



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.) «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

### Μεταπτυχιακή (Διπλωματική) Εργασία

#### ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ

Κωνσταντίνα Ταγματάρχη

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Περιβάλλον  
και  
Ανάπτυξη

Μέλη Εξετ. Επιτροπής :

1. Σ. Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ
2. Ε. Κορωνάκη, Καθηγήτρια ΕΜΠ
3. Ε. Κακαράς, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.) «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

### Μεταπτυχιακή (Διπλωματική) Εργασία

#### ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ

Κωνσταντίνα Ταγματάρχη

Επιβλέπων: Σωτήριος Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ

Περιβάλλον  
και  
Ανάπτυξη

Μέλη Εξετ. Επιτροπής :

1. Σ. Καρέλλας, Καθηγητής ΕΜΠ
2. Ε. Κορωνάκη, Καθηγήτρια ΕΜΠ
3. Ε. Κακαράς, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2023

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η μελέτη αυτή εκπονήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας του Τμήματος "Περιβάλλον και Ανάπτυξη" της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής ΕΜΠ . Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή Σωτήριο Καρέλλα που μου ανέθεσε αυτή την εργασία, δίνοντάς μου τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο, την παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον συνάδελφο Σκορδούλια Νικόλαο, για τον χρόνο που μου αφιέρωσε, τη βοήθεια, τις οδηγίες και κατευθύνσεις που μου έδινε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας.

Ευχαριστώ πολύ τον Άκη για την πολύτιμη βοήθειά του.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ, όμως, το οφείλω προπαντός στην οικογένειά μου, για την υπομονή και τη στήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

Ευρετήριο Πινάκων.....	5
Ευρετήριο Εικόνων .....	6
Περίληψη.....	7
Abstract .....	8
Σύνοψη .....	9
Συνοτομογραφίες και σύμβολα .....	11
1. Εισαγωγή.....	13
1.1 Το πρόβλημα της συμβατικής ενέργειας και η στροφή της Ευρώπης προς μία «πράσινη» πολιτική.....	13
1.2 Βιομάζα ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας και βιομεθάνιο.....	13
1.3 Συνθετικό φυσικό αέριο: SNG .....	14
2. Θεωρητικό υπόβαθρο .....	16
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	16
2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση-Πιλοτικές Μονάδες Παραγωγής SNG.....	16
2.3 Ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ) .....	20
2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών ανάλυσης κύκλου ζωής για την παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου από ξύλο.....	22
2.6 Γενικά συμπεράσματα γύρω από την αξιολόγηση του SNG.....	38
3. Περιγραφή συστήματος και μεθοδολογία .....	39
3.1 Περιγραφή του συστήματος για παραγωγή SNG από ξύλο .....	39
3.2 Περιγραφή των διεργασιών, των συνθηκών και των ορίων του προς μελέτη συστήματος.....	45
3.3 Προσομοίωση της AKZ σε λογισμικό: SimaPro.....	50
4. Εφαρμογή SimaPro στην περίπτωση μελέτης και συμπεράσματα.....	52
4.1 Μεθοδολογία.....	52
4.2 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα.....	53
Βιβλιογραφία.....	56

## Ευρετήριο Πινάκων

<b>Πίνακας 1.</b> Απόσταση οδήγησης και σχετικοί τύποι δρόμων, ταχύτητα και κόστος.....	26
<b>Πίνακας 2.</b> Κατηγορίες επιπτώσεων επιπέδου «midpoint».....	48
<b>Πίνακας 3.</b> Θερμοκρασία, πίεση, ρυθμός ροής μάζας, ρυθμός ροής εξέργειας και ειδική εξέργεια των ρευμάτων της επεξεργασμένης διεργασίας ξύλου σε SNG σε τυπικές συνθήκες διεργασίας (πίεση αεριοποιητή 7 bar, πίεση μεθανίωσης 20 bar, θερμοκρασία 1ου αντιδραστήρα μεθανίωσης 610 °C).....	49
<b>Πίνακας 4.</b> Ιδιότητες της πρώτης ύλης.....	49
<b>Πίνακας 5.</b> Τυπική σύνθεση SNG, απόδοση και εξεργειακή απόδοση των εργοστασίων σε δείκτη Wobbe 44 MJ/Nm <sup>3</sup> .....	50

## Ευρετήριο Εικόνων

<b>Εικόνα 1.</b> Μονάδα ανάπτυξης διεργασιών 1 MWSNG (PDU) στο Güssing [13].....	17
<b>Εικόνα 2.</b> Διάγραμμα ροής του συστήματος θέρμανσης SNG με βάση το ξύλο και αναλυτικό διάγραμμα ροής της παραγωγής SNG [14] .....	19
<b>Εικόνα 3.</b> Σύστημα ξήρανσης βιομάζας με χρήση αέρα [15].....	20
<b>Εικόνα 4.</b> Όρια συστήματος που τίθενται υπό ανάλυση κύκλου ζωής [15] .....	22
<b>Εικόνα 5.</b> Κόστος παραγωγής SNG για τη σύζευξη PtG με διαφορετικές πηγές CO <sub>2</sub> [21] ...	32
<b>Εικόνα 6.</b> Σύγκριση SNG και συστημάτων αναφοράς [12].....	34
<b>Εικόνα 7.</b> Διάγραμμα ροής του συστήματος θέρμανσης SNG με βάση το ξύλο.....	39
<b>Εικόνα 8.</b> Διάγραμμα ροής της εσωτερικής διαδικασίας παραγωγής SNG [26] .....	40
<b>Εικόνα 9.</b> Σύστημα παραγωγής SNG από αεριοποιητή παρασυρόμενης ροής [26].....	42
<b>Εικόνα 10.</b> Σύστημα παραγωγής SNG από αεριοποιητή CFB [26].....	43
<b>Εικόνα 11.</b> Σύστημα παραγωγής SNG από αεριοποιητή Allothermal [26].....	44
<b>Εικόνα 12.</b> Διασύνδεση κατηγοριών επιπτώσεων μεθοδολογίας ReCiPe 2016 [15] .....	47
<b>Εικόνα 13.</b> Διάγραμμα συμβολής διαδικασιών στην παραγωγή SNG .....	53
<b>Εικόνα 14.</b> Κατηγορίες επιπτώσεων-midpoint level .....	54

## Περίληψη

Εξαιτίας της υπερθέρμανσης του πλανήτη και άλλων σημαντικών προβλημάτων που έχουν κάνει την εμφάνισή τους εδώ και αρκετά χρόνια όσον αφορά το περιβάλλον, γίνεται αναγκαία η λήψη ενεργειών για την αντιμετώπιση αυτών. Έτσι λοιπόν, η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί ένα κομβικό σημείο στην προσπάθεια αυτή. Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία ασχολείται με την παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου από βιομάζα και συγκεκριμένα από ξύλο, πραγματοποιώντας την μεθοδολογία ανάλυσης κύκλου ζωής. Στόχος λοιπόν, είναι η αξιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος, ώστε να κριθεί αν και πότε είναι κατάλληλος τρόπος παραγωγής ενέργειας.

Η δομή της εργασίας παρουσιάζεται ως εξής. Αρχικά παρουσιάζεται το ευρύτερο πρόβλημα που οδήγησε σε ανάπτυξη τέτοιων τεχνολογιών καθώς και οι εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες. Στη συνέχεια γίνεται μία διεξοδική βιβλιογραφική ανασκόπηση αξιολόγησης τέτοιων εγκαταστάσεων παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου, με σκοπό το σχηματισμό μιας ευρύτερης εικόνας για την καταλληλότητα τέτοιων συστημάτων, καθώς πραγματοποιείται και αναλυτική περιγραφή του συστήματος που εξετάζεται. Τέλος γίνεται εφαρμογή στην περίπτωση μελέτης της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν.

Λεπτομερέστερα, γίνεται μελέτη ενός δυνητικού εργοστασίου στη Φινλανδία όπου πραγματοποιείται παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου από ξύλο. Η διαδικασία παραγωγής γίνεται με ανοδική αλλοθερμική αεριοποίηση. Η προσομοίωση του συστήματος αυτού, με σκοπό την ανάδειξη αποτελεσμάτων σχετικά με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που θα είχε μία τέτοια διαδικασία, πραγματοποιείται στο λογισμικό SimaPro.

Τέλος, παρουσιάζεται το γενικό συμπέρασμα σχετικά με το σύστημα παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου από ξύλο, δηλαδή το γεγονός πως αποτελεί μία φιλική λύση ως προς το περιβάλλον ειδικά συγκριτικά με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, αλλά και η αμφίβολη ενεργειακή του απόδοση. Τέλος, προκύπτει πως αποτελεί μία συμφέρουσα λύση ως καύσιμο για τις μεταφορές.

## Abstract

Due to global warming and other major environmental problems that have been emerging for several years now, it is necessary to take action to deal with them. Thus, the shift to renewable energy sources is a pivotal point in this effort. This master diploma thesis deals with the production of synthetic natural gas from biomass and specifically from wood, based on the methodology of Life Cycle Analysis (LCA). The goal, then, is the proper evaluation of such a system, in order to decide whether it is an efficient way of producing energy or not.

The structure of the diploma thesis is presented as follows. Initially, the broader problems that led to the development of such technologies as well as the state-of-the-art technologies are presented. Then a thorough bibliographic review of the assessment of such synthetic natural gas production facilities is conducted, with the aim of forming a broader picture of the suitability of such systems, as well as a detailed description of the system under consideration is presented. Finally, an application is made to the case study of the present master's thesis and the results and conclusions obtained are presented.

Next, a potential plant in Finland is being studied. There, synthetic natural gas is produced from wood. The production process is done by anodic allothermal gasification. The simulation of this system, in order to highlight results regarding the environmental impact that such a process would have, is conducted in the SimaPro software.

Finally, the general conclusion regarding synthetic natural gas is presented, i.e., whether it is environmentally friendly especially compared to conventional energy methods, but also about its doubtful energy performance. Finally, it turns out that it is an advantageous solution as a fuel for transport.



## Σύνοψη

Η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι δύο από τα παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα που εμφανίζονται όλο και πιο απειλητικά ως προς το περιβάλλον και τον ίδιο τον άνθρωπο. Φαίνεται ότι η ανθρώπινη παρέμβαση έχει στοιχίσει πολύ στην ισορροπία του περιβάλλοντος και πλέον υπάρχει μία συνεχής ανησυχία για την πρακτική καινούριων λύσεων που θα αντιμετωπίσουν τα προβλήματα που ανακύπτουν. Ιδιαίτερα η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει νόμους, στρατηγικές και στόχους για την επίτευξη μίας όσο γίνεται πιο πράσινης πραγματικότητας.

Μία σημαντική κατηγορία λύσεων που οδηγεί προς αυτή τη κατεύθυνση είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το φυσικό αέριο παρόλο που δεν αποτελεί μία καθαρά ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, θεωρείται ένα καύσιμο πιο φιλικό προς το περιβάλλον σε σχέση με άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια όμως, έχει αναπτυχθεί και μία καινούρια μορφή «ανανεώσιμου» φυσικού αερίου, το λεγόμενο συνθετικό φυσικό αέριο που προέρχεται από βιομάζα.

Σε αυτή τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, θα μελετηθεί το σύστημα παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου από βιομάζα και συγκεκριμένα από ξύλο. Η διαδικασία παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου περιλαμβάνει κυρίως τα εξής στάδια: 1) η βιομάζα υπόκειται σε αεριοποίηση για την παραγωγή αερίου σύνθεσης και 2) ακολουθεί μεθανίωση του αερίου σύνθεσης σε SNG.

Στην παρούσα λοιπόν μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, το ενδιαφέρον στράφηκε στο να πραγματοποιηθεί μία ανάλυση κύκλου ζωής για την παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου από βιομάζα και συγκεκριμένα από ξύλο. Η ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ) αφορά την αξιολόγηση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μίας υπηρεσίας, δηλαδή την αξιολόγηση του κατά τη διάρκεια των σταδίων εξαγωγής, κατασκευής, λειτουργίας και αποσυναρμολόγησης, ή μπορεί να αφορά και την αξιολόγηση κάποιων σταδίων από αυτά. Η AKZ σαν στόχο έχει να καταδεικνύει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στην περίπτωση μελέτης που επικεντρώθηκε η συγκεκριμένη εργασία η ανάλυση κύκλου ζωής αρέστηκε στην αξιολόγηση των σταδίων που έχουν να κάνουν με την βιομηχανοποίηση του προϊόντος, δηλαδή δεν ασχολείται με τα στάδια μετά την παραγωγή του αερίου. Η AKZ θα πραγματοποιηθεί μετά από την εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν το case study (το οποίο αφορά μία μονάδα παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου στην Φινλανδία που λειτουργεί με ανοδική αλλοθερμική αεριοποίηση) στο λογισμικό προσομοίωσης που επιλέχθηκε, το SimaPro. Μετά την ενέργεια αυτή θα παρουσιαστούν αποτελέσματα σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος αυτού, τα οποία αποτελέσματα και αναλύονται. Στα αποτελέσματα φαίνεται κατά πόσο συμβάλλει κάθε μία από τις διεργασίες που απαρτίζουν το σύστημα αυτό (δηλαδή η διαδικασία παραγωγής ροκανιδίων από το ξύλο που συλλέχθηκε, η διαδικασία της αεριοποίησης και η διαδικασία της

μεθανίωσης) στα περιβαλλοντικά προβλήματα. Με την προσομοίωση αυτή γίνεται σαφές πως ακόμα και ένα τέτοιο σύστημα έχει μεγάλο μερίδιο ευθύνης για άμεσες και έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οπότε η απόφαση εγκατάστασης μίας τέτοιας μονάδας σε μία περιοχή είναι δύσκολη και πολυδιάστατη.

Τέλος, προκύπτουν και κάποια γενικά συμπεράσματα σχετικά με την καταλληλότητα του συνθετικού φυσικού αερίου και με το αν τέτοια συστήματα είναι συμφέρον να υπάρχουν και να λειτουργούν. Αν και η εικόνα της καταλληλότητας αυτών των συστημάτων μοιάζει να είναι θολή και να εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, υπάρχει η πεποίθηση πως το αέριο αυτό αποτελεί μία καλή και συμφέρουσα λύση για σκοπούς μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου θεωρούνται πιο συμφέροντα από τα συμβατικά συστήματα (θέρμανση από φυσικό αέριο, θέρμανση με χρήση πετρελαίου, πυρηνικός σταθμός ηλεκτροπαραγωγής, σταθμός ηλεκτροπαραγωγής από φυσικό αέριο, βενζίνη, ντίζελ) όσον αφορά την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και την υπερθέρμανση του πλανήτη. Η σύγκριση όμως αλλάζει όταν κριτήριο για την αξιολόγηση αποτελέσουν προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου που έχουν να κάνουν με τα αναπνευστικά όργανα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των εκπομπών  $\text{NO}_x$ , των οποίων σημαντική πηγή εκπομπής αποτελεί η παραγωγή SNG. Στην μεταφορά, όπως ήδη ειπώθηκε, τα συστήματα SNG φαίνεται να αποτελούν μία καλή και αποδοτική επιλογή, αφού δεν χρειάζεται κάποια επιπλέον διαδικασία μετατροπής, που να μην υπάρχει επίσης όταν χρησιμοποιούνται άλλα καύσιμα μεταφοράς που προέρχονται από βιομάζα.

## Συντομογραφίες και σύμβολα

CO<sub>2</sub> : Διοξείδιο του άνθρακα

ΕΕ : Ευρωπαϊκή Ένωση

SNG : Συνθετικό φυσικό αέριο

NG : Φυσικό Αέριο

PtG : Power-to-Gas

FICFB : Circulating Fluid Bed

NGVs : Οχήματα που μεταφέρουν Φυσικό αέριο

PDU : Μονάδα Ανάπτυξης Διαδικασιών

H<sub>2</sub> : Υδρογόνο

NH<sub>4</sub> : Αμμώνιο

Char : Μη μετατρεπόμενη βιομάζα

CO : Μονοξείδιο του άνθρακα

CH<sub>4</sub> : Μεθάνιο

H<sub>2</sub>S : υδρόθειο

ZnO : οξείδιο του ψευδαργύρου

ZnS : θειούχος ψευδάργυρος

SO<sub>2</sub> : διοξείδιο του θείου

H<sub>2</sub>O : Νερό

AKZ : Ανάλυση κύκλου ζωής

LCIA : Ανάλυση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής

LCC : Κόστος κύκλου ζωής

CFs : Παράγοντες χαρακτηρισμού

HDF : Παράγοντας ανθρώπινης βλάβης

GWP : Παγκόσμιο δυναμικό θέρμανσης

H/A : Οικολογικός δείκτης 99

NFI3 : National Forest Inventory

ESA : Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος

RME : Μεθυλεστέρα κράμβης

FLH : Ώρες πλήρους λειτουργίας

GHG : Αέρια του θερμοκηπίου

EI'99 : Οικολογικός δείκτης 99

ES'06 : Οικολογική σπανιότητα 2006

NO<sub>x</sub> : Οξειδία του αζώτου

PM : Αιωρούμενα Σωματίδια

CFB : Κυκλοφορούσα ρευστοποιημένη κλίνη

OC : Συλλέκτης

OA : Απορροφητής

OS : Απογυμνωτής

MC : Τμήμα καύσης

MR : Αντιδραστήρας μεθανίωσης

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Το πρόβλημα της συμβατικής ενέργειας και η στροφή της Ευρώπης προς μία «πράσινη» πολιτική

Η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας παρέχεται, στο μεγαλύτερο μέρος από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο. Η κατανάλωση αυτή όμως ενέχει σημαντικά και παγκόσμια προβλήματα, καθώς με τη χρήση ορυκτών καυσίμων συμβαίνει μία γρήγορη εξάντληση και ενέχει κινδύνους για το περιβάλλον εξαιτίας της υπερθέρμανσης του πλανήτη από τις εκπομπές υψηλές σε CO<sub>2</sub> που απελευθερώνονται με τη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Η απανθρακοποίηση λοιπόν, που αφορά την αφαίρεση ή τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) στην ατμόσφαιρα που προκύπτουν από ανθρώπινη δραστηριότητα, είναι πλέον αναγκαία και μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη μετάβαση στη χρήση πηγών ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Επομένως, έχει γίνει ξεκάθαρο πως πρέπει να αναπτυχθούν εναλλακτικοί τρόποι παροχής ενέργειας, οι λεγόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [1,2].

Εν γένει, η Ευρωπαϊκή επιτροπή έχει θέσει σαν στόχο να αντικαταστήσει το 20% της ευρωπαϊκής κατανάλωσης καυσίμου από βιοκαύσιμα, αντικαθιστώντας εν μέρει το φυσικό αέριο με βιομεθάνιο [3]. Άλλωστε, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει νόμους και οδηγίες προς την κατεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και προς την επίτευξη της ουδετερότητας του άνθρακα ως το 2050. Σύμφωνα με την οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Renewable Energy Directive, Repower EU), η οποία αναθεωρήθηκε το 2018 και είναι νομικά δεσμευτική από τον Ιούνιο του 2021, ο στόχος είναι να διασφαλιστεί η απορρόφηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον τομέα των μεταφορών, στη θέρμανση και στη ψύξη, καθώς και η υποστήριξη αυτών και των δικαιωμάτων παραγωγής και κατανάλωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πρέπει να μελετηθούν επίσης τα κριτήρια βιωσιμότητας για τη βιομάζα και η οικονομική πλευρά αυτών (European Commission) [1].

## 1.2 Βιομάζα ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας και βιομεθάνιο

Μία πηγή ανανεώσιμης ενέργειας που αναπτύσσεται τα τελευταία χρόνια είναι η βιομάζα, κυρίως λόγω των ανανεώσιμων δυνατοτήτων της και του ουδέτερου της αντίκτυπου σε CO<sub>2</sub>. Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιείται για την παραγωγή διαφόρων μορφών ενέργειας, όπως ηλεκτρική ενέργεια ή βιοκαύσιμα με βάση την αεριοποίηση βιομάζας ως την πιο ελπιδοφόρα μέθοδο μετατροπής [2]. Πολλές Ευρωπαϊκές χώρες επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν την εγχώρια βιομάζα τους για την παραγωγή ενέργειας

προκειμένου οι εκπομπές CO<sub>2</sub> να μετριαστούν και να περιοριστούν αν όχι να διακοπουν οι εισαγωγές της ενέργειας [3].

Αυτό συμβαίνει γιατί η βιομάζα παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Η βιομάζα, σε αντίθεση με τις αναφερθείσες ανανεώσιμες πηγές, δεν εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες ώστε να είναι αποδοτική, δεν παρουσιάζει δηλαδή διακύμανση ως προς την απόδοση ισχύος, ανάλογα παραδείγματος χάρη με την ηλιοφάνεια μιας περιοχής μια δεδομένη χρονική περίοδο. Λόγω αυτού ακριβώς του πλεονεκτήματος της βιομάζας σε σχέση με τις άλλες, δεν είναι απαραίτητη και η αποθήκευση της παραγόμενης και πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας για μετέπειτα αξιοποίησή της [4]. Τέλος, η βιομάζα διασφαλίζει ενεργειακή αυτονομία, προάγοντας τη διαδικασία της απόλυτης αξιοποίησης των υλικών. Ένα μεγάλο μέρος της βιομάζας είναι λιγνοκυτταρινική (κυρίως ξύλο) και κυρίως χρησιμοποιείται για θέρμανση, για παράδειγμα κατασκευάζονται οι συσκευές θέρμανσης με pellet ξύλου [3].

Βέβαια, η βιομάζα με τη σειρά της έχει κάποια μειονεκτήματα. Το κόστος για τη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευση της αλλά και την μετατροπή της σε ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια είναι αρκετά υψηλό, ενώ το ενεργειακό της περιεχόμενο είναι μικρό σε σχέση με την ισόποση μάζα καυσίμου απολιθωμάτων [4].

Το βιομεθάνιο, αποκτάται μέσα από ορισμένες διαδικασίες αναβάθμισης του βιοαερίου. Συγκεκριμένα στην ΕΕ, η παραγωγή βιομεθανίου έχει αυξηθεί, όπου μέσω αυτής της αύξησης ενθαρρύνονται ακόμα περισσότερο οι πολιτικές για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με στόχο την ενεργειακή ασφάλεια και αυτάρκεια και την προστασία του περιβάλλοντος. Η Ευρώπη είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός βιομεθανίου παγκοσμίως για χρήση είτε ως καύσιμο οχημάτων είτε για έγχυση στο δίκτυο φυσικού αερίου [5].

### 1.3 Συνθετικό φυσικό αέριο: SNG

Το φυσικό αέριο από την άλλη, είναι μία τεράστια πηγή ενέργειας όσον αφορά την ηλεκτρική ενέργεια και τα συστήματα θέρμανσης, αλλά πλέον όλο και περισσότερο και την αυτοκινητοβιομηχανία [2]. Το φυσικό αέριο θεωρείται επίσης το καύσιμο γεφύρωσης για τη μετάβαση σε έναν κόσμο περιορισμένων εκπομπών άνθρακα με μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [6].

