_2 . Πρόκειται για μια περίπτωση που συγκεντρώνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς

νέες τεχνολογίες ή πρόσθετες διεργασίες μπορούν να αξιοποιηθούν σε υφιστάμενες παραγωγικές μονάδες, ώστε να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμά τους.

- Πράσινη Αμμωνία

Πρόκειται για αμμωνία η οποία παράγεται με υδρογόνου που προέρχεται από διεργασίες ηλεκτρόλυσης του νερού, όπου η απαιτούμενη ενέργεια για την ηλεκτρόλυση προέρχεται από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως ΑΠΕ.

- Τιρκουάζ Αμμωνία

Περιλαμβάνει διεργασίες πυρόλυσης μετατρέπουν το μεθάνιο σε υδρογόνο και καθαρό άνθρακα. Το υδρογόνο αντιδρά με τις συνήθεις διεργασίες με άζωτο προς σχηματισμό αμμωνίας. Η συγκεκριμένη κατηγορία κατατάσσεται μεταξύ της πράσινης και μπλε αμμωνίας.

1.4.2 Παραγωγή αμμωνίας στην Ελλάδα

Η παραγωγή αμμωνίας στην Ελλάδα καλύπτεται εξολοκλήρου από μία (1) εγκατάσταση που βρίσκεται στην περιοχή της Καβάλας. Η παραγόμενη ποσότητα αμμωνίας, δε, αξιοποιείται εξολοκλήρου σε επόμενες διεργασίες με κύριο σκοπό την παραγωγή λιπασμάτων. Σε ελάχιστες περιπτώσεις πραγματοποιούνται χύδην πωλήσεις αμμωνίας.

Σύμφωνα με την πρόσφατη αναφορά του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας της Ελλάδας η συνολική παραγωγή αμμωνίας εμφανίζεται κυμαινόμενη, ενώ την τελευταία 5ετία σημειώνεται μείωση. Στον πίνακα που ακολουθεί έχουν περιληφθεί δεδομένα που αφορούν τη συνολική παραγωγή αμμωνίας στη χώρα, τη συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου και τις εκπομπές CO₂, σε ετήσια βάση, για την περίοδο 2011 – 2021.¹²

Πίνακας 2. Ενδεικτικά μεγέθη παραγωγής, κατανάλωσης και εκπομπών της βιομηχανίας παραγωγής αμμωνίας στην Ελλάδα¹²

Έτος	Παραγωγή Αμμωνίας (kMT)	Κατανάλωση Φυσικού Αερίου (TJ)	Εκπομπές CO _{2,eq} (kMt)
2011	157,59	4.728,78	262,51
2012	106,69	3.214,67	178,73
2013	128,14	3.831,36	212,13
2014	144,56	4.359,26	241,31
2015	145,21	4.302,90	240,51
2016	91,40	2.722,24	151,98
2017	162,44	4.806,81	267,71
2018	148,16	4.381,66	244,82
2019	135,05	4.005,57	223,60
2020	115,79	3.518,57	196,30
2021	114,68	3.540,11	196,19

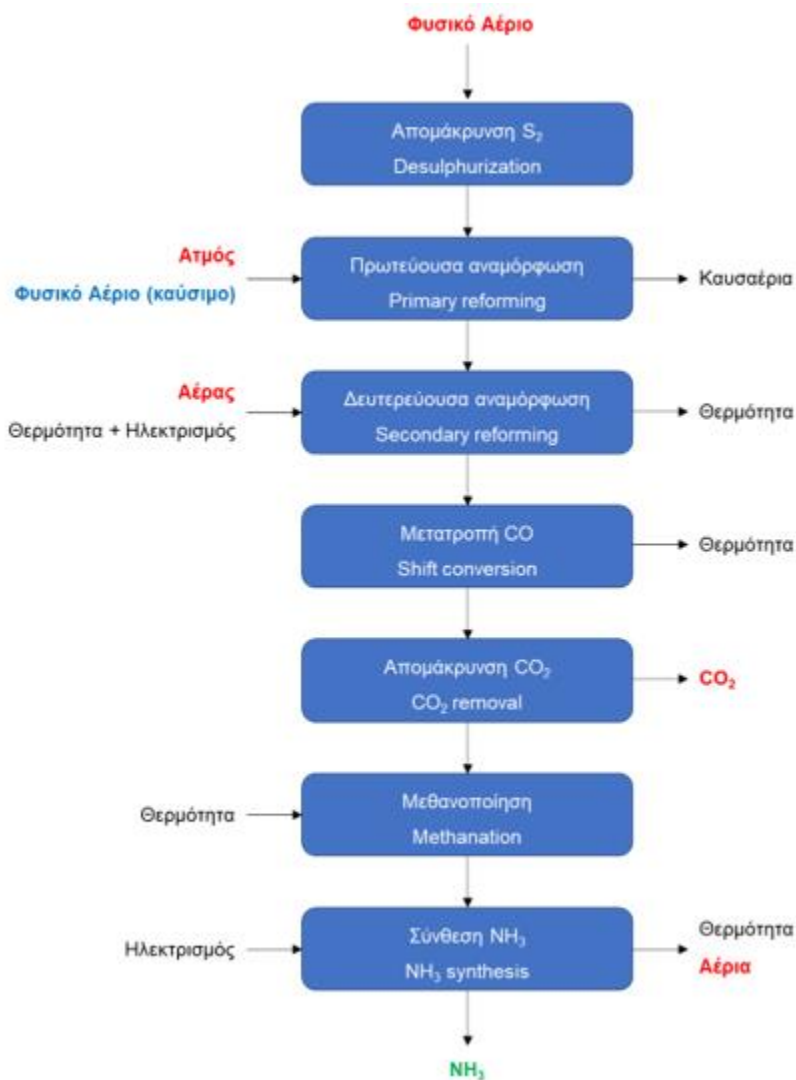
Από τα δεδομένα του Πίνακα 2 προκύπτει το συμπέρασμα πως για κάθε παραγόμενο μετρικό τόνο (MT) αμμωνίας εκλύονται περίπου 1,7 μετρικοί τόνοι (MT) ισοδύναμου CO₂. Αξίζει να σημειωθεί πως η ποσότητα φυσικού αερίου που καταναλώνεται δεν αφορά μόνο καύσιμη ύλη, αλλά και α' ύλη, βασικό ρεύμα τροφοδοσίας που αντιδρά προς παραγωγή αμμωνίας.¹²

Το 2021 η παραγωγή αμμωνίας στη χώρα αποτέλεσε το 0,8 % του συνόλου παραμονής αμμωνίας στην ΕΕ (13.691 kMT). Αντίστοιχα, οι εκπομπές CO₂ από την παραγωγή αμμωνίας ισοδυναμούν στο 0,6 % του συνόλου εκπομπών GHG της ΕΕ (19.299 kMT CO_{2,eq}). Η τάση μεταβολής των εκπομπών έως το 2021 σημειώνεται μειωμένη. Οι εκπομπές που σχετίζονται με την παραγωγή αμμωνίας στην Ελλάδα αποτελούν το 1% των εκπομπών που σχετίζονται με την αντίστοιχη παραγωγική διαδικασία, στο σύνολο των χωρών της ΕΕ.¹²

2 Μεθοδολογία

2.1 Περιγραφή προσομοίωσης

Η προσομοίωση που αναπτύχθηκε για να περιγράψει την παραγωγή NH_3 μέσω των βασικών διεργασιών SMR, για παραγωγή H_2 και Haber – Bosch για σύνθεση NH_3 περιγράφεται συνοπτικά, από το παρακάτω διάγραμμα ροής (Εικόνα 1). Σημειώνονται, ακόμη οι βασικές ροές υλών και ενέργειας.^{11,13}



Εικόνα 1. Χαρακτηριστικό διάγραμμα ροής παραγωγικής διαδικασίας σύνθεσης NH_3 ¹⁴

2.2 Περιγραφή τροφοδοσίας

Οι πρώτες ύλες που ήταν απαραίτητο να τροφοδοτηθούν στο μελετώμενο παραγωγικό σχήμα είναι το φυσικό αέριο (ως αντιδρών και καύσιμο), ο ατμός (ως αντιδρών) και ο αέρας, που περιέχει την απαιτούμενη ποσότητα N_2 για το σχηματισμό NH_3 . Για το ρεύμα φυσικού αερίου χρησιμοποιήθηκε η σύσταση, όπως αυτή παρουσιάζεται στα δεδομένα χημικής ανάλυσης από προμηθευτή της ΔΕΣΦΑ. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται η σύνθεση του μίγματος αερίων που αφορά το φυσικό αέριο.

Πίνακας 3. Σύσταση φυσικού αερίου

	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	$i-C_4H_{10}$	$n-C_4H_{10}$	$i-C_5H_{12}$	$n-C_5H_{12}$	C_6H_{14}	N_2	CO_2
% v/v	94,84	3,03	0,94	0,15	0,14	0,03	0,02	0,01	0,58	0,26

Το φυσικό αέριο θεωρήθηκε πως είναι διαθέσιμο σε πίεση 35 bar και θερμοκρασία περιβάλλοντος (20 °C) στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο του προμηθευτή.

Ο ατμός (100% H_2O) παράχθηκε μέσω της θέρμανσης σε εναλλάκτες ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας (waste heat boilers). Ο παραγόμενος ατμός ήταν διαθέσιμος σε πίεση 35 bar και θερμοκρασία 350 °C (υπέρθερμος ατμός).

Η σύσταση του μίγματος αέρα που τροφοδοτήθηκε τόσο για την καύση όσο και για την παροχή του αντιδρώντος N_2 παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Σύσταση αέρα

	N_2	O_2	Ar	CO_2
% v/v	78,09	20,95	0,93	0,04

Η προσομοίωση αναπτύχθηκε στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus[®], ενώ μέρος αυτής στο εμπορικό λογισμικό Aspen Adsorption[®]. Το θερμοδυναμικό μοντέλο στηρίχθηκε στη χρήση καταστατικών εξισώσεων (Equations of State – EoS) για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των ενώσεων, σύμφωνα με το μοντέλο RKS-BM (Redlich-Kwong-Soave Boston-Mathias) που υπήρχε διαθέσιμη στο λογισμικό. Η ανάπτυξη της προσομοίωσης στηρίχθηκε στο υφιστάμενο μοντέλο της Aspentech[®], “Aspen Plus Ammonia Model”.

2.3 Απομάκρυνση ενώσεων S₂ από το φυσικό αέριο

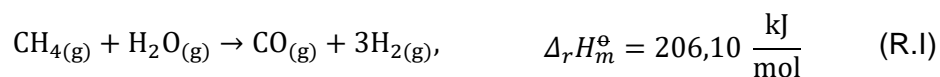
Το φυσικό αέριο που τροφοδοτείται στην παραγωγική διαδικασία, συνήθως φέρει μικρές ποσότητες ή ίχνη θείου (S₂) ως ενώσεις υδρόθειου (H₂S), που αποτελούν «δηλητήριο» για τα καταλυτικά συστήματα, υποβαθμίζοντας σημαντικά την απόδοσή τους. Κατά συνέπεια απαιτείται η απομάκρυνσή τους, η οποία επιτυγχάνεται σε απλά μη-καταλυτικά συστήματα που προσροφούν τις ενώσεις S₂ σύμφωνα με μια ετερογενή αντίδραση στερεού-αερίου. Συνήθως οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε καταλυτικές κλίνες οξειδίων του ψευδαργύρου (ZnO), στους 350 °C – 400 °C, ενώ η συγκέντρωση στο αέριο μίγμα εξόδου σε S₂ δεν ξεπερνά το 1 ppm.^{11,15}

Από τα δεδομένα συγκεντρώσεων S₂ στο φυσικό αέριο, όπου η περιεκτικότητα της ουσίας ήταν αμελητέα κρίθηκε πως το συγκεκριμένο στάδιο μπορεί παραληφθεί, στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης. Αναλυτικά στοιχεία ως προς τη σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας φυσικού αερίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

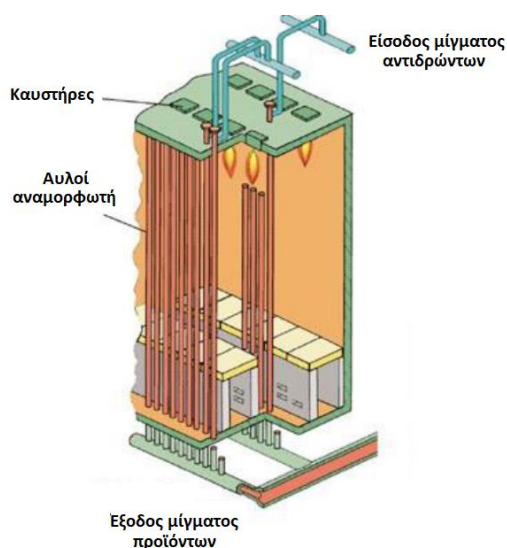
2.4 Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό

2.4.1 Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό – Περιγραφή διεργασίας

Το ρεύμα φυσικού αερίου, απαλλαγμένο από το βλαβερό S₂ τροφοδοτείται στο πρώτο κύριο καταλυτικό σύστημα, προς παραγωγή υδρογόνου. Στην πραγματικότητα το παραγόμενο ρεύμα είναι ένα μίγμα H₂ – CO – CO₂, που χαρακτηρίζεται ως syngas. Οι βασικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε αυτό το στάδιο ήταν οι ακόλουθες, υπό μορφή χημικών εξισώσεων:^{13,16}



Η R.I αναφέρεται ως αντίδραση αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό (Steam-methane reforming reaction – SMR), ενώ η R.II ως αντίδραση μετατροπής νερού-αερίου (Water-gas shift reaction – WGS). Όπως σημειώνεται στις χημικές εξισώσεις η R.I είναι ενδόθερμη και απαιτείται προσφορά θερμότητας για τη διεξαγωγή της, ενώ η R.II εξώθερμη, οπότε εκλύεται θερμότητα κατά τη διεξαγωγή της. Το συνολικό ενεργειακό αποτέλεσμα από τη διεξαγωγή των δύο αντιδράσεων ισοδυναμεί με απαίτηση προσφοράς θερμότητας.¹⁷



Εικόνα 2. Τυπική απεικόνιση εξοπλισμού αναμόρφωσης

Στη συνήθη βιομηχανική εφαρμογή οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε έναν αναμορφωτή, με τυπική μορφή όπως αυτή της Εικόνας 2. Το τροφοδοτούμενο αέριο μίγμα επιμερίζεται σε εσωτερικούς αυλούς οι οποίοι είναι φορτωμένοι με καταλύτη. Η απαιτούμενη θερμότητα προσφέρεται μέσω της καύσης φυσικού αερίου στους καυστήρες του θαλάμου καύσης. Από την αντίδραση καύσης και μέσω δύο διαφορετικών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, ακτινοβολία και συναγωγή, επιτυγχάνεται η κάλυψη ενεργειακών απαιτήσεων για την εκτέλεση της αντίδρασης. Η έξοδος του αέριου μίγματος προϊόντων οδηγείται προς τα επόμενα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Τα καυσαέρια που καταλαμβάνουν το

χώρο καύσης του αναμορφωτή, οδηγούνται τελικά στο περιβάλλον από την έξοδο καμινάδας, εφόσον νωρίτερα αξιοποιηθεί το θερμικό τους φορτίο, μέσω ροής από συστήματα εναλλαγής θερμότητας (economizers – waste heat boilers). Η θερμοκρασία των καυσαερίων μειώνεται, καθώς θερμαίνονται άλλα ρεύματα της διεργασίας, οπότε επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας.^{6,10}

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση της συγκεκριμένης διεργασίας είναι (α) η θερμοκρασία της αντίδρασης, (β) η πίεση του αέριου μίγματος και (γ) ο λόγος τροφοδοσίας ατμού – μεθανίου (S/C – Steam-to-Carbon). Συνήθεις συνθήκες διεξαγωγής των αντιδράσεων μετατροπής CH₄ παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.⁶

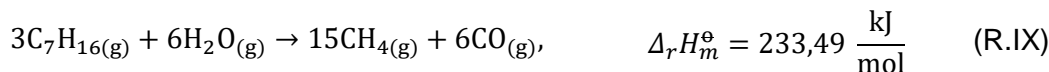
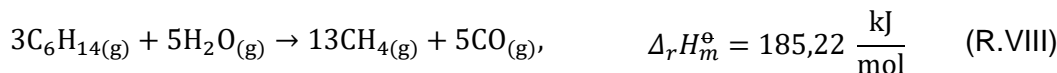
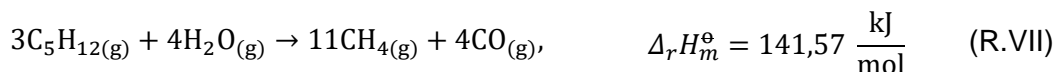
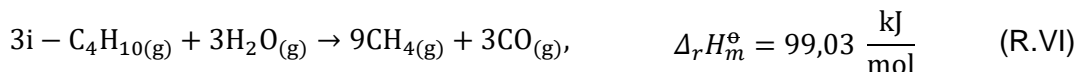
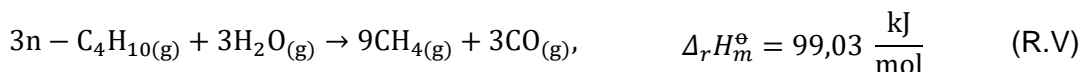
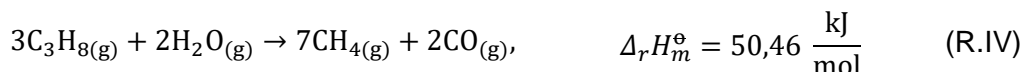
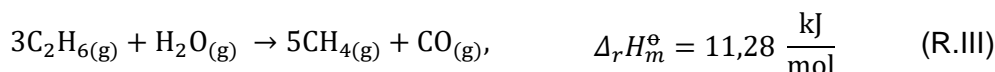
Πίνακας 5. Συνήθεις συνθήκες λειτουργίας αναμόρφωσης

Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	800 – 900
Πίεση λειτουργίας (bar)	15 – 30
Λόγος Ατμού- CH ₄ (mol _{steam} /mol _{N.G.})	2,5 – 3,0

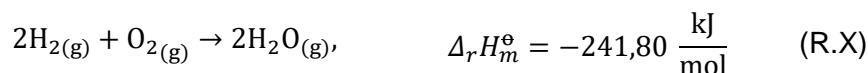
Το καταλυτικό σύστημα του αντιδραστήρα αποτελείται συνήθως από καταλύτη νικελίου (Ni), που περιέχει 15-25 κ.β. % NiO σε φορέα αλούμινας (α-Al₂O₃). Ο τύπος του αντιδραστήρα χαρακτηρίζεται ως σταθερής κλίνης (fixed bed).^{9,17}

Αξίζει να σημειωθεί πως το ρεύμα φυσικού αερίου φέρει σημαντικές ποσότητες από βαρύτερα αλκάνια ($C_2 - C_{7+}$). Τα μόριά τους μετατρέπονται σε απλούστερους υδρογονάνθρακες και συγκεκριμένα σε CH_4 μέσω αντίδρασης με τα μόρια του ατμού. Το σύνολο των αντιδράσεων είναι ενδόθερμες, οπότε απαιτείται προσφορά ενέργειας για την εκτέλεσή τους. Στην πραγματικότητα, οι εν λόγω αντιδράσεις πραγματοποιούνται ταχύτατα εντός του αναμορφωτή.¹³

Δεδομένου πως οι αντιδράσεις εμφανίζουν υψηλούς ρυθμούς και υψηλές αποδόσεις, μπορούν να θεωρηθούν πλήρεις. Στο ρεύμα εισόδου μόρια με αριθμό ατόμων άνθρακα μεγαλύτερο του επτά (C_{7+}) έχουν πολύ μικρές συγκεντρώσεις, επομένως μπορούν να αγνοηθούν και να αντιμετωπιστούν ως C_7H_{16} . Κατά συνέπεια οι αντιδράσεις των δευτερευόντων μορίων με το H_2O περιγράφονται από τις κάτωθι εξισώσεις:¹³



Το στάδιο αναμόρφωσης περιλαμβάνει μία ακόμη διεργασία, στην οποία προστίθεται αέρας στο μίγμα των αερίων. Ο αέρας που προθερμαίνεται και τροφοδοτείται σε κατάλληλη πίεση, περιέχει την απαραίτητη ποσότητα N_2 που απαιτείται για τη σύνθεση της αμμωνίας. Το οξυγόνο (O_2) που περιέχεται στον αέρα, αντιδρά με το παραγόμενο H_2 , μειώνοντας σε μικρό βαθμό, τη συνολική απόδοση της διεργασίας, προς παραγωγή ατμού (H_2O), σύμφωνα με την αντίδραση:¹³



Ο χώρος όπου λαμβάνει χώρα αυτή η αντίδραση είθισται να χαρακτηρίζεται ως δευτερεύον αναμορφωτής.

Κατά την αναμόρφωση φυσικού αερίου εκτός του H_2 παράγονται, ως παραπροϊόντα, οδηγείται στο CO και CO_2 . Τα παραπροϊόντα είναι ανεπιθύμητα στις διεργασίες του σταδίου παραγωγής αμμωνίας, επομένως θα πρέπει να προηγηθούν διεργασίες μετατροπής τους ή απομάκρυνσής τους.

2.4.2 Αναμόρφωση φυσικού αερίου με ατμό – Ανάπτυξη προσομοίωσης

Το πρώτο στάδιο της προσομοίωσης περιλάμβανε την αναμόρφωση του ρεύματος φυσικού αερίου με ατμό. Για την προθέρμανση του ρεύματος φυσικού αερίου έγινε χρήση εναλλάκτη (E-101), ενώ το φυσικό αέριο θεωρήθηκε απαλλαγμένο από S_2 . Η θερμοκρασία εξόδου του αντιδρώντος αερίου από την εναλλάκτη επιλέχθηκε ίση με $325\text{ }^\circ\text{C}$, ενώ η πίεση αυτού ίση με 35 bar .

Το προθερμασμένο ρεύμα φυσικού αερίου αναμίχθηκε με ατμό σε πίεση 35 bar και θερμοκρασία $340\text{ }^\circ\text{C}$, και προθερμάνθηκε στους $500\text{ }^\circ\text{C}$ (E-102) για να οδηγηθεί στον αναμορφωτή. Το στάδιο αναμόρφωσης προσομοιώθηκε σε τέσσερα (4) στάδια.

1^ο στάδιο: Το θερμό μίγμα φυσικού αερίου – ατμού τροφοδοτήθηκε σε πρώιμο αντιδραστήρα (pre-reformer, R-101) όπου έλαβαν χώρα οι ταχύτερες αντιδράσεις βαρύτερων του CH_4 υδρογονανθράκων (C_{2+}) προς CH_4 και CO . Οι αντιδράσεις (R.III – R.IX) θεωρήθηκαν πλήρεις. Το block που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας αντιδραστήρας τύπου «RStoic» αδιαβατικής λειτουργίας.

2^ο στάδιο: Το αντιδρών μίγμα που εξήλθε του πρώιμου αντιδραστήρα οδηγήθηκε στον πρωτεύον αντιδραστήρα αναμόρφωσης (R-102). Εκεί έλαβαν χώρα οι αντιδράσεις R.I – R.II προς σχηματισμό του syngas. Η απαιτούμενη θερμότητα προσδόθηκε μέσω του φούρνου H-101, που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της καύσης φυσικού αερίου και αέρα στους καυστήρες του αναμορφωτή. Το block που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας αντιδραστήρας τύπου «RGibbs» στον οποίο προσδόθηκε θερμότητα με σκοπό να προκύψουν αέρια προϊόντα επιθυμητής θερμοκρασίας ($835\text{ }^\circ\text{C}$).

3^ο στάδιο: Το προϊόν syngas πρωτεύοντος αντιδραστήρα αναμόρφωσης τροφοδοτήθηκε σε επόμενο αντιδραστήρα (R-103) όπου αναμίχθηκε με θερμό αέρα ($460\text{ }^\circ\text{C}$). Στο συγκεκριμένο

στάδιο έλαβε χώρα η αντίδραση R.X. προς μετατροπή του O₂ του ατμοσφαιρικού αέρα. Το block που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας αντιδραστήρας τύπου «RStoic» αδιαβατικής λειτουργίας.

4^ο στάδιο: Το μίγμα syngas – αέρα τροφοδοτήθηκε στο δευτερεύων αντιδραστήρα αναμόρφωσης (R-104) όπου έλαβε χώρα περαιτέρω μετατροπή του CH₄. Η απαιτούμενη θερμότητα προσδόθηκε μέσω του φούρνου H-101. Το block που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας αντιδραστήρας τύπου «RGibbs» στον οποίο προσδόθηκε θερμότητα με σκοπό να προκύψουν αέρια προϊόντα επιθυμητής θερμοκρασίας (915 °C). Η πίεση του ρεύματος εξόδου επιλέχθηκε ίση με 29 bar.

Σημειώνεται πως η διεργασία αναμόρφωσης περιγράφηκε από τους 4 αντιδραστήρες καθώς και το φούρνο H-101 (καυστήρες αναμορφωτή). Η θέρμανση του καταλυτικού συστήματος των αντιδραστήρων επετεύχθη με μεταφορά θερμότητας από το χώρο καύσης (ακτινοβολία) και από τα θερμά καυσαέρια (συναγωγή). Επίσης, η προθέρμανση του μίγματος Φ.Α. – ατμού (E-102), αλλά και του θερμού αέρα (E-103) πραγματοποιήθηκε με αξιοποίηση των θερμών καυσαερίων (συναγωγή) του H-101. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιήθηκε σημαντικό μέρος απορριπτόμενης θερμότητας.

