

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Θερμότητας

Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Μελέτη του Χρόνου Καθυστέρησης Ανάφλεξης των Βασικών
Συστατικών του Φυσικού Αερίου – An Ignition Delay Time
Study of Natural Gas main components*

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή : Γεώργιος Δρυμωνίτης

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Μαρία Φούντη

Οκτώβριος 2015

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά την Καθηγήτρια Κα Φούντη Μαρία για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον διδάκτορα κ. Γεώργιο Βουρλιωτάκη για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε και για τη σημαντική βοήθεια που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Ήταν πάντα διαθέσιμος, παρά την απόσταση που μας χώριζε λόγω της ταυτόχρονης εκπλήρωσης της στρατιωτικής μου θητείας, να ασχοληθεί με κάθε απορία μου σχετική με ακαδημαϊκά ζητήματα, εντός και εκτός των πλαισίων της παρούσας εργασίας και να με κατευθύνει στα βήματα που έπρεπε να ακολουθήσω. Τον ευχαριστώ θερμά για τις ιδέες που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας και την υποστήριξη που μου παρείχε.

Επιπλέον, ευχαριστώ θερμά τον διδάκτορα κ. Χρήστο Κεραμιώτη καθώς και τον υποψήφιο διδάκτορα Ζήση Μαλλιωτάκη για την αμέριστη βοήθεια και όλες τις συμβουλές και τα εφόδια που μου παρείχαν για την ολοκλήρωση της εργασίας, το χρόνο και την άψογη συνεργασία μας εντός του εργαστηρίου.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και τις φίλες των φοιτητικών μου χρόνων, που έκαναν τα χρόνια αυτά μία πραγματικά αξέχαστη εμπειρία. Βέβαια, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, των οποίων η πίστη στις δυνατότητές μου αποτέλεσε αρωγός σε όλους τους στόχους και τα όνειρά μου, και οι οποίοι με ανέθρεψαν σε ένα ειδυλλιακό περιβάλλον χωρίς καμία στέρηση.

Την παρούσα εργασία την αφιερώνω στον πατέρα μου Ιωάννη Δρυμωνίτη.

Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης μιγμάτων των τριών βασικών συστατικών του φυσικού αερίου: του Μεθανίου (CH_4), του Αιθανίου (C_2H_6) και του Προπανίου (C_3H_8). Πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν σε σωλήνα κρουστικού κύματος (ST) και μηχανή ταχείας συμπίεσης (RCM) χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση με τρία μοντέλα αναλυτικής χημικής κινητικής. Η χρήση των μοντέλων αυτών είναι αναγκαία για τη διεξαγωγή μελετών εναλλαξιμότητας καυσίμων σε πρακτικές εφαρμογές (Αεριοστρόβιλοι και ΜΕΚ). Η μελέτη κάλυψε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας: πίεση, στοιχειομετρία και αραίωση μίγματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και του λογαρίθμου των χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης. Επίσης, αναδεικνύουν τη σημασία χρήσης αναλυτικής χημικής κινητικής και, εν γένει, δείχνουν ότι ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης μειώνεται με την προσθήκη υδρογόνου στο εκάστοτε μίγμα και την αύξηση της πίεσης.

Abstract

The present thesis considers the three main components of natural gas mixtures, namely Methane, Ethane and Propane, and investigates their ignition delay time. The experimental data, obtained from chemical shock tubes and rapid compression machines, were used to compare with three detailed chemical kinetic models. The use of these models is of great importance to conduct fuel interchangeability studies in practical applications, such as Gas Turbines and Internal Combustion Engines. The study covered a wide range of operating conditions; pressure, equivalence ratio and dilution. The results suggest that the correlation between the reciprocal of temperature and the logarithm of the ignition delay times is largely linear. The work also highlights the importance of detailed chemical kinetics and, generally, indicates that the ignition delay time decreases by either adding hydrogen to the considered mixture or by increasing the pressure.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Σύνοψη	3
Abstract	4
Κεφάλαιο 1. Το Ενεργειακό Ζήτημα	8
1.1 Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας	8
1.2 Παγκόσμιες τάσεις ενέργειας – Κατανάλωση Ενέργειας	9
Κεφάλαιο 2. Τοπική Σύσταση Ορυκτών Καυσίμων	14
2.1 Επισκόπηση	14
2.2 Φυσικό Αέριο	17
2.2.1..Επισκόπηση	17
2.2.2 Παραγωγή	18
2.2.3 Αποθέματα	19
2.2.4 Σύνθεση	20
2.2.5 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά του Φυσικού Αερίου	21
2.2.6 Διαδικασία Μεταφοράς και Ροής Φυσικού Αερίου	24
2.2.7 Εναλλαξιμότητα Φυσικού Αερίου και Δείκτης Wobbe	25
Κεφάλαιο 3. Ευελιξία Εναλλαγής Καυσίμων σε Συστήματα Καύσης	29
3.1 Εισαγωγή στην Ευελιξία Καυσίμων Αεριοστρόβιλων	29
3.2 Καύσιμα Αεριοστρόβιλων	31
3.3 Εφαρμογές Καυσίμων	32
3.3.1 Κλασσικά Καύσιμα Αεριοστρόβιλων	32
3.3.2 Μη Κλασσικά καύσιμα αεριοστρόβιλων	34
3.3.2.1 Αργό Πετρέλαιο	35
3.3.2.2 Παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών	38
3.3.2.3 Συνθετικό Αέριο και Συνθετικά Καύσιμα	40
3.3.2.4 Ανανεώσιμα Υγρά – Βιοκαύσιμα	40

Κεφάλαιο 4. Φυσικό Αέριο και Μηχανές Εσωτερικής Καύσης	43
4.1 Επισκόπηση	43
4.2 Χαρακτηριστικά Καύσης - Εκπομπών στις Μ.Ε.Κ	46
4.2.1 Στροπή Ταχύτητα Καύσης	47
4.2.2 Αυτανάφλεξη	48
4.2.3 Σχηματισμός Ρύπων	49
4.2.4 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	51
Κεφάλαιο 5. Μίγματα Υδρογόνου – Φυσικού Αερίου	52
5.1 Επισκόπηση	52
5.2 Χαρακτηριστικά Καύσης	55
5.3 Πλεονεκτήματα Μιγμάτων Υδρογόνου – Φυσικού Αερίου	57
Κεφάλαιο 6. Υπόβαθρα της μελέτης της καύσης	58
Κεφάλαιο 7. Πειραματικές Διατάξεις	62
7.1 Σωλήνας Κρουστικού Κύματος	62
7.2 Μηχανή Ταχείας Συμπίεσης	65
Κεφάλαιο 8. Μοντελοποίηση Χημικής Κινητικής	70
8.1 Μελέτη χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης μιγμάτων Φυσικού αερίου με υπολογιστική προσομοίωση αναλυτικής χημικής κινητικής	70
8.2. Το υπολογιστικό πρόγραμμα Chemkin	72
8.3. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	73
8.3.1 Μίγματα Καθαρού Μεθανίου σε Πίεση 1,7 atm , 1,3 atm, 1,2 atm	74
8.3.2 Υποστοιχειομετρικά Μίγματα Μεθανίου/Υδρογόνου σε Πίεση 1 και 10 atm	75
8.3.3 Μίγματα Μεθανίου αραιωμένα με N ₂ και CO ₂	77
8.3.4 Υποστοιχειομετρικά Μίγματα Καθαρού Μεθανίου αραιωμένα με N ₂ και CO ₂	78
8.3.5 Στοιχειομετρικά Μίγματα Καθαρού Μεθανίου αραιωμένα με N ₂ και CO ₂	79
8.3.6 Πλούσια Μίγματα Καθαρού Μεθανίου αραιωμένα με N ₂ και CO ₂	80
8.3.7 Μίγματα Καθαρού Αιθανίου σε Πίεση 1,4 atm και 1,3 atm	81
8.3.8 Στοιχειομετρικά Μίγματα Καθαρού Αιθανίου σε Πίεση 1.2 , 4 και 16 atm	82
8.3.9 Στοιχειομετρικά Μίγματα Αιθανίου/Υδρογόνου σε Πιέσεις 1.2, 4 και 16 atm	84