Όμως, οι πηγές του φυσικού αερίου είναι περιορισμένες, γεγονός που έχει οδηγήσει πολλά προγράμματα να αναπτύξουν τη δυνατότητα της παραγωγής του φυσικού αερίου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό το φυσικό αέριο πιο συγκεκριμένα ονομάζεται SNG [2].

Το συνθετικό φυσικό αέριο περιγράφει μια ποικιλία εναλλακτικών φυσικών αερίων που είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά σε σύνθεση και ιδιότητες με το φυσικό αέριο. Το SNG μπορεί να προέρχεται από άνθρακα, βιομάζα (απόβλητα) ή να συντίθεται με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [7]. Έχει ακόμα αξιοσημείωτες δυνατότητες να αποθηκεύει πολλαπλούς όγκους φυσικού αερίου σε συμπαγείς ένυδρους κρυστάλλους που προσφέρουν την ασφαλέστερη και πιο φιλική

περιβαλλοντικά λειτουργία αποθήκευσης NG [6]. Αυτή η αποθήκευση φυσικού αερίου μπορεί να καταστεί κατάλληλη για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και συστήματα πολυπαραγωγής, αφού λόγω της ολοένα και πιο έντονης παρουσίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά και η αιολική ενέργεια στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η ζήτηση για εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε χωρικές και χρονικές αποστάσεις αυξάνεται. Οπότε, είναι απαραίτητη και η εποχιακή αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας [2]. Η τεχνολογία αυτή εκτός από την αποθήκευση του φυσικού αερίου συμβάλλει και στη μεταφορά του. Η ανάκτηση ενέργειας από το SNG είναι πολύ εύκολη χωρίς να υπάρχουν σχεδόν καθόλου απώλειες κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης διαδικασίας [6]. Άλλο ένα σημαντικό προτέρημα του SNG, είναι ότι αυτό μπορεί να μεταφερθεί και να χρησιμοποιηθεί σε υπάρχουσες υποδομές φυσικού αερίου και σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση φυσικού αερίου. Τέλος, η ύπαρξη του ενισχύει τις άλλες τεχνολογίες που βασίζονται στην αεριοποίηση [8]. Το συνθετικό αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία θερμού νερού, ατμού και ηλεκτρισμού.

Σύμφωνα με το Νορβηγικό Συμβούλιο Προσφύγων ( NRC, 2020) για τη χρονιά 2020 η υποδομή για τη μετατροπή άνθρακα ή βιομάζας σε SNG υπάρχει σε όλες τις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά. Επί του διαστήματος αυτού, ο Καναδάς είναι ο βος μεγαλύτερος εξαγωγέας φυσικού αερίου και ο 4ος μεγαλύτερος παραγωγός φυσικού αερίου στον κόσμο, όπου οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ρωσία και το Ιράν κατατάσσονται μπροστά από την άποψη της παραγωγής [9].

Στο πλαίσιο της ανάπτυξης ευκαιριών και τεχνολογιών για την επέκταση της πράσινης ενέργειας και την όσο καλύτερη αξιοποίηση της, έχει αναπτυχθεί λοιπόν η τεχνολογία Power-to-Gas, που είναι ένας ενδεδειγμένος τρόπος παραγωγής SNG. Πρόκειται για μία τεχνολογική αλυσίδα που μετατρέπει την περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας σε αέριο καύσιμο, όπως υδρογόνο ή μεθάνιο. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο για αποθήκευση της ενέργειας, αλλά και για την εξασφάλιση της εξισορρόπησης των δικτύων ηλεκτρικού και φυσικού αερίου. Λόγω αυτής της δυνατότητας μετατροπής μιας ενεργειακής μορφής σε μία άλλη, τα συστήματα PtG έχουν τη δυνατότητα να διευκολύνουν την κατανομή της ενέργειας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Ακόμα, αυξάνεται η ενεργειακή ασφάλεια του συστήματος και το υδρογόνο και το μεθάνιο που παράγονται στην PtG τεχνολογία θεωρούνται καθαρά αέρια, με αποτέλεσμα να υπάρχει μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. [10]. Παρόλα αυτά, στο σενάριο της Καλιφόρνιας είχε προβλεφθεί ότι το προβλεπόμενο κόστος του SNG από την PtG το 2050 θα είναι μεν συγκρίσιμο, αλλά ακόμα και τότε υψηλότερο από το κόστος του συμβατικού φυσικού αερίου δεδομένου του χαμηλού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με το χαμηλό κεφαλαιουχικό κόστος ηλεκτρολύτη [11].

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας γίνεται μελέτη για την παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου από βιομάζα και πιο συγκεκριμένα από ξύλο. Σκοπός της διπλωματικής είναι η διεξαγωγή της ανάλυσης κύκλου ζωής της παραγωγής αυτής για κάποια συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Όπως έχει φανεί από προσομοιώσεις που έχουν γίνει και από τις πρώτες εγκαταστάσεις επίδειξης, η μετατροπή του ξύλου σε SNG μπορεί να επιτύχει σημαντικά υψηλότερη απόδοση από τη μετατροπή του σε υγρά καύσιμα [3].



## 2. Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το συνθετικό φυσικό αέριο SNG που παράγεται από ξύλο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και για μεταφορά. Το SNG, πιο αναλυτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λέβητα φυσικού αερίου οικιακής θέρμανσης, σε εργοστάσιο, όπου χρησιμοποιείται εσωτερικά σε μικτό κύκλο, σε μια μικρή μονάδα όπου υπάρχει συμπαραγωγή θερμότητας και ισχύος για μεταφορά σε αυτοκίνητο φυσικού αερίου. Η θερμότητα διεργασίας που ανακτάται κατά την παραγωγή SNG χρησιμοποιείται σε συστήματα τηλεθέρμανσης και σε νοσοκομεία, που απαιτούν ζέστη όλο το χρόνο. Διαφορετικά αυτή η ζέστη θα παραγόταν με λέβητα φυσικού αερίου [12].

Για να παραχθεί λοιπόν SNG, πρέπει να ακολουθηθεί μία διαδικασία που περιλαμβάνει την αεριοποίηση βιομάζας.

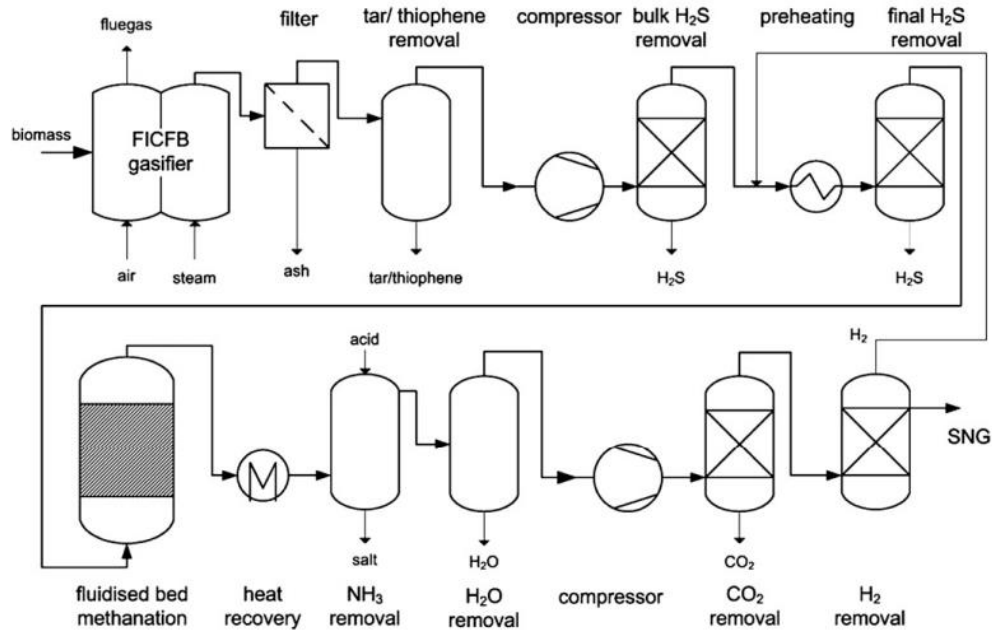
### 2.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση-Πιλοτικές Μονάδες Παραγωγής SNG

Η τεχνολογία που ακολουθείται για την αεριοποίηση της βιομάζας στο υπό μελέτη σύστημα είναι η προηγμένη τεχνολογία της αλλοθερμικής ή έμμεσης αεριοποίησης με αεριοποιητή ανοδικού ρεύματος και αεριοποιητή Fast Internal Circulating Fluid Bed (FICFB). Ο αεριοποιητής FICFB αποτελείται από δύο ζώνες, οι οποίες είναι η ζώνη αεριοποίησης και η ζώνη καύσης. Η ζώνη καύσης παρέχει θερμότητα μέσω του υλικού της κλίνης στη ζώνη αεριοποίησης. Ο ατμός χρησιμοποιείται ως παράγοντας αεριοποίησης στη ζώνη αεριοποίησης.

Για την καλύτερη κατανόηση της προηγμένης αυτής τεχνολογίας, θα παρουσιαστεί μία μονάδα, η κατασκευή της οποίας είχε ξεκινήσει με σκοπό τη μετατροπή των αποβλήτων ξύλου (κορυφές δέντρων, ρίζες και κλαδιά) σε 1 TWh bioSNG (συνθετικό φυσικό αέριο βιολογικής προέλευσης) ετησίως, στο Γκέτεμποργκ της Σουηδίας. Το εργοστάσιο ονομάζεται GoBiGas και προβλέπεται ως εγκατάσταση FICFB των 100 MW<sub>SNG</sub> με δύο μονές κλίνες με το πρώτο στάδιο του έργου να είναι μια εγκατάσταση των 20 MW<sub>SNG</sub> και άλλες εγκαταστάσεις των 80 MW<sub>SNG</sub>. Η εταιρεία πίσω από την GoBiGas, η Göteborg Energi, διαθέτει ένα δίκτυο τηλεθέρμανσης μήκους 1000 km που μπορεί να προμηθεύει το 90% όλων των σπιτιών στο Γκέτεμποργκ με θέρμανση και ζεστό νερό. Σε συνδυασμό με την θυγατρική εταιρεία Göteborg Energi Gas AB, όπου έχει στην κατοχή και στον έλεγχο της ένα δίκτυο φυσικού αερίου στην πόλη, η υποδομή για την αξιοποίηση του παραγόμενου SNG είναι κατάλληλη για το έργο. Η ποσότητα της 1 TWh SNG από το εργοστάσιο GoBiGas θα μπορούσε να αντικαταστήσει το 30% της τρέχουσας κατανάλωσης φυσικού αερίου, ή σε καύσιμο σχεδόν 75.000 οχήματα που μεταφέρουν φυσικό αέριο (NGVs). Ο στόχος είναι να



φτάσει το 65% σε απόδοση μετατροπής της βιομάζας σε SNG, με συνολική ενεργειακή απόδοση άνω του 90% συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής της τηλεθέρμανσης. Ο αεριοποιητής Güssing έχει εξοπλιστεί με μια Μονάδα Ανάπτυξης Διαδικασιών (PDU) χωρητικότητας 1 MW<sub>SNG</sub> για τη συμπαραγωγή bio-SNG και τηλεθέρμανσης. Το PDU επιτρέπει για επίδειξη της πλήρους διαδικασίας παραγωγής bio-SNG συμπεριλαμβανομένης της αεριοποίησης, καθαρισμό αερίου, μεθανίωση και αναβάθμιση αερίου. Η διαδικασία PDU παρουσιάζεται παρακάτω.



**Εικόνα 1.** Μονάδα ανάπτυξης διεργασιών 1 MWSNG (PDU) στο Güssing [13]

Ο αντιδραστήρας διπλής κλίνης FICFB PDU αποτελείται από έναν αεριοποιητή ρευστοποιημένης κλίνης φυσαλίδας και από μια κυκλοφορούσα ρευστοποιημένη κλίνη με θερμοκρασία γύρω στους 850 °C στη ζώνη αεριοποίησης ως καυστήρα. Αυτός ο συνδυασμός έχει αναγνωριστεί ως ο πιο αποτελεσματικός συνδυασμός ρευστοποιημένων κλινών σε κατασκευή δυο κλινών. Ο καθαρισμός αερίου αποτελείται από ένα φίλτρο και μια πλυντρίδα για την αφαίρεση της σκόνης και πίσσας και από άγνωστες μονάδες για την αφαίρεση θειούχων συστατικών, βαρέων υδρογονανθράκων και αρωματικών ενώσεων. Η μεθανοποίηση συμβαίνει σε ένα σύστημα τεχνολογίας μεθανοποίησης ισοθερμικής ρευστοποιημένης κλίνης. Τέλος, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub> και νερό αφαιρούνται/κυκλοφορούν ξανά πριν το αέριο να εγχυθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου [13].

Στη συνέχεια, θα γίνει μία πιο παραστατική περιγραφή της διαδικασίας μετατροπής του ξύλου σε αέριο. Πιο συγκεκριμένα, η χώρα μελέτης για την περιγραφή αυτή είναι η Ελβετία. Σημείο έναρξης της παραγωγικής διαδικασίας είναι η παραγωγή ροκανιδιών με θρυμματιστή από υπολειμματικά ξύλα στο δάσος. Θεωρείται ότι παραδίδονται στο εργοστάσιο με υγρασία 50% σε μία μέση απόσταση μεταφοράς πάνω από 25 χλμ. με φορτηγό. Το εργοστάσιο που παράγει SNG έχει αναμενόμενη

παραγωγική ικανότητα 28 MWth-SNG ( που αντιστοιχεί σε 50 MWth ενέργεια εισόδου ξύλου) και λειτουργεί περίπου 700 ώρες/έτος.

Η παραγωγή μεθανίου από ξύλο, όπως αναφέρθηκε, αποτελείται από δύο ξεχωριστά στάδια, τα οποία είναι η αεριοποίηση του ξύλου και η μεθανοποίηση του βιοαερίου ακολουθούμενες από καθαρισμό και διαδικασίες προετοιμασίας. Έχει ληφθεί επίσης υπόψη μία πιλοτική μονάδα CHP στην Αυστρία για το τμήμα αεριοποίησης όσον αφορά την αποτελεσματικότητα, τη λειτουργική χρήση της ενέργειας, την κατανάλωση πόρων και τις εκπομπές. Σχετικά με το τμήμα μεθανίωσης έχει διεξαχθεί μία συνεχιζόμενη έρευνα PSI χρησιμοποιώντας έναν πιλοτικό αντιδραστήρα 10 kW. Αυτά αντιπροσωπεύουν τις τρέχουσες τιμές αναφοράς της state-of-the-art τεχνολογίας.

Η αεριοποίηση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το Fast Internally Circulating Fluidized Bed (FICFB). Στο πρώτο τμήμα του αντιδραστήρα η βιομάζα αεριοποιείται με ατμό. Η μη μετατρέπόμενη βιομάζα (char) μεταφέρεται στο δεύτερο τμήμα βιομηχανικού ορυκτού ολιβίνης, όπου και καίγεται πλήρως με αέρα. Η θερμότητα που απελευθερώνεται από αυτό μεταφέρεται μαζί με το ορυκτό ολιβίνης πίσω στο πρώτο τμήμα, όπου διατηρεί την αεριοποίηση με ατμό. Το προϊόν αέριο αποτελείται από περίπου 30-45% H<sub>2</sub>, 20-30% CO, 15-25% CO<sub>2</sub>, 8-12% CH<sub>4</sub> και 1-3% άζωτο. Τα δεδομένα εκπομπών που χρησιμοποιήθηκαν είναι μέσες τιμές που μετρήθηκαν στις 21 Φεβρουαρίου 2004 στην Αυστρία. Η απόδοση του ψυχρού αερίου ορίζεται ως:

$$\text{απόδοση ψυχρού αερίου} = \frac{(\text{παραγωγή αερίου καυσίμου}) \text{ th}}{(\text{εισαγόμενη βιομάζα}) \text{ th}}$$

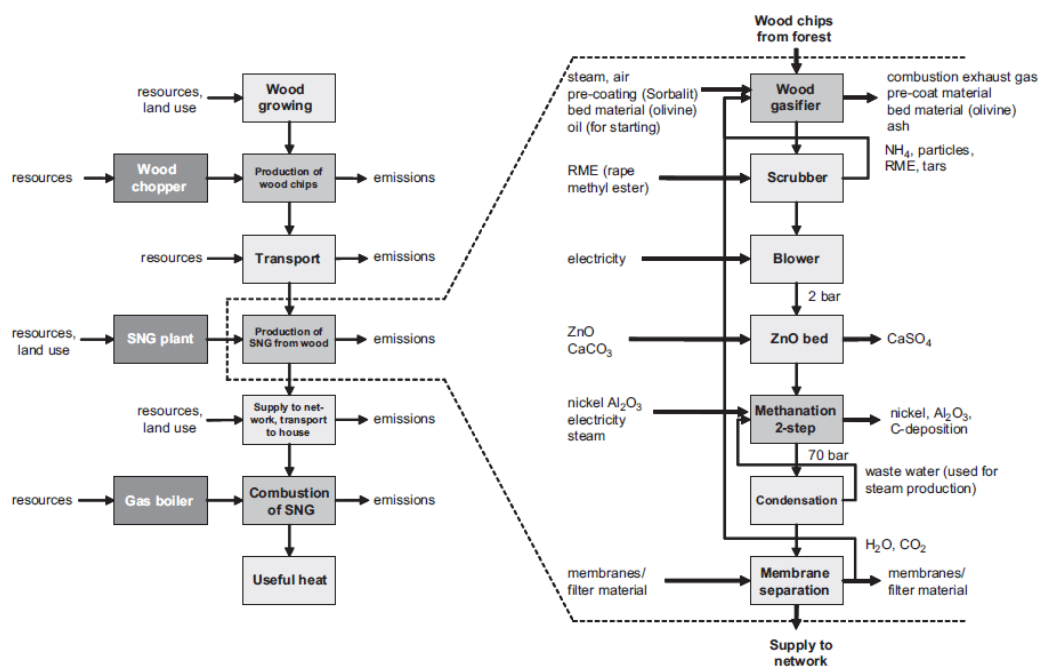
και εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία αεριοποίησης και την υγρασία της βιομάζας. Σε θερμοκρασία αεριοποίησης 850 °C και υγρασία ξύλου 15% η απόδοση του κρύου αερίου είναι περίπου 73%, που είναι μία κάπως αισιόδοξη τιμή. Χαμηλώνοντας τη θερμοκρασία και στεγνώνοντας τα ροκανίδια αυξάνεται η αποδοτικότητα. Από την αεριοποίηση, καθώς και από το εξώθερμο μέρος της μεθανίωσης, η απόβλητη θερμότητα είναι διαθέσιμη, η οποία είναι επαρκής για το στέγνωμα του ξύλου στην επιθυμητή υγρασία 15%, απαιτώντας ισχύ περίπου ίση με 4 MWth.

Ανεπιθύμητα ίχνη πίσσας (1,5- 2,5 g/Nm<sup>3</sup>), αμμώνιο (περίπου 1000 ppm) και σκόνη (10-20 g/Nm<sup>3</sup>) αφαιρούνται από το αέριο με πλυντρίδες και τροφοδοτούνται πίσω στον αεριοποιητή. Στη συνέχεια, το αέριο συμπιέζεται σε περίπου 2 bar από έναν φυσητήρα. Το αέριο εξακολουθεί να έχει ίχνη υδρόθειου H<sub>2</sub>S, περίπου 50-150 ppm. Το θείο απορροφάται από μία κλίνη ZnO για να σχηματιστεί σε ZnS. Το ZnO μπορεί να αναγεννηθεί με αντίδραση ZnS με οξυγόνο που περιέχεται στον αέρα. Έτσι, σχηματίζεται SO<sub>2</sub> που μπορεί να μετατραπεί με ανθρακικό ασβέστιο σε θειικό ασβέστιο, το οποίο τελικά εναποτίθεται σε υγειονομικό ΧΥΤΑ. Στο στάδιο της καταλυτικής μεθανίωσης, οι ουσίες που περιέχονται μετατρέπονται σε μεθάνιο και CO<sub>2</sub>.

Η απόδοση του CH<sub>4</sub> αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης και την πτώση της θερμοκρασίας. Το CO<sub>2</sub> διαχωρίζεται από το μείγμα αερίων χρησιμοποιώντας μία

μονάδα διαχωρισμού μεμβράνης. Η τελική σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε για τους ακόλουθους υπολογισμούς είναι 97,3 vol% CH<sub>4</sub>, 2,6 vol% CO<sub>2</sub> και 0,1 vol% H<sub>2</sub>O. Αυτή η σύνθεση έρχεται σε συμφωνία με τους αγωγούς καλής ποιότητας φυσικού αερίου. Η υποτιθέμενη αποτελεσματικότητα της μεθανίωσης, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών για το διαχωρισμό του CO<sub>2</sub>, είναι 76,5%, το οποίο ποσοστό μπορεί να είναι κάπως χαμηλότερο από το εφικτό. Για τη μεθανίωση χρησιμοποιείται ένας καταλύτης, ο οποίος αποτελείται από οξείδιο αλουμινίου και νικέλιο (50% wt το καθένα). Κατά τη διάρκεια της μεθανίωσης το αέριο συμπιέζεται στην πίεση του δικτύου αερίου (30-70 bar), για την οποία απαιτείται πρόσθετη ενέργεια (περίπου 0,2 kWh/m<sup>3</sup> για συμπίεση στα 70 bar). Αυτή η ενέργεια θεωρείται ότι παρέχεται από το ελβετικό ηλεκτρικό δίκτυο. Για το σταθμό ανεφοδιασμού αερίου, το αέριο πρέπει να συμπιεστεί επιπλέον στα 250 bar, πίεση η οποία θεωρείται ως η μέγιστη πίεση στο ρεζερβουάρ του αυτοκινήτου.

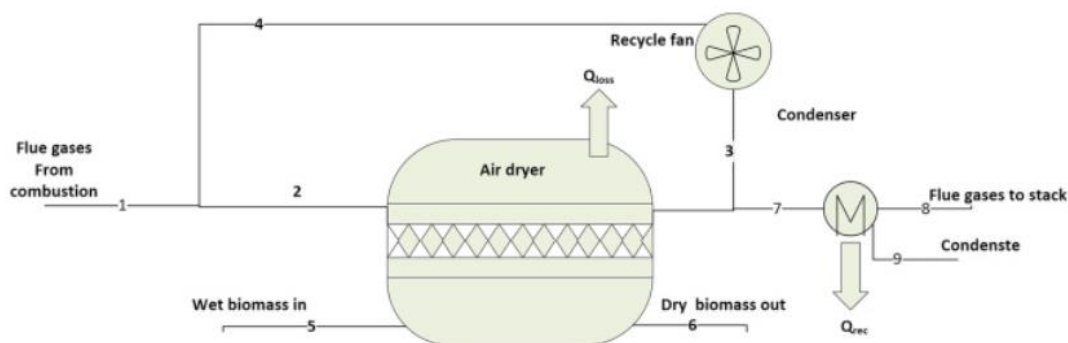
Η συνολική απόδοση θερμικής μετατροπής που είναι το 56%, είναι το γινόμενο της απόδοσης που θέτεται από την αεριοποίηση (73%) και της απόδοσης που θέτεται από τη μεθανίωση [14].