Στον Πίνακα 6 συνοψίζονται τα βασικά στοιχεία τροφοδοσίας της προσομοίωσης αναμόρφωσης:

Πίνακας 6. Ροές αντιδρόντων και καυσίμων για τη διεργασία αναμόρφωσης

Παράμετρος	Τιμή
Ροή Φυσικού Αερίου (α' ύλη)	13.900 Nm ³ /hr
Ροή Ατμού (α' ύλη)	32.000 kg/hr
Ροή αέρα (α' ύλη)	17.040 Nm ³ /hr
Ροή Φυσικού Αερίου (καύσιμο)	6.730 Nm ³ /hr
Ροή αέρα (καύσιμο)	71.730 Nm ³ /hr

Με επεξεργασία των τιμών του Πίνακα 6 προκύπτουν τα συμπεράσματα πως η διεργασία λειτουργεί με λόγο $\frac{S}{C} = 2,86 \frac{mol_{steam}}{mol_{carbon}}$ και $\frac{Air}{Steam+Carbon} = 0,45 \frac{mol_{air}}{mol_{carbon}+mol_{carbon}}$.

2.5 Μετατροπή CO

2.5.1 Μετατροπή CO – Περιγραφή διεργασίας

Το μίγμα αερίων εξόδου της αναμόρφωσης, οδηγείται στο επόμενο στάδιο όπου το CO μετατρέπεται σε CO₂ και H₂. Η μετατροπή επιτυγχάνεται βάσει της αντίδρασης WGS (R.II). Η αντίδραση είναι εξώθερμη οπότε σε αυτό το στάδιο σημειώνεται έκλυση θερμότητας και αύξηση της θερμοκρασίας του μίγματος στην έξοδο κάθε αντιδραστήρα.¹⁸

Το συγκεκριμένο στάδιο περιγράφεται από δύο σειριακές διεργασίες αντίδρασης με έναν ξεχωριστό αντιδραστήρα σε καθεμιά. Αρχικά ευνοείται η αντίδραση σε υψηλή θερμοκρασία (High Temperature Shift – HTS), τυπικά 330 °C – 500 °C, έτσι ώστε να επιταχυνθεί η μετατροπή. Ωστόσο, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση των προϊόντων η δράση δεν είναι πλέον αποτελεσματική, οπότε μείωση της θερμοκρασίας θα οδηγήσει σε επέκταση της αντίδρασης, καθώς η σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης θα αυξηθεί με αποτέλεσμα να ευνοηθεί ο περαιτέρω σχηματισμός CO₂ και H₂. Η αντίδραση σε χαμηλή θερμοκρασία (Low Temperature Shift – LTS) πραγματοποιείται συνήθως στους 200 °C – 250 °C. Το καταλυτικό σύστημα του 1^{ου} αντιδραστήρα αποτελείται από σταθερές κλίνες καταλύτη FeO/Fe₂O₃ (συνήθως φέρουν περίπου 10% κ.β. Cr₂O₃), ενώ του 2^{ου} αντιδραστήρα από σταθερές κλίνες καταλύτη Cu-Zn ή Cu-Zn-Al.^{11,13,18}

2.5.2 Μετατροπή CO – Ανάπτυξη προσομοίωσης

Το συγκεκριμένο στάδιο επιλέχθηκε να προσομοιωθεί με χρήση δύο αντιδραστήρων (REquil), ενός για τη αντίδραση υψηλής θερμοκρασίας HTS (R-201) και ενός για την αντίδραση χαμηλής θερμοκρασίας (R-202). Οι αντιδραστήρες θεωρήθηκαν αδιαβατικοί, οπότε δεν ανταλλάχτηκε θερμότητα με το περιβάλλον. Η εκλούμενη θερμότητα που οφείλεται στον εξώθερμο χαρακτήρα της αντίδρασης WGS θεωρήθηκε πως προκαλεί, αποκλειστικά, αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου των προϊόντων.

Το ρεύμα εισόδου οδηγήθηκε στην είσοδο του 1^{ου} αντιδραστήρα με θερμοκρασία 320 °C. Όπως σημειώθηκε το εναλλασσόμενο θερμικό φορτίο θεωρήθηκε μηδενικό, όπως και η πτώση πίεσης. Το ρεύμα εξόδου του 1^{ου} αντιδραστήρα αφού ψύχθηκε στους 200 °C οδηγήθηκε στον 2^ο αντιδραστήρα. Το εναλλασσόμενο θερμικό φορτίο του αντιδραστήρα όπως και η πτώση πίεσης θεωρήθηκαν μηδενικά και σε αυτή την περίπτωση. Η ψύξη του αέριου μίγματος αντιδρώντων

πραγματοποιήθηκε σε εναλλάκτη αυλών – κελύφους (E-202), όπου χρησιμοποιήθηκε νερό ως ψυκτικό μέσο.

2.6 Απομάκρυνση CO₂

2.6.1 Απομάκρυνση CO₂ – Επεξεργασία τροφοδοσίας

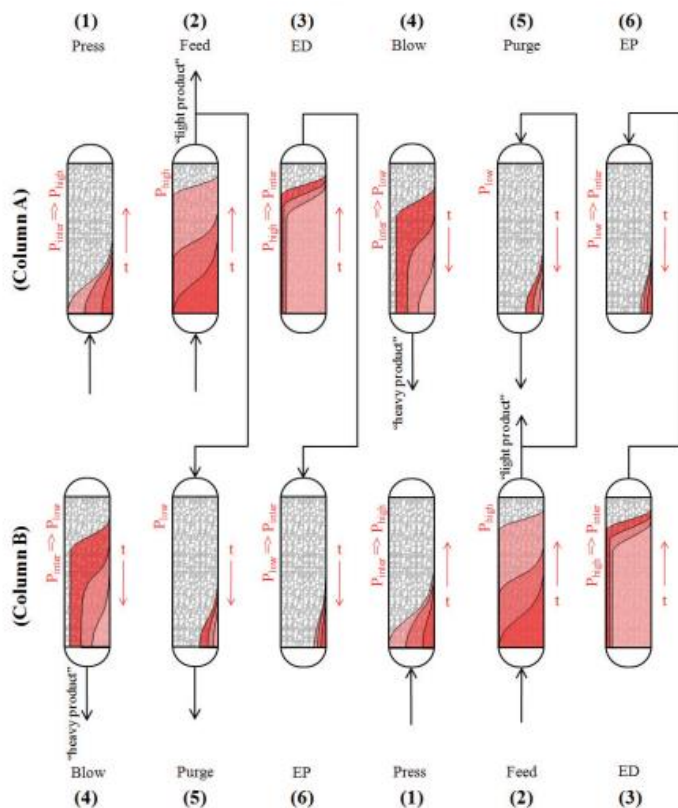
Το ρεύμα εξόδου των αντιδραστήρων HTS και LTS περιέχει σημαντική ποσότητα CO₂ που θα πρέπει να απομακρυνθεί. Πριν γίνει η τροφοδοσία του μίγματος στον εξοπλισμό του σταδίου, ψύχεται και οδηγείται σε δοχείο διαχωρισμού (Knock-out Drum), όπου ο ατμός συμπυκνώνεται και διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα αέρια.

Οι πλέον συνηθισμένες βιομηχανικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για απομάκρυνση CO₂ που χρησιμοποιούνται είναι δύο (2) και παρουσιάζονται παρακάτω στα επόμενα κεφάλαια.

2.6.2 Απομάκρυνση CO₂ σε μονάδες PSA

Πρόκειται για μια αποτελεσματική μέθοδο με μικρό αποτύπωμα, όπου λαμβάνει χώρα προσρόφηση αερίων από πληρωτικό υλικό υψηλού πορώδους σε στήλες υπό πίεση. Πρόκειται για μια συστοιχία προσροφητών που λειτουργούν παράλληλα, σε επαναλαμβανόμενους κύκλους. Η πίεση μεταβάλλεται οπότε η μέθοδος περιγράφεται ως προσρόφηση υπό μεταβλητή πίεση (Pressure Swing Adsorption – PSA). Κάθε στήλη φέρει στερεά υλικά πλήρωσης που βασικό χαρακτηριστικό των οποίων είναι η υψηλή ενεργή επιφάνεια. Κατάλληλα υλικά για σχετικές εφαρμογές είναι ο ενεργός άνθρακας (activated carbon) και τα μοριακά κόσκινα (molecular sieves), π.χ. ζεόλιθοι. Στο εσωτερικό μιας στήλης διαμορφώνονται διακριτά στρώματα που καταλαμβάνει κάθε υλικό.¹⁹

Το αέριο μίγμα τροφοδοτείται σε μια στήλη προσρόφησης και ρέει διαμέσου του πληρωτικού υλικού. Κάθε αέριο προσροφάται με διαφορετικό ρυθμό υπακούοντας σε διαφορετικές κινητικές προσρόφησης, που εξαρτώνται από την πίεση και τη θερμοκρασία της δράσης. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η λειτουργία μιας συστοιχίας δύο στηλών προσρόφησης αερίων.



Εικόνα 3. Σχηματική απεικόνιση σταδίων λειτουργίας μονάδας PSA δύο (2) στηλών προσρόφησης¹⁹

Τα στάδια της διεργασίας περιγράφονται παρακάτω:

Βήμα (1). Το αέριο μίγμα τροφοδοτείται στην 1^η στήλη προσρόφησης, οπότε η πίεση της στήλης αυξάνεται έως να εξισωθεί με την πίεση του αερίου μίγματος στην είσοδο.

Βήμα (2). Το πληρωτικό υλικό σε κάθε διατομή της στήλης οδηγείται σταδιακά σε κορεσμό, αρχικά τα στερεά κοντά στην είσοδο του αερίου και αργότερα εκείνα πιο κοντά στην έξοδο. Το εξερχόμενο αέριο μίγμα από την 1^η στήλη προσρόφησης αρχικά είναι πλούσιο σε περιεκτικότητα ως προς το επιθυμητό αέριο, που συνήθως είναι εκείνο που εμφανίζει το μικρότερο ρυθμό προσρόφησης σε σχέση με τα υπόλοιπα. Μέρος του ρεύματος εξόδου τροφοδοτείται στη 2^η στήλη, με σκοπό την απομάκρυνση προσροφημένων αερίων από το εσωτερικό της (αντίθετη ροή αερίου σε σχέση με την πρώτη στήλη).

Βήμα (3). Πριν τον πλήρη κορεσμό του πληρωτικού υλικού της 1^{ης} στήλης η ροή αερίου διακόπτεται σε αυτή. Μέρος του ρεύματος εξόδου συνεχίζει να τροφοδοτείται στη 2^η στήλη. Η

πίεση εξισορροπείται στις δύο στήλες. Το συγκεκριμένο βήμα συνήθως είναι ταχύτατο και διαρκεί μόλις λίγα δευτερόλεπτα.

Βήμα (4). Η 1^η στήλη συνδέεται με σημείο χαμηλής πίεσης, οπότε αέρια που έχουν προσροφηθεί στο εσωτερικό τους ξεκινούν να εκροφώνται και να μεταφέρονται στο σημείο χαμηλότερης πίεσης. Πρόκειται για τη φάση έναρξης εκρόφησης. Το αέριο μίγμα τροφοδοτείται στην 2^η στήλη προσρόφησης, οπότε η πίεση της στήλης αυξάνεται έως να εξισωθεί με την πίεση του αερίου μίγματος στην είσοδο. (Βήμα ανάλογο του «1»)

Βήμα (5). Αέριο από την έξοδο της 2^{ης} στήλης τροφοδοτείται στην 1^η με αποτέλεσμα την περαιτέρω απομάκρυνση προσροφημένων αερίων προς το σημείο χαμηλής πίεσης. Ο κορεσμός του πληρωτικού υλικού συνεχίζεται στη 2^η στήλη. (Βήμα ανάλογο του «2»)

Βήμα (6). Πρόκειται για το ταχύτατο βήμα όπου το αέριο δεν τροφοδοτείται πλέον στη 2^η στήλη, ενώ μέρος του περιεχομένου αυτής ρέει προς την 1^η στήλη προς εξισορρόπηση της πίεσης των δύο στηλών. (Βήμα ανάλογο του «3»)

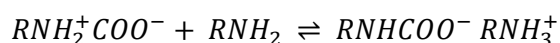
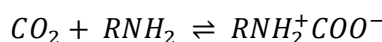
Τα αέρια ενδιαφέροντος που αναμένεται να ληφθούν στην έξοδο της διεργασίας προσρόφησης είναι τα H₂ και N₂. Αντίθετα, εκείνα που προσροφώνται είναι τα CO₂, CO και CH₄. Τα τελευταία διαχωρίζονται με επιτυχία και μπορούν να αξιοποιηθούν σε άλλες διεργασίες. Σημειώνεται δε, πως σε μια μονάδα, όπως αυτή που μελετάται οι ποσότητες CO και CH₄ στο καθαρό ρεύμα εξόδου αναμένονται ελάχιστες^{20,21}.

Ο αριθμός των απαιτούμενων στηλών, καθώς και ο χρόνος ολοκλήρωσης ενός κύκλου αποτελούν τις βασικές παραμέτρου σχεδιασμού για ένα τέτοιο σύστημα. Το πλήθος στηλών εξαρτάται κυρίως από την πίεση σχεδιασμού της μονάδας που σχετίζεται με την πίεση προσρόφησης. Όσο υψηλότερη πίεση επιλεγεί, τόσο αυξάνονται οι χρόνοι και ο αριθμός των βημάτων εξισορρόπησης. Επίσης, ο χρόνος ενός κύκλου εξαρτάται άμεσα και καθορίζεται από το φορτίο πληρωτικού υλικού σε κάθε στήλη, άρα και το μέγεθος του εξοπλισμού. Από βιομηχανικά δεδομένα για την πίεση λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, περί τα 25 – 28 bar, το πλήθος στηλών που επιλέγονται είναι συνήθως τέσσερις (4).^{20,22}

2.6.3 Απομάκρυνση CO₂ σε στήλες απορρόφησης

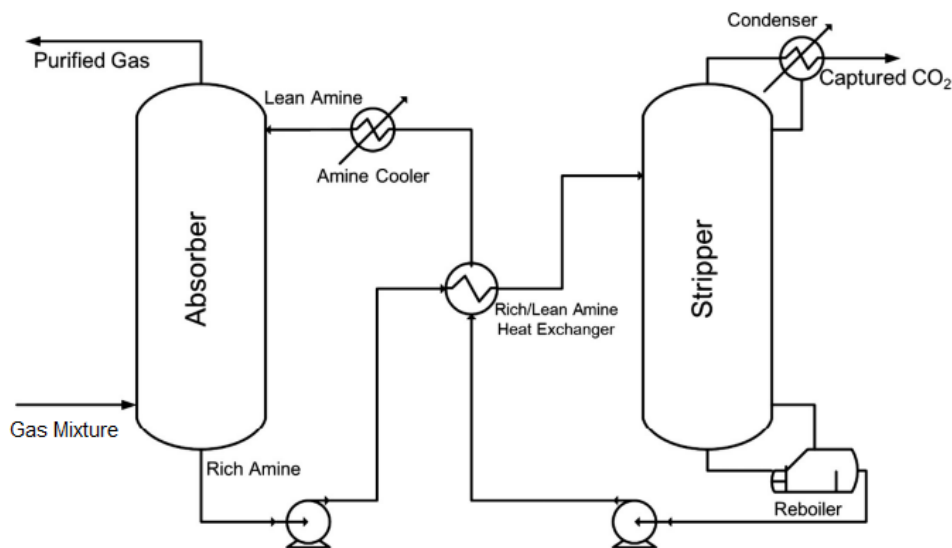
Πρόκειται για την προγενέστερη, ιστορικά, διεργασία που χρησιμοποιήθηκε για την απομάκρυνση CO₂ από αέρια μίγματα. Στηρίζεται στη διεργασία απορρόφησης αερίου-υγρού, όπου το CO₂ απορροφάται από κάποια κατάλληλη ένωση, σε υγρή κατάσταση. Το συνηθισμένο υγρό που χρησιμοποιείται είναι η αιθανολαμίνη (monoethanolamine – MEA).²³

Ο μηχανισμός που περιγράφει τη συγκεκριμένη διεργασία περιγράφεται από δύο βασικές αντιδράσεις ισορροπίας:²⁴



Η διεργασία λαμβάνει χώρα σε στήλη με πληρωτικού υλικού όπου η ροή του αερίου μίγματος που περιέχει το CO₂ γίνεται προς μία διεύθυνση – συνήθως εισέρχεται από τον πυθμένα και εξέρχεται από την κορυφή της στήλης –, ενώ το ρεύμα MEA ρέει προς την αντίθετη διεύθυνση. Το πληρωτικό υλικό εξυπηρετεί την ανάγκη για αυξημένη επιφάνεια επαφής μεταξύ των δύο ρευστών βελτιώνοντας και ευνοώντας τα φαινόμενα μεταφοράς. Το εξερχόμενο αέριο περιέχει ίχνη CO₂ εφόσον η κύρια ποσότητα αυτού έχει απορροφηθεί από το MEA.^{23,24}

Επομένως, το ρεύμα MEA εισέρχεται στη στήλη «φτωχό» σε περιεκτικότητα CO₂ (lean MEA) και εξέρχεται από αυτή «πλούσιο» σε CO₂ (rich MEA). Μάλιστα, επειδή το κύκλωμα του ρεύματος απορρόφησης θεωρείται κλειστό, προκύπτει η ανάγκη αναγέννησης του πλούσιου σε CO₂ MEA, δηλαδή απομάκρυνσης του περιεχόμενου CO₂. Η διεργασία αυτή εξυπηρετείται από τη λειτουργία μιας στήλης απογύμνωσης με ατμό. Το ρεύμα MEA που περιέχει CO₂ εισέρχεται στη στήλη απογύμνωσης, όπου τροφοδοτείται συνεχώς ατμός προς απομάκρυνση του διαλυμένου CO₂. Με αυτό τον τρόπο εξέρχεται της στήλης MEA που φέρει μόλις ίχνη CO₂. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η βασική διάταξη της διεργασίας.²⁵



Εικόνα 4. Τυπικό διάγραμμα διεργασίας απορρόφησης και διαχωρισμού CO₂ με ρεύμα MEA²⁵

Σημειώνεται πως μέρος του ρεύματος MEA υφίσταται χημική υποβάθμιση ή συμπαρασύρεται με κάποιο ρεύμα εξόδου αερίων. Για το λόγο αυτό, η βασική διεργασία περιλαμβάνει ένα ακόμη ρεύμα αναπλήρωσης (“make-up stream”) MEA, που συνήθως προστίθεται στο ρεύμα ανακύκλωσης MEA, πριν εισέλθει στη στήλη απορρόφησης.^{14,25}

2.6.4 Απομάκρυνση CO₂ – Ανάπτυξη προσομοίωσης

Το συγκεκριμένο στάδιο μοντελοποιήθηκε σε διαφορετικό λογισμικό (Aspen Adsorption©), καθώς επιλέχθηκε η μέθοδος PSA, που αποτελεί μια διεργασία σε μη-μόνιμη κατάσταση (non-steady state).

Η απομάκρυνση επιτεύχθη με προσρόφηση του αερίου CO₂ σε στήλες προσρόφησης – μονάδα PSA. Η προσρόφηση του αερίου επιτεύχθη με τροφοδοσία του αερίου μίγματος σε στήλη με προσροφητικό υλικό που λειτουργούσε σε πίεση 28 bar και θερμοκρασία 28 °C. Προκειμένου να τροφοδοτηθεί το αέριο μίγμα σε κατάλληλη θερμοκρασία και σύσταση προηγήθηκε ψύξη του με χρήση αερόψυκτου (E-203) και απομάκρυνση του υδατικού περιεχομένου σε δοχείο διαχωρισμού (C-202).

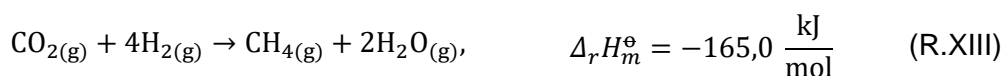
Το σύστημα στηλών προσρόφησης αποτελούνταν από τέσσερις (4) στήλες, κατά τη συνήθη βιομηχανική πρακτική. Οι στήλες δέχθηκαν το μίγμα αερίων και προσρόφησαν και εκρόφησαν αέρια κυκλικά σε μια επαναλαμβανόμενη αλληλουχία. Κάθε στήλη έφερε τρία στρώματα

πληρωτικού υλικού που αποτελούνταν από αλούμινα, ενεργό άνθρακα και μοριακά κόσκινα (ζεόλιθους). Σημειώνεται πως η ολοκληρωμένη προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για μία (1) μόλις στήλη με χαρακτηριστικά όμοια με εκείνα των υπόλοιπων. Αξιοποιώντας κινητικά δεδομένα για κάθε επιμέρους στάδιο και γενικεύσεις που συνάδουν με τη βιομηχανική εφαρμογή έγινε εκτίμηση των απαιτήσεων για την επιθυμητή λειτουργία της συνολικής μονάδας. Η λογική σχεδιασμού περιελάμβανε τον υπολογισμό του μέγιστου χρόνου φόρτισης (χρόνος προσρόφησης) μίας (1) στήλης έως την υποβάθμιση του αερίου στην έξοδο – αδυναμία προσρόφησης CO₂ λόγω κορεσμού πληρωτικού υλικού – και υπόθεση πως τα στάδια εξισορρόπησης πίεσης και καθαρισμού (purging) ισοδυναμούν, αθροιστικά, με τον τριπλάσιο χρόνο από αυτόν που απαιτείται για προσρόφηση. Ο συνολικός χρόνος των σταδίων καθόρισε τη διάρκεια ενός κύκλου.

2.7 Μετατροπή υπολείμματος CO και CO₂

2.7.1 Μετατροπή υπολείμματος CO και CO₂ – Περιγραφή διεργασίας

Το μίγμα αερίου πριν οδηγηθεί προς σύνθεση αμμωνίας τροφοδοτείται σε αντιδραστήρα, ώστε να αντιδράσουν ποσότητες CO και CO₂ που δε διαχωρίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Η διεργασία αποκαλείται Μεθανοποίηση (Methanation) λαμβάνει χώρα σε αντιδραστήρα στερεάς καταλυτικής κλίνης Ni, θερμοκρασία 400 °C – 600 °C και πίεση έως 30 bar. Οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται παρουσιάζονται παρακάτω:^{11,13}



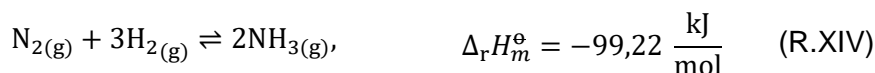
2.7.2 Μετατροπή υπολείμματος CO και CO₂ – Ανάπτυξη προσομοίωσης

Το εξερχόμενο ρεύμα από τη μονάδα PSA οδηγήθηκε στον αντιδραστήρα μεθανοποίησης (R-203) για τη μετατροπή αερίων CO και CO₂ που πιθανά να μη δεσμεύτηκαν στον προηγούμενο στάδιο. Η αντίδραση έλαβε χώρα σε θερμοκρασία 280 °C και πίεση 28 bar. Προκειμένου να καλυφθεί η απαίτηση για υψηλή θερμοκρασία, το αέριο μίγμα προθερμάνθηκε σε εναλλάκτη (E-204) πριν οδηγηθεί στον αντιδραστήρα.

2.8 Κύκλος σύνθεσης NH₃

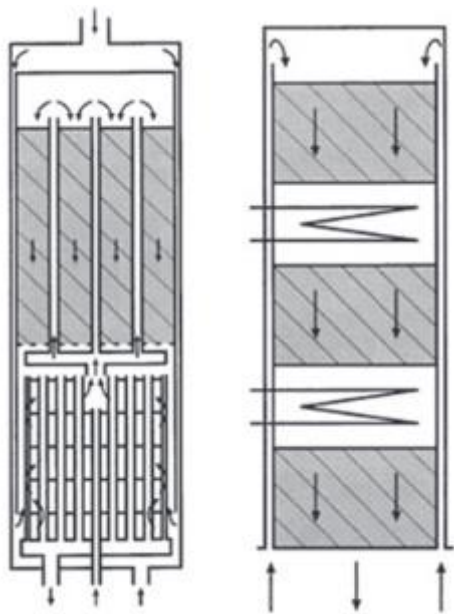
2.8.1 Κύκλος σύνθεσης NH₃ – Περιγραφή διεργασίας

Η σύνθεση της αμμωνίας (NH₃) πραγματοποιείται σύμφωνα με την ευρέως χρησιμοποιούμενη διεργασία Haber – Bosch. Η χημική εξίσωση που περιγράφει τη σύνθεση NH₃ από H₂ και N₂ παρουσιάζεται παρακάτω:^{9,11,13}



Πρόκειται για μια εξώθερμη αντίδραση ισορροπίας η διεξαγωγή της οποίας, μάλιστα, περιορίζεται σημαντικά από τις κινητικές και τα μεγέθη ισορροπίας. Δηλαδή, παρόλο που σε υψηλή θερμοκρασία ο ρυθμός της αντίδρασης αυξάνεται, ο σχηματισμός αμμωνίας ευνοείται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις. Κατά συνέπεια σημαντικές ποσότητες αντιδρώντων, H₂ και N₂, διέρχονται από τον αντιδραστήρα χωρίς να αντιδρούν, οπότε το ρεύμα εξόδου του αντιδραστήρα σύνθεσης NH₃ θα πρέπει να ανατροφοδοτηθεί στο καταλυτικό σύστημα, ώστε να επιτευχθεί υψηλότερη μετατροπή. Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού εναλλαγής θερμότητας, διαχωρισμού ρευστών και οι ποσότητες που θα επανατροφοδοτηθούν αποτελούν βασικές παραμέτρους βελτιστοποίησης της συνολικής διεργασίας, με σκοπό την αύξηση της μετατροπής σε NH₃ χωρίς, ωστόσο, να αυξηθεί σημαντικά το ενεργειακό φορτίο που απαιτείται να προσδοθεί.