8.3.10 Μίγματα Καθαρού Προπανίου ευρισκόμενα σε Ίδιες Συνθήκες Πίεσης	85
8.3.11 Μίγματα Προπανίου/Υδρογόνου ευρισκόμενα σε Ίδιες Συνθήκες Πίεσης	88
8.3.12 Μίγματα CH₄/C₂H₆/C₃H₈ Ίδιας Σύνθεσης & Στοιχειομετρίας	91
8.3.13 Μίγματα CH₄/C₂H₆/C₃H₈ Διαφορετικής Σύνθεσης & Στοιχειομετρίας	93
Κεφάλαιο 9. Συμπεράσματα	95
9.1 Σύνοψη	95
9.2 Κύρια Συμπεράσματα της Εργασίας	96
9.3 Προτάσεις Μελλοντικής Εργασίας	97
Κεφάλαιο 10. Βιβλιογραφικές Αναφορές	98

1. Κεφάλαιο 1

Το Ενεργειακό Ζήτημα

1.1. Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας

International Energy Agency

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency) ιδρύθηκε το Νοέμβριο του 1974 και όλα αυτά τα χρόνια έχει κερδίσει την αναγνώριση ως μία από τις παγκοσμίως πιο έγκυρες πηγές για στατιστικές που αφορούν την ενέργεια. Οι πηγές αυτές, που περιλαμβάνουν ετήσιες μελέτες για το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, τον άνθρακα, τον ηλεκτρική ενέργεια και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αποτελούν απαραίτητα εργαλεία για εταιρείες και μελετητές που εμπλέκονται με τον τομέα της ενέργειας και ακολουθούν χάραξη ενεργειακής πολιτικής.

Τα στατιστικά στοιχεία που παρέχει ο Οργανισμός αυτός περιέχουν έγκαιρα και ευκόλως παρουσιαζόμενα και κατανοητά στοιχεία σχετικά με την παροχή, την μετατροπή και την κατανάλωση όλων των σημαντικών πηγών ενέργειας. Η συλλογή και η ανάλυση των στοιχείων αυτών είναι μία από τις σημαντικές λειτουργίες του Οργανισμού, όπως επίσης και :

1. Ο συντονισμός των εθνικών προσπαθειών για την εξοικονόμηση ενέργειας και την ανάπτυξη εναλλακτικών πηγών ενέργειας, καθώς και για τον περιορισμό της ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής οφειλόμενη στην ενέργεια.
2. Η διάδοση πληροφοριών σχετικά με την παγκόσμια αγορά ενέργειας.

Η ετήσια ‘**Παγκόσμια Ενεργειακή Κατάσταση (World Energy Outlook-WEO)**’ είναι η κύρια έκδοση του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, η οποία αναγνωρίζεται ευρέως ως η πιο αξιόπιστη πηγή για τις παγκόσμιες προβλέψεις και την ανάλυση της ενέργειας. Παρουσιάζει την κύρια πηγή για τις μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες τάσεις της αγοράς, εκτενή στατιστικά, αναλύσεις και συμβουλές και για τις κυβερνήσεις και για την επιχείρηση ενέργειας.

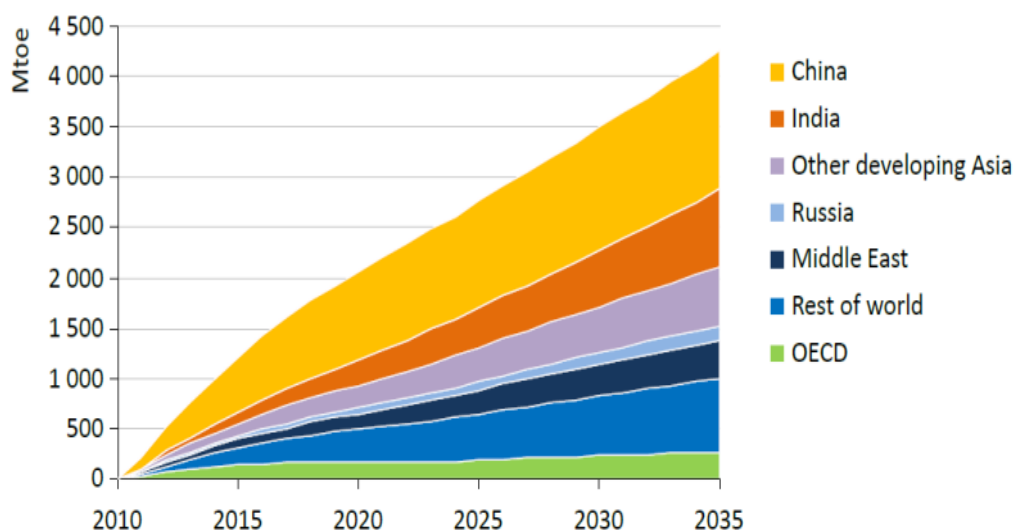
Σύμφωνα, λοιπόν, με την έκδοση αυτή, ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας τονίζει ότι χωρίς μια μεγάλη και τολμηρή αλλαγή της πολιτικής κατεύθυνσης, ο κόσμος θα μετατραπεί σε ένα ανασφαλές, μη αποδοτικό και υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα ενεργειακό σύστημα. Ακόμα, βέβαια, υπάρχει χρόνος για να ληφθούν μέτρα αλλά το παράθυρο της ευκαιρίας ολοένα και κλείνει.

Η ανάπτυξη, η ευημερία και η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού αναπόφευκτα θα οδηγήσουν σε αύξηση των ενεργειακών αναγκών κατά τις επόμενες δεκαετίες. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να σταματήσει η ανθρωπότητα να βασίζεται σε μη ασφαλείς και περιβαλλοντικά μη βιώσιμες χρήσεις την ενέργειας . Οι κυβερνήσεις θα πρέπει να θεσπίσουν αυστηρότερα μέτρα για την οδήγηση των επενδύσεων σε αποδοτικές τεχνολογίες με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Το πυρηνικό ατύχημα στη Φουκουσίμα, η αναταραχή στις περιοχές της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής και μια απότομη αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας το 2010 , που ώθησε τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε επίπεδα ρεκόρ, υπογραμμίζουν τον επείγοντα χαρακτήρα και την κλίμακα της πρόκλησης.

1.2. Παγκόσμιες Τάσεις Ενέργειας – Κατανάλωση Ενέργειας

Global Energy Trends – Energy Consumption

1) Κατανάλωση ανά περιοχή

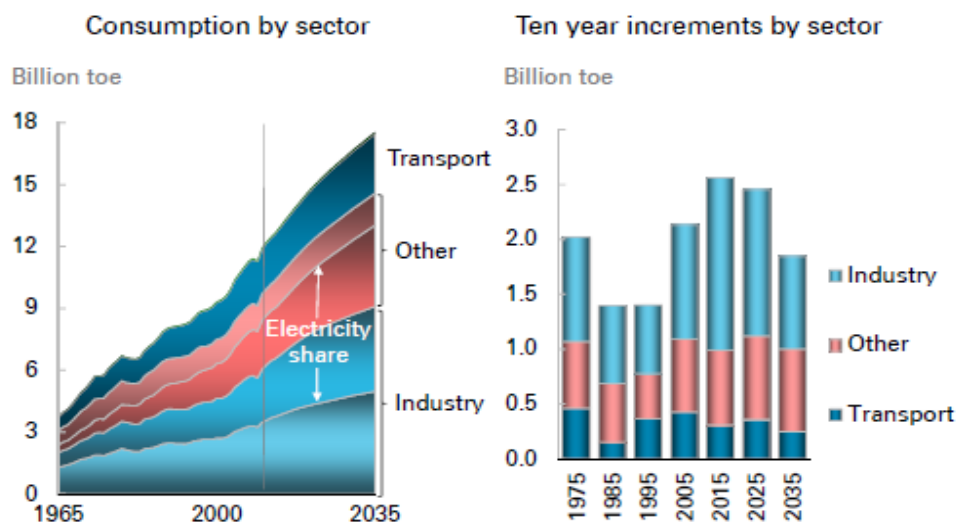


Εικόνα 1.1 . Αύξηση της Ζήτησης Πρωτογενούς Ενέργειας. Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξάνεται κατά 1/3 από το 2010 ως το 2035, με την Κίνα και την Ινδία να αντιπροσωπεύουν το 50% της αύξησης.

