



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ
ΑΤΤΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

ΚΑΜΕΝΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 461272017054

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ε.ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

DEPARTMENT OF
MECHANICAL ENGINEERING

TERMINAL STATIONS OF GASIFICATION AND
CONDENSATION OF NATURAL GAS

KAMENIDIS GEORGIOS

REGISTER NUMBER: 461272017054

SYPERVISOR: E.SAKELLARIOU

Athens, October 2022

Η Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κοσμάς Καββαδίας	
Αντώνιος Νάζος	
Ευάγγελος Σακελλαρίου	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΚΑΜΕΝΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ του ΙΩΑΝΝΗ, με αριθμό μητρώου 461272017054 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ημερομηνία

10/9/2022

Ο Δηλών

Καμενίδης Γεώργιος

Copyright © ΚΑΜΕΝΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσεως, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν επιτρέπεται να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Ευχαριστίες

Ως συγγραφέας αυτής της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στην ολοκλήρωση της και γενικότερα όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον κύριο Ε. Σακελλαρίου για την συνεργασία μας και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε για την ανάθεση της εργασίας. Οι πολύτιμες συμβουλές του και η πάντα άμεση ανταπόκρισή του, ήταν καθοριστικές για την συγγραφή της διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια, θέλω να ευχαριστήσω τους φίλους μου για την βοήθειά τους. Ιδιαίτερα, τους Μιχάλη Κ. και Παναγιώτη Κ., που τυγχάνει και συμφοιτητής μου όλα αυτά τα χρόνια, για την υποστήριξή τους. Φυσικά, ευχαριστώ πολύ τους φίλους που απέκτησα κατά την διάρκεια των σπουδών μου, που από την πρώτη κιόλας μέρα είμαστε μαζί και με τους οποίους μοιραστήκαμε πολλές ώρες κάνοντας παρέα.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου και ιδιαίτερα την αδερφή μου, για την τεράστια υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Σας ευχαριστώ!

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η παραγωγή ενέργειας αυξάνεται ραγδαία παγκοσμίως. Ταυτόχρονα τα αποθέματα συμβατικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μειώνονται και η καύση τους δημιουργεί προβλήματα στο περιβάλλον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν έρθει στο προσκήνιο εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Η επιστημονική κοινότητα προσπαθεί να στραφεί, λοιπόν, σε καύσιμα που δεν επιβαρύνουν τόσο το περιβάλλον και μπορούν να ανταπεξέλθουν στην παραγωγή ενέργειας. Στόχος αυτών των πιο ηπιών καυσίμων είναι η μετάβαση από τα συμβατικά καύσιμα στην πράσινη ενέργεια. Ένα τέτοιο καύσιμο είναι το φυσικό αέριο (ΦΑ). Αυτό το ορυκτό καύσιμο, συναντάται σε αέρια μορφή και συνηθίζεται στην πράξη να υγροποιείται. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην υγρή του μορφή, ενώ γίνεται και σύγκρισή του με άλλα καύσιμα. Μέσα από μια βιβλιογραφική ανασκόπηση, γίνεται καταγραφή των λόγων υγροποίησής του, καθώς και των σταδίων επεξεργασίας του, από την στιγμή που υγροποιείται ως την εισαγωγή του στο δίκτυο διανομής. Περιγράφονται οι τεχνολογίες επεξεργασίας του, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται και οι ποσότητες ενέργειας που απαιτούνται για την υγροποίηση και επαναεριοποίηση του. Επίσης, γίνεται καταγραφή των υποδομών επεξεργασίας του σε Ευρώπη και Ελλάδα. Γίνεται σύνδεση με την μεταφορά του σε χώρες του κόσμου, ώστε τελικά να βγουν συμπεράσματα για το υπάρχουν, ή όχι, λόγοι να ασχοληθεί η κοινωνία περισσότερο ή λιγότερο με το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (Liquefied Natural Gas, LNG).

Μέσα από την συλλογή πληροφοριών και λαμβάνοντας υπόψιν τα περιβαλλοντικά οφέλη, συμπεραίνουμε πως θα αυξηθεί η αξιοποίηση του ΦΑ τα επόμενα χρόνια. Μιας και το ΦΑ δεν συναντάται παντού στον κόσμο, η μεταφορά του είναι μονόδρομος. Έτσι, με το τεράστιο πλεονέκτημα του να μειώνεται ο όγκος του κατά 600 φορές μετά την υγροποίηση, η μεταφορά του ως LNG σε όλο τον πλανήτη θα έρθει ακόμη περισσότερο στο προσκήνιο άμεσα. Για αυτό, αυξάνονται όλο και περισσότερο οι εγκαταστάσεις υγροποίησης και επαναεριοποίησης σε όλο τον κόσμο. Έχουν, μάλιστα, προγραμματιστεί ήδη να δημιουργηθούν νέες υποδομές τα επόμενα χρόνια, ενώ έχουν γίνει και πολλές παραγγελίες για πλοία μεταφοράς LNG, δείχνοντας πως έχουν γίνει επενδύσεις.

Για να υγροποιηθεί και ύστερα να αεριοποιηθεί ξανά το ΦΑ, απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ενέργειας και η προσοχή της επιστήμης έχει στραφεί προς το να μειωθούν οι ενεργειακές ανάγκες των λειτουργιών αυτών. Ένας τρόπος για την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας είναι η εκμετάλλευση της εξέργειας που δεσμεύεται κατά την υγροποίηση και προσπαθεί να ανακτηθεί κατά την επαναεριοποίηση. Αυτό, ήδη εφαρμόζεται, αλλά όσο περισσότερο ανακτάται τόσο λιγότερες απαιτήσεις χρειάζονται

και ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος των υποδομών αυξάνεται. Το εξωτερικό περιβάλλον των εγκαταστάσεων, έχει σπουδαίο ρόλο στις ενεργειακές απαιτήσεις και ο σχεδιασμός τους βασίζεται στην εκμετάλλευση και του φυσικού περιβάλλοντος. Σημαντικό είναι πως το ΦΑ φαίνεται να γίνεται συνδεδετικός κρίκος σε μια μετάβαση από τα συμβατικά καύσιμα σε πιο πράσινες λύσεις.

Λέξεις κλειδιά: Φυσικό αέριο, ορυκτά καύσιμα, υγροποιημένο φυσικό αέριο, υγροποίηση, επαναεριοποίηση, τερματικοί σταθμοί .

Abstract

In recent years, energy production has been increasing rapidly worldwide. At the same time, the reserves of conventional fuels used for production are decreasing and their combustion creates environmental problems. As a result, alternative energy sources are coming to the foreground. So, the scientific community tries to turn to fuels that do not burden the environment and can cope with energy production. The aim of the more environmentally friendly fuels is the smooth transition from conventional fuels to the renewables. One such fuel is the natural gas (NG). This fossil fuel is found in gaseous form and it is used to be liquified in practice. This work, focuses on its liquid form, while also comparing it with other fuels. Through a bibliographic review, the reasons for its liquefaction are recorded, as well as its processing stages, from the moment it is liquefied to its input into the distribution network. Its processing technologies, the equipment used and the amounts of energy required for its liquefaction and regasification are described. Also, its processing infrastructures in Europe and Greece are recorded. A connection is made with its transport to countries around the world, so that finally can get results as to whether or not there are reasons for society to deal more or less with Liquefied Natural Gas (LNG).

Through the collection of information and taking into account the environmental benefits, we conclude that the utilization of NG will increase in the coming years. Since NG is not found everywhere in the world, its transportation is a must. With the huge advantage of its volume being reduced by 600 times after liquefaction, its global transportation as LNG will even more to the foreground immediately. For this reason, liquefaction and regasification plants are increasing all over the world. In fact, new infrastructures are already planned to be created in coming years, while many orders have been placed for LNG transport ships, showing that investments have been made.

In order to liquefy and then re-gasify NG, large amounts of energy are required and the science's attention has been directed towards reducing to the needs of these operations. A way for the reduction sought is the exploitation of the exergy found in the liquefaction and trying to recover it during the regasification. This is already being applied, the more its recovered the fewer demands are needed and the overall efficiency of the infrastructure system increase. The external environment of the facilities has an important role in energy requirements and their design is based on exploitation of the natural environment. Importantly, NG seems to be a connection link in a transition from conventional fuels to greener solutions.

Key words: Natural gas, fossil fuels, liquefied natural gas, liquefaction, regasification, LNG terminals.

Πίνακας Ονοματολογίας:

LNG, Liquefied Natural Gas	cf, cubic feet
FSRU, Floating Storage Regasification Unit	HP, Horse Power
CNG, Compressed Natural Gas	toe, tonne of oil equivalent
MTPA, Millions Tones Per Annum	Bcm, billions cubic metres
PM, Particulate matter	Nm ³ , Κανονικό κυβικό μέτρο
LPG, Liquefied Petroleum Gas	μ, διάμετρος (inches)
EIA, Energy Information Administration	δ, όγκος φυσικού αερίου (m ³ /year)
NG, Natural Gas	α, μήκος αγωγού σε km
AP-C3MR, Air Product- propane pre cooled mixed refrigerant	c, συνολική χωρητικότητα σταθμών συμπίεσης σε HP
DMR, dual mixed refrigerant	L, η ποσότητα LNG σε εκατομμύρια τόνους τον χρόνο
AP-SMR, single mixed refrigerant	N, όγκος φυσικού αερίου (m ³ /year)
Shell MMLS, moveable modular liquefaction system	P, τιμή φυσικού αερίου (\$/m ³)
MFC, Mixed Fluid Cascade	n, χιλιόμετρα μεταξύ των σταθμών συμπίεσης
ΔΕΗ, Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού	ΦΑ, Φυσικό Αέριο
Α.Π.Ε, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	ΥΦΑ, Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο

Περιεχόμενα

Πίνακας Ονοματολογίας:	0
Κατάλογος εικόνων.....	2
Κατάλογος διαγραμμάτων	3
Κατάλογος πινάκων	3
Κατάλογος εξισώσεων	4
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Ενεργειακές απαιτήσεις στον κόσμο και στην Ελλάδα	1
1.2 Πηγές ενέργειας	3
1.3 Ορυκτά καύσιμα.....	6
1.4 Ιδιότητες φυσικού αερίου- Προέλευση φυσικού αερίου και εξόρυξη	6
1.5 Κατανάλωση φυσικού αερίου στον κόσμο και στην Ελλάδα.....	8
1.5.1 Κατανάλωση φυσικού αερίου.....	9
1.6 Υγροποιημένο φυσικό αέριο , LNG.....	12
1.6.1 Εγκαταστάσεις υγροποίησης και επαναεριοποίησης φυσικού αερίου ..	13
1.6.2 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα.....	15
1.6.3 Ενεργειακές απαιτήσεις υγροποίησης και επαναεριοποίησης φυσικού αερίου.....	16
1.7 Βασικοί ερευνητικοί στόχοι	16
1.8 Σύνθεση εργασίας	17
Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία.....	19
Κεφάλαιο 3. Φυσικό αέριο.....	21
3.1 Αποθέματα φυσικού αερίου	21
3.2 Ταξινόμηση φυσικού αερίου.....	24
3.2.1 Ανάλογα την προέλευση.....	24
3.2.2 Ανάλογα την χημική σύσταση.....	24
3.3 Επεξεργασία φυσικού αερίου.....	25
3.4 Παραπροϊόντα φυσικού αερίου.....	27
3.4.1 Τεχνολογία μετατροπής αερίου σε υγρά προϊόντα	27
3.5 Φυσικό αέριο και περιβάλλον	30
Κεφάλαιο 4. Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο LNG	32

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

4.1	Τεχνολογία υγροποίησης-θερμοδυναμικοί κύκλοι	33
4.1.1	Αλληλουχία αερίου υγρού	35
4.1.2	Διαδικασία πρόψυξης μικτού ψυκτικού μέσου με προπάνιο.....	36
4.1.3	Διαστολή αζώτου	37
4.2	Τεχνολογία AP-C3MR.....	38
4.3	Τεχνολογία Phillips Optimized Cascade.....	40
4.4	Χρήση τεχνολογιών υγροποίησης στον κόσμο.....	41
4.5	Χρήσεις LNG	47
Κεφάλαιο 5.	Επαναεριοποίηση φυσικού αερίου.....	50
5.1	Διαδικασία επαναεριοποίησης χερσαίων εγκαταστάσεων.....	50
5.2	Πλωτοί σταθμοί αποθήκευσης και επαναεριοποίησης FSRU	53
5.2.1	Διαδικασία επαναεριοποίησης FSRU.....	55
5.3	Σταθμοί επαναεριοποίησης -Real life systems.....	56
5.4	Σταθμός Ρεβυθούσας.....	62
5.5	Ενεργειακές απαιτήσεις για υγροποίηση και αεριοποίηση του φυσικού αερίου.....	64
Κεφάλαιο 6.	Τεχνολογίες μεταφοράς φυσικού αερίου	66
6.1	Μεταφορά σε υγρή και αέρια μορφή	66
6.2	Κόστος μεταφοράς	68
6.2.1	Κόστος μεταφοράς σε αέρια μορφή	68
6.2.2	Κόστος μεταφοράς σε υγρή μορφή.....	69
Κεφάλαιο 7.	Συμπεράσματα	71
7.1	Λόγοι υγροποίησης	71
7.2	Τεχνολογίες και εξοπλισμός υγροποίησης.....	71
7.3	Τεχνολογίες και εξοπλισμός αεριοποίησης.....	72
7.4	Ενεργειακές ανάγκες υγροποίησης και αεριοποίησης	72
7.5	Πορεία εργασίας.....	73
7.6	Μελλοντική έρευνα.....	73
Αναφορές.....		74

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1.1 Σύγκριση ενεργειακών απαιτήσεων ανά τομέα μεταξύ 2005 και πρόβλεψης 2030 [1].....	1
Εικόνα 1.2 Κατανομή τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ελλάδα το 2018 [6]	2
Εικόνα 1.3 Παραγωγής ενέργειας και ρυθμός αύξησης παραγωγής ανά πηγή το 2005 και το 2030 [1].....	5
Εικόνα 1.4 Τυπική σύνθεση φυσικού αερίου [13].....	7
Εικόνα 1.5 Σχηματική απεικόνιση πηγής φυσικού αερίου [14]	8
Εικόνα 1.6 Ποσοστά χρήσης φυσικού αερίου ανά τομέα στον κόσμο το 2015 [18] .	10
Εικόνα 1.7 Κατανάλωση Φυσικού Αερίου 2007-2018 στην Ελλάδα (εκατομμύρια Nm ³) [20]	11
Εικόνα 1.8 Ενεργειακό μείγμα παραγωγής στην Ελλάδα 2020 [17].....	11
Εικόνα 1.9 Ποσοστά εισαγωγής φυσικού αερίου το 2019 στην Ελλάδα [21].....	12
Εικόνα 1.10 Krk, Croatia [29]	14
Εικόνα 1.11 Μελλοντικός τερματικός σταθμός FSRU Αλεξανδρούπολης [28]	15
Εικόνα 2.1 Βήματα επεξεργασίας φυσικού αερίου [16].....	19
Εικόνα 2.2 Βήματα συλλογής πληροφοριών.	19
Εικόνα 3.1 Κατανομή αποθεμάτων φυσικού αερίου στον κόσμο [18]	24
Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση μονάδων επεξεργασίας (Κλασματοποίηση) αερίου [18].....	27
Εικόνα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής παραπροϊόντων μέσω της τεχνολογίας Gas to Liquids [35].	30
Εικόνα 4.1 Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας υγροποίησης (μέθοδος Linda) [34] ..	34
Εικόνα 4.2 Αντίστροφος κύκλος Brayton [34].....	35
Εικόνα 4.3 Διεργασία αλληλουχίας αερίου-υγρού [34].	36
Εικόνα 4.4 Διαδικασία πρόψυξης μικτού ψυκτικού μέσου με προπάνιο [34].....	37
Εικόνα 4.5 Διεργασία διαστολής αζώτου [34]	38
Εικόνα 4.6 Τεχνολογίες AP-C3MR και AP-X [43], [44]	39
Εικόνα 4.7 Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας DMR [45]	39
Εικόνα 4.8 Αρχική τεχνολογία Phillips Optimized Cascade LNG Process [46].	40
Εικόνα 4.9 Σημερινή τεχνολογία Phillips Optimized Cascade LNG Process [46].	41
Εικόνα 4.10 Σχηματική αναπαράσταση υγροποίησης και επαναεριοποίησης φυσικού αερίου [30].....	49
Εικόνα 5.1 Σχηματική αναπαράσταση διαφοράς θερμοκρασίας και πίεσης [50]	51
Εικόνα 5.2 Διαδικασία διαχωρισμού αέρα με χρήση εξέργειας LNG [2]	51
Εικόνα 5.3 Διαδικασία αφαλάτωσης με χρήση εξέργειας LNG [2]	52
Εικόνα 5.4 Διαδικασία αποθήκευσης σε χαμηλή θερμοκρασία με χρήση εξέργειας LNG [2].	52
Εικόνα 5.5 Μέθοδοι επαναεριοποίησης [26].....	56

Εικόνα 5.6 Λειτουργικοί τερματικοί σταθμοί LNG [55].....	57
Εικόνα 5.7 Τερματικοί σταθμοί υπό κατασκευή στην Ευρώπη [56].....	59
Εικόνα 5.8 Μελλοντικοί Τερματικοί Σταθμοί στην Ευρώπη[56].....	59
Εικόνα 5.9 Διανομή φυσικού αερίου μέσω αγωγών [56]	61
Εικόνα 5.10 Διανομή LNG στην Ευρώπη 1 [56].....	61
Εικόνα 5.11 Διανομή LNG στην Ευρώπη 2 [56].....	62
Εικόνα 5.12 Σταθμός επαναεριοποίησης, Ρεβυθούσα [59]	63
Εικόνα 5.13 Ενεργειακές απαιτήσεις διεργασιών LNG [30].....	64
Εικόνα 5.14 Κατανάλωση φυσικού αερίου κατά τη διάρκεια των διεργασιών [30]...	65
Εικόνα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση αγωγών φυσικού αερίου [19].....	68

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4-1 Λειτουργικές μονάδες Υγροποίησης κάθε χρόνο.....	46
Διάγραμμα 4-2 Κατανομή τεχνολογιών στο σύνολο των λειτουργικών εγκαταστάσεων	47

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1.1 Τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα 2010-2018 [5].....	3
Πίνακας 1.2 Συμβατικά καύσιμα	3
Πίνακας 1.3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	4
Πίνακας 1.4 Ποσοστά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [17].....	9
Πίνακας 1.5 Εισαγωγή φυσικού αερίου 2019 [21].....	12
Πίνακας 1.6 Σύγκριση εκπομπών ορυκτών καυσίμων (Btu) [23]	15
Πίνακας 3.1 Αποθέματα φυσικού αερίου ανά γεωγραφικό διαμέρισμα από το 1999 έως το 2019 [32]	22
Πίνακας 3.2 Παραγωγή φυσικού αερίου ανά γεωγραφικό διαμέρισμα από το 2009 έως το 2019 [32]	22
Πίνακας 3.3 Χώρες με τα μεγαλύτερα αποθέματα ανά γεωγραφικό διαμέρισμα και ποσοστό επί του παγκόσμιου συνόλου [32]	23
Πίνακας 3.4 Συστάσεις φυσικού αερίου σε πόλεις από το Ιράν [13]	25
Πίνακας 3.5 Συστάσεις φυσικού αερίου από τη Ρωσία και την Αλγερία [33]	25

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Πίνακας 3.6 Μετατροπή αερίου σε υγρά προϊόντα	28
Πίνακας 4.1 Κατηγορίες LNG [41]	33
Πίνακας 4.2 Χημική σύσταση LNG ανά χώρα [30]	33
Πίνακας 4.3 Τεχνολογίες Υγροποίησης ανά έτος έναρξης λειτουργίας [47]	41
Πίνακας 4.4 Τεχνολογίες Υγροποίησης μελλοντικών εγκαταστάσεων [47]	45
Πίνακας 4.5 Κορυφαίες χώρες χρήσης οχημάτων με καύσιμο φυσικό αέριο έως το 2009 [23]	48
Πίνακας 5.1 Πλεονεκτημάτων FSRU [26],[53],[54]	54
Πίνακας 5.2 Μειονεκτήματα FSRU [26],[53],[54]	55
Πίνακας 5.3 FSRU την Ευρώπη [29]	55
Πίνακας 5.4 Λειτουργικοί Τερματικοί Σταθμοί στην Ευρώπη [56],[55], [57]	58
Πίνακας 5.5 Τερματικοί Σταθμοί υπό κατασκευή στην Ευρώπη [56],[29]	59
Πίνακας 5.6 Μελλοντικοί Τερματικοί Σταθμοί στην Ευρώπη [56], [29]	60
Πίνακας 5.7 Αριθμός δεξαμενοπλοίων εκφόρτωσης Ρεβυθούσας [21]	62
Πίνακας 5.8 Ποσότητες επαναεριοποίησης ΦΑ στην Ρεβυθούσα [21]	63
Πίνακας 5.9 Ποσότητες ΦΑ που διοχετεύτηκαν από τις εγκαταστάσεις τις Ρεβυθούσας στο Εθνικό Δίκτυο (Αγία Τριάδα) [58]	63
Πίνακας 6.1 Αγωγοί φυσικού αερίου [19],[2]	67

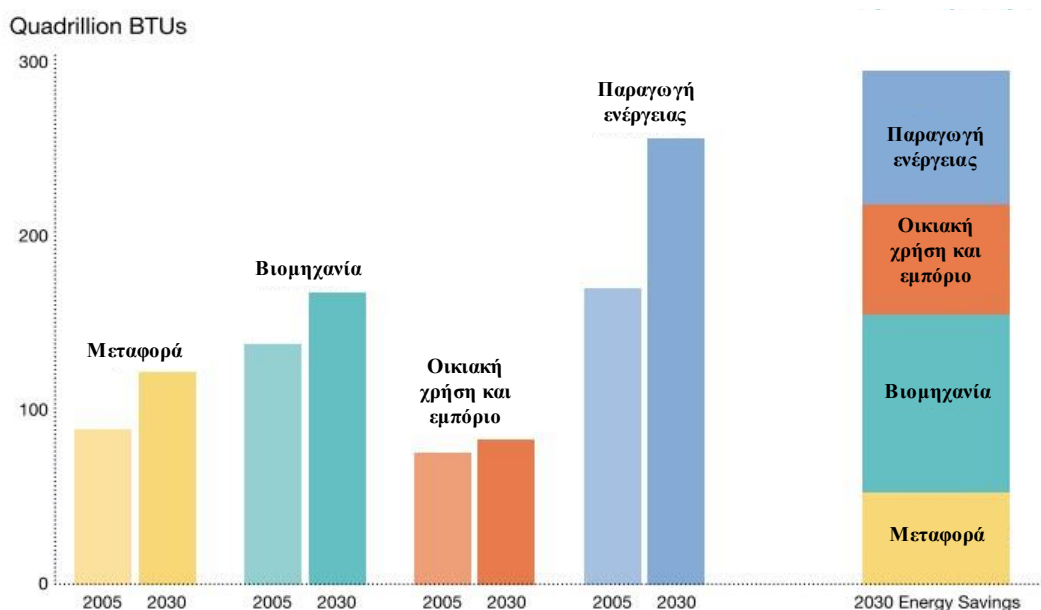
Κατάλογος εξισώσεων

Εξίσωση 1	69
Εξίσωση 2	69
Εξίσωση 3	70

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακές απαιτήσεις στον κόσμο και στην Ελλάδα

Παγκοσμίως οι ενεργειακές απαιτήσεις αυξάνονται συνεχώς, χρόνο με τον χρόνο και σύμφωνα με έρευνες αναμένεται να αυξάνονται όλο και περισσότερο. Η παραγωγή ενέργειας έχει τις μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις με την μεγαλύτερη ετήσια αύξηση, με τον τομέα της βιομηχανίας να ακολουθεί. Μετά, οι μεταφορές είναι αυτές που έχουν υψηλές ενεργειακές ανάγκες και, τέλος, είναι η ιδιωτική χρήση, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 1.1. Μάλιστα, η παραγωγή ενέργειας είναι ο τομέας με τον μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης. Προβλέπεται επίσης, πως εξαιτίας της αύξησης των αναγκών και της ανάπτυξης της οικονομίας, πάνω από το μισές απαιτήσεις τα επόμενα χρόνια θα οφείλονται σε αυτόν τον τομέα [1]. Ακόμη, η αύξηση του πληθυσμού παγκοσμίως συνοδεύεται και με την αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης, με έρευνες να δείχνουν πως από το 2015 μέχρι και το 2040 θα συνεχίσουν να αυξάνονται κάθε χρόνο από 0,6% έως 1,5% [2].



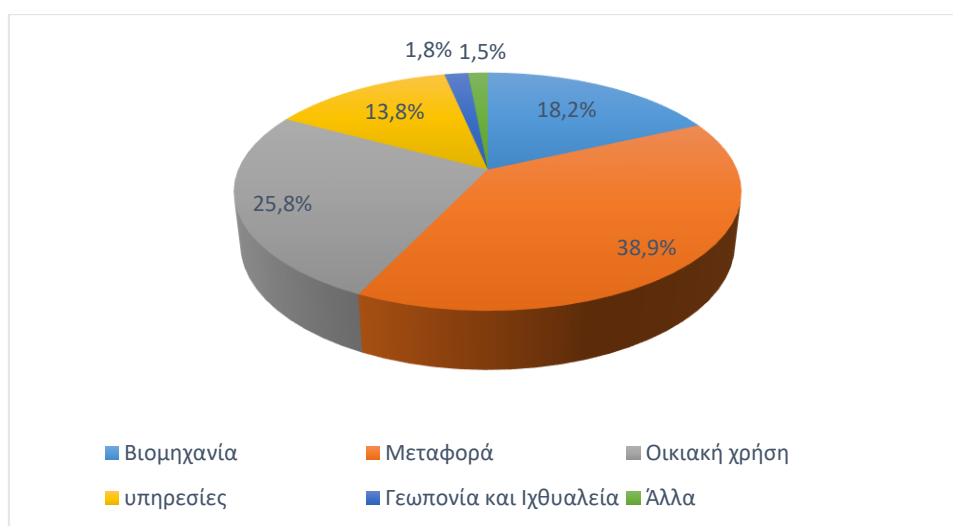
Εικόνα 1.1 Σύγκριση ενεργειακών απαιτήσεων ανά τομέα μεταξύ 2005 και πρόβλεψης 2030 [1]

Στην Ελλάδα, ένα μέσο νοικοκυριό χρειάζεται, σύμφωνα με στατιστικά του 2011-12, 13.994 kWh τον χρόνο για να καλύψει τις ανάγκες του, εκ των οποίων 3.750 kWh είναι ηλεκτρικής ενέργειας ενώ το υπόλοιπο θερμικής ενέργειας [3]. Μελλοντικά, ως το 2030 αναμένεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να αυξηθεί από τις 52.379 GWh

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

που καταγράφηκαν το 2020 στις 57.220 GWh, εκ των οποίων το 31,9% σύμφωνα με εθνικούς στόχους θα είναι από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε). Έτσι, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρόκειται να αυξηθεί κατά 51% από Α.Π.Ε και ταυτόχρονα πρόκειται να μειωθεί από ορυκτά καύσιμα. Ακόμη, η Ελλάδα εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από εισαγωγές ενέργειας και μόνη της δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες της, κάτι το οποίο δημιουργεί κινδύνους ως προς την ενεργειακή ασφάλεια της. Το 2018 παρήγαγε 7,4 Mtoe και εισήγαγε 38,77 Mtoe ενώ εξήγαγε 20,57 Mtoe όπου κατά κύριο λόγο ήταν το πετρέλαιο [4].

Η τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα είχε κατανεμηθεί το 2018 σύμφωνα με την Εικόνα 1.2 και τα ποσά ενέργειας για κάθε τομέα από το 2010 έως το 2018 καταγράφονται στον επόμενο πίνακα, Πίνακας 1.1:



Εικόνα 1.2 Κατανομή τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ελλάδα το 2018 [6]

Πίνακας 1.1 Τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα 2010-2018 [5]

ktoe									
Χρονιές	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Τελική κατανάλωση ενέργειας	16403	14668	14804	15741	15879	15721	15153	15401	14483
Βιομηχανία	2995	2836	3088	3128	3073	2763	2739	2588	2523
Μεταφορά	5616	560	5635	5753	5897	5815	5897	6045	5142
Άλλοι τομείς	7792	6224	6080	6859	6909	7143	6516	6768	6818
Υπηρεσίες	1941	1821	1714	1975	2038	2192	2093	2135	1903
Οικιακή χρήση	5096	3821	3845	4461	4349	4413	3914	4114	4290

1.2 Πηγές ενέργειας

Οι πηγές ενέργειας χωρίζονται στις συμβατικές πηγές και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε).

Από τις συμβατικές- ή αλλιώς- μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προέρχονται καύσιμα όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, ο λιγνίτης, ο άνθρακας, το υγραέριο και άλλα, Πίνακας 1.2. Αυτές οι πηγές έχουν αποθέματα μέχρι κάποια στιγμή να εξαντληθούν, αλλά ταυτόχρονα τα τελευταία αποθέματα αυτά αυξάνονται στη φύση είτε γιατί παράγονται από μόνα τους είτε γιατί ανακαλύπτονται συνεχώς νέες πηγές τους [6].

Πίνακας 1.2 Συμβατικά καύσιμα

Πετρέλαιο
Φυσικό αέριο
Άνθρακας
Υγραέριο
Πυρηνικά καύσιμα
Λιγνίτης

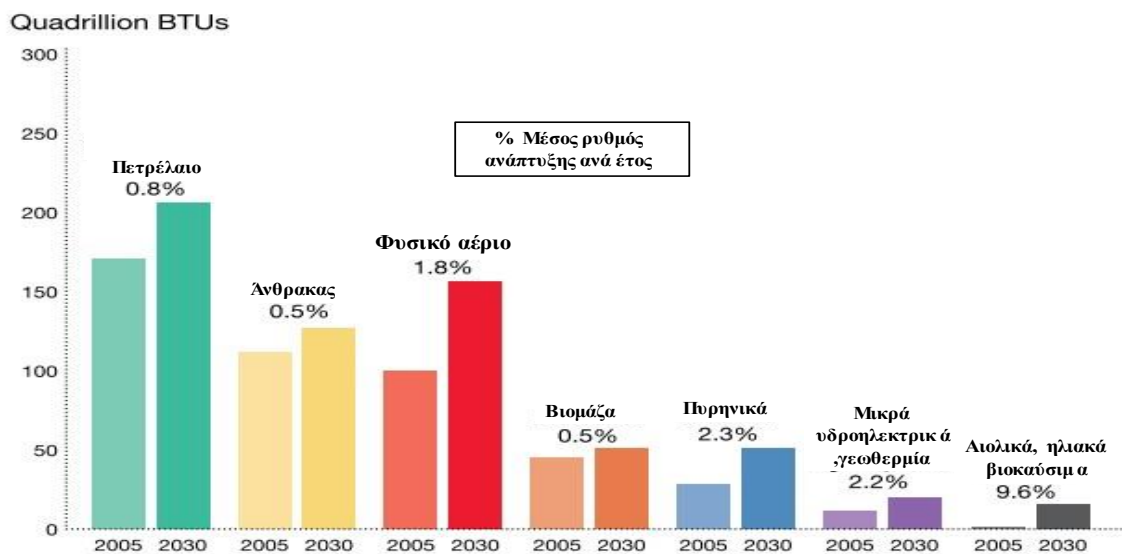
Οι Α.Π.Ε είναι αυτές που θεωρούνται καθαρές πηγές ενέργειας, δηλαδή υπάρχουν στο περιβάλλον από την φύση και έχουν ελάχιστες έως μηδενικές επιπτώσεις στο περιβάλλον ενώ μπορούν να παράγουν ενέργεια συνεχόμενα και για πάντα, Πίνακας 1.3. Σε μεγαλύτερη αφθονία πηγή ενέργειας είναι ο ήλιος και χωρίς αυτόν καμία άλλη πηγή ενέργειας δεν θα υπήρχε (εκτός της βαθιάς γεωθερμίας και την βαρυτική έλξης). Οι ανανεώσιμες πηγές μπορούν να βοηθήσουν στην υπάρχουσα παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη των απαιτήσεων και φυσικά στην μείωση των εκπομπών ρύπων στην ατμόσφαιρα [7]. Η συνολική ενέργεια που μπορεί να συλλεχθεί από Α.Π.Ε το 1965 ήταν 5 TWh και το 2014 καταγράφηκε πως ήταν 1404 TWh [6].