Τα βασικά στάδια της διεργασίας Haber – Bosch παρουσιάζονται στη συνέχεια. Αρχικά, το αντιδρών ρεύμα αερίων που περιέχει H_2 και N_2 και ίχνη Ar , τροφοδοτείται σε συμπιεστές, με σκοπό την αύξηση της πίεσης. Η αντίδραση σύνθεσης αμμωνίας, σε βιομηχανικό επίπεδο, λαμβάνει χώρα συνήθως σε πίεση 100 – 300 bar. Στη συνέχεια, αφού το αντιδρών ρευστό



Εικόνα 5. Τυπικές απεικονίσεις αντιδραστήρα σύνθεσης αμμωνίας

προθερμανθεί τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα σύνθεσης NH_3 . Ο συγκεκριμένος αντιδραστήρας δεν είναι τετριμμένος, ενώ κυριαρχούν δύο (2) χαρακτηριστικές διαμορφώσεις. Κοινό χαρακτηριστικό και των δύο είναι η ψύξη του αντιδρώντος ρευστού, καθώς εκλύεται θερμότητα κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, έτσι ώστε η θερμοκρασία να παραμείνει χαμηλή, ευνοώντας υψηλές μετατροπές. Στην πρώτη διαμόρφωση το αντιδρών ρευστό ψύχεται εσωτερικά, αξιοποιώντας ένα σύνθετο δίκτυο αυλών όπου ρέει ψυχρό ρευστό. Στη δεύτερη διαμόρφωση, μεταξύ κάθε κλίνης του καταλυτικού συστήματος και της επόμενης μεσολαβεί ένας χώρος ψύξης με παρουσία εναλλάκτη θερμότητας. Σημειώνεται πως σε κάθε διαμόρφωση το ψυχρό ρεύμα είναι στην πραγματικότητα μίγμα των αντιδρώντων που εξυπηρετεί την ψύξη του ρεύματος που αντιδρά και θερμαίνεται, πριν το πρώτο εισαχθεί προθερμασμένο στο καταλυτικό σύστημα. Η διαμόρφωση αυτή φέρει πολυπλοκότητα και η περαιτέρω περιγραφή της δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.^{8,11,13,26}

Το ρεύμα προϊόντων και περίσσειας αντιδρώντων οδηγούνται σε επόμενα στάδια της διεργασίας προς διαχωρισμό ψύξη και τελικά αποθήκευση NH_3 υψηλής καθαρότητας. Μέρος του ρεύματος θα επανατροφοδοτηθεί στα αρχικά στάδια της διεργασίας, ενώ ένα μικρό κλάσμα αερίου θα απορριφθεί. Σημειώνεται πως σε αυτό το σημείο και επειδή οι απαιτήσεις σε ψυκτικό φορτίο είναι υψηλές σημαντική συνεισφορά στο έργο της ψύξης εξυπηρετείται με χρήση υγρής αμμωνίας, ως ψυκτικό. Πρόκειται για ρεύμα αμμωνίας σε συνθήκες πίεσης μικρότερης των 10 bar, ως δευτερεύον κλειστό δίκτυο ψύξης. Από τις επιμέρους διεργασίες θα προκύψει το ρεύμα παραγόμενης αμμωνίας που θα οδηγηθεί προς αποθήκευση.^{8,11,13,26}

2.8.2 Κύκλος σύνθεσης NH₃ – Ανάπτυξη προσομοίωσης

Η διεργασία μετατροπής του CO συνοδεύεται από συνολική μετατροπή του CO σε ποσοστό 97%.

Το μίγμα αερίων που εξήλθε της διεργασίας μεθανοποίησης τροφοδοτήθηκε στη μονάδα παραγωγής αμμωνίας. Η κύρια αντίδραση για παραγωγή αμμωνίας πραγματοποιήθηκε σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση και για αυτό το λόγο απαιτούνταν συμπίεση και θέρμανση του αντιδρώντος μίγματος. Η συμπίεση πραγματοποιήθηκε πρωτογενώς με τη χρήση συμπιεστή (K-301) για την αύξηση της πίεσης στα 275 bar. Στη συνέχεια το αέριο οδηγήθηκε σε κόμβο ανάμιξης με άλλα ρεύματα ανακύκλωσης της διεργασίας. Ουσιαστικά πρόκειται για ρεύματα προϊόντος και αντιδρώντων που επανατροφοδοτούνταν στην είσοδο του κύκλου διεργασιών, προκειμένου να αυξηθεί η απόδοση της αντίδρασης. Το συνολικό μίγμα υλών οδηγήθηκε σε μια σειρά σταδίων προθέρμανσης και περαιτέρω συμπίεσης ώστε να τροφοδοτηθεί σε θερμοκρασία 190 °C και πίεση 292 bar στο στάδιο της αντίδρασης προς παραγωγή NH₃. Το στάδιο αυτό προσομοιώθηκε με τη χρήση τεσσάρων (4) αντιδραστήρων (R-301A/B/C/D) και τριών (3) εναλλακτών ψύξης (E-304A/B/C). Πρακτικά πρόκειται για περιγραφή ενός συστήματος που προσομοιάζει στη (β) διαμόρφωση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.8.1. Το ρεύμα εισόδου διαχωρίστηκε ώστε το 90% να ρέει διαμέσου των εναλλακτών ως ψυκτικό μέσο και να ενώνεται εκ νέου με την τροφοδοσία της συστοιχίας αντιδραστήρων. Η έξοδος αερίων κάθε αντιδραστήρα ψύχθηκε και τροφοδοτήθηκε στον επόμενο αντιδραστήρα. Τελικά, ελήφθη μίγμα προϊόντος σε θερμοκρασία 435 °C και πίεση 284 bar. Τα blocks που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αντιδραστήρες τύπου «REquil» αδιαβατικής λειτουργίας.

Τα επόμενα βήματα περιλάμβαναν μια σειρά από στάδια διαχωρισμού σε στήλες πίεσης και ψύξης, όπου χρησιμοποιήθηκε υγρή αμμωνία ως ψυκτικό μέσο. Ποσότητα του μίγματος αντιδρώντων και αμμωνίας απορρίφθηκαν – καύση στον πυρσό (flare). Πρόκειται για ποσότητες που δεν καθιστούσαν αποδοτική τη διεργασία με ανακύκλωσή τους ή επηρέαζαν την καθαρότητα του τελικού προϊόντος που οδηγήθηκε προς αποθήκευση. Η κατάσταση στην οποία παρελήφθη το προϊόν είναι υγρό σε θερμοκρασία 45 °C και πίεση 20 bar.

2.9 Κόστος κεφαλαίου επένδυσης

Η προσδιορισμός του κόστους κεφαλαίου που απαιτείται για μια επένδυση όπως η μελετώμενη περιλαμβάνει υπολογισμό για αξίες παραγωγικού εξοπλισμού (δοχεία, δεξαμενές, στήλες, αντιδραστήρες, αντλίες, σωληνώσεις κ.ά.), συστήματα υποδομών (διαμορφώσεις οικοπέδων, ηλεκτρισμός, ύδρευση, αποχέτευση), κτηριακά και κατασκευές (κτίρια, εγκαταστάσεις, φωτισμός κ.ά.), καθώς επίσης και δευτερεύοντος εξοπλισμού (εξοπλισμός γραφείων, ιδιόκτητα οχήματα κ.ά.). Κατά συνέπεια διακρίνονται τέσσερις (4) βασικές κατηγορίες κόστους κεφαλαίου ως εξής:²⁷

- Κόστος κύριου παραγωγικού εξοπλισμού (Inside Battery Limits cost – ISBL)
- Κόστος δευτερεύοντος εξοπλισμού και υποδομών (Outside Battery Limits cost – OSBL)
- Κόστος μελετών και σχεδιασμού
- Μη προβλεπόμενα έξοδα

Από τα διαθέσιμα βιβλιογραφικά στοιχεία είναι δυνατός ο αναλυτικός υπολογισμός του κόστους κύριου εξοπλισμού, άρα η εκτίμηση του κόστους ISBL. Ο προσδιορισμός των υπόλοιπων απαιτήσεων σε δαπάνες κεφαλαίου θα γίνει βάσει διαθέσιμων βιβλιογραφικών στοιχείων ή/και ως συνάρτηση του του κόστους ISBL.²⁷

Υπολογισμός κόστους ISBL

Για συνήθεις παραγωγικές διαδικασίες και κοινό βιομηχανικό εξοπλισμό υπάρχουν διαθέσιμα τόσο τα εργαλεία, όσο και οι μεθοδολογίες για τον υπολογισμό του εκτιμώμενου κόστους εξοπλισμού, που στηρίζονται σε δεδομένα μελετών πραγματικών εγκαταστάσεων. Οι βασικές παράμετροι που τελικά διαμορφώνουν το κόστος του παραγωγικού εξοπλισμού συνοψίζονται παρακάτω:²⁷

- Είδος εξοπλισμού
- Βασικό υλικό κατασκευής
- Παραγωγική δυναμικότητα
- Προέλευση κατασκευής
- Τοποθεσία εγκατάστασης
- Χρονική περίοδος

Όλα τα παραπάνω μεγέθη επηρεάζουν άμεσα το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης του εξοπλισμού, ενώ οι μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί επιτρέπουν τον υπολογισμό κόστους, αξιοποιώντας αριθμητικούς συντελεστές.²⁷

Κόστος αγοράς εξοπλισμού

Προκειμένου να υπολογιστεί το εκτιμώμενο κόστος ISBL είναι απαραίτητο αρχικά να υπολογιστεί το εκτιμώμενο κόστος αγοράς εξοπλισμού. Το βήμα αυτό αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό του κόστους εγκατεστημένου εξοπλισμού που πρακτικά ταυτίζεται με το κόστος ISBL. Μια απλή και ευρέως διαδεδομένη συνάρτηση υπολογισμού του κόστους αγοράς εξοπλισμού για διαφορετικά είδη εξοπλισμού είναι η παρακάτω:²⁷

$$C_e = a + bS^n \quad (E.1)$$

όπου C_e : το κόστος αγοράς εξοπλισμού

S : παράμετρος μεγέθους του εξοπλισμού

a, b, n : σταθερές χαρακτηριστικές του είδους εξοπλισμού

Ανάλογα με το είδος του εξοπλισμού η μεταβλητή S μπορεί να λαμβάνει διάφορες τιμές που να αφορούν ισχύ λειτουργίας, όγκο εξοπλισμού, μάζα εξοπλισμού διαχειριζόμενο φορτίο ρευστού ή άλλα χαρακτηριστικά. Ανάλογα οι σταθερές a και b , χαρακτηριστικές για κάθε είδος εξοπλισμού, λαμβάνουν θετικές ή αρνητικές τιμές, ενώ ο εκθέτης n λαμβάνει τιμές από 0 έως 1,0.²⁷

2.9.1 Κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού

Εφόσον είναι γνωστό το κόστος παραγόμενου εξοπλισμού είναι δυνατό να υπολογιστεί το επιπλέον κόστος που αφορά την τοποθέτηση και προετοιμασία του εξοπλισμού, ώστε να είναι κατάλληλος προς θέση σε λειτουργία. Τα στάδια που σχετίζονται με την εγκατάσταση του εξοπλισμού και συνοδεύονται με αύξηση του κόστους περιλαμβάνουν την ανέγερσή του, την κατασκευή σωληνώσεων, την τοποθέτηση οργάνων και συστημάτων ελέγχου την ηλεκτρολογική σύνδεση του εξοπλισμού τη βαφή και μόνωσή του ή άλλες ειδικές απαιτήσεις. Ανάλογα με το είδος της εκάστοτε διεργασίας και ειδικότερα από το είδος του μέσου της διεργασίας (ρευστό, στερεό ή μίγμα ρευστού-στερεού) έχουν προταθεί διαφορετικοί σταθεροί παράγοντες για κάθε

συνιστώσα κόστους (αναλυτική μέθοδος Guthrie). Το συνολικό κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:²⁷

$$C = \sum_{i=1}^{i=M} C_{e,i,CS} [(1 + f_p)f_m + f_{er} + f_{el} + f_i + f_c + f_s + f_l] \quad (E.II)$$

όπου C: συνολικό κόστος εγκατεστημένου εξοπλισμού

$C_{e,i,CS}$: κόστος αγοράς εξοπλισμού i κατασκευασμένου από ανοξείδωτο χάλυβα

M : πλήθος μονάδων εξοπλισμού

f_p : παράγοντας κόστους για κατασκευή και εγκατάσταση σωληνώσεων

f_m : παράγοντας κόστους για κατασκευή εξοπλισμού από εξωτικό υλικό

f_{er} : παράγοντας κόστους για ανέγερση εξοπλισμού

f_{el} : παράγοντας κόστους για ηλεκτρολογική σύνδεση εξοπλισμού

f_i : παράγοντας κόστους για τοποθέτηση οργάνων και συστημάτων ελέγχου

f_c : παράγοντας κόστους για έργα έδρασης και στέγασης εξοπλισμού

f_s : παράγοντας κόστους για δικτυώματα, κατασκευές και κτηριακά

f_l : παράγοντας κόστους για μόνωση και βαφή εξοπλισμού

Ενδεικτικές τιμές για κάθε παράγοντα της εξίσωσης E.II παρουσιάζονται στον Πίνακα 21 του παραρτήματος I.III.²⁷

Ειδικότερα, αναφέρεται πως ο υπολογισμός του παράγοντας κόστους f_m που αφορά σε κατασκευή εξοπλισμού από κάποιο εξωτικό υλικό (διαφορετικό από ανθρακούχο χάλυβα – carbon steel), κατά κανόνα, υψηλότερου κόστους από ανθρακούχο χάλυβα υπολογίζεται ως εξής:

²⁷

$$f_m = \frac{\text{κόστος μονάδας από εξωτικό υλικό}}{\text{κόστος μονάδας από ανθρακούχο χάλυβα}} \quad (E.III)$$

Ενδεικτικές τιμές για κόστος μονάδας από εξωτικό υλικό της εξίσωσης E.III παρουσιάζονται στον Πίνακα 20 του παραρτήματος I.III.²⁷

Από την προσομοίωση της παραγωγικής διαδικασίας που αναπτύχθηκε και τον τύπο διεργασιών και εξοπλισμού που επιλέχθηκαν δύναται η διαστασιολόγηση του βασικού, απαιτούμενου παραγωγικού εξοπλισμού. Ως διαστασιολόγηση, λογίζεται ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών, S , του εξοπλισμού, που μπορούν να αξιοποιηθούν για τον υπολογισμό του κόστους αγοράς C_e , καθενός.²⁷

2.9.2 Δευτερεύον κόστος εξοπλισμού

Το κόστος OSBL περιλαμβάνει έργα υποδομής και ανάπτυξης μιας υφιστάμενης εγκατάστασης. Αφορά δηλαδή εγκαταστάσεις ηλεκτρικών υποσταθμών, συστήματα διαχείρισης βοηθητικών υλών (π.χ, πύργοι ψύξης, ατμολέβητες, δίκτυα αέρα οργάνων), συστήματα πυρασφάλειας, δεξαμενές αποθήκευσης, αποθήκες, μηχανοστάσια, αναλυτικά εργαστήρια κ.ά.²⁷

Ο υπολογισμός της σχετικής δαπάνης προσδιορίζεται συνήθως ως ποσοστό του κόστους ISBL, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ισούται ακόμη με το συνολικό κόστος του κύριου εξοπλισμού. Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη ή μη υφιστάμενης εγκατάστασης ή έργων υποδομών στην περιοχή ενδιαφέροντος, αλλά και τον αντίκτυπο στις τοπικές κοινωνίες (καταναλώσεις ύδατος – ηλεκτρικού). Τυπικά επιλέγεται περί το 40% για εγκαταστάσεις όπου δεν υπάρχει επαρκής πληροφόρηση.²⁷

Το κόστος μελέτης και σχεδιασμού περιλαμβάνει τις δαπάνες που αφορούν την προμήθεια της τεχνολογίας και τη διαμόρφωση της παραγωγικής διαδικασίας. Οι διαδικασίες προμήθειας εξοπλισμού, καθώς επίσης και η ανάθεση επίβλεψης και αδειοδότησης των κατασκευών εντάσσονται στην παρούσα κατηγορία. Συνηθίζεται να εκτιμάται ως το 30% του ISBL + OSBL για έργα μικρής κλίμακας και 10% του ISBL + OSBL για έργα μεγάλης κλίμακας.²⁷

Οι έκτακτες χρεώσεις μπορεί να οφείλονται σε αλλαγές του σχεδιασμού στη φάση εκτέλεσης ενός έργου, ανατιμήσεις υλικών και εξοπλισμού ή άλλες καταστάσεις που επηρεάζουν με κάποιο τρόπο την αναμενόμενη εξέλιξη του έργου. Η εκτίμηση της συγκεκριμένης δαπάνης περί το 10% του ISBL + OSBL θεωρείται ασφαλής, εκτός αν η εφαρμοσμένη τεχνολογία δεν έχει δοκιμαστεί επαρκώς, οπότε αναμένονται αυξημένες έκτακτες δαπάνες.²⁷

2.9.3 Υπολογισμός κεφαλαίου εξοπλισμού

Εφόσον υπολογιστούν ή προσδιοριστούν οι επιμέρους συνιστώσες που διαμορφώνουν το απαιτούμενο κεφάλαιο για την αγορά και εγκατάσταση του παραγωγικού εξοπλισμού, είναι δυνατό να εκτιμηθεί το συνολικό απαιτούμενο κεφάλαιο. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό του εγκατεστημένου κόστους εξοπλισμού μπορεί να επεκταθεί προκειμένου να περιλαμβάνει και το κόστος OSBL, μελέτης και σχεδιασμού, καθώς και μη προϋπολογισμένα ή έκτακτα κόστη. Η διευρυμένη σχέση που μπορεί να αξιοποιηθεί για τον υπολογισμό του εκτιμώμενου κεφαλαίου της επένδυσης είναι η ακόλουθη:²⁷

$$CapEx = C(1 + OS)(1 + DE + X) \quad (E.IV)$$

όπου OS: παράγοντας κόστους OSBL

DE: παράγοντας κόστους μελέτης και σχεδιασμού

X: παράγοντας έκτακτου κόστους

2.10 Λειτουργικό κόστους επένδυσης

2.10.1 Περιγραφή λειτουργικού κόστους

Το λειτουργικό κόστος διακρίνεται σε σταθερό (Fixed Cost – FC) και μεταβλητό (Variable Cost – VC). Ως σταθερό λογίζεται εκείνο που δε μεταβάλλεται συναρτήσει του ύψους παραγωγής και μπορεί να σχετίζεται με τις αμοιβές προσωπικού, τα έξοδα κτηριακών εγκαταστάσεων και χρήσης γης, τα έξοδα χρήσης αδειών, αλλά και το κόστος πωλήσεων. Το μεταβλητό, δε, κόστος εξαρτάται άμεσα από το ύψος παραγωγής, υπό την έννοια της κατανάλωσης ενέργειας (ηλεκτρισμού, καυσίμων), α' υλών και βοηθητικών υλών, τα έξοδα διανομής υλικών και διάθεσης αποβλήτων.²⁷

2.10.2 Υπολογισμός σταθερού λειτουργικού κόστους

Το σταθερό λειτουργικό κόστος αποτελείται από διάφορες συνιστώσες κάθε μία από τις οποίες μπορεί να εκτιμηθεί διακριτά, συνήθως ως ποσοστό των ISBL και OSBL. Οι βασικές παραδοχές που πραγματοποιούνται για τον υπολογισμό του σταθερού λειτουργικού κόστους παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.²⁷

Πίνακας 7. Παραδοχές για τον υπολογισμό βασικών παραμέτρων σταθερού κόστους

		Συνάρτηση υπολογισμού κόστους	
Κόστος εργασίας,	C_{op}	8.400 χιλ. €	
Κόστος εποπτείας,	C_s	$25\% \cdot C_{op}$	(E.V)
Κόστος υπερωρίας,	C_{ot}	$50\% \cdot (C_{op} + C_s)$	(E.VI)
Κόστος συντήρησης,	C_m	$5\% \cdot ISBL$	(E.VII)
Κόστος φόρων και ασφάλισης περιουσίας,	C_{ti}	$2\% \cdot ISBL$	(E.VIII)
Κόστος ενοικίασης γης,	C_r	$2\% \cdot (ISBL + OSBL)$	(E.IX)
Γενικά έξοδα εγκαταστάσεων,	C_g	$65\% \cdot (C_{op} + C_s + C_{ot} + C_m)$	(E.X)

2.10.3 Υπολογισμός μεταβλητού λειτουργικό κόστους

Το μεταβλητό κόστος παραγωγής μπορεί να υπολογιστεί εφόσον είναι γνωστές οι αξίες των απαιτούμενων υλών και ενέργειας, καθώς και το πως μεταβάλλονται οι απαιτήσεις χρήσης αυτών σε σχέση με το ύψος παραγωγής. Οι βασικές παράμετροι που διαμορφώνουν το μεταβλητό κόστος παραγωγής αφορούν τη χρήση α' υλών, βοηθητικών υλών, καθώς και ενεργειακών πόρων. Στη μελετώμενη εγκατάσταση τα παραπάνω κατανέμονται ως εξής:

Πίνακας 8. Βασική κατανομή υλών παραγωγικής εγκατάστασης

A' ύλες	B' ύλες	Ενέργεια
Φυσικό Αέριο	Ατμός	Φυσικό Αέριο
Ατμός	Νερό ψύξης	Ηλεκτρισμός
Αέρας	Άζωτο	Καύσιμο H/Z
	Αέρας οργάνων	
	Χημικά / Πρόσθετα	

Από τα παραπάνω, σημαντικές A' ύλες, ως προς την κοστολόγηση, αποτελούν το Φυσικό Αέριο και ο Ατμός. Ο Αέρας είναι διαθέσιμος στο περιβάλλον. Ως προς τις B' ύλες, ο Ατμός, το Νερό Ψύξης και το Άζωτο σημειώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Παρόλα αυτά, το κόστος Αζώτου αφενός εκτιμάται αμελητέο, συγκριτικά με τα υπόλοιπα μεγέθη, αφετέρου η απαιτούμενη

ποσότητά του είναι δύσκολο να προσδιορισθεί. Το κόστος προμήθειας δευτερευόντων β' υλών θεωρείται συγκριτικά αμελητέο. Τέλος, ως προς την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, θα γίνει εκτεταμένη ανάλυση ως προς το κόστος που σχετίζεται με το Φυσικό Αέριο και τον Ηλεκτρισμό. Το καύσιμο H/Z – συνήθως πετρέλαιο (diesel) – καταναλώνεται για την κάλυψη αναγκών σε ηλεκτρισμό, εφόσον υπάρξει κάποια αστάθεια στο βασικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Το σενάριο εκτεταμένης χρήσης τους θεωρείται απίθανο, κατά συνέπεια δεν μπορεί να γίνει κάποια ασφαλής εκτίμηση ως προς την ετήσια κατανάλωση του συγκεκριμένου πόρου.

Οι αξίες προμήθειας Φ.Α., ηλεκτρισμού και νερού δικτύου, λαμβάνονται από δεδομένα της ελληνικής βιομηχανίας, όπως ισχύουν για το τρέχον διάστημα της μελέτης (Q3 2023). Τα δεδομένα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 9 που ακολουθεί:

Πίνακας 9. Τυπικές αξίες προμήθειας υλών και ενεργειακών πόρων (μέση αξία Q3 2023)

	Αξία Προμήθειας
Φυσικό Αέριο	35 €/MWh
Ηλεκτρισμός	120 €/MWh
Νερό δικτύου	1,7 €/m ³

Η βάση για τους υπολογισμούς σε ετήσιες καταναλώσεις και παραγωγές στηρίζεται σε παραδοχή για λειτουργία 300 ημερών ετησίως ήτοι 7.920 ώρες. Οι υπόλοιπες ημέρες του έτους θεωρούνται ημέρες προγραμματισμένης συντήρησης και παύσης λειτουργίας λόγω βλαβών.