(1 toe = 11.63 MWh = 41,87 GJ)

- Η ζήτηση πρωτογενούς ενέργειας αυξάνεται κατά 41% μεταξύ του 2012 και του 2035, με αύξηση κατά μέσο όρο 1,5% ετησίως. Η ανάπτυξη επιβραδύνεται από 2,2% ετησίως για το 2005-2015, στο 1,7% ετησίως για το 2015-2025 και μόλις 1,1% ετησίως στην τελευταία δεκαετία.
- Βγαίνουμε από μία περίοδο πολύ μεγάλης αύξησης κατανάλωσης ενέργειας, καθοδηγούμενη από την εκβιομηχάνιση και την ηλεκτροδότηση των μη μελών του Οργανισμού Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ), όπως η Κίνα. Η δεκαετία 2002-2012 κατέγραψε τη μεγαλύτερη μέχρι σήμερα αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά όγκο και αυτό είναι απίθανο να ξεπεραστεί στο χρονοδιάγραμμα μας.
- Υπάρχει μια σαφής μακροπρόθεσμη στροφή στην αύξηση κατανάλωσης της ενέργειας από κράτη του ΟΟΣΑ σε κράτη που δεν ανήκουν σ' αυτόν. Σχεδόν όλη (95%) η προβλεπόμενη αύξηση είναι σε μη μέλη του ΟΟΣΑ με την κατανάλωση της ενέργειας να αυξάνεται κατά 2,3% ετησίως από το 2012 έως το 2035. Αντιθέτως, η κατανάλωση ενέργειας σε μέλη του ΟΟΣΑ μεγαλώνει κατά μόλις 0.2% ετησίως ολόκληρη την περίοδο και στην πραγματικότητα πέφτει από το 2030 και μετά.
- Η Κίνα έχει αναδειχθεί ως το κλειδί που συμβάλλει στην κατανάλωση , αλλά στο τέλος του χρονοδιαγράμματος η συμβολή της αρχίζει να εξασθενεί. Η συνεισφορά της Ινδίας αυξάνεται, σχεδόν ταιριάζει με αυτή της Κίνας στην τελευταία δεκαετία του διαγράμματος.

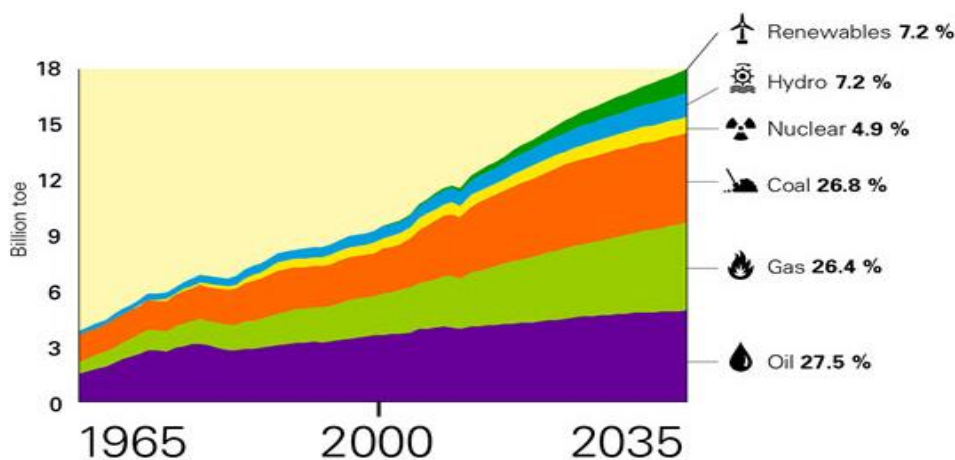
2) Κατανάλωση ανά τομέα



Εικόνα 1.2. Παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση ανά τομέα.

- Κατά τομέα, η Βιομηχανία παραμένει η κυρίαρχη πηγή αύξησης της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, τόσο άμεσα όσο και έμμεσα (με τη μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας). Η Βιομηχανία αντιπροσωπεύει περισσότερο από το ήμισυ της αύξησης κατανάλωσης ενέργειας το 2012 ως το 2035. Αυτό αντανακλά τον πρωτοφανή ρυθμό και την κλίμακα εκβιομηχάνισης στην Ασία. Η ενέργεια που καταναλώνεται στη βιομηχανία αυξάνεται κατά 2,6% κατά τη δεκαετία 2012-2035, αλλά πέφτει κατά μόνο 1% την τελευταία δεκαετία του χρονοδιαγράμματος καθώς η ταχεία εκβιομηχάνιση της Κίνας τελειώνει.
- Η επόμενη σημαντική συνιστώσα της αύξησης κατανάλωσης της ενέργειας είναι η ενέργεια που χρησιμοποιείται σε «άλλους» τομείς (κατοικίες, υπηρεσίες και γεωργία), κυρίως στη μορφή της ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την τελευταία δεκαετία, η ανάπτυξη αυτή και η χρήση ενέργειας στους παραπάνω τομείς φτάνει σε μέγεθος την κατανάλωση ενέργειας από τον τομέα της βιομηχανίας.
- Ο τομέας των μεταφορών συνεχίζει να παίζει ένα σχετικά μικρό ρόλο στην αύξηση κατανάλωσης της πρωτογενούς ενέργειας κατά τη διάρκεια του προβλεπόμενου χρονοδιαγράμματος, αυξανόμενος σταθερά αλλά υπολογίζεται ότι αποτελεί μόνο το 13% της συνολικής αύξησης το 2012 ως το 2035.

3) Κατανάλωση ανά καύσιμο



Εικόνα 1.3. Κατανάλωση Ενέργειας ανά καύσιμο

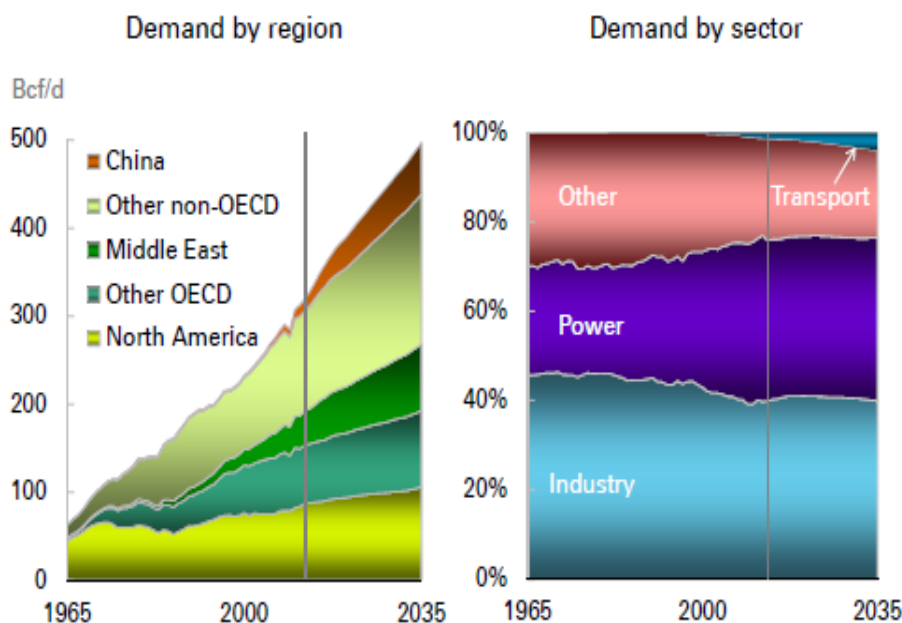
- Πετρέλαιο (Oil)

Το πετρέλαιο αναμένεται να είναι το καύσιμο με τη μικρότερη αύξηση κατανάλωσης, σε σχέση με τα άλλα βασικά είδη καυσίμων, ως το 2035, με αυξανόμενη ζήτηση του κατά μέσο όρο 0,8% ετησίως. Παρ' όλα αυτά, αυτό θα συνεχίσει να οδηγεί σε ζήτηση του πετρελαίου και άλλων υγρών καυσίμων, υπολογιζόμενη περίπου σε 19 εκατομμύρια βαρέλια περισσότερα το 2035 σε σχέση με το 2012.