Πίνακας 1.3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ηλιακή
Αιολική
Βιομάζα
Γεωθερμία
Υδροηλεκτρική
Κυματική-Βαρυτική

Μέχρι και το 2009, στον κόσμο το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής ενέργειας προερχόταν από ορυκτά καύσιμα. Πετρέλαιο, άνθρακας και ΦΑ ήταν οι μεγαλύτερες πηγές παραγωγής ενέργειας και ακολουθούσαν η βιομάζα, υδροηλεκτρικά, γεωθερμία και τέλος αιολικά-ηλιακά. Προβλέψεις του 2009 υπολόγιζαν πως πετρέλαιο και ΦΑ θα συνεχίσουν να παράγουν το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας με το ΦΑ να γνωρίζει πολύ μεγάλη αύξηση ενώ οι Α.Π.Ε θα αυξήσουν τα ποσοστά τους στην παραγωγή ενέργειας[1].

Το 2018 σύμφωνα με τον Αμερικάνικο οργανισμό ΕΙΑ η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας οφειλόταν κατά περίπου 80% σε ορυκτά καύσιμα, όπου 36% από πετρέλαιο, 31% από ΦΑ, 13% από άνθρακα, 11% από σε πυρηνική ενέργεια και 8% από Α.Π.Ε. Να σημειωθεί πως εξαιτίας της αύξησης της τιμής του πετρελαίου προβλέπεται, τα επόμενα χρόνια, ότι το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών θα αυξηθεί [8].



Εικόνα 1.3 Παραγωγής ενέργειας και ρυθμός αύξησης παραγωγής ανά πηγή το 2005 και το 2030 [1]

Όσο αναφορά τις Α.Π.Ε, στην Ευρώπη η παραγωγή ενέργειας από τα υδροηλεκτρικά είχε φτάσει το 1997 να είναι η κυρίαρχη πηγή από της Α.Π.Ε, μιας και το 90% της παραγωγής ήταν από αυτά. Ωστόσο, το ποσοστό αυτό άρχισε να πέφτει και το 2007 αποτελούσε το 60%, λόγω του ότι αρχικά οι βροχοπτώσεις είχαν μειωθεί κατά πολύ αλλά κυρίως επειδή αναδείχθηκαν άλλες ανανεώσιμες πηγές. Η βιομάζα κατείχε το 2007 το δεύτερο μεγαλύτερο ποσοστό συνεισφοράς στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [9]. Δεύτερη μεγαλύτερη πηγή ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές στην παραγωγή ενέργειας στον κόσμο το 2011, ήταν η αιολική που μπορούσε να παράγει τον χρόνο μέσω ανεμογεννητριών 26.000 TWh/y αλλά λόγω οικονομικών συμφερόντων, τελικά παρήγαγαν 9.0000 TWh/y[7]. Οι Α.Π.Ε αντιπροσώπευαν το 14,1% το 2007 της παραγωγής ενέργειας, γνωρίζοντας αύξηση από το 1997 που το ποσοστό αυτό ήταν στο 12,8%. Αυτή η αύξηση οφείλεται στην ανάπτυξη των αιολικών και της βιομάζας οι οποίες μάλιστα αξιοποιούντουσαν όλο και περισσότερο χάρη τις νέες νομοθεσιών που θεσπίζονταν για μείωση των ρύπων και χάρη της καινούργιας πολιτικής πολλών χωρών που επιθυμούσαν να εκμεταλλευτούν το τοπικό περιβάλλον για παραγωγή ενέργειας [9]. Στην Ελλάδα στόχος είναι να αυξηθεί η εγκατεστημένη ισχύς των Α.Π.Ε έως το 2030 από 10,1 GW που ήταν το 2020 στις 18,1 GW με αποτέλεσμα να γίνει αξιοποίηση των Α.Π.Ε κατά 90% παραπάνω, όταν παράλληλα ΦΑ, πετρέλαιο και άνθρακας θα περιθωριοποιούνται. Ήδη έχει αρχίσει να μειώνεται η χρήση συμβατικών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας, όπως, για παράδειγμα, η αξιοποίηση του λιγνίτη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [4].

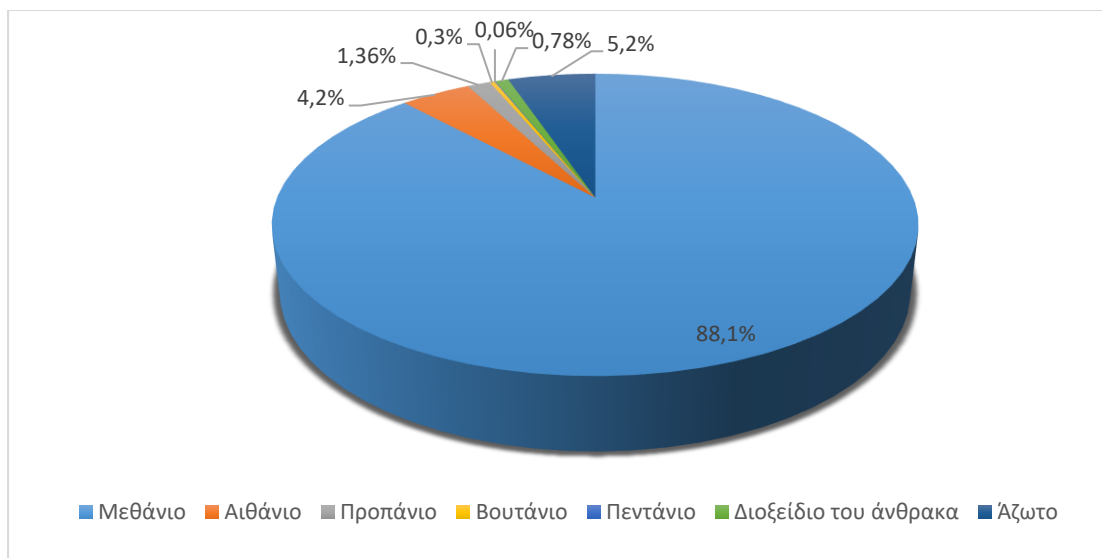
1.3 Ορυκτά καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα συνεχίζουν να παράγουν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που χρειάζεται ο πλανήτης. Είναι όμως παράλληλα υπεύθυνα για την αύξηση των ρύπων στον ατμοσφαιρικό αέρα και έχουν επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου. Οι βασικές επιπτώσεις τους είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη, η ατμοσφαιρική ρύπανση, η όξινη βροχή και η απελευθέρωση ραδιενεργών ουσιών [10]. Η αξιοποίηση των ορυκτών καυσίμων είναι ευρέως εφαρμοσμένη καθώς υπάρχουν πολλές και βελτιωμένες τεχνολογίες για την χρήση τους, υπάρχει πολύ καλά υφιστάμενη αλυσίδα από την παραγωγή έως την κατανάλωση και έχουν χαμηλό κόστος [11].

Το φυσικό αέριο ως ορυκτό καύσιμο έχει αρνητική επίδραση στο περιβάλλον αφού είναι λόγος για εκπομπή μεθανίου, οξειδίων του αζώτου και φορμαλδεΐδης (καρκινογόνα ουσία). Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει νόμους για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% έως το 2030. Κύριος παράγοντας των ρύπων αυτών είναι ο άνθρακας και επειδή αυτό δεν μπορεί να σταματήσει από την μία μέρα στην άλλη και επειδή οι τεχνολογίες Α.Π.Ε δεν έχουν φτάσει σε σημείο να αποδώσουν όσο το ΦΑ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το ΦΑ φαίνεται να προσπαθεί να «ενώσει» την μετάβαση από την αξιοποίηση των ορυκτών στην αξιοποίηση των Α.Π.Ε για να μειωθούν οι ρύποι [12].

1.4 Ιδιότητες φυσικού αερίου- Προέλευση φυσικού αερίου και εξόρυξη

Το ΦΑ είναι ορυκτό καύσιμο που αποτελείται από μίγμα υδρογονανθράκων σε αέρια κατάσταση που αποτελείται κυρίως από μεθάνιο σε ποσοστό από 85% έως 96%. Στην καθαρή του κατάσταση είναι άχρωμο και άοσμο. Τα υπόλοιπα συστατικά του είναι το αιθάνιο C_2H_6 , το προπάνιο C_3H_8 , το βουτάνιο C_4H_{10} και βαρύτερους υδρογονάνθρακες. Περιέχει επίσης και μη καυσίμων αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , το άζωτο N_2 και υδρόθειο H_2S και άλλα είδη υδρογονανθράκων [13]. Το ΦΑ διαθέτει μερικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων καυσίμων. Προσφέρει μια καθαρή και αποτελεσματική καύση ενώ είναι και αξιόπιστο καύσιμο με εύκολη μεταφορά και αποθήκευση [2].

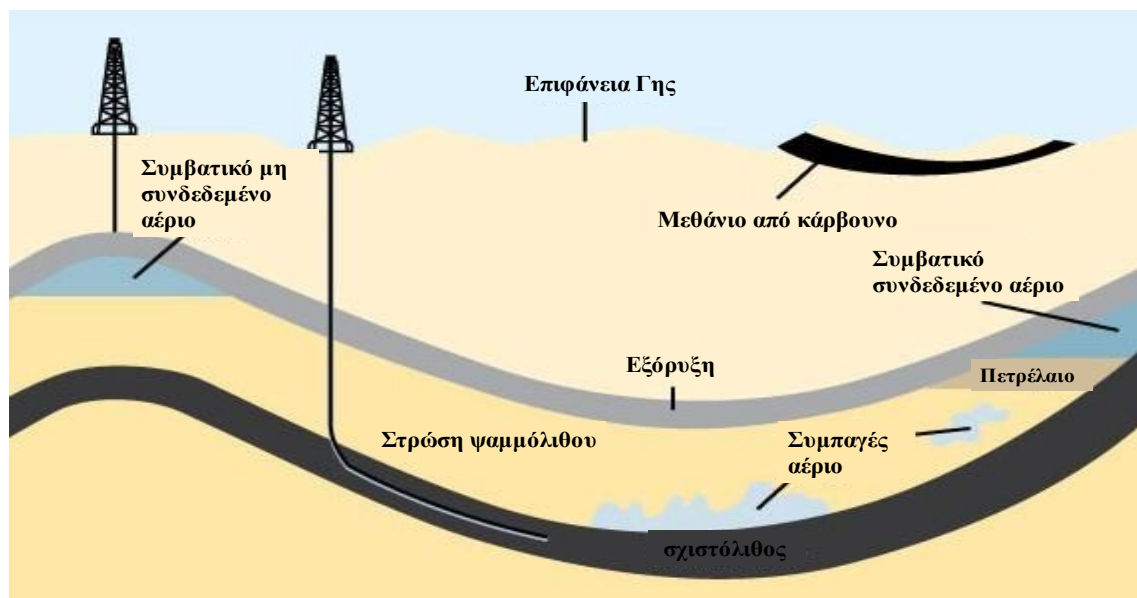


Εικόνα 1.4 Τυπική σύνθεση φυσικού αερίου [13]

Η σύσταση του βέβαια ποικίλλει ως προς τα συστατικά του και την συγκέντρωση αυτών και εξαρτάται άμεσα από την περιοχή παραγωγής του, την εποχή και το κλίμα της περιοχής. Από την σύστασή του εξαρτώνται και οι θερμοδυναμικές του ιδιότητες, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για τις μετέπειτα χρήσεις του μιας και δίνει μεγάλη ποσότητα ενέργειας με μικρές εκπομπές ρύπων καθιστώντας το σημαντικό ορυκτό καύσιμο [13].

Το ΦΑ όπως επίσης και οι γαιάνθρακες και το πετρέλαιο, δημιουργήθηκαν πριν εκατομμύρια χρόνια από υπολείμματα ζώων και φυτών, που αποσυντέθηκαν και συμπιέστηκαν για πολλά χρόνια στην επιφάνεια της γης και στον πυθμένα των θαλασσών αναμειγμένα συνήθως με άμμο και λάσπη. Με την πάροδο των χρόνων εισχώρησαν ακόμη πιο βαθιά στην γη και σε συνδυασμό με την πίεση και τις υψηλές θερμοκρασίες προκάλεσαν διάσπαση των δεσμών άνθρακα της οργανικής ύλης και δημιούργησαν μέρη πλούσια σε άνθρακα και υδρογόνο [14],[15]. Στην Εικόνα 1.5, μπορεί κάποιος να κατανοήσει το βάθος στο οποίο βρίσκονται οι πηγές. Έτσι πλέον, το ΦΑ μπορεί να εμφανιστεί:

- σε μεγάλες ρωγμές ή σε στρώματα πετρωμάτων που ονομάζεται συμβατικό ΦΑ
- σε πόρους ανάμεσα σε σχιστόλιθους που αναφέρεται ως σχιστολιθικό ή αλλιώς ως μη συμβατικό καύσιμο.
- Σε κοιτάσματα αργού πετρελαίου που ονομάζεται συσχετισμένο ΦΑ
- Σε υπεράκτιες περιοχές και στον πυθμένα των θαλασσών που ονομάζονται μεθάνιο με άνθρακες [14].



Εικόνα 1.5 Σχηματική απεικόνιση πηγής φυσικού αερίου [14]

1.5 Κατανάλωση φυσικού αερίου στον κόσμο και στην Ελλάδα

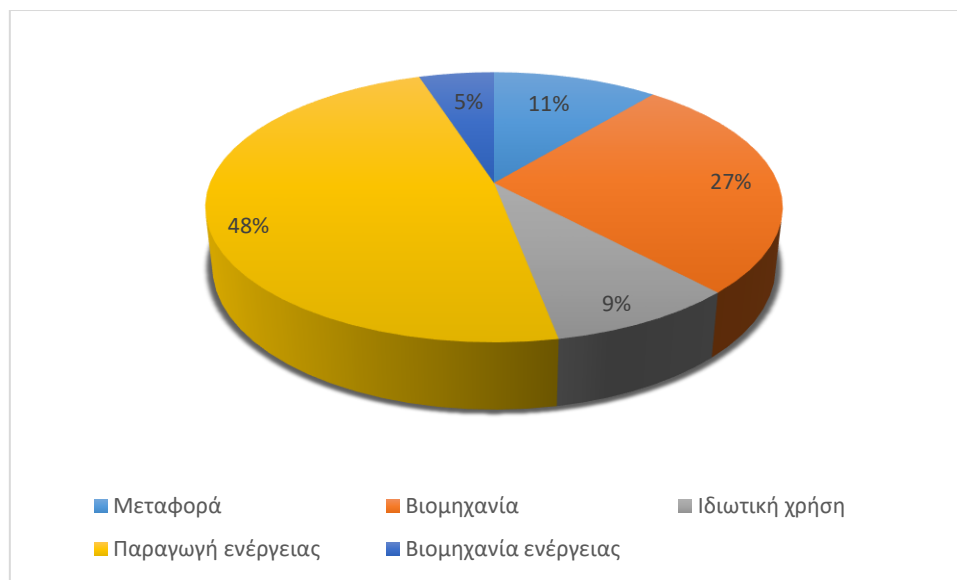
Το ΦΑ αναμένεται να παίξει σπουδαίο ρόλο στην παραγωγή ενέργειας. Λόγω του ότι είναι ένα καθαρό καύσιμο σε σύγκριση με το πετρέλαιο και τον άνθρακα μπορεί να αποτελέσει λύση για την μείωση των ρύπων στο περιβάλλον και να βοηθήσει στην αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας. Προβλέπεται πως η ανάγκη για κατανάλωση ΦΑ θα αυξηθεί κατά 40% από το 2015 έως το 2040 [16]. Στην Ελλάδα, η τελική κατανάλωση ΦΑ έχει αυξηθεί λόγω της χρήσης του για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά βέβαια παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα συγκριτικά με Ευρώπη, η οποία επέβαλε αυστηρότερα πρόστιμα για εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα [4]. Στον παρακάτω Πίνακα 1.4, αποτυπώνεται το ποσοστό ΦΑ που συμβάλει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, συγκριτικά με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα και Α.Π.Ε. Φαίνεται, λοιπόν, πως έχει γίνει φανερή η αξία του ΦΑ προς το περιβάλλον και την παγκόσμια ενέργεια [2].

Πίνακας 1.4 Ποσοστά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [17]

Ορυκτά καύσιμα	%	TWh
Λιγνίτης	12,37	5,72
Πετρέλαιο	8,29	3,83
Φυσικό αέριο	40,91	18,92
Άλλα ορυκτά καύσιμα	0,3	0,14
Σύνολο ορυκτών καυσίμων	61,86	28,61
Ηλιακά	9,67	4,47
Αιολικά	20,35	9,41
Υδροηλεκτρικά	7,19	3,33
Βιομάζα	0,93	0,43
Υπόλοιπα Α.Π.Ε	0,00	0,00
Σύνολο Α.Π.Ε	38,149	17,64
Σύνολο	100,0	46,25

1.5.1 Κατανάλωση φυσικού αερίου

Στις Η.Π.Α και Ασία η παραγωγή ΦΑ αυξάνεται συνεχώς σε αντίθεση με την Ευρώπη που οι εισαγωγές του γίνονται όλο και περισσότερες όπως προβλέπεται από το 2009 [1]. Ακόμη, αναμένεται μελλοντικά ότι τις επόμενες δεκαετίες οι Η.Π.Α θα γίνουν πρώτες σε παραγωγή και εξαγωγή ΦΑ και η Ασία πρώτη σε κατανάλωση LNG [16]. Στην Εικόνα 1.6 αποτυπώνεται το ποσοστό του ΦΑ που χρησιμοποιείται από κάθε τομέα στον κόσμο:

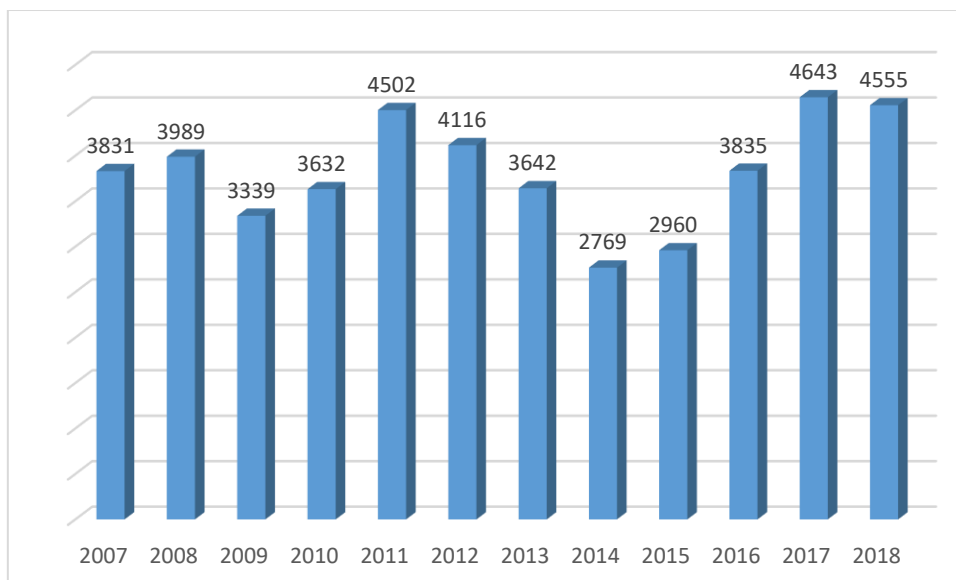


Εικόνα 1.6 Ποσοστά χρήσης φυσικού αερίου ανά τομέα στον κόσμο το 2015 [18]

Οι Η.Π.Α ήδη (2018) χρησιμοποιούν το ΦΑ ως καύσιμο και ως χημική πρώτη ύλη και υπολογίζεται πως από το 2018 έως το 2040 η χρήση του για την παραγωγή ενέργειας θα αυξηθεί κατά 2%[19].

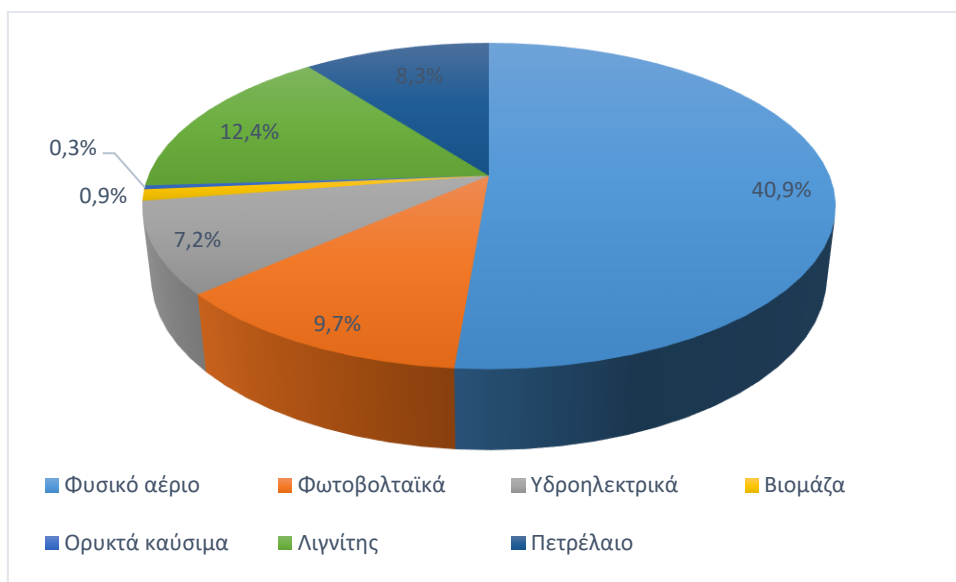
Στην Ελλάδα η κατανάλωση ΦΑ είχε γνωρίσει αξιοσημείωτη αύξηση το 2011. Βέβαια τα επόμενα τρία χρόνια υπήρξε μείωση της κατανάλωσης εξαιτίας της οικονομικής κρίσης και των αλλαγών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία, ωστόσο, δεν ήταν μόνιμη μιας και αργότερα έως και το 2018 ξαναγνώρισε αύξηση, όπως παρατηρείται και στην Εικόνα 1.7 [20]. Μελλοντικά, το 2030, στόχος είναι το ΦΑ να εκπροσωπεί το 22% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας [4].

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ



Εικόνα 1.7 Κατανάλωση Φυσικού Αερίου 2007-2018 στην Ελλάδα (εκατομμύρια Nm³) [20]

Το ΦΑ αντιπροσωπεύει το 40,9% του ενεργειακού μείγματος στον ελλαδικό χώρο, ποσοστό που ισοδυναμεί με 18,92 TWh από τις συνολικά 28,61 TWh που προσφέρουν όλα τα ορυκτά καύσιμα συνολικά, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 1.8:



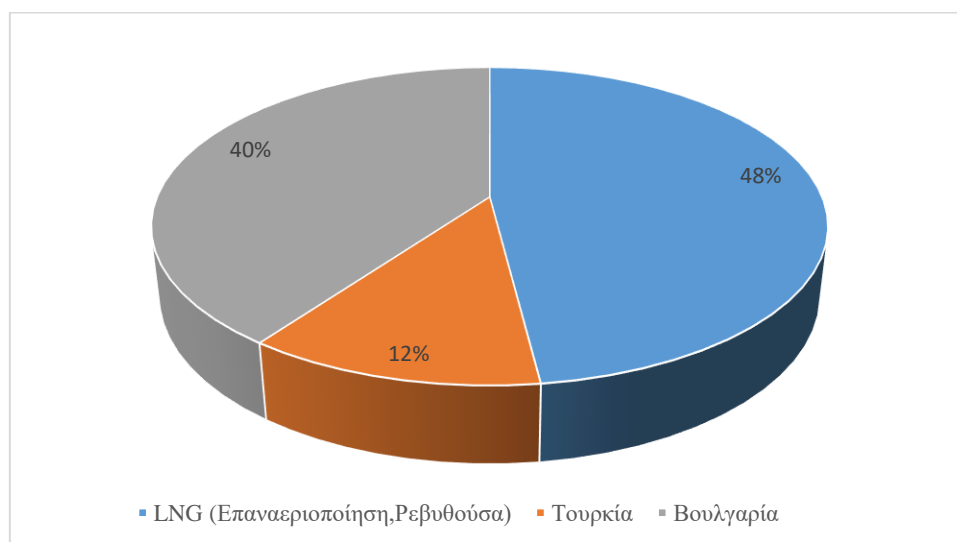
Εικόνα 1.8 Ενεργειακό μείγμα παραγωγής στην Ελλάδα 2020 [17]

Το 2019, η Ελλάδα έφτασε στο μεγαλύτερο ποσοστό παραγωγής ενέργειας από ΦΑ που έχει καταγραφεί ποτέ και συγκεκριμένα στο 60%. Σε αυτό βοήθησε ο τερματικός σταθμός LNG στην Ρεβυθούσα ο οποίος έγινε πολύ σημαντικός σταθμός εισαγωγής ΦΑ την ίδια χρονιά που παράλληλα απογειώθηκαν και οι εξαγωγές προς Βουλγαρία

[4]. Η Ελλάδα εισήγαγε το 2019 ΦΑ από Τουρκία και Βουλγαρία και μέσω επαναεριοποίησης σε μεγάλο ποσοστό LNG από την Ρεβυθούσα, Πίνακας 1.5 και Εικόνα 1.9.

Πίνακας 1.5 Εισαγωγή φυσικού αερίου 2019 [21]

Εισαγωγές	LNG (Επαναεριοποίηση, Ρεβυθούσα)	Τουρκία	Βουλγαρία
GWh	31426	8108	25667



Εικόνα 1.9 Ποσοστά εισαγωγής φυσικού αερίου το 2019 στην Ελλάδα [21]

Τα επόμενα χρόνια, σημαντικός σταθμός εισαγωγής αναμένεται να γίνει και στην Αλεξανδρούπολη και ταυτόχρονα, υπόγεια αποθήκευση ΦΑ στην Καβάλα. Το ποσοστό εισαγωγής προβλέπεται πως θα μειωθεί στο 32% το 2030 εξαιτίας της μεγαλύτερης χρήσης των Α.Π.Ε [4].

1.6 Υγροποιημένο φυσικό αέριο , LNG

Το ΦΑ υγροποιείται στους $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ υπό ατμοσφαιρική πίεση και έχει ως αποτέλεσμα να μειώνεται ο όγκος του κατά σχεδόν 600 φορές λόγω της χαμηλής του πυκνότητας. Αυτό αποτελεί τεράστιο πλεονέκτημα για την αποθήκευση και μεταφορά του ανά τον κόσμο [22]. Το ποσοστό μεθανίου κυμαίνεται από 87% έως και 99,8% και μπορεί να προσφέρει θέρμανση περίπου 21-24 MJ/L. Το LNG είναι άχρωμο, μη διαβρωτικό, άοσμο και ασφαλές [22], [2]. Θεωρείται η πιο καθαρή μορφή του ΦΑ με σχεδόν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του θείου και οξειδίων του αζώτου. Σε περιπτώσεις διαρροής είναι σημαντικό πως το LNG αντιλαμβάνεται εύκολα καθώς η πυκνότητα του είναι μικρότερη από αυτή του νερού με αποτέλεσμα στην θάλασσα όπου συναντάται

κυρίως να ανεβαίνει στην επιφάνεια [2]. Είναι αποδεδειγμένο ότι η υγροποίησή του κάνει την μεταφορά του ευκολότερη και οικονομικότερη έναντι της μεταφοράς σε αέρια μορφή μέσω σωληνώσεων. Σε υγρή μορφή πλέον, η πυκνότητα του είναι 0,4-0,5 kg/L σε ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης ενώ το νερό έχει 1,0 kg/L που σημαίνει ότι σε περίπτωση διαρροής στο νερό αυτό μένει στην επιφάνεια και εξατμίζεται εύκολα [23]. Είναι άχρωμο, μη τοξικό και μη διαβρωτικό και η αποθήκευση γίνεται σε κατάλληλα διαμορφωμένες δεξαμενές και η μεταφορά του μέσω πλοίων [22].

Δεν είναι τυχαίο πως οι κατασκευές δεξαμενοπλοίων για μεταφορά του LNG αυξάνονται συνεχώς. Στο τέλος του 2020 καταγράφηκαν συνολικά 572 πλοία εκ των οποίων τα 130 είναι υπό κατασκευή με τα περισσότερα να αναμένονται τα επόμενα δύο χρόνια. Οι παγκόσμιες εμπορικές συναλλαγές LNG έφτασαν τις 356,1 MT το 2020, αυξημένες από την προηγούμενη χρονιά που είχε χαρακτηριστεί από την πανδημία. Αυτό οφειλόταν κυρίως χάρη στις εξαγωγές που καταγράφηκαν από Η.Π.Α και Αυστραλία και στις εισαγωγές Ασίας και χωρών του Ειρηνικού. Οι ποσότητες υγροποίησης αυξήθηκαν το 2020 φτάνοντας τις 452,9 MTPA που ίσως να ήταν μεγαλύτερες αν δεν καθυστερούσαν έργα λόγω πανδημίας [24].

1.6.1 Εγκαταστάσεις υγροποίησης και επαναεριοποίησης φυσικού αερίου

Αφού γίνει η εξόρυξη του ΦΑ και αφού επεξεργαστεί καταλλήλως, είναι έτοιμο να υγροποιηθεί. Όπως προαναφέρθηκε, υγροποιείται στους $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ με σκοπό να μειωθεί ο όγκος. Έτσι, εξυπηρετείται η μεταφορά και η αποθήκευση του σε ειδικές δεξαμενές. Οι μονάδες υγροποίησης είναι το πιο δαπανηρό στάδιο στον κύκλο του ΦΑ πριν την κατανάλωση λόγω του ότι απαιτούν πολλή ενέργεια, αυστηρά μέτρα ασφαλείας και ακριβή σχεδιασμός, πολλά μηχανήματα και υλικά. Το μέγεθός τους εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων συμπιεστών της μονάδας. Επιπρόσθετα, η τοποθεσία των μονάδων αυτών βρίσκεται συνήθως σε απομακρυσμένες περιοχές κάτι που αυξάνει περισσότερο το κόστος [25], Εικόνα 1.10, ενώ επιπλέον χρειάζεται να διατηρούνται κρυογονικές συνθήκες που σημαίνει περισσότερες απαιτήσεις ενέργειας [16].

Σε παγκόσμια κλίμακα οι ποσότητες επαναεριοποίησης έφτασαν τα 850,1 MTPA (million tones per annum) τον Φεβρουάριο του 2021 [24]. Σε αυτό βοήθησε η ανάπτυξη των πλωτών εγκαταστάσεων αποθήκευσης και επαναεριοποίησης (Floating Storage Regasification Unit, FSRU). Πρόκειται για μονάδες που εισάγουν LNG από άλλα δεξαμενόπλοια το αποθηκεύουν και το αεριοποιούν όποτε χρειαστεί, εξάγοντας το σε δίκτυα για κατανάλωση. Βρίσκονται σε λιμάνια χωρίς να χρειάζονται εγκαταστάσεις στην ξηρά για να λειτουργήσουν, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο νομοθετικά πλαίσια για την κατασκευή εγκαταστάσεων. Στον κόσμο υπάρχουν 37 FSRU ενώ κατασκευάζονται και άλλα για τα επόμενα χρόνια [26]. Μπορεί να αποτελέσουν και

προσωρινές λύσεις σε κάποιες περιπτώσεις, όταν κοντά στην πλωτή μονάδα κατασκευάζεται χερσαία εγκατάσταση [27]. Αποτελούν έναν πιο γρήγορο τρόπο επεξεργασίας του ΦΑ προσφέροντας παράλληλα και μεγάλη ευελιξία στις ανάγκες ζήτησης [26].

Στην Ελλάδα μάλιστα έχει δρομολογηθεί η δημιουργία μια πλωτής εγκατάστασης στην Αλεξανδρούπολη, Εικόνα 1.11. Πρόκειται για ένα έργο που θα προμηθεύει ΦΑ στην Ελλάδα και θα διασυνδέεται τα Βαλκάνια. Σκοπός είναι να αναβαθμιστεί το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου και γενικότερα όλης της Ευρώπης με παράλληλο σκοπό τους περιβαλλοντικούς στόχους. Το LNG θα φτάνει στον τερματικό σταθμό (FSRU) έξω από την Αλεξανδρούπολη και μετά την επανααεριοποίηση του θα κατευθύνεται σε έναν καινούργιο μετρητικό και ρυθμιστικό σταθμό και στην συνέχεια θα διοχετεύεται στο Εθνικό σύστημα μεταφοράς. Αυτός ο τερματικός σταθμός θα έχει χωρητικότητα 153.000 m³ και υπολογίζεται ότι θα αεριοποιεί σχεδόν 5.5 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα τον χρόνο [28].