**Εικόνα 2.** Διάγραμμα ροής του συστήματος θέρμανσης SNG με βάση το ξύλο και αναλυτικό διάγραμμα ροής της παραγωγής SNG [14]

Την περίπτωση να είναι η βιομάζα (εδώ το ξύλο) υγρή εξέτασαν σε μια μελέτη που διεξήχθη οι Heyne και Harvey (2009). Οι ερευνητές αξιολόγησαν την παραγωγή SNG χρησιμοποιώντας υγρό ξύλο. Ως εκ τούτου, οι ερευνητές ερεύνησαν πώς να ενσωματώσουν επίσης το στέγνωμα στη διαδικασία. Η ξήρανση είναι μια πολύ ενεργοβόρα διαδικασία. Επομένως, οι ερευνητές στόχευσαν στο να μοντελοποιήσουν ένα σύστημα ικανό να παράγει ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα να είναι ικανό να στεγνώνει

την υγρή βιομάζα, έτσι ώστε να μπορεί να παραχθεί SNG. Το στεγνωτήριο καυσαερίων καθώς και το σύστημα απεικονίζεται ακολούθως [15].



Εικόνα 3. Σύστημα ξήρανσης βιομάζας με χρήση αέρα [15]

## 2.3 Ανάλυση κύκλου ζωής (ΑΚΖ)

Η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) αποτελεί ένα καθιερωμένο εργαλείο που έχει σχεδιαστεί για να αξιολογεί τις άμεσες και έμμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα έχει ένα προϊόν ή μια διαδικασία σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του [8]. Με άλλα λόγια, περιλαμβάνει την αξιολόγηση όλων (κατασκευή, λειτουργία και αποσυναρμολόγηση) των βιομηχανικών δραστηριοτήτων που εμπλέκονται, άμεσα ή έμμεσα, στην παραγωγή αγαθών ή υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της ενέργειας και στην περίπτωση μελέτης της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας, αναλύονται συστήματα, πλήρεις αλυσίδες ή κύκλοι, π.χ. από την εκμετάλλευση φυσικών πόρων, την μετακίνηση των φορέων ενέργειας, την μετατροπή τους σε χρήσιμη ενέργεια και τελικά τη διαχείριση απορριμμάτων. Η LCA χρησιμοποιείται συχνά στην οικολογική επισήμανση προϊόντων [14].

Επιπλέον, η περιβαλλοντικά και οικονομικά βέλτιστη χρήση της βιοενέργειας εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από το μέγεθος και τον σχεδιασμό μίας μονάδας βιοενέργειας, τα οποία καθορίζουν για παράδειγμα την απόδοση μετατροπής της βιομάζας, το κόστος παραγωγής και τις συναφείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επίσης, χωροταξικοί παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα βιομάζας, οι μέθοδοι συγκομιδής και η μεταφορά λόγω αποστάσεων μπορεί να έχουν μεγάλη επίδραση στην απόδοση μίας μονάδας.

Σκοπός της αξιολόγησης κύκλου ζωής, πέρα από την ίδια την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου όπως συζητήθηκε, είναι και η μετέπειτα δυνατότητα που δίνεται για την υποβολή προτάσεων βελτιωτικών απέναντι στα μεγαλύτερα αλλά και τα μικρότερα περιβαλλοντικά προβλήματα που εντοπίστηκαν κατά τη διαδικασία. Η προσέγγιση της ανάλυσης αυτής επιτυγχάνεται με τέσσερα κύρια βήματα. Αυτά είναι 1) ο ορισμός στόχου και πεδίου (goal and scope definition), 2) η δημιουργία του

καταλόγου απογραφής (inventory analysis), 3) η εκτίμηση επιπτώσεων (impact assessment) και 4) η ερμηνεία αποτελεσμάτων (result interpretation) [8]. Ακολουθεί μία περιγραφή των παραπάνω βημάτων:

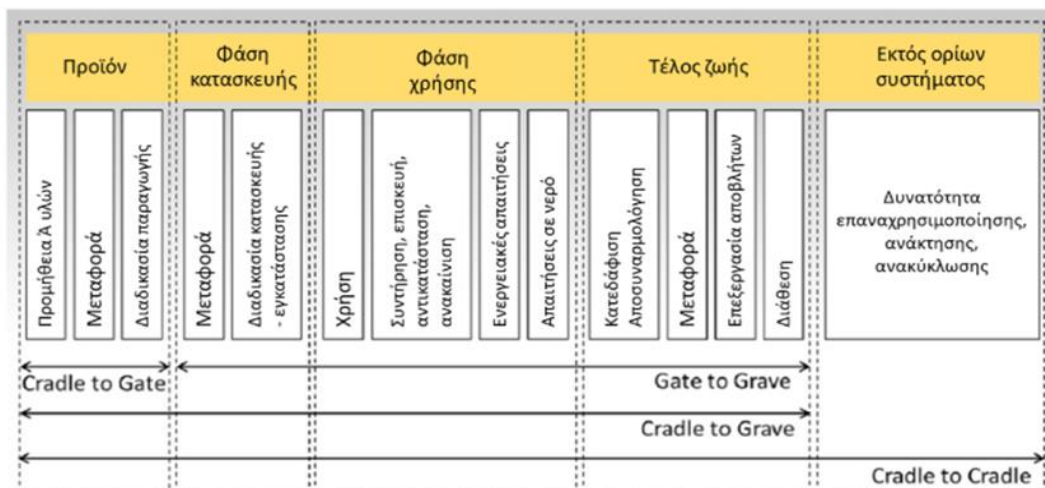
1. **ορισμός στόχου και πεδίου (goal and scope definition):** γίνεται ορισμός της λειτουργικής μονάδας, των ορίων του συστήματος, καθώς και της διάρκειας ζωής της μονάδας ( πχ ορισμός γεωγραφικών και χρονικών ορίων)
2. **κατάλογος απογραφής (inventory analysis):** πραγματοποιείται συλλογή δεδομένων εισροών και εκροών για όλες τις διεργασίες του συστήματος και ποσοτικοποίηση των κύριων καθαρών ροών υλικών και ενέργειας (π.χ. θερμότητα, ηλεκτρική ενέργεια, εκπομπές, πρώτες ύλες, απόβλητα) που βρίσκονται ανάμεσα στα όρια του συστήματος κάθε φορά, ανάλογα με τη λειτουργική μονάδα.
3. **εκτίμηση επιπτώσεων (impact assessment):** συμβαίνει αξιολόγηση περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Επιλέγεται μια μέθοδος εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων (π.χ. ReCiPe, CML, IPCC, VDI κ.λπ.). Τρεις βασικές κατηγορίες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων είναι η κλιματική αλλαγή, η ανθρώπινη υγεία και η εξάντληση των φυσικών πόρων [15].
4. **ερμηνεία αποτελεσμάτων (result interpretation):** το στάδιο αυτό περιλαμβάνει και την προσωπική οπτική του ανθρώπου που πραγματοποιεί την ανάλυση κύκλου ζωής και τη δική του ερμηνεία στη σημαντικότητα των αποτελεσμάτων. Ακόμη, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα καθώς και οι συστάσεις σύμφωνα με τον στόχο και το εύρος της μελέτης που διεξήχθη. Με τη βοήθεια αυτού του σταδίου μπορεί να εντοπιστούν δυνητικά συμφέρουσες περιβαλλοντικές τοποθεσίες ή να προταθούν ακόμα και βελτιώσεις. Η ευαισθησία των αποτελεσμάτων και τα συμπεράσματα πάνω σε βασικές παραμέτρους που αποτελούν κλειδιά μπορούν επίσης να διερευνηθούν [16].

Τα όρια του συστήματος μπορούν να μελετηθούν στο πλαίσιο κάποιων κύριων περιπτώσεων:

- **Cradle to Gate.** Περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες από την απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι και την φάση της παραγωγής του προϊόντος.
- **Gate to Gate.** Περιλαμβάνονται όλες οι διαδικασίες από την μεταφορά έως και την τελική χρήση του προϊόντος.
- **Gate to Grave.** Περιλαμβάνει όλα τα στάδια μετά την παραγωγή του προϊόντος έως και τις φάσεις τέλους ζωής του.
- **Cradle to Grave.** Είναι η πιο ολοκληρωμένη από τις προηγούμενες περιπτώσεις οριοθέτησης στην οποία περιλαμβάνονται όλες οι διαδικασίες από την εξαγωγή των πρώτων υλών, την παραγωγή και μεταφορά του προϊόντος μέχρι και τις τελικές μεθόδους διάθεσης του υπό εξέταση προϊόντος [15].

Παρακάτω παρατίθεται μία παραστατική εικόνα επεξήγησης των ορίων του εκάστοτε υπό μελέτη συστήματος.





Εικόνα 4. Όρια συστήματος που τίθενται υπό ανάλυση κύκλου ζωής [15]

Η ανάλυση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής χρησιμοποιεί σαν εργαλεία το Eco indicator 99, και το Eco-scarcity [14]. Τέλος, άλλη μια εκτίμηση αυτή τη φορά όλων των δαπανών που σχετίζονται με ένα προϊόν κατά τη διάρκεια του συνολικού κύκλου ζωής, από την παραγωγή και τη χρήση μέχρι την απόρριψη, είναι το κόστος κύκλου ζωής. Για την σωστή αξιολόγηση του κάθε κύκλου ζωής, πέρα από τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων αυτών, πρέπει ανάλογα την περίπτωση να λαμβάνονται υπόψη και άλλες πτυχές αντικειμενικές ή υποκειμενικές αυτού που αποφασίζει, ώστε να επιτυγχάνεται κάθε φορά μία συνολικά συνεπής επιλογή.

Μια περιβαλλοντική ανάλυση LCC έχει παρόμοια δομή με μία ανάλυση LCA που διεξάγεται παράλληλα και αφορά την ίδια λειτουργική μονάδα. Γενικά, ο κύκλος ζωής και τα όρια του συστήματος πρέπει να είναι ισοδύναμα, χωρίς απαραίτητα να είναι ακριβώς ίδια. Πάντως σε μία ανάλυση κύκλου ζωής LCA η έρευνα και η ανάπτυξη σπάνια θα ληφθούν υπόψη, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε μία ανάλυση LCC. Δεδομένου ότι τόσο το LCC και το LCA έχουν παρόμοια δομή μπορούν ακόμη και να ερμηνευθούν μαζί [17]. Τα μοντέλα εκτίμησης επιπτώσεων χρησιμοποιούν επίσης τους λεγόμενους παράγοντες χαρακτηρισμού (CFs) οι οποίοι είναι οι ποσοτικές αναπαραστάσεις της σχετικής σημασίας μίας συγκεκριμένης παρέμβασης. Για παράδειγμα, ο παράγοντας ανθρώπινης βλάβης (HDF) των PM10 είναι 300.

## 2.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μελετών ανάλυσης κύκλου ζωής για την παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου από ξύλο

Πριν παρουσιαστεί η περίπτωση μελέτης στην παρούσα εργασία και η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί, θα παρουσιαστούν κάποιες διαφορετικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση του κύκλου ζωής της παραγωγής SNG από βιομάζα.

Τα συμπεράσματα που θα προκύψουν από την μελέτη των παραδειγμάτων αυτών σχετικά με την αξιολόγηση των συστημάτων SNG είναι σε μεγάλο βαθμό κοινά για όλα τα συστήματα παραγωγής SNG, με αποτέλεσμα να εκφράζουν και το σύστημα που θα αναλυθεί στη συνέχεια της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας που αφορά και το κύριο σύστημα μελέτης της εργασίας αυτής.

Έχουν, λοιπόν, αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι και μελέτες με τις οποίες μπορεί να πραγματοποιηθεί ανάλυση κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μίας υπηρεσίας. Αρχικά, παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση για την μοντελοποίηση τόσο των οικονομικών όσο και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των αλυσίδων αξίας της βιοενέργειας που βασίζονται σε έναν πλήρη κύκλο ζωής (LCA). Το μοντέλο αυτό, λοιπόν, εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό του βέλτιστου μεγέθους και τοποθεσίας μιας μονάδας, και της εξάρτησης τους από επιμέρους μέρη της αλυσίδας αξίας για την περίπτωση παραγωγής συνθετικού φυσικού αερίου από ξύλο στην Ελβετία [18].

Πέντε υπομοντέλα αναπτύχθηκαν και συνδυάστηκαν για να αντιπροσωπεύσουν την αλυσίδα αξίας SNG από ενεργειακό ξύλο:

- A) ένα χωρικό μοντέλο διαθεσιμότητας ξύλου
- B) ένα μοντέλο συγκομιδής
- Γ) ένα μοντέλο μεταφοράς
- Δ) ένα μοντέλο μετατροπής του ξύλου σε SNG, ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα
- E) ένα μοντέλο τελικής χρήσης SNG και αντικατάστασης των υπηρεσιών των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Το ενεργειακό ξύλο σε αυτή τη μελέτη ορίζεται ως υπολειμματικό ξύλο από συγκομιδές στρογγυλής ξυλείας και εργασίες αραίωσης.

Τα μοντέλα B-E που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος που σχετίζεται με το κάθε μέρος της αλυσίδας SNG.

Τα μοντέλα και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή τους σχετικά με τις περιβαλλοντικές και τις οικονομικές επιπτώσεις που θα είχε μία τέτοια μονάδα στην Ελβετία, δεν αρκούν για να παρθεί μία απόφαση για τη βέλτιστη τοποθεσία και μέγεθος της μονάδας. Η τελική απόφαση θα πρέπει να ορίζεται από τον υπεύθυνο, ο οποίος θα σταθμίσει τα αποτελέσματα ανάλογα με τη βαρύτητα που έχουν για αυτή την απόφαση. Επιλέχθηκαν 11 τοποθεσίες εργοστασίων με στόχο την αντιπροσώπευση διαφορετικών περιοχών της Ελβετίας. Όλες οι τοποθεσίες είναι κοντά σε κατοικημένες περιοχές, επιτρέποντας την πιθανή χρήση της θερμότητας σε ένα σύστημα τηλεθέρμανσης. Τα μεγέθη των μονάδων που λήφθηκαν υπόψη ήταν από 5 έως 200 MW.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αξιολογήθηκαν με βάση το παγκόσμιο δυναμικό θέρμανσης (GWP), καθώς και με βάση δύο μεθόδους εκτίμησης επιπτώσεων, οι οποίες συγκεντρώνουν διάφορες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε μία ενιαία βαθμολογία: 1) ο οικολογικός δείκτης 99 (H/A) και 2) η οικολογική σπανιότητα 2006.

## Το χωρικό μοντέλο διαθεσιμότητας

Το χωρικό μοντέλο διαθεσιμότητας αναφέρεται στη διαθεσιμότητα του ξύλου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας (ενεργειακό ξύλο). Για την ανάπτυξη αυτού του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν γνώσεις από το μοντέλο MASSIMO, το ελβετικό National Forest Inventory (NFI3), αλλά και λήφθηκαν υπόψη κριτήρια βιωσιμότητας, όπως βιολογικοί, κοινωνικοί και οικονομικοί περιορισμοί.

Στο μοντέλο αυτό λαμβάνονται υπόψη δύο διαφορετικά σενάρια συγκομιδής. Το πρώτο σενάριο συγκομιδής αντικατοπτρίζει τη σημερινή κατάσταση και ονομάζεται βάση. Στο σενάριο αυτό περίπου 2,9 εκατομμύρια  $m^3$  ενεργειακής ξυλείας συλλέγονται ετησίως. Το δεύτερο σενάριο ονομάζεται σενάριο μέγιστης συγκομιδής και σε αυτό 5 εκατομμύρια  $m^3$  ενεργειακής ξυλείας συλλέγονται ετησίως, ποσότητα που θεωρείται και μέγιστη για αυτό τον σκοπό.

Στο σενάριο μέγιστης συγκομιδής αναγκαστικά το απόθεμα σε ξυλεία που έχει συσσωρευτεί τις τελευταίες δεκαετίες (όπου οι ποσότητες ξύλου που συλλέγονταν ήταν χαμηλότερες από την ανάπτυξη του δάσους) μειώνεται. Επομένως, αυτό το σενάριο έχει συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στο οποίο θα μπορούσε να διατηρηθεί, το οποίο χρονικό διάστημα είναι γύρω στα 30 χρόνια.

Η ζήτηση του ενεργειακού ξύλου διαφέρει από τη μία γεωγραφική περιοχή στην άλλη. Η χωρική λοιπόν ζήτηση του ενεργειακού ξύλου βασίζεται από την μία πλευρά σε μία βάση δεδομένων που περιέχει χωρικές πληροφορίες για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις ενεργειακού ξύλου στην Ελβετία, ενώ από την άλλη βασίζεται στη συνολική ζήτηση από τα νοικοκυριά, τα οποία χωροταξικά κατανέμονται ανάλογα με την πληθυσμιακή πυκνότητα. Η συνολική ζήτηση του ενεργειακού ξύλου ανέρχεται σε 1,7 εκατομμύρια  $m^3$  [18].

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA) παρέχει δορυφορικά αρχεία κλιματικών δεδομένων [19]. Η συνολική ενεργειακή διαθεσιμότητα ξύλου για τα σενάρια για τη βάση ESA και το μέγιστο ESA ανέρχονται σε 1,2 και 3,3 εκατομμύρια  $m^3$  αντίστοιχα.

## Το μοντέλο συγκομιδής

Το μοντέλο συγκομιδής υπολογίζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη συγκομιδή ξύλου. Οι δώδεκα υπάρχουσες μέθοδοι στην εθνική απογραφή δασών έχουν συγκεντρωθεί σε τέσσερις πρωτότυπες μεθόδους συγκομιδής. Αυτές περιλαμβάνουν το εγχειρίδιο κινητήρα και πλήρως μηχανοποιημένη συγκομιδή σε βατές συστάδες ( κλίση < 40% ) καθώς και συγκομιδή καλωδιακού γερανού και ελικοπτέρου σε αδιάβατες κερκίδες ( κλίση > 40% ).



Ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος της ξυλείας  $EI_s^h$  μπορεί να υπολογίζεται ως άθροισμα των ποσοτήτων ξύλου  $W_n$  που συλλέγονται στις δασικές τοποθεσίες (σημεία δειγματοληψίας NFI) πολλαπλασιαζόμενα με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε κάθε τοποθεσία (ανάλογα με τη μέθοδο της συγκομιδής), όπου  $N_s$  είναι ο συνολικός αριθμός των τοποθεσιών που απαιτούνται για την ικανοποίηση της ζήτησης ξύλου ενός συγκεκριμένου μεγέθους μονάδας  $S$ .

$$EI_s^h = \sum_{n=1}^{N_s} w_n ei_n^h$$

Όπου:

- $W_n$ : οι ποσότητες ξύλου που συλλέγονται
- $EI_s^h$ : ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος της ξυλείας
- $n$ : οι δασικές τοποθεσίες
- $ei_n^h$ : ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της ξυλείας σε κάθε τοποθεσία
- $N_s$ : ο συνολικός αριθμός των τοποθεσιών
- $W_s$ : η συνολική ποσότητα ξύλου που έχει συλλεχθεί
- $W_n$ : η ποσότητα ξύλου που έχει συλλεχθεί σε κάθε δασική τοποθεσία
- τοποθεσίες  $n=1$  μέχρι  $N$ : ταξινομημένοι κατά απόσταση, ώστε η πρώτη συγκομιδή να γίνεται στην πλησιέστερη δασική τοποθεσία και η τελευταία στην πιο απομακρυσμένη.

$$W_s = \sum_{n=1}^{N_s} w_n$$

Στην Ελβετία οι δασολόγοι σπάνια χρέωναν το πραγματικό κόστος συγκομιδής ενεργειακού ξύλου, αλλά αντί αυτού πωλούνται σε τιμή αγοράς, η οποία είναι συχνά ομοιογενής για ολόκληρες περιοχές.

- $C^w$ : σχετικό κόστος του ενεργειακού ξύλου στην τοποθεσία συγκομιδής
- $C_s^w$ : συνολικό κόστος του ξύλου που απαιτείται για ένα συγκεκριμένο μέγεθος εργοστασίου

$$C_s^w = W_s c^w$$

### Το μοντέλο μεταφοράς

Το μοντέλο μεταφοράς υπολογίζει το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη μεταφορά θρυμμάτων ξύλου από το δάσος στο εργοστάσιο SNG με φορτηγό. Θεωρήθηκε ότι χρησιμοποιήθηκε φορτηγό 20-28 t για τη μεταφορά του ξύλου.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μεταφορών βασίστηκαν στο ecoinvent. Αποστάσεις μεταφοράς από όλα τα σημεία δειγματοληψίας δασικής απογραφής έως

όλες τις θέσεις των μονάδων υπολογίστηκαν κατά μήκος του δασικού οδικού δικτύου και του παρακείμενου οδικού δικτύου από το Vector 25.

- $d_n$ : απόσταση ανάμεσα στην τοποθεσία του δάσους και το εργοστάσιο SNG
- $e_i^t$ : ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος που σχετίζεται με τις μεταφορές

$$EI_s^t = \sum_{n=1}^{N_s} 2d_n w_n e_i^t$$

Ο παράγοντας 2 αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι το φορτηγό κάνει μία κυκλική διαδρομή, για την οποία θεωρείται ότι είναι πλήρως φορτωμένο στην μία κατεύθυνση και άδειο στην άλλη.

Για τον υπολογισμό του κόστους διακρίθηκαν τρεις τύποι δρόμων:

1. δασικοί και παράπλευροι δρόμοι
2. αγροτικοί δρόμοι
3. αυτοκινητόδρομοι

Το κόστος της μεταφοράς ενός πλήρως φορτωμένου φορτηγού με βάση τα νούμερα του παρακάτω πίνακα, μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$\begin{aligned} c^t &= 85 + 17d_n & \forall 0 \leq d_n \leq 5 \\ c^t &= 136 + 6.8d_n & \forall 5 < d_n \leq 30 \\ c^t &= 196 + 4.8d_n & \forall 30 < d_n \end{aligned}$$

Driving distance (km)	Road type	Average driving velocity (km/h)	Driving costs (CHF/km)
0	–	–	85
≤5	Forest and side roads	20	8.5
>5 and ≤30	Rural road	50	3.4
>30	Highway	70	2.4

**Πίνακας 1.** Απόσταση οδήγησης και σχετικοί τύποι δρόμων, ταχύτητα και κόστος

Επιπλέον, το κόστος μεταφοράς για μία ποσότητα ξύλου εξαρτάται από τον σχετικό όγκο του φορτηγού.