2.11 Κόστος δικαιωμάτων εκπομπής CO₂

Στην προσπάθεια δραστικής μείωσης των αέριων βλαβερών εκπομπών αναπτύχθηκε η έννοια της φορολόγησης των GHGs μέσω ενός συστήματος αγοράς «δικαιωμάτων» εκπομπής CO₂. Σε αυτό το σύστημα, το οποίο έχει χαρακτηριστικά χρηματιστηρίου, οι μεγάλοι καταναλωτές ενέργειας μπορούν να αγοράσουν δικαιώματα εκπομπών CO₂ σύμφωνα με την εκάστοτε ισχύουσα χρηματιστηριακή αξία (€/t_{CO2}). Στην ΕΕ το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών – ΣΕΔΕ (European Union Emissions Trading System – EU ETS) εξυπηρετεί, ακριβώς, αυτό το σκοπό. Μέσω του EU ETS και των οργανισμών που συμμετέχουν σε αυτό διαμορφώνεται η εκάστοτε χρηματιστηριακή αξία δικαιώματα εκπομπών CO₂, σύμφωνα με την οποία μια εταιρεία ζημιώνεται ανάλογα με το ύψος εκπομπών CO_{2,eq} που καταγράφει. Η έννοια του CO_{2,eq}

χρησιμοποιήθηκε, προκειμένου να υπάρχει ένα κοινό μέτρο, ως προς τον προσδιορισμό των εκπομπών και στηρίζεται στην αποτύπωση ενός τύπου GHG ως ισοδύναμης ποσότητας CO₂. Η μετατροπή αυτή στηρίζεται, κατ' αναλογία στην επίδραση που θα είχε το εκάστοτε GHG στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος, σε σχέση με το CO₂. Για τη διευκόλυνση του υπολογισμού της ποσότητας εκπομπών CO_{2,eq} που οφείλεται σε διάφορες βιομηχανικές δραστηριότητες έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες, αλλά και βάσεις δεδομένων με τυπικές τιμές περιεχόμενου CO_{2,eq} για κοινά καύσιμα και ενεργειακές ύλες. Οι ποσότητες αυτές διατυπώνονται συνήθως με τη μορφή t_{CO2} ανά ποσότητα μάζας καυσίμου ή ανά ποσότητα ενεργειακού περιεχόμενου καυσίμου και αποκαλούνται συντελεστές εκπομπής (emission factors).¹²

Οι ποσότητες εκπομπών CO₂ που αφορούν τη συγκεκριμένη ανάλυση υπολογίζονται βάσει των δεδομένων συντελεστών εκπομπής, όπως αυτά έχουν παρουσιαστεί στην πρόσφατη αναφορά του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας της Ελλάδας, Σημειώνεται πως τα εν λόγω στοιχεία αφορούν εκπομπές, όπως αυτές έχουν προσδιοριστεί για τα δεδομένα του ενεργειακού μίγματος της χώρας έως το 2021.¹²

Δεδομένου πως οι σημαντικότερες πηγές έκλυσης CO₂ στη συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία αφορούν την κατανάλωση φυσικού αερίου και, θα ληφθούν υπόψη δεδομένα εκπομπών που αφορούν μόνο τις συγκεκριμένες πηγές. Οι συντελεστές εκπομπής που θα χρησιμοποιηθούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.¹²

Πίνακας 10. Συντελεστές εκπομπών CO_{2,eq} για την Ελλάδα (2023)

	Συντελεστής εκπομπής (MT CO_{2,eq}/TJ)
Φυσικό Αέριο	56
Ηλεκτρισμός	103

2.12 Αξιολόγηση επένδυσης

Η αξιολόγηση μιας επένδυσης αποσκοπεί στην εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας μιας επένδυσης που αναμένεται να έχει μεγάλη διάρκεια ωφέλιμης ζωής. Η αξιολόγηση στηρίζεται στον υπολογισμό χρηματοροών για την περίοδο (έτη) που μελετάται η συγκεκριμένη επένδυση, που συνδυάζουν δεδομένα παραγωγής, δεδομένα αγοράς, καθώς και σενάρια που αναμένεται

να επηρεάσουν την εξέλιξή τους. Ο χαρακτηρισμός της επένδυσης ως ωφέλιμης ή μη γίνεται με τη χρήση ποιοτικών δεικτών, στον υπολογισμό των οποίων έχει ληφθεί υπόψη η διαχρονική αξία του χρήματος (Time Value of Money). Η συνήθης διαδικασία απαιτεί τον υπολογισμό προεξοφλημένων χρηματοροών (discounted cash flows) ώστε να υπολογιστούν τελικά χαρακτηριστικοί δείκτες, όπως οι παρακάτω:^{28,29}

- Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV)
- Προεξοφλημένη περίοδος αποπληρωμής/επανείσπραξης (Discounted Payback Period – DPP)
- Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR)

Οι δείκτες που παρουσιάστηκαν δεν είναι οι μοναδικοί, ωστόσο στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας οι συγκεκριμένοι θεωρούνται επαρκείς για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, ως προς τη βιωσιμότητα της επένδυσης.

Χρηματοροές

Οι χρηματοροές αποτυπώνουν το ετήσιο ποσοτικό αποτέλεσμα που συνοδεύει τη ζωή μιας επένδυσης, σε οικονομικούς όρους, και διακρίνονται σε εισροές (+) ή εκροές (-). Υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τα έσοδα από τη δραστηριότητα και τα έξοδα που διακρίνονται σε λειτουργικά ή φόρους.²⁷⁻²⁹

Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV)

Το συγκεκριμένο μέγεθος έχει την έννοια της προεξόφλησης μιας σειράς χρηματοροών στην παρούσα τους αξία, Η εξίσωση υπολογισμού του δείκτη φέρει την παρακάτω διατύπωση:^{28,29}

$$NPV = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{(1+r)^i} - C \quad (E.XI)$$

όπου n : ο αριθμός των ετών που αφορούν την μελετώμενη περίοδο

P_i : η προεξοφλημένη χρηματοροή του έτους i

r : το επιτόκιο ανατοκισμού/προεξόφλησης

C : το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης

Η έννοια του συγκεκριμένου δείκτη, συνοψίζεται στη θέση πως όσο μεγαλύτερη αριθμητική τιμή σημειώνει, τόσο περισσότερο ευνοϊκή κρίνεται η επένδυση, Δηλαδή, προκύπτει το συμπέρασμα πως ο ρυθμός επανείσπραξης χρημάτων που έχουν διατεθεί για την κάλυψη του κεφαλαίου της επένδυσης είναι υψηλότερος από το ρυθμό ανατοκισμού που έχει επιλεγεί για το δεδομένο επενδυτικό σενάριο.^{28,29}

Η βασική πρόκληση που αφορά τον υπολογισμό του συγκεκριμένου δείκτη είναι η επιλογή του επιτοκίου ανατοκισμού, Δεδομένου πως το επιτόκιο που επιλέγεται παραμένει σταθερό η επιλογή μιας αντιπροσωπευτικής τιμής που θα προσεγγίζει τις μεταβολές των ετών που αφορά η ανάλυση είναι εξαιρετικά δύσκολη, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται σημαντικά ο υπολογισμός της εκτιμώμενης βιωσιμότητας της επένδυσης.^{28,29}

Προεξοφλημένη περίοδος αποπληρωμής/επανείσπραξης (DPP)

Η περίοδος αποπληρωμής/επανείσπραξης (Payback Period) αποτελεί τον χρόνο που απαιτείται έτσι ώστε οι χρηματοροές που προκύπτουν από μια επένδυση να καλύψουν το αρχικό κεφάλαιο που δαπανήθηκε. Έτσι λοιπόν, υπολογίζοντας τις ετήσιες χρηματοροές μπορεί να προσδιοριστεί η περίοδος όπου μηδενίζεται η διαφορά μεταξύ αθροιστικών χρηματοοών (+) και κεφαλαίου (-).

Για τον προσδιορισμό του συγκεκριμένου μεγέθους δε λαμβάνεται υπόψη η διαχρονική αξία του χρήματος, μέσω της εισαγωγής της έννοιας του επιτοκίου ανατοκισμού, στον υπολογισμό των χρηματοροών. Επομένως, μια βελτιωμένη παραλλαγή του υπολογισμού έγινε μέσω της προεξοφλημένης περιόδου αποπληρωμής (DPP). Σε αυτή την περίπτωση ο υπολογιζόμενος χρόνος είναι αυξημένος, ωστόσο γίνεται βάσει της εκτιμώμενης μεταβολής στην παρούσα αξία κάθε χρηματοροής. Μια προσεγγιστική διατύπωση της εξίσωσης που περιγράφει το δείκτη αποτυπώνεται παρακάτω:^{28,29}

$$\sum_{i=1}^{DPP} \frac{P_i}{(1+r)^i} - C = 0 \quad (E.XII)$$

Σημειώνεται πως η τιμή του δείκτη δεν είναι ακέραια, οπότε η παραπάνω σχέση δεν περιγράφει απόλυτα τον υπολογισμό του μεγέθους, αλλά προσεγγιστικά.

Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR)

Ο συγκεκριμένος δείκτης αποτυπώνει, πρακτικά, το ρυθμός με τον οποίο επιστρέφεται το αρχικό κεφάλαιο, στη ζωή της επένδυσης. Φυσικά, υπολογίζεται ως η τιμή για την οποία επιτυγχάνεται ο μηδενισμός της Καθαρής Παρούσας Αξίας ώστε να ισχύει η παρακάτω σχέση:^{28,29}

$$\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{(1 + IRR)^i} - C = 0 \quad (\text{E.XIII})$$

Η φυσική έννοια του δείκτη είναι ο ρυθμός με τον οποίο οι θετικές χρηματοροές (εισροές) εξισώνονται με τις αρνητικές χρηματοροές (εκροές), Εφόσον το συγκεκριμένο μέγεθος είναι υψηλότερο από το επιτόκιο ανατοκισμού που επιλέγεται, τότε ο επενδυτής εκτιμά πως ο ρυθμός εισροών ξεπερνά εκείνο των εκροών και η επένδυση παρουσιάζεται ελκυστική.^{28,29}

Το βασικό μειονέκτημα του δείκτη είναι η υπόθεση επανεπένδυσης των χρηματοροών με επιτόκιο ίσο του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης. Επίσης, ο υπολογισμός του δείκτη σε περιπτώσεις όπου προκύπτουν χρηματοροές με διαφορετικό πρόσημο μεταξύ των ετών της μελετώμενης περιόδου, δεν κρίνεται ορθός.^{28,29}

Ανάλυση περιβάλλοντος

Ως πρόσθετο εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού για την ανάλυση του εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος της μελετώμενης επιχείρησης θα χρησιμοποιηθεί η ανάλυση SWOT. Σκοπός της συγκεκριμένης ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός δυνατών (Strengths) και αδύναμων (Weaknesses) σημείων της επιχείρησης, αναζήτησης ευκαιριών (Opportunities) και αναγνώρισης απειλών (Threats) σε σχέση με το περιβάλλον δραστηριότητας. Η ανάδειξη των στοιχείων που μπορούν να επηρεάσουν θετικά ή αρνητικά την εν λόγω δραστηριότητα αποτελούν σημαντικό στοιχείο, έτσι ώστε να ληφθεί η απόφαση επένδυσης, αλλά και να αναπτυχθούν οι μηχανισμοί που θα ελαχιστοποιήσουν το ρίσκο.

2.13 Ανάλυση ευαισθησίας μελετώμενης επένδυσης

Η συγκεκριμένη επένδυση έχει χαρακτηριστικά μεγάλης επένδυσης και για αυτό το λόγο επιλέγεται η αξιολόγησή της σε περίοδο 20ετίας. Το επιτόκιο ανατοκισμού επιλέγεται ίσο με 15%, ενώ στο τέλος της περιόδου, θεωρείται πως η υπολειμματική αξία είναι μηδενική.

Το σενάριο περιλαμβάνει επίσης ορισμένες μεταβολές αξιών κόστους και οφέλους, προκειμένου να προσεγγιστούν αναμενόμενες τάσεις τη αγοράς υλών και ενέργειας. Στον Πίνακα 11 παρουσιάζονται οι παραδοχές που αφορούν τις εκτιμώμενες μεταβολές:

Πίνακας 11. Παραδοχές μεταβολής βασικών μεγεθών κόστους-οφέλους επένδυσης

Περιγραφή	Ποσοστιαία ετήσια μεταβολή
Κόστος εργασιών συντήρησης	+ 1%
Αξία δικαιωμάτων εκπομπής CO ₂	+ 2%
Αξία προμήθειας Φυσικού Αερίου	+ 1%
Αξία προμήθειας βοηθητικών υλών	+ 1%
Αξία πώλησης άνυδρης αμμωνίας	+ 3%

Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας, ώστε να διαπιστωθεί πως μεταβάλλεται η βιωσιμότητα της επένδυσης, σε βασικά μεγέθη, όπως σημειώνεται παρακάτω:

Πίνακας 12. Σενάρια ανάλυσης ευαισθησίας για την αξιολόγηση της επένδυσης

Περιγραφή	Ποσοστιαία μεταβολή αξίας	
	Σενάριο 1	Σενάριο 2
Κεφαλαιουχικές Δαπάνες	± 10%	± 20%
Αξία προμήθειας Φυσικού Αερίου	± 10%	± 20%
Αξία πώλησης άνυδρης αμμωνίας	± 10%	± 20%

2.14 Περιορισμός περιβαλλοντικού αποτυπώματος παραγωγικής μονάδας

Από την ανάλυση που έχει γίνει στις προηγούμενες προκύπτει το συμπέρασμα πως η συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία είναι ευρέως διαδεδομένη, αλλά ταυτόχρονα, υστερεί σημαντικά ως προς την απαίτηση για παραγωγή ενός προϊόντος που θα συνοδεύεται με μηδενικούς ρύπους. Η ανάγκη για ανάπτυξη διεργασιών ή τροποποίηση των υφιστάμενων, με

σκοπό την εξάλειψη των GHGs που εκλύονται στην ατμόσφαιρα, αποτελεί μια σημαντική πρόκληση για την οποία θα επιχειρηθεί να παρουσιαστούν ορισμένες προτάσεις.

- Αντικατάσταση αναμόρφωσης για παραγωγή H₂ με ηλεκτρόλυση

Αναμφίβολα η έρευνα και ανάπτυξη μονάδων για την παραγωγή υδρογόνου με τη χρήση ηλεκτρόλυσης αποτελεί την πιο διαδεδομένη τάση των τελευταίων ετών. Η συγκεκριμένη μέθοδος συγκεντρώνει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς αποτελεί μια «πράσινη» μέθοδο παραγωγής αμμωνίας. Οι ενώσεις άνθρακα, που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου απουσιάζουν πλήρως από τη συγκεκριμένη διεργασία. Η μέθοδος στηρίζεται σε ηλεκτρόλυση απιονισμένου νερού με σκοπό το διαχωρισμό μορίων H₂ και O₂. Στη διεργασία τροφοδοτείται ηλεκτρισμός, που εάν, μάλιστα, προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τότε γίνεται λόγος για παραγωγή «πράσινου υδρογόνου». Η εν λόγω διεργασία είναι πλήρως συμβατή με τις απαιτήσεις περί NetZero και εξάλειψη εκπομπών GHGs στις βιομηχανικές διεργασίες. Τα βασικά μειονεκτήματα που σημειώνονται είναι δύο:³⁻⁵

- Υψηλό κόστος παραγωγής (απαιτήσεις σε α' ύλες και ενέργεια) σε σύγκριση με την αναμόρφωση μεθανίου προς παραγωγή H₂
- Ανάγκη αντικατάστασης υφιστάμενων μονάδων παραγωγής H₂ με παραδοσιακές τεχνικές

Στη διεργασία ηλεκτρόλυσης ύδατος προς παραγωγή H₂ θεωρητικά απαιτείται η προσφορά ενέργειας ίσης με εκείνη που απαιτείται για το διαχωρισμό των μορίων που αποτελούν το H₂O. Η ενέργεια αυτή, συμβατικά, ισούται με την κατωτέρα θερμογόνο δύναμη (Lower Heating Value – LHV)¹ ίση με 33,3 kWh/kg_{H₂}. Ο διαχωρισμός ποσότητας 8,9 L απιονισμένου ύδατος με πρόσφορα του ποσού θερμότητας που σημειώθηκε θα οδηγήσει σε παραγωγή 1 kg H₂. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως οι αποδόσεις ως προς την αξιοποίηση ενέργειας σε συμβατικές μονάδες ηλεκτρόλυσης κυμαίνονται μεταξύ 52% και 82%. Κατά συνέπεια απαιτείται να προσφερθούν 40,6 kWh – 64,0 kWh για την παραγωγή 1 kg H₂. Στις αναλύσεις που ακολουθούν θα χρησιμοποιήθηκε το σενάριο που συνοδεύεται με την ελάχιστη δαπάνη ενέργειας.⁵

¹ Ακριβέστερα απαιτείται ενέργεια ίση με την κατωτέρα θερμογόνο δύναμη (Higher Heating Value – HHV), ίση με 39,4 kWh/kg_{H₂}

Για τον υπολογισμό του κόστους υλών και ενέργειας θα χρησιμοποιήθηκαν οι αξίες ηλεκτρικού και κατανάλωσης ύδατος του Πίνακα 9. Ελλείπει κάποιας εναλλακτικής πληροφορίας και δεδομένου πως σε περίπτωση χρήσης καθαρά ανανεώσιμης ενέργειας οι απαιτήσεις σε αποθήκευση αυτής δε δύναται να αγνοηθούν, δεδομένης της διαθέσιμης τεχνολογίας δεν επιτρέπεται η χρήση ενός μειωμένου LCOE (Levelized Cost Of Energy) που συνοδεύει κάποια ανανεώσιμη πηγή παραγωγής ηλεκτρισμού. Παρόλα αυτά και για συγκριτικούς λόγους, προσδιορίστηκε το εύρος τιμών LCOE για το οποίο η ηλεκτρόλυση θα εμφάνιζε παραπλήσιο κόστος παραγωγής με τη συμβατική μέθοδο.

Σημειώνεται πως το κόστος επεξεργασίας ύδατος προς παραγωγή απιονισμένου ύδατος είναι αμελητέο, όπως θα φανεί παρακάτω, ως προς την επίδραση του στο συνολικό κόστος ανά παραγόμενο kg H₂. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να αγνοηθεί στις περαιτέρω αναλύσεις.

3 Αποτελέσματα

3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης παραγωγικής διαδικασίας

Το πρώτο στάδιο της παραγωγικής διεργασίας είναι η αναμόρφωση του φυσικού αερίου, με ατμό, προς παραγωγή H_2 . Για τους λόγους τροφοδοσίας αντιδρώντων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.4 επιτυγχάνεται μετατροπή του CH_4 ίση με 94%, ενώ η συνολική απόδοση της διεργασίας ισούται με $\varepsilon = 67\%$. Η μετατροπή υπολογίζεται ως προς την ποσότητα CH_4 που αντέδρασε. Η συνολική θερμική ενέργεια που εκλύθηκε από την καύση υπολογίστηκε ίση με 58.660 kW. Οι απαιτήσεις σε θερμότητα για τη διεργασία της αναμόρφωσης υπολογίστηκαν ίσες με 30.800 kW, ενώ περίπου 17.400 kW καταναλώθηκαν για προθέρμανση ρευμάτων αντιδρώντων. Τα καυσαέρια από τους καυστήρες του θαλάμου εξήλθαν στους 1350 °C με κλάσμα O_2 , ίση με 1,5% v/v (περίσσεια οξυγόνου 8%). Σημειώνεται ακόμη πως για τη συμπίεση του ρεύματος αέρα υπολογίστηκε πως απαιτούνται 1.575 kW έργου.

Η συνολική μετατροπή του σταδίου μετατροπής CO που επετεύχθη ήταν 97%. Επιμέρους, στον 1^ο αντιδραστήρα επετεύχθη μετατροπή 77% ενώ στο 2^ο μετατροπή 80%. Η συνολική απαίτηση σε ψυκτικό φορτίο τόσο για την τροφοδοσία της διεργασίας, όσο και μεταξύ των αντιδραστήρων υπολογίστηκε ίση με 32.570 kW. Η ψύξη πραγματοποιήθηκε με χρήση νερού σε εναλλακτες κελύφους αυλών, ενώ η ποσότητα ψυκτικού που υπολογίστηκε ήταν 42.000 kg/h. Μέρος της συγκεκριμένης ποσότητα ύδατος που εξήλθε θερμή στους 240 °C χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του ατμού που καταναλώθηκε στην αναμόρφωση.

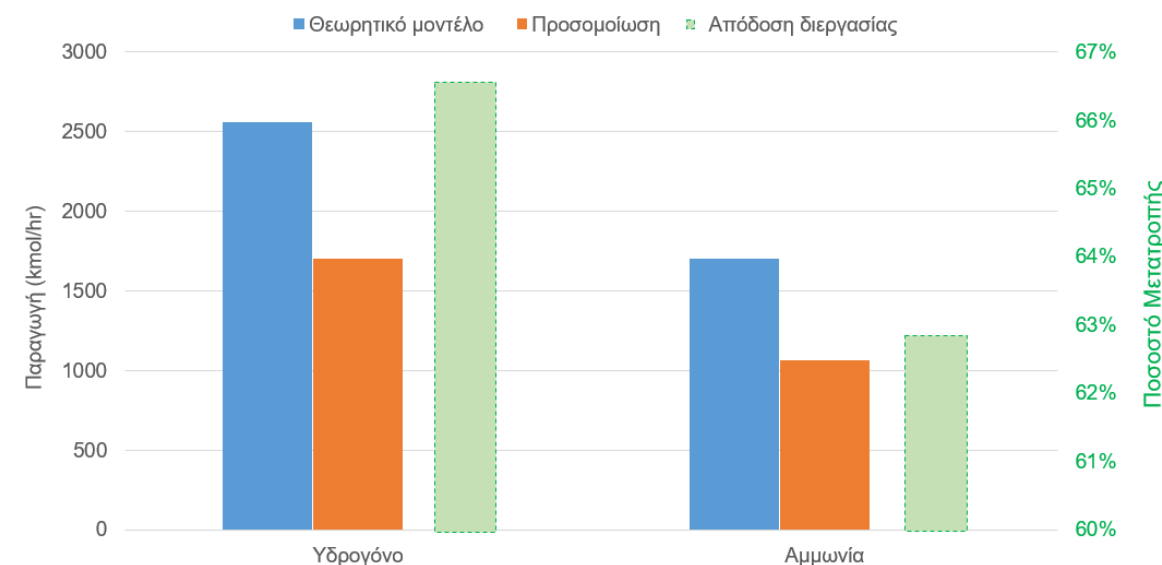
Για τη λειτουργία της μονάδας PSA επελέχθη ως προδιαγραφή η απομάκρυνση της ποσότητας CO_2 και ιχνών CO και CH_4 σε βαθμό μεγαλύτερο του 99%. Στην προσομοίωση μιας (1) στήλης με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που επιλέχθηκαν και δεδομένο φορτίο πληρωτικού υλικού ελήφθησαν οι καμπύλες προσρόφησης (breakthrough curves), όπου προέκυψε πως η φόρτιση κάθε στήλης θα πρέπει να γίνει για περίπου 100s. Κατά συνέπεια για τις παραδοχές που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.6.4 ο χρόνος του κύκλου υπολογίστηκε σε 400 s. Οι απαιτήσεις σε ψύξη του ρεύματος τροφοδοσίας της PSA ήταν 18.650 kW, ενώ από το ρεύμα εισόδου απομακρύνθηκαν 15.750 kg/hr νερού.

Το μίγμα αερίων που εξήλθε του αντιδραστήρα μεθανοποίησης θεωρήθηκε πως δεν περιέχει ποσότητες CO_2 και CO (πλήρεις αντιδράσεις). Το απαιτούμενο θερμικό φορτίο που υπολογίστηκε

πως απαιτείται στην εν λόγω διεργασία ήταν 5.560 kW και αφορούσε προθέρμανση του ρεύματος αντιδρώντων μέσω ανάκτησης καυσαερίων από τον H-101.

Η ποσότητα παραγόμενης αμμωνίας που παρήχθη τελικά ήταν 18.170 kg/hr, ενώ η μετατροπή που επιτεύχθηκε υπολογίστηκε ίση με 88,6%. Περίπου 2.800 kg/hr μίγματος αντιδρώντων και αμμωνίας απορρίφθηκαν – καύση στον πυρσό (flare). Η απαίτηση σε ενέργεια για τη συμπίεση του μίγματος αντιδρώντων στην τροφοδοσία υπολογίστηκε ίση με 7.810 kW, υπό μορφή έργου. Το απαιτούμενο εξωτερικό θερμαντικό φορτίο που απαιτήθηκε για την πραγματοποίηση των διεργασιών ήταν μηδενικό, ενώ το αντίστοιχο ψυκτικό φορτίο ίσο με 21.000 kW. Το 98% (20.680 kW) του ψυκτικού φορτίου προήλθε από νερό ψύξης, ενώ μόλις το 2% (330 kW) από ψυκτικό μέσο, αμμωνία.

Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών προέκυψε το συμπέρασμα πως η αποδοτικότητα της συνολικής διεργασίας ισούται με 63%. Δηλαδή, το φυσικό αέριο που τροφοδοτείται ως a' ύλη στη διεργασία μετατράπηκε κατά 63% σε NH_3 σε σχέση με την ποσότητα που θα μπορούσε θεωρητικά να οδηγήσει σε προϊόν. Σημειώνεται πως, από τα βιομηχανικά δεδομένα είναι γνωστό πως η αξιοποίηση ενέργειας τροφοδοσίας προς παραγωγή NH_3 επιτυγχάνεται σε ποσοστό 60% - 65%.²⁶ Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι σχετικοί υπολογισμοί.

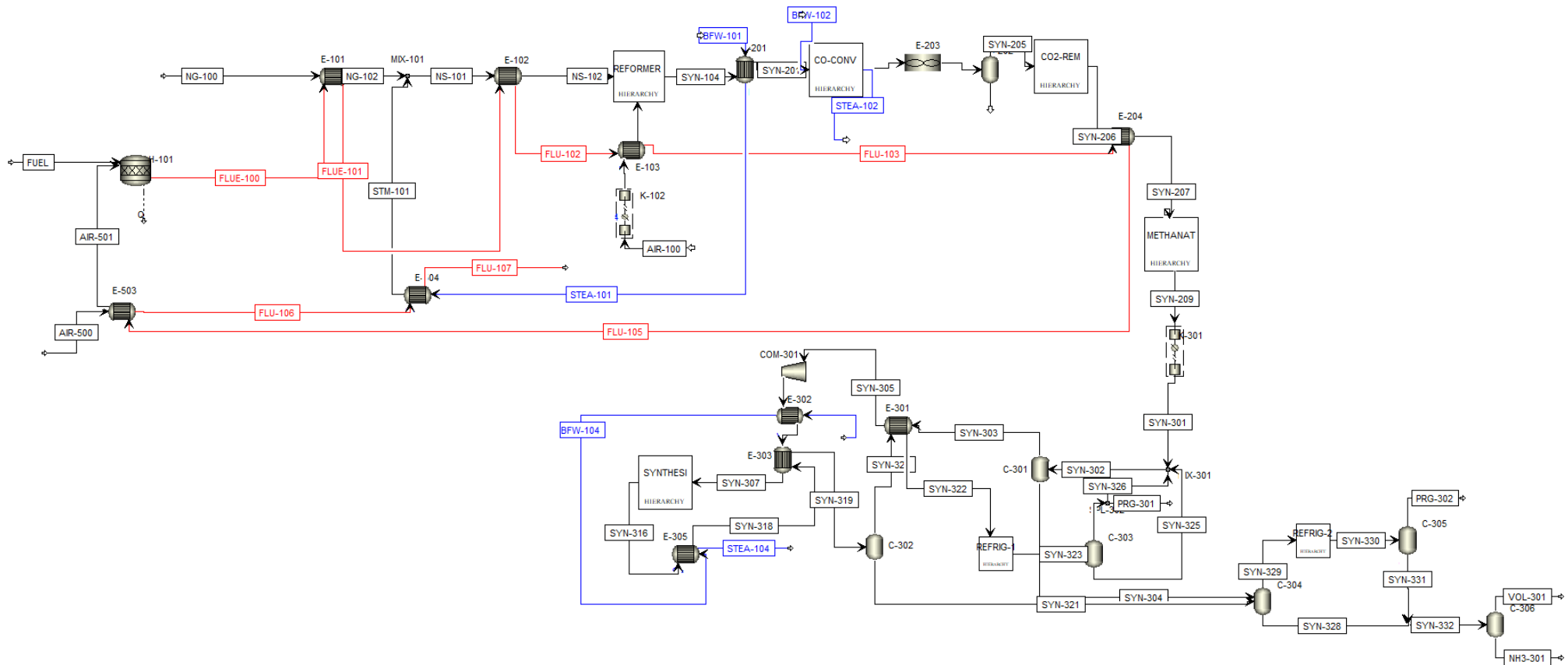


Εικόνα 6. Σύγκριση μεταξύ θεωρητικά υπολογιζόμενης και υπολογιζόμενης βάσει προσομοίωσης παραγόμενης ποσότητας ουσιών και απόδοσης διεργασιών

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας

Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η εικόνα της προσομοίωσης όπως αναπτύχθηκε στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus®. Επιμέρους διεργασίες περιγράφηκαν σε αναλυτικά blocks που συμβολίζονται με τετράγωνο σχήμα (π.χ. “REFORMER”). Το περιεχόμενό τους παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ι.Ι.