Εικόνα 1.10 Krk, Croatia [29]



Εικόνα 1.11 Μελλοντικός τερματικός σταθμός FSRU Αλεξανδρούπολης [28]

1.6.2 Περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω το ΦΑ είναι το πιο ‘πράσινο’ ορυκτό καύσιμο, διότι είναι το φιλικότερο στο περιβάλλον. Αυτό προκύπτει από τις ποσότητες άνθρακα που απελευθερώνει στο περιβάλλον, οι οποίες είναι λιγότερες συγκριτικά με τα υπόλοιπα ορυκτά καύσιμα. Οι μέχρι τώρα δραστηριότητες στον πλανήτη μας, έχουν οδηγήσει στην αύξηση της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα με αποτέλεσμα αυτό να συγκεντρώνεται στην ατμόσφαιρα και να υπάρχει υπερθέρμανση του πλανήτη [18]. Φυσικά, η αύξηση αυτή οφείλεται στην παράλληλη αύξηση της παραγωγής ενέργειας [2].

Πίνακας 1.6 Σύγκριση εκπομπών ορυκτών καυσίμων (Btu) [23]

ΕΚΠΟΜΠΕΣ	LNG	ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ	ΑΝΘΡΑΚΑΣ
CO ₂	117.000	164.000	208.000
CO	40	33	208
NO _x	92	448	457
SO _x	1	1112	2591
PM	7	84	2774
ΥΔΡΑΡΓΥΡΟΣ	0,000	0,007	0,016

Η καύση των ορυκτών καυσίμων πέρα από διοξείδιο του άνθρακα, εκπέμπουν και σωματίδια μονοξειδίου του αζώτου (NO_x) και μονοξειδίου του θείου (SO_x). Αντίθετα,

η καύση του LNG έχει πολύ περισσότερες εκπομπές CO₂ και ελάχιστες SO_x και NO_x. Ειδικότερα, εκπέμπει 80% λιγότερο NO_x και σχεδόν μηδαμινές εκπομπές SO_x, ενώ 99% λιγότερα PM και κατά 70% λιγότερες εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου [23]. Οι εκπομπές ρύπων φαίνονται στον παραπάνω Πίνακας 1.6.

1.6.3 Ενεργειακές απαιτήσεις υγροποίησης και επαναεριοποίησης φυσικού αερίου

Σημαντικό ρόλο στην σχεδίαση των εγκαταστάσεων υγροποίησης και επαναεριοποίησης παίζουν οι ενεργειακές απαιτήσεις που χρειάζονται για να γίνουν οι διαδικασίες. Για την υγροποίηση του ΦΑ καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια από ό,τι καταναλώνεται για την αεριοποίησή του. Στις καταναλώσεις αυτές βέβαια μεγάλος παράγοντας είναι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για να εκτελεστούν, καθώς και η ποσότητα του ΦΑ που πρόκειται να υγροποιηθεί, να αποθηκευτεί και να αεριοποιηθεί και, τέλος, η περιοχή στην οποία βρίσκονται οι εγκαταστάσεις. Μελέτες έχουν αποδείξει πως οι εγκαταστάσεις που βρίσκονται κοντά σε θάλασσα (για παράδειγμα FSRU) χρειάζονται λιγότερη ενέργεια για αποθήκευση και επαναεριοποίηση σε αντίθεση με τις εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε χερσαίο έδαφος, μιας και υπάρχει η δυνατότητα να αξιοποιηθεί το θαλάσσιο περιβάλλον που βρίσκεται κοντά, είτε λόγω θερμοκρασίας είτε λόγω χρήσης του θαλασσινού νερού. Αυτές οι εγκαταστάσεις βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές και το μεγάλο πλεονέκτημά τους είναι οι μεγαλύτερες εκτάσεις για αποθήκευση αλλά αντίθετα καθιστούν δύσκολη την μεταφορά προσωπικού και μεταφορών προμηθειών. Στην διαφορετική περίπτωση που οι εγκαταστάσεις είναι κοντά σε θάλασσα, η υγροποίηση και αεριοποίηση μπορεί να γίνει σε ναυπηγεία όπου εκεί είναι εύκολο να μεταφερθεί και το προσωπικό και οι προμήθειες καθώς και να διανεμηθούν ευκολότερα τα προϊόντα. Χαρακτηριστικό μάλιστα είναι πως οι χώρες που έχουν μεγάλη παραγωγή LNG έχουν εγκαταστάσεις σε χερσαίες περιοχές για λόγους μεγαλύτερης αποθήκευσης ενώ οι χώρες που δεν παράγουν αποθηκεύουν σε πλωτές μονάδες [30]. Στο κύριο κορμό της εργασίας προσφέρονται περισσότερες λεπτομέρειες επί του θέματος.

1.7 Βασικοί ερευνητικοί στόχοι

Στην παρούσα εργασία διεξάγεται μια επιστημονική ανασκόπηση σχετικά με τις εγκαταστάσεις υγροποίησης και αεριοποίησης ΦΑ. Ένας από τους βασικούς στόχους είναι η συλλογή και η ανάλυσή της υπάρχουσας επιστημονικής αλλά και μη βιβλιογραφίας σχετικά με την εν λόγω τεχνολογίες.

Πιο συγκεκριμένα σε αυτή την βιβλιογραφική έρευνα, περιγράφεται η λειτουργία των μονάδων (υδροποίησης και αεριοποίησης φυσικού αερίου), μέσα από την καταγραφή των τεχνολογιών και του εξοπλισμού που χρησιμοποιούν. Επίσης, στόχος της εργασίας είναι να γίνουν κατανοητοί οι λόγοι υδροποίησης και επανααεριοποίησης του ΦΑ. Επιπρόσθετα, σκοπός είναι η αναφορά και η ανάλυση στις ενεργειακές απαιτήσεις που χρειάζονται για να πραγματοποιηθεί η υδροποίηση και η επανααεριοποίηση στις μονάδες. Οι δύο αυτές διαδικασίες (υδροποίησης και επανααεριοποίησης) αποτελούν σημαντικό κομμάτι της επεξεργασίας του ΦΑ πριν την τελική κατανάλωση, το οποίο είναι κάτι που αναλύεται. Μέσα από την συλλογή πληροφοριών γίνεται αξιολόγηση του ΦΑ ως προς την συνολική του αξιοποίηση συγκριτικά με άλλα ορυκτά καύσιμα.

Οι βασικές ερωτήσεις της εργασίας, όπου και ζητούν απάντηση είναι: Δικαιολογείται τελικά ο χαρακτηρισμός του φυσικού αερίου ως πράσινο καύσιμο; Αξίζει η υδροποίηση και η επανααεριοποίηση του; Τι χρειάζεται και τι απαιτείται για τις διαδικασίες αυτές; Πού υπάρχουν αυτές οι εγκαταστάσεις;

1.8 Σύνθεση εργασίας

Η εργασία αυτή αποτελείται από 7 κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται εισαγωγή στις πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα, με ιδιαίτερη αναφορά στο ΦΑ και την σημερινή του κατανάλωση.

Στο Κεφάλαιο 2, που ακολουθεί την εισαγωγή, περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την συγγραφή της εργασίας. Γίνεται αναφορά στο τι πραγματεύεται και στα βήματα που ακολουθήθηκαν για να απαντηθούν τα ερωτήματα και οι στόχοι της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 3, στην εργασία γίνεται λόγος για την αρχική μορφή του LNG, δηλαδή πριν υδροποιηθεί. Γίνεται αναφορά για τα αποθέματά του στον κόσμο και την διαφορετική σύστασή του ανάλογα την προέλευση. Περιγράφεται η επεξεργασία που, είτε πριν υδροποιηθεί, είτε πριν διανεμηθεί στο δίκτυο για κατανάλωση. Επισημαίνονται, ακόμη, τρόποι εξαγωγής παραπροϊόντων του ΦΑ και τέλος, για το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα στο περιβάλλον.

Στο Κεφάλαιο 4 που ακολουθεί, γίνεται αναφορά στο υγρή μορφή του αερίου. Περιγράφονται οι ιδιότητές, οι χρήσεις του και ο τρόπος με τον οποίο υδροποιείται και επανααεριοποιείται. Επισημαίνονται οι πλωτοί σταθμοί επανααεριοποίησης και αποθήκευσης FSRU, οι οποίοι συγκρίνονται με τις αντίστοιχες χερσαίες εγκαταστάσεις και τέλος, καταγράφονται οι ενεργειακές ανάγκες των διαδικασιών υδροποίησης και επανααεριοποίησης.

Στο Κεφάλαιο 5, καταγράφονται οι τερματικοί σταθμοί στον κόσμο, σε πίνακες και χάρτες. Καταγράφηκαν επίσης, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν ανά εγκατάσταση στον κόσμο για την υγροποίηση ενώ περιγράφεται και ο ελληνικός τερματικός σταθμός της Ρεβυθούσας.

Στο Κεφάλαιο 6, το οποίο κάνει αναφορά στην μεταφορά του ΦΑ, συγκρίνεται η μεταφορά του σε υγρή και αέρια μορφή, όσο αναφορά τον τρόπο και το κόστος τους.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7, έχουν γραφτεί τα συμπεράσματα, συνάρτηση των πορισμάτων όλων των παραπάνω πληροφοριών. Τονίζονται τα σημαντικά σημεία και γίνεται φανερή η σημασία της εργασίας, ενώ, συμπεριλαμβάνονται σε αυτά, προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

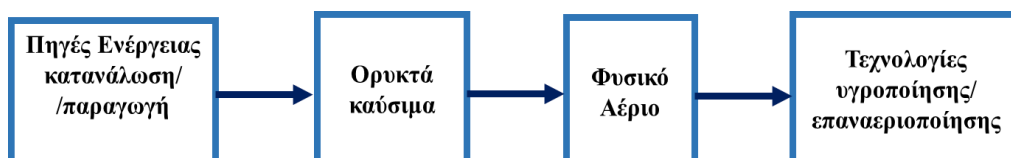
Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία

Για να επιτευχθούν οι στόχοι της εργασίας, χρειάστηκε να γίνει αναφορά, αρχικά, στις διεργασίες του ΦΑ, από την εξόρυξη έως την κατανάλωσή του. Για να φτάσει να καταναλωθεί το ΦΑ, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1, πρέπει πρώτα να επεξεργαστεί, αφού λόγω της εξόρυξής του από τα βάθη της γης, έχει συστατικά τα οποία πρέπει να απομακρυνθούν. Έπειτα, μεταφέρεται, είτε σε αέρια μορφή για χερσαίες αποστάσεις, είτε υγρή για μεταφορά μέσω θαλάσσης. Για να υγροποιηθεί, ψύχεται πρώτα σε εγκαταστάσεις υγροποίησης, όπου στην συνέχεια, φορτώνεται σε δεξαμενόπλοια και μεταφέρεται σε περιοχές που διαθέτουν εγκαταστάσεις επαναεριοποίησης, ώστε από εκεί τελικά να διοχετευθεί για κατανάλωση.



Εικόνα 2.1 Βήματα επεξεργασίας φυσικού αερίου [16]

Έτσι, λοιπόν, ακολουθήθηκε μια μεθοδολογία, κατά την οποία έγινε, αρχικά, συλλογή πληροφοριών από ένα ευρύτερο πεδίο, για την πλήρη περιγραφή των σταδίων του ΦΑ, ενώ στην πορεία οι πληροφορίες και η καταγραφή τους γινόταν όλο και πιο ειδικές, όπως εμφανίζεται και στην επόμενη εικόνα:



Εικόνα 2.2 Βήματα συλλογής πληροφοριών.

Ξεκινώντας από μια ενημέρωση για τις υπάρχουσες πηγές ενέργειας στην Εισαγωγή, η εργασία επικεντρώνεται στο ΦΑ και στο τι αυτό μπορεί να προσφέρει έναντι των

άλλων καυσίμων, κάτι που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3. Για να απαντηθούν οι στόχοι της παρούσας εργασίας, εντοπίζονται και καταγράφονται στο παρακάτω κεφάλαιο οι λόγοι υδροποίησής του, καθώς και οι τεχνολογίες και ο εξοπλισμός που συντελούν στην υδροποίηση. Παράλληλα δίνονται και πίνακες, όπου καταγράφονται λειτουργικές μονάδες σήμερα. Έχοντας υδροποιηθεί το ΦΑ, χρειάζεται να αεριοποιηθεί, οπότε δημιουργείται ένα καινούργιο κεφάλαιο, το Κεφάλαιο 5, όπου περιγράφονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την επανααεριοποίηση του, ενώ ταυτόχρονα καταγράφονται και πραγματικές εγκαταστάσεις σε Ευρώπη και πιο αναλυτικά στον ελληνικό σταθμό επανααεριοποίησης. Απαραίτητη θεωρείται και μια αναφορά στην μεταφορά του, αφού δημιουργείται και το ερώτημα, αν αξίζει η διαδικασία της υδροποίησής για την μεταφορά, το οποίο απαντάται στο Κεφάλαιο 6.

Τα στοιχεία για τις ενεργειακές αποδόσεις και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του ΦΑ βοήθησε στο να πραγματοποιηθεί σύγκριση με άλλα καύσιμα και πηγές. Οι πίνακες με τις λειτουργικές μονάδες υδροποίησης και επανααεριοποίησης, βοήθησαν στο να γίνει αντιληπτό, πως η εργασία πραγματεύεται κάτι πραγματικό και σύγχρονο, ενώ βοήθησαν και στην συλλογή πληροφοριών σχετικά με τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούν. Επίσης, οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν για την μεταφορά του ΦΑ σε υγρή μορφή, βοήθησαν με την σειρά τους στο να γίνει κατανοητός ο λόγος που μεταφέρεται με αυτόν τον τρόπο το ΦΑ.

Η συλλογή πληροφοριών για τα παραπάνω, έγινε μέσω αναζήτησης, στο διαδίκτυο, άρθρων σε πηγές αναζήτησης όπως google scholar, Science direct, Elsevier. Τα άρθρα που βρέθηκαν ήταν επιστημονικά, δημοσιευμένα σε επιστημονικά περιοδικά. Αναζητήθηκαν, επίσης, άρθρα από ιστοσελίδες φορέων και οργανισμών που ασχολούνται με την ενέργεια, το ΦΑ και τις εγκαταστάσεις τους, τόσο του εξωτερικού όσο και του εσωτερικού. Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως πρόσφατα άρθρα, ενώ υπάρχουν και κάποια παλαιότερα για ιστορικούς σκοπούς. Στις προαναφερθείσες μηχανές αναζήτησης, συγχρονίστηκε το ιδρυματικό email του συγγραφέα και στελνόντουσαν τακτικά emails με προτεινόμενα άρθρα τα οποία βοήθησαν στην περάτωση της εργασίας. Η συγγραφή των πληροφοριών, σε αρκετές περιπτώσεις έγινε σε πίνακες ή καταγράφηκαν σε κουκίδες ή σε διαγράμματα για πιο εύκολη και κατανοητή ανάγνωση.

Τα συμπεράσματα της εργασίας, απαντούν στους στόχους που έχουν τεθεί από την αρχή, ενώ δίνονται και ακόμη περισσότερα σε ένα πιο ευρύτερο πλαίσιο. Τα αποτελέσματα της εργασίας μπορούν να χρησιμεύσουν ως ιδέες για μελλοντικές εργασίες.

Κεφάλαιο 3. Φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων, στην βιομηχανίας για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, στην πετροχημική βιομηχανία και ως καύσιμα μεταφοράς. Η υψηλή ενεργειακή απόδοση που αποδίδει το ΦΑ, το καθιστά ένα πολύ σημαντικό καύσιμο. Ακόμη, τα συστατικά του μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή άλλων προϊόντων όπως στην παραγωγή αιθυλενίου και αμμωνίας [18],[31]. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του ΦΑ είναι ότι μπορεί να αξιοποιηθεί και ως συμπιεσμένο (compressed natural gas, CNG) και σε υγρή μορφή (LNG) [23], όπως θα δούμε παρακάτω.

Συγκριτικά με τα υπόλοιπα συμβατικά καύσιμα όπως το πετρέλαιο (diesel) και τη βενζίνη, το ΦΑ είναι καύσιμο καθαρής καύσης, έχει μεγαλύτερο αριθμό οκτανίων, υψηλότερη θερμοκρασία αυτανάφλεξης, αναμιγνύεται γρήγορα με τον αέρα για να σχηματίσει ομοιογενές μίγμα αέρα-καυσίμου καθώς και εκπέμπει λιγότερους ρύπους. Τα τελευταία χρόνια το ΦΑ αξιοποιείται όλο και περισσότερο και αναμένεται να χρησιμοποιηθεί περισσότερο στο άμεσο μέλλον για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στις μεταφορές [31]. Σύμφωνα με έρευνες μάλιστα, η παραγωγή του ΦΑ αναμένεται να αυξηθεί κατά 50% έως το 2030 και να ξεπεράσει τις πηγές έτσι του άνθρακα μέσω ακόμη την χρήση του και στις βιομηχανίες [23]. Η εξόρυξη του ΦΑ μπορεί να γίνει με γεώτρηση, κάθετη ή οριζόντια, όταν βέβαια πρόκειται για κοιτάσματα με μεγάλα κοιτάσματα και αξίζει η εξόρυξή του. Όταν πρόκειται για πηγή με συμβατικό τύπο τότε η εξόρυξη γίνεται μέσω φρεατίου όπου το ΦΑ ανεβαίνει εύκολα στην επιφάνεια. Όταν πρόκειται για μη συμβατικό τύπο ΦΑ, όπως στις Η.Π.Α που το ΦΑ υπάρχει σε σχιστόλιθους η εξόρυξη γίνεται με την βοήθεια χημικών ουσιών, πίεση νερού και άμμου κάτω από το κοιτάσμα με σκοπό να απελευθερώσει το ΦΑ από τα πετρώματα και να οδηγηθεί στην επιφάνεια. Μετά από αυτά, το ΦΑ οδηγείται μέσω αγωγών σε μονάδες επεξεργασίας καθώς μπορεί να περιέχει στοιχεία που δεν χρειάζονται όπως μη υδρογονάνθρακες, θείο, ήλιο, άζωτο και άλλα [14].

3.1 Αποθέματα φυσικού αερίου

Από το 1970 έως το 2009, οι καταγραφές αποθεμάτων ΦΑ σε ολόκληρο τον κόσμο αυξανόντουσαν κατά 5% ανά έτος. Πρέπει να τονιστεί πως με τον όρο αποθέματα εννοείται το ΦΑ που έχει ανακαλυφθεί σε κάποια μέρη με τα υπάρχον δεδομένα και τεχνολογίες, κάτι το οποίο μπορεί μελλοντικά να αλλάξει. Υιοθετώντας, λοιπόν, τον όρο αποθέματα με τις παραπάνω προϋποθέσεις, οι χώρες στις οποίες αρχικά είχαν εντοπιστεί αποθέματα, ήταν 40 και το 2005 είχαν φτάσει στις 85 [31]. Ενδεικτικά, παρατίθενται παρακάτω οι πίνακες, στους οποίους αποτυπώνονται οι ποσότητες αποθεμάτων ΦΑ ανά γεωγραφικό διαμέρισμα, Πίνακας 3.1, και οι ποσότητες παραγωγής ΦΑ, Πίνακας 3.2:

Πίνακας 3.1 Αποθέματα φυσικού αερίου ανά γεωγραφικό διαμέρισμα από το 1999 έως το 2019 [32]

Αποθέματα Φυσικού Αερίου σε tcm			
Γεωγραφικά Διαμερίσματα	1999	2009	2019
Βόρεια Αμερική	7	9,4	15
Κεντρική και Νότια Αμερική	6,8	7,6	8
Ευρώπη	5,6	5,3	3,4
Ανεξάρτητα Κρατίδια	39,8	46,6	64,2
Μέση Ανατολή	53	73,6	75,6
Αφρική	11	14,2	14,9
Δυτική Ασία- Ειρηνικός Ωκεανός	9,5	13,9	17,7

Πίνακας 3.2 Παραγωγή φυσικού αερίου ανά γεωγραφικό διαμέρισμα από το 2009 έως το 2019 [32]

Παραγωγή Φυσικού Αερίου σε bcm			
Γεωγραφικά Διαμερίσματα	2009	2018	2019
Βόρεια Αμερική	765,2	1050,1	1128
Κεντρική και Νότια Αμερική	152,3	176,2	173,6
Ευρώπη	303,7	251,2	235,9
Ανεξάρτητα Κρατίδια	663,2	831,1	846,5
Μέση Ανατολή	413,8	680,7	695,3
Αφρική	192,1	236,2	237,9
Δυτική Ασία- Ειρηνικός Ωκεανός	444,6	632	672,1

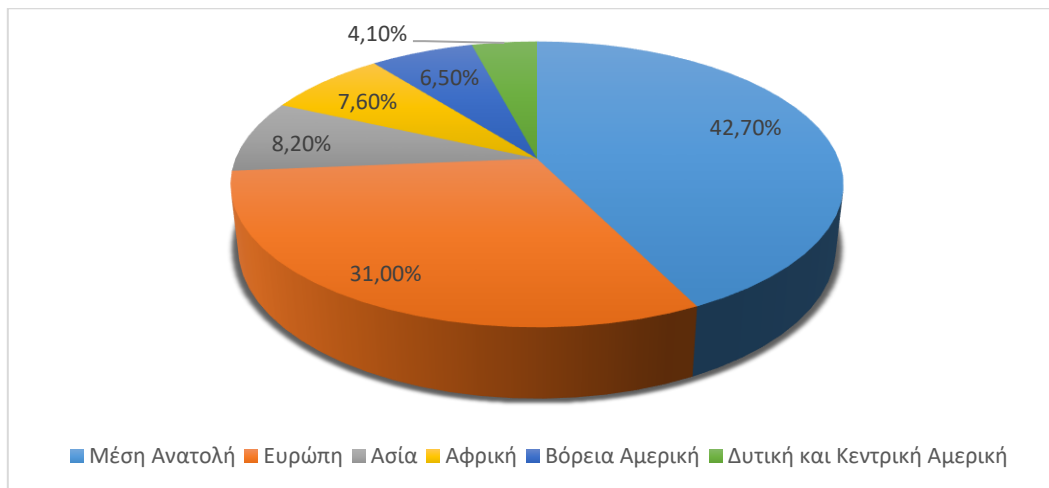
Στον επόμενο πίνακα αναγράφονται οι χώρες ανά γεωγραφικό διαμέρισμα με τα μεγαλύτερα αποθέματα και η συνεισφορά τους στο παγκόσμιο σύνολο, Πίνακας 3.3.

Πίνακας 3.3 Χώρες με τα μεγαλύτερα αποθέματα ανά γεωγραφικό διαμέρισμα και ποσοστό επί του παγκόσμιου συνόλου [32]

Αποθέματα Φυσικού Αερίου 2019			
Γεωγραφικά Διαμερίσματα	Χώρες	tcm	Ποσοστό επί του παγκόσμιου συνόλου
Βόρεια Αμερική	Η.Π.Α	12,9	6,5%
Κεντρική και Νότια Αμερική	Βενεζουέλα	6,3	3,2%
Ευρώπη	Νορβηγία	1,5	0,8%
Ανεξάρτητα Κρατίδια	Ρωσία	38	19,1%
Μέση Ανατολή	Ιράν	32	16,1%
Αφρική	Νιγηρία	5,4	2,7%
Δυτική Ασία- Ειρηνικός Ωκεανός	Κίνα	8,4	4,2%

Το μεγαλύτερο ποσοστό τόσο αποθεμάτων το έχει η Ρωσία που ανήκει στα Ανεξάρτητα Κρατίδια ενώ την μεγαλύτερη παραγωγή η Βόρεια Αμερική. Φαίνεται πως τόσο τα αποθέματα όσο και η παραγωγή ΦΑ αυξάνει συνεχώς, εκτός της Ευρώπης που οι ποσότητες μειώνονται. Φαίνεται, λοιπόν, πως η Ευρώπη είναι λογικό να εισάγει ΦΑ από άλλες περιοχές όπως Ρωσία λόγω της μικρής της παραγωγής.

Η Ρωσία είναι αυτή που διαθέτει τα μεγαλύτερα στον κόσμο σε ΦΑ, στην οποία η παραγωγή ΦΑ ήταν στάσιμη, μέχρι το 2007, λόγω κρατικών ρυθμίσεων, γεωπολιτικών στρατηγικών, ανεπαρκή τεχνολογία εξαγωγής λόγω ότι δεν έγιναν οι κατάλληλες επενδύσεις και μονοπωλίου εταιρίας στη βιομηχανία. Το μεγαλύτερο μέρος των κοιτασμάτων της Ρωσία βρίσκονται στη Δυτική Σιβηρία. Ακολουθεί το Ιράν, όπου ένα μεγάλο ποσοστό των αποθεμάτων βρίσκεται σε μη ανεπτυγμένα κοιτάσματα και το μεγαλύτερο μέρος τους αναπτύσσεται υπεράκτια σχεδόν στο 47% τους [31]. Ακολουθεί η Εικόνα 3.1 που αναφέρει το που βρίσκονται σε ποσοστά τα αποθέματα στον κόσμο :



Εικόνα 3.1 Κατανομή αποθεμάτων φυσικού αερίου στον κόσμο [18]

3.2 Ταξινόμηση φυσικού αερίου

Το ΦΑ το κατηγοριοποιούμε ανάλογα την προέλευση και την χημική του σύσταση.

3.2.1 Ανάλογα την προέλευση

- Συμβατικό αέριο το οποίο το βρίσκεται είτε μαζί με το αργό πετρέλαιο(associated gas) είτε περιέχει λίγο ως καθόλου αργό πετρέλαιο(non-associated gas)
- Αντισυμβατικό αέριο

Οι χαρακτηρισμοί προκύπτουν μετά από τεχνικές διαφοροποίησης που είναι οι εξής: το είδος των σταθερών ισότοπων (άνθρακα, ορυκτά, ραδιενεργά, πυρηνικά), η συγκέντρωση των υδρογονανθράκων, η μικροβιακή ταυτοποίηση, η θερμοκρασία σχηματισμού, η ανάλυση του πυρήνα, η ποσότητα του νερού και τη θερμική του ωριμότητα.

3.2.2 Ανάλογα την χημική σύσταση

- Αέριο με ποσότητες θείου, όπου εδώ το αέριο μπορεί να χαρακτηριστεί παραπάνω ως γλυκό ή ξινό ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε H_2S .
- Αέριο με ποσότητες υδρογονανθράκων όπου μπορεί να χαρακτηριστεί ως ξηρό ή υγρό.

Παρακάτω στον Πίνακα 3.4 παρατίθενται παραδείγματα διαφορετικής σύστασης του ΦΑ με βάση την περιοχή. Παρατηρούμε πως παρόλο που οι περιοχές βρίσκονται όλες στο Ιράν, η σύσταση σε κάθε περιοχή είναι διαφορετική, κάτι που μας δείχνει πως η σύσταση αλλάζει και σε κοντινές αποστάσεις. Παράδειγμα για την διαφορετική σύσταση του παρατίθεται στον Πίνακα 3.5, όπου διακρίνεται η διαφορά ανάμεσα σε Ρωσία και Αλγερία :

Πίνακας 3.4 Συστάσεις φυσικού αερίου σε πόλεις από το Ιράν [13]

Συστατικά	Σύνθεση (%)			
	Khangiran	Kangan	Pars	Bidboland
CH ₄	98,6	90,04	87	85,01
C ₂ H ₆	0,59	3,69	5,4	9,38
C ₃ H ₈	0,09	0,93	1,7	3,49
i-G ₄ H ₁₀	0,02	0,2	0,3	0,34
n-G ₄ H ₁₀	0,04	0,29	0,45	0,65
i-G ₄ H ₁₂	0,02	0,14	0,13	0,1
n-G ₅ H ₁₂	0,02	0,08	0,11	0,09
n-G ₆ H ₁₄	0,07	0,14	0,07	0,09
C ₇ ⁺	0	0,01	0,03	0
N ₂	0,56	4,48	3,1	0,44
CO ₂	0	0	1,85	0,41

Πίνακας 3.5 Συστάσεις φυσικού αερίου από τη Ρωσία και την Αλγερία [33]

Σύσταση	Ρωσικό ΦΑ (%)	Αλγερινό ΦΑ (%)
Μεθάνιο (CH ₄)	98	91,2
Αιθάνιο (C ₂ H ₆)	0,6	6,5
Προπάνιο	0,2	1,1
Βουτάνιο	0,2	0,2
Πεντάνιο και βαρύτερα	0,1	-
Άζωτο N ₂	0,8	1
Διοξείδιο του άνθρακα CO ₂	0,1	-
Ευγενή Αέρια(He,Ne,Xe)	-	-
Υδροθείο(H ₂ O)	-	-
Θερμικό περιεχόμενο	8.600-9.200 kcal/Nm ³	9.640-10.650 kcal/Nm ³

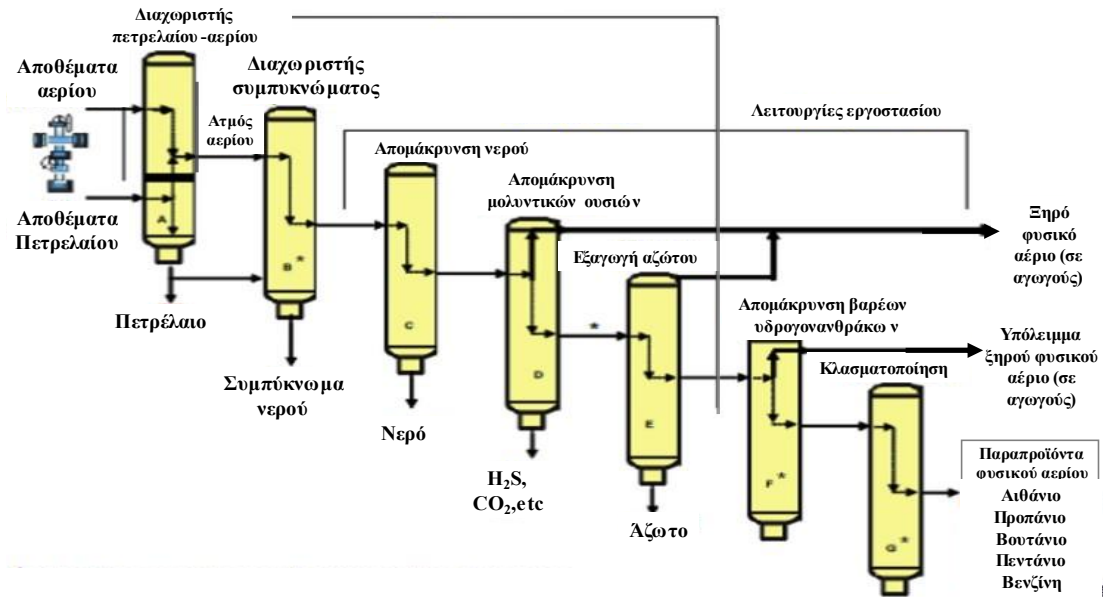
3.3 Επεξεργασία φυσικού αερίου

Στο τέλος το ΦΑ που διατίθεται προς κατανάλωση είναι καθαρό μεθάνιο σχεδόν, διότι από την εξόρυξη ως την κατανάλωση ακολουθούνται οι παρακάτω διεργασίες :

- Απομάκρυνση αερίων που εμποδίζουν την χρήση του ΦΑ ως καύσιμο.
- Διαχωρισμός του αερίου από συστατικά που μπορούν να είναι χρήσιμα για άλλες χρήσεις όπως το προπάνιο και αιθάνιο
- Υγροποίηση του για μεταφορά.

Όπως μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 3.2, για να πληροί το ΦΑ τις απαραίτητες προδιαγραφές για μεταφορά και κατανάλωση γίνονται οι εξής διαδικασίες [18]:

- Διαχωρισμός υγρών υδρογονανθράκων. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στάδιο, καθώς πέρα του ότι διαχωρίζονται τα υγρά που οπωσδήποτε πρέπει να απομακρυνθούν, διαχωρίζονται και πολύτιμα συστατικά που μπορούν χρησιμεύσουν για βενζίνη ή συμπυκνώματα, υγροποιημένο φυσικό αέριο (ΥΦΑ) ή και υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (LPG). Αυτός ο διαχωρισμός μπορεί να γίνει με μεμβράνες, ψύξη, απορρόφηση λαδιού ή προσρόφηση.
- Αφαίρεση ιχνοστοιχείων ηλίου, οξυγόνου, ενώσεων αρσενικού, αζώτου και ραδιενεργού υλικού
- Απομάκρυνση όξινων αερίων όπως υδρόθειο και διοξειδίου του άνθρακα είτε με προσρόφηση είτε με απορρόφηση τα οποία σχηματίζουν όξινα διαλύματα και μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση. Το CO₂ αν υπερβεί ένα όριο, μπορεί το αέριο να παγώσει μέσα στους αγωγούς.
- Αφαίρεση νερού. Με την διαδικασία αυτή αποφεύγεται η μείωση της θερμαντικής αξίας του αερίου που παράγεται. Επίσης, με την παρουσία του νερού θα υπήρχε πρόβλημα στην ροή του αερίου που θα γινόταν πιο αργή. Ακόμη, είναι ένα μέτρο αποφυγής της διάβρωσης των σωλήνων του δικτύου και προβλημάτων στα εξαρτήματα μεταφοράς. Για την απομάκρυνση του νερού γίνονται οι εξής τεχνικές αφυδάτωσης που είναι η εξής:
 - Απορρόφηση, η οποία γίνεται με οργανικά υλικά, με υδατικά διαλύματα αλάτων, με στερεά απορροφητικά όπου γίνεται χημική αντίδραση και υγρά απορροφητικά όπου γίνεται χημική αντίδραση και διάλυση.
 - Προσρόφηση, που γίνεται με στερεά προσφορητικά.
 - Διήθηση αερίου μέσω μεμβρανών.
- Απομάκρυνση υδραργύρου. Είναι μια ουσία που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα διάβρωσης στα συστήματα ολόκληρης της διαδικασίας και κινδύνους στο περιβάλλον μιας και είναι τοξική ουσία και η απομάκρυνση του γίνεται με αναγεννητικές και μη αναγεννητικές διαδικασίες [18].