- Γαιάνθρακας (Coal)

Μετά το πετρέλαιο, ο γαιάνθρακας αναμένεται να έχει τη μικρότερο ρυθμό αύξησης της κατανάλωσης του, με τις τιμές της ζήτησης του να αυξάνονται κατά μέσο όρο 1,1% ετησίως ως το 2035. Κατά τη διάρκεια του χρονικού διαγράμματος, η αύξηση αυτή μειώνεται σε 0,6% ετησίως μετά το 2020. Σχεδόν όλη (87%) η αύξηση στη ζήτηση του άνθρακα για το 2035 αναμένεται να οφείλεται στην Κίνα και την Ινδία, των οποίων το –από κοινού–μερίδιο στην παγκόσμια κατανάλωση άνθρακα θα αυξηθεί από 58% το 2012 σε 64% το 2035.

- Φυσικό Αέριο (Natural Gas)



Εικόνα 1.4. Ζήτηση του Φυσικού Αερίου ανά περιοχή και ανά τομέα χρήσης του.

- Η παγκόσμια ζήτηση για το φυσικό αέριο θα αυξηθεί κατά 1,9% ετησίως πάνω από την μελετημένη περίοδο , φθάνοντας τα 497 δισεκατομμύρια

κυβικά πόδια (Billion Cubic Feet per Day – Bcf/d) το 2035, με τη ζήτηση από μη μέλη του ΟΟΣΑ να αυξάνεται κατά 2,7% ετησίως, ενώ από μέλη του ΟΟΣΑ 1% ετησίως.

- Στον ΟΟΣΑ, το φυσικό αέριο θα ξεπεράσει το πετρέλαιο ως το κυρίαρχο καύσιμο από το 2031, φτάνοντας να καταλαμβάνει ένα μερίδιο της τάξης του 31% στην πρωτογενή ενέργεια ως το 2035. Όμως, εκτός του ΟΟΣΑ, το φυσικό αέριο παραμένει στην τρίτη θέση, πίσω από τον άνθρακα και το πετρέλαιο, με μερίδιο της πρωτογενούς ενέργειας περίπου 24% μέχρι το 2035.
- Στα κράτη-μέλη του ΟΟΣΑ , η αύξηση της ζήτησης του φυσικού αερίου οφείλεται κυρίως στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής (17 Bcf/d , 1,2% ετησίως), ενώ ακολουθεί η βιομηχανία (10 Bcf/d , 1,2% ετησίως). Από την άλλη, μακριά από τον ΟΟΣΑ, η βιομηχανία παραμένει η κύρια πηγή αύξησης της ζήτησης του αερίου (61 Bcf/d , 2,6% ετησίως).

Κεφάλαιο 2

Τυπική Σύσταση Ορυκτών Καυσίμων

(Fossil Fuels Typical Composition)

2.1 Επισκόπηση

Καθημερινά, ο κόσμος παράγει διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα της γης και το οποίο θα εξακολουθήσει να υπάρχει εκεί σε εκατό χρόνια. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) είναι το πιο σημαντικό από τα αέρια που προκαλούν την υπερθέρμανση του πλανήτη και προέρχεται από την ανεξέλεγκτη καύση των ορυκτών καυσίμων, αποτελώντας έτσι μια κύρια αιτία του λεγόμενου «φαινομένου του θερμοκηπίου». Μια λύση στο ζήτημα αυτό είναι η αντικατάσταση και αναπροσαρμογή των σύγχρονων τεχνολογιών με εναλλακτικές λύσεις που έχουν συγκρίσιμη ή καλύτερη απόδοση, αλλά δεν οδηγούν στην εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό αποκαλείται *εναλλακτική ενέργεια*.

Ως το 2050, το ένα τρίτο της παγκόσμιας ενέργειας θα χρειαστεί να προέρχεται από την ηλιακή, την αιολική και άλλες ανανεώσιμες πηγές. Η κλιματική αλλαγή, η αύξηση του πληθυσμού του πλανήτη και η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων σημαίνει ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα χρειαστεί να διαδραματίσουν ένα μεγαλύτερο ρόλο στο μέλλον απ' όσο κάνουν σήμερα.

Η εναλλακτική ενέργεια αναφέρεται σε πηγές ενέργειας που δεν έχουν ανεπιθύμητες συνέπειες, όπως για παράδειγμα τα ορυκτά καύσιμα ή η πυρηνική ενέργεια. Οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας είναι ανανεώσιμες και έχουν όλες λιγότερες εκπομπές άνθρακα σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές. Αυτές περιλαμβάνουν ενέργεια από βιομάζα, αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, γεωθερμική, υδροηλεκτρική και άλλες πηγές.

Τα ορυκτά καύσιμα επί του παρόντος προμηθεύουν τις περισσότερες από τις παγκόσμιες ενεργειακές ανάγκες. Η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που μπορεί να απορροφήσει η ατμόσφαιρα είναι συγκεκριμένη. Κάθε χρόνο εκπέμπονται περισσότεροι από 25 δις τόνους CO₂. Τα κοιτάσματα άνθρακα θα μπορούσαν να προσφέρουν καύσιμα επί μερικές εκατοντάδες χρόνια, όμως δεν μπορούμε να τα κάψουμε και ταυτόχρονα να παραμείνουμε μέσα σε ασφαλή όρια. Η κατανάλωση του πετρελαίου και του άνθρακα πρέπει να τερματιστεί. Ξεκινώντας από τις ανεπτυγμένες χώρες, η οικονομική ανάπτυξη πρέπει να αποσυνδεθεί πλήρως από τα ορυκτά καύσιμα. Οι επιστήμονες και οι φορείς πολιτικής πρέπει να κάνουν αξιολόγηση των εναλλακτικών πηγών ενέργειας και να αποφασίσουν τι είναι επιστημονικά εφικτό, περιβαλλοντικά αποδεκτό και υποσχόμενο τεχνολογικά.

Τα εναλλακτικά καύσιμα προέρχονται από πόρους διαφορετικούς από το πετρέλαιο. Μερικά από αυτά μπορεί να είναι εγχώριας παραγωγής, μειώνοντας έτσι τις ανάγκες και την εξάρτηση από το εισαγόμενο πετρέλαιο και ορισμένα προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές. Συνήθως, δεν εκπέμπουν τόσους ρύπους όσο η βενζίνη ή το ντίζελ.

✓ Αιθανόλη



Η Αιθανόλη είναι ένα ανανεώσιμο καύσιμο που παράγεται από καλαμπόκι και άλλα φυτικά έλαια. Η χρήση της αιθανόλης είναι πολύ διαδεδομένη – χαρακτηριστικό παράδειγμα ότι στις Ηνωμένες Πολιτείες σχεδόν όλη η βενζίνη περιέχει κάποια ποσότητα αιθανόλης. Η αιθανόλη είναι διαθέσιμη ως E85 - ένα μίγμα αιθανόλης υψηλού επιπέδου που περιέχει 51%-83% αιθανόλη ανάλογα με την εποχή και το γεωγραφικό προσδιορισμό- για χρήση σε οχήματα εναλλακτικών καυσίμων. Το E15 ορίζεται από τον οργανισμό προστασίας του περιβάλλοντος ως ένα μίγμα περιεκτικότητας 10%-15% αιθανόλης με βενζίνη.

Το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται όταν η αιθανόλη καίγεται αντισταθμίζεται από το διοξείδιο του άνθρακα που δεσμεύεται όταν μεγαλώνουν οι καλλιέργειες για την παραγωγή αιθανόλης. Αυτό διαφέρει από το πετρέλαιο, το οποίο παράγεται από φυτά που αναπτύχθηκαν εκατομμύρια χρόνια πριν. Με βάση την ανάλυση του κύκλου ζωής, η παραγωγή αιθανόλης που βασίζεται στο καλαμπόκι και χρήση της μειώνει τις εκπομπές του θερμοκηπίου ως και 52% σε σύγκριση με την παραγωγή και χρήση βενζίνης.