Εικόνα 7. Αποτύπωση προσομοίωσης παραγωγής NH₃ στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus®

3.2 Αποτελέσματα κόστους κεφαλαίου και λειτουργικού κόστους

Ο υπολογισμός του χαρακτηριστικού μεγέθους κοστολόγησης για κάθε εξοπλισμό που προσδιορίστηκε μέσω της εξίσωσης E.I, αλλά και του κόστους εγκατάστασης που υπολογίστηκαν μέσω της εφαρμογής των εξισώσεων E.II, παρουσιάζονται ανά εξοπλισμό, στον Πίνακα 13. Σημειώνεται πως τα χαρακτηριστικά κόστη που αφορούν πάχη τοιχώματος εξοπλισμού υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο Παράρτημα I.II.

Πίνακας 13. Λίστα παραγωγικού εξοπλισμού, στοιχεία και εκτιμώμενο κόστος εγκατάστασης

Ονομασία εξοπλισμού	Περιγραφή εξοπλισμού	Παραγωγική Μονάδα	Παράμετρος μεγέθους	Κόστος εγκατάστασης
H-101	Φούρνος καύσης Φ.Α. – αέρα	U-100	31 MW	17.413 χιλ. €
E-101	Εναλλάκτης προθέρμανσης αντιδρώντος Φ.Α.	U-100	3 m ²	37 χιλ. €
E-102	Εναλλάκτης προθέρμανσης αντιδρώντος μίγματος Φ.Α. – ατμού	U-100	7 m ²	35 χιλ. €
K-102	Συμπιεστής αέρα αναμόρφωσης	U-100	1574 kW	875 χιλ. €
E-103	Εναλλάκτης προθέρμανσης αέρα αναμόρφωσης	U-100	3 m ²	34 χιλ. €
R-101	Πρώιμος αντιδραστήρας αναμόρφωσης	U-100	5.698 kg	143 χιλ. €
R-102	Πρωτεύον αντιδραστήρας αναμόρφωσης	U-100	5.710 kg	143 χιλ. €
R-103	Αντιδραστήρας μετατροπής οξυγόνου	U-100	15.426 kg	261 χιλ. €
R-104	Δευτερεύον αντιδραστήρας αναμόρφωσης	U-100	14.695 kg	253 χιλ. €
E-201	Εναλλάκτης ψύξης αντιδρώντος μίγματος αερίων εισόδου HTS	U-200	73 m ²	59 χιλ. €
R-201	Αντιδραστήρας HTS	U-200	25.997 kg	357 χιλ. €

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας

E-202	Εναλλάκτης ψύξης αντιδρώντος μίγματος αερίων εισόδου LTS	U-200	131 m ²	78 χιλ. €
R-202	Αντιδραστήρας LTS	U-200	32.778 kg	387 χιλ. €
E-203	Αερόψυκτο μίγματος αερίων εισόδου PSA unit	U-200	406 m ²	165 χιλ. €
C-202	Δοχείο απομάκρυνσης υγρασίας μίγματος αερίων εισόδου PSA unit	U-200	1.593 kg	64 χιλ. €
E-204	Εναλλάκτης προθέρμανσης αντιδρώντος μίγματος αερίων μεθανοποίησης	U-200	7 m ²	38 χιλ. €
R-203	Αντιδραστήρας μεθανοποίησης	U-200	394 kg	28 χιλ. €
C-203	Στήλη διαχωρισμού προϊόντων μεθανοποίησης	U-200	1.180 kg	53 χιλ. €
K-301	Συμπιεστής αντιδρώντος μίγματος αερίων αμμωνιοπαραγωγής	U-300	7809 kW	2.243 χιλ. €
C-301	Στήλη διαχωρισμού υγρής – αέριας αμμωνία	U-300	8.083 kg	166 χιλ. €
E-301	Εναλλάκτης προθέρμανσης αντιδρώντος μίγματος αερίων	U-300	120 m ²	74 χιλ. €
COM-301	Συμπιεστής αντιδρώντος μίγματος αερίων αμμωνιοπαραγωγής	U-300	637 kW	567 χιλ. €
E-302	Εναλλάκτης προθέρμανσης αντιδρώντος μίγματος αερίων	U-300	237 m ²	111 χιλ. €
E-303	Εναλλάκτης προθέρμανσης αντιδρώντος μίγματος αερίων	U-300	768 m ²	256 χιλ. €
R-301A	Αντιδραστήρας αμμωνιοπαραγωγής	U-300	34.677 kg	425 χιλ. €

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας

R-301B	Αντιδραστήρας αμμωνιοπαραγωγής	U-300	39.268 kg	458 χιλ. €
R-301C	Αντιδραστήρας αμμωνιοπαραγωγής	U-300	58.136 kg	580 χιλ. €
R-301D	Αντιδραστήρας αμμωνιοπαραγωγής	U-300	252.675 kg	1.402 χιλ. €
E-304A	Εναλλάκτης ψύξης αντιδραστήρα αμμωνιοπαραγωγής	U-300	190 m ²	96 χιλ. €
E-304B	Εναλλάκτης ψύξης αντιδραστήρα αμμωνιοπαραγωγής	U-300	160 m ²	87 χιλ. €
E-304C	Εναλλάκτης ψύξης αντιδραστήρα αμμωνιοπαραγωγής	U-300	140 m ²	80 χιλ. €
E-305	Εναλλάκτης ψύξης παραγόμενης αμμωνίας	U-300	78 m ²	61 χιλ. €
C-302	Στήλη διαχωρισμού υγρής – αέριας αμμωνία	U-300	21.728 kg	302 χιλ. €
C-303	Στήλη διαχωρισμού υγρής – αέριας αμμωνίας	U-300	11.188 kg	203 χιλ. €
C-304	Στήλη διαχωρισμού υγρής – αέριας αμμωνίας	U-300	22.252 kg	307 χιλ. €
C-305	Στήλη ανάκτησης υγρής αμμωνίας	U-300	5.753 kg	136 χιλ. €
C-306	Στήλη διαχωρισμού προϊόντος (αμμωνίας) τελικού σταδίου	U-300	2.382 kg	79 χιλ. €
C-401A	Στήλη προσρόφησης αερίων	U-400	7.760 kg	162 χιλ. €
C-401B	Στήλη προσρόφησης αερίων	U-400	7.760 kg	162 χιλ. €
C-401C	Στήλη προσρόφησης αερίων	U-400	7.760 kg	162 χιλ. €
C-401D	Στήλη προσρόφησης αερίων	U-400	7.760 kg	162 χιλ. €
E-501	Εναλλάκτης ψύξης με αμμωνία	U-500	8 m ²	35 χιλ. €
E-502	Εναλλάκτης ψύξης με αμμωνία	U-500	1 m ²	33 χιλ. €
E-503	Εναλλάκτης προθέρμανσης αέρα καύσης H-101	U-500	13 m ²	37 χιλ. €
E-504	Εναλλάκτης ανάκτησης ενέργειας – παραγωγής ατμού	U-500	11 m ²	36 χιλ. €

Ακολούθως, με εφαρμογή των σχέσεων του Πίνακα 7 υπολογίστηκαν τα μεγέθη σταθερού λειτουργικού κόστους. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 14.

Πίνακας 14. Αξίες παραμέτρων σταθερού κόστους

	Κόστος (χιλ. €)
Κόστος εργασίας, C_{op}	8.400
Κόστος εποπτείας, C_s	2.100
Κόστος υπερωρίας, C_{ot}	4.200
Κόστος συντήρησης, C_m	105
Κόστος φόρων και ασφάλισης περιουσίας, C_{ti}	990
Κόστος ενοικίασης γης, C_r	1.385
Γενικά έξοδα εγκαταστάσεων, C_g	9.620
Σύνολο	26.800

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης λαμβάνονται οι τιμές ποσοτήτων που αφορούν τις απαιτήσεις σε καταναλώσεις βασικών α' υλών, β' υλών και ενέργειας ανά έτος:

Πίνακας 15. Κατανομές και κόστος προμήθειας και κατανάλωσης υλών και πόρων ετησίως

	Α' ύλες	Β' ύλες	Ενέργεια
Φυσικό Αέριο	1.266 GWh (44.300 χιλ.€)	-	612 GWh (21.450 χιλ.€)
Ατμός (Νερό)	-	253.500 m ³ (430 χιλ.€)	-
Νερό ψύξης	-	166.300 m ³ (280 χιλ.€)	-
Ηλεκτρισμός	-	-	38.000 MWh (4.560 χιλ.€)

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως ο απαιτούμενος ατμός της εγκατάστασης θα καλυφθεί μέσω των παραγωγικών διεργασιών, αξιοποιώντας το νερό ως πρώτη ύλη (κεφάλαιο 2.10.3). Κατά συνέπεια δεν απαιτείται να προσδιοριστεί τιμή κόστους για τον ατμό ως α' ύλη .

Από τα δεδομένα του Πίνακα 15, όπου καταγράφονται οι ποσότητες φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού που καταναλώνονται μπορούν να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ποσότητες εκπομπών CO_{2,eq} με εφαρμογή των αντίστοιχων συντελεστών εκπομπής, αλλά και το αντίστοιχο κόστος. Η εκτιμώμενη αξία παρουσιάζεται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16. Ποσότητα εκπομπών CO_{2,eq} και κόστος δικαιωμάτων εκπομπών

	CO _{2,eq} (tCO _{2,eq})	Κόστος (χιλ. €/tCO _{2,eq})
Φυσικό Αέριο (α' ύλη)	253.750	22.840
Φυσικό Αέριο (καύσιμο)	122.780	11.050
Ηλεκτρισμός	13.560	1.220
Σύνολο	390.090	35.110

Από τις ποσότητες που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα οι εκπομπές που οφείλονται στο φυσικό αέριο ως α' ύλη θεωρούνται αμελητέες, αφού σχεδόν ολόκληρη η ποσότητα δεσμεύεται στη μονάδα απομάκρυνσης CO₂. Κατά συνέπεια το κόστος που απορρέει από τη συγκεκριμένη ποσότητα θα θεωρηθεί μηδενικό. Έτσι, το πραγματικό συνολικό κόστος από τη φορολόγηση των εκπομπών εκτιμάται σε 12 εκ.€, περίπου.

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας

3.3 Αποτελέσματα ανάλυσης αξιολόγησης επένδυσης

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης κόστους, εσόδων και ταμειακών ροών για την περίοδο μελέτης της επένδυσης.

Πίνακας 17. Πίνακας ταμειακών ροών επένδυσης

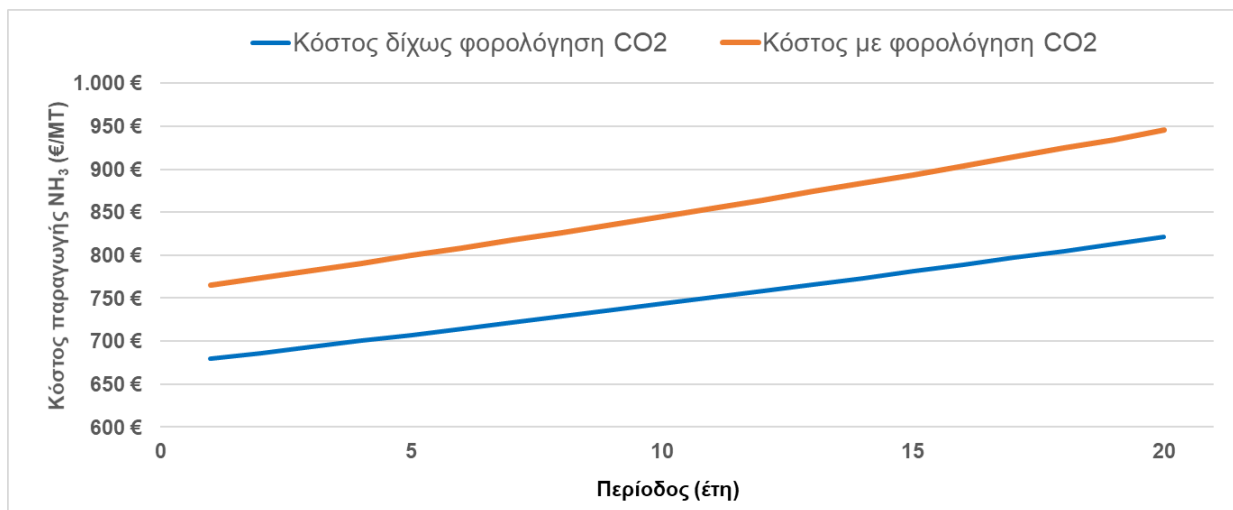
	E 0	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9	E 10	E 11	E 12	E 13	E 14	E 15	E 16	E 17	E 18	E 19	E 20
Πωλήσεις		139.590 €	143.780 €	148.090 €	152.530 €	157.110 €	161.820 €	166.680 €	171.680 €	176.830 €	182.130 €	187.600 €	193.220 €	199.020 €	204.990 €	211.140 €	217.480 €	224.000 €	230.720 €	237.640 €	244.770 €
Κόστος Κεφαλαίου	(93.500 €)																				
Μεταβλητό Λειτουργικό Κόστος		(70.990 €)	(71.700 €)	(72.410 €)	(73.140 €)	(73.870 €)	(74.610 €)	(75.350 €)	(76.110 €)	(76.870 €)	(77.640 €)	(78.410 €)	(79.200 €)	(79.990 €)	(80.790 €)	(81.600 €)	(82.410 €)	(83.240 €)	(84.070 €)	(84.910 €)	(85.760 €)
Σταθερό Λειτουργικό Κόστος		(26.800 €)	(27.070 €)	(27.340 €)	(27.610 €)	(27.890 €)	(28.170 €)	(28.450 €)	(28.740 €)	(29.020 €)	(29.310 €)	(29.610 €)	(29.900 €)	(30.200 €)	(30.500 €)	(30.810 €)	(31.120 €)	(31.430 €)	(31.740 €)	(32.060 €)	(32.380 €)
Λειτουργικό Κόστος		(97.790 €)	(98.770 €)	(99.760 €)	(100.750 €)	(101.760 €)	(102.780 €)	(103.810 €)	(104.840 €)	(105.890 €)	(106.950 €)	(108.020 €)	(109.100 €)	(110.190 €)	(111.290 €)	(112.410 €)	(113.530 €)	(114.670 €)	(115.810 €)	(116.970 €)	(118.140 €)
Κόστος δικαιωμάτων εκπομπών CO ₂		(12.270 €)	(12.520 €)	(12.770 €)	(13.020 €)	(13.280 €)	(13.550 €)	(13.820 €)	(14.100 €)	(14.380 €)	(14.660 €)	(14.960 €)	(15.260 €)	(15.560 €)	(15.870 €)	(16.190 €)	(16.520 €)	(16.850 €)	(17.180 €)	(17.530 €)	(17.880 €)
Έσοδα προ φόρων		29.530 €	32.490 €	35.570 €	38.760 €	42.070 €	45.500 €	49.050 €	52.740 €	56.560 €	60.520 €	64.620 €	68.870 €	73.270 €	77.820 €	82.540 €	87.430 €	92.490 €	97.720 €	103.140 €	108.750 €
Φόρος		(7.090 €)	(7.800 €)	(8.540 €)	(9.300 €)	(10.100 €)	(10.920 €)	(11.770 €)	(12.660 €)	(13.570 €)	(14.520 €)	(15.510 €)	(16.530 €)	(17.580 €)	(18.680 €)	(19.810 €)	(20.980 €)	(22.200 €)	(23.450 €)	(24.750 €)	(26.100 €)
Καθαρό Κέρδος		22.440 €	24.690 €	27.030 €	29.460 €	31.970 €	34.580 €	37.280 €	40.080 €	42.980 €	45.990 €	49.110 €	52.340 €	55.680 €	59.150 €	62.730 €	66.450 €	70.290 €	74.270 €	78.390 €	82.650 €

* Οι χρηματικές αξίες του παραπάνω πίνακα παριστάνονται σε χιλ. €.

Από τα αποτελέσματα υπολογισμού παραγωγικών και οικονομικών μεγεθών προκύπτει το συμπέρασμα πως το κόστος παραγωγής για το 1^ο έτος λειτουργίας της εγκατάστασης εκτιμάται σε 680 €/MT_{NH₃} λαμβάνοντας υπόψη αποκλειστικά το λειτουργικό κόστος του πίνακα και την παραγόμενη ποσότητα NH₃ ετησίως (145 MT). Αν ληφθεί υπόψη το πρόσθετο κόστος από τα δικαιώματα εκπομπών CO₂, τότε το κόστος αυξάνεται στα 765 €/MT_{NH₃}. Σε κάθε περίπτωση δεν έχει ληφθεί υπόψη το ύψος των ετήσιων αποσβέσεων.

Επίσης, δεδομένου πως δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα σχετικά με το κόστος πωλήσεων το λειτουργικό κόστος θεωρείται παραπλήσιο του κόστους πωληθέντων.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή κόστους παραγωγής NH₃ ανά έτος, σύμφωνα με τη σύμβαση που παρουσιάστηκε. Επισημαίνεται πως στη δεδομένη ανάλυση εξετάζονται δύο σενάρια ως προς την ποσότητα του CO_{2,eq} που εκπέμπεται κατά την κάυση στην αναμόρφωση: (i) μη φορολόγηση CO₂ και (ii) φορολόγηση CO₂. Σε κάθε περίπτωση δε μελετάται η εφαρμογή κάποιας τεχνικής δέσμευσης CO₂ που θα συνοδευόταν με αυξημένο κόστος κεφαλαίου και λειτουργικό κόστος. Μια τέτοια περίπτωση, φυσικά, θα οδηγούσε σε αυξημένο κόστος παραγωγής CO₂ από το συμβατικό.



Εικόνα 8.Μεταβολή κόστους παραγωγής NH₃ ανά έτος

Από τη μελέτη των μεταβολών προκύπτει το συμπέρασμα πως για τις παραδοχές που έχουν γίνει αναμένεται αύξηση περί το 25% στο κόστος παραγωγής NH₃, στο τέλος της 20ετίας. Η μέση τιμή

κόστους παραγωγής άνευ φορολόγησης CO₂ εκτιμάται σε 750 €/MT_{NH3}, ενώ η αντίστοιχη μέση τιμή με φορολόγηση CO₂ εκτιμάται σε 850 €/MT_{NH3}.

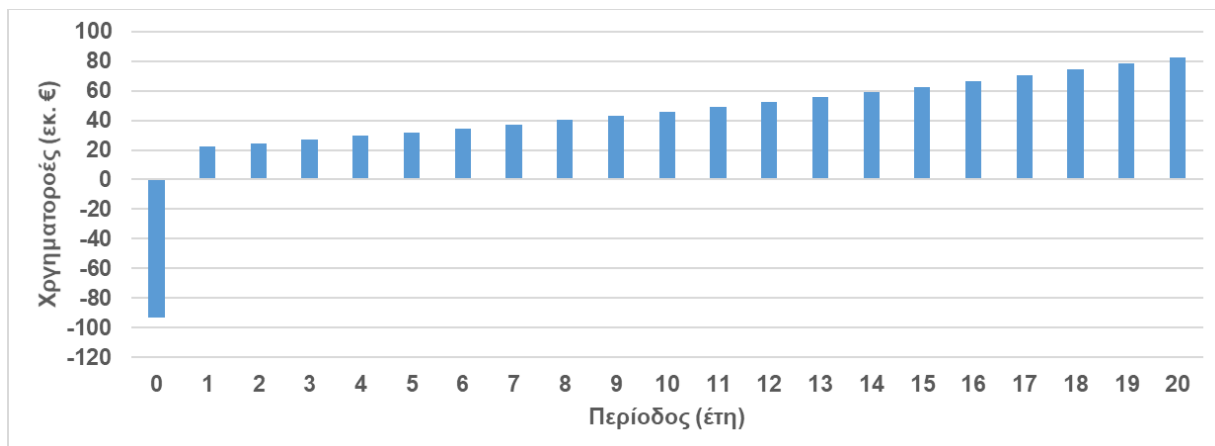
Στον Πίνακα 17 παρουσιάστηκαν οι ετήσιες χρηματοροές που με χρήση του επιτοκίου ανατοκισμού που επιλέχθηκαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των προεξοφλημένων χρηματοροών. Τα ετήσια μεγέθη όπως και η ΚΠΑ στο τέλος της 20ετίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 18.

Πίνακας 18. Υπολογισμός χρηματοροών και ΚΠΑ για την περίοδο μελέτης της επένδυσης

	Χρηματοροή	Προεξοφλημένη χρηματοροή
Έτος 0	(93.500 χιλ.€)	(93.500 χιλ.€)
Έτος 1	22.440 χιλ. €	19.510 χιλ. €
Έτος 2	24.690 χιλ. €	18.670 χιλ. €
Έτος 3	27.030 χιλ. €	17.770 χιλ. €
Έτος 4	29.460 χιλ. €	16.840 χιλ. €
Έτος 5	31.970 χιλ. €	15.890 χιλ. €
Έτος 6	34.580 χιλ. €	14.950 χιλ. €
Έτος 7	37.280 χιλ. €	14.010 χιλ. €
Έτος 8	40.080 χιλ. €	13.100 χιλ. €
Έτος 9	42.980 χιλ. €	12.220 χιλ. €
Έτος 10	45.990 χιλ. €	11.370 χιλ. €
Έτος 11	49.110 χιλ. €	10.560 χιλ. €
Έτος 12	52.340 χιλ. €	9.780 χιλ. €
Έτος 13	55.680 χιλ. €	9.050 χιλ. €
Έτος 14	59.150 χιλ. €	8.360 χιλ. €
Έτος 15	62.730 χιλ. €	7.710 χιλ. €
Έτος 16	66.450 χιλ. €	7.100 χιλ. €
Έτος 17	70.290 χιλ. €	6.530 χιλ. €
Έτος 18	74.270 χιλ. €	6.000 χιλ. €
Έτος 19	78.390 χιλ. €	5.510 χιλ. €
Έτος 20	82.650 χιλ. €	5.810 χιλ. €
	ΚΠΑ	137.300 χιλ.€

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας

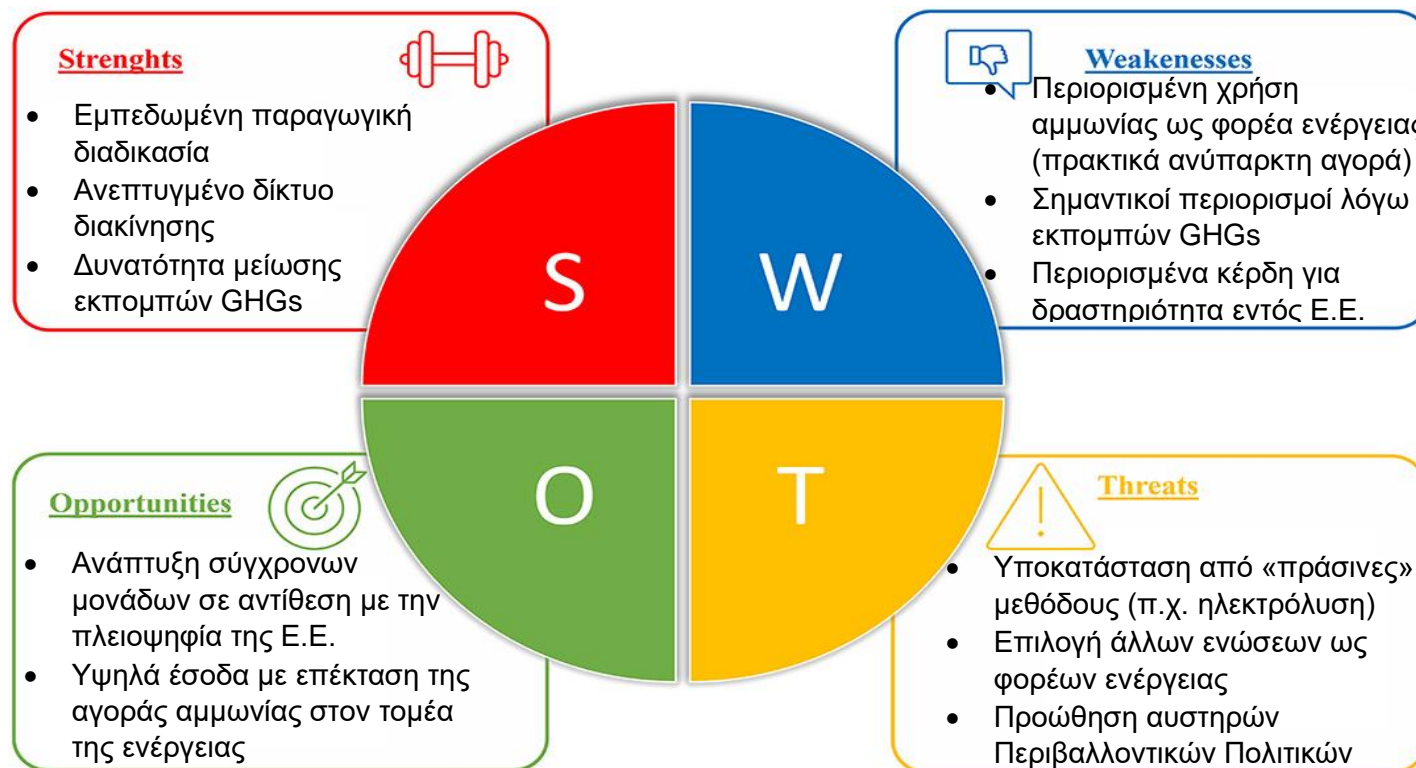


Εικόνα 9. Ετήσιες χρηματοροές επένδυσης

Από τα δεδομένα αξιολόγησης προκύπτει το συμπέρασμα πως η απόσβεση της εν λόγω επένδυσης θα επιτευχθεί σε 5,3 έτη, ενώ ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης που καταγράφεται ισούται με 32%. Η ΚΠΑ στο τέλος της 20ετίας ισούται με 137 εκ. €. Τα δεδομένα αυτά, καταρχήν, καθιστούν την εν λόγω επένδυση εξαιρετικά βιώσιμη βάσει των παραδοχών της μελέτης. Το προσδοκώμενο κέρδος είναι υψηλό, ενώ αναμένεται να σημειωθεί απόσβεση του εξοπλισμού σε σύντομο χρονικό διάστημα, αναλογιζόμενοι, μάλιστα το υψηλό κόστος επένδυσης κεφαλαίου.