Εικόνα 3.2 Σχηματική αναπαράσταση μονάδων επεξεργασίας (Κλασματοποίηση) αερίου [18]

3.4 Παραπροϊόντα φυσικού αερίου

Από την εξόρυξη του ΦΑ έως την κατανάλωσή του το ΦΑ αλλάζει μορφές, από υγρή σε αέρια και από αέρια σε υγρή. Για αυτό λοιπόν, υπάρχουν τεχνολογίες που μπορούν και αξιοποιούν τις αλλαγές φάσεις του ΦΑ προσδίδοντας περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Οι τεχνολογίες αυτές περιγράφονται παρακάτω:

3.4.1 Τεχνολογία μετατροπής αερίου σε υγρά προϊόντα

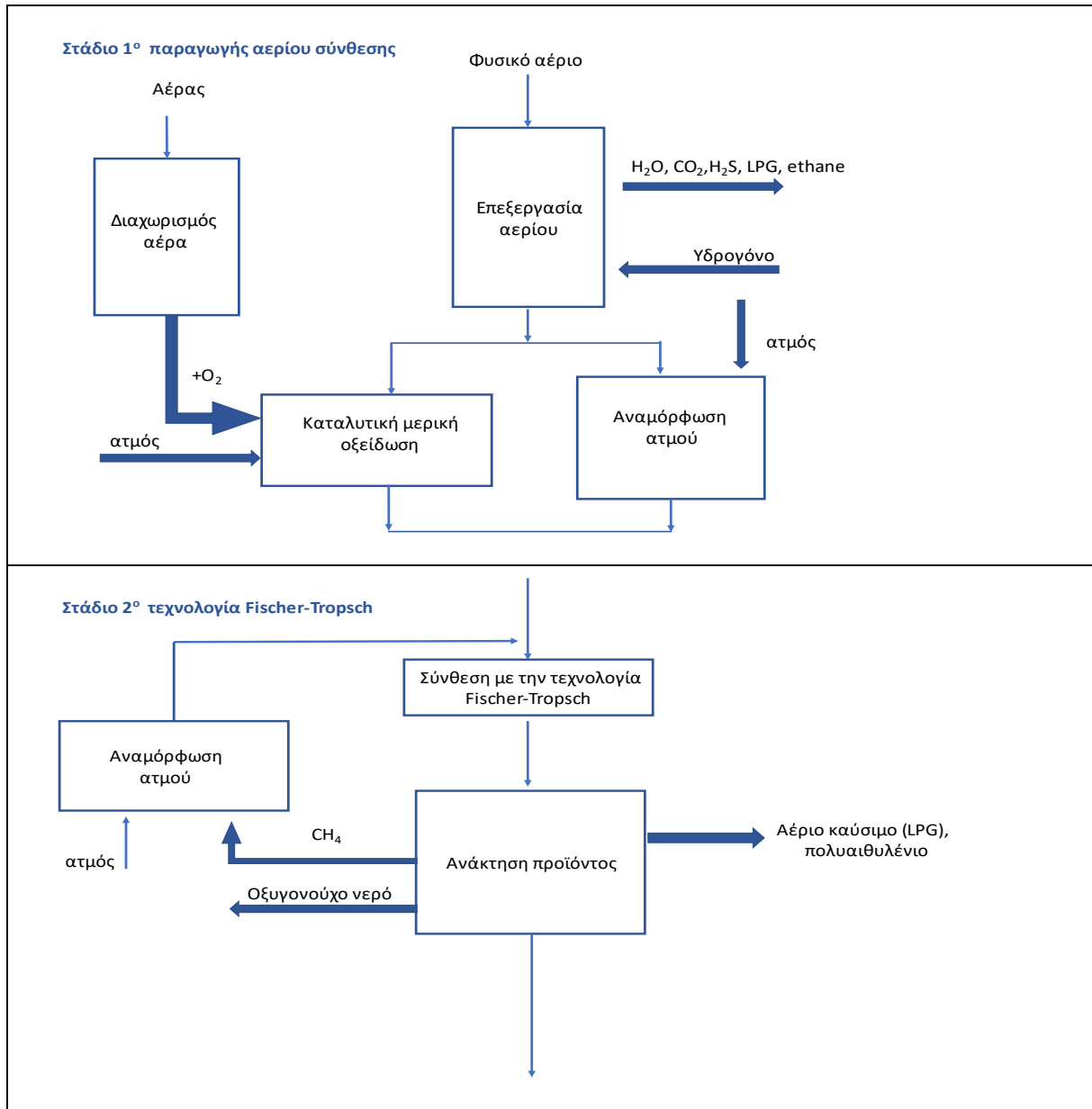
Μία από αυτές τις τεχνολογίες είναι η τεχνολογία Gas to Liquids, που αξίζει να αναφέρουμε, όπου μέσα από μια σειρά διαδικασιών παράγονται κάποια προϊόντα. Η τεχνολογία αυτή δεν έχει αναπτυχθεί τόσο όσο η υγροποίηση του φυσικού αερίου (LNG) καθώς είναι πιο πολύπλοκη διαδικασία. Πιο αναλυτικά, η τεχνολογία Gas to Liquids δηλαδή η μετατροπή του αερίου σε υγρά προϊόντα, αποτελείται από τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο το ΦΑ και κυρίως το μεθάνιο που είναι το μεγαλύτερο σε ποσοστό συστατικό του μετατρέπεται σε ένα αέριο που ονομάζεται αέριο σύνθεσης, μίγμα το οποίο αποτελείται από υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα σε αναλογία 2 προς 1, από τα οποία τα άτομα υδρογόνου και άνθρακα χρησιμεύουν στο δεύτερο στάδιο από το οποίο παράγονται προϊόντα. Η μετατροπή αυτή γίνεται με 4 τρόπους, όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακας 3.6:

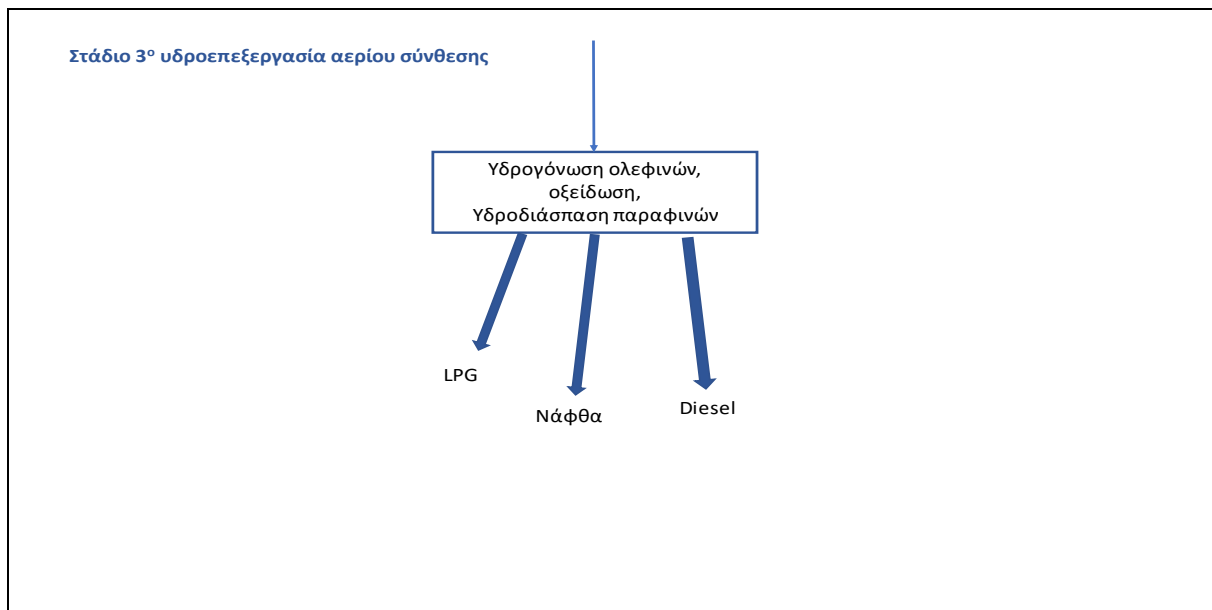
Πίνακας 3.6 Μετατροπή αερίου σε υγρά προϊόντα

Αναμόρφωση με ατμό
<ul style="list-style-type: none"> • Ακριβή διαδικασία έναντι των υπολοίπων • Μεγάλο κόστος διεργασιών • Αναλογία υδρογόνου/μονοξειδίου του άνθρακα >4 που δεν ωφελεί το επόμενο στάδιο • Μικρότερη μετατροπή του μεθανίου λόγω ελάχιστης απαιτούμενης θερμοκρασίας
Αναμόρφωση μέσω μερικής οξείδωσης
<ul style="list-style-type: none"> • Με την μερική οξείδωση γίνεται μη καταλυτική καύση από την οποία παράγεται αέριο χρήσιμο για το επόμενο στάδιο • Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας εξόδου το αέριο χρειάζεται να φιλτραριστεί, χρειάζεται μεγαλύτερη κατανάλωση οξυγόνου και παράγεται μεθάνιο που δεν μετατρέπεται και δεν μπορεί να ανακυκλωθεί • Χρειάζονται επιπλέον διεργασίες ανάλογα με τις θερμικές ανάγκες της εγκατάστασης που επηρεάζονται από το κόστος κεφαλαίου
Αυτοθερμική αναμόρφωση
<ul style="list-style-type: none"> • Χρήση καταλύτη για την μετατροπή του ΦΑ σε αέριο σύνθεσης • Ηπιότερες συνθήκες θερμοκρασίας • Μεγαλύτερη αναλογία υδρογόνου/ μονοξειδίου του άνθρακα που δεν ωφελεί το επόμενο στάδιο
Συνδυασμένη αναμόρφωση
<ul style="list-style-type: none"> • Καλύτερη αξιοποίηση ενέργειας • Λιγότερο δαπανηρή από την αναμόρφωση με ατμό • Πιο ακριβή από την αυτοθερμική αναμόρφωση • Το κόστος της διαδικασίας εξαρτάται άμεσα από το κόστος του ΦΑ

Στο δεύτερο στάδιο, εφαρμόζεται η τεχνολογία Fischer-Tropsch όπου παράγονται πολύτιμα προϊόντα πετρελαίου. Με αυτή τη διαδικασία αξιοποιείται το ΦΑ το οποίο σε άλλη περίπτωση θα καιγόταν και δεν θα είχε εκμεταλλευτεί. Στην νότια Αφρική, για παράδειγμα, μέσω αυτής της λειτουργίας παράγονται υγρά καύσιμα, λιπαντικά και πετροχημικά. Η διαδικασία αυτή λειτουργεί, είτε με υψηλή θερμοκρασία κατά την οποία μπορούν και παράγονται κυρίως βενζίνη και χημικά όπως οι ολεφίνες, είτε με χαμηλή θερμοκρασία από όπου παράγεται το κερί και πρόκειται για μια διαδικασία που πραγματοποιείται από έναν καταλύτη κοβαλτίου που μετατρέπει το αέριο σε υγρά καύσιμα. Χρειάζεται, μάλιστα, προσοχή στην ανάμειξη των αερίων και στον έλεγχο της θερμοκρασίας κάτι στο οποίο επικεντρώνονται οι μελέτες για αυτή την λειτουργία. Τέλος, υπάρχει το στάδιο της υδροεπεξεργασίας, στο οποίο υπάρχουν διαδικασίες όπως η υδρογόνωση, όπου αυξάνεται η αναλογία του υδρογόνου προς τον άνθρακα

με την προσθήκη υδρογόνου από εξωτερική πηγή, ώστε να μετατραπεί ο άνθρακας σε υγρά καύσιμα και η υδροδιάσπαση. Σε αυτή, τα βαρέα μόρια της παραφίνης σπάνε και παράγεται η νάφθα και το ντίζελ. Η τεχνολογία αυτή απαιτεί πολλές ακόμη βελτιστοποιήσεις για να μπορεί να είναι ανταγωνιστική σε όλα τα στάδια επεξεργασίας κάτι που σύμφωνα με τους επιστήμονες είναι εφικτό [35]–[37].





Εικόνα 3.3 Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής παραπροϊόντων μέσω της τεχνολογίας Gas to Liquids [35].

3.5 Φυσικό αέριο και περιβάλλον

Στις μέρες μας οι ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) έχουν αυξηθεί και αυτό έχει καταστεί τεράστιο πρόβλημα για όλο τον πλανήτη λόγω των επιπτώσεων που έχουν σε αυτόν. Χαρακτηριστικό μάλιστα είναι πως από το 1970 έως το 2000 η αύξηση του CO_2 ήταν 1,3% κάθε χρόνο ενώ από το 2000 έως το 2010 το ποσοστό είχε ανέβει στο 2,2% [18] ενώ προβλέπεται παράλληλα πως από το 2005 έως το 2030 οι εκπομπές του θα έχουν αυξηθεί κατά 30% ακόμη και με καινούργιες τεχνολογίες που μειώνουν την εκπομπή του [23]. Επιπλέον, σύμφωνα με μελέτες οι θερμοκρασία του πλανήτη αν δεν υπάρξει προσπάθεια να μειωθεί το φαινόμενο της υπερθέρμανσης προβλέπεται να αυξηθεί από 3,7 °C στους 4,8 °C την επόμενη δεκαετία. Για αυτό λοιπόν, διεθνώς, έχουν παρθεί αποφάσεις ώστε να μειωθούν οι εκπομπές CO_2 χρησιμοποιώντας καύσιμα με χαμηλότερη συγκέντρωση άνθρακα και για τον λόγο αυτό η παγκόσμια κοινότητα έχει στραφεί στο ΦΑ [18]. Να σημειωθεί πως έως το 2011, τα οχήματα δημόσιας συγκοινωνίας χρησιμοποιούσαν το ΦΑ σε ποσοστό μόλις 7% στα πλαίσια προγραμμάτων καθαρού αέρα. Ακόμη και μετά την υγροποίησή του, το LNG μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα στο περιβάλλον κατά την εξάτμισή του. Κατά την αποθήκευση, μικρό μέρος της ποσότητας εξατμίζεται με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μεθάνιο. Επίσης κατά την επαναεριοποίηση του, όταν το υγρό γίνεται αέριο, υπάρχει κίνδυνος διαρροής και έτσι το μεθάνιο που είναι κύριος παράγοντας του φαινομένου του θερμοκηπίου δημιουργεί περισσότερα προβλήματα από ότι θα προκαλούσε αν καιγόταν σε κάποια διεργασία[30]. Κατά την αποθήκευση του LNG σε δεξαμενές ακόμη μπορεί να υπάρχει διαρροή του μεθανίου όταν το υγρό εξατμίζεται εξαιτίας κακού εξαιρισμού, κακής κατασκευής ή υπερπίεσης [38]. Ήδη έχουν εντοπιστεί σε χώρες που παράγουν ΦΑ, πως το μεθάνιο που απελευθερώνεται από τις διεργασίες αυτές είναι επικίνδυνο για το τοπικό περιβάλλον όπως

στην Νορβηγία [39]. Επίσης, όταν το αέριο μεταφέρεται μέσω αγωγών υπάρχει και εκεί ο κίνδυνος διαρροής λόγω κακής κατασκευής, διάβρωσης, αστοχίας υλικών, κακής χρήσης ή καταστροφής του γύρω περιβάλλον [19].

Κεφάλαιο 4. Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο LNG

Μετά την επεξεργασία του ΦΑ, όταν έχουν απομακρυνθεί όλα τα περιττά συστατικά του, το ΦΑ αρχίζει να ψύχεται έτσι ώστε να διαχωριστούν οι βαρύτεροι υδρογονάνθρακες και από αυτούς να παραχθούν προϊόντα πετρελαίου και τέλος να υγροποιηθεί στους $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ και να χρησιμοποιηθεί ή να μεταφερθεί ή να επαναεριοποιηθεί μετέπειτα [30]. Αποτελούμενο από σχεδόν 95% μεθάνιο και αιθάνιο, το υπόλοιπο ποσοστό της σύνθεσης του αποτελείται από άλλους υδρογονάνθρακες και άζωτο, το οποίο μειώνεται όταν πρόκειται να αποθηκευτεί σε λιγότερο από 1% και ακόμη, η πυκνότητά του είναι σχεδόν η μισή του νερού [38]. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.2, η ποσότητα του αζώτου στο LNG είναι μικρότερη από όταν είναι στην αέρια μορφή όπως είχε καταγραφεί παραπάνω στον Πίνακα 3.4 και στον Πίνακα 3.5. Το LNG αποτελούσε από το 2008 ήδη σημαντικό παράγοντα για την αγορά του ΦΑ, ποσοστό το οποίο με το πέρασμα των χρόνων αυξάνεται καθώς οι τεχνολογίες εξόρυξης και μεταφοράς εξελίσσονται και η ζήτησή του από όλο και περισσότερα κράτη αυξάνεται. Το LNG υπόσχεται μείωση ρύπων, κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη στον κόσμο, με αυτά προϋποθέτουν και μεγάλα έργα κατασκευής δικτύων παροχής ΦΑ μέσα από αγωγούς και τερματικούς σταθμούς αποθήκευσης και μεταφοράς. Τέτοια έργα ήδη αυξάνονται παράλληλα με τη μεγάλη ζήτηση που έχουν και αναμένεται να παραδοθούν τα επόμενα χρόνια. Ωστόσο, παρόλο τα θετικά που προσφέρει μια εξέλιξη της χρήσης του, είναι απαραίτητο να ξεπεραστούν γεωπολιτικά προβλήματα που προκύπτουν, όπως ο σταθερός εφοδιασμός LNG λόγω μεγάλων αποστάσεων και οι ανταγωνιστικές τιμές έναντι άλλων καυσίμων για να υπάρξει κέρδος στις αγορές. Το εγχείρημα αυτό, έχει αντιμετωπιστεί με θετικές αντιδράσεις, καθώς η βιομηχανία διαθέτει την τεχνολογία για την εξόρυξη, μεταφορά, αποθήκευση και την παραγωγή ΦΑ, όπως επίσης και η κοινωνία είναι έτοιμη να επενδύσει στο καύσιμο αυτό ενώ υπάρχουν και κεφάλαια που μπορούν να το στηρίξουν [31]. Ήδη υπάρχει, κάθε χρόνο, αύξηση στην αξιοποίηση του ΦΑ χάρις την τεχνολογία υγροποίησής του, όπως, για παράδειγμα, το 2007 που η χρήση του αυξήθηκε κατά 2,5% λόγω της αύξησης παραγωγής του LNG κατά 7%. Ακόμη, εκτιμάται πως η χρήση του LNG θα αυξηθεί τα επόμενα χρόνια κατά 1,3% κάθε χρόνο με $3,2\text{ Tm}^3$ το 2010 να φτάνει στους $5,2\text{ Tm}^3$ το 2040 την ίδια ώρα που η Ευρώπη έχει αύξηση της χρήσης του από το 2010 έως το 2018 [40]. Με έρευνα του 2007 αναμενόταν κιόλας, από το 2005 έως το 2020 η κατανάλωση ΦΑ κάθε χρόνο να αυξάνεται κατά 6,7% λόγω της υγροποίησης του [23].

Το LNG χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα την περιεκτικότητά του σε συστατικά σε βαρύ(heavy), μέσο(medium) και ελαφρύ(light) LNG. Παρατίθενται παρακάτω ο Πίνακας 4.1 των κατηγοριών:

Πίνακας 4.1 Κατηγορίες LNG [41]

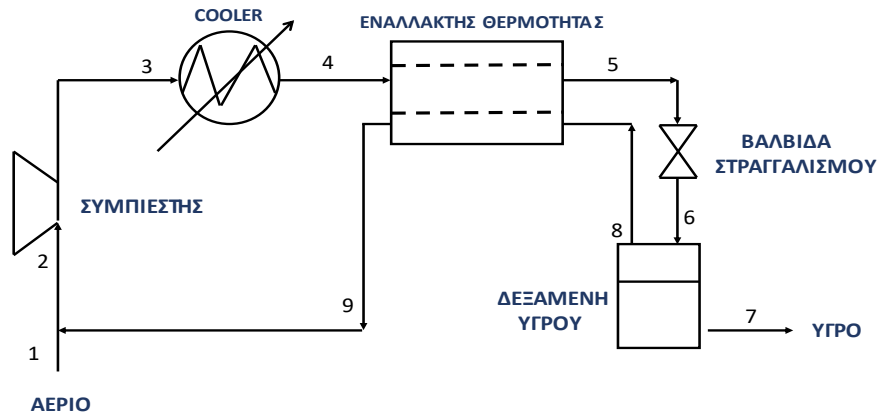
% Μοριακή σύσταση	Ελαφρύ LNG	Μέσο LNG	Βαρύ LNG
Μεθάνιο	98,6	92,3	85,87
Αιθάνιο	1,18	5	8,4
Προπάνιο	0,1	1,5	3
Βουτάνιο	0,02	0,6	1,2
Πεντάνιο	-	0,1	0,23
Άζωτο	0,1	0,5	1,3
Πυκνότητα(kg/m ³)- (-162°C/ /1,3bar)	427,58	451,58	474,87
Κατώτερη θερμική αξία (kJ/kg)	49,935	49,557	48,984

Πίνακας 4.2 Χημική σύσταση LNG ανά χώρα [30]

Τερματικοί Σταθμοί	Μεθάνιο	Αιθάνιο	Προπάνιο	Βουτάνιο	Άζωτο
Abu Dhabi	87,07%	11,41%	1,27%	0,14%	0,11%
Alaska	99,80%	0,10%	N.A.	N.A.	N.A.
Algeria	91,40%	7,87%	0,44%	0,00%	0,28%
Australia	84,82%	8,30%	2,98%	0,88%	0,00%
Brunei	89,40%	6,30%	2,80%	1,30%	0,00%
Indonesia	90,60%	6,00%	2,48%	0,82%	0,09%
Malaysia	91,15%	4,28%	2,87%	1,36%	0,32%
Oman	87,66%	9,71%	2,04%	0,69%	0,00%
Qatar	89,87%	6,65%	2,30%	0,98%	0,19%
Trinidad	92,26%	6,39%	0,91%	0,43%	0,00%
Nigeria	91,60%	4,60%	2,40%	1,30%	0,10%

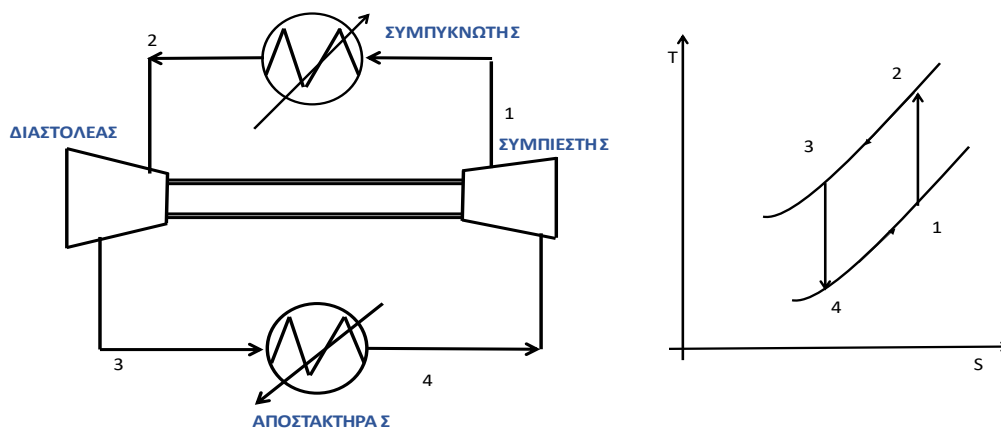
4.1 Τεχνολογία υγροποίησης-θερμodynamικοί κύκλοι

Γενικότερα, η διαδικασία της υγροποίησης αποτελείται από ένα περίπλοκο σύστημα ψύξης· γίνεται, είτε με συμπίεση, είτε με απορρόφηση. Με την διαδικασία της συμπίεσης, που είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος, εκτελείται ο παρακάτω κύκλος διεργασιών, Εικόνα 4.1:



Εικόνα 4.1 Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας υγροποίησης (μέθοδος Linda) [34]

Το αέριο εισέρχεται σε έναν πολυβάθμιο συμπιεστή, το οποίο στη συνέχεια προψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ώστε να μπορεί έπειτα να ψυχτεί περισσότερο στον εναλλάκτη θερμότητας που βρίσκεται αμέσως μετά. Όταν συμπιεσμένο και φτάνοντας στον εναλλάκτη με υψηλή πίεση, ψύχεται από ροή αέρα και στραγγαλίζεται μέσω μιας βαλβίδας. Η ροή στην έξοδο της βαλβίδας είναι σε ισορροπία φάσεων υγρού-ατμού. Ακολουθεί ένας διαχωριστής όπου στον πυθμένα του σχηματίζεται υγροποιημένο προϊόν ενώ το υπόλοιπο αέριο, μη συμπυκνωμένο, ρέει προς τον εναλλάκτη όπου ψύχει το αέριο υψηλής πίεσης το οποίο κατευθύνεται στην στραγγαλιστική βαλβίδα. Μετά τον εναλλάκτη, το αέριο αναμιγνύεται με το αέριο που εισέρχεται στον συμπιεστή. Επίσης, ο αντίστροφος κύκλος Brayton, Εικόνα 4.2, χρησιμοποιείται για την κρυογονική υγροποίηση του ΦΑ [34]. Να σημειωθεί πως το LNG είναι ένα κρυογενές ρευστό το οποίο κατά την ατμοποίηση είναι εύφλεκτο και συντρέχει έτσι κίνδυνος για την υγεία και την ασφάλεια της διαδικασίας [42].

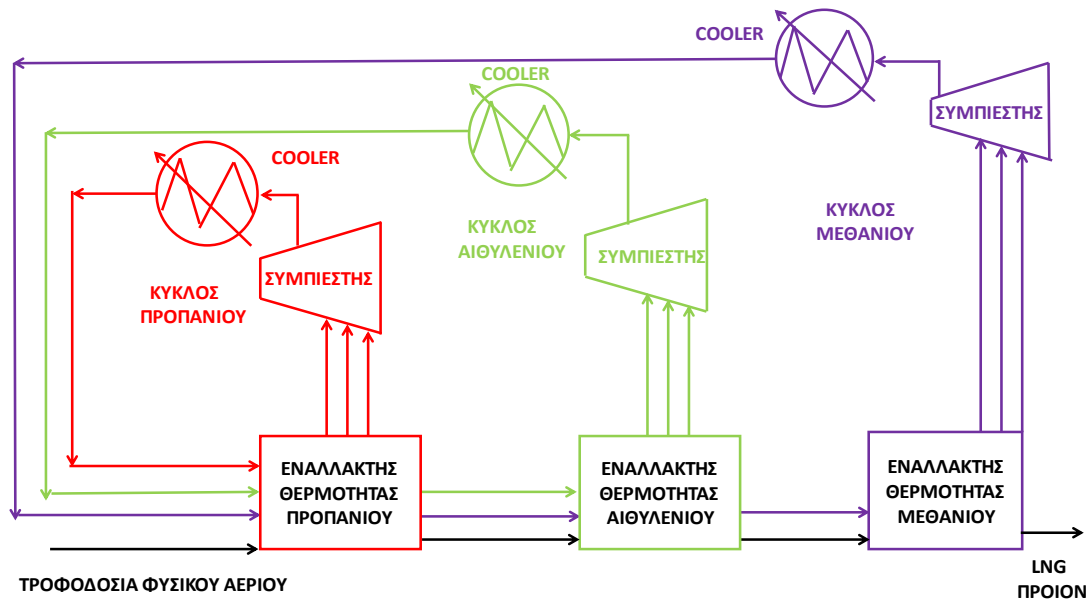


Εικόνα 4.2 Αντίστροφος κύκλος Brayton [34]

Ειδικότερα, κατά υγροποίηση του ΦΑ στις εγκαταστάσεις LNG οι διεργασίες που εκτελούνται για την υγροποίηση είναι τριών κατηγοριών, όπως περιγράφονται παρακάτω [34].

4.1.1 Αλληλουχία αερίου υγρού

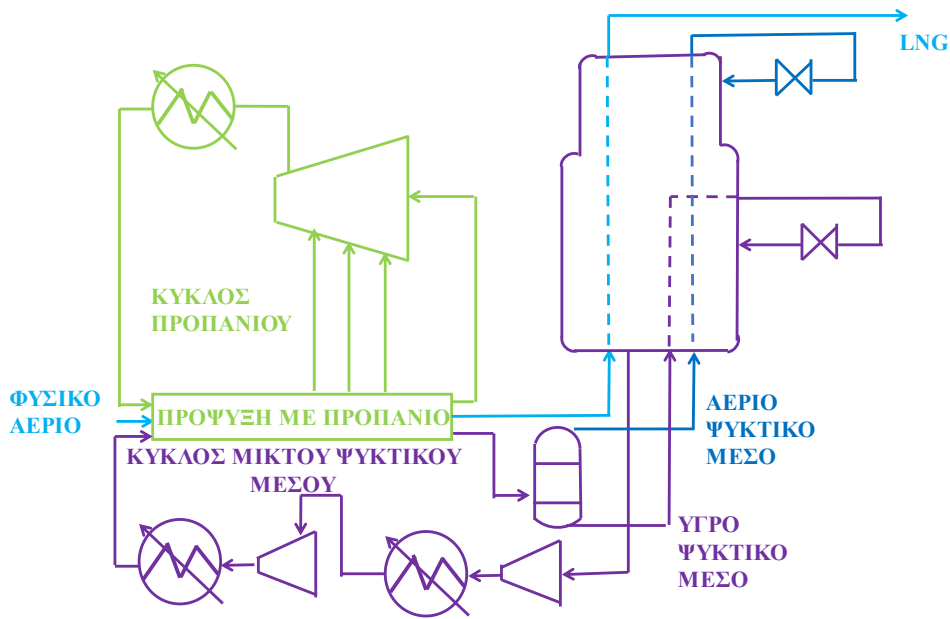
Η διεργασία αλληλουχίας αερίου-υγρού ήταν η πρώτη που εφαρμόστηκε σε εγκαταστάσεις LNG. Σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο, η υγροποίηση γίνεται σε τρία στάδια ψύξης δηλαδή σε τρεις διαφορετικούς κύκλους ψύξης του ψυκτικού μέσου και με τρία διαφορετικά ψυκτικά μέσα, όπως αναπαρίσταται στην Εικόνα 4.3. Ο κάθε κύκλος λειτουργεί σε διαφορετικές θερμοκρασίες με συμπίεση πολλών σταδίων. Αρχικά, ο πρώτος κύκλος που έχει ως ψυκτικό μέσο το προπάνιο σε υψηλή πίεση, συμπυκνώνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα ή το νερό ψύξης κατά την συμπίεση πολλών σταδίων. Στον κύκλο του προπανίου χρησιμοποιείται και ένας εναλλάκτης θερμότητας τύπου βραστήρα για να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία. Με τον κύκλο αυτόν το ΦΑ καταφέρνει να ψύχεται σε θερμοκρασία $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στον επόμενο κύκλο χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο το αιθυλένιο το οποίο με την σειρά του ψύχει το ΦΑ στους $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ, στον τελευταίο κύκλο χρησιμοποιείται ως ψυκτικό μέσο το μεθάνιο το οποίο ψύχει τελικά το ΦΑ στους $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στους δύο τελευταίους κύκλους χρησιμοποιείται και ένας εναλλάκτης θερμότητας με περιέλιξη για την επιθυμητή θερμοκρασία των ψυκτικών μέσων. Επίσης, κατά την διεργασία αυτή χρησιμοποιούνται σε όλους τους κύκλους χρησιμοποιούνται αμοστρόβιλοι που βοηθούν στην κίνηση των συμπιεστών και οι συμπυκνωτές χρησιμοποιούν ως ψυκτικό διαλύματα με βάση το νερό.



Εικόνα 4.3 Διεργασία αλληλουχίας αερίου-υγρού [34].