- $b_v$ : ογκομετρικός συντελεστής μετατροπής (τίθεται ότι 1 m<sup>3</sup> μασίφ ξύλου έχει όγκο 2,5 m<sup>3</sup> όταν θρυμματίζεται)
- $v_i$ : συνολικός όγκος του φορτηγού
- $c_s^t$ : συνολικό κόστος που σχετίζεται με τη μεταφορά του ξύλου για ένα συγκεκριμένο μέγεθος εργοστασίου

$$C_s^t = \sum_{n=1}^{N_s} c^t \frac{w_n b_v}{v_l}$$

### Μοντέλο εγκατάστασης SNG

Η παραγωγή SNG από ξύλο περιλαμβάνει πολλά κύρια στάδια διεργασίας: ξήρανση ξύλου, θερμική προεπεξεργασία, αεριοποίηση, καθαρισμός αερίου, μεθανοποίηση και τελικά καθαρισμός για να επιτευχθεί η ποιότητα του πλέγματος.

Επιπλέον η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα συχνά παράγονται από κοινού. Στα περισσότερα στάδια υπάρχουν αρκετές εναλλακτικές τεχνολογίες. Ένα θερμοοικονομικό μοντέλο διαδικασίας για την παραγωγή SNG ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας από το ξύλο αναπτύχθηκε από τους Gassuer και Marechal. Το SNG μοντέλο εγκατάστασης που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη περιέχει ένα υποσύνολο θερμοοικονομικά βελτιστοποιημένων διαμορφώσεων τεχνολογίας από το μοντέλο τους.

Διαμορφώσεις τεχνολογίας:

Το στέγνωμα του ξύλου είναι απαραίτητο για να αποφευχθεί η υπερβολική θερμική απώλεια κατά το στάδιο της αεριοποίησης. Για την προσομοίωση και μελέτη της ξήρανσης με αέρα και ατμό αναπτύχθηκε και το αντίστοιχο μοντέλο. Το πλεονέκτημα του ατμού είναι ότι η λανθάνουσα θερμότητα του εξαμιζόμενου νερού μπορεί να ανακτηθεί.

Η θερμική προεπεξεργασία είναι προαιρετική και αυξάνει τις αποδόσεις αερίου από την αεριοποίηση.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε μοντέλο για την κατανόηση και τη μελέτη των διαδικασιών που ακολούθησαν, δηλαδή τη διαδικασία της πυρόλυσης καθώς και του τύπου πυρόλυσης που συμβαίνει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ( περίπου 200 και 320°C ). Αυτός ο τύπος πυρόλυσης ονομάζεται torrefaction.

Η αεριοποίηση αποσυνθέτει το συμπαγές ξύλο σε αέρια ( CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> ). Θεωρήθηκαν άμεση αεριοποίηση σε ένα CFB με μείγμα ατμού και οξυγόνου και έμμεση αεριοποίηση σε μία ταχεία εσωτερική κυκλοφορία ρευστοποιημένης κλίνης ( FICFB) με ατμό. Ο καθαρισμός αερίου απαιτείται πριν από τη μεθανοποίηση και θεωρήθηκε εδώ ότι χρησιμοποιούνται φίλτρα άμμου και καθαρισμός αερίου με μεθυλεστέρα κράμβης (RME) ή νερό.

Δεδομένου ότι το αέριο συνήθως χρειάζεται να ψύχεται πριν από τον καθαρισμό, ο καθαρισμός με ζεστό αέριο είναι μια μελλοντική εναλλακτική λύση που υπόσχεται αύξηση της απόδοσης. Το στάδιο της μεθανίωσης μετατρέπει το H<sub>2</sub> σε CH<sub>4</sub> με μια καταλυτική αντίδραση. Στη συνέχεια, το μεθάνιο πρέπει να καθαριστεί από άλλα αέρια όπως το υπόλοιπο CO<sub>2</sub> (αναβάθμιση SNG). Οι εναλλακτικές λύσεις που διαμορφώθηκαν για τον καθαρισμό περιλάμβαναν φυσική απορρόφηση με χρήση σελεξόλης, πίεση απορρόφηση ταλάντευσης και διαχωρισμό μεμβράνης.

Για τη LCA αναπτύχθηκαν κάποιες έννοιες και εξισώσεις:

- $E_{i,s}^P$ : οι συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη μετατροπή

- $ei_{i,s}^P$ : οι σχετικές επιπτώσεις (ανά MJ εισροή ξύλου) μιας τεχνολογικής διαμόρφωσης

$$EI_{i,s}^P = W_s ei_{i,s}^P$$

Όπου:

- $W_s$ : η συνολική ποσότητα ξύλου που εισέρχεται στην παραγωγή
- $ci_{i,s}^P$ : το σχετικό κόστος παραγωγής ανά εισροή ξύλου MJ για οποιαδήποτε διαμόρφωση τεχνολογίας σε οποιοδήποτε μέγεθος εγκατάστασης
- $C_{i,s}^P$ : το συνολικό κόστος παραγωγής

$$C_{i,s}^P = W_s ci_{i,s}^P$$

Ορισμένες από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες, π.χ. απευθείας θερμαινόμενη αεριοποίηση με εμφύσηση οξυγόνου ή έμμεση αεριοποίηση υπό πίεση, μπορεί για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους να κατασκευάζονται μόνο σε μεγάθη εγκαταστάσεων μεγαλύτερων από 25 MW.

- $EI_{i,s}^{use}$ : οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από το ξύλο
- $ei^{use}$ : οι σχετικές επιπτώσεις των χρήσεων SNG, της ηλεκτρικής ενέργειας και της θερμότητας
- $\eta_i$ : η απόδοση μετατροπής της διαμόρφωσης τεχνολογίας  $i$

$$EI_{i,s}^{use} = W_s \left( \eta_{SNG,i} ei_{car}^{use} + \eta_{el,i} ei_{feedin}^{use} + \eta_{heat,i} ei_{dh}^{use} \right)$$

- $EI_{i,s}^{sub}$ : οι αποφευχθείσες επιπτώσεις των υποκατεστημένων ενεργειακών υπηρεσιών

$$EI_{i,s}^{sub} = W_s \left( \eta_{SNG,i} ei_{car}^{sub} + \eta_{el,i} ei_{NGCC}^{sub} + \eta_{heat,i} ei_{oilheat}^{sub} \right)$$

Ο διαχειριστής της μονάδας SNG δεν διαχειρίζεται τη χρήση των προϊόντων. Αντίθετα πουλάει τα προϊόντα σε τιμές πώλησης SNG, ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας.

- $R_{i,s}$ : έσοδα
- $r$ : οι τιμές πώλησης των προϊόντων της εγκατάστασης SNG

$$R_{i,s} = W_s \left( \eta_{SNG,i} r_{SNG} + \eta_{el,i} r_{el} + \eta_{heat,i} r_{heat} \right)$$

Για τα έσοδα θεωρούνται οι παρακάτω τιμές:

90 CHF για το SNG, 135 CHF για την ηλεκτρική ενέργεια και 60 CHF για τη θερμότητα.

Σε ορισμένες περιπτώσεις ηλεκτρική ενέργεια δεν παράγεται, αντιθέτως καταναλώνεται από το εργοστάσιο. Σε αυτές τις περιπτώσεις το ρεύμα αγοράζεται στα 135 CHF.

### Αξία μοντέλου αλυσίδας SNG

Η διαδικασία που εφαρμόστηκε στο μοντέλο της αλυσίδας αξίας SNG είναι η εξής:

Ορίστηκε ένα σενάριο που αποτελείται από οικονομική ρύθμιση (κόστος και τιμές πώλησης), διαθέσιμες τεχνολογίες (έτοιμες ή μελλοντικές), διαθεσιμότητα ενεργειακού ξύλου (βάση ESA ή μέγιστο σενάριο) και στάθμιση μεταξύ περιβαλλοντικών και οικονομικών επιδόσεων. Στη συνέχεια, συλλέγεται ξύλο από τις πλησιέστερες δασικές τοποθεσίες προς τις πιο μακρινές μέχρι να ικανοποιηθεί η ζήτηση για συγκεκριμένο μέγεθος εργοστασίου. Για κάθε δασική τοποθεσία από την οποία συλλέγεται το ξύλο, η συγκομιδή και τα μοντέλα μεταφοράς υπολογίζουν τις σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και το κόστος.

- S: το μέγεθος του εργοστασίου
- $EI_{i,s}^{net}$ : οι καθαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- $P_{i,s}$ : κέρδη (έσοδα-έξοδα) για κάθε διαμόρφωση τεχνολογίας i

$$EI_{i,s}^{net} = EI_S^h + EI_S^t + EI_{i,s}^p + EI_{i,s}^{use} - EI_{i,s}^{sub}$$

$$P_{i,s} = R_{i,s} - (C_S^h + C_S^t + C_{i,s}^p)$$

Για τις εξισώσεις αυτές οι περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδόσεις είναι γραμμικά κανονικοποιημένες μεταξύ 0 και 1. Για κέρδη το 1 αντιστοιχεί στα υψηλότερα κέρδη, ενώ για περιβαλλοντικές επιπτώσεις το 1 αντιστοιχεί στις χαμηλότερες.

- $\hat{S}_{i,s}$ : κανονικοποιημένη και σταθμισμένη βαθμολογία απόδοσης κάθε διαμόρφωσης τεχνολογίας για ένα δοσμένο μέγεθος εγκατάστασης
- $\hat{E}I_{i,s}^{net, norm}$ : κανονικοποιημένη περιβαλλοντική απόδοση
- $\hat{P}_{i,s, norm}$ : κανονικοποιημένη οικονομική απόδοση
- $x_{ei}$ : βάρος περιβαλλοντικής διάστασης
- $x_p$ : βάρος οικονομικής διάστασης

Το άθροισμα των  $x_{ei}$  και  $x_p$  πρέπει να είναι 1.

$$\hat{S}_{i,s} = \hat{E}I_{i,s, norm}^{net} x_{ei} + \hat{P}_{i,s, norm} x_p$$

Τέλος, επιλέχθηκε η τεχνολογία διαμόρφωσης με την υψηλότερη συνολική βαθμολογία. Αυτή αντιστοιχεί στη βέλτιστη διαμόρφωση για ένα συγκεκριμένο μέγεθος εγκατάστασης για καθορισμένη στάθμιση των περιβαλλοντικών και οικονομικών αποδόσεων.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα μεγέθη των εγκαταστάσεων, τις τοποθεσίες και τα σενάρια. Το βέλτιστο μέγεθος εργοστασίου είναι το μέγεθος εργοστασίου με τη μέγιστη τιμή του  $\hat{S}_{i,s}$ . Ομοίως, η βέλτιστη θέση του εργοστασίου μπορεί να προσδιοριστεί με ταυτοποίηση της τοποθεσίας με τη μέγιστη τιμή του  $\hat{S}_{i,s}$  ( όλων των τοποθεσιών).

### Ανάλυση σεναρίου και ευαισθησίας

Στη συνέχεια ακολουθήθηκαν δύο σενάρια.

1. Το πρώτο σενάριο αντιπροσωπεύει τις τρέχουσες συνθήκες (σενάριο βάσης), το οποίο αναφέρεται στις προαναφερθείσες παραδοχές σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κόστη και τιμές πώλησης, καθώς και στις έτοιμες τεχνολογίες και στο βασικό σενάριο διαθεσιμότητας ξύλου ESA (1,2 εκατομμύρια m<sup>3</sup>).
2. Το δεύτερο σενάριο ονομάζεται πράσινο μελλοντικό σενάριο και είναι ένα υποθετικό σενάριο, το οποίο χαρακτηρίζεται από αυξημένη σπανιότητα ορυκτών ενεργειακών πόρων από τη μία πλευρά, και πολιτική κινήτρων για την αυξημένη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από την άλλη. Λόγω της σπανιότητας της ορυκτής ενέργειας η τιμή του πετρελαίου θεωρείται ότι είναι 50% υψηλότερη. Επομένως, το κόστος της συντήρησης των δασών και της συγκομιδής του ξύλου είναι επίσης υψηλότερο, γι' αυτό οι δασολόγοι αυξάνουν την τιμή πώλησης του ενεργειακού ξύλου κατά 50%. Για τον ίδιο λόγο, η μεταφορά του ξύλου θεωρείται ότι είναι 50% πιο δαπανηρή.

Καθώς λοιπόν στην πραγματικότητα του πράσινου μελλοντικού σεναρίου υπάρχουν κάποιες δυσκολίες που πηγάζουν από τις υψηλές τιμές για την απόκτηση ενεργειακού ξύλου, έπρεπε από τη μεριά της πολιτικής να αναπτυχθούν κάποιες ενέργειες κινήτρων για τη στροφή και το ενδιαφέρον προς την πράσινη αυτή πραγματικότητα. Έτσι, έπρεπε να υπάρξει κάποιου είδους εγγύηση για την τροφοδοσία ξύλου και αποδοτικών τεχνολογιών μετατροπής σε βιοενέργεια. Για την προώθηση των προηγμένων τεχνολογιών μετατροπής SNG, οι οποίες χρησιμοποιούνται στο σενάριο του πράσινου μέλλοντος, τα τιμολόγια τροφοδοσίας διπλασιάζονται. Τέλος, προκειμένου να αυξηθεί η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχει επιτραπεί μια προσωρινή μείωση του δασικού αποθέματος. Συνεπώς, στο σενάριο του πράσινου μέλλοντος η διαθεσιμότητα ενεργειακής ξυλείας καθορίζεται στα 3,3 εκατομμύρια m<sup>3</sup>).

Φαίνεται πως οι επιπτώσεις από την παραγωγή SNG είναι συγκριτικά μικρές. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις δημιουργούνται από τη χρήση των προϊόντων του εργοστασίου SNG, π.χ. κατά την καύση του SNG σε φυσικό αέριο για αυτοκίνητα (οδικές υποδομές και παραγωγή επιβατικών αυτοκινήτων υπολογίζονται επίσης). Στις επιπτώσεις λογίζονται επίσης και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα από την παραγωγή

SNG (μετατροπή), τη συγκομιδή ξύλου και σε μεγαλύτερα μεγέθη εργοστασίων από τη μεταφορά.

### Οικονομική απόδοση

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα κέρδη είναι τα έσοδα από την πώληση SNG. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το κόστος παραγωγής, το οποίο μειώνεται σημαντικά σε μεγαλύτερα μεγέθη εργοστασίων, λόγω των οικονομικών σε κλίμακα. Το κόστος μεταφοράς επηρεάζει την οικονομική απόδοση σε μεγαλύτερα μεγέθη εργοστασίων.

Στο σενάριο βάσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα καθαρά περιβαλλοντικά οφέλη είναι δυνατά σε όλους τους συντελεστές στάθμισης και για όλους τους δείκτες. Τα αποτελέσματα GWP κυμαίνονται μεταξύ 0,06 kg και 0,075 kg. Η καθαρή περιβαλλοντική στάθμιση οδηγεί σε 25% υψηλότερες μειώσεις CO<sub>2</sub>. Ταυτόχρονα είναι εφικτό τα κέρδη να μπορούν να μειωθούν από περίπου 0,01 σε 0,005 CHF ανά MJ εισροή ξύλου (ή και κάτω), που αντιστοιχεί σε μείωση 50% (ή και περισσότερο).

Τόσο με βάση τον οικολογικό δείκτη 99 (ecoindicator 99), όσο και με βάση την οικολογική σπανιότητα (ecological scarcity) βελτιστοποιήσεις στα καθαρά οφέλη μπορούν να επιτευχθούν χωρίς σημαντικούς συμβιβασμούς όσον αφορά τα κέρδη. Ωστόσο, οι οικονομικές απώλειες είναι πιθανές σε μικρότερα μεγέθη εργοστασίων. Παρόλο που τα κέρδη αυξάνονται απότομα στην αρχή για το εύρος μεγεθών του εργοστασίου, μία πρόσθετη αύξηση μπορεί να εκδηλωθεί σε μεγέθη εργοστασίων άνω των 25 MW, γεγονός που οφείλεται στις πρόσθετες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες σε αυτό το μέγεθος.

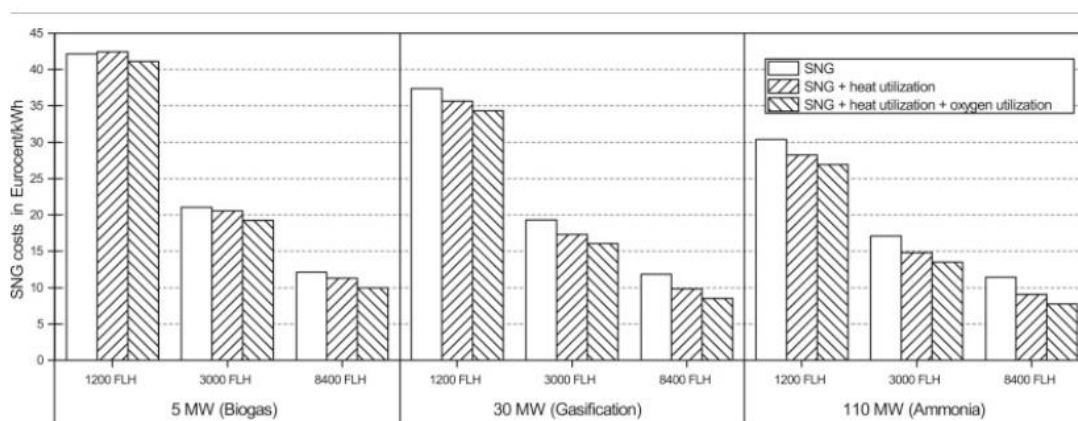
Διαφορετικές τοποθεσίες εργοστασίων δείχνουν διαφορετικές αποδόσεις, οπότε η επιλογή της τεχνολογίας και της τοποθεσίας του εργοστασίου είναι πολύ σημαντική για την οικονομική απόδοση.

Στο σενάριο του πράσινου μέλλοντος μπορούν να επιτευχθούν ελαφρώς καλύτερες περιβαλλοντικές επιδόσεις με τις μελλοντικές τεχνολογίες, ιδίως σχετικά με τον οικολογικό δείκτη 99 και την οικολογική σπανιότητα. Ταυτόχρονα, τα κέρδη είναι τα χαμηλότερα, πράγμα που δείχνει πως σε αυτό το σενάριο όσο υψηλότερα είναι τα έσοδα ξυλείας, μεταφοράς και τεχνολογίας υπερτερούν των υψηλότερων εσόδων. Αν η επιλογή τεχνολογίας βασιζόταν στην καθαρή περιβαλλοντική στάθμιση, δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί κέρδος για όλες τις βελτιστοποιημένες διαμορφώσεις εγκαταστάσεων σε σχέση με το GWP και την οικολογική σπανιότητα [18]. Το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP) χαρακτηρίζεται ως μία «μετρική» που καθιερώνει μία «ισοδυναμία» μεταξύ μιας ποσότητας εκπομπών CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, όπως το CH<sub>4</sub>. Η ισοδυναμία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό οικονομικά αποδοτικών στρατηγικών μετριασμού. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται στις τεχνολογικές αξιολογήσεις του κύκλου ζωής (LCA). Λειτουργία των μετρήσεων αυτών είναι να παρέχουν μία «ισοδυναμία» όσον αφορά τις κλιματικές επιπτώσεις και με αυτόν τον τρόπο να επιτρέπουν μία οικονομικά αποδοτική επίτευξη των στόχων μετριασμού [20].



Το κόστος παραγωγής για το SNG εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ετήσιο χρόνο λειτουργίας και την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε γενικές γραμμές, όμως, σε σύγκριση με το φυσικό αέριο, τα κόστη για το SNG είναι πολύ υψηλότερα [21].

Ενδεικτικά, αν θεωρηθεί μία σύζευξη μιας μονάδας βιομεθανίου (δυναμικότητα παραγωγής SNG 5 MW), με αεριοποίηση βιομάζας (χωρητικότητα παραγωγής SNG 30 MW) και με μια μονάδα αμμωνίας (δυναμικότητα παραγωγής SNG 110 MW) φαίνεται στο παρακάτω σχήμα η απεικόνιση του κόστους παραγωγής SNG για τη σύζευξη αυτή PtG με διαφορετικές πηγές CO<sub>2</sub>, όπου FLH οι ώρες πλήρους λειτουργίας. Φαίνεται πως όταν αυξάνονται οι ώρες αυτές από 1200 σε 3000 μειώνεται το κόστος SNG κατά περίπου 50%. Μια περαιτέρω αύξηση έχει μικρότερη επίδραση στο κόστος SNG [21].



**Εικόνα 5.** Κόστος παραγωγής SNG για τη σύζευξη PtG με διαφορετικές πηγές CO<sub>2</sub> [21]

Οι περιβαλλοντικές επιδόσεις συνήθως μειώνονται με την αύξηση του μεγέθους των εργοστασίων λόγω μεταφοράς. Για αυτό τα περιβαλλοντικά βέλτιστα μεγέθη εργοστασίων βρίσκονται στην περιοχή 5 - 200 MW. Με εξαίρεση τις βελτιστοποιήσεις για το GWP, όπου προτιμώνται τα μικρότερα μεγέθη εργοστασίων, τα περιβαλλοντικά βέλτιστα είναι εντός του εύρους 25 - 40 MW, λόγω των διαθέσιμων τεχνολογιών άνω των 25 MW. Αντίθετα, η οικονομική βέλτιστη βρίσκεται (με ορισμένες εξαιρέσεις) μεταξύ 100 και 200 MW.

Τελικά, το βέλτιστο μέγεθος ενός εργοστασίου πρέπει να βασίζεται σε μία υποκειμενική επιλογή, αφού τα περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια οδηγούν σε διαφορετικά βέλτιστα (trade off κατάσταση). Ωστόσο, δεν πρέπει να δίνεται υπερβολική βαρύτητα μόνο στο μέτρο του βέλτιστου μεγέθους εργοστασίου. Αντιθέτως, είναι σημαντικό να εστιάζουμε στις απόλυτες επιδόσεις.