3.3.1 Ανάλυση περιβάλλοντος

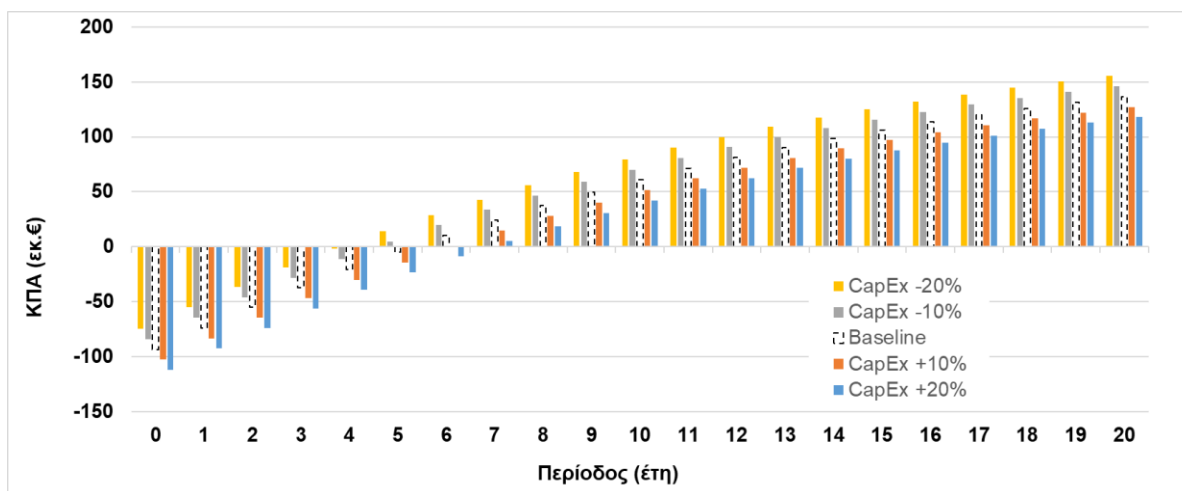
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης SWOT. Τα δεδομένα του περιβάλλοντος για την προώθηση της επένδυσης θεωρούνται ευνοϊκά, καθώς συνοδεύεται από εφαρμογή μιας εμπεδωμένης παραγωγικής διαδικασίας με ευελιξία. Ωστόσο, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κίνδυνοι που σχετίζονται με την ανάδειξη νέων οικονομικότερων και πιο «πράσινων» τεχνολογιών, καθώς και αυστηροποίησης της περιβαλλοντικής πολιτικής για τα GHGs.



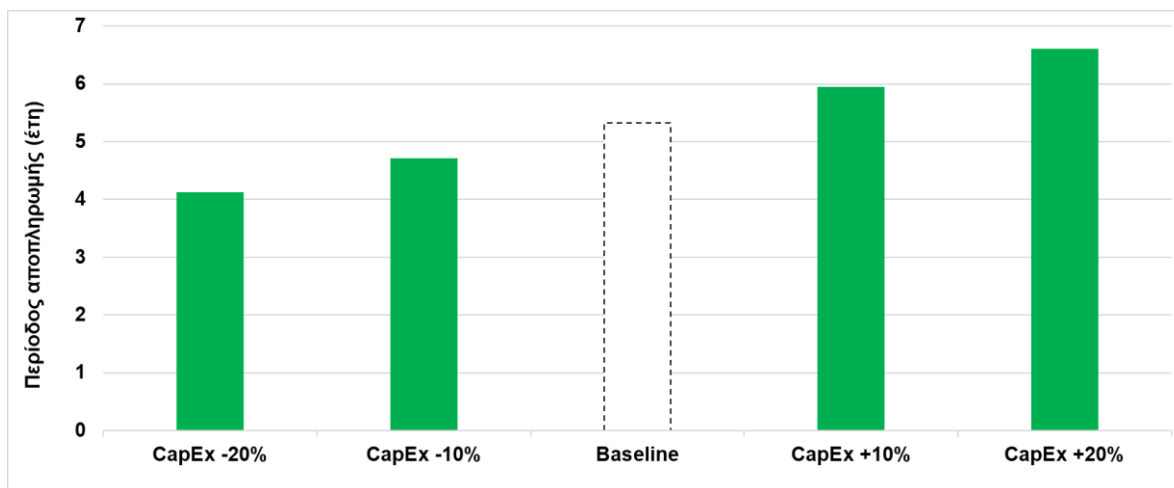
Εικόνα 10. Αποτελέσματα ανάλυσης SWOT

3.4 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας επένδυσης

Προκειμένου να διαπιστωθεί πως μεταβάλλεται η βιωσιμότητα της επένδυσης εξετάζεται η εξάρτηση βασικών δεικτών μεταβάλλοντας παραμέτρους κόστους και εσόδων. Στις Εικόνες 11 και 12 παρουσιάζεται η μεταβολή της ΚΠΑ της επένδυσης, καθώς και ο χρόνος αποπληρωμής, μεταβάλλοντας το αρχικό κόστος κεφαλαίου της επένδυσης.



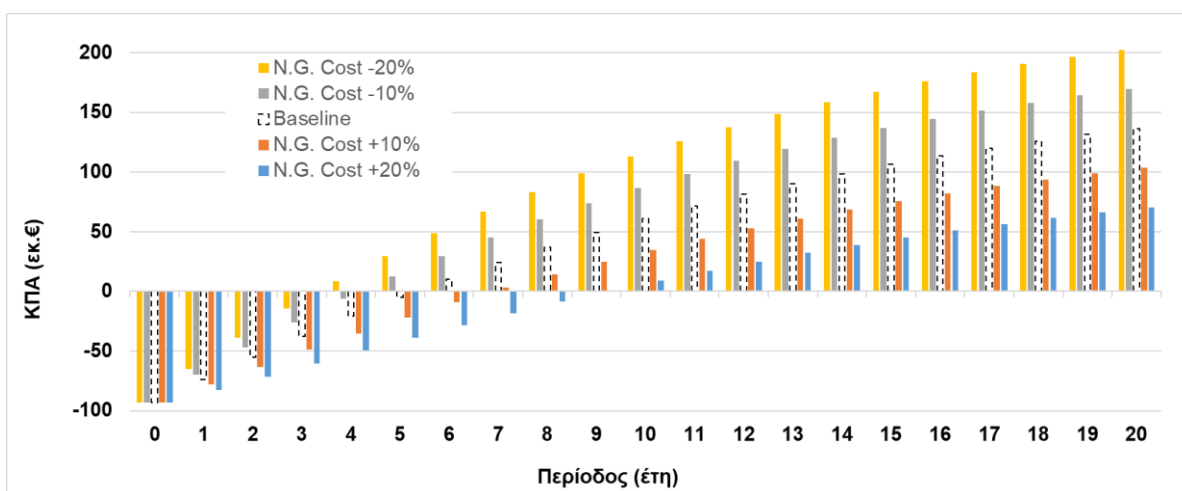
Εικόνα 11. Μεταβολή ΚΠΑ για διαφορετικές τιμές Κόστους Κεφαλαίου Επένδυσης



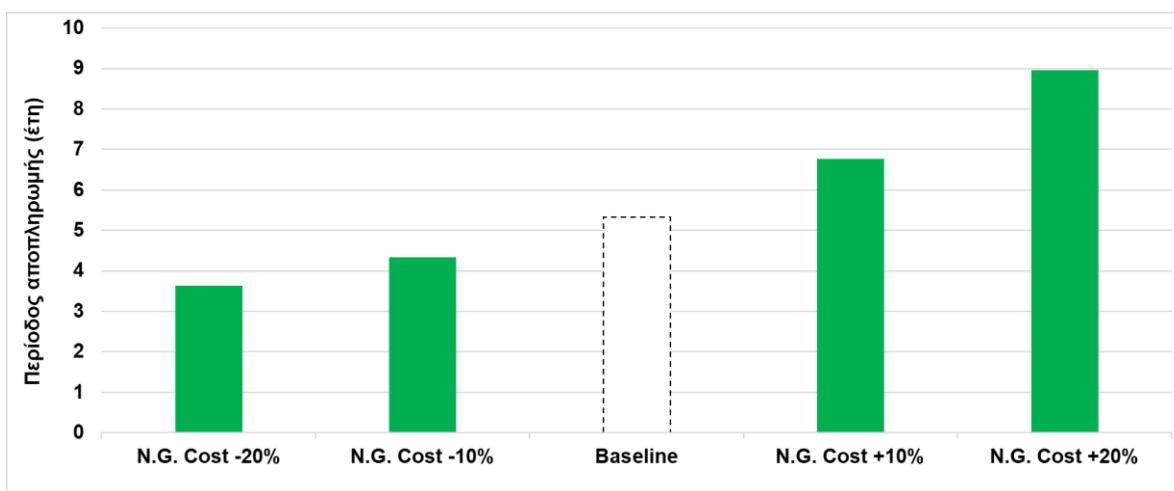
Εικόνα 12. Μεταβολή χρόνου αποπληρωμής για διαφορετικές τιμές Κόστους Κεφαλαίου Επένδυσης

Συμπεραίνεται πως η επένδυση επηρεάζεται σε μικρό βαθμό από το κόστος κεφαλαίου, καθώς αναμενόμενες μεταβολές δεν είναι ικανές να οδηγήσουν σε μη βιωσιμότητα αυτής, μελετώντας σε βάθος 20ετίας. Ο προσδιορισμός του κόστους κεφαλαίου με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια αποτελεί σημαντικό βήμα πριν την έναρξη της επένδυσης, ωστόσο δεν αναμένεται να κρίνει την επιτυχία αυτής. Σημειώνεται, πως η εκτιμώμενη αύξηση σε κόστος κεφαλαίου που θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο τη βιωσιμότητας της επένδυσης είναι της τάξης του 150%.

Στις Εικόνες 13 και 14 παρουσιάζεται η μεταβολή της ΚΠΑ της επένδυσης, καθώς και ο χρόνος αποπληρωμής, μεταβάλλοντας το αρχικό κόστος προμήθειας φυσικού αερίου.



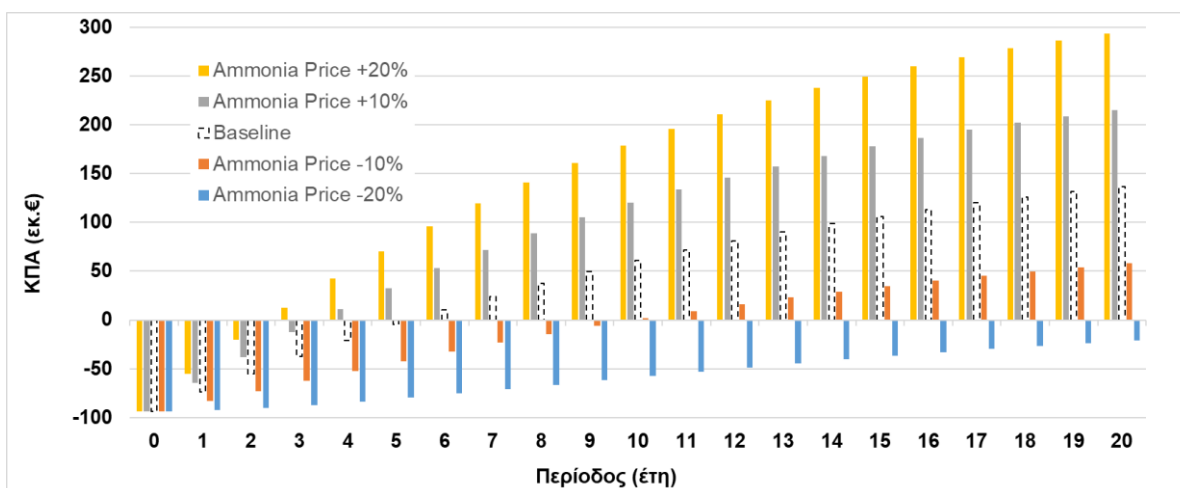
Εικόνα 13. Μεταβολή ΚΠΑ για διαφορετικές τιμές Κόστους Προμήθειας Φυσικού Αερίου



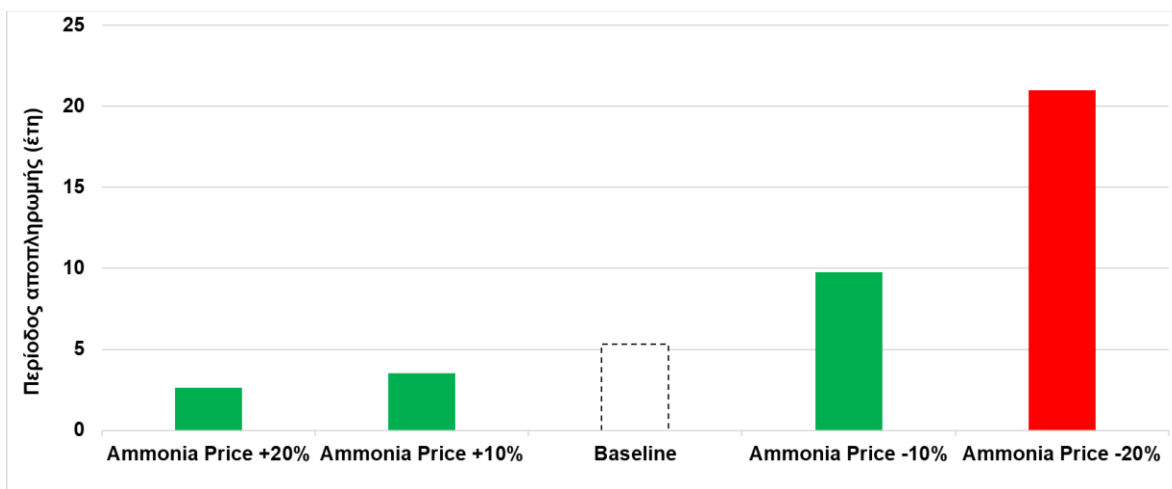
Εικόνα 14. Μεταβολή χρόνου αποπληρωμής για διαφορετικές τιμές Κόστους Προμήθειας Φυσικού Αερίου

Συμπεραίνεται πως η επένδυση επηρεάζεται περισσότερο από το κόστος προμήθειας φυσικού αερίου, αλλά ακόμη και αξιόλογες μεταβολές δεν είναι ικανές να οδηγήσουν σε μη βιωσιμότητα αυτής. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, καθώς το φυσικό αέριο αποτελεί τη βασική α΄ ύλη της παραγωγικής διαδικασίας. Η εξασφάλιση χαμηλών χρεώσεων και η μελέτη της αγοράς και των μεταβολών αυτής, ως προς την προμήθεια φυσικού αερίου είναι απαραίτητα για τη μεγαλύτερη βιωσιμότητα της επένδυσης και την επιτυχία του εγχειρήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως η αξία του φυσικού αερίου, λόγω γεωπολιτικών μεταβολών, υπέστη σημαντικές αυξήσεις στη διάρκεια των τελευταίων 2 ετών. Παρόλα αυτά η αξία του φαίνεται να σταθεροποιείται και η αγορά να ομαλοποιείται ενθαρρύνοντας την επένδυση με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, στη συγκεκριμένη μελέτη.

Στις Εικόνες 15 και 16 παρουσιάζεται η μεταβολή της ΚΠΑ της επένδυσης, καθώς και ο χρόνος αποπληρωμής, μεταβάλλοντας την αξία πώλησης άνυδρης αμμωνίας.



Εικόνα 15. Μεταβολή ΚΠΑ για διαφορετικές τιμές Αξίας Άνυδρης Αμμωνίας



Εικόνα 16. Μεταβολή χρόνου αποπληρωμής για διαφορετικές τιμές Αξίας Άνυδρης Αμμωνίας

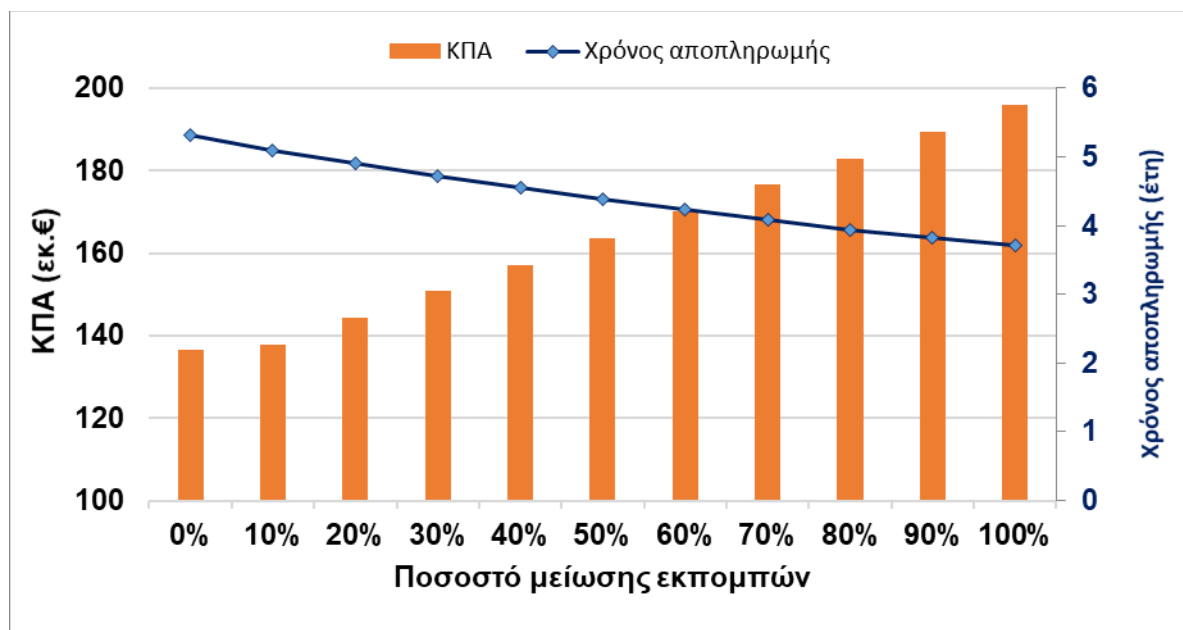
Συμπεραίνεται πως η αξία πώλησης της άνυδρης NH_3 αποτελεί την πλέον κρίσιμη παράμετρο για τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Το συμπέρασμα είναι αναμενόμενο, καθώς η μεταβολή αντανακλάται στο ύψος των εσόδων. Αύξηση της αξίας της αμμωνίας, έως 20%, μπορεί να οδηγήσει ακόμη και σε μείωση του χρόνου αποπληρωμής κατά 2,7 έτη και διπλασιασμό της ΚΠΑ. Αντίστοιχα, μικρή μείωση της αξίας πώλησης (-10%), έχει άμεσο αντίκτυπο στη βιωσιμότητα της επένδυσης αυξάνοντας το χρόνο αποπληρωμής στα 9,8 έτη και μειώνοντας την ΚΠΑ κατά 50%. Ωστόσο, δεν απειλείται η βιωσιμότητα της εν λόγω επένδυσης. Σημειώνεται, πως η οριακή τιμή πώλησης κάτω από την οποία η βιωσιμότητα της επένδυσης αμφισβητείται είναι 825 €/MT_{NH3}, δηλαδή απαιτείται μείωση της αξίας πώλησης της άνυδρης NH_3 κατά 17% σε όλη τη διάρκεια της 20ετίας, ώστε να αμφισβητηθεί η βιωσιμότητα της επένδυσης.

3.5 Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδων για μείωση εκπομπών GHGs

3.5.1 Χρήση μεθόδων δέσμευσης και αξιοποίησης CO₂

Στην ενότητα 3.3 μελετήθηκε η βιωσιμότητα της εν λόγω επένδυσης για συγκεκριμένες παραδοχές, που αφορούσαν αρχικές αξίες υλών, ενέργειας και προϊόντων, αλλά και ετήσιες μεταβολές των αξιών τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως η συγκεκριμένη επένδυση εμφανίζει υψηλή βιωσιμότητα για μελέτη 20ετίας, ενώ ταυτόχρονα η ευελιξία και ασφάλεια που σχετίζεται με μεταβολές ορισμένων βασικών μεγεθών, παρουσιάζεται διευρυμένη. Δηλαδή, ακόμη και πιθανές μεταβολές στην αξία προμήθειας υλών ή υποβάθμιση της αξίας του προϊόντος δεν είναι ικανές να καταστήσουν τη λειτουργία της επιχείρησης ζημιογόνα. Δεδομένου πως μια παραγωγική διαδικασία όπως αυτή που παρουσιάστηκε μπροστά στην πρόκληση δημιουργίας μιας νέας αγοράς ενέργειας, όπου τα οφέλη της επένδυσής μπορεί να είναι πολλαπλά, οδηγώντας σε σημαντικά κέρδη, κρίνεται αυτονόητη η ανάγκη αναζήτησης λύσεων που θα αυξήσουν την κερδοφορία αυτής και θα περιορίσουν πιθανούς κινδύνους.

Η καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων και μεταβολών που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την επένδυση αποτελεί μια κρίσιμη εργασία. Φυσικά, μια καλύτερη πρόβλεψη της μεταβολής της αξίας προμήθειας υλών και ενέργειας ή η επένδυση σε εξοπλισμό για την καλύτερη αποδοτικότητα των διεργασιών θα μπορούσε να οδηγήσει σε ενώ βελτιωμένο αποτέλεσμα. Η μελέτη αυτή είναι δύσκολη και οι πιθανότητες εξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων ελάχιστες, δεδομένων των μεταβολών και της φύσης της αγοράς ενέργειας και φυσικού αερίου. Αντίθετα ενέργειες που μπορούν να μεταβάλουν την αποδοτικότητα, περιορίζοντας σημαντικά τις εκπομπές CO₂, που αποτελούν μια σημαντική παράμετρο κόστους, για την εν λόγω επένδυση, είναι πιθανό να οδηγήσουν σε σημαντικά οφέλη. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί πως οι ενέργειες που απαιτούνται για τη μείωση των εκπομπών εξαρτώνται αποκλειστικά από παρεμβάσεις στην παραγωγική διαδικασία και επένδυση σε εξοπλισμό και υλικά, άρα αποτελεί μια πρόσθετη επένδυση. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας το ενδιαφέρον εστιάζεται στην παρακολούθηση της εξάρτησης και μεταβολής ορισμένων επενδυτικών δεικτών, συναρτήσει της μείωσης του ποσοστού μείωσης (δέσμευσης) εκπομπών, που μεταφράζονται σε εκπομπές CO₂. Σημειώνεται πως στο συγκεκριμένο μοντέλο επιτυγχάνεται δέσμευση της μεγαλύτερης ποσότητας CO₂ που παράγεται, ενώ εκλύεται ποσότητα μέσω των καυσαερίων της αναμόρφωσης. Δευτερεύουσα πηγή αποτελεί το αποτύπωμα CO_{2,eq} που συνοδεύει την προσφερόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Στην Εικόνα 17 παρουσιάζεται η μεταβολή των μεγεθών.