4.1.2 Διαδικασία πρόψυξης μικτού ψυκτικού μέσου με προπάνιο

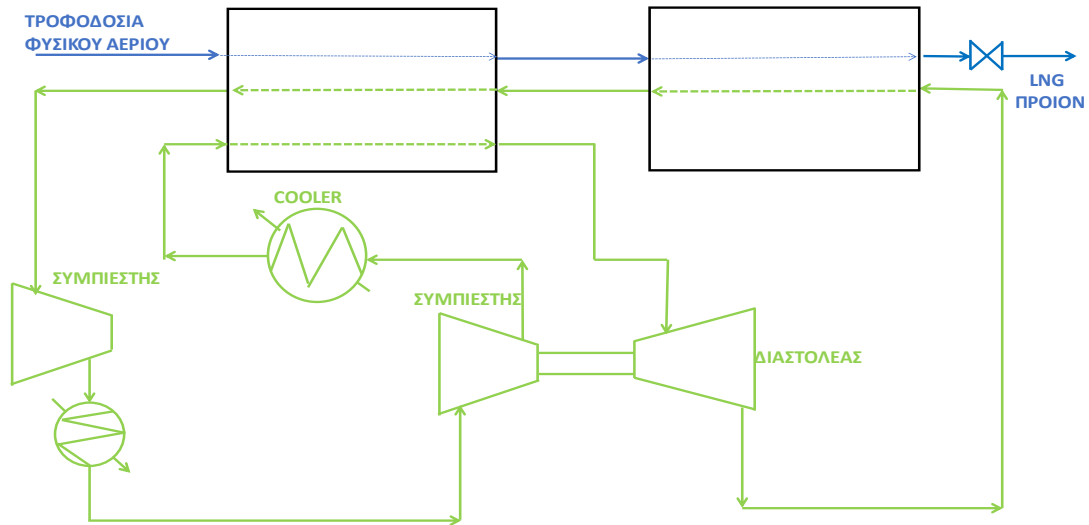
Σύμφωνα με την διαδικασία αυτή, χρησιμοποιείται μικό ψυκτικό μέσο για μία μοναδική κρυογενική διαδικασία, στην οποία η υγροποίηση και η υπόψυξη από τους -35°C , φέρνουν το φυσικό αέριο στους -162°C . οι -35°C προκύπτουν από την πρόψυξη του αερίου με προπάνιο, το οποίο ψύχεται σε δικό του κύκλο. Το μικό ψυκτικό το οποίο και αυτό προψύχεται, διαχωρίζεται σε υγρό και αέριο. Το υγρό μέρος συμμετέχει και αυτό στην κρυογενική ψύξη αλλά παίζει ρόλο στον κύκλο ψύξης του μικτού ψυκτικού. Το αέριο μέρος του μικτού ψυκτικού είναι αυτό που το ψύχει στους -162°C . Εικόνα 4.4. το μικό ψυκτικό μπορεί να αποτελείται από μείγμα αζώτου και υδρογονανθράκων(προπάνιο, αιθάνιο, κλπ.)Αυτή η διαδικασία είναι η πιο διαδεδομένη [32].



Εικόνα 4.4 Διαδικασία πρόψυξης μικτού ψυκτικού μέσου με προπάνιο [34]

4.1.3 Διαστολή αζώτου

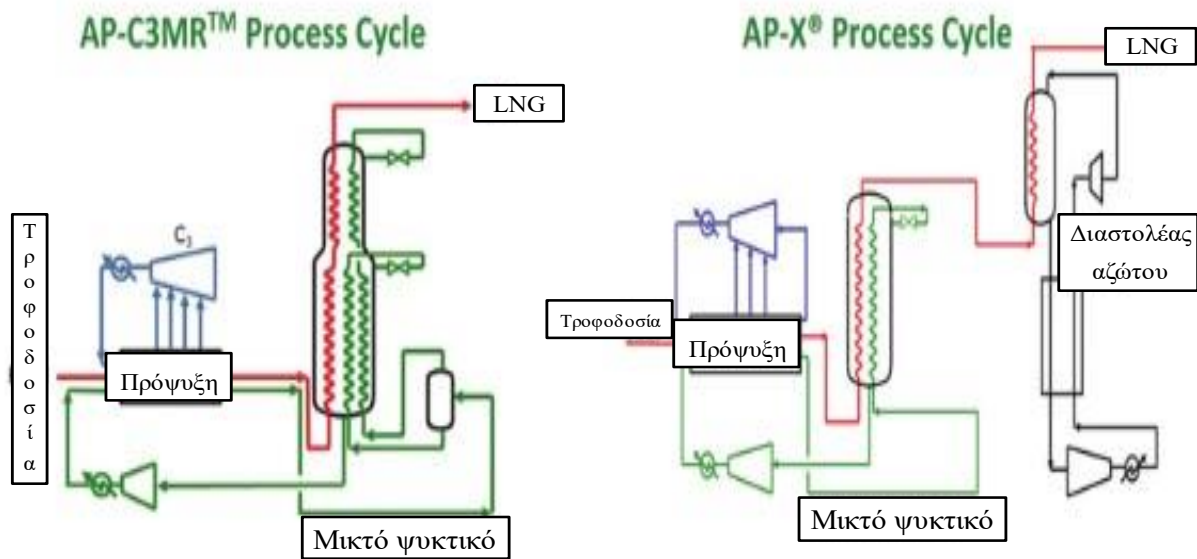
Αυτή η διαδικασία βασίζεται στον αντίστροφο κύκλο του Brayton και Claude και χρησιμοποιείται κυρίως σε υπεράκτιες και μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις. Η διαστολή αζώτου χρησιμοποιείται γενικότερα στην κρυογονική υγροποίηση στην βιομηχανία. Έτσι και εδώ. Το άζωτο περνάει από τον συμπιεστή και με υψηλή πίεση ψύχεται στους εναλλάκτες και οδηγείται στην συνέχεια προς τον διαστολέα από όπου πέφτει η πίεση του και έπειτα ψύχει το ΦΑ και το άζωτο στον εναλλάκτη θερμότητας. Ο διαστολέας, παράλληλα, παράγει έργο βοηθάει στη λειτουργία ενός ακόμη συμπιεστή πριν από αυτόν. Αυτή η λειτουργία είναι κατάλληλη για εργοστάσια μικρή κλίμακας μιας και είναι μια διαδικασία που περνάει από ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και περιγράφεται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 4.5):



Εικόνα 4.5 Διεργασία διαστολής αζώτου [34]

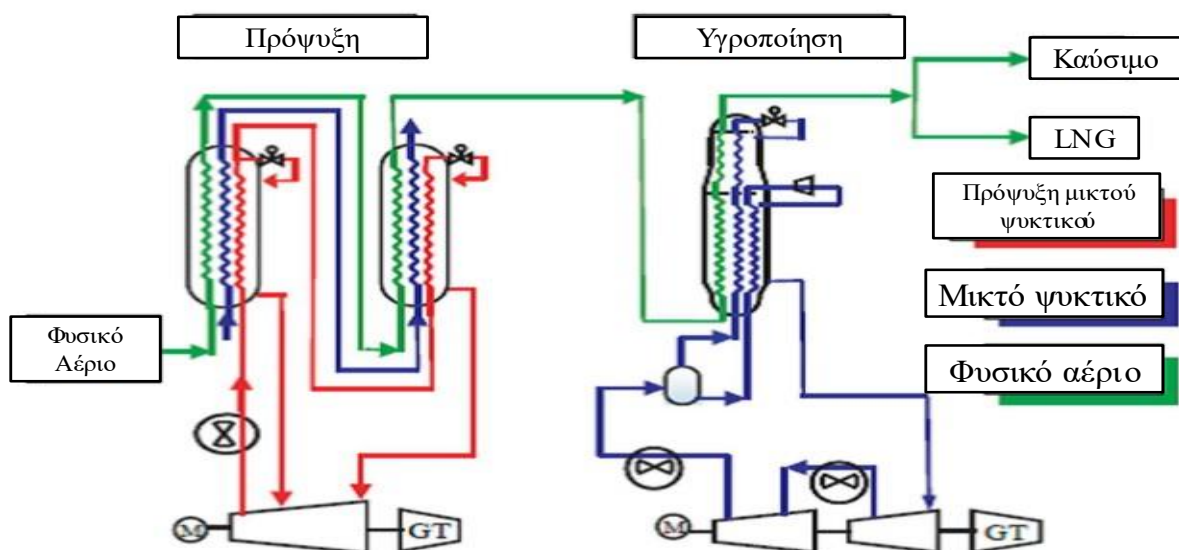
4.2 Τεχνολογία AP-C3MR

Η πιο δημοφιλής μέθοδος υγροποίησης, σύμφωνα με τους πίνακες είναι η AP-C3MR (Air Product- propane pre cooled mixed refrigerant) και οι παραλλαγές της, όπως η AP-X. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το προπάνιο χρησιμοποιείται για την πρόψυξη του ΦΑ και στην συνέχεια χρησιμοποιείται μικτό ψυκτικό, το οποίο παρέχει ψύξη για την υγροποίηση και την υπόψυξή του. Ταυτόχρονα το προπάνιο προψύχει και το μικτό ψυκτικό. Τα δύο αυτά ψυκτικά μέσα, χρησιμοποιούνται σε δυο διαφορετικούς κύκλους [43], [44], [45]. Μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής, είναι πως δύναται να προσφέρει έως και 50% εξεργειακή απόδοση [45]. Κατά αυτόν τον τρόπο λειτουργεί και η παραλλαγή AP-X. Σε αυτή την περίπτωση, τα τρία στάδια της υγροποίησης του ΦΑ (πρόψυξη, υγροποίηση, υπόψυξη), αποτελούνται από τρεις διαφορετικούς κύκλους ψύξης. Τα δυο πρώτα είναι ίδια και στις δυο διαδικασίες. Αυτό που αλλάζει είναι ότι ενσωματώνεται ένα κύκλος διαστολής αζώτου Brayton για την υπόψυξη του ρευστού.



Εικόνα 4.6 Τεχνολογίες AP-C3MR και AP-X [43], [44]

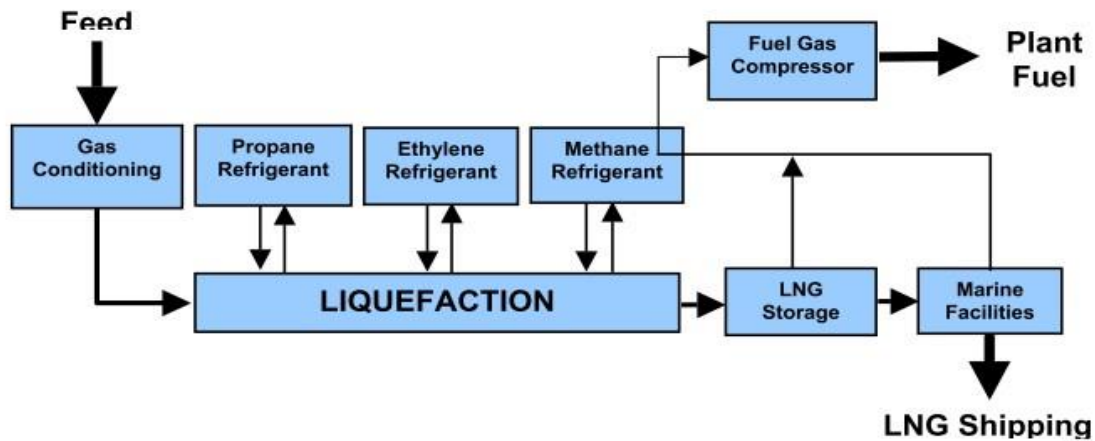
Υπάρχουν και άλλα ήδη παραλλαγών, εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούν στις περιοχές των εγκαταστάσεων, όπως, για παράδειγμα, η χαμηλή ή υψηλή θερμοκρασία. Ενδεικτικά, μία, επίσης παραλλαγή είναι η AP-C3MR™ που επιτρέπει την μετακίνηση του μικτού ψυκτικού για βελτιστοποίηση της διαδικασίας [43], [44], [45]. Ακόμη, μια εναλλακτική τεχνολογία της C3MR είναι η DMR (dual mixed refrigerant), κατά την οποία για την πρόψυξη και την υπόψυξη χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά μικτά ψυκτικά. Αυτό, προσφέρει την δυνατότητα στην επιλογή θερμοκρασίας πρόψυξης και κατ' επέκταση την επιλογή αριθμού συμπιεστών [45].



Εικόνα 4.7 Σχηματική αναπαράσταση τεχνολογίας DMR [45]

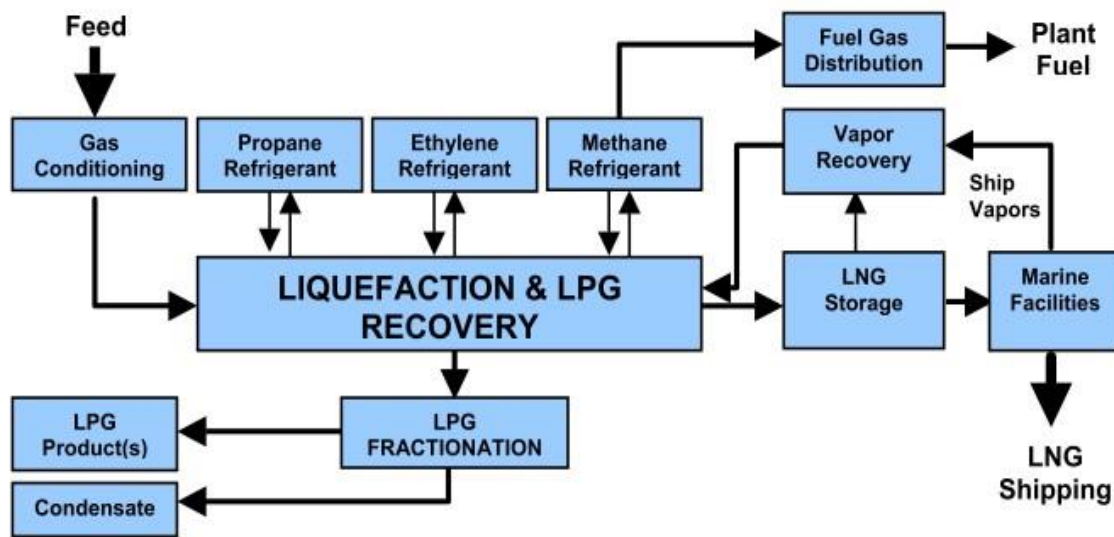
4.3 Τεχνολογία Phillips Optimized Cascade

Μία εξίσου διαδεδομένη μέθοδος υγροποίησης, που συναντάται σε πολλές εγκαταστάσεις, είναι η Phillips Optimized Cascade. Χαρακτηρίζεται από την αξιοπιστία και την ευελιξία της. Η ψύξη του ΦΑ γίνεται σε διαδοχικά στάδια. Πρώτα ψύχεται με προπάνιο, έπειτα με αιθυλένιο και τέλος με μεθάνιο. Στην μέθοδο αυτή, ο άερας ή το νερό χρησιμοποιούνται για την συμπύκνωση του προπανίου, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την συμπύκνωση του αιθυλενίου και το τελευταίο για την συμπύκνωση του μεθανίου. Η αρχική τεχνολογία φαίνεται στην Εικόνα 4.8:



Εικόνα 4.8 Αρχική τεχνολογία Phillips Optimized Cascade LNG Process [46].

Η μέθοδος αυτή με τα χρόνια εξελίχθηκε. Έγιναν βελτιστοποιήσεις σε πολλά τμήματα, με γνώμονα πάντα την αξιοπιστία. Ειδικότερα, οι αλλαγές που έγιναν ήταν πάνω στα φορτία ψύξης, για την διατήρηση των ψυκτικών φορτίων. Έτσι, μπορεί να προσαρμόζεται στις αλλαγές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος. Πρόσθεση σταδίου ανάκτησης υγραερίου και συμπυκνωμάτων, κυρίως μεθανίου και αιθανίου. Βελτιωμένα υδραυλικά δίκτυα και διάταξης της εγκατάστασης και τέλος, βελτίωση στην θερμική απόδοση του συστήματος. Αυτή η βελτιωμένη διαδικασία προσφέρει μεγαλύτερη θερμική απόδοση, μεγαλύτερη ευελιξία, ενώ μειώνει και το κόστος κεφαλαίου, Εικόνα 4.9. Φυσικά, υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της τεχνολογίας αυτής, ανάλογα τι χρειάζεται και τι μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε εγκατάσταση. Για παράδειγμα, κάποια εγκατάσταση μπορεί να μην διαθέτει στάδιο ανάκτησης υγραερίου [46]. Αντίστοιχη είναι και η τεχνολογία Linde MFC με την διαφορά ότι αυτή χρησιμοποιεί μικτό ρευστό για ψύξη.



Εικόνα 4.9 Σημερινή τεχνολογία Phillips Optimized Cascade LNG Process [46]

4.4 Χρήση τεχνολογιών υγροποίησης στον κόσμο

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την υγροποίηση του ΦΑ στις εγκαταστάσεις υγροποίησης. Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, στις τεχνολογίες υγροποίησης, κάθε εγκατάσταση μπορεί να χρησιμοποιεί όποια τεχνολογία την ικανοποιεί. Αυτές οι τεχνολογίες δέχονται κάποιες παραλλαγές και βελτιστοποιήσεις και αποκτούν ονομασίες που προέρχονται από την διαδικασία που χρησιμοποιούν. Ο παρακάτω πίνακας, Πίνακας 4.3, δείχνει τι τεχνολογία χρησιμοποιείται σε κάθε εγκατάσταση στον κόσμο, μέχρι τις αρχές του 2021:

Πίνακας 4.3 Τεχνολογίες Υγροποίησης ανά έτος έναρξης λειτουργίας [47]

Χρονιά έναρξης λειτουργίας	Χώρα	Χωρητικότητα (ΜΤΡΑ)	Τεχνολογία Υγροποίησης
1970	Λιβύη	3,2	AP-SMR
1972	Μπρουνέι	2,88	AP-C3MR
1973	Μπρουνέι	2,88	AP-C3MR
1974	Μπρουνέι	1,44	AP-C3MR
1977	Η.Α.Ε.	2,6	AP-C3MR
1978	Αλγερία	7,9	AP-C3MR
1981	Αλγερία	8,4	AP-C3MR
1983	Ινδονησία	5,6	AP-C3MR
1983	Μαλαισία	8,4	AP-C3MR

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

1989	Ινδονησία	2,8	AP-C3MR
1989	Αυστραλία	5	AP-C3MR
1992	Αυστραλία	2,5	AP-C3MR
1993	Ινδονησία	2,8	AP-C3MR
1994	Η.Α.Ε.	3,2	AP-C3MR
1995	Μαλαισία	6,4	AP-C3MR
1995	Μαλαισία	3,2	AP-C3MR
1996	Κατάρ	3,2	AP-C3MR
1997	Ινδονησία	2,8	AP-C3MR
1997	Κατάρ	3,2	AP-C3MR
1998	Κατάρ	3,2	AP-C3MR
1999	Ινδονησία	2,95	AP-C3MR
1999	Κατάρ	3,3	AP-C3MR
1999	Τρινιδάδ και Τομπάγκο	3	ConocoPhillips Optimized Cascade
1999	Νιγηρία	6,6	AP-C3MR
2000	Κατάρ	3,3	AP-C3MR
2000	Ομάν	7,1	AP-C3MR
2002	Τρινιδάδ και Τομπάγκο	3,3	ConocoPhillips Optimized Cascade
2002	Νιγηρία	3,3	AP-C3MR
2003	Μαλαισία	7,7	AP-C3MR
2003	Τρινιδάδ και Τομπάγκο	3,3	ConocoPhillips Optimized Cascade
2004	Αυστραλία	4,6	AP-C3MR
2004	Κατάρ	4,7	AP-C3MR/SplitMR
2005	Κατάρ	4,7	AP-C3MR/SplitMR
2005	Τρινιδάδ και Τομπάγκο	5,2	ConocoPhillips Optimized Cascade
2005	Νιγηρία	4,1	AP-C3MR
2005	Αίγυπτος	5	AP-C3MR/SplitMR
2005	Αίγυπτος	7,2	ConocoPhillips Optimized Cascade
2006	Νιγηρία	4,1	AP-C3MR
2006	Ομάν	3,3	AP-C3MR

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

2005	Αίγυπτος	7,2	ConocoPhillips Optimized Cascade
2006	Νιγηρία	4,1	AP-C3MR
2006	Ομάν	3,3	AP-C3MR
2006	Αυστραλία	3,7	ConocoPhillips Optimized Cascade
2007	Κατάρ	4,7	AP-C3MR/SplitMR
2007	Νιγηρία	4,1	AP-C3MR
2007	Ισημερινή Γουινέα	3,7	ConocoPhillips Optimized Cascade
2007	Νορβηγία	4,2	Linde MFC
2008	Αυστραλία	4,6	AP-C3MR
2009	Κατάρ	15,6	AP-X
2009	Κατάρ	15,6	AP-X
2009	Ρωσία	9,6	Shell-DMR
2009	Ινδονησία	3,8	AP-C3MR/SplitMR
2009	Υεμένη	6,7	AP-C3MR/SplitMR
2010	Κατάρ	7,8	AP-X
2010	Ινδονησία	3,8	AP-C3MR/SplitMR
2010	Περού	4,45	AP-C3MR/SplitMR
2011	Κατάρ	7,8	AP-X
2012	Αυστραλία	4,9	Shell Propane Precooled Mixed
2013	Αλγερία	4,5	AP-C3MR/SplitMR
2013	Ανγκόλα	5,2	ConocoPhillips Optimized Cascade
2014	Αλγερία	4,7	AP-C3MR/SplitMR
2014	Παπούα Νέα Γουινέα	6,9	AP-C3MR
2015	Ινδονησία	2	AP-C3MR
2015	Αυστραλία	3,9	ConocoPhillips Optimized Cascade
2015	Αυστραλία	8,5	ConocoPhillips Optimized Cascade
2016	Αυστραλία	3,9	ConocoPhillips Optimized Cascade

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

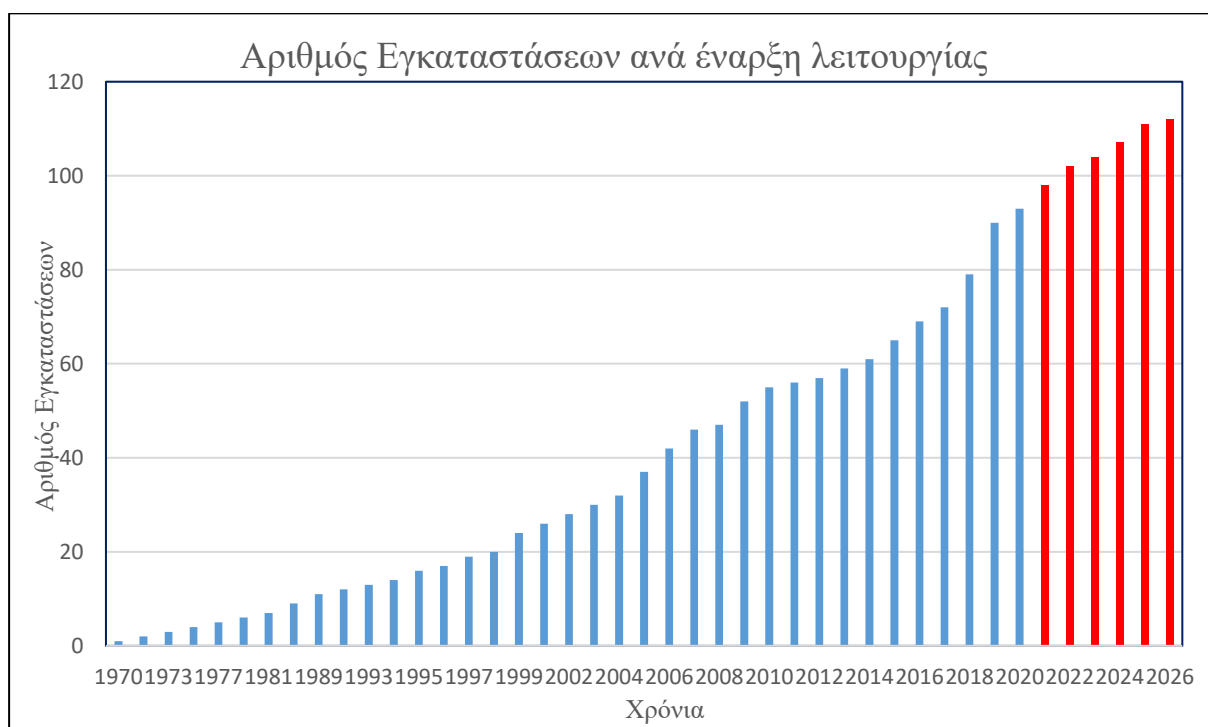
2016	Αυστραλία	9	ConocoPhillips Optimized Cascade
2016	Αυστραλία	10,4	AP-C3MR/SplitMR
2016	Ηνωμένες Πολιτείες	10	ConocoPhillips Optimized Cascade
2017	Μαλαισία	1,2	AP-N
2017	Αυστραλία	4,45	ConocoPhillips Optimized Cascade
2017	Ρωσία	5,5	AP-C3MR
2018	Αυστραλία	4,45	ConocoPhillips Optimized Cascade
2018	Ρωσία	5,5	AP-C3MR
2018	Καμερούν	2,4	Black and Veatch PRICO
2018	Ηνωμένες Πολιτείες	5,25	AP-C3MR
2018	Ρωσία	5,5	AP-C3MR
2018	Καμερούν	2,4	Black and Veatch PRICO
2018	Ηνωμένες Πολιτείες	5,25	AP-C3MR
2019	Ηνωμένες Πολιτείες	5	ConocoPhillips Optimized Cascade
2019	Ρωσία	5,5	AP-C3MR
2019	Αυστραλία	8,9	AP-C3MR/SplitMR
2019	Αργεντινή	0,5	Black and Veatch PRICO
2019	Ηνωμένες Πολιτείες	4,5	ConocoPhillips Optimized Cascade
2019	Ηνωμένες Πολιτείες	4	AP-C3MR/SplitMR
2019	Ηνωμένες Πολιτείες	4,5	ConocoPhillips Optimized Cascade
2019	Ηνωμένες Πολιτείες	5,1	AP-C3MR
2019	Αυστραλία	3,6	Shell DMR
2019	Ρωσία	0,65	Air Liquid Smartin
2019	Ηνωμένες Πολιτείες	0,75	Shell MMLS
2020	Ηνωμένες Πολιτείες	10,2	AP-C3MR
2020	Ηνωμένες Πολιτείες	8	AP-C3MR/SplitMR
2020	Ηνωμένες Πολιτείες	1,75	Shell MMLS

Πίνακας 4.4 Τεχνολογίες Υγροποίησης μελλοντικών εγκαταστάσεων [47]

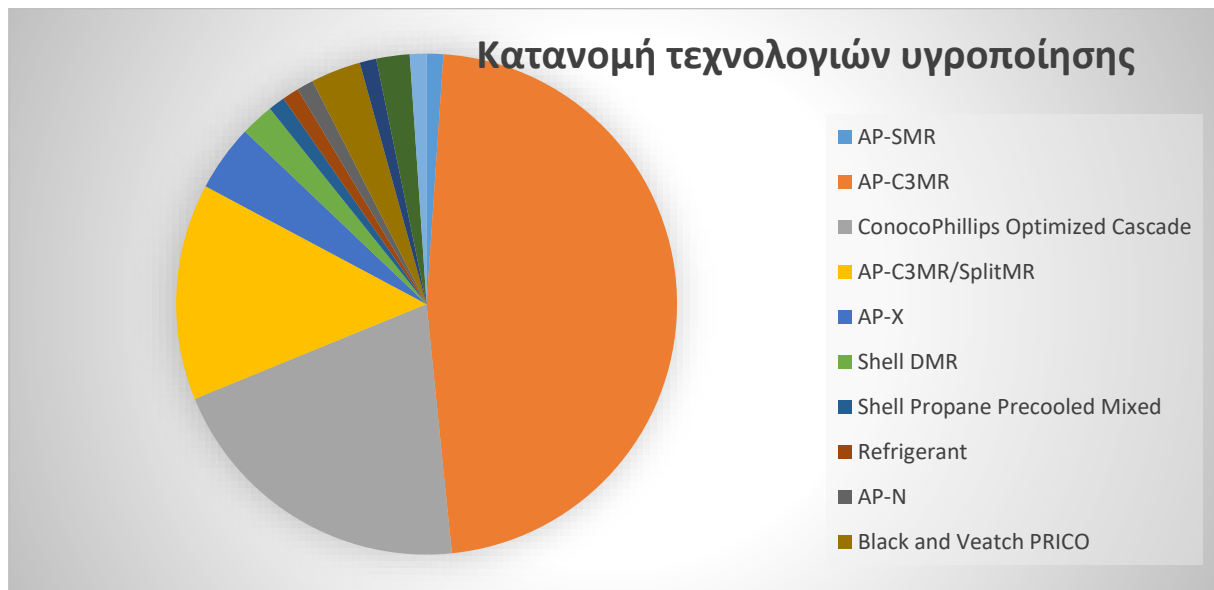
Χρονιά έναρξης λειτουργίας	Χώρα	Χωρητικότητα (ΜΤΡΑ)	Τεχνολογία Υγροποίησης
2021	Ινδονησία	0,5	Chart Industries IPSMR
2021	Μαλαισία	1,5	AP-N
2021	Ρωσία	1,5	Linde LIMUM
2021	Ρωσία	0,9	Novatek Arctic Cascade
2021	Ηνωμένες Πολιτείες	4,5	ConocoPhillips Optimized Cascade
2022	Ινδονησία	3,8	AP-C3MR/SplitMR
2022	Μοζαμβίκη	3,4	AP-DMR
2022	Ρωσία	6,6	Linde MFC
2022	Ηνωμένες Πολιτείες	10	BHGE SMR
2023	Μαυριτανία	2,5	Black and Veatch PRICO
2023	Ηνωμένες Πολιτείες	5	ConocoPhillips Optimized Cascade
2024	Ρωσία	6,6	Linde MFC
2024	Μεξικό	3,25	AP-C3MR
2024	Νιγηρία	8	AP-C3MR
2024	Ηνωμένες Πολιτείες	10,4	AP-C3MR/SplitMR
2025	Καναδάς	14	Shell DMR
2025	Μοζαμβίκη	12,88	AP-C3MR
2025	Ηνωμένες Πολιτείες	5,2	AP-C3MR/SplitMR
2026	Ρωσία	6,6	Linde MFC
2025	Κατάρ	32	AP-X

Στο παρακάτω Διάγραμμα 4-1 αποτυπώνεται η αύξηση των εγκαταστάσεων υγροποίησης με το πέρασμα των χρόνων. Με γαλάζιο χρώμα, φαίνονται οι μονάδες μέχρι το 2020 και με κόκκινο οι μονάδες που προβλέπονται να λειτουργήσουν έως το 2026. Η πρώτη εγκατάσταση υγροποίησης τοποθετείται το 1970 στην Λιβύη με την τεχνολογία AP-SMR (single mixed refrigerant). Παρατηρείται πως η επόμενη εγκατάσταση υγροποίησης λειτούργησε δύο χρόνια αργότερα, διαφοροποιώντας μάλιστα την τεχνολογία υγροποίησης. Από τότε και για τα επόμενα χρόνια, έως και σήμερα, η τεχνολογία AP-C3MR και οι παραλλαγές της που προαναφέρθηκαν, είναι η πιο συχνά

χρησιμοποιημένη, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4-2. Από το διάγραμμα της εικόνας επίσης, διαπιστώνεται πως την διετία 2018-19 μονάδες υδροποίησης γνώρισαν την μεγαλύτερη αύξησή τους, καθώς προστέθηκαν 18 εγκαταστάσεις στο παγκόσμιο σύνολο. Οι χώρες με τις περισσότερες εγκαταστάσεις υδροποίησης είναι οι Αυστραλία, Η.Π.Α και Κατάρ. Να σημειωθεί πως το Κατάρ, διαθέτει τις μονάδες με την μεγαλύτερη χωρητικότητα, οι οποίες λειτουργούν μικτό ψυκτικό για υδροποίηση. Επίσης, αρκετά διαδεδομένη είναι η τεχνολογία Phillips Optimized Cascade. Αυστραλία και Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιούν αρκετά και τις δύο αυτές τεχνολογίες. Όσο αναφορά την Ευρώπη, στη Νορβηγία είναι η μοναδική μονάδα υδροποίησης, κάτι το οποίο έρχεται σε συνέχεια των αποθεμάτων που υπάρχουν στην Ευρώπη μιας και η Νορβηγία είναι η μοναδική χώρα της που έχει αποδεδειγμένα αποθέματα και παράγει ΦΑ. Παρατηρείται, ακόμη, πως χώρες με αποθέματα ΦΑ, έχουν εγκαταστάσεις υδροποίησης, ασχέτως αν οι ποσότητές που έχουν είναι μεγάλες, όπως για παράδειγμα η Αλγερία, ο Καναδάς και το Ιράν.