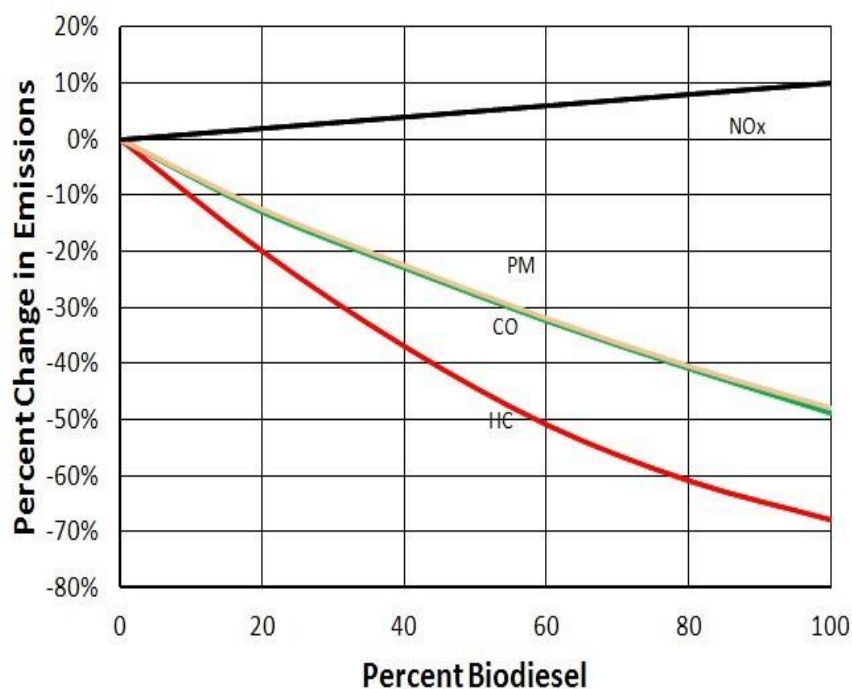
✓ Βιοντίζελ



Το βιοντίζελ είναι ένα ανανεώσιμο καύσιμο που μπορεί να παρασκευαστεί από φυτικά έλαια, ζωικά λίπη ή ανακυκλωμένα λίπη εστιατορίων για χρήση σε οχήματα ντίζελ. Οι φυσικές ιδιότητες του καυσίμου αυτού είναι παρόμοιες με εκείνες του πετρελαίου ντίζελ, αλλά είναι ένα εναλλακτικό με καθαρότερη καύση. Χρησιμοποιώντας βιοντίζελ στη θέση του πετρελαίου ντίζελ, ειδικά στα παλαιότερα οχήματα, μπορεί να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών

Όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο οχημάτων, το βιοντίζελ προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα βενζίνη και πετρέλαιο ντίζελ. Τα οφέλη αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά, επειδή το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της καύσης του καυσίμου αντισταθμίζεται από το διοξείδιο του άνθρακα που δεσμεύεται από τα φυτά από τα οποία παράγεται το βιοντίζελ.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα ποσοστά αύξησης/μείωσης των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NOx), υδρογονανθράκων (HC), αιωρούμενων σωματιδίων (PM) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO), από τη χρήση βιοντίζελ σε μηχανές βαρέως τύπου.



Εικόνα 2.1. Ποσοστά εκπομπών ρύπων σε μηχανές βαρέως τύπου από τη χρήση Βιοντίζελ

✓ Φυσικό Αέριο



Το φυσικό αέριο είναι ένα άοσμο, αέριο μίγμα υδρογονανθράκων – κυρίως μεθανίου (CH₄). Είτε παράγεται μέσω συμβατικών , είτε μέσω ανανεώσιμων μεθόδων , το φυσικό αέριο είναι ένα καθαρό εναλλακτικό καύσιμο. Χρησιμοποιώντας το σε οχήματα αυξάνεται η ενεργειακή ασφάλεια και μπορούν να μειωθούν οι εκπομπές. Το φυσικό αέριο που παράγεται μέσω ανανεώσιμων μεθόδων προσφέρει επιπλέον πλεονεκτήματα. Όταν χρησιμοποιείται σε μηχανές εσωτερικής καύσης ή αεριοστρόβιλους υπόκειται κάποιες διαδικασίες συμπίεσης (Compressed Natural Gas – CNG) ή υγροποίησης (Liquefied Natural Gas - LNG). Όπως και στην περίπτωση κάθε εναλλακτικού καυσίμου, υπάρχουν ορισμένες εκτιμήσεις που λαμβάνονται υπόψη όταν εξετάζεται η χρήση του φυσικού αερίου.

✓ Υγραέριο



Το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου, γνωστό και με τον αντίστοιχο διεθνή όρο **LPG** σύντμηση του liquefied petroleum gas, αποτελείται από ελαφρά κλάσματα αργού πετρελαίου, τα οποία είναι αέρια όταν βρίσκονται υπό συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Τα αέρια αυτά κλάσματα υδρογονανθράκων διαχωρίζονται από τα υγρά κλάσματα κατά τη

διύλιση που γίνεται στο αργό και οδεύουν προς δεξαμενές αποθήκευσης προς άλλες χρήσεις, ενώ τα υγρά κλάσματα χρησιμοποιούνται για την παρασκευή υγρών καυσίμων (ντίζελ, βενζίνη κ.ο.κ.).

Αποτελεί ένα εναλλακτικό καύσιμο με δυνατότητα καθαρής καύσης και υψηλής ενεργειακής ασφάλειας που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία πολλών οχημάτων υγραερίου.

✓ Υδρογόνο



Το υδρογόνο αποτελεί το καύσιμο του απώτερου μέλλοντος, η χρήση του οποίου ευρίσκεται σε πειραματικό στάδιο και πιλοτικές χρήσεις. Παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού (για την οποία απαιτείται μεγάλη ενέργεια) ή τη διάσπαση των υδρογονανθράκων.

Χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης ή σε συνδυασμό με τις κυψέλες καυσίμου (fuel cells) από τις οποίες παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Από τη χρήση του παράγονται σχεδόν μηδενικοί ρύποι. Τα περιβαλλοντικά και τα οφέλη για την υγεία είναι ακόμη μεγαλύτερα όταν το υδρογόνο παράγεται από πηγές με χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια και ορυκτά καύσιμα με προηγμένα συστήματα ελέγχου εκπομπών και δέσμευσης του άνθρακα.

2.2 Φυσικό Αέριο (Natural Gas)

2.2.1 Επισκόπηση

Το φυσικό αέριο είναι μια ζωτικής σημασίας συνιστώσα της παγκόσμιας παροχής ενέργειας. Αποτελεί μία από τις καθαρότερες, ασφαλέστερες και πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας στη σύγχρονη εποχή.

Το φυσικό αέριο γενικά θεωρείται ένα μη ανανεώσιμο ορυκτό καύσιμο. Ο λόγος που θεωρείται ορυκτό καύσιμο είναι ότι οι περισσότεροι επιστήμονες πιστεύουν ότι το φυσικό αέριο διαμορφώθηκε από τα υπολείμματα μικροσκοπικών θαλάσσιων ζώων και φυτών που πέθαναν πριν από περίπου 200-400 εκατομμύρια χρόνια. Όταν τα φυτά και οι οργανισμοί αυτοί πέθαναν, βυθίστηκαν στον πυθμένα των ωκεανών όπου και θάφτηκαν από ιζήματα και άμμο. Κατά τη διάρκεια γεωλογικών καθιζήσεων, τεράστιες ποσότητες οργανικής ύλης βυθίστηκαν μέσα στη γη, συμβάλλοντας στο σχηματισμό πετρωμάτων. Με το πέρασμα του χρόνου, οι υψηλές θερμοκρασίες και οι υψηλές πιέσεις που αναπτύχθηκαν από τις καθιζάνουσες μάζες γης, πυροδότησαν μια σειρά χημικών διεργασιών που είχαν ως αποτέλεσμα τη μετατροπή της οργανικής

ύλης σε υδρογονάνθρακες, οι οποίοι, απορροφούμενοι από πορώδη πετρώματα, δημιούργησαν τα κοιτάσματα.

Το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου είναι το μεθάνιο (CH₄). Το μεθάνιο δεν έχει χρώμα, οσμή ή γεύση. Για λόγους ασφάλειας, οι εταιρείες που ασχολούνται με το φυσικό αέριο προσθέτουν μερκαπτάνη, ένα αέριο δύσσομο που προκαλεί ναυτία και ανησυχίες, με σκοπό την άμεση ανίχνευση οποιασδήποτε διαρροής (μυρίζει σαν σάπιο αυγό). Οι άνθρωποι χρησιμοποιούν το φυσικό αέριο κυρίως για θέρμανση. Δεν πρέπει να συγχέεται με τη βενζίνη, η οποία παράγεται από το πετρέλαιο. Σχεδόν πάντα το θεωρούμε μη ανανεώσιμο, το οποίο σημαίνει ότι δεν μπορούμε να παράγουμε περισσότερο σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, υπάρχουν μερικές ανανεώσιμες πηγές μεθανίου, όπως οι χωματερές.