Εικόνα 17. Μεταβολή ΚΠΑ και χρόνου αποπληρωμής, συναρτήσε του ποσοστού μείωσης εκπομπών

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι εντυπωσιακό, καθώς διαπιστώνεται πως ακόμη και δέσμευση μικρού ποσοστού των GHGs μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της βιωσιμότητας της επένδυσης. Συγκεκριμένα μείωση των εκπομπών κατά 50% οδηγεί σε αύξηση της ΚΠΑ κατά 30 εκ. € και μείωση του χρόνου αποπληρωμής κατά ένα (1) έτος. Μια τέτοια ενέργεια δε θεωρείται δυσχερής ή ιδιαίτερα δαπανηρή, ενώ τα οφέλη της εμφανίζονται πολλαπλάσια. Στην περίπτωση μάλιστα που επιτευχθεί η μείωση των εκπομπών στο 100%, ικανοποιώντας την απαίτηση για μηδενικές εκπομπές που έχει ορίζοντα εφαρμογής έως το 2050, τότε ο χρόνος αποπληρωμής μειώνεται στα 3,7 έτη, ενώ η ΚΠΑ αυξάνεται στα 200 εκ. € - έναντι 137 εκ. € της αρχικής μελετώμενης επένδυσης. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί πως το λειτουργικό κόστος και κόστος εξοπλισμού που συνοδεύει τη λειτουργία μιας μονάδας δέσμευσης CO₂ δεν έχει ληφθεί υπόψη. Τα συγκεκριμένα μεγέθη δεν είναι αμελητέα, ωστόσο το περιθώριο κέρδους που εκτιμάται πως επιτυγχάνεται καθιστά τα συμπεράσματα που παρουσιάζονται ασφαλή.

3.5.2 Ηλεκτρόλυση ως εναλλακτική μέθοδος παραγωγής «πράσινου» H₂

Παρακάτω, επιχειρείται η συγκριτική παρουσίαση του κόστους παραγωγής H₂ με ηλεκτρόλυση σε σχέση με το αντίστοιχο κόστος παραγωγής του αερίου με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται στη μελετώμενη παραγωγική διαδικασία, της παρούσας εργασίας. Η διαδικασία που παρουσιάστηκε στην εν λόγω εργασία θα αποκαλείται «συμβατική τεχνική» συμπεριλαμβάνοντας, ως όρους κόστους, τις διεργασίες που αφορούν την απομάκρυνση δευτερευόντων αερίων που παράγονται στην αναμόρφωση.

Στον Πίνακα 19 παρουσιάζεται η κατανομή κόστους σε ύλες και ενέργεια ανά παραγόμενη μονάδα H₂, χρησιμοποιώντας τη συμβατική μέθοδο παραγωγής (SMR).

Πίνακας 19. Προσδιορισμός ανηγμένου κόστους υλών και ενέργειας για παραγωγή H₂ με τη συμβατική τεχνική

	Ανηγμένη ποσότητα	Μοναδιαίο Κόστος	Ανηγμένο Κόστος
Κατανάλωση φυσικού αερίου (α' ύλη)	3,3 Nm ³ /kg _{H2}		
Κατανάλωση φυσικού αερίου (καύσιμο)	1,6 Nm ³ /kg _{H2}		
Συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου	4,9 Nm³/kg_{H2}	0,40 €/Nm ³	1,984 €/kg_{H2}
Κατανάλωση ατμού (α' ύλη)	7,7 kg/kg _{H2}	1,70 €/m ³	0,013 €/kg_{H2}
Κατανάλωση νερού ψύξης (β' ύλη)	2,4 kg/kg _{H2}	1,70 €/m ³	0,004 €/kg_{H2}
Κατανάλωση ηλεκτρισμού (ενέργεια)	0,3 kWh/ kg _{H2}	0,12 €/kWh	0,031 €/kg_{H2}
Σύνολο			2,033 €/kg_{H2}
Εκπομπές CO ₂	0,012 t _{CO2} /kg _{H2}	90 €/ t _{CO2}	0,370 €/kg_{H2}
Σύνολο			2,403 €/kg_{H2}

Στον Πίνακα 20 παρουσιάζεται η κατανομή κόστους σε ύλες και ενέργεια ανά παραγόμενη μονάδα H₂, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης.

Πίνακας 20. Προσδιορισμός ανηγμένου κόστους υλών και ενέργειας για παραγωγή H₂ με ηλεκτρόλυση

	Ανηγμένη ποσότητα	Μοναδιαίο Κόστος	Ανηγμένο Κόστος
Κατανάλωση νερού (α' ύλη)	8,9 kg/kg_{H2}	1,70 €/m ³	0,015 €/kg_{H2}
Κατανάλωση ηλεκτρισμού (ενέργεια)	401,6 kWh/ kg_{H2}	0,12 €/kWh	4,873 €/kg_{H2}
Σύνολο			4,888 €/kg_{H2}

Από τη σύγκριση του κόστους α' υλών και ενέργειας ανά kg παραγόμενου H₂ προκύπτει το συμπέρασμα πως η εξοικονόμηση με χρήση της συμβατικής τεχνικής κυμαίνεται μεταξύ 2,485 – 2,855 €/kg_{H2} ανάλογα με το καθεστώς φορολόγησής CO₂ που μεταβάλλει το κόστος της συμβατικής μεθόδου.

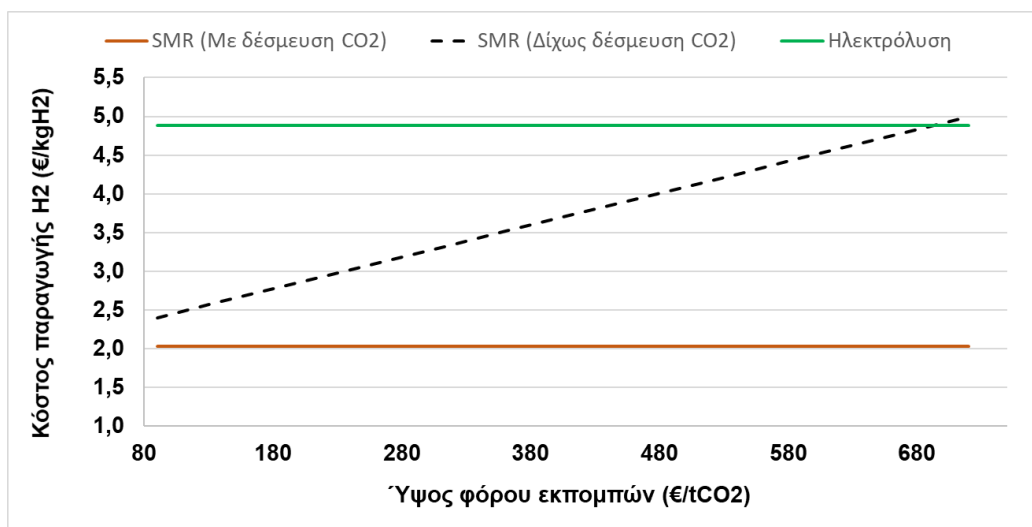
Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει το συμπέρασμα πως η απαίτηση σε H₂ για παραγωγή 1 kg NH₃ ισούται με 0,23 kg_{H2}/kg_{NH3}. Κατά συνέπεια, το κόστος υλών (φυσικό αέριο και ατμός) και ενέργειας για παραγωγή H₂ αναλογικά διαμορφώνει το κόστος παραγόμενης NH₃ στα 468 €/MT_{NH3}, με αξιοποίηση της συμβατικής – μελετώμενης – τεχνικής. Αν ληφθούν υπόψη τα κόστη που σχετίζονται με τα δικαιώματα εκπομπών, τότε το κόστος μεταβάλλεται στα 553 €/MT_{NH3}. Αντίστοιχα, εάν η παραγωγή H₂ γίνει με ηλεκτρόλυση η ίδια τιμή διαμορφώνεται στα 1.124 €/MT_{NH3}. Για ετήσια παραγωγή 145 kMT NH₃ η πρόσθετη ετήσια επιβάρυνση σε κόστος υλών και ενέργειας εκτιμάται στα 83 εκ. € - 95 εκ. €, εφόσον χρησιμοποιηθεί η τεχνική της ηλεκτρόλυσης.

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να διευκρινιστεί πως η εφαρμογή κάποιας τεχνικής δέσμευσης και αξιοποίησης CO₂ αυξάνει τα λειτουργικά κόστη, ενώ απαιτεί περαιτέρω επένδυση σε εξοπλισμό, ανά παραγόμενη μονάδα H₂. Δηλαδή, η δέσμευση CO₂ οδηγεί σε αυξημένο κόστος ανά kg παραγόμενου H₂, έναντι της παραγωγής άνευ δέσμευσης CO₂. Εισάγοντας, ωστόσο, την

έννοια του κόστους από τα δικαιώματα εκπομπής CO₂ προκύπτει μια πρόσθετη επιβάρυνση στην περίπτωση που το CO₂ δε δεσμευτεί και γι αυτό το λόγο κάθε μονάδα παραγόμενου H₂ παρουσιάζεται με αυξανόμενο, τελικά, κόστος. Αυτό δικαιολογείται, αφού οι επιβαρύνσεις σε ύλες, ενέργεια και εξοπλισμό για δέσμευση CO₂ δε λαμβάνονται υπόψη στη συγκεκριμένη μελέτη.

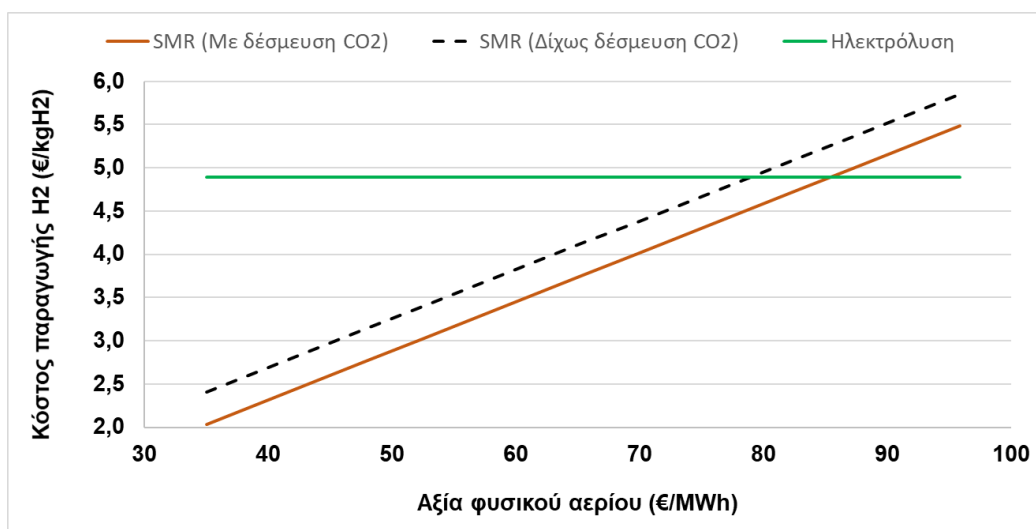
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, καθιστούν την εφαρμογή της ηλεκτρόλυσης για παραγωγή H₂ μια μη βιώσιμη λύση, συγκρινόμενη τόσο με υφιστάμενες τεχνολογίες, όσο και τα δεδομένα της αγοράς αμμωνίας. Στο παρόν, επιχειρείται μέσω χρηματοδοτούμενων ερευνητικών προγραμμάτων και κοινοπραξιών μεγάλων οργανισμών η ανάπτυξη βιώσιμων μονάδων ηλεκτρόλυσης, με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης υλών, αλλά και του συνολικού λειτουργικού κόστους – που δε συγκρίθηκε στο πλαίσιο αυτής της μελέτης. Είναι βέβαιο πως ορισμένες από τις παραμέτρους που μπορεί να αντιστρέψουν το οικονομικό πλεονέκτημα της παραγωγής H₂ με φυσικό αέριο, έναντι της μεθόδου ηλεκτρόλυσης είναι οι παρακάτω:

- Αύξηση του κόστους δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ (απαιτείται μεταβολή περίπου +600%)
Το συγκεκριμένο σενάριο συνοδεύεται από την προώθηση μιας ακόμη πιο αυστηρής πολιτικής για τον περιορισμό GHGs. Η αύξηση που κατεγράφη στη διάρκεια των προηγούμενων 12 μηνών (09/2022-09/2023) ήταν περίπου +30%. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη μεταβολή θα επηρέαζε σημαντικά, εξίσου, άλλες κατηγορίες βιομηχανικών παραγωγικών εγκαταστάσεων, καθώς θα οδηγούσε σε τεράστια αύξηση των δαπανών που σχετίζονται με τα δικαιώματα εκπομπής CO₂.



Εικόνα 18.Μεταβολή κόστους υλών και ενέργειας για παραγωγή H₂ για διαφορετικές διεργασίες παραγωγής συναρτήσεϊ του φόρου εκπομπών CO₂

- Αύξηση της αξίας προμήθειας φυσικού αερίου (απαιτείται μεταβολή περίπου +140%)
Η συγκεκριμένη μεταβολή παρόλο που μοιάζει αρκετά μεγάλη, σημειώθηκε και ξεπεράστηκε την περίοδο 04/2022 – 01/2023, ως αποτέλεσμα γεωπολιτικών αναταραχών και απειλής ενεργειακής επάρκειας. Η μετάβαση προς εναλλακτικές πηγές ενέργειας, ως προς την προσφορά ηλεκτρισμού, αναμένεται να υποβαθμίσει την αξία του φυσικού αερίου, με αποτέλεσμα να μην αναμένεται μια τέτοια αύξηση της αξίας προμήθειάς του, υπό φυσιολογικές συνθήκες.

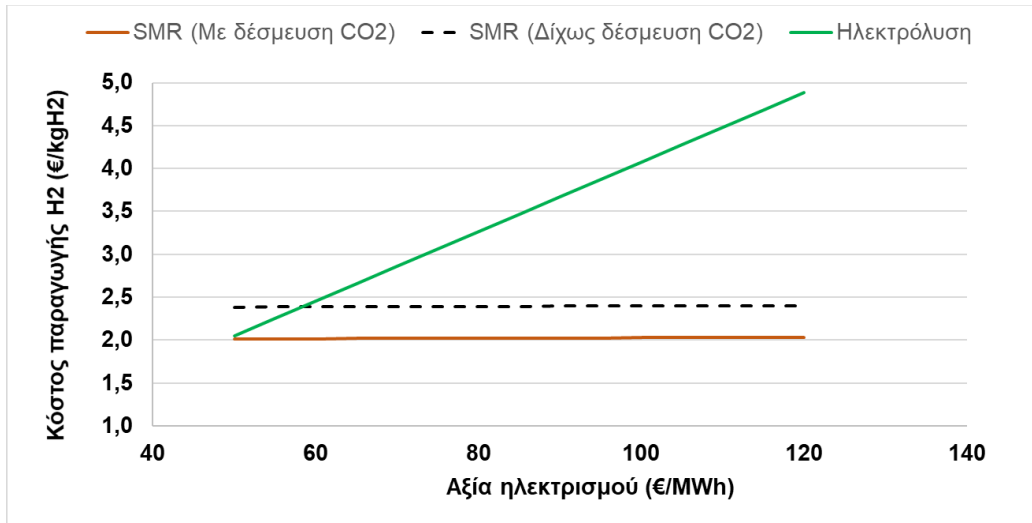


Εικόνα 19. Μεταβολή κόστους υλών και ενέργειας για παραγωγή H₂ για διαφορετικές διεργασίες παραγωγής συναρτήσει της αξίας προμήθειας φυσικού αερίου

- Μείωση της αξίας προμήθειας ηλεκτρισμού (απαιτείται μεταβολή τουλάχιστον -55%)
Το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί το 99,7% του συνολικού κόστους υλών και ενέργειας για τη διεξαγωγή της διεργασίας ηλεκτρόλυσης. Εφόσον διαμορφωθεί μια τιμή προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας περί τα 58 €/MWh, τότε αναμένεται να εξισωθεί το μελετώμενο κόστος μεταξύ των δύο μεθόδων.

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας



Εικόνα 20. Μεταβολή κόστους υλών και ενέργειας για παραγωγή H₂ για διαφορετικές διεργασίες παραγωγής συναρτήσει της αξίας προμήθειας ηλεκτρισμού

4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η επένδυση κατασκευής και λειτουργίας μιας μονάδας παραγωγής NH₃ ως φορέας υδρογόνου. Η μελέτη παραγωγής άνυδρης αμμωνίας πραγματοποιήθηκε μέσω προσομοίωσης της διεργασίας παραγωγής της αξιοποιώντας το λογισμικό Aspen®, βασισμένη στη μετατροπή φυσικού αερίου με ατμό (Steam Methane Reforming) ακολουθούμενη από τη διαδικασία Haber – Bosch – δύο διεργασίες οι οποίες αποτελούν τις πλέον συνήθεις μεθόδους παραγωγής αμμωνίας παγκοσμίως. Δεδομένου ότι παγκοσμίως η παραγόμενη αμμωνία δεν προορίζεται για την αξιοποίηση της ως φορέας υδρογόνου, η παρούσα μελέτη βασίζεται σε υπάρχοντα δεδομένα αγοράς για τις παραδοσιακές χρήσεις της αμμωνίας. Στο πλαίσιο της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης, το κόστος του φυσικού αερίου και των βοηθητικών υλών υπολογίστηκε με βάση τα δεδομένα της ελληνικής αγοράς του τρίτου τριμήνου του 2023, ενώ η τιμή πώλησης της άνυδρης αμμωνίας προέκυψε από δεδομένα της διεθνούς αγοράς για την ίδια περίοδο. Η δυναμικότητα της μονάδας που μοντελοποιήθηκε ανέρχονταν σε ετήσια παραγωγή 145 kMT, ενώ το εκτιμώμενο κόστος επένδυσης ανήλθε στα 95 εκ.€. Το εκτιμώμενο μέσο ετήσιο λειτουργικό κόστος 110 εκ.€/έτος. Παράλληλα, υπολογίστηκε έκλυση 140 kMT CO_{2,eq} με εκτιμώμενο κόστος δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ στα 12 εκ.€, για τρέχοντα δεδομένα αγοράς. Τα αποτελέσματα της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης έδειξαν πως για μελέτη 20ετίας, η επένδυση κρίνεται βιώσιμη με ΚΠΑ περί τα 135 εκ. € και χρόνο αποπληρωμής 5,3 έτη. Η ανάλυση ευαισθησίας επιβεβαίωσε την υψηλή βιωσιμότητα της επένδυσης καθώς μεταβάλλονται οι από βασικές μεταβλητές κόστους, όπως η τιμή πώλησης της αμμωνίας, το κόστος του φυσικού αερίου και ο φόρος από τα δικαιώματα εκπομπών CO₂. Αύξηση του κόστους κεφαλαίου κατά 20% μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ΚΠΑ μόλις κατά 20 εκ.€, ενώ μείωση του κόστους κεφαλαίου κατά 20% οδηγεί σε ίση αύξηση της ΚΠΑ κι ακόμη βελτιωμένο χρόνο αποπληρωμής (4,1 έτη). Αύξηση της αξίας προμήθειας κατά 20% οδηγεί σε μείωση της ΚΠΑ κατά 66 εκ.€, ενώ η αντίστοιχη μείωση στην αξία προμήθειας του αερίου θα βελτιώσει σημαντικά τα στοιχεία της επένδυσης, διαμορφώνοντας την ΚΠΑ στα 200 εκ.€, περίπου και το χρόνο αποπληρωμής σε μόλις 3,6 έτη. Τέλος, οι μεταβολές της αξίας προμήθειας της τιμής πώλησης της αμμωνίας συνοδεύονται από σημαντική επίδραση στη βιωσιμότητα της επένδυσης. Συγκεκριμένα, στο εύρος μεταβολών ±20% σημειώνεται μεταβολή της ΚΠΑ κατά σχεδόν 160 εκ.€. Στη χειρότερη περίπτωση δεν επιτυγχάνεται αποπληρωμή της επένδυσης σε 20 έτη, ενώ στη βέλτιστη εκδοχή η επένδυση σημειώνει υψηλή κερδοφορία με ΚΠΑ περί τα 295 εκ.€ και χρόνο αποπληρωμής μικρότερο των τριών (3) ετών.

Επιπλέον, παρουσιάστηκαν πρόσθετες στρατηγικές και προτάσεις για τη βελτίωση της βιωσιμότητας της επένδυσης και την ελαχιστοποίηση του αποτυπώματος με τον περιορισμό των ετησίων εξόδων που σχετίζονται με τον φόρο εκπομπών CO₂, ο οποίος εκτιμήθηκε σε περίπου 35 εκ.€. Σημειώνεται πως η υιοθέτηση μεθόδων διαχωρισμού και απομόνωσης του CO₂, όπως η μέθοδος Pressure Swing Adsorption (PSA), αποδείχθηκε αποτελεσματική για τη μείωση των εκπομπών CO₂, οδηγώντας σε μείωση των ετησίων εξόδων στα 12 εκ.€. Περαιτέρω εφαρμογή τεχνικών για μείωση των οποίο αντιστοιχεί σε μείωση του χρόνου αποπληρωμής από 5,3 έτη σε έως και 3,7 έτη. Ειδικότερα, αναφέρεται πως η ενσωμάτωση πηγών ανανεώσιμης ενέργειας ως εναλλακτική λύση στις παραδοσιακές πηγές ηλεκτροδότησης συμμετέχει στη μείωση του κόστους από τα δικαιώματα εκπομπών CO₂, κατά 1,2 εκ.€.

Τέλος, εξετάστηκαν «πράσινες» μέθοδοι παραγωγής H₂, όπως η ηλεκτρόλυση, που θα μπορούσαν να μηδενίσουν τις εκπομπές GHGs. Ωστόσο, η ετήσια επιβάρυνση κόστους υλών και ενέργειας για τη παραγωγή αμμωνίας με χρήση H₂ προερχόμενο από ηλεκτρόλυση έναντι της συμβατικής μεθόδου εκτιμάται μεταξύ 100-140%.

Τα συγκεκριμένα ευρήματα και συμπεράσματα μπορούν να λειτουργήσουν ως μια πολύτιμη βάση για την εξέταση νέων επενδυτικών ευκαιριών ή την εκκίνηση του μετασχηματισμού υφιστάμενων μονάδων, ανοίγοντας τον δρόμο για έναν πιο βιώσιμο μέλλον.

5 Προτάσεις

Στη συγκεκριμένη μελέτη το ενδιαφέρον εστιάστηκε στον υπολογισμό της παραγωγικής ικανότητας της μονάδας που προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας λειτουργικές συνθήκες και τροφοδοσίες, χαρακτηριστικές μελετών της βιβλιογραφίας και της γνωστής βιομηχανικής πρακτικής. Ωστόσο, δε μελετήθηκε η απόδοση και μεταβολή του παραγωγικού κόστους για μεταβολές των λειτουργικών παραμέτρων, υπό την έννοια της ανάλυσης ευαισθησίας. Μια τέτοια ανάλυση θα μπορούσε να προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις παραμέτρους που θα μπορούσαν να αυξήσουν την αποδοτικότητα των διεργασιών.

Ένα ιδιαίτερο σημαντικό στοιχείο η μελέτη του οποίου σημειώνει ενδιαφέρον, αποτελεί η μεταβολή του κόστους παραγωγής συναρτήσει του ύψους παραγωγής. Δηλαδή, η επίδραση σε κόστος κεφαλαίου και λειτουργικού κόστους που θα απέφερε αύξηση ή/και μείωση της τροφοδοσίας υλών στη μονάδα. Αναμένεται η επίτευξη οικονομίας κλίμακας που σε συνδυασμό με δέσμευση των εκπομπών GHGs θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά τη βιωσιμότητα της επένδυσης.

Η εφαρμογή εναλλακτικών μεθόδων για την παραγωγή ενδιάμεσων υλών που απαιτούνται για σύνθεση NH_3 αποτελεί βασικό αντικείμενο έρευνας, καθώς πολλές προτάσεις συνοδεύονται με μηδενικές εκπομπές GHGs. Παρόλο που η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης που αναδείχθηκε δε μοιάζει ανταγωνιστική, μια αναλυτική σύγκριση μεταξύ των μεθόδων που δε θα περιορίζεται στο κόστος υλών, αλλά θα περιλαμβάνει και το κόστος κεφαλαίου και λειτουργικού κόστους θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη. Επίσης, σε μια τέτοια ανάλυση θα είχε ενδιαφέρον να συμπεριληφθούν ποιοτικοί ή ακόμη και ποσοτικοί δείκτες που σχετίζονται με την ασφάλεια των διεργασιών. Επιπρόσθετα, η υποκατάσταση των πηγών ενέργειας με ΑΠΕ αλλά και η μερική υποκατάσταση της τροφοδοσίας φυσικού αερίου με εναλλακτικές ύλες (π.χ. βιόμαζα) θα μπορούσαν να περιορίσουν το αποτύπωμα της παραγωγικής διαδικασίας, συμβάλλοντας στην κυκλική οικονομία.

6 Βιβλιογραφία

- (1) Kojima, Y.; Yamaguchi, M. Ammonia as a Hydrogen Energy Carrier. *Int J Hydrogen Energy* **2022**, *47* (54), 22832–22839. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.096>.
- (2) Kothari, P.; Awatade, G.; Patil, J.; Kothari1, P.; Adhikari2, A.; Awatade3, G.; Gadekar4, G.; Patil5, J. Review on Hydrogen as Fuel. *International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)* **2021**, *3*, 487. <https://doi.org/10.35629/5252-0311487495>.
- (3) The Role of Hydrogen and ammonia in Meeting the Net Zero Challenge. *The Royal Society CLIMATE CHANGE (CLIMATE CHANGE : SCIENCE AND SOLUTIONS (Briefing 4))*.
- (4) Institute for Sustainable Process Technology Power to Ammonia. *Power to Ammonia*.
- (5) Saur, G. *Wind-To-Hydrogen Project: Electrolyzer Capital Cost Study*; 2008. <http://www.osti.gov/bridge>.
- (6) Rödl, A.; Wulf, C.; Kaltschmitt, M. Assessment of Selected Hydrogen Supply Chains-Factors Determining the Overall GHG Emissions. In *Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation*; Elsevier, 2018; pp 81–109. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811197-0.00003-8>.
- (7) Chatterjee, S.; Parsapur, R. K.; Huang, K. W. Limitations of Ammonia as a Hydrogen Energy Carrier for the Transportation Sector. *ACS Energy Lett* **2021**, *6* (12), 4390–4394. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c02189>.
- (8) Amhamed, A. I.; Shuibul Qarnain, S.; Hewlett, S.; Sodiq, A.; Abdellatif, Y.; Isaifan, R. J.; Alrebei, O. F. Ammonia Production Plants—A Review. *Fuels* **2022**, *3* (3), 408–435. <https://doi.org/10.3390/fuels3030026>.
- (9) Varies. *AP42 Chapter 8 Reference*; 1980.
- (10) Bakey, K. *The Production of Hydrogen Gas: Steam Methane Reforming*; 2015.
- (11) Efig. Emissions Factors & AP 42 Ammonia.
- (12) MINISTRY OF ENVIRONMENT AND ENERGY. *CLIMATECHANGE NATIONAL INVENTORY REPORT OF GREECE FOR GREENHOUSE AND OTHER GASES FOR THE YEARS 1990-2021*; 2023.
- (13) Aspen Technology. *Aspen Plus Ammonia Model*; 2008. <http://www.aspentech.com>.
- (14) Luis, P. Use of Monoethanolamine (MEA) for CO₂ Capture in a Global Scenario: Consequences and Alternatives. *Desalination*. Elsevier February 15, 2016, pp 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.004>.