Διάγραμμα 4-1 Λειτουργικές μονάδες Υδροποίησης κάθε χρόνο



Διάγραμμα 4-2 Κατανομή τεχνολογιών στο σύνολο των λειτουργικών εγκαταστάσεων

4.5 Χρήσεις LNG

Τα τελευταία χρόνια η αξιοποίηση του LNG ως καύσιμο στα μέσα μεταφοράς έχει συγκεντρώσει την προσοχή της παγκόσμιας κοινότητας. Είναι ένα εναλλακτικό καύσιμο καθαρής καύσης φιλικό προς το περιβάλλον για βαρέα οχήματα, λεωφορεία και οχήματα δημόσιας ωφέλειας (π.χ. συλλογής απορριμμάτων). Αντίθετα στα επιβατικά οχήματα, στο τέλος της περιόδου δεν ενδείκνυται, καθώς τα οχήματα αυτά μένουν περισσότερο στάσιμα, οπότε υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό εξάτμισης του καυσίμου. Όλα τα οχήματα αυτά θα πρέπει να είναι εξοπλισμένα με συγκεκριμένο εξοπλισμό για να μπορούν να αξιοποιήσουν το καύσιμο αυτό, δηλαδή ειδικούς κινητήρες, κάτι το οποίο κάνει την χρήση του ακριβή. Επίσης, ο εφοδιασμός του LNG θα πρέπει να γίνεται από συγκεκριμένα πρατήρια, σε δρόμους όπου θα μπορούν να αποθηκεύουν το ΦΑ σε υγρή μορφή στους $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ μέσα σε κρυογονικές δεξαμενές αποθήκευσης. Μεγάλο πλεονέκτημα του LNG είναι ότι διαθέτει μεγαλύτερη θερμογόνο δύναμη έναντι του υγρού αζώτου. Αυτό μπορεί να προσφέρει υψηλή ψύξη μειώνοντας την συνολική θερμοκρασία εισαγωγής καυσίμου και αυξάνοντας την απόδοση ισχύος. Ο μεγάλος αριθμός οκτανίων του κάνει το LNG, καύσιμο ιδανικό για πλοία και αεροσκάφη κάνοντας την συντήρηση των μηχανών πιο εύκολη. Επιπλέον, προσφέρει μεγάλη θερμική απόδοση, γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάτω από υψηλή συμπίεση ενώ έχει και χαμηλότερη ειδική κατανάλωση. Η τεχνολογία αυτή, έχει σκοπό να μειώσει τις εκπομπές ρύπων, με σκοπό να αναδειχθεί ένα πιο πράσινο καύσιμο από τα ήδη υπάρχοντα. Μάλιστα, πολλές εταιρίες ενέργειας έχουν στραφεί στην αντικατάσταση του άνθρακα από το LNG για αυτόν τον λόγο και παράλληλα θεσπίζονται νόμοι για μείωση των ρύπων που προσφέρει με την σειρά του σε τεχνολογίες χρήσης καθαρότερου καυσίμου. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά θέματα που πρέπει να ξεπεραστούν για την ευρύτερη χρήση του. Παγκόσμιοι κανόνες έχουν πολλά κενά στα διεθνή πρότυπα με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν πολλές δυνατότητες εφαρμογής. Επίσης, υπάρχουν

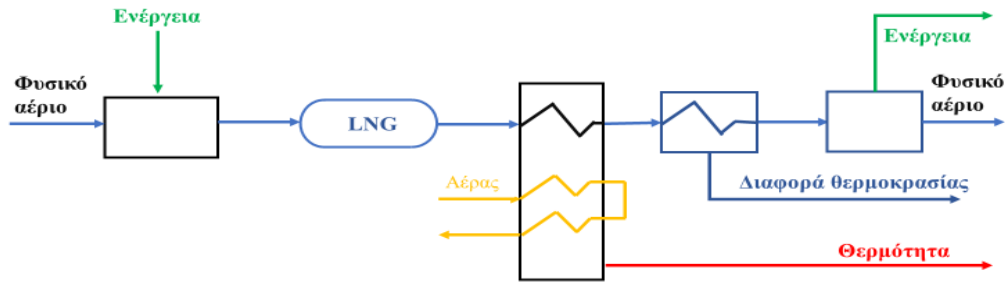
πολλά εθνικά και πολιτικά συμφέροντα που εμποδίζουν την αντικατάσταση των υπάρχων καυσίμων με LNG που παραπέμπουν σε οικονομικές μεταβολές. Ακόμη, παρόλη την κατασκευή ειδικών κινητήρων, δεν υπάρχει πλήρης εξοπλισμός που να μπορεί να ανταπεξέλθει στην ζήτηση. Επομένως, αν και το LNG είναι αποδεκτό καύσιμο, χρειάζεται μεγαλύτερη εφαρμογή κανόνων για την διευκόλυνση των κατασκευών και της χρήσης του. Ενδεικτικά, ακολουθεί ο Πίνακας 4.5 , που δείχνει τον αριθμό αυτοκινήτων ΦΑ στον κόσμο. Παρατηρούμε πως με την σειρά, Πακιστάν, Ιράν, Αργεντινή, Βραζιλία και Ινδία είναι οι χώρες με τα περισσότερα οχήματα, αντιπροσωπεύοντας αθροιστικά, πάνω από το μισό ποσοστό των συνολικών οχημάτων παγκοσμίως, ενώ ακολουθούν Κίνα, Ρωσία και Αμερική. Στην Ευρώπη το ποσοστό είναι πάρα πολύ μικρό. Τα μεγαλύτερα ποσοστά χρήσης τα έχουν η Ιταλία που χρησιμοποιεί από το 1930 κινητήρες με συμπιεσμένο ΦΑ, η Γερμανία και η Ουκρανία και το Ηνωμένο Βασίλειο που τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να κάνει εισαγωγές [23].

Πίνακας 4.5 Κορυφαίες χώρες χρήσης οχημάτων με καύσιμο φυσικό αέριο έως το 2009 [23]

Χώρες	Αριθμός οχημάτων
Πακιστάν	2.700.000
Ιράν	1.950.000
Αργεντινή	1.900.000
Βραζιλία	1.600.000
Ινδία	1.000.000

Αυτό, μπορεί να οφείλεται στο δεν υπάρχουν μέχρι στιγμής τόσες πηγές ΦΑ κάτι που την αναγκάζει να κάνει εισαγωγές είτε σε αέρια είτε σε υγρή μορφή και ταυτόχρονα παρατηρούμε πως στις χώρες που είτε έχουν κοντά είτε έχουν οι ίδιες πηγές εξόρυξης ΦΑ, η χρήση οχημάτων που λειτουργούν με ΦΑ είναι πολύ μεγάλη.

Επίσης, η υγροποίηση του ΦΑ απαιτεί υψηλές ποσότητες ενέργειας, αλλά ένα μέρος της ενέργειας αυτής μπορεί να ανακτηθεί. Υπολογίζεται πως για την υγροποίηση θα χρειαζόταν περίπου το 10% της ενέργειας της ποσότητας του προς κατανάλωση ΦΑ. Ανακτάται, λοιπόν, από την διαφορά θερμοκρασίας που προκύπτει από την θερμοκρασία του LNG και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος κατά την διαδικασία επαναεριοποίησης, όπως αναπαρίσταται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 4.10). Σύμφωνα με μελέτες μπορεί να φτάνει έως 12 GW τον χρόνο [30], ανάκτηση που όμως είναι πολύ λίγη λόγω περιορισμών διότι το μεγαλύτερο μέρος χάνεται κατά την επαναεριοποίηση λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του υγρού και του μέσου με τον οποίο γίνεται θέρμανση του LNG για να αεριοποιηθεί [40].



Εικόνα 4.10 Σχηματική αναπαράσταση υγροποίησης και επαναεριοποίησης φυσικού αερίου [30]

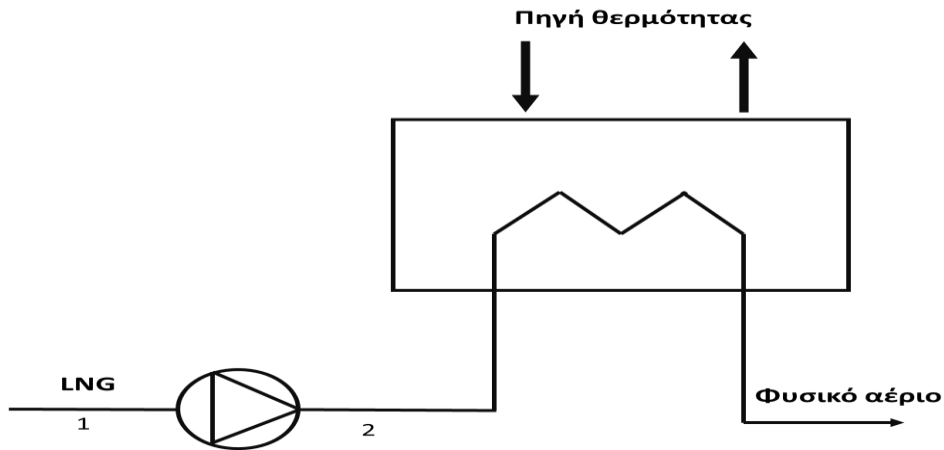
Ακόμη, ένας άλλος τρόπος αξιοποίησης του LNG είναι εξεργειακά. Η κρυογενή θερμοκρασία μπορεί να χρησιμεύσει και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, διαδικασία που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτερα αλλά αποτελεί μια καλή επιλογή στον ενεργειακό τομέα που βέβαια χρειάζεται βελτιώσεις [48]. Μεγάλο μέρος της εξέργειας χάνεται όταν γίνεται προσπάθεια να αξιοποιηθεί, στις αντλίες, στους συμπιεστές και στην ανταλλαγή θερμότητας, με αποτέλεσμα σχεδόν το 1/3 να αξιοποιείται [30]. Ειδικότερα, κατά την διαδικασία αυτή, αξιοποιείται η κρυογενή θερμοκρασία αποθήκευσης του ΦΑ μέσω ενός ψυχρού κύκλου Rankine. Πρόκειται για μια απλή μορφή της διαδικασίας όπου απορροφάται η θερμότητα του περιβάλλοντος με την οποία εξατμίζεται το LNG και απορρίπτεται η θερμοκρασία συμπύκνωσης του ρευστού που συμμετέχει στον κύκλο, ώστε το ρευστό αυτό να προθερμανθεί, να εξατμιστεί και να πραγματοποιηθεί ο κύκλος Rankine. Για να εκτελεστεί ο κύκλος, όμως, χρειάζεται ένα ποσό ηλεκτρικής ενέργειας και εδώ ζητούμενο είναι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται να είναι μεγαλύτερη από αυτή που καταναλώνεται [48].

Κεφάλαιο 5. Επαναεριοποίηση φυσικού αερίου

Πριν γίνει η διανομή του ΦΑ στους καταναλωτές πρέπει να έρθει στην αρχική του μορφή. Μετά την υγροποίηση και την μεταφορά του σε υγρή μορφή, χρειάζεται να επαναεριοποιηθεί. Στο στάδιο αυτό πλέον, συναντάται και ο όρος της εξέργειας που έχει σημαντικό ρόλο στην διαδικασία της επαναεριοποίησης όπως θα δούμε παρακάτω.

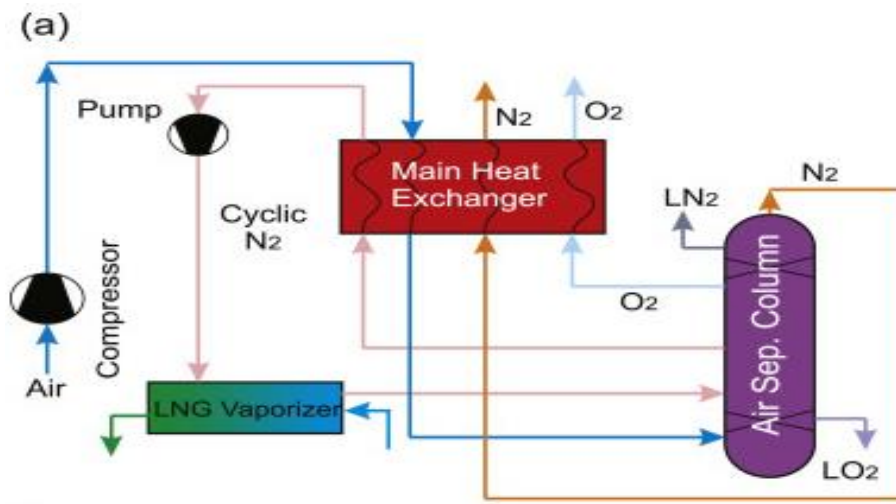
5.1 Διαδικασία επαναεριοποίησης χερσαίων εγκαταστάσεων

Την διαδικασία της επαναεριοποίησης την εκτελούν μονάδες που βρίσκονται στους τερματικούς σταθμούς LNG. Οι ατμοποιητές που χρησιμοποιούνται για το μετατρέψουν σε αέρια μορφή χρησιμοποιούν κυρίως το θαλασσινό νερό, φρέον, προπάνιο ή ατμοσφαιρικό αέρα ως εργαζόμενο μέσο προκειμένου να εξατμίσουν το LNG [30],[38]. Παράλληλα με το εργαζόμενο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επαναεριοποίηση είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί και μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιείται κατά την υγροποίηση. Η ενέργεια αυτή ουσιαστικά σπαταλιέται ενώ θεωρητικά μπορεί να αξιοποιηθεί. Πρακτικά, υπολογίζεται πως ανακτάται σχεδόν 12 GW, ποσό ενέργειας που θεωρείται ότι είναι πολύ μικρό μπροστά σε αυτό που σπαταλιέται [30]. Το LNG όταν αεριοποιείται απελευθερώνει ενέργεια στο περιβάλλον [49]. Το περιβάλλον αυτό βρίσκεται σε θερμοκρασία που προκύπτει από την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ΥΦΑ και του εργαζόμενου μέσου που είναι σε θερμοκρασία σχεδόν περιβάλλοντος. Επίσης, υπάρχει και διαφορά πίεσης ανάμεσα στην πίεση της αντλίας που τροφοδοτεί το υγρό στους ατμοποιητές και στην πίεση με την οποία γίνεται η διανομή του ΦΑ [50]. Η ενέργεια που απελευθερώνεται σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο μετατρέπεται σε διάφορες μορφές. Ένα μέρος της βρίσκεται σε ισορροπία και ένα άλλο σε ανισορροπία. Κατ' επέκταση γίνεται λόγος για εξέργεια [51]. Πιο συγκεκριμένα, η εξέργεια είναι το μέγιστο, θεωρητικά, έργο που μπορεί να ανακτηθεί από ένα σύστημα σε ανισορροπία, καθώς τείνει σε ισορροπία αλληλοεπιδρώντας μόνο με το περιβάλλον. Η εξέργεια είναι χημικής και φυσικής προέλευσης αφού όλες οι υπόλοιπες μορφές είναι αμελητέες. Στο LNG συγκεκριμένα είναι φυσική προέλευσης διότι αυτή αξιοποιείται κατά την επαναεριοποίηση λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας (θερμικό στοιχείο) και της διαφοράς πίεσης (μηχανικό στοιχείο), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 5.1) [50],[45].



Εικόνα 5.1 Σχηματική αναπαράσταση διαφοράς θερμοκρασίας και πίεσης [50]

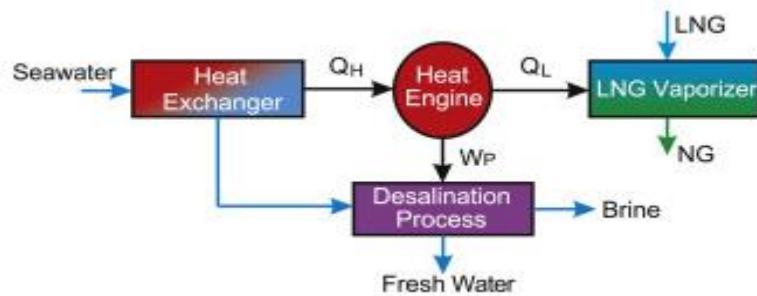
Έτσι λοιπόν, η επαναεριοποίηση του LNG είναι συνδεδεμένη και με άλλες διεργασίες που αξιοποιούν μέρος της ενέργειας υδροποίησης. Ενδεικτικά, μία από αυτές τις διεργασίες είναι εκμετάλλευση της εξέργειας του LNG για διαχωρισμό των συστατικών του αέρα, Εικόνα 5.2, [2], [50]. Ήταν μάλιστα και η πρώτη εφαρμογή όταν σχεδιάστηκε να αξιοποιηθεί εξεργειακά το LNG το 1977 στην Ιαπωνία. Αργότερα, επεκτάθηκε και σε άλλες εφαρμογές και σε άλλες χώρες. Στην Ευρώπη πρωτοεφαρμόστηκε στην Ισπανία στον τερματικό σταθμό της Huelva που λειτουργεί από το 2013 και στη συνέχεια επεκτάθηκε σε Ηνωμένο Βασίλειο, Γαλλία και Βέλγιο [50]. Ο διαχωρισμός του αέρα είναι σε οξυγόνο και άζωτο. Παράλληλα, μπορεί να γίνει και διαχωρισμός των ελαφρών υδρογονανθράκων από το ΦΑ.



Εικόνα 5.2 Διαδικασία διαχωρισμού αέρα με χρήση εξέργειας LNG [2]

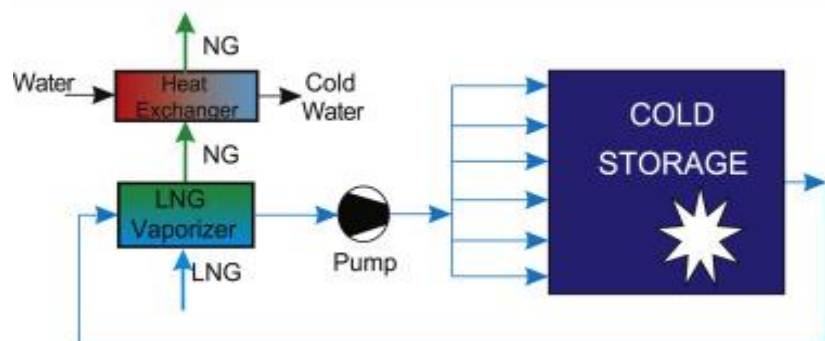
Υπολογίζεται πως μέσω της διαδικασίας αυτής μπορεί να μειωθεί στο $\frac{1}{4}$ η κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την συμβατική διαδικασία διαχωρισμού αέρα [30].

Ένας ακόμη τρόπος αξιοποίησης της εξέργειας είναι για αφαλάτωση του θαλασσινού νερού η οποία χρειάζεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας, Εικόνα 5.3. Έχουν δοκιμαστεί συστήματα που έχουν προσφέρει έως και 50% λιγότερη κατανάλωση ενέργειας για αφαλάτωση χάρις την εξέργεια [2].



Εικόνα 5.3 Διαδικασία αφαλάτωσης με χρήση εξέργειας LNG [2]

Επίσης, εφαρμογή της εξέργειας του LNG συναντάται στην βιομηχανία τροφίμων για αποθήκευση σε χαμηλές θερμοκρασίες, Εικόνα 5.4 [2].



Εικόνα 5.4 Διαδικασία αποθήκευσης σε χαμηλή θερμοκρασία με χρήση εξέργειας LNG [2].

Πολλές φορές επειδή η σύσταση του LNG ποικίλλει, όπως διαπιστώσαμε και παραπάνω, χρειάζονται κάποια επιπρόσθετα στάδια επεξεργασίας, ώστε το τελικό προϊόν να τηρεί τις κατάλληλες προδιαγραφές χρήσης [38].

Οι μονάδες επαναεριοποίησης γνωρίζουν μια σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια με χαρακτηριστική αύξηση από το 2015 στο 2018 όταν σχεδόν διπλασιάστηκαν από 60 σε 100 [30].

5.2 Πλωτοί σταθμοί αποθήκευσης και επαναεριοποίησης FSRU

Όπως είδαμε, υπάρχουν αρκετοί σταθμοί στην Ευρώπη που εισάγουν το ΦΑ σε υγρή μορφή. Το ίδιο ισχύει και παγκόσμιο βαθμό όπου οι εγκαταστάσεις αυξάνονται συνεχώς. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθούν οι πλωτοί σταθμοί αποθήκευσης και επαναεριοποίησης FSRU (Floating Storage and Regasification Unit). Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για πλοία-εγκαταστάσεις που υποδέχονται LNG, το αποθηκεύουν και το μετατρέπουν ξανά σε αέρια μορφή και το στέλνουν κατευθείαν σε αγωγούς [52],[26]. Είναι συνήθως αγκυροβολημένα σε προβλήτες, αλλά μπορούν κιόλας να μεταφέρονται μεταξύ των λιμένων, εισάγοντας LNG στον ένα λιμάνι και να το αεριοποιούν στο άλλο [53], [52], έχουν μήκος περίπου 290 μέτρα και πλάτος 49 μέτρα. Διατηρούν το υγροποιημένο ΦΑ στους $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, σε δεξαμενές χωρητικότητας 125.000 m^3 - 170.000 m^3 , όπως και στις χερσαίες εγκαταστάσεις αποθήκευσης [53]. Οι πλωτές αυτές μονάδες συγκεντρώνουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των χερσαίων εγκαταστάσεων και μάλιστα τα τελευταία χρόνια έχουν γνωρίσει ραγδαία αύξηση. Πρώτη φορά FSRU κατασκευάστηκε το 2005. Το 2010 στον κόσμο υπήρχαν μόλις 10 FSRU και 5 χρόνια αργότερα σχεδόν διπλασιάστηκαν. Το 2017 έφτασαν να είναι 27 ενώ αναμένονται δεκάδες περισσότερες τέτοιες εγκαταστάσεις στο άμεσο μέλλον [54].

Πέρα από τα πολλά πλεονεκτήματα που διαθέτουν, έχουν και κάποια αρνητικά που τα καθιστούν ακατάλληλα, όπως συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες, Πίνακας 5.1. Πίνακας 5.2:

Πίνακας 5.1 Πλεονεκτημάτων FSRU [26],[53],[54]

Πλεονεκτήματα
<ul style="list-style-type: none"> • Δεν χρειάζεται κατασκευή χερσαίων υποδομών, κατ' επέκταση δεν χρειάζεται να τηρηθούν κανόνες στην στεριά (περιβαλλοντικοί, νομοθετικοί)
<ul style="list-style-type: none"> • Όταν ολοκληρωθεί το έργο τους, η πλωτή εγκατάσταση μπορεί να αποχωρήσει χωρίς να αφήσει πίσω εγκαταστάσεις
<ul style="list-style-type: none"> • Δυνατότητα αεριοποίησης όποτε χρειαστεί ανάλογα με την ζήτηση. Η διαδικασία μπορεί να σταματήσει και να ξανά αρχίσει για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της αγοράς
<ul style="list-style-type: none"> • Ασφαλείς μονάδες LNG. Στην σπάνια περίπτωση πυρκαγιάς, αυτή περιορίζεται πολύ
<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος αρχικού κεφαλαίου
<ul style="list-style-type: none"> • Κατασκευάζεται και τίθεται σε λειτουργία πιο σύντομα από τις χερσαίες εγκαταστάσεις
<ul style="list-style-type: none"> • Τήρηση προγράμματος χωρίς να υπερβαίνουν το χρονοδιάγραμμα
<ul style="list-style-type: none"> • Ευέλικτο στις μετακινήσεις για ανταπόκριση στις απαιτήσεις τις αγοράς
<ul style="list-style-type: none"> • Γρήγορη τροφοδοσία με φυσικό αέριο
<ul style="list-style-type: none"> • Παροχή ΦΑ σε απομακρυσμένες περιοχές
<ul style="list-style-type: none"> • Κατάλληλο για μικρές και για μεγάλες χρονικές περιόδους

Πίνακας 5.2 Μειονεκτήματα FSRU [26],[53],[54]

Μειονεκτήματα
• Δημιουργία θορύβου, πρόβλημα στο γύρω οικοσύστημα
• Μικρή χωρητικότητα αποθήκευσης, κατάλληλο περισσότερο για μικρές αγορές(τα επόμενα χρόνια αυτό αναμένεται να εξελιχθεί με μεγαλύτερες χωρητικότητες)
• Περιορισμοί στην συντήρηση, λόγω κανονισμών για αποφυγή ρύπανσης του θαλάσσιου περιβάλλοντος
• Δύσκολη η επέκτασή τους αν αυξηθεί η ζήτηση ΦΑ
• Δύσκολη η δημιουργία υποδομών για εκμετάλλευση παραπροϊόντων που μπορεί να δημιουργηθούν ή εξέργειας
• Ανάγκη προσωπικού με εξειδικευμένες γνώσεις
• Δύσκολη η βελτιστοποίηση των λειτουργιών
• Επηρεάζεται εύκολα από τις καιρικές λειτουργίας με αποτέλεσμα έως και διακοπών λειτουργίας

Στην Ευρώπη, FSRU σταθμοί είναι οι (Πίνακας 5.3) :

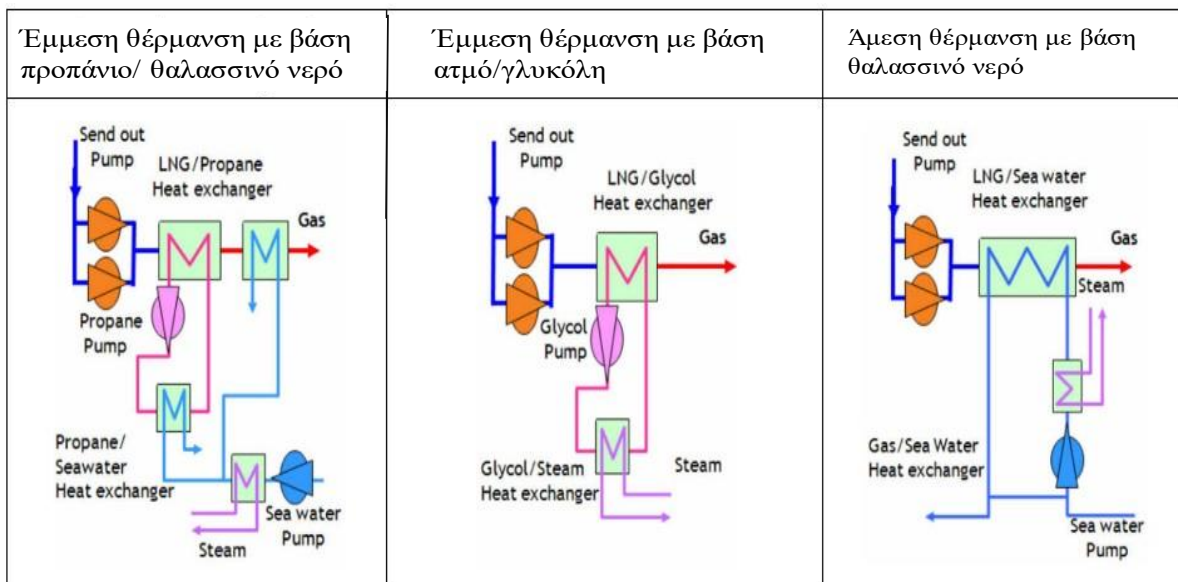
Πίνακας 5.3 FSRU την Ευρώπη [29]

Τουρκία	Ismir, Dortyol
Κροατία	Krk
Ιταλία	Toscana
Λιθουανία	Klaipeda
Κύπρος	Βασιλικό

5.2.1 Διαδικασία επαναεριοποίησης FSRU.

Πριν την διοχέτευση του ΦΑ στο δίκτυο για κατανάλωση, χρειάζεται να επαναεριοποιηθεί. Οι πλωτοί σταθμοί αναλαμβάνουν να κάνουν αυτή την διαδικασία. Γενικότερα οι τεχνολογίες και ο τρόπος που γίνεται η επαναεριοποίηση είναι αντίστοιχη με αυτήν που γίνεται στις χερσαίες εγκαταστάσεις και έχουν τους ίδιους στόχους βελτίωσης των λειτουργιών τους [53], [54].

Συνήθως η επαναεριοποίηση γίνεται με την χρήση του θαλασσινού νερού [26],[53], [54]. Από τις δεξαμενές που αποθηκεύεται το LNG, εξάγεται μέσω αντλίας όπου οδηγείται σε επόμενη αντλία υψηλής πίεσης που θα το οδηγήσει στον εναλλάκτη θερμότητας για να αεριοποιηθεί [26]. Οι εναλλάκτες θερμότητας χρησιμοποιούν το θαλασινό νερό ως το εργαζόμενο μέσο και το LNG ως το φορτίο που εξατμίζεται [53]. Το θαλασσινό νερό, λοιπόν, βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας του με το ΥΦΑ (-162 °C), οδηγεί στην θέρμανση του LNG [53]. Η θέρμανση του γίνεται κάτω από το σημείο κρίσιμης πίεσης ώστε να διατηρηθεί και στην μετέπειτα ροή του σε αέρια μορφή [54]. Όταν πλέον αεριοποιηθεί, προστίθενται ουσίες ώστε να αποκτήσει άρωμα και να αντιλαμβάνεται σε περίπτωση διαρροής [26] και εισάγεται στο δίκτυο σε πίεση 60-80 bar κοντά στους 5 °C [53]. Το θαλασσινό νερό στην συνέχεια, αναμειγνύεται με άλλη ποσότητα θαλασσινού νερού που βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή ρίχνεται στην θάλασσα, εφόσον τηρεί τις προϋποθέσεις και δεν πρόκειται να ρυπαίνει το θαλάσσιο περιβάλλον [26],[53]. Όταν, όμως, το θαλασσινό νερό δεν τηρεί τις προδιαγραφές για να θερμάνει το LNG, τότε υπάρχει η περίπτωση να χρησιμοποιηθεί το φορτίο (ΦΑ) για να γίνει η αεριοποίηση [53]. Επίσης, όταν το θαλασσινό νερό δεν είναι κατάλληλο ή οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν το επιτρέπουν, οι ατμοποιητές χρησιμοποιούν προπάνιο ή γλυκόλη ως εργαζόμενα μέσα. Για την επιλογή ατμοποιητών, αποτελούν και οικονομικοί παράγοντες όπως το αρχικό κόστος, η απόδοση και η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς [26]. Οι μέθοδοι επαναεριοποίησης που αναφέρθηκαν φαίνονται στην επόμενη εικόνα, (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5 Μέθοδοι επαναεριοποίησης [26]

5.3 Σταθμοί επαναεριοποίησης -Real life systems

Τις τελευταίες δεκαετίες τα κράτη της Ευρώπης έχουν αυξήσει την χρήση του ΦΑ στην καθημερινότητά τους και αυτό έχει παίξει ρόλο στην δημιουργία εγκαταστάσεων υποδομής

LNG. Εγκαταστάσεις, δηλαδή τερματικών σταθμών, όπου γίνεται η αποθήκευση LNG και η αεριοποίηση του, έργα τα οποία ήδη εδώ και αρκετά χρόνια έχουν υλοποιηθεί ώστε οι σταθμοί αυτοί να αποτελούν κόμβους εισαγωγής και εξαγωγής ΦΑ σε υγρή και αέρια μορφή [31].

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του Ιουνίου 2021 για τους τερματικούς σταθμούς LNG και των αγωγών με στατιστικά του Μαρτίου 2022 παρουσιάζονται οι λειτουργικές μονάδες επανααεριοποίησης στην Ευρώπη, Εικόνα 5.6 -Πίνακας 5.4 και οι σταθμοί που πρόκειται να λειτουργήσουν τα επόμενα χρόνια, Εικόνα 5.7-Πίνακας 5.5 και οι μελλοντικοί σταθμοί που σχεδιάζεται να κατασκευαστούν Εικόνα 5.8, Πίνακας 5.6:



Εικόνα 5.6 Λειτουργικοί τερματικοί σταθμοί LNG [55].

Πίνακας 5.4 Λειτουργικοί Τερματικοί Σταθμοί στην Ευρώπη [56],[55], [57].