Το φυσικό αέριο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε :

- Παραγωγή Ενέργειας
- Παραγωγή Υδρογόνου
- Καύσιμο Οχημάτων. Γίνονται προσπάθειες και για χρήση του στην αεροπορία
- Οικιακές Χρήσεις (μαγειρική, θέρμανση κ.α.)
- Λιπάσματα
- Παραγωγή και Κατασκευή Υφασμάτων, γυαλιού, πλαστικού, ατσαλιού και άλλων προϊόντων

2.2.2 Παραγωγή

Το φυσικό αέριο είναι δύσκολο να βρεθεί δεδομένου ότι είναι παγιδευμένο στους πορώδεις βράχους βαθιά στη γη. Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν πολλές μεθόδους για να βρουν τις δεξαμενές του φυσικού αερίου. Εξετάζοντας τους επιφανειακούς βράχους βρίσκουν ενδείξεις για την πιθανή ύπαρξή του. Άλλες φορές με ελεγχόμενες μικρές εκρήξεις ή μικρές σεισμικές δονήσεις καταγράφουν την ύπαρξη του φυσικού αερίου.

Το φυσικό αέριο μπορεί να βρεθεί στις υπόγειες δεξαμενές πετρελαίου. Τα φρεάτια φυσικού αερίου φθάνουν σε βάθος 1500 μέτρα κατά μέσο όρο. Σήμερα, κάνουμε γεωτρήσεις και μέσω των στρωμάτων της άμμου, του βούρκου, και των πετρωμάτων φθάνουμε στους σχηματισμούς βράχου που περιέχουν πετρέλαιο και φυσικό αέριο. Αφότου βγαίνει το φυσικό αέριο από το έδαφος, στέλνεται σε εγκαταστάσεις όπου καθαρίζεται από τις προσμίξεις του και χωρίζεται στα διάφορα μέρη του. Το φυσικό αέριο είναι συνήθως μεθάνιο, αλλά και περιέχει μικρά ποσά άλλων αερίων όπως το προπάνιο και το βουτάνιο. Το ποσοστό συμμετοχής του στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανερχόταν το 1994 περίπου στο 23,8%, ενώ το 1992 το 63% της παγκόσμιας κατανάλωσής του πραγματοποιούνταν στη Βόρεια Αμερική και στις χώρες της Κοινοπολιτείας

Ανεξαρτήτων Κρατών (ΚΑΚ). Στις χώρες της ΚΑΚ υπολογίζεται ότι βρίσκεται το 40% των παγκόσμιων αποθεμάτων (περίπου 56.515 δισεκατομ. κυβικά), ενώ σημαντικά αποθέματα υπάρχουν και στη Μέση Ανατολή (44.752 δισεκατομ. κυβικά), στη Β. Αμερική (7.353 δισεκατομ. κυβικά), στην Αφρική (9.723 δισεκατομ. κυβικά), στην Κεντρική Ασία, Άπω Ανατολή, Αυστραλία κ.α. Το φυσικό αέριο μπορεί επίσης να προέλθει και από άλλες πηγές, όπως το αέριο μεθάνιο που βρίσκεται στον άνθρακα. Το μεθάνιο των ορυχείων άνθρακα θεωρήθηκε κάποτε πολύ επικίνδυνο για την ασφάλεια των ανθρακωρύχων στα υπόγεια ορυχεία άνθρακα, αλλά τώρα είναι μια πολύτιμη πηγή ενέργειας. Μια άλλη πηγή φυσικού αερίου είναι το αέριο που παράγεται στις χωματερές. Το αέριο που παράγεται στις χωματερές χαρακτηρίζεται ως ανανεώσιμη πηγή φυσικού αερίου δεδομένου ότι προέρχεται από το σάπισμα των απορριμμάτων.

2.2.3 Αποθέματα

Σύμφωνα με στοιχεία της έγκριτης ενεργειακής εκδόσεως Oil & Gas Journal έτους 2007, το Ιράν διαθέτει εξακριβωμένα αποθέματα φυσικού αερίου 974 τρισεκ. κυβικών μέτρων και είναι η χώρα με τα δεύτερα μεγαλύτερα αποθέματα στον κόσμο (μετά τη Ρωσία). Τα αποθέματα φυσικού αερίου του Ιράν αντιστοιχούν στο 15% των παγκοσμίων αποθεμάτων, αλλά επί του παρόντος το Ιράν παράγει μόνο το 2,7% της ετήσιας παγκόσμιας παραγωγής.

Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα του Ιράν βρίσκονται στο Νότιο Pars (από 280 έως 500 τρισ. κυβ. μέτρα), στο Βόρειο Pars (50 τρισ. κυβικά μέτρα) και στο Kangan-Nar (23,7 τρισ. κυβ. μέτρα).

Ακολουθεί συγκριτικός πίνακας συνολικών κοιτασμάτων και ετήσια παραγωγής των χωρών με τα έξι μεγαλύτερα συνολικά αποθέματα παγκοσμίως:

Χώρες με μεγαλύτερα αποθέματα φυσικού αερίου – Ετήσια παραγωγή			
Κατάταξη	Χώρα	Εξακριβωμένα Αποθέματα (τρис.κυβ.μέτρα)	Ετήσια Παραγωγή (τρис.κυβ.μέτρα)
1	Ρωσία	1.680	22,4
2	Ιράν	974	3,5
3	Κατάρ	930	1,4
4	Σαουδική Αραβία	250	2,3
5	Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα	220	1,64
6	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής	190	18,8
Πηγή: Oil & Gas Journal			

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, η σχέση της ετήσιας παραγωγής του Ιράν με τα συνολικά του εξακριβωμένα αποθέματα σε φυσικό αέριο είναι πολύ μικρή, συγκριτικά με αυτή άλλων χωρών του πίνακα.

2.2.4 Σύνθεση

Το φυσικό αέριο είναι ένα πολύπλοκο μίγμα αέριων υδρογονανθράκων με κυμαινόμενες ποσότητες άλλων αερίων, οι οποίες θεωρούνται ακαθαρσίες. Το ακατέργαστο φυσικό αέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, το μικρότερο και ελαφρύτερο μόριο υδρογονάνθρακα. Περιέχει επίσης ποικίλες ποσότητες από :

- Βαρύτερους αέριους υδρογονάνθρακες : Αιθάνιο (C_2H_6), Προπάνιο (C_3H_8), κ-Βουτάνιο ($n-C_4H_{10}$), Ισοβουτάνιο ($i-C_4H_{10}$), Πεντάνια και υδρογονάνθρακες με ακόμα μεγαλύτερα μοριακά βάρη.
Όταν επεξεργάζεται και καθαρίζεται σε τελικά υποπροϊόντα, όλα αυτά αναφέρονται συνολικά ως υγρά φυσικού αερίου.
- Όξινα αέρια : Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2), Υδρόθειο (H_2S) και Μερκαπτάνες όπως η μεθανοθειόλη (CH_3SH) και η αιθανοθειόλη (C_2H_5SH).
- Άλλα αέρια : Άζωτο (N_2) και Ήλιο (He).
- Νερό : Και σε υδρατμούς και σε υγρή μορφή.
- Υγρούς υδρογονάνθρακες : Ίσως κάποια συμπυκνώματα φυσικού αερίου ή/και αργό πετρέλαιο.
- Υδράργυρο : Πολύ μικρές ποσότητες υδραργύρου κυρίως σε στοιχειώδη μορφή και χλωρίδια.

Το Φυσικό Αέριο που είναι απαλλαγμένο από υδρογονάνθρακες πέραν του μεθανίου "καθαρό μεθάνιο" συχνά αποκαλείται και ξηρό φυσικό αέριο. Αντίστοιχα, το φυσικό αέριο που συμπεριλαμβάνει και άλλους υδρογονάνθρακες εκτός από το μεθάνιο, αποκαλείται και υγρό φυσικό αέριο. Η σύνθεση του φυσικού αερίου ποικίλλει ανάλογα με τον τόπο, το σχηματισμό ή τη δεξαμενή από την οποία αντλήθηκε.