- (15) Parandin, M. S.; Rashidi, H. Deep Desulfurization of Natural Gas by a Commercial ZnO Adsorbent: A Mathematical Study for Fixed-Bed Reactors. *J Nat Gas Sci Eng* **2018**, *59*, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.08.030>.
- (16) García, L. Hydrogen Production by Steam Reforming of Natural Gas and Other Nonrenewable Feedstocks. In *Compendium of Hydrogen Energy: Hydrogen Production and Purification: Volume 1*; Elsevier, 2015; Vol. 1, pp 83–107. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-361-4.00004-2>.
- (17) Abbas, S. Z.; Dupont, V.; Mahmud, T. Kinetics Study and Modelling of Steam Methane Reforming Process over a NiO/Al₂O₃ Catalyst in an Adiabatic Packed Bed Reactor. *Int J Hydrogen Energy* **2017**, *42* (5), 2889–2903. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.093>.
- (18) Boon, J.; Van Dijk, E.; Pirgon-Galin, Ö.; Haije, W.; Van Den Brink, R. Water-Gas Shift Kinetics over FeCr-Based Catalyst: Effect of Hydrogen Sulphide. *Catal Letters* **2009**, *131* (3–4), 406–412. <https://doi.org/10.1007/s10562-009-0090-0>.
- (19) Filipe S Lopes Supervisor, by V; Rodrigues Co-supervisor, A. E.; Grande, C. A. *New Pressure Swing Adsorption Cycles for Hydrogen Purification from Steam Reforming Off-Gases*; 2010.
- (20) Ahn, S.; You, Y. W.; Lee, D. G.; Kim, K. H.; Oh, M.; Lee, C. H. Layered Two- and Four-Bed PSA Processes for H₂ Recovery from Coal Gas. *Chem Eng Sci* **2012**, *68* (1), 413–423. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.09.053>.
- (21) Cheng, C.-Y.; Kuo, C.-C.; Yang, M.-W.; Zhuang, Z.-Y.; Lin, P.-W.; Chen, Y.-F.; Yang, H.-S.; Chou, C.-T. CO₂ Capture from Flue Gas of a Coal-Fired Power Plant Using Three-Bed PSA Process. *Energies (Basel)* **2021**, *14* (12), 3582. <https://doi.org/10.3390/en14123582>.
- (22) Marcinek, A.; Möller, A.; Guderian, J.; Bathen, D. Dynamic Simulation of High-Purity Twin-Bed N₂-PSA Plants. *Adsorption* **2021**, *27* (8), 1149–1173. <https://doi.org/10.1007/s10450-021-00320-0>.
- (23) Dutcher, B.; Fan, M.; Russell, A. G. Amine-Based CO₂ Capture Technology Development from the Beginning of 2013-A Review. *ACS Appl Mater Interfaces* **2015**, *7* (4), 2137–2148. <https://doi.org/10.1021/am507465f>.
- (24) Huertas, J. I.; Gomez, M. D.; Giraldo, N.; Garzón, J. CO₂ Absorbing Capacity of MEA. *J Chem* **2015**, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/965015>.
- (25) Oh, S. Y.; Binns, M.; Cho, H.; Kim, J. K. Energy Minimization of MEA-Based CO₂ Capture Process. *Appl Energy* **2016**, *169*, 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.046>.
- (26) Department of Energy, U. *Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy A Study of Issues Related to the Use Ammonia for On-Board Vehicular Hydrogen Storage*; 2006.

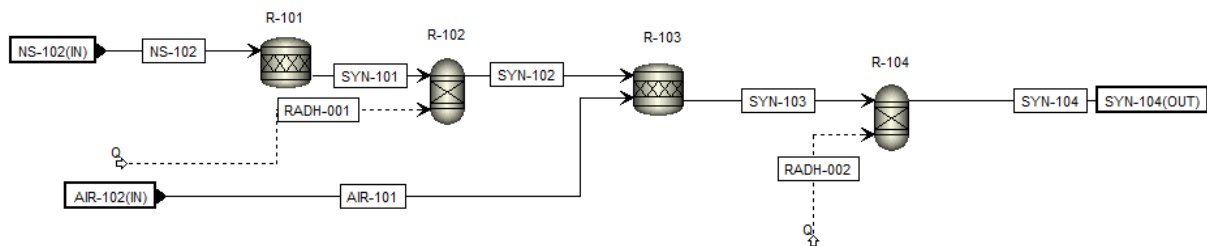
Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας

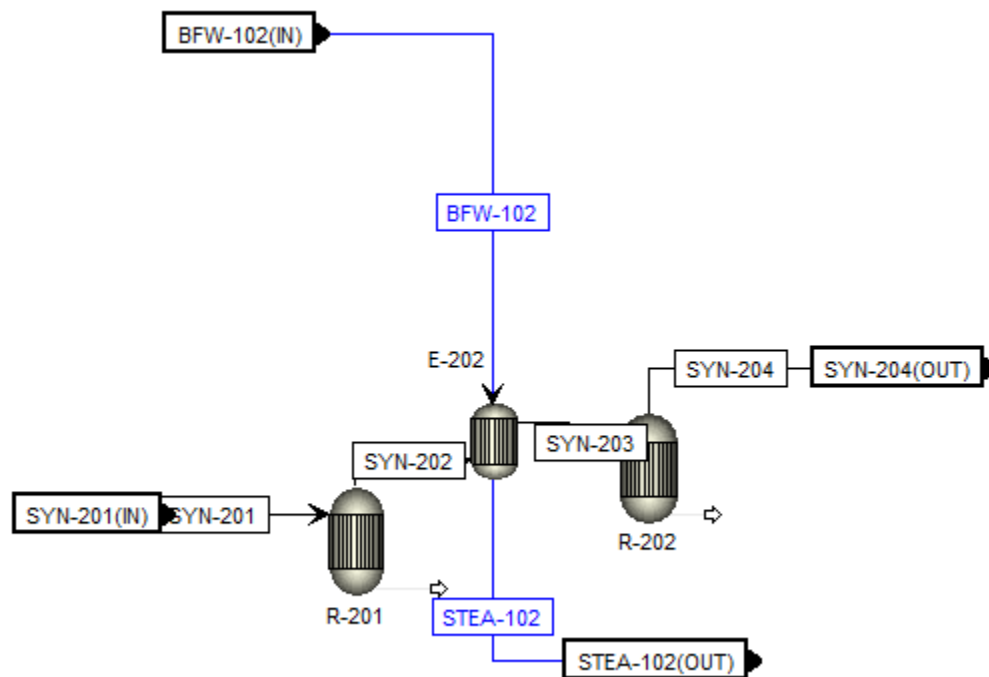
- (27) GAVIN TOWLER, R. S. *CHEMICAL ENGINEERING DESIGN: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*; 2008.
- (28) Juhász, L. *NET PRESENT VALUE VERSUS INTERNAL RATE OF RETURN*; 2011; Vol. 4.
- (29) Yan, R.; Zhang, Y. *The Introduction of NPV and IRR*; 2022.

Παράρτημα Ι

Παράρτημα Ι.Ι – Απεικονίσεις μοντελοποίησης διεργασίας



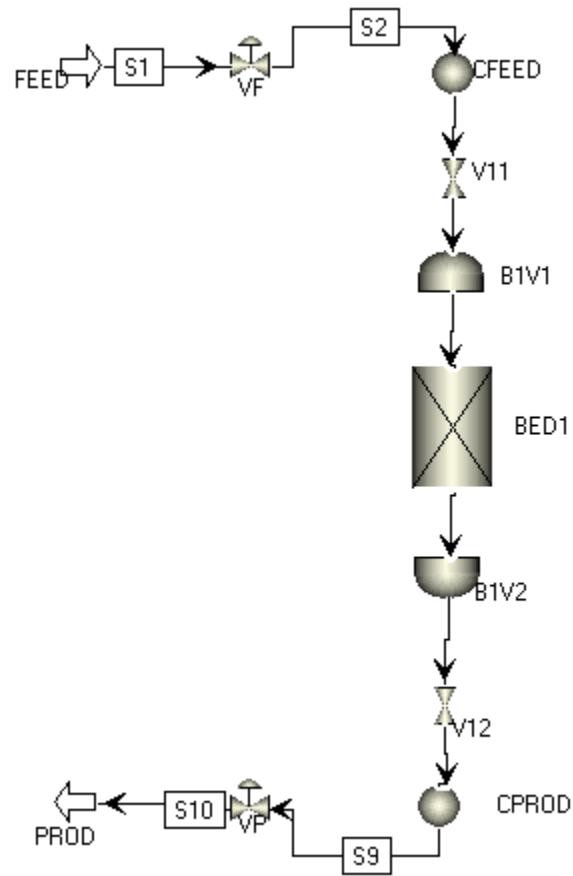
Εικόνα 21. Αποτύπωση προσομοίωσης SMR στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus®



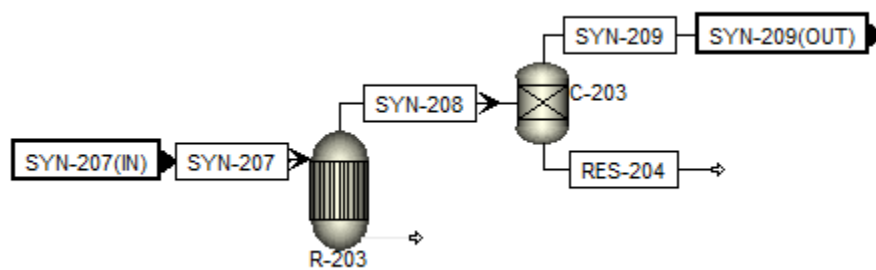
Εικόνα 22. Αποτύπωση προσομοίωσης μετατροπής CO στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus®

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας



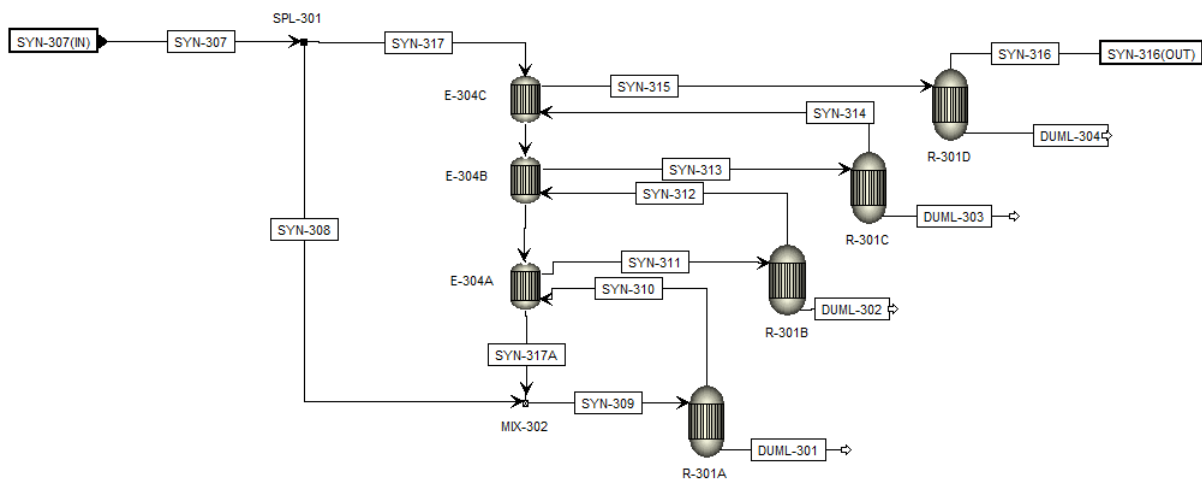
Εικόνα 23. Αποτύπωση προσομοίωσης στήλης προσρόφησης στο εμπορικό λογισμικό Aspen Adsorption®



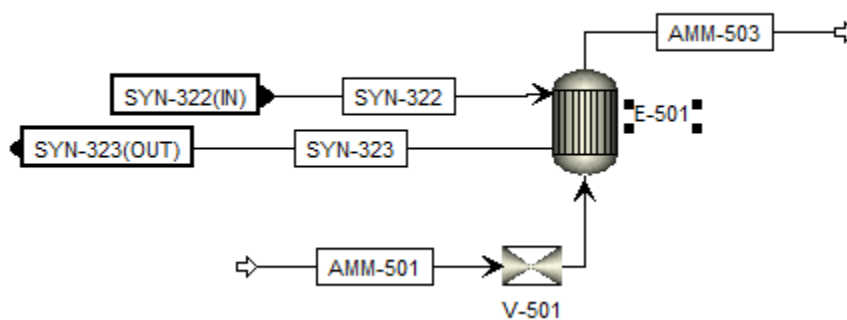
Εικόνα 24. Αποτύπωση προσομοίωσης μεθανοποίησης στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus®

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας



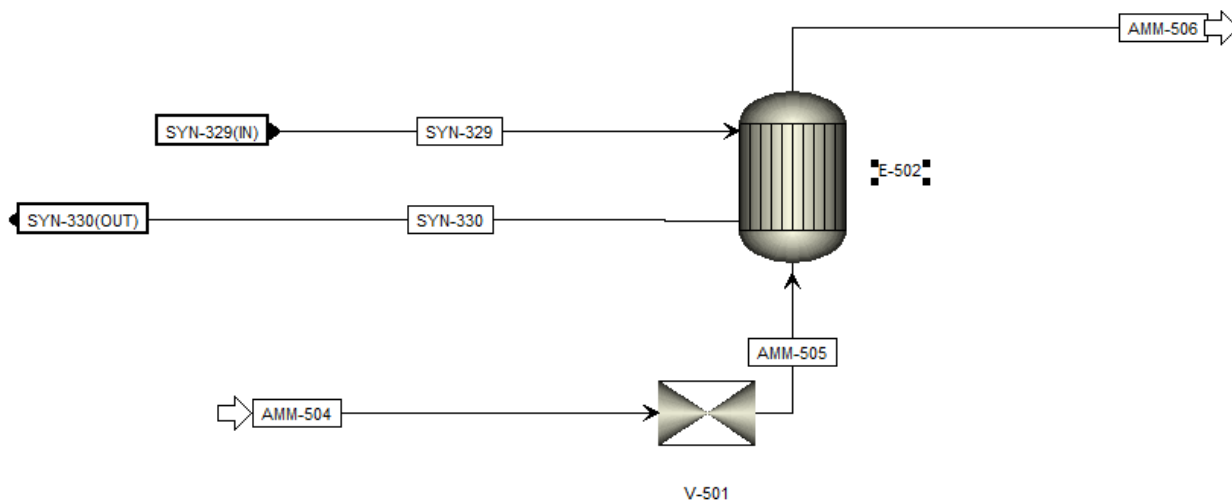
Εικόνα 25. Αποτύπωση προσομοίωσης αντίδρασης N_2 και H_2 προς σύνθεση NH_3 στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus®



Εικόνα 26. Αποτύπωση προσομοίωσης πρωτογενούς ψύξης ανακύκλωσης αντιδρώντων - NH_3 στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus®

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας



Εικόνα 27. Αποτύπωση προσομοίωσης δευτερογενούς ψύξης ανακύκλωσης αντιδρώντων - NH_3 στο εμπορικό λογισμικό Aspen Plus®

Παράρτημα I.II – Διαδικασία υπολογισμού πάχους τοιχωμάτων δοχείων πίεσης

Η συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πάχους τοιχωμάτων δοχείων πίεσης και βρίσκει εφαρμογή στη διαστασιολόγηση και υπολογισμό κόστους στηλών και αντιδραστήρων.

Η διαστασιολόγηση ενός δοχείου πίεσης χρησιμοποιείται οι εξισώσεις υπολογισμού του ελάχιστου απαιτούμενου πάχους κελύφους του δοχείου, όπως αυτές διατυπώνονται στον κώδικα ASME, Η πρώτη, που παρουσιάζεται παρακάτω, ισχύει για τον προσδιορισμό του ελάχιστου πάχους, λαμβάνοντας υπόψη τις **διαμήκεις συγκολλήσεις**:

$$t_{min} = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Η εξίσωση ισχύει υπό τις κάτωθι προϋποθέσεις:

$$t_{min} \leq 0,5R \quad \text{ή} \quad P \leq 0,385SE$$

Η δεύτερη, που παρουσιάζεται παρακάτω, ισχύει για τον προσδιορισμό του ελάχιστου πάχους, λαμβάνοντας υπόψη τις **περιμετρικές συγκολλήσεις**:

$$t_{min} = \frac{PR}{2SE + 0,4P}$$

Η εξίσωση ισχύει υπό τις κάτωθι προϋποθέσεις:

$$t_{min} \leq 0,5R \quad \text{ή} \quad P \leq 1,25SE$$

- όπου, t_{min} = ελάχιστο απαιτούμενο πάχος κελύφους
 P = εσωτερική πίεση σχεδιασμού του δοχείου
 R = εσωτερική ακτίνα του δοχείου
 S = μέγιστη επιτρεπτή τάση του υλικού κατασκευής
 E = η απόδοση του συνδέσμου (στοιχείο συγκόλλησης)

Η τιμή της μέγιστης επιτρεπτής τάσης του υλικού κατασκευής, S , προσδιορίζεται από τους σχετικούς πίνακες του ASME BPVC Section II, Part D,

Η τιμή της απόδοσης των συνδέσμων, E , που σχετίζεται με την απόδοση των συνδέσμων των συγκολλήσεων, προσδιορίζεται από τον πίνακα UW-12 ASME SEC. VIII DIV 1, Η τιμή επιλέγεται ίση με **1,0** καθώς πρόκειται για νέο εξοπλισμό υπό την παραδοχή πως έχει υποβληθεί σε πλήρη έλεγχο των σημείων συγκολλήσεων,

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μελέτης το ελάχιστο απαιτούμενο πάχους κελύφους, t_{min} , που θα επιλεγεί για τον εκάστοτε εξοπλισμό θα είναι το μέγιστο μεταξύ των τιμών που υπολογίζονται από τις αντίστοιχες εξισώσεις,

Εφόσον υπολογιστεί το ελάχιστο απαιτούμενο πάχους κελύφους θα εφαρμοστεί ένας σταθερός όρος για αύξηση του πάχους, που λειτουργεί ως ασφάλεια, απέναντι σε φαινόμενα διάβρωσης, Ο όρος αυτός συμβολίζεται με ca (corrosion allowance) και επιλέγεται ίσος με $ca = 3,5 \text{ mm}$, Τελικά, το πάχος του κελύφους, t , για κάθε εξοπλισμό θα ισούται με:

$$t = t_{min} + ca$$

Από τον υπολογισμό του πάχους κελύφους, είναι δυνατό να υπολογιστεί ο όγκος μετάλλου, V_s , του εκάστοτε εξοπλισμού, οπότε για γνωστή πυκνότητα μετάλλου, ρ_s , είναι δυνατό να υπολογιστεί η μάζα του μετάλλου, m_s , μέσω της σχέσης:

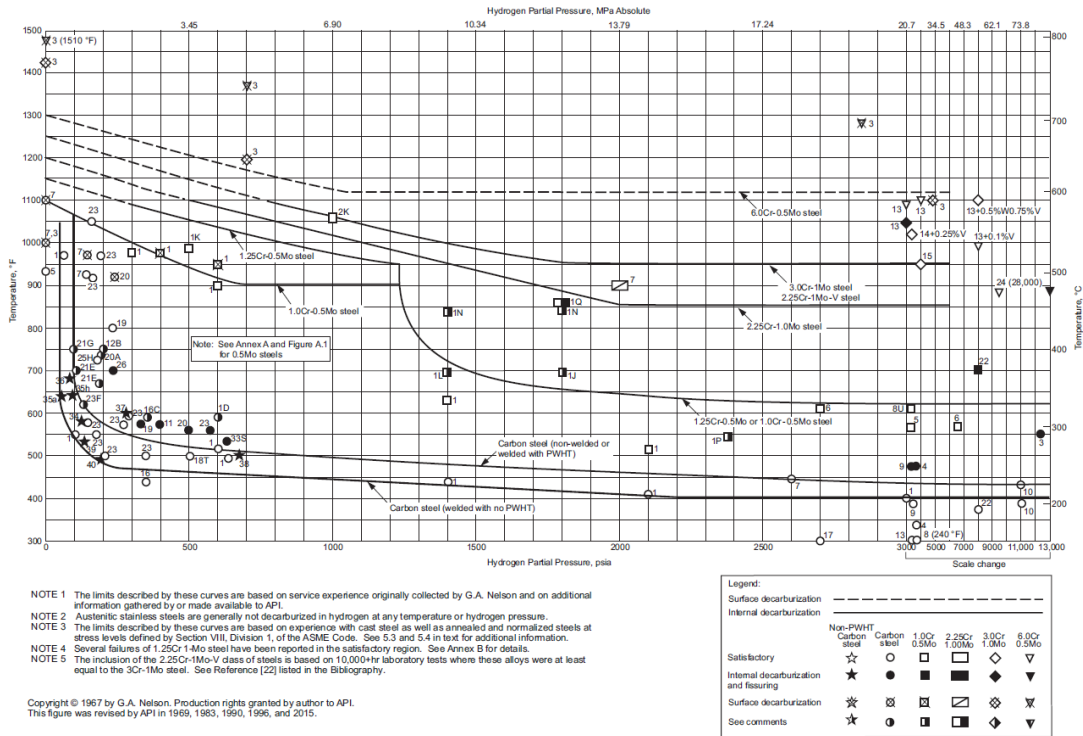
$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

Ένα από τα φαινόμενα που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή υλικού κατασκευής του εξοπλισμού όπου θα διακινείται ρεύμα που περιέχει αέριο υδρογόνο (H_2) είναι αυτό του High Temperature Hydrogen Attack (HTHA).

Η επιλογή του κατάλληλου υλικού εξοπλισμού θα γίνει με γνώμονα όσα προβλέπονται στο αρχείο API Recommended Practice 941, Το παρακάτω διάγραμμα προσφέρει βασικές πληροφορίες σχετικά με την επιλογή της σύστασης του υλικού κατασκευής εξοπλισμού που έρχεται σε επαφή με το H_2 συναρτήσει της πίεσης (P) και θερμοκρασίας (T) σχεδιασμού,

Αμμωνία ως φορέας υδρογόνου: Τεχνο-Οικονομική αξιολόγηση επένδυσης στηριζόμενη σε μοντέλο προσομοίωσης διεργασιών αξιοποιώντας βιώσιμες στρατηγικές

Γεώργιος Κ. Πατρίδας



Εικόνα 28. Διάγραμμα επιλογής υλικού για προστασία από ΗΑΗΤ συναρτήσει θερμοκρασίας και πίεσης σχεδιασμού του εξοπλισμού

Σημειώνεται πως δεδομένης της απαίτησης για επιλογή του κατάλληλου υλικού, ώστε να μην εμφανίζεται υποβάθμιση αυτού κατά την επαφή με το H₂ σε εξοπλισμό με μεγάλο πάχος κελύφους (μεγαλύτερο από την τιμή *ca*), δεν απαιτείται η χρήση του κράματος αυτού σε όλη τη μάζα του εξοπλισμού, αλλά υπό τη μορφή ενός εσωτερικού στρώματος (lining). Με τον τρόπο αυτό αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά το φαινόμενο ΗΤΗΑ ενώ παράλληλα, μειώνεται σημαντικά η συνολική αξία του εξοπλισμού.

Παράρτημα I.III – Πίνακες τιμών παράγοντα κόστους εγκατεστημένου εξοπλισμού

Οι παράγοντες που παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του εγκατεστημένου κόστους εξοπλισμού σύμφωνα με τις εξισώσεις E.I – E.III.

Πίνακας 20. Τιμές παράγοντα κόστους f_m για διάφορα μεταλλικά υλικά κατασκευής εξοπλισμού

Υλικό	f_m
Ανοξείδωτος χάλυβας	1,0
Αλουμίνιο και μπρούντζος	1,07
Χυτός χάλυβας	1,1
Ανοξείδωτος χάλυβας 304	1,3
Ανοξείδωτος χάλυβας 316	1,3
Ανοξείδωτος χάλυβας 321	1,5

Πίνακας 21. Τιμές διαφορετικών παραγόντων κόστους εξοπλισμού f_i και δευτερεύοντος κόστους για διαφορετικά διακινούμενα μέσα

Αντικείμενο	Ρευστά	Ρευστά - Στερεά
f_p	0,8	0,6
f_{er}	0,3	0,5
f_{el}	0,2	0,2
f_i	0,3	0,3
f_c	0,3	0,3
f_s	0,2	0,2
f_l	0,1	0,1
OS	0,3	0,4
DE	0,3	0,25
X	0,1	0,1