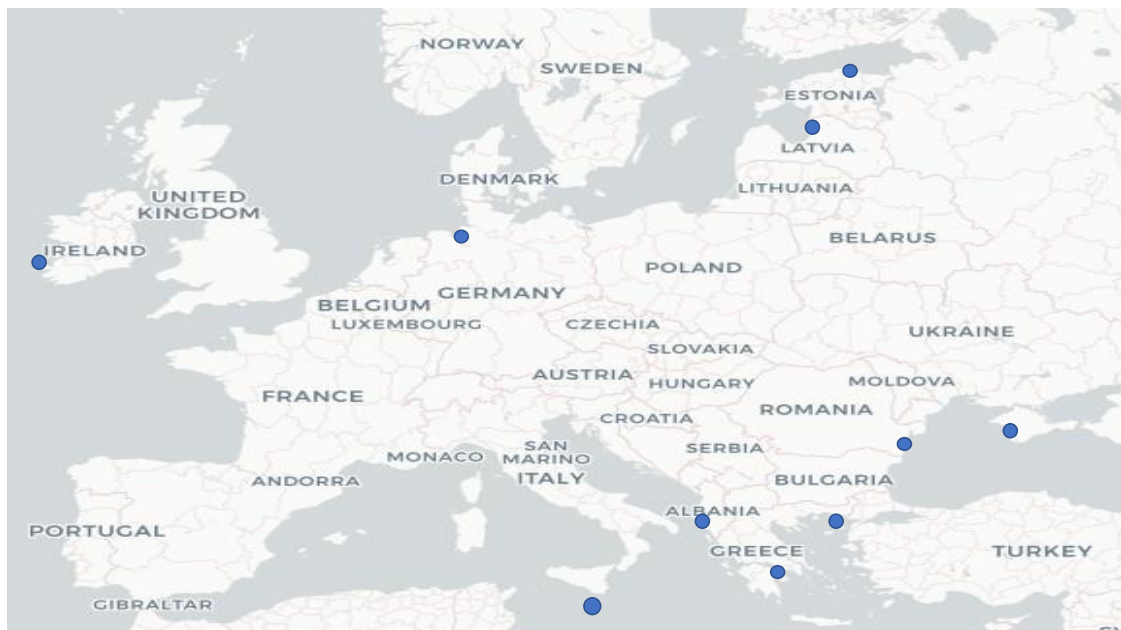
ΧΩΡΑ	ΣΤΑΘΜΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΧΩΡΙΤΗΚΟΤΗΤΑ (mtpa)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ
ΕΛΛΑΔΑ	Ρεβυθούσα	3,7	2000
ΙΤΑΛΙΑ	Tuscana	2,7	2013-14
	Spezia	2,5	1971
	Adriatic Sea	8-9	2009
ΚΡΟΑΤΙΑ	Krk	2,9	2021
ΓΑΛΛΙΑ	Fon Tonkin	2,2	1972
	Fon Cavaou	6,0	2010
	Dunkirk	9,5	2017
	Montoir	7,3	1980
ΙΣΠΑΝΙΑ	Barcelona	12,8	1969
	Sanguto (Valencia)	6,4-6,7	2006
	Bilbao	5,1	2003
	Cartagena	7,6	1989
	El Musel	5,4	2013
	Mugaridos	2,6	2007
	Huelva	8,7	1988
ΠΟΡΤΟΓΑΛΙΑ	Sines	5,8	2004
ΗΝΩΜΕΝΟ ΒΑΣΙΛΕΙΟ	South Hook	15,6	2009
	Dragon	4,4	2009
	Grain	15	2005
ΒΕΛΓΙΟ	Zeebrugge	6,6	1987
ΟΛΛΑΝΔΙΑ	Maasvlakte	9,3	2011
ΠΟΛΩΝΙΑ	Świnoujście	3,9	2015-16
ΛΙΘΟΥΑΝΙΑ	Klaipėda	2,9	2014
ΤΟΥΡΚΙΑ	Marmara	4,6	1994
	Aliaga	10,7	2006
	Izmir	5,7	2016
	Dörtyol	4,1	2018
ΓΙΒΡΑΛΤΑΡ	Gibraltar	-	2017



Εικόνα 5.7 Τερματικοί σταθμοί υπό κατασκευή στην Ευρώπη [56].

Πίνακας 5.5 Τερματικοί Σταθμοί υπό κατασκευή στην Ευρώπη [56],[29].

ΧΩΡΑ	ΣΤΑΘΜΟΣ	ΧΩΡΙΤΗΚΟΤΗΤΑ (mtpa)	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ
ΤΟΥΡΚΙΑ	Gulf of Saros	5,4	2022
ΚΥΠΡΟΣ	Βασικλικό	0,6	2023
ΠΟΛΩΝΙΑ	Świnoujście	0,6	2023



Εικόνα 5.8 Μελλοντικοί Τερματικοί Σταθμοί στην Ευρώπη[56]

Πίνακας 5.6 Μελλοντικοί Τερματικοί Σταθμοί στην Ευρώπη [56], [29]

ΧΩΡΑ	ΣΤΑΘΜΟΣ	ΧΩΡΙΤΗΚΟΤΗΤΑ (mtpa)	ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΗ ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ
ΕΛΛΑΔΑ	Κορινθιακός κόλπος	2,02	2023
	Αλεξανδούπολη	4,6	2023
ΑΛΒΑΝΙΑ	Port of Vlora	-	2023
ΜΑΛΤΑ	Delimara	-	-
ΡΟΥΜΑΝΙΑ	Constanța	6	2027
ΟΥΚΡΑΝΙΑ	Crimea	-	-
ΙΡΛΑΝΔΙΑ	Tarbert/Ballylongford, County Kerry Munster Province	2,1	2022
		1,54	2025
		2,43	2029
ΓΕΡΜΑΝΙΑ	Wilhelmshaven	5,5	2022
ΛΕΤΟΝΙΑ	Skulte	4,6	2024
ΕΣΘΟΝΙΑ	Paldiski	1,8	2025

Οι εισαγωγές ΦΑ γίνονται κυρίως από το Κατάρ (28%), τη Ρωσία (20%), τις Η.Π.Α (16%) και τη Νιγηρία (12%), ενώ τις περισσότερες εισαγωγές τις κάνουν Ισπανία (20%), Γαλλία (20%), Ηνωμένο Βασίλειο (17%) και Ιταλία (13%). Επομένως, η Ευρώπη εισάγει κυρίως ΦΑ μέσω είτε πλοίων σε υγρή μορφή είτε μέσω αγωγών. Πέρα από τους σταθμούς, η υπόλοιπη διανομή του ΦΑ γίνεται μέσω αγωγών όπως φαίνεται στην παρακάτω , Εικόνα 5.9:

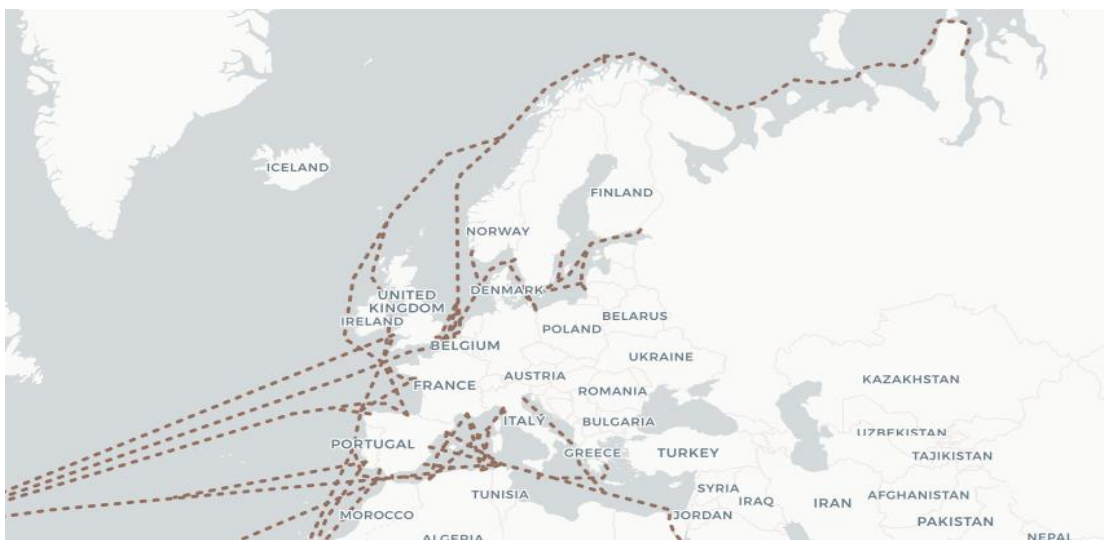
ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ



Εικόνα 5.9 Διανομή φυσικού αερίου μέσω αγωγών [56]

Από την παραπάνω εικόνα, διαπιστώνεται πως η Ευρώπη διαθέτει ένα μεγάλο σύστημα διανομής ΦΑ μέσω αγωγών, το οποίο συμπεριλαμβάνει Νορβηγία και Ρωσία, που όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.1, είναι χώρες με μεγάλα αποθέματα ΦΑ.

Παρακάτω αποτυπώνεται στην σχηματική αναπαράσταση πως διανέμεται το LNG στην Ευρώπη μέσω πλοίων, Εικόνα 5.10, Εικόνα 5.11:



Εικόνα 5.10 Διανομή LNG στην Ευρώπη 1 [56]



Εικόνα 5.11 Διανομή LNG στην Ευρώπη 2 [56].

Από τις δύο τελευταίες εικόνες παρατηρούμε πως η Ευρώπη προμηθεύεται LNG από χώρες όπως το Κατάρ, τη Νορβηγία, τις Η.Π.Α και την Βενεζουέλα. Δεν είναι τυχαίο αυτό, καθώς αυτές οι χώρες, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.4, είναι οι χώρες που διαθέτουν μονάδες υγροποίησης ΦΑ και παράλληλα μεγάλα αποθέματα ΦΑ.

5.4 Σταθμός Ρεβυθούσας

Στην Ελλάδα υπάρχει ο τερματικός σταθμός της Ρεβυθούσας έξω από την Αθήνα που εισάγει ΥΦΑ, Εικόνα 5.12. Συγκεκριμένα, ο σταθμός αυτός εκτελεί τις παραπάνω διαδικασίες:

- Εισαγωγή LNG από δεξαμενόπλοια, Πίνακας 5.7. Η σύνδεση για την υποδοχή του γίνεται με βραχίονες (3) και έναν ακόμη βραχίονα για την μεταφορά αερίων και από τις δυο κατευθύνσεις.

Πίνακας 5.7 Αριθμός δεξαμενοπλοίων εκφόρτωσης Ρεβυθούσας [21]

Χρονιές	2014	2015	2016	2017	2018	2019
δεξαμενόπλοια	14	13	18	30	24	50

- Αποθήκευση του σε δεξαμενές. Η αποθήκευσή του γίνεται στους $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ σε τρεις δεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 225.000 m^3 .
- Υγροποίηση των αερίων που έχουν προέλθει από εξάτμιση του υγρού στις δεξαμενές. Τα αέρια αυτά που πρόκειται κατά κύριο λόγο μεθάνιο και άζωτο, προέρχονται από φυσική εξάτμιση του υγρού. Οδηγούνται μέσω συμπιεστών σε συμπυκνωτές, ώστε να υγροποιηθούν ξανά και επίσης για να μην αυξήσουν την πίεση των δεξαμενών.
- Άντληση και επανααεριοποίηση. Στις δεξαμενές μέσα περιέχονται αντλίες χαμηλής και υψηλής πίεσης. Από εκεί λοιπόν είτε οδηγούνται στον επανασυμπυκνωτή (χαμηλής πίεσης) είτε στους αεριοποιητές (υψηλής πίεσης). Από εκεί τα αέρια αποκτούν μια

θερμότητα και μία επιπλέον αύξηση της θερμοκρασίας τους για να οδηγηθούν στο σύστημα μεταφοράς. Οι ποσότητες επαναεριοποίησης των τελευταίων χρόνων, καταγράφονται στο παρακάτω πίνακα

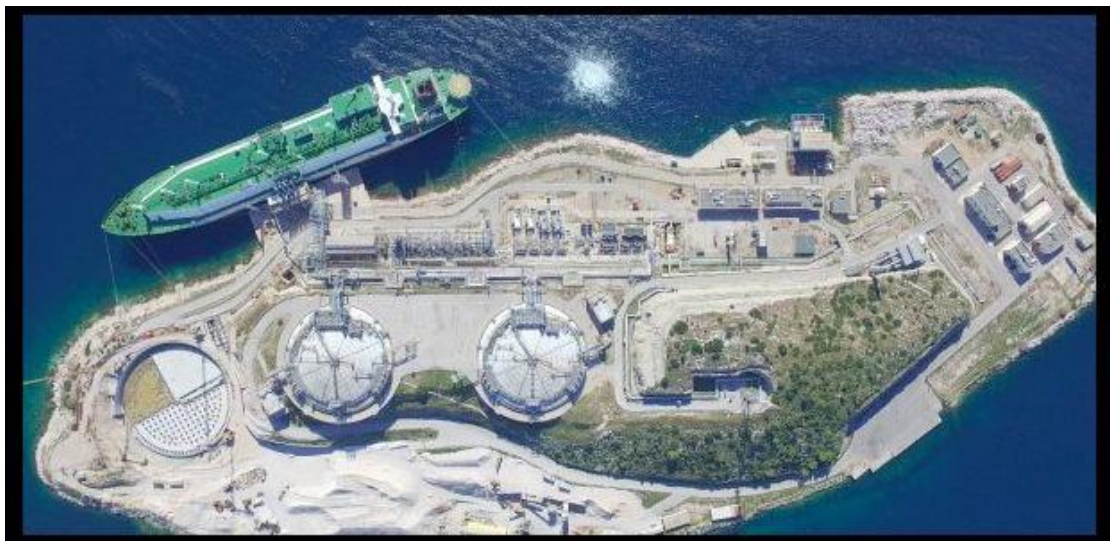
Πίνακας 5.8 Ποσότητες επαναεριοποίησης ΦΑ στην Ρεβυθούσα [21]

Χρονιές	2014	2015	2016	2017	2018	2019
(GWh)	6626	6508	8939	15987	10834	31426

- Έγχυση του ΦΑ στο Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς, Πίνακας 5.9. Η εγκατάσταση συνδέεται μέσω δυο υποθαλάσσιων αγωγών στο σύστημα .

Πίνακας 5.9 Ποσότητες ΦΑ που διοχετεύτηκαν από τις εγκαταστάσεις τις Ρεβυθούσας στο Εθνικό Δίκτυο (Αγία Τριάδα) [58]

Χρονιές	2018	2019	2020	2021
(GWh)	10697	31008	32432	24667



Εικόνα 5.12 Σταθμός επαναεριοποίησης, Ρεβυθούσα [59]

Παράλληλα με την εγκατάσταση αυτή, υπάρχει και μία ακόμη, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια και δημιουργεί ενεργειακή αυτονομία στον τερματικό σταθμό. Αυτή η εγκατάσταση αποτελείται από μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν ΦΑ. Μάλιστα, σε περίπτωση που παράγει παραπάνω ηλεκτρική ενέργεια, την προσφέρει ενέργεια στο δίκτυο της ΔΕΗ. Επίσης υπάρχουν και δυο ηλεκτρογεννήτριες, οι οποίες σε περίπτωση διακοπής, φροντίζουν την συνέχιση της αυτονομίας. Στην μονάδα αυτή σημαντικό είναι ότι τα καυσαέρια που δημιουργούνται από την καύση χρησιμοποιούνται για θερμότητα μαζί με τους αεριοποιητές, οπότε γίνεται λόγος για μονάδα παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού [60].

5.5 Ενεργειακές απαιτήσεις για υγροποίηση και αεριοποίηση του φυσικού αερίου

Όπως αναφέρθηκε, η κατανάλωση ενέργειας κατά την υγροποίηση είναι μεγαλύτερη από αυτή της αεριοποίησης. Η ειδική κατανάλωση κατά την υγροποίηση είναι σοβαρός παράγοντας για την συνολική απόδοση της διαδικασίας υγροποίησης, όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα που πρόκειται να υγροποιηθεί τόσο μικρότερη είναι η ειδική κατανάλωση που απαιτείται. Άξια αναφοράς, σύμφωνα με την Εικόνα 5.13, είναι η πληροφορία, πως κατά την διάρκεια της αποθήκευσης, μέρος του υγροποιημένου αερίου εξατμίζεται και υπολογίζεται πως αυτό αντιστοιχεί σε ποσοστό 0,15% την ημέρα. Μελέτες έδειξαν πως υπάρχουν εγκαταστάσεις που υγροποιούν το αέριο με ειδική κατανάλωση 1,27 kWh για 1 κιλό αζώτου το οποίο αζώτο είναι το εργαζόμενο μέσο που χρησιμεύει στην ψύξη του αερίου. Επειδή, λοιπόν, η ποσότητα ενέργειας είναι μεγάλη για την υγροποίηση γίνεται λόγος για επανάκτηση αυτής της ενέργειας ώστε μέρος της να αξιοποιείται και στο επόμενο βήμα της αεριοποίησης όπου με είτε θαλασσινό νερό είτε με ατμοσφαιρικό αέρα. Με αυτό τον τρόπο αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης ολόκληρου του συστήματος [30].

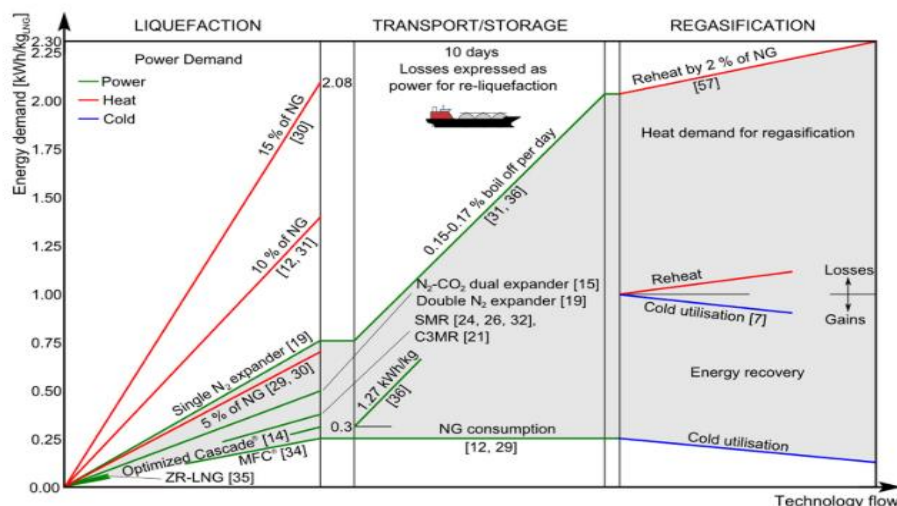


Fig. 14. Energy demands of LNG process.

Εικόνα 5.13 Ενεργειακές απαιτήσεις διεργασιών LNG [30]

Στην παραπάνω εικόνα, φαίνεται η ενέργεια που απαιτείται για τις διαδικασίες υγροποίησης, μεταφοράς, αποθήκευσης και επαναεριοποίησης του ΦΑ. Το γκρι πλαίσιο αποτυπώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις για κάθε τεχνολογία LNG. Το πάνω όριο του γκρι πλαισίου δείχνει την μέγιστη κατανάλωση ενέργειας για τις διεργασίες και το κάτω όριο την ελάχιστη ενέργεια. Τέλος, τα υπόλοιπα περιγράμματα φανερώνουν άλλες διαδικασίες που θα μπορούσαν να προστεθούν, ώστε να ανακτηθεί ενέργεια. Τα χρώματα είναι διαφορετικά ανάλογα με τις διεργασίες. Γίνεται αντιληπτό, λοιπόν από το διάγραμμα πως για ολόκληρη την διαδικασία απαιτούνται περίπου 2,3 kWh/kg LNG που ισοδυναμεί με 20% της ποσότητας ΦΑ όπως καταγράφεται στο επόμενο διάγραμμα της Εικόνα 5.14 [30].

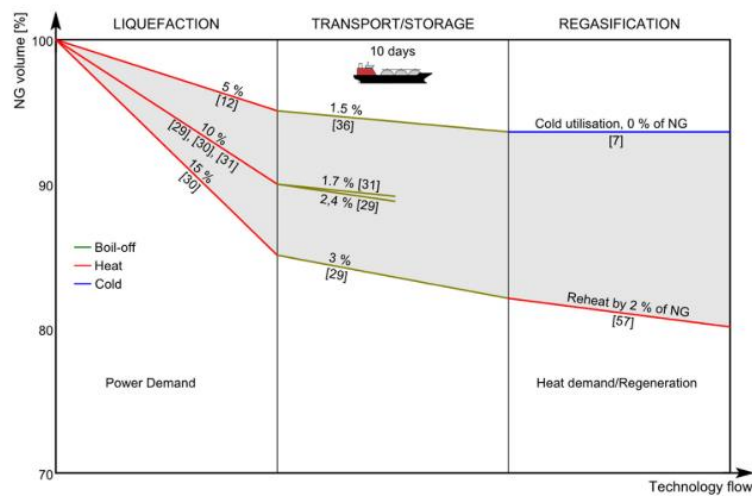


Fig. 15. Natural gas consumption of LNG process.

Εικόνα 5.14 Κατανάλωση φυσικού αερίου κατά τη διάρκεια των διεργασιών [30]

Από τις δύο αυτές εικόνες, επιβεβαιώνεται πως η υγροποίηση είναι η διαδικασία με την μεγαλύτερη απαίτηση σε ενέργεια, διότι χρειάζεται 5-15% της ποσότητας του ΦΑ, ενώ η αποθήκευση και η μεταφορά την μικρότερη μιας και οι ποσότητες σε αυτές τις διεργασίες οφείλονται κυρίως στον βρασμό του υγρού. Σε αυτό το σημείο, έρχεται το ερώτημα αν αξίζει η υγροποίηση του ΦΑ ή είναι καλύτερο η μεταφορά του μέσω αγωγών. Για τις διαδικασίες από την υγροποίηση έως και την επαναεριοποίηση, η ζήτηση ενέργειας είναι πολλή μεγάλη, ενώ με αγωγούς δεν χρειάζεται τίποτα παραπάνω από επεξεργασία του αερίου. Ωστόσο, έχει υπολογιστεί πως όταν πρόκειται για μεγάλες αποστάσεις οι διαδικασίες αυτές είναι προτιμότερες οικονομικά. Το LNG ενδείκνυται για περιοχές απομακρυσμένες που έχουν πρόσβαση σε δεξαμενόπλοια και την παραγωγή ενέργειας και λιγότερο για μακροχρόνια αποθήκευση αφού εξατμίζεται και χάνεται η αξία του. Αν βέβαια γινόταν αξιοποίηση του αερίου που εξατμίζεται και η κατανάλωση ήταν ισοδύναμη με το ποσό που εξατμίζεται θα μπορούσε το LNG να χρησιμεύσει και ως μέσο αποθήκευσης [30].

Κεφάλαιο 6. Τεχνολογίες μεταφοράς φυσικού αερίου

6.1 Μεταφορά σε υγρή και αέρια μορφή

Το LNG μπορεί να μεταφερθεί με δεξαμενόπλοια σε δεξαμενές από μεταλλικό υλικό διπλού τοιχώματος [23]. Είναι, δηλαδή, μια δεξαμενή μέσα την άλλη και ενδιάμεσα στα τοιχώματα υπάρχει μόνωση. Το εσωτερικό τοίχωμα που έρχεται σε επαφή με το υγρό είναι κράμα χάλυβα με νικέλιο ή αλουμίνιο σχεδόν ενώ το εξωτερικό τοίχωμα είναι από ανθρακούχο χάλυβα ή από οπλισμένο σκυρόδεμα συνδυαστικά με χάλυβα νικελίου. Οι δεξαμενές αυτές λειτουργούν υπό ατμοσφαιρική πίεση. Η εξωτερική δεξαμενή είναι και αυτή που συγκρατεί τον ατμό που προκύπτει από την εξάτμιση του υγρού φυσικού αερίου [38]. Αντίστοιχες δεξαμενές αποθήκευσης υπάρχουν και στους τερματικούς σταθμούς που βρίσκονται κοντά σε ακτές με μόνωση και προστασία από καιρικές συνθήκες [23]. Συνήθως τοποθετούνται κάτω από το έδαφος για λόγους οικονομίας και ταχύτητας κατασκευής τους ενώ δεν είναι και ιδιαίτερα ορατές [38]. Τα απλά πλοία LNG συνήθως μεταφέρουν 135-138 χιλιάδες κυβικά μέτρα προϊόν ενώ από το 2011 υπάρχουν δεκάδες πλοία που να ξεπερνάνε σε χωρητικότητα τα 200.000 m³ και το μεγαλύτερο που είχε καταγραφεί είναι 266.000 m³[25]. Το ενεργειακό τους περιεχόμενο, επίσης, είναι πιο ακριβό συγκριτικά με τα αντίστοιχα πετρελαίου έως και δέκα φορές. Ανάλογοι σε όγκο είναι και οι τερματικοί σταθμοί των δεξαμενοπλοίων LPG, ώστε να μπορούν να τα υποδέχονται και να αποθηκεύουν το φορτίο σε δεξαμενές οι οποίες είναι τουλάχιστον διπλάσιες από τον όγκο του LPG που μεταφέρουν τα πλοία [22].

Κατά την διάρκεια της μεταφοράς LNG με δεξαμενόπλοια, μέρος του ΥΦΑ θερμαίνεται λόγω της επαφής του με το περιβάλλον, επομένως μεταφέρεται θερμότητα, μέσα από κάποιους μεμονωμένους χώρους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα μικρό μέρος του LNG να γίνεται ατμός. Επιπλέον, η ατμοποίηση οφείλεται και στην ψύξη των δεξαμενών, διαδικασία η οποία πραγματοποιείται για να κρατάει την εσωτερική θερμοκρασία σταθερή κατά την μεταφορά του προϊόντος. Τέλος, ο ατμός προκαλείται και λόγω των συνθηκών κατά το ταξίδι, δηλαδή όταν το πλοίο βρίσκεται σε άσχημες καιρικές συνθήκες. Έτσι, το αποθηκευμένο στις δεξαμενές LNG ανακινείται, αλληλοεπιδρώντας έντονα με τα εσωτερικά τοιχώματα και μεταφέροντας θερμότητα. Κατά την μεταφορά του πρέπει να διατηρείται σε θερμοκρασία κάτω από τη θερμοκρασία βρασμού στην αντίστοιχη πίεση [13].

Έχοντας, λοιπόν, αυτή την κατάσταση, με την ατμοποίηση του LNG, τα συγκεκριμένα δεξαμενόπλοια έχουν χωριστεί σε δύο κατηγορίες:

- i. αυτά που χρησιμοποιούν τον ατμό για κίνηση και
- ii. αυτά που ρευστοποιούν ξανά τον ατμό μετατρέποντας το LNG.

Και στις δύο κατηγορίες μπορεί να υπάρχει εφεδρικά και το diesel είτε για περίπτωση που το αέριο δεν μπορεί να καλύψει όλες τις ανάγκες είτε να χρησιμεύει για δευτερεύουσες ανάγκες [30].

Στα δεξαμενόπλοια της πρώτης κατηγορίας, ο ατμός χρησιμοποιείται για την κίνηση του πλοίου(πρόωση) και η περίσσεια του ατμού καίγεται στις μονάδες καύσεις αερίου ή σε λέβητες, χωρίς έτσι να χρειάζεται ενέργεια για να ελέγχεται η πίεση στις δεξαμενές. Από την άλλη, τα πλοία της δεύτερης κατηγορίας διαθέτουν μονάδες που ρευστοποιούν τον ατμό και τον επαναφέρουν ξανά στις δεξαμενές σε υγρή μορφή, κάτι που χρειάζεται μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Να σημειωθεί πως υπάρχουν κανονισμοί που περιορίζουν την εκπομπή ρύπων των πλοίων και για αυτό γίνονται συνέχεια μελέτες και αναπτύσσονται συστήματα που να μην απελευθερώνουν ρύπους [41]. Η μεταφορά του ΦΑ μπορεί να γίνει με δεξαμενόπλοια, αφού πρώτα έχει υγροποιηθεί. Η διαδικασία αυτή συμφέρει όταν πρόκειται το ΦΑ να μεταφερθεί σε αποστάσεις πάνω από 5000 km σε στεριά και πάνω από 2000 km όταν πρόκειται για θάλασσα [30].

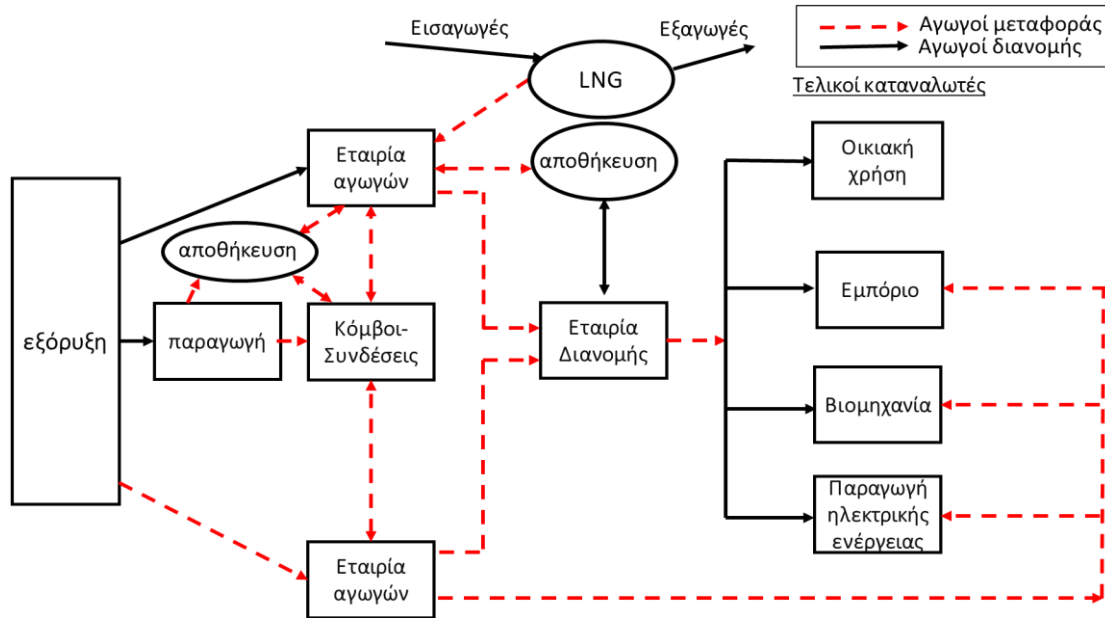
Από την άλλη πλευρά μπορεί να μεταφερθεί και με αγωγούς. Οι αγωγοί που μεταφέρουν ΦΑ κατηγοριοποιούνται σε διανομής και μεταφοράς. Το δίκτυο αγωγών για την μεταφορά του συναντάται κυρίως στην ξηρά και λιγότερο υποθαλάσσια. Στις Η.Π.Α το 2020 είχαν καταγραφεί περίπου 3 εκατομμύρια μίλια αγωγών που μεταφέρουν ΦΑ, από την παραγωγή και τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης έως την κατανάλωση προσφέροντας σε 77,3 εκατομμύρια καταναλωτές σχεδόν 27,7 Tcf ΦΑ. Οι αγωγοί ξεκινάνε από την εξόρυξη με σωλήνες μικρής διαμέτρου και μικρής πίεσης και φτάνουν στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας. Κατόπιν επεξεργασίας, διοχετεύεται σε αγωγούς μεταφοράς υπό υψηλή πίεση από όπου και μεταφέρεται σε πόλεις, κράτη και μονάδες αποθήκευσης και από εκεί διανέμεται μέσω αγωγούς διανομής σε καταναλωτές [61]. Οι σωλήνες από τους οποίους αποτελούνται οι αγωγοί, παλαιότερα συνηθιζόταν να είναι από χυτοσίδηρο, ωστόσο αυτό άλλαξε όταν εμφανίστηκαν διαρροές και αποδείχθηκε επικίνδυνο. Πλέον, το υλικό για αγωγούς διανομής είναι πλαστικό και για μεταφορά χάλυβας με προσμίξεις [19]. Στην Ευρώπη, για πρώτη φορά, το 1963, τοποθετήθηκαν αγωγοί ΦΑ μεταξύ Ολλανδίας και Δυτικής Γερμανίας, όταν βρέθηκαν μεγάλα κοιτάσματα στην Ολλανδία, οδηγώντας την επόμενη δεκαετία την Ευρώπη σε μεγάλη αύξηση παραγωγής ΦΑ. Αργότερα, η τροφοδοσία του επεκτάθηκε από υπόλοιπες χώρες, τη Νορβηγία, τη Ρωσία και την Αλγερία και ακόμη περισσότερο τα επόμενα χρόνια όταν βρέθηκαν και άλλες πηγές ΦΑ σε περιοχές της Ευρώπης [62]. Μέσω αγωγών μεταφέρεται είτε χερσαία είτε υποθαλάσσια. Οι αγωγοί αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, Πίνακας 6.1:

Πίνακας 6.1 Αγωγοί φυσικού αερίου [19],[2]

Αγωγοί	Διάμετρος	Πίεση
Διανομής	Μικρή	Χαμηλή (30 bar)
Μεταφοράς	Μεγάλη(>50inches)	Υψηλή (70-80 bar)

Οι αγωγοί διανομής είναι αυτοί που προορίζονται για να διανέμουν το ΦΑ σε σπίτια και επιχειρήσεις. Είναι μικρότερης διαμέτρου από αυτούς της μεταφοράς που είναι διαμέτρου 500 mm οι οποίοι μεταφέρουν το αέριο σε μεγαλύτερες αποστάσεις, ανάμεσα σε πόλεις και νομούς έως και κράτη. Συγκριτικά με τους διανομείς έχουν πολύ υψηλότερη πίεση, στα 80 bar. Οι αγωγοί ενδιάμεσα συνδέονται με σταθμούς που ρυθμίζουν την ροή του αερίου και τις συνθήκες

μεταφοράς ενώ κάθε κράτος διαθέτει κέντρο ελέγχου από όπου ρυθμίζει τη ροή ανάλογα με τις ανάγκες του [19],[63]. Οι σταθμοί αυτοί είναι συμπίεσης και τοποθετούνται ανά περίπου 160 χιλιόμετρα [25]. Μια περιληπτική περιγραφή των αγωγών παρατίθεται στην επόμενη Εικόνα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση αγωγών φυσικού αερίου [19]:



Εικόνα 6.1 Σχηματική αναπαράσταση αγωγών φυσικού αερίου [19]

6.2 Κόστος μεταφοράς

6.2.1 Κόστος μεταφοράς σε αέρια μορφή

Το κόστος για την μεταφορά του ΦΑ μέσω χερσαίων αγωγών χωρίζεται στο κόστος που περιλαμβάνει:

- i. τις κατασκευαστικές δαπάνες και
- ii. τα λειτουργικά έξοδα.