Η τοποθεσία είναι πολύ σημαντική για τη δυνατότητα αντικατάστασης των υπηρεσιών μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας υψηλών επιπτώσεων. Ως εκ τούτου, οι μονάδες βιοενέργειας θα πρέπει να κατασκευαστούν σε τοποθεσίες όπου να μπορεί να διασφαλιστεί υψηλή απόδοση υποκατάστασης, π.χ. από έναν καταναλωτή που μπορεί



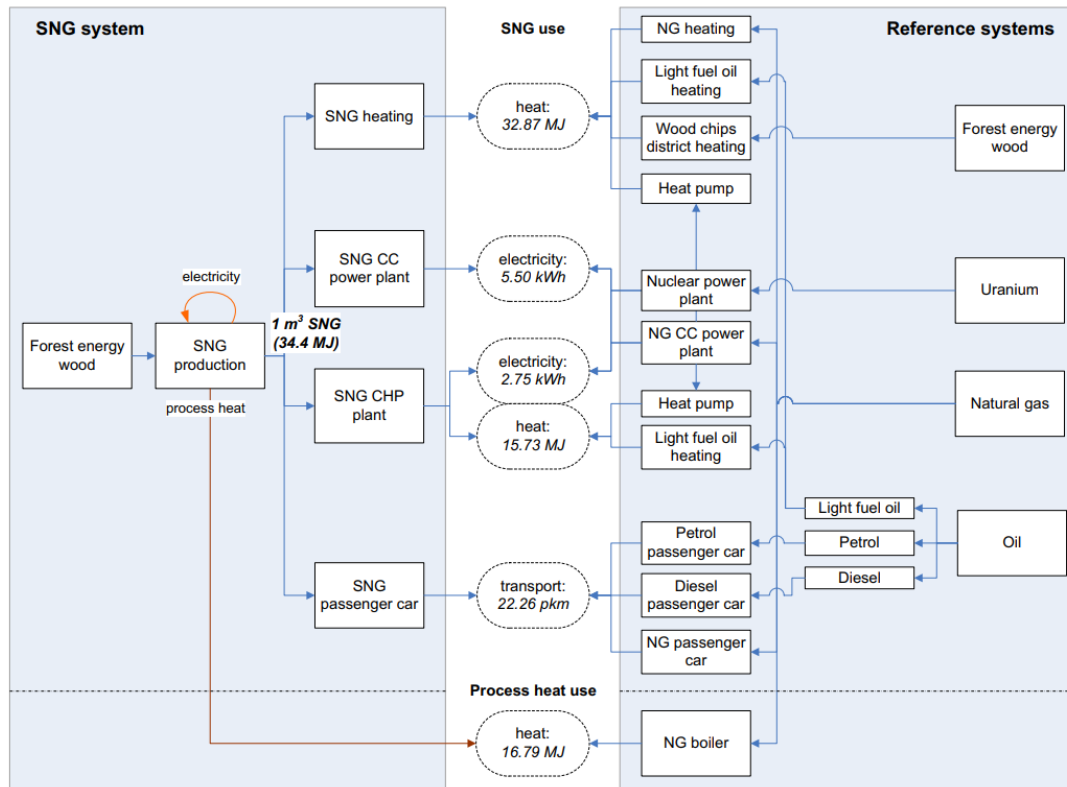
να αξιοποιήσει τη θερμότητα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Μία ενημερωμένη επιλογή του μεγέθους και της τοποθεσίας της εγκατάστασης (π.χ. όσον αφορά την τοπική διαθεσιμότητα βιομάζας) μπορεί να αυξήσει περαιτέρω την περιβαλλοντική απόδοση του εργοστασίου. Γενικά τα περιβαλλοντικά βέλτιστα κυμαίνονται σε τιμές 5 - 40 MW και τα οικονομικά βέλτιστα για τιμές 100 - 200 MW. Επίσης, με τις υποθέσεις που έγιναν εδώ, οι εγκαταστάσεις SNG μικρότερες από 25 MW δεν είναι κερδοφόρες.

Παρόλα αυτά αν ληφθούν υπόψη τα περιβαλλοντικά και τα οικονομικά οφέλη, ελαχιστοποιώντας το trade-off, οι πιο αποδοτικές εγκαταστάσεις φαίνεται να αφορούν μεγέθη άνω των 25 MW. Από οικονομική άποψη, οι κύριοι μοχλοί είναι τα έσοδα από την πώληση των προϊόντων του εργοστασίου SNG και το κόστος παραγωγής και στη συνέχεια ακολουθούν τα έξοδα μεταφοράς, τα οποία συνδέονται με τη διαθεσιμότητα ξύλου και το κόστος του ξύλου [18].

Η περιβαλλοντική βελτιστοποίηση στη μελέτη αυτή έχει τρεις στόχους, που είναι οι εκπομπές GHG, ο οικολογικός δείκτης 99 και η οικολογική σπανιότητα [18]. Ο οικολογικός δείκτης 99 είναι μία μέθοδος εκτίμησης επιπτώσεων του κύκλου ζωής (life cycle impact assessment method) [22]. Η ελβετική μέθοδος οικολογικής σπανιότητας από την άλλη, λαμβάνει υπόψη τις πρόσφατες εξελίξεις στην ελβετική και ευρωπαϊκή (εφόσον είναι σχετική για την Ελβετία) νομοθεσία και περιβαλλοντικούς στόχους. Η βασική αρχή και η κύρια δύναμη της μεθόδου είναι η μέτρηση της περιβαλλοντικής σπανιότητας με τη βοήθεια πραγματικών ρύπων ( και πόρων) [23].

Μια ακόμα αξιοσημείωτη αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης της παραγωγής και χρήσης SNG από ξύλο παρουσιάζεται με βάση τα σχέδια του Baden.

Όπως έχει ειπωθεί, η αναλυθείσα μονάδα πολυπαραγωγής παράγει SNG, θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια από ξύλο. Δεδομένου ότι η θέρμανση, η ηλεκτρική ενέργεια και οι μεταφορές μετριοούνται σε διαφορετικές μονάδες, είναι αναγκαίο να οριστεί μία κοινή μονάδα ως λειτουργική (εδώ το  $1\text{m}^3$  SNG). Η ποσότητα μιας από αυτές τις 3 υπηρεσίες που αποδίδεται κατά  $1\text{m}^3$  SNG απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 6. Σύγκριση SNG και συστημάτων αναφοράς [12]

Αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του καθαρού περιβαλλοντικού οφέλους για την τελική αξιολόγηση των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την αντικατάσταση διαφορετικών συστημάτων αναφοράς από συστήματα SNG. Αυτό υπολογίζεται επομένως ως η διαφορά μεταξύ των επιπτώσεων που παράγονται από συστήματα SNG και από συστήματα αναφοράς.

Όπως είναι ήδη γνωστό, οι φάσεις του κύκλου ζωής του συστήματος παραγωγής SNG αποτελούνται από την παραγωγή του ξύλου (ανάπτυξη και συγκομιδή), την μεταφορά του ξύλου στο εργοστάσιο SNG, την μετατροπή του ξύλου σε SNG, μέχρι τον αγωγό μεταφοράς και τη χρήση SNG για θέρμανση ή μεταφορά. Ομοίως, για τα συστήματα αναφοράς ολόκληρος ο κύκλος ζωής απλώνεται από την εξόρυξη πόρων έως τη χρήση των καυσίμων.

Η αξιολόγηση που ακολουθεί για την εύρεση του πιο οικολογικού συστήματος συγκριτικά με αυτό συμπαραγωγής θερμότητας κατά την παραγωγή SNG χρησιμοποιεί το εξής σκεπτικό: οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα είχαν δημιουργηθεί από την εναλλακτική παραγωγή θερμότητας (για το σύστημα τηλεθέρμανσης και για το νοσοκομείο) με χρήση λέβητα φυσικού αερίου, αφαιρούνται από τις επιπτώσεις του κύκλου ζωής του συστήματος SNG.

Για την εκτίμηση επιπτώσεων, η αξιολόγηση έγινε με δείκτες μεσαίου σημείου από τη CML και τη μέθοδο οικολογικού δείκτη 99, καθώς και με τη συσσωρευμένη ζήτηση ενέργειας και το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη. Για τη συγκεντρωτική εκτίμηση επιπτώσεων, η μέθοδος του οικολογικού δείκτη 99 και η ελβετική μέθοδος οικολογικής σπανιότητας 2006 είναι οι δύο μέθοδοι που χρησιμοποιούνται.

Θεωρείται ότι το ξύλο είναι μία πηγή ενέργειας ουδέτερη σε διοξείδιο του άνθρακα (δηλαδή η πρόσληψη διοξειδίου του άνθρακα από τα δέντρα είναι ίση με την επακόλουθη απελευθέρωση του κατά την καύση) και επομένως το βιογενές CO<sub>2</sub> δεν λαμβάνεται υπόψη στην εκτίμηση των επιπτώσεων. Αυτό μπορεί να μην είναι πάντα σωστό, καθώς η ποσότητα του CO<sub>2</sub> που αποθηκεύεται στο δασικό έδαφος εξαρτάται επίσης από τη διαχείριση που εφαρμόζεται στο δάσος.

Αναπτύχθηκαν 7 σενάρια για να ληφθούν υπόψη οι δυνατότητες για μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις και παράγοντες που μπορεί να επιδεινώσουν ή να ενισχύσουν την οικολογική απόδοση σε επίπεδο μονάδας SNG.

1. Το σενάριο της αυξημένης απόδοσης προϋποθέτει μια αύξηση της απόδοσης της μετατροπής του ξύλου σε SNG κατά 21%, το οποίο φαίνεται επιτεύξιμο στο εγγύς μέλλον, ειδικά για μεγαλύτερης κλίμακας μονάδες. Από τη στιγμή που στη διαδικασία μετατροπής μπαίνει λιγότερο ξύλο, παράγονται και λιγότερες εκπομπές.
2. Το σενάριο απονιτροποίησης, όπου οι εκπομπές NO<sub>x</sub> μειώνονται κατά 80% μέσω μιας μονάδας επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής (SCR).
3. Το σενάριο θέρμανσης με υποκατάσταση της χρήσης λέβητα λαδιού. Θεωρείται ότι η διεργασία θερμότητας από τη μονάδα SNG αντικαθιστά τη θερμότητα από λέβητα ελαφρού πετρελαίου αντί για λέβητα φυσικού αερίου.
4. Το σενάριο θέρμανσης με υποκατάσταση του λέβητα ξύλου με θερμότητα διεργασίας από τη μονάδα SNG. Το σενάριο αυτό δεν είναι πολύ ρεαλιστικό, καθώς στην περίπτωση υπάρχοντος λέβητα ξύλου, ένα εργοστάσιο SNG πιθανότατα θα κατασκευαστεί σε διαφορετική τοποθεσία.
5. Το σενάριο αχρησιμοποίητης θερμότητας διεργασίας κατά 50% έχει σχεδιαστεί για να αξιολογήσει την οικολογική απόδοση, σε περίπτωση που ένα σημαντικό κλάσμα της θερμότητας διεργασίας παρέμενε αχρησιμοποίητο.
6. Το σενάριο αχρησιμοποίητης θερμότητας διεργασίας κατά 100% αξιολογεί την οικολογική απόδοση εάν η θερμότητα της διεργασίας παρέμενε εντελώς αχρησιμοποίητη.
7. Το ευρωπαϊκό σενάριο του μίγματος ηλεκτρικής ενέργειας (UCTE) αξιολογεί την ευαισθησία της χρήσης του ευρωπαϊκού μίγματος ηλεκτρικής ενέργειας με μεγαλύτερη ένταση άνθρακα, αντί του ελβετικού μίγματος, για τη πλεονάζουσα ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του εργοστασίου (το εργοστάσιο που δεν μπορεί να καλύπτεται από τη δική του παραγωγή).

Το δασικό ενεργειακό ξύλο παράγεται είτε κατά τις εργασίες αραίωσης ή ως συμπροϊόν της συγκομιδής ξυλείας. Μια ανάλυση που είχε πραγματοποιηθεί έδειξε ότι από άποψη βιωσιμότητας η τρέχουσα χρήση του δασικού ενεργειακού ξύλου στην Ελβετία θα μπορούσε να αυξηθεί κατά περίπου 50%. Για τη μοντελοποίηση των ροών υλικών και ενέργειας, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ecoinvent. Οι αρχικές φυσικές εισροές κατά την ανάπτυξη του ξύλου περιλαμβάνουν γη, ηλιακή ενέργεια και διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα.

Θεωρείται ότι το 72% της συγκομιδής είναι μαλακό ξύλο και το 28% σκληρό ξύλο, που αντανακλά τον μέσο όρο της κατανάλωσης ξύλου στην Ελβετία. Θεωρείται επίσης μία μέση απόσταση μεταφοράς από το δρόμο του δάσους προς το εργοστάσιο

μήκους 24 χλμ, καθώς επίσης θεωρείται πως η μεταφορά αυτή πραγματοποιείται με φορτηγό 28 τόνων. Το εργοστάσιο που εξετάζεται εδώ θεωρείται ότι λειτουργεί 7500 ώρες σε βάθος χρόνου 30 ετών. Το ελβετικό μίγμα ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε για τη κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια για τις οποίες δεν αρκεί η παραγωγή του ίδιου του εργοστασίου.

Για τα ορυκτά συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιήθηκε λέβητας ελαφρού πετρελαίου (10 KW), λέβητας ρυθμιζόμενου φυσικού αερίου (<100 KW) και αντλία θερμότητας που λειτουργεί με ηλεκτρισμό από φυσικό αέριο ως ισοδύναμο του συστήματος θέρμανσης σπιτιού με SNG. Όσον αφορά την μεταφορά τα SNG αυτοκίνητα συγκρίνονται με τα επιβατικά αυτοκίνητα τα οποία υπακούν στα πρότυπα εκπομπών σύμφωνα με το Euro 5. Τέλος, θεωρήθηκε ότι υπάρχει μια απώλεια θερμότητας κατά 11% για τον λέβητα στην περιοχή του δικτύου θέρμανσης.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Κατά τη διάρκεια που αναπτύσσεται το ξύλο δεν υπάρχει παραγωγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GHG).

Στη μέθοδο EI'99 (οικολογικός δείκτης 99) η χρήση γης είναι ιδιαίτερα σταθμισμένη και είναι αποκλειστικά υπεύθυνη για τις επιπτώσεις. Παρόλα αυτά, η χρήση γης μπορεί και να θεωρηθεί επαρκής λόγος για να θεωρηθεί ακατάλληλη μια διαδικασία λόγω αυτού, αφού αυτά τα διαχειριζόμενα δάση δεν αξιοποιούνται και με άλλους τρόπους, προσφέροντας δηλαδή μερικές ακόμη δασικές υπηρεσίες.

Από την άλλη μεριά, η μέθοδος ES'06 (οικολογική σπανιότητα 2006) λαμβάνει υπόψη εκτός από τη χρήση γης και τη χρήση ενεργειακών πόρων βιομάζας, προκειμένου να αξιολογήσει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

Οι εκπομπές GHG από τη συγκομιδή ξύλου σχετίζονται με τη χρήση ορυκτών καυσίμων.

Στις βαθμολογίες των μεθόδων EI'99 και ES'06 κυριαρχούν οι εκπομπές από μηχανήματα συγκομιδής, ιδιαίτερα οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και σωματίδια (PM). Άλλες εκπομπές που ελευθερώνονται από τη συλλογή ξύλου μέχρι την παραγωγή SNG είναι οι ενώσεις θείου. Η μεταφορά του ξύλου με φορτηγό σε μικρές αποστάσεις έχει θετικά αποτελέσματα, καθώς η χρήση του ντίζελ και οι παραγόμενες εκπομπές αέρα προκαλούν μόνο μικρές επιπτώσεις. Η παραγωγή SNG συνεισφέρει στη συνολική βαθμολογία των μεθόδων στο μεγαλύτερο ποσοστό, πιο συγκεκριμένα κατά 35-54% στην βαθμολογία της μεθόδου EI'99 και 31-65% στην βαθμολογία της μεθόδου ES'06. Σε δεύτερο επίπεδο συνεισφέρουν οι εκπομπές GHG με ποσοστό 13-39%. Σχετικά με τη διαδικασία παραγωγής SNG, οι επιπτώσεις για τις βαθμολογίες των μεθόδων EI'99 και ES'06 προκαλούνται σε ποσοστό 32-45% από NO<sub>x</sub> και 5-7% από τις εκπομπές σωματιδίων από την αεριοποίηση και τη συμπαραγωγή στον κινητήρα αερίου.

Σύμφωνα με τη βαθμολογία της μεθόδου EI'99, η χρήση γης δημιουργεί επιπτώσεις της τάξης 13%, ενώ η παραγωγή RME (βιοντίζελ) αποτελεί σημαντική πηγή εκπομπών GHG της τάξης των 15%. Αξιοσημείωτο ρόλο επίσης για όλες τις μεθόδους της τάξεως του 5-10% παίζει η διάθεση της τέφρας των ξύλων στον ΧΥΤΑ. Επιπλέον, η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας του ελβετικού δικτύου συμβάλει σε ένα ποσοστό στην βαθμολογία ES'06 (6%), καθώς είναι υπεύθυνη και για τις εκπομπές GHG σε ποσοστό 25%. Στις εκπομπές GHG συμβάλει επίσης σε ένα μικρό ποσοστό (6%) το φυσικό αέριο που χρησιμοποιείται κατά την έναρξη λειτουργίας του εργοστασίου.

Όταν το SNG χρησιμοποιείται σαν καύσιμο για επιβατικά αυτοκίνητα οι επιπτώσεις είναι υψηλότερες, καθώς απαιτείται μία πρόσθετη συμπίεση αερίου τότε. Εκπομπές GHG παράγονται επίσης κατά τη χρήση SNG. Οι μέθοδοι EI'99 και ES'06 λαμβάνουν υπόψη σε μεγάλο βαθμό τις εκπομπές αερίων, όπως NO<sub>x</sub>, σωματιδίων και βενζολίου από την καύση SNG. Στο σύστημα μεταφοράς SNG οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις είναι σημαντικά υψηλότερες στην τριβή των ελαστικών και των τακακίων των φρένων που προκαλούν βαρέα μέταλλα (πχ ψευδάργυρος και χαλκός) που οδηγούνται στο έδαφος και στα υπόγεια ύδατα μολύνοντας τα. Προϋποθέσεις για τη μεταφορά με επιβατικά αυτοκίνητα είναι η παραγωγή και η συντήρηση των δρόμων και των επιβατικών αυτοκινήτων. Αυτός ο παράγοντας αποτελεί σημαντική συνεισφορά σε όλες τις μεθόδους ( 63% GWP, 30% EI'99, 38% ES'06). Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και πόρων που απαιτούνται.

Τέλος, πραγματοποιείται η σύγκριση των συστημάτων SNG με τα συστήματα αναφοράς. Σύμφωνα με το GWP, τα συστήματα SNG αποδίδουν σημαντικά καλύτερα, δίνοντας έμφαση στο γεγονός ότι το ξύλο είναι μία πηγή ενέργειας ουδέτερη σε CO<sub>2</sub>. Με βάση το ecoindicator, το οποίο δίνει μεγάλη έμφαση στην εξάντληση των ορυκτών καυσίμων, τα συστήματα SNG επιβαρύνουν λιγότερο το περιβάλλον με αποτέλεσμα να εμφανίζουν σημαντικά καθαρά οφέλη κατά την αντικατάσταση των συστημάτων αναφοράς που έχουν σαν βάση το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο με συστήματα SNG. Τα οφέλη από την αντικατάσταση της πυρηνικής ενέργειας, των αντλιών θερμότητας ή της τηλεθέρμανσης ξύλου είναι μικρά ή αρνητικά.

Σύμφωνα με τη μέθοδο της οικολογικής σπανιότητας, τα συστήματα SNG παρουσιάζουν καθαρά οφέλη όταν τα συστήματα πυρηνικής ενέργειας ή πετρελαίου αντικαθίστανται, ενώ δεν παρουσιάζουν καθόλου οφέλη ή μικρά κατά την αντικατάσταση αντλιών θερμότητας, συστημάτων θέρμανσης με ξύλο και συστημάτων φυσικού αερίου. Επομένως, τα αποτελέσματα της μεθόδου ES'06 διαφέρουν από αυτά της EI'99, αφού περισσότερο βάρος δίνεται στις εκπομπές παρά στην εξάντληση των ορυκτών καυσίμων. Κατά συνέπεια, το πλεονέκτημα του SNG στα συστήματα φυσικού αερίου είναι ελάχιστο. Οι δύο μέθοδοι επίσης διαφωνούν σχετικά με τον ηλεκτρισμό από πυρηνική ενέργεια. Σε αντίθεση με τη μέθοδο EI'99, η ES'06 λαμβάνει υπόψη τα πυρηνικά απόβλητα σε μεγάλο βαθμό, με αποτέλεσμα η υποκατάσταση της πυρηνικής ηλεκτρικής ενέργειας να φαίνεται ωφέλιμη.

Τα συστήματα SNG (και η τηλεθέρμανση με ξύλο) υπερέχουν των συστημάτων αναφοράς όσον αφορά την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και την υπερθέρμανση του πλανήτη (GWP). Ταυτόχρονα όμως, τα συστήματα SNG αποδίδουν χειρότερα από τα συστήματα αναφοράς σχεδόν σε όλες τις άλλες κατηγορίες. Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> είναι υπεύθυνες για αναπνευστική νόσο, για τις οποίες εκπομπές σημαντική πηγή αποτελεί η παραγωγή SNG (αεριοποίηση και κινητήρας αερίου).

Σύμφωνα με τη βαθμολογία EI'99, για ηλεκτροπαραγωγή και ΣΗΘ, τα συστήματα αναφοράς (πυρηνική ενέργεια και αντλίες θερμότητας) ξεπερνούν εμφανώς τα συστήματα SNG. Από την άλλη, σύμφωνα με τη βαθμολογία ES'06, η αυξημένη απόδοση, η απονιτροποίηση και η αποτελεσματική χρήση της διεργασίας θερμότητας, βελτιώνει την περιβαλλοντική απόδοση, έτσι ώστε όλες οι χρήσεις SNG να εμφανίζονται ελαφρώς καλύτερα από τα συστήματα αναφοράς.

Συμπερασματικά, τα GWP, EI'99 και ES'06 αναδεικνύουν ότι το SNG είναι μια φιλική προς το περιβάλλον υποκατάσταση των συστημάτων θέρμανσης και μεταφοράς με βάση το πετρέλαιο. Πιο συγκεκριμένα, με βάση το GWP και τη μέθοδο EI'99, η υποκατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας από συστήματα φυσικού αερίου είναι ωφέλιμη.



Ακόμα, με βάση το GWP και τη μέθοδο ES'06, η υποκατάσταση της πυρηνικής ενέργειας αποφέρει θετικά αποτελέσματα. Η ανάλυση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής δείχνει πως ένα μεγάλο μέρος των επιπτώσεων συμβαίνει κατά το στάδιο παραγωγής SNG. Οι επιπτώσεις αυτές, όμως, μπορούν να μειωθούν αρκετά και κατά συνέπεια να βελτιωθεί η περιβαλλοντική απόδοση των συστημάτων SNG. Για παράδειγμα, με την αύξηση απόδοσης μετατροπής ή με την εγκατάσταση μονάδας απονιτροποίησης μειώνονται σημαντικά οι επιπτώσεις. Επομένως, έχοντας σαν κριτήρια τις εκπομπές GHG, την εξάντληση ορυκτών καυσίμων και την υπερθέρμανση του πλανήτη, τα συστήματα SNG αποτελούν μια καλή λύση.