Στην πρώτη κατηγορία το κόστος περιέχει τα έξοδα για υλικά σωληνώσεων, την εγκατάσταση, την επιστροφή του σωλήνα για αντοχή σε φθορά, κατασκευή σταθμών συμπίεσης, διαχείριση κατασκευών, άδειες εγκατάστασης. Τα λειτουργικά έξοδα περιλαμβάνουν τα καύσιμα για σταθμούς συμπίεσης, επισκευή σωλήνων, περιβαλλοντικές άδειες και διοικητικές δαπάνες. Τα κόστη αυτά δεν είναι σταθερά καθώς ανάλογα την περιοχή διαφέρουν εξαιτίας των διαφορετικών συνθηκών που μπορεί να υπάρχουν όπως το έδαφος, το κλίμα ή το κόστος εργασίας. Οι σταθμοί συμπίεσης είναι απαραίτητο στοιχείο για την μεταφορά ΦΑ με αγωγούς καθώς σκοπός τους είναι να ρυθμίζουν την πίεση και τις συνθήκες που μεταφέρεται. Συνήθως οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται ανά 160 χιλιόμετρα και έχουν μέση ισχύ 110 MW. Το κόστος για την μεταφορά με αγωγούς δηλαδή αυξάνει όσο μεγαλώνει η απόσταση, ενώ αντίθετα όσο

μεγαλώνει η απόσταση για τα δεξαμενόπλοια LNG, που έχουν υψηλό αρχικό κόστος, τόσο μειώνεται το κόστος μεταφοράς. Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος μεταφοράς ΦΑ είτε με αγωγούς είτε με δεξαμενόπλοια. Τα κόστη αυτά εξαρτώνται άμεσα από την εποχικότητα και τις περιοχές στις οποίες καταλήγει το προϊόν αφού οι τιμές κατασκευής, μεταφοράς και αποθήκευσης μεταβάλλονται [25] με τα χρόνια, την εποχή και με την εξέλιξη της τεχνολογίας [19].

Μεγάλο μέρος των κατασκευαστικών δαπανών οφείλεται στο υλικό του σωλήνα, το μήκος και την διάμετρό του και επίσης από τον αριθμό και την χωρητικότητα των συμπιεστών.

Ως μια πρώτη εκτίμηση για το κεφάλαιο που χρειάζεται για την κατασκευή των αγωγών μπορεί να μας δοθεί από την παρακάτω εξίσωση:

στον οποίο δεν συνυπολογίζεται το κόστος υλικών και το κόστος εργασίας γιατί αυτά αλλάζουν από περιοχή σε περιοχή, παρά μόνο το μήκος των σωλήνων και η διάμετρος του και ο αριθμός των σταθμών συμπίεσης και η χωρητικότητά τους.

$$C = 52.675 \cdot \mu \cdot \delta(\$) + (3 \cdot 10^7) \cdot \alpha(\$) + 3091 \cdot c(\$) \quad (1)$$

μ =διάμετρος σε inches, δ =μήκος αγωγού σε km, α =αριθμός σταθμών συμπίεσης, c =συνολική χωρητικότητα σταθμών συμπίεσης σε HP(ιπποδύναμη).

Ο υπολογισμός λοιπόν πρέπει να ανανεώνεται συνεχώς λόγω των διακυμάνσεων στις τιμές που είναι πολύ σημαντικό ώστε πάντα να γίνεται σύγκριση με το κόστος μεταφοράς με πλοία LNG.

Αντίθετα το λειτουργικό κόστος παραμένει σταθερό για κάθε έργο, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$O_p = C_t + \left(1(1 - l)^{\frac{\delta}{n}}\right) \cdot N \cdot P \quad (2)$$

Σε αυτόν τον τύπος συνυπολογίζονται : N =όγκος ΦΑ $m^3/year$, P =τιμή ΦΑ ($\$/m^3$), n =χιλιόμετρα μεταξύ των σταθμών συμπίεσης, l =ποσοστά ΦΑ που χρησιμοποιείται στους σταθμούς συμπίεσης (περίπου 0,4% ανά 100 μίλια).

6.2.2 Κόστος μεταφοράς σε υγρή μορφή

Όσο αναφορά το κόστος των έργων για τη μεταφορά LNG με δεξαμενόπλοια αυτό ποικίλει. Μεγάλη σημασία έχουν οι εγκαταστάσεις που πρόκειται να δημιουργηθούν καθώς αυτές μπορεί να είναι είτε κατασκευή από την αρχή είτε κάποια επέκταση κάποιας ήδη εγκατάστασης. Επίσης, είναι πολύ περισσότερο δύσκολο να προσδιοριστεί καθώς μιλάμε για κατασκευές που τα κόστη των εξαρτημάτων διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή όπως, για παράδειγμα, το υλικά (χάλυβας και νικέλιο) ή οι μισθοί εργασίας και εξαρτώνται ταυτόχρονα

από την παγκόσμια οικονομία. Βέβαια τα έργα αυτά με τα χρόνια απαιτούν μικρότερο κόστος χάρις την εξέλιξη της τεχνολογίας. Σπουδαίο παράδειγμα είναι πως έως το 2004 οι μεγαλύτερο εργοστάσιο υγροποίησης παρήγαγε 4 εκατομμύρια τόνους τον χρόνο ενώ το 2012 υπήρχαν πολλά εργοστάσια που παρήγαγαν 7,8 εκατομμύρια τόνους στο ίδιο διάστημα, κάτι που οφειλόταν στην εξέλιξη της διαδικασίας συμπύκνωσης. Επί της ουσίας, το κόστος μεταφοράς ΦΑ ως LNG εξαρτάται από το κόστος εγκατάστασης υγροποίησης, την μεταφορά με δεξαμενόπλοια και τον σταθμό επαναεριοποίησης. Προσδιορίζεται πως για εγκαταστάσεις χωρητικότητας έως 4 εκατομμύρια τόνων τον χρόνο το κόστος κεφαλαίου είναι σταθερό ενώ για παραπάνω χωρητικότητα αυξάνεται σημαντικά ανά εκατομμύριο τόνο. Ενδεικτικά το κόστος κεφαλαίου υπολογίζεται προσεγγιστικά ως από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P_K = (5.5 \cdot 10^9)(\$) + (1 \cdot 10^9)(L - 4)(\$), \quad (2)$$

Σε αυτή την εξίσωση συνυπολογίζεται : L η ποσότητα LNG σε εκατομμύρια τόνους τον χρόνο. Ιδιαίτερα για τους σταθμούς επαναεριοποίησης το κόστος αυτό ανέρχεται το 1 δισεκατομμύριο δολάρια για 10 εκατομμύρια τόνους τον χρόνο. Στις εγκαταστάσεις οι πιο δαπανηροί τομείς είναι οι δεξαμενές αποθήκευσης που εκπροσωπούν σχεδόν το 1/3 του συνολικού κόστους κατασκευής και οι θαλάσσιες εγκαταστάσεις. Για ένα δεξαμενόπλοιο 266.000 m³ το κόστος ανέρχεται περίπου στα 290 εκατομμύρια δολάρια και γενικότερα εξαρτάται από την απόσταση από την αγορά, την ταχύτητα του πλοίου, την χωρητικότητα του προς την εγκατάσταση και την ετήσια παραγωγή στην μονάδα υγροποίησης.

Στο λειτουργικό κόστος των μεταφορών με LNG ανήκουν η συντήρηση, τα λιμενικά και κεφαλαιακά τέλη, οι φόροι, τα καύσιμα για την υγροποίηση, την μεταφορά και την επαναεριοποίηση και την εξάτμιση η οποία λόγω του ότι εκπέμπει CO₂ έχει πρόστιμο [25].

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή έγινε μια επιστημονική ανασκόπηση, που αφορά τις εγκαταστάσεις αεριοποίησης και υγροποίησης του φυσικού αερίου. Καταγράφηκαν πληροφορίες από την εξόρυξη έως την κατανάλωση του ΦΑ, με το κύριο μέρος της εργασίας να επικεντρώνεται στην υγροποιημένη του μορφή και στις μονάδες υγροποίησης και επανααεριοποίησής του. Δόθηκαν, παράλληλα, ονομαστικά, μονάδες υγροποίησης και επανααεριοποίησης ενώ περιγράφηκαν και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται.

Η συλλογή των παραπάνω πληροφοριών, ήταν απαραίτητη ώστε να απαντηθούν οι βασικές ερωτήσεις της εργασίας και να κατανοηθούν οι στόχοι της. Ερωτήσεις και στόχοι, που αφορούν τους λόγους υγροποίησης του ΦΑ, τις τεχνολογίες και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την υγροποίηση και επανααεριοποίηση του και τις ενεργειακές ανάγκες που απαιτούνται σε αυτές τις εγκαταστάσεις. Παράλληλα και αξιολόγηση του ΦΑ συγκριτικά με τα υπόλοιπα καύσιμα.

7.1 Λόγοι υγροποίησης

Όσο αναφορά τους λόγους υγροποίησης του ΦΑ, ένας σημαντικός λόγος, είναι πως όταν υγροποιείται, ο όγκος του μειώνεται κατά 600 φορές. Αυτό, δεν συναντάται σε κανένα άλλο καύσιμο σε τόσο υψηλό βαθμό, κάτι που του δίνει την δυνατότητα να μεταφέρεται σε μεγάλες ποσότητες σε υγρή μορφή. Η μεταφορά του είναι σημαντική, μιας το καύσιμο αυτό δεν υπάρχει παντού και η μεταφορά του μέσω θαλάσσης είναι μονόδρομος. Επίσης, το LNG μπορεί να αξιοποιηθεί ως καύσιμο, με το θετικό πως έχει λιγότερες εκπομπές ρύπων, συγκριτικά με άλλα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Εκπέμπει έως και 30% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα σε σχέση με το πετρέλαιο και φτάνει και 50% λιγότερους ρύπους σε σχέση με τον άνθρακα, ενώ οι εκπομπές μονοξειδίου του αζώτου, μονοξειδίου του θείου και αιωρούμενων σωματιδίων είναι ελάχιστες. Είναι φανερό, λοιπόν, πως από περιβαλλοντικής άποψης συμφέρει η υγροποίησή του. Ως προς, όμως, την υγροποίησή του για μεταφορά, πρέπει πάντα να συγκρίνεται με την μεταφορά του με αγωγούς. Έτσι, η μεταφορά του ως LNG είναι κερδοφόρα όταν οι χερσαίες και θαλάσσιες αποστάσεις μεγάλες, όπως Νορβηγία-Ιταλία (χερσαίες) και Ελλάδα-Αλγερία (θαλάσσιες).

7.2 Τεχνολογίες και εξοπλισμός υγροποίησης

Σχετικά με τον εξοπλισμό για την υγροποίηση, σε όλες τις μονάδες υγροποίησης ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι παρόμοιος. Χρησιμοποιούνται συμπυκνωτές, εναλλάκτες θερμότητας, αντλίες, ψυκτικά μέσα μέσα, διαστολείς και βαλβίδες στραγγαλισμού. Η διαφορά ανάμεσα στις μονάδες είναι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται. Αυτό σημαίνει διαφορετικό αριθμό συμπυκνωτών, ψυκτικών μέσων και εναλλακτών θερμότητας. Αλλάζουν, δηλαδή, οι θερμοδυναμικοί κύκλοι. Εν ολίγοις, το ΦΑ ακολουθεί περνάει διαδοχικά από εναλλάκτες

θερμότητες όπου ψύχεται μέχρι να φτάσει την επιθυμητή θερμοκρασία των $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ ή από συμπυκνωτές όπου συμπυκνώνεται. Ο σχεδιασμός μιας τέτοιας εγκατάστασης εξαρτάται από τον όγκο εισαγωγής και εξαγωγής του φυσικού αερίου, την χωρητικότητα της μονάδας και το αρχικό κεφάλαιο που διατίθεται. Σημαντικό ρόλο, ακόμη, έχουν οι συνθήκες που υπάρχουν στο περιβάλλον μιας εγκατάστασης, αφού το εξωτερικό περιβάλλον μπορεί να τις αξιοποιήσει για να μειώσει τις ενεργειακές ανάγκες της. Για παράδειγμα, έχει σημασία αν εκμεταλλεύεται το θαλασσινό νερό αν βρίσκεται σε παραθαλάσσια περιοχή ή την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Κάθε μονάδα, λοιπόν, μπορεί να είναι μοναδική.

7.3 Τεχνολογίες και εξοπλισμός αεριοποίησης

Ως προς τον εξοπλισμό των χερσαίων και πλωτών μονάδων αεριοποίησης που ακολουθούν, χρησιμοποιούνται επίσης αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας και εργαζόμενα μέσα που θερμαίνουν το LNG με σκοπό να το φέρουν σε αέρια μορφή. Όπως και στην υγροποίηση, έτσι και εδώ, κάθε χερσαία εγκατάσταση μπορεί να διαφέρει ως προς τα εργαζόμενα μέσα ή τον αριθμό εναλλακτών που χρησιμοποιούν. Πριν αεριοποιηθεί, το ΥΦΑ περνάει από έναν ή περισσότερους κύκλους θέρμανσης ανάλογα την ποσότητα, τα εργαζόμενα μέσα και την ενέργεια που μπορεί να εκμεταλλευτεί από το περιβάλλον η μονάδα, ώστε τελικά να αεριοποιηθεί. Αξιοσημείωτο είναι οι πλωτές μονάδες αποθήκευσης και επανααεριοποίησης FSRU, που εγκαθίστανται στην θάλασσα, χωρίς να δεσμεύουν μέρος της στεριάς. Σε αυτές τις μονάδες είναι ότι εύκολα μπορούν να αποδεσμευτούν και να αποχωρήσουν από ένα μέρος. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι χώρες μπορούν να συμφωνήσουν για μακροπρόθεσμες συμβάσεις, ώστε να προμηθεύονται LNG για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μέχρι να καλυφθούν ενεργειακές ανάγκες. Αυτό, προσθέτει τεράστια ευελιξία τόσο στην χώρα όσο και στην πλωτή μονάδα, η οποία μπορεί να επανααεριοποιεί όποτε της ζητείται. Οι μονάδες αυτές, έχουν τον ίδιο τρόπο αεριοποίησης του LNG, με την διαφορά του ότι προσπαθούν να εκμεταλλευτούν στο έπακρο το περιβάλλον γύρω τους μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.

7.4 Ενεργειακές ανάγκες υγροποίησης και αεριοποίησης

Σχετικά με τις ενεργειακές ανάγκες υγροποίησης και αεριοποίησης του ΦΑ, είναι ξεκάθαρο πως η υγροποίηση απαιτεί μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας ανάμεσα στις δύο. Αυτό οφείλεται, αρχικά, στο ότι η ψύξη πρέπει να γίνει σε πολύ χαμηλή θερμοκρασία και ακόμη, επειδή κατά την αεριοποίηση, υπάρχει η δυνατότητα να εκμεταλλευτεί το περιβάλλον, η θάλασσα ή ο ατμοσφαιρικός αέρας. Επιπρόσθετα, κατά την αποθήκευση του LNG σε δεξαμενές, ένα μέρος του εξατμίζεται οπότε χρειάζεται να περάσει από κύκλο υγροποίησης ξανά. Στο σημείο αυτό, εξαρτάται από την μονάδα αν μπορεί να εκμεταλλευτεί και να χρησιμοποιήσει το εξατμισμένο ΦΑ ως καύσιμο για άλλες λειτουργίες της.

Στην αεριοποίηση, τόσο οι χερσαίες όσο και πλωτές μονάδες, κάνουν προσπάθεια να ανακτήσουν ενέργεια από την υγροποίηση, στην οποία καταναλώνεται το μεγαλύτερο μέρος

της ενέργειας που χρειάζεται, για να φτάσει το ΦΑ στον καταναλωτή. Γίνεται, έτσι, λόγος για εξέργεια. Η εξέργεια μπορεί να αυξήσει την συνολική απόδοση του συστήματος, κάτι που είναι και σημαντικό σε μια εγκατάσταση.

7.5 Πορεία εργασίας

Κατά την συγγραφή της εργασίας, παρουσιάστηκαν δυσκολίες στην εύρεση άρθρων με πληροφορίες σχετικές με τον ειδικό εξοπλισμό που χρειάζονται οι μονάδες για να εκτελέσουν τις λειτουργίες τους. Οι πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά συμπυκνωτών, εναλλακτών θερμότητας και αντλιών ήταν ελάχιστες, κάτι που βέβαια δικαιολογείται, αφού κάθε εγκατάσταση όπως προαναφέρθηκε μπορεί να χρειάζεται μηχανήματα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Εφόσον οι πληροφορίες αυτές ήταν πιο προσιτές, το κομμάτι του εξοπλισμού θα καλυπτόταν περισσότερο.

Στην πορεία της εργασίας, προέκυψαν και άλλα ενδιαφέροντα κομμάτια τα οποία θα μπορούσαν να είχαν αναλυθεί περισσότερο όπως αυτό των FSRU και της μεταφοράς ΦΑ μέσω αγωγών, αλλά δεν είχαν τεθεί ως στόχοι από την αρχή.

7.6 Μελλοντική έρευνα

Για περαιτέρω έρευνα ενδιαφέρον θέματα είναι :

- Εξεργειακή ανάλυση, αύξηση του ποσοστού ανάκτησης ενέργειας
- Συνθήκες αποθήκευσης LNG στις δεξαμενές και μείωση του ποσοστού εξάτμισής του
- Μείωση κατανάλωσης ενέργειας στις FSRU, εκμετάλλευση του θαλάσσιου περιβάλλοντος
- Βέλτιστη λειτουργία των μηχανημάτων που συμμετέχουν στην υδροποίηση και αεριοποίηση
- Εκμετάλλευση εξάτμισης LNG από τις μονάδες αποθήκευσης

Φαίνεται ότι το Υδροποιημένο Φυσικό Αέριο, θα απασχολήσει την κοινωνία άμεσα τα επόμενα χρόνια. Το ΦΑ, μέσα από την δυνατότητα της υδροποίησης, είναι και πρόκειται να γίνει ακόμη περισσότερο, προσιτό στους καταναλωτές . Ένα καύσιμο που είναι φιλικό προς το περιβάλλον, που μπορεί να μεταφέρεται σε μεγάλες ποσότητες με ευκολία και που έχει ισάξιες δυνατότητες με τα υπόλοιπα καύσιμα, το καθιστά χρήσιμο για τα επόμενα χρόνια.. Σε καιρούς που χρειάζεται περισσότερη παραγωγή ενέργειας εξαιτίας της αυξανόμενης κατανάλωσής της, η κοινωνία βρίσκει στο φυσικό αέριο δυνατότητες που θα βοηθήσουν ως «πέρασμα» από την εποχή των ορυκτών καυσίμων σε αυτή των Α.Π.Ε. Δηλαδή σε μια ακόμη πιο πράσινη λύση.

Αναφορές

- [1] Exxon Mobil, “Outlook for Energy A View to 2030.”
- [2] B. B. Kanbur, L. Xiang, S. Dubey, F. H. Choo, and F. Duan, “Cold utilization systems of LNG: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79. Elsevier Ltd, pp. 1171–1188, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.161.
- [3] ΕΛΣΤΑΤ, “ΔΕΛΤΙΟ ΤΥΠΟΥ.” [Online]. Available: www.cres.gr
- [4] HAEE Hellenic Association for Energy Economic, “2020 | Greek Energy Market Report |.”
- [5] Eurostat, “Energy balances - Energy - Eurostat.” <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances> (accessed May 28, 2022).
- [6] N. Abas, A. Kalair, and N. Khan, “Review of fossil fuels and future energy technologies,” *Futures*, vol. 69, pp. 31–49, May 2015, doi: 10.1016/J.FUTURES.2015.03.003.
- [7] N. L. Panwar, S. C. Kaushik, and S. Kothari, “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1513–1524, Apr. 2011, doi: 10.1016/J.RSER.2010.11.037.
- [8] Y. Lu, Z. A. Khan, M. S. Alvarez-Alvarado, Y. Zhang, Z. Huang, and M. Imran, “sustainability A Critical Review of Sustainable Energy Policies for the Promotion of Renewable Energy Sources”, doi: 10.3390/su12125078.
- [9] R. Haas, C. Panzer, G. Resch, M. Ragwitz, G. Reece, and A. Held, “A historical review of promotion strategies for electricity from renewable energy sources in EU countries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 1003–1034, Feb. 2011, doi: 10.1016/J.RSER.2010.11.015.
- [10] F. Dellano-Paz, A. Calvo-Silvosa, S. Iglesias Antelo, and I. Soares, “The European low-carbon mix for 2030: The role of renewable energy sources in an environmentally and socially efficient approach,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48, pp. 49–61, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2015.03.032.

- [11] D. Pashchenko, “Natural gas reforming in thermochemical waste-heat recuperation systems: A review,” *Energy*, vol. 251, p. 123854, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.ENERGY.2022.123854.
- [12] I. Kostakis, S. Lolos, and E. Sardianou, “Residential natural gas demand: Assessing the evidence from Greece using pseudo-panels, 2012–2019,” *Energy Econ*, vol. 99, p. 105301, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.ENECO.2021.105301.
- [13] A. H. Kakaee, A. Paykani, and M. Ghajar, “The influence of fuel composition on the combustion and emission characteristics of natural gas fueled engines,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38. Elsevier Ltd, pp. 64–78, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.080.
- [14] Energy Information Administration(EIA), “Natural gas explained - U.S. Energy Information Administration (EIA).” <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/> (accessed Jun. 05, 2022).
- [15] National Geograpic Society, “Natural Gas | National Geographic Society.” <https://education.nationalgeographic.org/resource/natural-gas> (accessed Jun. 05, 2022).
- [16] I. Lee, J. Park, and I. Moon, “Key Issues and Challenges on the Liquefied Natural Gas Value Chain: A Review from the Process Systems Engineering Point of View,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 57, no. 17. American Chemical Society, pp. 5805–5818, May 02, 2018. doi: 10.1021/acs.iecr.7b03899.
- [17] ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε., “Ενεργειακό Μείγμα - Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης Α.Ε. - ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε.” <https://www.dapeep.gr/viosimi-anaptixi/energeiako-meigma/> (accessed May 21, 2022).
- [18] S. Faramawy, T. Zaki, and A. A. E. Sakr, “Natural gas origin, composition, and processing: A review,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 34. Elsevier B.V., pp. 34–54, Aug. 01, 2016. doi: 10.1016/j.jngse.2016.06.030.
- [19] C. P. Vetter, L. A. Kuebel, D. Natarajan, and R. A. Mentzer, “Review of failure trends in the US natural gas pipeline industry: An in-depth analysis of transmission and distribution system incidents,” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 60, pp. 317–333, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.JLP.2019.04.014.
- [20] Δ.Ε.Σ.Φ.Α., “LNG-GR_Μελέτη Ανάπτυξης ΕΣΦΑ 2020-2029_280719”.
- [21] ΔΕΣΦΑ, “LNG TANKERS,” 2019, doi: 10.834.137.

- [22] J. A. Fay, “RISKS OF LNG AND LPG,” 1980. [Online]. Available: www.annualreviews.org
- [23] S. Kumar *et al.*, “LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 12. Elsevier Ltd, pp. 4264–4273, 2011. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.06.035.
- [24] International Gas Union, “Sponsored by 2021 WORLD LNG REPORT Knowledge Partner,” 2021.
- [25] M. Ulvestad and I. Overland, “Natural gas and CO₂ price variation: Impact on the relative cost-efficiency of LNG and pipelines,” *International Journal of Environmental Studies*, vol. 69, no. 3, pp. 407–426, Jun. 2012, doi: 10.1080/00207233.2012.677581.
- [26] M.-K. H. H. S.-Y. ung K. an nd S.-C. S. Dong-Hyun Lee, “Research of design challenges and new technologies for floating LNG,” *Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan University, Busan, Korea*, 2014.
- [27] EIA - Independent Statistics and Analysis, “U.S. Energy Information Administration - EIA - Independent Statistics and Analysis.” <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=20972> (accessed Jun. 29, 2022).
- [28] Gastrade, “The Company - Gastrade A.E.” <https://www.gastrade.gr/en/the-company/> (accessed Jun. 29, 2022).
- [29] J. Abiteboul, “The LNG industry Acknowledgements The LNG industry in 2020 Profile Editorial Key figures Contents.”
- [30] J. Pospíšil, P. Charvát, O. Arsenyeva, L. Klimeš, M. Špiláček, and J. J. Klemeš, “Energy demand of liquefaction and regasification of natural gas and the potential of LNG for operative thermal energy storage,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 99. Elsevier Ltd, pp. 1–15, Jan. 01, 2019. doi: 10.1016/j.rser.2018.09.027.
- [31] M. J. Economides and D. A. Wood, “The state of natural gas,” *J Nat Gas Sci Eng*, vol. 1, no. 1–2, pp. 1–13, Jul. 2009, doi: 10.1016/j.jngse.2009.03.005.
- [32] Statistical Review of World Energy, “bp Statistical Review of World Energy 2020,” Jun. 2020. [Online]. Available: www.bp.com/statisticalreview.
- [33] ΔΕΠΑ, “Εμπόριο Φυσικού Αερίου - ΔΕΠΑ ΕΜΠΟΡΙΑΣ Α.Ε.” <https://www.depa.gr/emporio-fysikou-aeriu/> (accessed May 26, 2022).

- [34] W. Lim, K. Choi, and I. Moon, “Current status and perspectives of Liquefied Natural Gas (LNG) plant design,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 52, no. 9. pp. 3065–3088, Mar. 06, 2013. doi: 10.1021/ie302877g.
- [35] L. Dong, S. Wei, S. Tan, and H. Zhang, “GTL or LNG: Which is the best way to monetize ‘stranded’ natural gas?,” *Pet Sci*, vol. 5, no. 4, pp. 388–394, 2008, doi: 10.1007/s12182-008-0063-8.
- [36] A. C. Vosloo, “Fischer-Tropsch: a futuristic view,” 2001. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/fuproc
- [37] S. M. Jokar, D. A. Wood, S. Sinehbaghizadeh, P. Parvasi, and J. Javanmardi, “Transformation of associated natural gas into valuable products to avoid gas wastage in the form of flaring,” *J Nat Gas Sci Eng*, vol. 94, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jngse.2021.104078.
- [38] M. Lev-On, “GHG Emissions from LNG Operations,” 2015.
- [39] M. Ulvestad and I. Overland, “Natural gas and CO₂ price variation: Impact on the relative cost-efficiency of LNG and pipelines,” *International Journal of Environmental Studies*, vol. 69, no. 3, pp. 407–426, Jun. 2012, doi: 10.1080/00207233.2012.677581.
- [40] N. Paltrinieri, A. Tugnoli, and V. Cozzani, “Hazard identification for innovative LNG regasification technologies,” *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 137, pp. 18–28, 2015, doi: 10.1016/j.res.2014.12.006.
- [41] I. A. Fernández, M. R. Gómez, J. R. Gómez, and Á. B. Insua, “Review of propulsion systems on LNG carriers,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67. Elsevier Ltd, pp. 1395–1411, Jan. 01, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.09.095.
- [42] I. Animah and M. Shafiee, “Application of risk analysis in the liquefied natural gas (LNG) sector: An overview,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 63. Elsevier Ltd, Jan. 01, 2020. doi: 10.1016/j.jlp.2019.103980.
- [43] Jeremy Beard, Mark Roberts, and Bill Kennington, “Air Products article_LNG 3,” 2017.
- [44] I. Air Products and Chemicals, “Large to Mega-scale LNG plant capabilities for capacity >2 MTPA Benefit from economies of scale and proven technology Liquefaction capabilities and support,” 2021.

- [45] O. Akinsipe, A. Anozie, and D. Babatunde, “A study of LNG processes to determine the effect of end flash systems on efficiency,” *Archives of Thermodynamics*, vol. 41, no. 2, pp. 35–63, 2020, doi: 10.24425/ather.2020.132959.
- [46] W. R. Qualls and P. Hunter, “A Focus on Balance-A Novel Approach Taking the Phillips Optimized Cascade LNG Process Into the Future,” 2003.
- [47] Joe M. Kang, “Sponsored by 2021 WORLD LNG REPORT Knowledge Partner,” 2021.
- [48] J. Szargut and I. Szczygiel, “Utilization of the cryogenic exergy of liquid natural gas (LNG) for the production of electricity,” *Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 827–837, 2009, doi: 10.1016/j.energy.2009.02.015.
- [49] L. N. Guo, B. L. An, L. B. Chen, J. X. Chen, J. J. Wang, and Y. Zhou, “Progress of liquefied natural gas cold energy utilization,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jun. 2019, vol. 502, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/502/1/012148.
- [50] M. Romero Gómez, R. Ferreiro Garcia, J. Romero Gómez, and J. Carbia Carril, “Review of thermal cycles exploiting the exergy of liquefied natural gas in the regasification process,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 781–795, Oct. 2014, doi: 10.1016/J.RSER.2014.07.029.
- [51] M. A. R. Ibrahim Dincer, “Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development - Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen - Βιβλία Google,” *2nd edition*, 2013.
https://books.google.gr/books?hl=el&lr=&id=FrUolHxhGVYC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Exergy:+energy,+environment+and+sustainable+development&ots=9Kjl9Y6e79&sig=XI7ZDDBDy7AEEeMX8j52ExFgXks&redir_esc=y#v=onepage&q&f=true (accessed Jul. 05, 2022).
- [52] T. Y. Kott and A. Losz, “How New and Emerging LNG Importers Are Reshaping the Waterborne Gas Market,” 2017. [Online]. Available: www.sipa.columbia.edu
- [53] agl, “Floating Storage and Regassification Units,” Oct. 2017. [Online]. Available: www.engageagl.com.au
- [54] D. A. Wood and M. Kulitsa, “A review: Optimizing performance of Floating Storage and Regasification Units (FSRU) by applying advanced LNG tank pressure management strategies,” *International Journal of Energy Research*, vol.

42, no. 4. John Wiley and Sons Ltd, pp. 1391–1418, Mar. 25, 2018. doi: 10.1002/er.3883.

- [55] King and Spalding, “An Overview of LNG Import Terminals in Europe,” 2018.
- [56] Global Energy Monitor, “Tracker Map - Global Energy Monitor.” <https://globalenergymonitor.org/projects/europe-gas-tracker/tracker-map/> (accessed May 09, 2022).
- [57] BUNKER NAVIGATOR INTRODUCTION, “SEA LNG.” <https://sea-lng.org/bunker-navigator/> (accessed May 31, 2022).
- [58] DESFA, “Yearly NNGS Data - desfa.gr.” <https://www.desfa.gr/en/regulated-services/transmission/pliroforisimetaforas-page/ng-market-data/other-data> (accessed Jun. 01, 2022).
- [59] Δ.Ε.Σ.Φ.Α., “ΔΕΣΦΑ Α.Ε. - desfa.gr.” <https://www.desfa.gr/> (accessed Jun. 01, 2022).
- [60] ΔΕΣΦΑ, “Εγκατάσταση Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ)-Ρεβυθούσα”.
- [61] Energy Information Administration (EIA), “Natural gas pipelines - U.S. Energy Information Administration (EIA).” <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/natural-gas-pipelines.php> (accessed May 24, 2022).
- [62] S. Bouzarovski, M. Bradshaw, and A. Wochnik, “Making territory through infrastructure: The governance of natural gas transit in Europe,” *Geoforum*, vol. 64, pp. 217–228, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.GEOFORUM.2015.06.022.
- [63] “DIRECTORATE GENERAL FOR INTERNAL POLICIES POLICY DEPARTMENT A: ECONOMIC AND SCIENTIFIC POLICIES INDUSTRY, RESEARCH AND ENERGY An Assessment of the Gas and Oil Pipelines in Europe AN EXTENSIVE BRIEFING NOTE,” 2009.