Όταν όμως ληφθούν υπόψη κάποιοι άλλοι παράγοντες, όπως οι επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου από τα όργανα του αναπνευστικού, η αξιολόγηση των συστημάτων SNG αλλάζει. Η σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα θέρμανσης με ξύλο δεν αποφέρει σαφές πλεονέκτημα για το σύστημα SNG. Αντιθέτως, από την άποψη της αποδοτικότητας των πόρων, η θέρμανση SNG είναι μάλλον μειονεκτική. Αυτό συμβαίνει γιατί σε σύγκριση με τη συμβατική θέρμανση από ξύλο, στο σύστημα SNG απαιτείται περίπου διπλάσια ποσότητα ξύλου ώστε να παραχθεί η ίδια ποσότητα θερμότητας. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η χαμηλότερη συνολική απόδοση μετατροπής, που είναι ένα μειονέκτημα της τεχνολογίας SNG. Αυτό θα πρέπει επίσης να ισχύει και για τη σύγκριση ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από SNG με την άμεση συμπαράγωγή ξύλου ή την αεριοποίηση.

Ωστόσο, αυτή η λογική δεν ισχύει για τα συστήματα μεταφορών, με δεδομένο ότι τα καύσιμα μεταφοράς που προέρχονται από βιομάζα απαιτούν έτσι κι αλλιώς ένα βήμα μετατροπής. Το SNG, λοιπόν για τη μεταφορά φαίνεται να είναι μία πολλά υποσχόμενη επιλογή, όσον αφορά το περιβάλλον, την απόδοση, αλλά και τη μελλοντική ζήτηση [\[12\]](#).

## 2.6 Γενικά συμπεράσματα γύρω από την αξιολόγηση του SNG

Εξετάζοντας το σύστημα SNG με μία ευρεία ματιά, το SNG έχει την καλύτερη οικολογική απόδοση ενώ η κατανάλωση ορυκτών πόρων είναι έντονα σταθμισμένη. Τα συστήματα ξύλου είναι με διαφορά τα καλύτερα, όσον αφορά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (GHG). Το SNG εκπέμπει περίπου διπλάσια από το σύστημα θρυμμάτων ξύλου. Οι αρνητικές πτυχές του συστήματος αυτού είναι οι εξής:

1. Οι εκπομπές NO<sub>x</sub> και σωματιδίων
2. Η σχετικά χαμηλή ενεργειακή απόδοση που οφείλεται στην πρόσθετη επεξεργασία για τη μετατροπή του ξύλου σε αέριο.

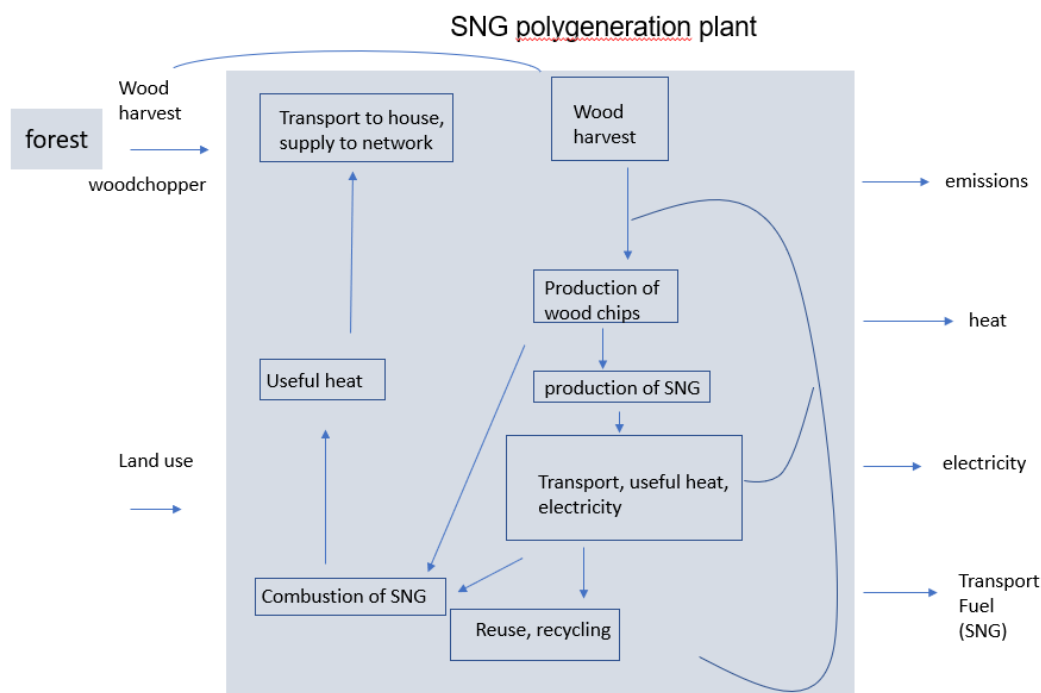
Για την καλύτερη οικολογική απόδοση από την καύση ξύλου προτιμάται εγκατάσταση φίλτρων σωματιδίων υψηλής απόδοσης. Το SNG θα πρέπει κατά προτίμηση να χρησιμοποιείται στα αυτοκίνητα, καθώς συμφέρει οικολογικά και οικονομικά σε σχέση με το πετρέλαιο για τα σημερινά αυτοκίνητα, παρά για τα συστήματα θέρμανσης [\[14\]](#).

### 3. Περιγραφή συστήματος και μεθοδολογία

#### 3.1 Περιγραφή του συστήματος για παραγωγή SNG από ξύλο

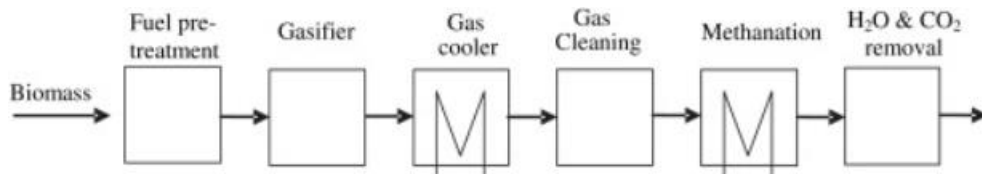
Η παραγωγή του SNG, όπως έχει ήδη διευκρινιστεί, βασίζεται στην αεριοποίηση βιομάζας, η οποία είναι και η συμβατική διαδρομή για την παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου. Η διαδικασία έχει ως εξής: 1) η βιομάζα υπόκειται σε αεριοποίηση για την παραγωγή αερίου σύνθεσης και 2) ακολουθεί μεθανίωση του αερίου σύνθεσης σε SNG [2].

Αρχικά παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ροής της εξωτερικής διαδικασίας μετατροπής του ξύλου σε SNG, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για θέρμανση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως καύσιμο στον τομέα των μεταφορών. Το ξύλο συγκομιδής χρησιμοποιείται από το εργοστάσιο πολυπαραγωγής που παράγει SNG, ώστε αρχικά να παραχθούν τα λεγόμενα ροκανίδια και στη συνέχεια το SNG. Όταν η διαδικασία ολοκληρωθεί, θα ακολουθήσει ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση, ώστε να μπορέσει να αξιοποιηθεί η ενέργεια και το ίδιο το SNG όσο το δυνατόν καλύτερα. Από τη καύση του SNG μπορεί να ανακτηθεί χρήσιμη θερμότητα η οποία με τη σειρά της θα διανεμηθεί στο δίκτυο.



Εικόνα 7. Διάγραμμα ροής του συστήματος θέρμανσης SNG με βάση το ξύλο

Όσον αφορά τώρα τις εσωτερικές διαδικασίες για την παραγωγή αυτή, αρχικά παρουσιάζεται ένα απλοποιημένο διάγραμμα των μετατροπών. Η βιομάζα, συγκεκριμένα το ξύλο εδώ, εισέρχεται και αρχικά υπόκειται σε ένα στάδιο προ επεξεργασίας προτού μπει στον αεριοποιητή. Ακολουθεί η διαδικασία ψύξης προτού το αέριο εισέλθει σε κάποιο σύστημα καθαρισμού. Τέλος, το αέριο μετατρέπεται σε μεθάνιο και η διαδικασία ολοκληρώνεται με τις διεργασίες για απομάκρυνση νερού και CO<sub>2</sub>.



**Εικόνα 8.** Διάγραμμα ροής της εσωτερικής διαδικασίας παραγωγής SNG [26]

Λεπτομερέστερα, αρχικά η πρώτη ύλη υφίσταται μία επεξεργασία, με σκοπό να απομακρυνθούν διάφορες ακαθαρσίες, όπως πετρώματα, χρώμα και σωματίδια μεγάλου μεγέθους [24]. Στη συνέχεια, αυτή τροφοδοτείται στον αεριοποιητή. Εκεί συμβαίνουν αντιδράσεις υπό υψηλή θερμοκρασία και με περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου. Το αποτέλεσμα είναι η παραγωγή ενός αερίου σύνθεσης, το οποίο αέριο το απαρτίζουν κυρίως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το υδρογόνο (H<sub>2</sub>). Δημιουργείται ξανά η ανάγκη αφαίρεσης ακαθαρσιών, όπως η πίσσα, σωματίδια, ενώσεις θείου και ίχνη ρύπων. Επομένως, τότε ακολουθεί το στάδιο του καθαρισμού του σύνθετου αερίου (Syngas Cleaning) στο οποίο στάδιο απαιτείται αρκετή ενέργεια. Η αφαίρεση πραγματοποιείται με χρήση κατάλληλου εξοπλισμού, όπως κυκλώνες και καταλυτικές προστατευτικές κλίνες. Ακολουθεί το στάδιο της μεθανίωσης, όπου πλέον το καθαρισμένο αέριο σύνθεσης, το οποίο αποτελείται κυρίως από CO, CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub> τροφοδοτείται σε αντιδραστήρα μεθανίωσης και μέσω καταλυτικής αντίδρασης το CO, CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub> μετατρέπονται σε μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), που είναι και το κύριο συστατικό του SNG. Το παραγόμενο αέριο λοιπόν, υφίσταται κατάλληλη επεξεργασία, ώστε να είναι σε θέση να συμπιεστεί για αποθήκευση ή διανομή [25].

Πιο αναλυτικά οι τεχνολογίες αεριοποίησης στις οποίες υπόκειται η βιομάζα είναι τρεις:

1. Παρασυρόμενη ροή (Entrained Flow) – η οποία συμβαίνει περίπου στους 1300 °C και παράγεται ένα αέριο σύνθεσης που περιέχει κυρίως CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O.
2. Κυκλοφοριακή ρευστοποιημένη κλίνη (CFB) και
3. Αλλοθερμική ή έμμεση αεριοποίηση (Allothermal), η οποία έχει και την υψηλότερη συνολική απόδοση του SNG.

Οι αεριοποιητές μεσαίας θερμοκρασίας 2. και 3. Allothermal και CFB, οι οποίοι λειτουργούν περίπου στους 850 °C, δίνουν ένα αέριο παραγωγής το οποίο εκτός από

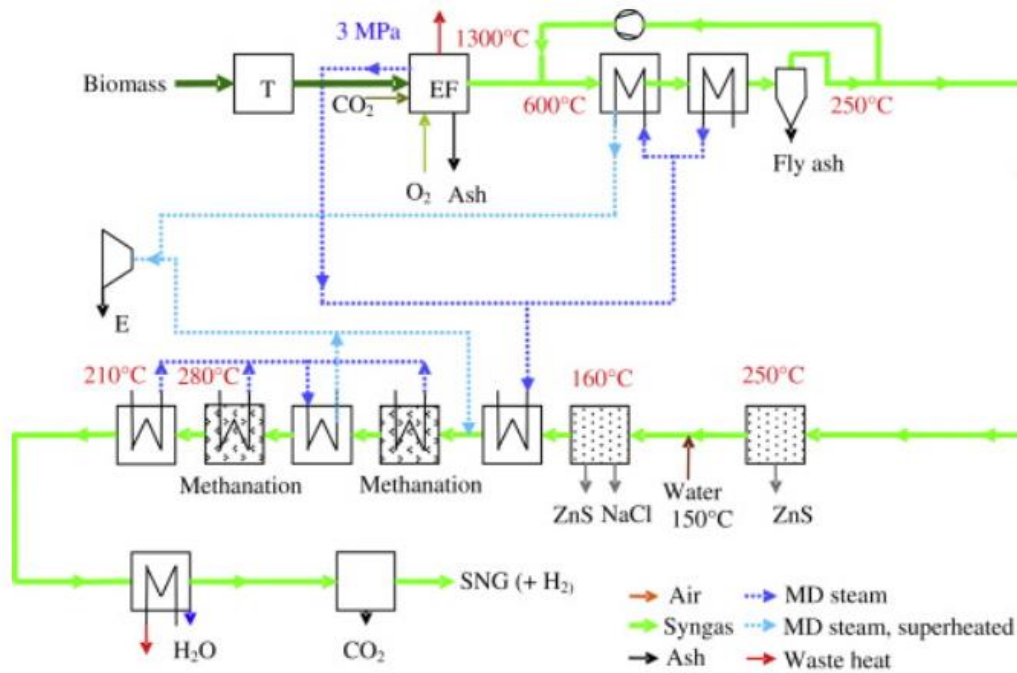


CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>O περιέχει CH<sub>4</sub>, ακόρεστους και αρωματικούς υδρογονάνθρακες, όπως C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> και πίσσα. Αρχικά γίνεται μία παρουσίαση και των 3 αεριοποιητών.

1. Παρασυρόμενη ροή (Entrained Flow): Η αεριοποίηση παρασυρόμενης ροής απαιτεί μια ενεργοβόρα προ επεξεργασία (pre-treatment) για την παραγωγή λεπτής σκόνης. Για την απομάκρυνση της υγρασίας επιλέγεται η διαδικασία torrefaction ακολουθούμενη από άλεση, λόγω της σχετικά χαμηλής ενεργειακής απαίτησης. Αποξηραμένη βιομάζα τροφοδοτείται στον αντιδραστήρα διάσπασης. Η κατεστραμμένη βιομάζα αλέθεται, συμπιέζεται με CO<sub>2</sub> και τροφοδοτείται στον αεριοποιητή Entrained Flow που λειτουργεί στα 3MPa και στους 1300 °C. Το αέριο σύνθεσης που εξέρχεται από τον αεριοποιητή ψύχεται πρώτα με σβήσιμο αερίου στους 600<sup>0</sup>C και στη συνέχεια ψύχεται σε εναλλάκτη θερμότητας που παράγει ατμό. Η ιπτάμενη τέφρα αφαιρείται από το ψυχρό αέριο με ένα φίλτρο. Μέρος του αερίου ανακυκλώνεται για να λειτουργήσει ως αέριο απόσβεσης. Το θείο και το χλώριο απομακρύνονται από το αέριο με προσροφητικά. Το αέριο υγραίνεται και προθερμαίνεται πριν μετατραπεί σε μεθάνιο. Η θερμότητα που παράγεται στο τμήμα μεθανίωσης χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα αφαιρούνται από το αέριο πριν από την έγχυση στο δίκτυο φυσικού αερίου.

Το στάδιο προ επεξεργασίας (torrefaction) με μεγαλύτερη ανάλυση παρουσιάζεται παρακάτω. Η ενέργεια που απαιτείται για την άλεση του καυσίμου μειώνεται σημαντικά και το καύσιμο περιέχει λιγότερο νερό, το οποίο γεγονός βελτιώνει την απόδοση του ψυχρού αερίου ενός αεριοποιητή Entrained Flow. Η διαδικασία αυτή (torrefaction) μειώνει επίσης το κόστος μεταφοράς και αποθήκευσης για τη βιομάζα.

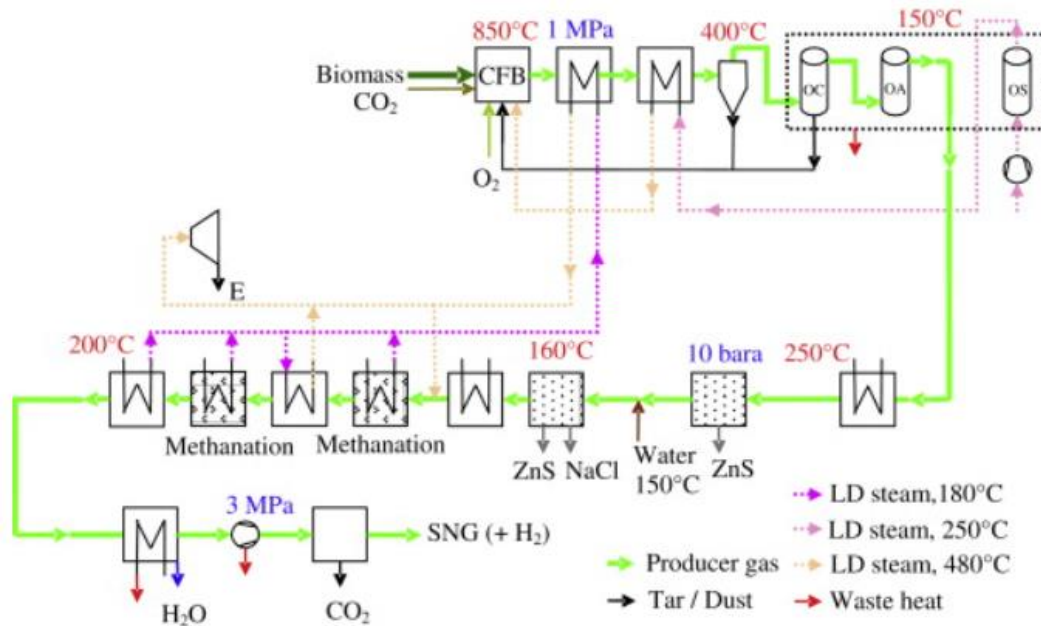
Ακολουθεί σχηματική αναπαράσταση των λεπτομερειακών διαδικασιών παραγωγής SNG από βιομάζα για την περίπτωση του αεριοποιητή Entrained Flow.



Εικόνα 9. Σύστημα παραγωγής SNG από αεριοποιητή παρασυρόμενης ροής [26]

Ο αντιδραστήρας διάσπασης (torrefaction reactor) συμβολίζεται με T στο σχήμα, ο αεριοποιητής Entrained Flow με EF.

2. Αεριοποιητής κυκλοφοριακής ρευστοποιημένης κλίνης (CFB): Τα ροκανίδια ξύλου συμπιέζονται από ένα σύστημα χόανης κλειδώματος και τροφοδοτούνται στον αεριοποιητή που λειτουργεί στο 1 MPa και στους 850 °C. Το αέριο παραγωγής που εξέρχεται από τον αεριοποιητή ψύχεται στους 400 °C. Το μεγαλύτερο μέρος της σκόνης (στάχτη που περιέχει άνθρακα) απομακρύνεται από το αέριο παραγωγής με έναν κυκλώνα. Η υπόλοιπη σκόνη και η πίσσα διαλύονται σε λάδι στο σύστημα καθαρισμού αερίου Olga. Η βαριά πίσσα αφαιρείται στον συλλέκτη (OC) και η ελαφριά πίσσα αφαιρείται στον απορροφητή (OA). Βαριά πίσσα και μικρή ποσότητα τέφρας ανακυκλώνονται πίσω στον αεριοποιητή. Η ελαφριά πίσσα αφαιρείται από το λάδι με ατμό σε απογυμνωτή (OS). Το μείγμα ατμού/ ελαφριάς πίσσας προθερμαίνεται και αποστέλλεται πίσω στον αεριοποιητή. Πριν από την αφαίρεση θείου και χλωρίου με προσροφητικά, το αέριο παραγωγής προθερμαίνεται στους 250 °C. Το καθαρισμένο αέριο στη συνέχεια προθερμαίνεται, ενυδατώνεται και μετατρέπεται σε μεθάνιο σε αρκετούς αντιδραστήρες μεθανίωσης. Η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού. Το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα αφαιρούνται από το αέριο πριν το SNG συμπιεστεί στα 3 MPa και εγχυθεί στο δίκτυο φυσικού αερίου. Για τους αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης δεν απαιτείται προ επεξεργασία παρόμοια αυτής των αεριοποιητών παρασυρόμενης ροής. Παρακάτω απεικονίζεται το σύστημα παραγωγής SNG από αεριοποιητή CFB.



Εικόνα 10. Σύστημα παραγωγής SNG από αεριοποιητή CFB [26]

3. Allothermal gasifier: Τα ροκανίδια ξύλου τροφοδοτούνται στον αεριοποιητή (MG) που λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία 850 °C. Το αέριο παραγωγής που εξέρχεται από τον αεριοποιητή ψύχεται στους 400 °C. Το μεγαλύτερο μέρος της σκόνης απομακρύνεται επίσης από το αέριο παραγωγής με έναν κυκλώνα. Η υπόλοιπη σκόνη και η πίσσα διαλύονται σε λάδι στο σύστημα καθαρισμού αερίου OIga (OC και OA). Βαριά πίσσα και μικρή ποσότητα τέφρας ανακυκλώνονται πίσω στο τμήμα καύσης του αλλοθερμικού αεριοποιητή. Η ελαφριά πίσσα αφαιρείται από το λάδι με αέρα σε απογυμνωτή (OS). Το μίγμα αέρα/ελαφριάς πίσσας προθερμαίνεται και χρησιμοποιείται ως εμπλουτισμένος με καύσιμο αέρας καύσης στο τμήμα καύσης (MC) του αλλοθερμικού αεριοποιητή. Τα υπόλοιπα βήματα παραγωγής SNG είναι ίδια με τα προηγούμενα. Προστίθεται αέρας στα καυσαέρια αφήνοντας τον καυστήρα (MC) στο ύψος των εξάλων ή μετά τον καυστήρα (MA) για να μειωθούν οι εκπομπές CO και C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>. Τα καυσαέρια ψύχονται και αφαιρούνται από τη σκόνη με τη βοήθεια ενός φίλτρου σακούλας πριν σταλεί στη στοίβα. Η θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού [26].



και το νερό συμυκνώνεται από το αέριο, το οποίο στη συνέχεια συμπιέζεται στα 3 MPa (εάν απαιτείται).

Διαφορετικές τεχνολογίες αφαίρεσης διοξειδίου του άνθρακα είναι διαθέσιμες στο εμπόριο. PSA (Pressure Swing Adsorption), φυσική απορρόφηση (πχ διεργασία Selexol), ή διαχωρισμός αερίων μεμβράνης (μεμβράνη UOP Separex). Στη συγκεκριμένη μελέτη θεωρήθηκε πως το διοξείδιο του άνθρακα αφαιρείται κατά 98%. Η κατανάλωση ενέργειας για την απομάκρυνση του CO<sub>2</sub> υπολογίζεται από την απαιτούμενη ενέργεια άντλησης για τον διαλύτη σε μια μονάδα Selexol. Η απώλεια μεθανίου θεωρείται ότι είναι 1%. Το πλούσιο σε CO<sub>2</sub> αέριο δεσμεύεται σε άδεια πεδία αερίου, με αποτέλεσμα η συνολική διαδικασία να γίνεται αρνητική σε διοξείδιο του άνθρακα. Τέλος, το ελβετικό εθνικό πρότυπο για απεριόριστη έγχυση αερίου περιορίζει τη συγκέντρωση υδρογόνου στο SNG στο 5 vol%.

Η παραγωγή SNG από ξύλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε λέβητες αερίου ή επιβατικά αυτοκίνητα. Έχει αποδειχθεί πως το αεριοποιημένο ξύλο είναι ένας εύκαμπος και με ουδέτερη εκπομπή CO<sub>2</sub> φορέας ενέργειας. Σύμφωνα με το Ελβετικό Ομοσπονδιακό Ινστιτούτο Έρευνας δασών, χιονιού και τοπίου (WSL), 21 PJ/a από υπολειμματικό ξύλο από το δάσος, θα μπορούσε επιπλέον να χρησιμοποιηθεί για ενεργειακούς σκοπούς στην Ελβετία. Από αυτό το ξύλο λοιπόν θα μπορούσε να παραχθεί το συνθετικό φυσικό αέριο (SNG) και να προμηθεύεται στο δίκτυο φυσικού αερίου για να αποκαταστήσει το ορυκτό φυσικό αέριο για λόγους θέρμανσης ή για τροφοδοσία οχήματος αερίου [14].

### 3.2 Περιγραφή των διεργασιών, των συνθηκών και των ορίων του προς μελέτη συστήματος

Αρχικά, σε ένα γενικό πλαίσιο θα γίνει μία ανάλυση των σταδίων που αποτελούν τη διαδικασία παραγωγής SNG και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν από κάθε στάδιο. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την παραγωγή πρώτης ύλης. Αυτό το στάδιο αφορά την καλλιέργεια, τη συγκομιδή και τη μεταφορά του ξύλου στην εγκατάσταση μετατροπής. Στη συνέχεια εισέρχεται στο σύστημα η ξυλεία ως πρώτη ύλη, σε αυτή την περίπτωση τα ροκανίδια. Εκτός από την εισροή της πρώτης ύλης, θα χρειαστεί η συνεισφορά ενέργειας για τις απαραίτητες διεργασίες τις οποίες θα υποστεί αυτή. Απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για διεργασίες όπως η ξήρανση ξύλου, η θέρμανση της διαδικασίας αεριοποίησης, καθώς και η λειτουργία άλλων διαδικασιών στην ολοκλήρωση μετατροπής [24]. Από την παραγωγή, λοιπόν πρώτης ύλης προκύπτουν και κάποιες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αυτές είναι η αλλαγή χρήσης γης, η χρήση νερού και η χρήση λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και ενέργειας για τη συγκομιδή και τη μεταφορά και στη συνέχεια τις διεργασίες μετατροπής. Η διαδικασία μετατροπής είναι υπεύθυνη και για εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων όπως τα σωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, ενώσεις του θείου, αλλά και αέρια του θερμοκηπίου. Στη συνέχεια έχουμε τον καθαρισμό αερίου, αλλά και γενικότερα τα διάφορα στάδια προετοιμασίας, όπως φιλτράρισμα, τρίψιμο, καταλυτική μετατροπή, στα οποία στάδια υπόκειται το αέριο σύνθεσης που παράγεται. Σε αυτές τις διαδικασίες γίνεται, επίσης χρήση ενέργειας και νερού και το περιβάλλον επιβαρύνεται με τις εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων όπως το μονοξείδιο του άνθρακα και τα οξείδια του αζώτου. Το



καθαρισμένο, πλέον, αέριο σύνθεσης που αποτελείται κυρίως από CO, CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>, τροφοδοτείται σε αντιδραστήρα μεθανίωσης, όπου μέσω μιας καταλυτικής αντίδρασης τα στοιχεία αυτά θα μετατραπούν σε μεθάνιο, το κύριο συστατικό του SNG. Η διαδικασία της μεθανίωσης είναι εξώθερμη, οπότε απελευθερώνεται θερμική ενέργεια κατά την αντίδραση αυτή, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού ή για άλλες απαιτήσεις θερμότητας που μπορεί να έχει η εγκατάσταση. Το επόμενο στάδιο είναι η συμπίεση και η μεταφορά, όπου το καθαρισμένο αέριο συμπιέζεται και μεταφέρεται στον τελικό χρήστη. Για τη διαδικασία αυτή χρειάστηκε οπωσδήποτε ενέργεια ξανά για τη συμπίεση, καθώς από τις μεταφορές υπήρξε επιπλέον επιβάρυνση από εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων. Παρόλα αυτά, ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος της διαδικασίας παραγωγής SNG από ξύλο ποικίλλει κάθε φορά, εξαιτίας των διαφορετικών παραγόντων, όπως για παράδειγμα τον τύπο της χρησιμοποιούμενης πρώτης ύλης ξύλου, των αποκλίσεων στην αποτελεσματικότητα κάθε φορά της διαδικασίας μετατροπής που ακολουθείται, αλλά και τις πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία της διαδικασίας [24].

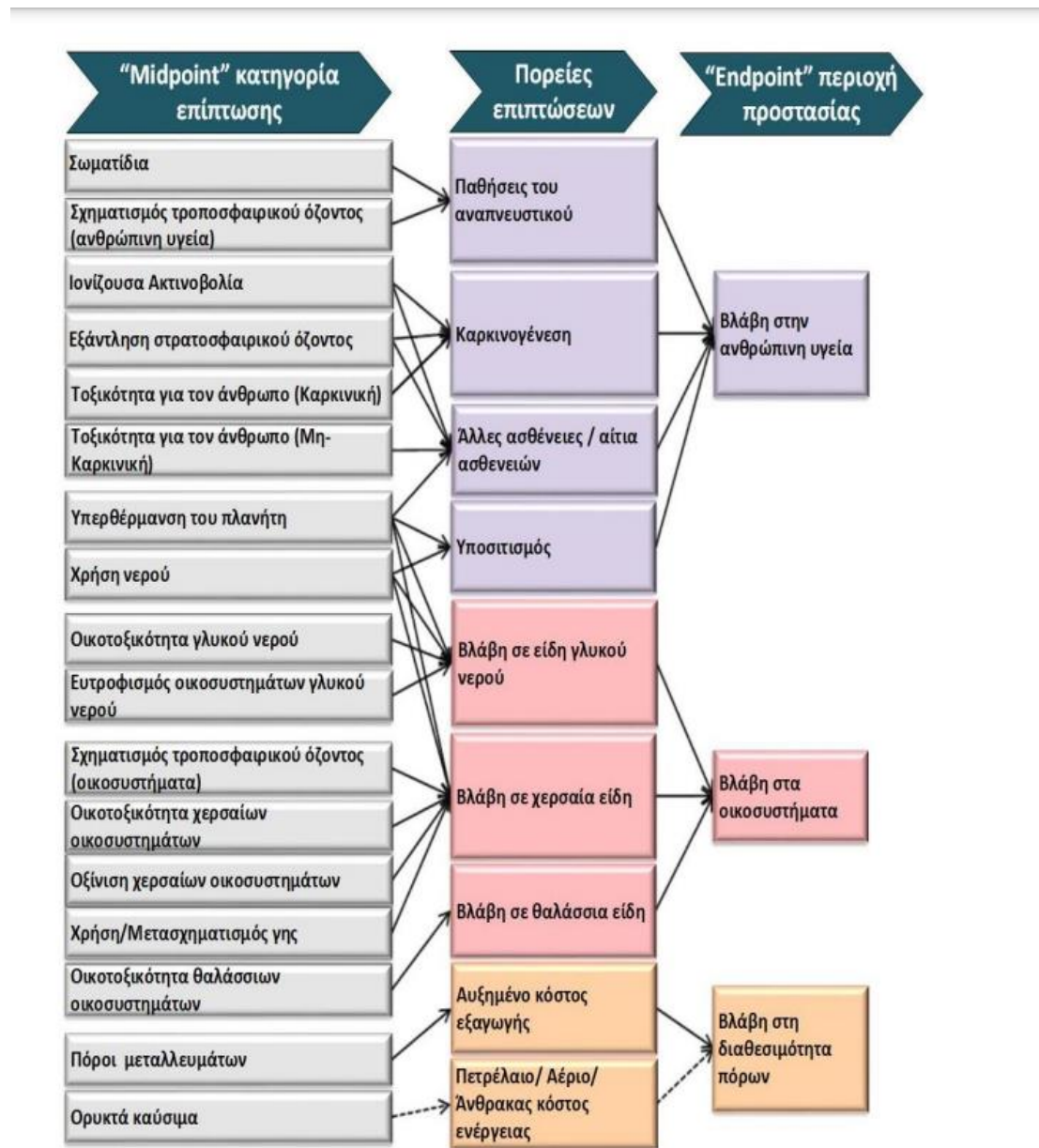
Για να πραγματοποιηθεί ανάλυση κύκλου ζωής για την παραγωγή SNG από ξυλώδη βιομάζα (ροκανίδια) στη συνέχεια, θα οριστεί ως γεωγραφική περιοχή της μελέτης ένα εργοστάσιο στη Φινλανδία, το οποίο λειτουργεί, όπως έχει ήδη διευκρινιστεί με ανοδική αλλοθερμική αεριοποίηση. Η απόδοση θερμικής ισχύος του εργοστασίου αυτού είναι χωρητικότητας 6 MW<sub>th</sub>. Η μαζική παροχή του εργοστασίου σε SNG ορίζεται ως 150 Nm<sup>3</sup> SNG ανά μετρικό τόνο τροφοδοσίας ξηρού ξύλου. Ο χρόνος ζωής της συγκεκριμένης μονάδας θεωρείται πως είναι 20 χρόνια και για λόγους απλοποίησης το μέρος από όπου συλλέγεται η ξυλεία βρίσκεται δίπλα στο εργοστάσιο, έτσι ώστε η χιλιομετρική απόσταση μεταξύ αυτών των δύο να θεωρείται αμελητέα. Όσον αφορά τη διαθεσιμότητα ξύλου, θα ληφθεί υπόψη το βασικό σενάριο διαθεσιμότητας ξύλου (ESA) δηλαδή ποσότητα ξύλου ίση με 1,2 εκατομμύρια m<sup>3</sup>.

Στη συνέχεια, η κάθε διεργασία που ακολουθήθηκε για την παραγωγή SNG συνοδεύεται και από τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης:

1. Για τη μετατροπή του ξύλου σε ροκανίδια, δηλαδή για το τρίψιμο ξύλου (woodchipping) ορίζεται ο βαθμός απόδοσης της τάξεως του 95%, δηλαδή περίπου το 95% του ξύλου εισόδου μετατρέπεται σε ροκανίδια.
2. Για τη ξήρανση αυτών ορίζεται ποσοστό 90% ως βαθμός απόδοσης, δηλαδή θεωρείται ότι το 90% της υγρασίας μπορεί να αφαιρεθεί με τη συγκεκριμένη διαδικασία.
3. Για την αλλοθερμική αεριοποίηση εδώ θεωρείται ότι επιτυγχάνεται απόδοσης της τάξεως του 80%.
4. Για τη διεργασία του καθαρισμού του αερίου σύνθεσης (syngas cleaning) θα θεωρηθεί απόδοση ίση με 85%.
5. Τέλος, για τη διεργασία της μεθανίωσης θεωρείται πως το 90% του αερίου σύνθεσης μετατρέπεται τελικά σε SNG.
6. Η συνολική απόδοση του συστήματος εκτιμάται γύρω στο 40%.

Η όλη διαδικασία θα προσεγγιστεί σύμφωνα με τη μέθοδο ReCiPe 2016 σε midpoint level. Παρακάτω παρουσιάζεται μία εικόνα όπου αιτιολογείται η διαφορά ανάμεσα στην προσέγγιση σε midpoint level και endpoint level. Με την πρώτη

προσέγγιση παρουσιάζονται 18 κατηγορίες επιπτώσεων κατά τη διαδικασία εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ενώ με τη δεύτερη προσέγγιση υπάρχουν 3 βασικές κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων [15].



Εικόνα 12. Διασύνδεση κατηγοριών επιπτώσεων μεθοδολογίας ReCiPe 2016 [15]

Στη συνέχεια για τις κατηγορίες επιπτώσεων επιπέδου «midpoint» παρουσιάζεται κάθε φορά η ισοδύναμη μονάδα.

Κατηγορία επιπτώσεων	Αγγλικός όρος	Ισοδύναμη μονάδα
Παγκόσμια υπερθέρμανση	Global warming	yr/kg CO <sub>2</sub>
Εξάντληση όζοντος	Stratospheric ozone depletion	yr/kg CFC-11
Ιονίζουσα ακτινοβολία	Ionizing radiation	yr/kBq Cobalt-60
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία	Ozone formation, human health	yr/kg NO <sub>x</sub>
Σχηματισμός σωματιδίων	Fine particulate matter formation	yr/kg PM <sub>2.5</sub>
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	Ozone formation, terrestrial ecosystems	yr/kg NO <sub>x</sub>
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	Terrestrial acidification	yr/kg SO <sub>2</sub>
Ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού	Freshwater eutrophication	yr/kg P
Ευτροφισμός θαλασσίων οικοσυστημάτων	Marine eutrophication	yr/kg N
Χερσαία οικοτοξικότητα	Terrestrial ecotoxicity	yr/kg 1,4-dichlorobenzene (1,4-DCB)
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	Freshwater ecotoxicity	yr/kg 1,4-dichlorobenzene (1,4-DCB)
Θαλάσσια οικοτοξικότητα	Marine ecotoxicity	yr/kg 1,4-dichlorobenzene (1,4-DCB)
Ανθρώπινη καρκινογενής οικοτοξικότητα	Human carcinogenic toxicity	yr/kg 1,4-dichlorobenzene (1,4-DCB)
Ανθρώπινη μη-καρκινογενής οικοτοξικότητα	Human non-carcinogenic toxicity	yr/kg 1,4-dichlorobenzene (1,4-DCB)
Χρήση γης	Land use	m <sup>2</sup> yr
Εξάντληση πόρων μεταλλευμάτων	Mineral resource scarcity	kg Copper
Εξάντληση ορυκτών πόρων	Fossil resource scarcity	kg oil
Χρήση νερού	Water use	m <sup>3</sup>

**Πίνακας 2.** Κατηγορίες επιπτώσεων επιπέδου «midpoint» [15]

Όσον αφορά τις συνθήκες του συστήματος μελέτης, μία τυπική τιμή για τη θερμοκρασία εισόδου αερίου στον πρώτο αντιδραστήρα μεθανίωσης είναι 610 °C. Σύμφωνα με τις τυπικές συνθήκες διεργασίας για ξυλώδη βιομάζα, η πίεση στην οποία πραγματοποιείται η μεθανίωση είναι 20 bar, ενώ η πίεση του αεριοποιητή είναι 7 bar. Η μελέτη που θα πραγματοποιηθεί για την αξιολόγηση κύκλου ζωής θα είναι στα πλαίσια των ορίων του συστήματος Cradle to Gate. Η μελέτη δηλαδή θα ολοκληρώνεται με την αξιολόγηση των διαδικασιών της προμήθειας των πρώτων υλών και της διαδικασίας της παραγωγής αφού θεωρήθηκε ότι δεν τίθεται το ζήτημα της μεταφοράς.

Παρακάτω απεικονίζεται ο πίνακας με τις πληροφορίες σχετικά με τη θερμοκρασία, την πίεση, το ρυθμό ροής μάζας, το ρυθμό ροής εξέργειας και την ειδική εξέργεια των ρευμάτων της επεξεργασμένης διεργασίας ξύλου σε SNG σε τυπικές



συνθήκες διεργασίας (πίεση αεριοποιητή 7 bar, πίεση μεθανίωσης 20 bar, θερμοκρασία 1ου αντιδραστήρα μεθανίωσης 610 °C).

No.	Stream	Input/product	T (°C)	Pressure (bar)	Mass flow rate (kg/s)	Exergy flow rate (MW)	Specific exergy (kJ/kg)
1	Biomass	Input	25	1	10.0	181.2	18,120
2	Air	Input	25	1	13.0	0	0
3	Water	Input	25	7	2.52	0.002	0.79
4	Pumping work	Input	–	–	–	0.004	–
5	Compression work	Input	–	–	–	3.7	–
6	Cold flue gas	Output	50	7	14.27	3.2	224.2
7	Syngas		737	7	11.25	149.9	13,324
8	Steam	Product	122	1	3.0	1.6	593.3
9	Compression work	Input	–	–	–	3.8	–
10	Water	Input	25	7	2.16	0.001	0.46
11	Pumping work	Input	–	–	–	0.011	–
12	Steam	Input	418	1	9.03	7.3	808.4
13	Steam	Product	162	1	22.13	12.7	573.9
14	Water	Input	25	1	–	0.7	–
15	Compression work	Input	–	–	–	1.0	–
16	Compression and pumping work	Input	–	–	–	12.6	–
17	Compression work	Input	–	–	–	0.1	–
18	SNG	Product	63	66.0	2.57	105.1	40,895

**Πίνακας 3.** Θερμοκρασία, πίεση, ρυθμός ροής μάζας, ρυθμός ροής εξέργειας και ειδική εξέργεια των ρευμάτων της επεξεργασμένης διεργασίας ξύλου σε SNG σε τυπικές συνθήκες διεργασίας (πίεση αεριοποιητή 7 bar, πίεση μεθανίωσης 20 bar, θερμοκρασία 1ου αντιδραστήρα μεθανίωσης 610 °C) [24]

Οι εκπομπές GHG κατά την παραγωγή SNG με τη χρήση ξύλου μπορούν να κυμανθούν από 86.9 μέχρι 224.7 kgCO<sub>2</sub>eq/MWhSNG. Η μονάδα μέτρησης αυτή (CO<sub>2</sub>eq) εκφράζει την οικονομική απόδοση και την ανταγωνιστικότητα [24].

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις ιδιότητες της ξυλώδους βιομάζας.

		Treated wood
Proximate analysis		
Moisture	wt% wet	14.8
Volatile matter	wt% daf (dry ash free)	80.3
Ash	wt% dry	4.9
Ultimate analysis		
Carbon	wt% daf	51.4
Hydrogen	wt% daf	6.07
Oxygen	wt% daf	41.3
Nitrogen	wt% daf	1.24
Sulfur	wt% daf	0.10
Chlorine	wt% daf	$9.9 \times 10^{-2}$
Fluorine	wt% daf	$3.0 \times 10^{-3}$
HHV	MJ/kg dry	19.69

**Πίνακας 4.** Ιδιότητες της πρώτης ύλης [25]

Παρατίθενται και άλλα δεδομένα στον ακόλουθο πίνακα σχετικά με τη σύνθεση και την απόδοση σε δείκτη Wobbe.

SNG composition		Treated wood
CO	mole%	0.16
CO <sub>2</sub>	mole%	7.70
H <sub>2</sub>	mole%	6.54
H <sub>2</sub> O	mole%	$3.19 \times 10^{-9}$
N <sub>2</sub>	mole%	2.40
CH <sub>4</sub>	mole%	83.19
SNG yield	kg/kg wet feedstock	0.24–0.26
SNG yield	kg/kg dry feedstock	0.28–0.31
Exergetic efficiency $\Psi$	%	53.1–58.0

**Πίνακας 5.** Τυπική σύνθεση SNG, απόδοση και εξεργειακή απόδοση των εργοστασίων σε δείκτη Wobbe 44 MJ/Nm<sup>3</sup> [25]

### 3.3 Προσομοίωση της AKZ σε λογισμικό: SimaPro

Η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για τη διεκπεραίωση της ανάλυσης κύκλου ζωής για το εργοστάσιο μελέτης στη Φινλανδία, θα βασιστεί στην προσομοίωση του case study στο λογισμικό SimaPro.

Τα δύο κορυφαία προγράμματα λογισμικού που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για μελέτες LCA είναι SimaPro (Pre-sustainability 2012) και GaBi (PE-international 2012). Στην παρούσα εργασία θα γίνει, λοιπόν, χρήση του SimaPro, ώστε να πραγματοποιηθεί η LCA περιβαλλοντική ανάλυση για την παραγωγή SNG από ξύλο. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα λογισμικό μοντελοποίησης και αξιολόγησης προϊόντων που κυκλοφόρησε το 1990 και πωλείται σε όλο τον κόσμο. Το λογισμικό αυτό, όπως και το λογισμικό GaBi, περιλαμβάνουν α) μια διεπαφή χρήστη για τη μοντελοποίηση του συστήματος προϊόντων, β) μια βάση δεδομένων διεργασιών μονάδας κύκλου ζωής, γ) μια βάση δεδομένων με την αξιολόγηση του αντίκτυπου με δεδομένα που υποστηρίζουν πολλές μεθοδολογίες αξιολόγησης του κύκλου ζωής και δ) μια υπολογιστική μηχανή που συνδυάζει αριθμούς από τις βάσεις δεδομένων σύμφωνα με τη μοντελοποίηση των προϊόντων στη διεπαφή χρήστη.

Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα LCA από το SimaPro (καθώς και από το GaBi) θα πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή από τους ειδικούς επαγγελματίες, αφού υπάρχει αβεβαιότητα στα αποτελέσματα. Αυτή η αβεβαιότητα μάλιστα, αν συγκριθεί με αυτή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης Monte Carlo, είναι μεγαλύτερη, καθώς σε μία προσομοίωση Monte Carlo δεν μπορεί να γίνει υπολογισμός με λανθασμένα δεδομένα [27].

Το πρόγραμμα λογισμικού SimaPro, για να πραγματοποιήσει την ανάλυση κύκλου ζωής, σύμφωνα με τις οδηγίες ISO 14040 και 14044, ακολουθεί συγκεκριμένη δομή. Η τυποποιημένη αυτή δομή για τη μεθοδολογία LCA, περιλαμβάνει τα τέσσερα γνωστά κύρια στάδια (goal and scope definition, life cycle inventory analysis, life cycle impact assessment, interpretation).

Ένα αρνητικό του λογισμικού SimaPro είναι πως δεν παρέχει μοντελοποίηση αβεβαιότητας για την εκτίμηση επιπτώσεων. Ένας απλός τρόπος να αντιμετωπιστεί αυτή η έλλειψη θα μπορούσε να είναι η παροχή πληροφοριών αβεβαιότητας σε επίπεδο διαδικασίας. Μία καλύτερη λύση θα ήταν να καθοριστεί η αβεβαιότητα σε μία παράμετρο στο SimaPro, η οποία θα πολλαπλασιαστεί ενδεχομένως ή θα συνυπολογιστεί με άλλο τρόπο όπου χρειαστεί [\[17\]](#).

## 4. Εφαρμογή SimaPro στην περίπτωση μελέτης και συμπεράσματα

### 4.1 Μεθοδολογία

Αρχικά, αφού όπως έχει ήδη ειπωθεί, τα όρια του συστήματος στα οποία θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση κύκλου ζωής είναι αυτά με την ονομασία ‘cradle to gate’, όπου αναλύεται μόνο το κομμάτι της βιομηχανοποίησης του εκάστοτε προϊόντος (δηλαδή μόνο οι διαδικασίες της εξαγωγής της πρώτης ύλης και στη συνέχεια η διαδικασία της παραγωγής), το μόνο βήμα με το οποίο θα ασχοληθούμε για την εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό μας που βρίσκεται κάτω από το Inventory είναι τα Processes. Όσον αφορά την περιγραφή της διαδικασίας που θα χρειαστεί αυτή θα είναι η επιλογή του System process, για μία ολοκληρωμένη εικόνα των διαδικασιών και των εκπομπών. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται είναι η Ecoinvent, και πιο συγκεκριμένα ReCiPe 2016 Midpoint (H) οπότε και η μέθοδος που επιλέχθηκε είναι η αντίστοιχη.

Στα Processes λοιπόν, καταγράφηκαν οι διαδικασίες του woodchipping, όπου θεωρήθηκε πως το 95% του ξύλου που εισέρχεται μετατρέπεται σε ροκανίδια. Στην περίπτωση μελέτης, όπου η μαζική παροχή του εργοστασίου σε SNG ορίζεται ως 150 Nm<sup>3</sup> SNG ανά μετρικό τόνο τροφοδοσίας ξηρού ξύλου και η διαθεσιμότητα ξύλου η οποία θα ληφθεί υπόψη αποτελεί το βασικό σενάριο διαθεσιμότητας ξύλου (ESA) δηλαδή την ποσότητα ξύλου ίση με 1,2 εκατομμύρια m<sup>3</sup>, χρειάζεται να γίνουν κάποιου υπολογισμοί που παρουσιάζονται στη συνέχεια, ώστε να βρεθεί η ποσότητα των ροκανιδιών που εισέρχονται στο σύστημα. Τέλος, η πυκνότητα των ροκανιδιών θεωρείται πως είναι 1,5 g/cm<sup>3</sup>.

$$\text{μάζα διαθέσιμου ξύλου} = \text{πυκνότητα} \times \text{ESA} = 1,8 \text{ Mtn}$$

$$\text{μαζική παροχή SNG} = 150 \text{ m}^3/\text{tn} \times 1,8 \text{ Mtn} = 270 \text{ Mm}^3$$

Αρα από τα 270 Mm<sup>3</sup> ξύλου που εισέρχονται, η ποσότητα των ροκανιδιών που θα παραχθεί είναι  $0,95 \times 270 \text{ Mm}^3 = 256 \text{ Mm}^3$  ή 1,71 Mtn που θεωρούνται ξηρή μάζα.

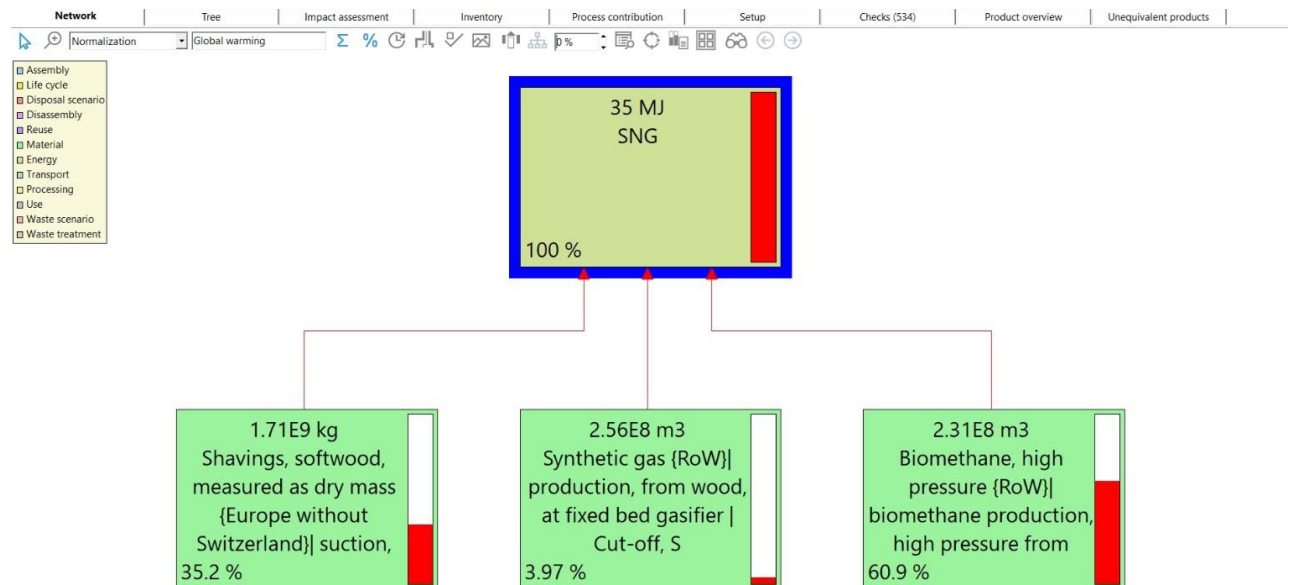
Στη συνέχεια μία ακόλουθη διαδικασία που καταγράφεται είναι η αλλοθερμική αεριοποίηση (η διαδικασία της ξήρανσης αγνοήθηκε, αφού θεωρήθηκε ότι η μάζα είναι ξηρή). Τέλος, καταγράφεται και η διαδικασία της μεθανοποίησης, όπου όπως είναι ήδη γνωστό, το 90% του αερίου που έχει συσταθεί μετατρέπεται σε SNG.

Αυτές οι διαδικασίες λοιπόν ακολουθήθηκαν, ώστε το τελικό προϊόν να είναι φυσικά το SNG.

Αφού λοιπόν θα γίνει η κατάλληλη προσομοίωση στο λογισμικό της συγκεκριμένης περίπτωσης, θα αποτυπωθούν κάποια αποτελέσματα που θα βοηθήσουν στο να γίνουν και τα τελικά συμπεράσματα σχετικά με το περιβαλλοντικό αντίκτυπο που θα είχε μία τέτοια διαδικασία.

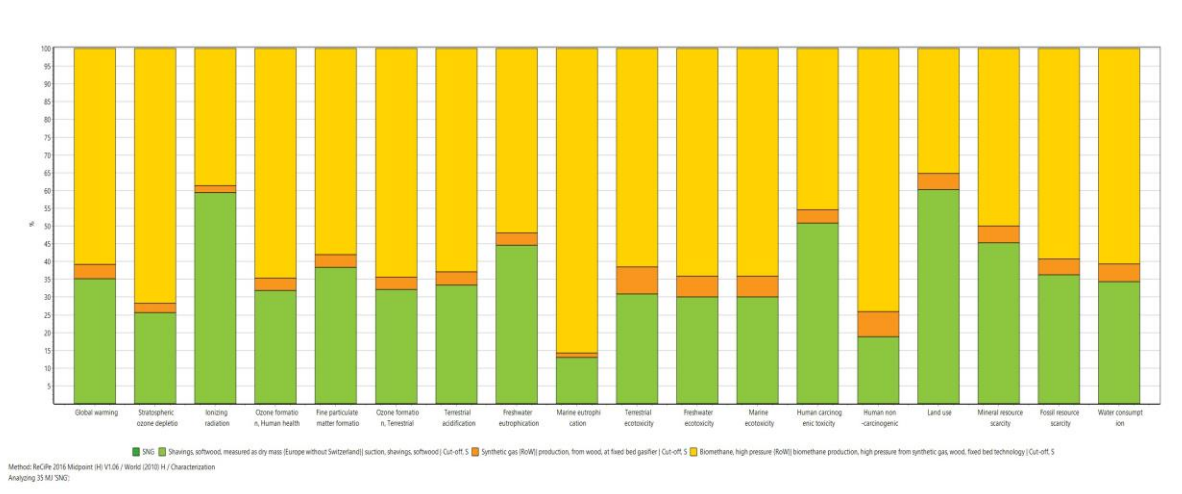
## 4.2 Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εισαγωγή δεδομένων.



**Εικόνα 13.** Διάγραμμα συμβολής διαδικασιών στην παραγωγή SNG

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, στη σύνθεση του τελικού προϊόντος SNG στη ζητούμενη ποσότητα που θεωρήθηκε 35 MJ, συνέβαλαν όπως έχει ήδη ειπωθεί τα ροκανίδια με τη μάζα των 1,71 Mtn, το αέριο σύνθεσης που παράγεται από την αλλοθερμική αεριοποίηση και από τη διαδικασία της μεθανοποίησης, όπου το αέριο αποκτά τη μορφή του SNG. Κάτω αριστερά σε κάθε πλαίσιο το ποσοστό που υπάρχει δείχνει συγκριτικά με τις υπόλοιπες απεικονιζόμενες διαδικασίες, το περιβαλλοντικό αντίκτυπο που έχουν. Αυτό το αντίκτυπο φαίνεται και με έναν άλλον τρόπο που απεικονίζεται στη στήλη που βρίσκεται δεξιά σε κάθε πλαίσιο. Είναι λοιπόν φανερό πως στη διαδικασία παραγωγής SNG, το βήμα της μεθανοποίησης αφήνει και το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ενώ η μικρότερη επιβάρυνση οφείλεται στη διαδικασία της αεριοποίησης.



Εικόνα 14. Κατηγορίες επιπτώσεων-midpoint level

Στις παραπάνω εικόνες φαίνεται σε τι ποσοστό συμβάλλει κάθε μία από τις 3 διαδικασίες που αναλύθηκαν σε καθεμιά από τις 18 κατηγορίες επιπτώσεων που αναλύονται κάθε φορά σε επίπεδο midpoint. Σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων φαίνεται να υπάρχει μία παρόμοια μορφή αποτελεσμάτων. Η παραγωγή ροκανιδίων και η διαδικασία της μεθανοποίησης έχουν τα μεγαλύτερα ποσοστά ευθύνης για τις υπό μελέτη κατηγορίες επιπτώσεων.

Στην υπερθέρμανση του πλανήτη η διαδικασία της μεθανίωσης συμβάλλει περισσότερο από τις υπόλοιπες διαδικασίες καθώς κατά τη μεθανίωση πραγματοποιούνται εξώθερμες αντιδράσεις που έχουν σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό μεθανίου, που αποτελεί ένα από τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου. Κατά την παραγωγή λοιπόν SNG το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι ιδιαίτερα υψηλό εάν χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια από ορυκτά καύσιμα κατά τη διάρκεια παραγωγής SNG. Επομένως, χρειάζεται να αναπτυχθεί η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για την απόκτηση SNG με χαμηλότερο GWP από το φυσικό αέριο, καθώς η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στον ηλεκτρολύτη και σε άλλες διεργασίες αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος του GWP σε τεχνολογίες Power to Methane [29]. Στην εξάντληση του στρατοσφαιρικού όζοντος φαίνεται πάλι τη μεγαλύτερη επίδραση να την έχει η διαδικασία της μεθανίωσης, καθώς οι χλωροφθοράνθρακες ( όπου η εκπομπή τους αποτελεί τη βασικότερη αιτία της εξάντλησης του στρατοσφαιρικού όζοντος) προέρχονται και από παράγωγα του μεθανίου. Στη συνέχεια για την ιοντίζουσα ακτινοβολία υπεύθυνη είναι κυρίως η διαδικασία της παραγωγής ροκανιδίων από ξύλο. Η περιβαλλοντική αυτή επίπτωση έχει επίπτωση στην υγεία του ανθρώπου. Αντίθετα, για τον σχηματισμό τροποσφαιρικού όζοντος και για τον σχηματισμό λεπτών σωματιδίων, οι οποίες επιπτώσεις προκαλούν παθήσεις του αναπνευστικού, η διαδικασία της μεθανίωσης έχει τον πρωταρχικό ρόλο. Άλλωστε, όπως έχει ήδη διευκρινιστεί η διαδικασία παραγωγής SNG έχει επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου κυρίως από τα όργανα του αναπνευστικού. Το μεθάνιο ευθύνεται για το 18% της υπερθέρμανσης της ατμόσφαιρας. Άλλο ένα πρόβλημα που δημιουργείται είναι η οξίνιση των χερσαίων οικοσυστημάτων, εξαιτίας των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>). Ο ευτροφισμός οικοσυστημάτων γλυκού νερού προκαλείται εξαιτίας της υπέρμετρης

αύξησης της συγκέντρωσης θρεπτικών στοιχείων και προκαλείται κυρίως κατά τη διαδικασία της μεθανίωσης, αλλά και κατά τη διαδικασία της μετατροπής του ξύλου σε ροκανίδια. Πέρα από τα οικοσυστήματα του γλυκού νερού, ευτροφισμός δημιουργείται και στις θάλασσες, όπου κυρίως οφείλεται στη διαδικασία της μεθανίωσης. Ο ευτροφισμός χαρακτηρίζεται από υπερβολική ανάπτυξη φυτών και φυκών. Η άνθηση των φυκών συνδέεται με τον εμπλουτισμό των θρεπτικών ουσιών που προκύπτει από ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως η γεωργία, η βιομηχανία και η διάθεση λυμάτων. Έτσι δικαιολογείται και η παρουσία ευτροφισμού κατά τη διάρκεια λειτουργίας του προς μελέτη συστήματος [28]. Η μεθανίωση έχει το μεγαλύτερο μερίδιο ευθύνης και για την οικοτοξικότητα είτε χερσαίων και θαλάσσιων οικοσυστημάτων, είτε του γλυκού νερού, λόγω χημικών ουσιών που εκπέμπονται στο περιβάλλον (νερό, έδαφος) κατά τη διαδικασία της μεθανίωσης. Οικοτοξικότητα βέβαια μπορεί να προκληθεί από διάφορες χημικές ουσίες σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του συστήματος. Άλλη μία σοβαρή επίπτωση που προκαλείται στον άνθρωπο είναι η τοξικότητα για αυτόν εξαιτίας των εκπομπών των οξειδίων του αζώτου και σωματιδίων που αποτελούν ουσίες τοξικότητας για τον άνθρωπο. Η χρήση γης ή ο μετασχηματισμός της καθώς είναι φυσικό επηρεάζεται περισσότερο από τη χρήση ξύλου και τη διαδικασία μετατροπής του σε ροκανίδια. Επίσης ζημιώνεται και η διαθεσιμότητα πόρων είτε ορυκτών, είτε μεταλλευμάτων. Γενικά οι τεχνολογίες Power to methane έχουν σαν περιβαλλοντική επίπτωση την έλλειψη ορυκτών πόρων, αφού κατά τη διαδικασία της μεθανοποίησης χρειάζονται πολύτιμα μέταλλα και ορυκτοί πόροι [29]. Τέλος παρατηρείται κατανάλωση νερού ειδικά κατά τη διαδικασία της μεθανίωσης.

Παρόλο που, όπως φάνηκε και στα αποτελέσματα, η διαδικασία παραγωγής SNG από ξύλο έχει επίσης επιπτώσεις στο περιβάλλον, δεν παύει να αποτελεί μία φιλική ως προς αυτό λύση και σίγουρα με μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής ενέργειας. Παρόλα αυτά, όπως έχει ήδη συζητηθεί, διακυβεύονται ζητήματα σχετικά με την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα του συνθετικού αυτού αερίου ιδίως αν συγκριθεί με τα συμβατικά καύσιμα, οπότε η απόφαση αν τελικά το αέριο αυτό συμφέρει να παραχθεί και να χρησιμοποιηθεί, έχει να κάνει με κάθε διαφορετική περίπτωση και εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες της μελέτης. Βέβαια δεν μπορεί να αμφισβητηθεί το γεγονός πως το SNG αποτελεί μία πολύ καλή και συμφέρουσα λύση για σκοπούς μεταφοράς.



## Βιβλιογραφία

- [1] What is decarbonisation? ( <https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/energy-resources-industrials/articles/what-is-decarbonisation.html> )
- [2] Martin Jurasčič, Anna Sues and Krzysztof J. Ptasinski\* (2009). Exergy analysis of synthetic natural gas production method from biomass. Elsevier, ScienceDirect.
- [3] Tilman J. Schildhauer and Serge M.A. Biollaz (2016). Synthetic Natural Gas from Coal, Dry Biomass, and POWER-TO -GAS Applications. Wiley.
- [4] Μπουζούκη Χριστίνα (2022) ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΡΑΣΙΝΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ. ΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΜΑΤΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ, ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ.
- [5] ΧΡΥΣΟΓΙΑΝΝΗ ΜΑΡΙΑ (2019) ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΑΠΟ ΒΙΟΜΑΖΑ ΚΑΙ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣ ΒΙΟΜΕΘΑΝΙΟ. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΒΙΟΜΕΘΑΝΙΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ Ή ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΤΟ Ν.ΠΕΡΙΑΣ. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- [6] Hari Prakash Veluswamy, Asheesh Kumar, Yutaek Seo, Ju Dong Lee, Praveen Linga (2018) A review of solidified natural gas (SNG) technology for gas storage via clathrate hydrates. Elsevier, ScienceDirect.
- [7] Man Energy Solutions Future in the making, SNG -Synthetic Natural Gas ( <https://www.man-es.com/discover/decarbonization-glossary---man-energy-solutions/synthetic-natural-gas> , τελευταία πρόσβαση στις 11/12/2022)
- [8] Yangdong He, Lin Zhu, Luling Li, Dong Rao ( 2019) Life-cycle assessment of SNG and power generation: The role of implement of chemical looping combustion for carbon capture. Elsevier, ScienceDirect.
- [9] Andre Bolt, Ibrahim Dincer, Martin Agelin-Chaab ( 2020) A critical review of synthetic natural gas production techniques and technologies. Elsevier, ScienceDirect.
- [10] Anna Lewandowska-Bernat, Umberto Desideri ( 2017) Opportunities of Power-to-Gas technology. Elsevier, ScienceDirect.
- [11] Xiaobo Cui, Guohui Song, Ailin Yao, Hongyan Wang, Liang Wang, Jun Xiao (2021) Technical and Economic Assessments of a novel biomass-to-synthetic natural gas (SNG) process integrating O<sub>2</sub>-enriched air gasification. Elsevier, ScienceDirect.
- [12] B. Steubing , R. Zah , C. Ludwig ( 2011) Life cycle assessment of SNG from wood for heating, electricity, and transportation. Elsevier, ScienceDirect.
- [13] Jesper Ahrenfeldt, Tobias P. Thomsen, Ulrik Henriksen, Lasse R. Clausen ( 2013) Biomass gasification cogeneration e A review of state of the art technology and near future perspectives. Elsevier, ScienceDirect.



- [14] Remo Felder and Roberto Dones (2007). Evaluation of ecological impacts of synthetic natural gas from wood used in current heating and car systems. Elsevier, ScienceDirect.
- [15] ΜΑΧΑΙΡΑΣ ΕΥΘΥΜΙΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ (2022) Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) Βιομηχανικής Μονάδας Παραγωγής, Αποθήκευσης και Αξιοποίησης Ανανεώσιμου Η<sub>2</sub> (Power-to-H<sub>2</sub>-to-Power). Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών. Τομέας Θερμότητας, Εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων.
- [16] Eleonora Bargiacchi , Daniele Candelaresi , Antonio Valente, Giuseppe Spazzafumo, Stefano Frigo (2021) Life Cycle Assessment of Substitute Natural Gas production from biomass and electrolytic hydrogen. Elsevier, ScienceDirect.
- [17] Andreas Ciroth, Juliane Franze, GreenDeltaTC Berlin (2009) Life Cycle Costing in SimaPro
- [18] Bernhard Steubing, Isabel Ballmer, Martin Gassner, Léda Gerber, Luca Pampuri, Sandro Bischof, Oliver Thees and Rainer Zah (2014). Identifying environmentally and economically optimal bioenergy plant sizes and locations: A spatial model of wood based SNG value chains. Elsevier, ScienceDirect.
- [19] R. Hollmann, C. J. Merchant, R. Saunders, C. Downy, M. Buchwitz, A. Cazenave, E. Chuvieco, P. Defourny, G. de Leeuw, R. Forsberg, T. Holzer-Popp, F. Paul, S. Sandven, S. Sathyendranath, M. van Roozendaal, and W. Wagner (2013) The ESA Climate Change Initiative: Satellite Data Records for Essential Climate Variables ( <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/94/10/bams-d-11-00254.1.xml> , τελευταία πρόσβαση στις 9/01/2023)
- [20] Malte Meinshausen and Zebedee Nicholls (2022) GWP\* is a model, not a metric ( <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac5930> , τελευταία πρόσβαση στις 5/01/2023)
- [21] Manuel Gotz, Jonathan Lefebvre, Friedemann Mors, Amy McDaniel Koch, Frank Graf, Siegfried Bajohr, Rainer Reimert, Thomas Kolb (2016) Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review
- [22] Louise Camilla Dreyer, Anne Louise Niemann, Michael Z. Hauschild (2003) Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 ( <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02978471> , τελευταία πρόσβαση στις 5/01/2023)
- [23] Rolf Frischknecht, Roland Steiner, Braunschweig Arthur, Egli Norbert, Hildesheimer Gabi (2006) Swiss Ecological Scarcity Method: The New Version 2006
- [24] Sebastian Kolb , Thomas Plankenbühler , Katharina Hofmann , Joule Bergerson , Jürgen Karl (2021) Life cycle greenhouse gas emissions of renewable gas technologies: A comparative review. Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [25] Caecilia R. Vitasari, Martin Jurascik, Krzysztof J. Ptasinski (2011) Exergy analysis of biomass-to-synthetic natural gas (SNG) process via indirect gasification of various biomass feedstock. Elsevier, Energy.

[26] Christiaan M. van der Meijden, Hubert J. Veringa, Luc P.L.M. Rabou (2010) The production of synthetic natural gas (SNG): A comparison of three wood gasification systems for energy balance and overall efficiency. Elsevier, ScienceDirect.

[27] Ivan T. Herrmann, Andreas Moltesen (2014) Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? -a comparative assessment of SimaPro and GaBi. Elsevier, ScienceDirect.

[28] Michael F. Chislock, Enrique Doster, Rachel A. Zitomer , Alan E. Wilson (2013) Eutrophication: Causes, Consequences, and Controls in Aquatic Ecosystems (<https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/eutrophication-causes-consequences-and-controls-in-aquatic-102364466/>, τελευταία πρόσβαση 6/09/2023)

[29] Freya Goffart De Roeck, Astrid Buchmayr, Jim Gripekoven, Jan Mertens, Jo P. Dewulf (2022) Comparative life cycle assessment of power-to-methane pathways: Process simulation of biological and catalytic biogas methanation. Elsevier, ScienceDirect.