Συστατικό	Μοριακό Κλάσμα
Μεθάνιο	0,75-0,99
Αιθάνιο	0,01-0,15
Προπάνιο	0,01-0,10
κ-Βουτάνιο	0,00-0,02
Ισοβουτάνιο	0,00-0,01
κ-Πεντάνιο	0,00-0,01
Ισοπεντάνιο	0,00-0,01

Εξάνιο	0,00-0,01
Επτάνιο και βαρύτεροι υδρογονάνθρακες	0,00-0,001

Μη Υδρογονάνθρακες

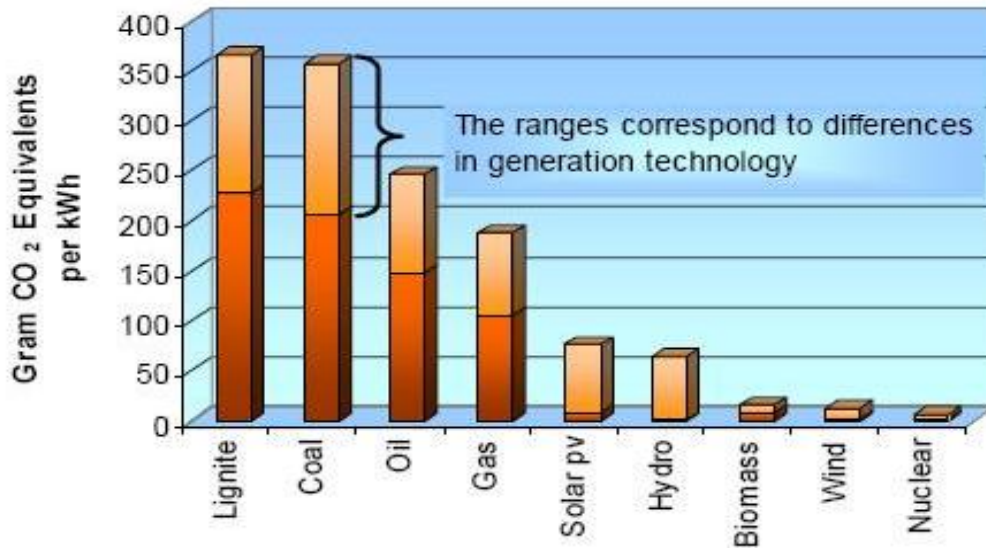
Άζωτο	0,00-0,15
Διοξείδιο του Άνθρακα	0,00-0,30
Υδρόθειο	0,00-0,30
Ήλιο	0,00-0,05

2.2.5 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά του Φυσικού Αερίου (Natural Gas facts)

- Το φυσικό αέριο είναι καθαρό. Από άποψη καύσης, αποτελεί το πιο καθαρό συμβατικό καύσιμο, αφού παράγει 45% λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα από το γαιάνθρακα. Γενικότερα, εκπέμπει λιγότερο αέριο ρύπο (SO₂, CO₂, NO_x και CH₄) ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Το γεγονός ότι είναι εύφλεκτο και καίγεται πιο ‘καθαρά’ σε σχέση με άλλες πηγές ενέργειας, ενισχύει τη θέση του ως μία από τις ευρέως χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας.

- Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής μέσω της καύσης άνθρακα στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Μελέτες έδειξαν ότι οι μονάδες αυτές δημιουργούν ζημιά στην οικονομία της τάξεως των 15 δισεκατομμυρίων δολλαρίων μέσω των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, οι οποίες συμβάλλουν και στην κλιματική αλλαγή. Η αύξηση της θερμοκρασίας συμβαίνει διότι, ενώ τα παραπάνω αέρια (αέρια του θερμοκηπίου, greenhouse gases) είναι περατά από την ηλιακή ακτινοβολία, απορροφούν την υπέρυθη ακτινοβολία (θερμότητα) της γης που θα μπορούσε να διαφύγει στο διάστημα και κατόπιν επανεκπέμπουν κάποιο ποσοστό της ακτινοβολίας που απορρόφησαν στην επιφάνεια της γης. Αυτό το *φαινόμενο* αναφέρεται ως «παγκόσμια αύξηση θερμοκρασίας» (global warming effect) .

Πραγματικά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που οφείλονται σε καύση ορυκτών ανθράκων, όπως ο λιγνίτης, ανά παραγόμενη κιλοβατώρα είναι πολύ περισσότερες από τις εκπομπές που οφείλονται στην καύση του φυσικού αερίου.



Εικόνα 2.2 . Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα (g CO₂/χρησιμοποιήσιμη παραγόμενη κιλοβατώρα.

Επιπροσθέτως, είναι εξίσου σημαντικό να παρατηρηθεί η μειωμένη συμβολή της καύσης του φυσικού αερίου έναντι αυτής του γαιάνθρακα στην εκπομπή και άλλων αέριων αέριων ρύπων, όπως τα NO_x, το διοξείδιο του θείου (SO₂) και οι εκπομπές υδραργύρου.

(τόνοι ανά χρόνο ανά MWatt)

Ρύπος	Γαιάνθρακας	Φυσικό Αέριο
CO ₂	6352	2348
CO ₂ με τεχνολογία CCS (Capture and Storage technology)	837	309
Μονοξείδιο του Άνθρακα	4,62	1,64
NO _x	1,85	0,15
SO ₂	3,08	0,02
Υδράργυρος	2 ουγγιές	0

Πίνακας 1. Σύγκριση των εκπομπών ρύπων μεταξύ Γαιάνθρακα και Φυσικού Αερίου

- Το φυσικό αέριο είναι διαθέσιμο στις εγχώριες αγορές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ότι σχεδόν όλο το αέριο που καταναλώνεται στη Βόρεια Αμερική (98%) παράγεται στις Ηνωμένες Πολιτείες και στον Καναδά.
- Το φυσικό αέριο είναι άφθονο. Οι ανακαλύψεις νέων κοιτασμάτων σε περίπλοκους βραχώδεις σχηματισμούς, όπως ο σχιστόλιθος, έχουν αυξήσει τα αποθέματα σε μεγάλο βαθμό για περισσότερο από 100 χρόνια.

- Το φυσικό αέριο είναι αποδοτικό. Αναφορικά, ενώ ο αριθμός των κατοίκων της Βορείου Αμερικής που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο έχει μεγαλώσει κατά 70% τα τελευταία 40 χρόνια, οι πελάτες σήμερα στην πραγματικότητα χρησιμοποιούν σχεδόν 40% λιγότερο φυσικό αέριο. Αυτό οφείλεται στο ότι μεγαλύτερη αποδοτικότητα στην παραγωγή, τη διανομή και τη χρήση συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.
- Το φυσικό αέριο είναι αξιόπιστο. Αποτελεί την ενέργεια στην οποία μπορούμε να βασιστούμε, μέρα με τη μέρα. Είτε ο ήλιος λάμπει, είτε φυσά άνεμος, υπάρχουν άφθονες προμήθειες φυσικού αερίου, οι οποίες είναι διαθέσιμες για άμεση αποστολή, μέσω ενός υπάρχοντος διασυνδεδεμένου, αποδοτικού και πολύ αξιόπιστου συστήματος διανομής.
- Το φυσικό αέριο έχει πολύπλευρη χρήση. Παράγει ηλεκτρισμό, λειτουργεί εργοστάσια παραγωγής, παρέχει πρώτες ύλες για μια πληθώρα προϊόντων, θερμαίνει και δροσίζει τα σπίτια μας και αποτελεί καύσιμο μεταφορών.
- Το φυσικό αέριο είναι ένα από τα ασφαλέστερα καύσιμα. Αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας διέπουν την εξερεύνηση, την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή και τη χρήση του φυσικού αερίου. Το ηπειρωτικό σύστημα αγωγών της Βόρειας Αμερικής αποτελεί τον ασφαλέστερο τρόπο για μεταφορά της ενέργειας στον κόσμο σήμερα.
- Το φυσικό αέριο είναι απαραίτητο. Στις μέρες μας, καλύπτει σχεδόν το ¼ των ενεργειακών αναγκών της Βόρειας Αμερικής. Υπάρχει η δυνατότητα να εξυπηρετηθεί ακόμη μεγαλύτερη ζήτηση, διότι το φυσικό αέριο ολοένα και περισσότερο αρχίζει να αποκαλείται ως μια 'καθαρή' εναλλακτική λύση για την παραγωγή ενέργειας και τις μεταφορές.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι κυριότερες φυσικές και χημικές ιδιότητες του φυσικού αερίου:

Ιδιότητες	Τιμή
Σχετική Μοριακή Μάζα	17-20
Συγκέντρωση Άνθρακα, κατά βάρος %	73,3
Συγκέντρωση Υδρογόνου, κατά βάρος %	23,9
Συγκέντρωση Οξυγόνου, κατά βάρος %	0,4
Αναλογία Ατόμων Υδρογόνου/Άνθρακα	3,0-4,0
Σχετική Πυκνότητα, 15°C	0,72-0,81
Σημείο Βρασμού, °C	-162

Θερμοκρασία Αυτανάφλεξης , °C	540-560
Αριθμός Οκτανίου (Octane Number - ON)	120-130
Αριθμός Μεθανίου (Methane Number – MN)	69-99
Στοιχειομετρικός Λόγος Αέρα/Καυσίμου , κατά βάρος	17,2
Όρια αναφλεξιμότητας	0,7-2,1
Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα, MJ/Kg	38-50
Στοιχειομετρική Κατώτερη Θερμογόνος Ικανότητα, MJ/Kg	2,75
Εκπομπές CO ₂ , g/MJ	38-50

Πίνακας 2. Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες του Φυσικού Αερίου

2.2.6 Διαδικασία μεταφοράς και ροής φυσικού αερίου **(Natural Gas Transporting and flow)**



Η μεταφορά του φυσικού αερίου σε αποστάσεις χιλιάδων μιλίων, μέσω ενός δικτύου αγωγών είναι ο ασφαλέστερος τρόπος μεταφοράς. Ένα σύστημα αγωγών φυσικού αερίου ξεκινάει από το σημείο όπου γίνεται η εξόρυξη του. Από τη στιγμή που το αέριο εγκαταλείπει το σημείο αυτό, ένα σύστημα συλλογής αγωγών κατευθύνει τη ροή είτε προς μια μονάδα επεξεργασίας αερίου ή άμεσα στο κύριο δίκτυο μεταφοράς, ανάλογα με την αρχική ποιότητα του αερίου από την εξόρυξη.

Το εργοστάσιο επεξεργασίας παράγει φυσικό αέριο ποιότητας ιδανικής για μεταφορά. Το αέριο έπειτα μεταφέρεται μέσω αγωγών στους καταναλωτές ή τοποθετείται σε ένα υπόγειο χώρο αποθήκευσης προς μελλοντική χρήση. Η αποθήκευση αυτή συμβάλει στη διατήρηση της λειτουργικής ακεραιότητας του

συστήματος αγωγών ή/και στην ανταπόκριση των απαιτήσεων των καταναλωτών κατά τη διάρκεια των περιόδων αιχμής.

Η μεταφορά του φυσικού αερίου από το σημείο εξόρυξης προς την αγορά περιλαμβάνει μια σειρά από διαδικασίες και μια σειρά από φυσικές εγκαταστάσεις. Μεταξύ αυτών είναι:

i) **Σωλήνες Συγκέντρωσης (Gathering Lines):** Οι μικρού μήκους αγωγοί αυτοί οδηγούν το φυσικό αέριο από το σημείο της εξόρυξης του στο εργοστάσιο επεξεργασίας του ή σε μια διασύνδεση με ένα μεγαλύτερο κύριο σύστημα αγωγών.

ii) **Εργοστάσιο επεξεργασίας(Processing Plant):** Σε αυτή τη μονάδα, εξάγεται το υγρό και οι ακαθαρσίες του ρεύματος του φυσικού αερίου. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν 4 στάδια για την απομάκρυνση των ακαθαρσιών αυτών: α) αφαίρεση πετρελαίου και συμπυκνωμάτων , β) αφαίρεση νερού , γ) διαχωρισμός των υγρών του φυσικού αερίου , δ) απομάκρυνση των διοξειδίων θείου και άνθρακα.

iii) **Συστήματα κύριας μετάδοσης(Mainline Transmission Systems):** Αυτοί οι –μεγάλης διαμέτρου, μεγάλης αποστάσεως-σωλήνες μεταφέρουν το φυσικό αέριο από το σημείο παραγωγής του σε τομείς της αγοράς.

iv) **Κέντρα αγοράς(Market Hubs/Centers):** Τοποθεσίες όπου οι αγωγοί τέμνονται και μεταφέρονται τα ρεύματα.

v) **Υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης(Underground Storage Facilities):** Το φυσικό αέριο αποθηκεύεται σε άδειες δεξαμενές πετρελαίου και αερίου, υδροφόρους ορίζοντες και σπήλαια άλατος για μελλοντική χρήση.

2.2.7 Εναλλαξιμότητα Φυσικού Αερίου και Δείκτης Wobbe **(Interchangeability and Wobbe Index)**

Κάθε εξοπλισμός και σύστημα καύσης αερίου έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για συγκεκριμένες προδιαγραφές αερίου. Αυτό θα περιλαμβάνει μια σειρά από ιδιότητες του καυσίμου με βάση τις οποίες κρίνεται εάν η μηχανή λειτουργήσει σωστά. Εάν αέρια που δεν πληρούν τις ιδιότητες αυτές οδηγηθούν σε καύση, μπορεί να προκύψουν μια σειρά προβλημάτων από φτωχή ποιότητα καύσης ως και ζημιά στον εξοπλισμό και , τελικά, επικίνδυνη λειτουργία.

Με τον όρο *εναλλαξιμότητα φυσικού αερίου (Natural Gas Interchangeability)* αναφερόμαστε σε ένα μέτρο του βαθμού στον οποίο τα χαρακτηριστικά καύσης ενός αερίου μοιάζουν με τα χαρακτηριστικά ενός άλλου αερίου. Δύο αέρια λέγεται ότι είναι εναλλάξιμα όταν το ένα αέριο μπορεί να υποκατασταθεί από το άλλο, χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργία των συστημάτων καύσης ή του εξοπλισμού.

Εάν οι συνέπειες της εναλλαξιμότητας δεν είναι κατανοητές, μπορούν να οδηγήσουν σε αναποτελεσματικότητα και φτωχή λειτουργία και κακή απόδοση του εξοπλισμού. Η εναλλαξιμότητα βασίζεται στην ποιότητα του φυσικού αερίου, αλλά μερικές φορές οι δύο αυτοί όροι συγχέονται. Ως ένα υποσύνολο των προδιαγραφών ποιότητας του αερίου, χρήσιμο είναι να αναφερθούν και να ταξινομηθούν οι παράμετροι εναλλαξιμότητας, κριτήρια που εξασφαλίζουν ότι ένα υποκατάστατο κάποιου αερίου θα συνεχίσει να προσφέρει ικανοποιητικές επιδόσεις στις πτυχές της ασφάλειας, της απόδοσης και των εκπομπών.

Μερικά από τα κριτήρια εναλλαξιμότητας είναι :

- Εκπομπές οξειδίων αζώτου (NO_x)
- Εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO)
- Κίτρινη φλόγα
- Φαινόμενα flash-back
- Ταχύτητα φλόγας
- Φαινόμενα κρουστικής καύσης
- Αποδοτικότητα
- Θερμοκρασία φλόγας
- Σημείο δρόσου καυσαερίων
- Αυτανάφλεξη
- Δείκτης Wobbe

Η απαίτηση για μια συγκεκριμένη προδιαγραφή ποιότητας του φυσικού αερίου σε μια συγκεκριμένη αγορά οδηγεί σε μια σειρά από συνέπειες, από τις διαδικασίες επεξεργασίας του αερίου, μεταφοράς του μέσω δικτύου και στο πεδίο της καύσης. Μερικά από τα ζητήματα που σχετίζονται με την εναλλαξιμότητα του φυσικού αερίου είναι :

- Ζητήματα σχετικά με την επεξεργασία για αέρια που είναι εκτός προδιαγραφών και θέματα σχετικά με την ποιότητα και την παροχή του υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG).
- Ζητήματα σχετικά με τη δυνατότητα προσαρμογής ενός αερίου στο δίκτυο διανομής και τα πλεονεκτήματά του.
- Ζητήματα σχετικά με τη μελέτη και ανάπτυξη καυστήρων νέας γενιάς και συμβατότητα τους με ένα μεγάλο εύρος ποιοτήτων αερίου.

Οι διακυμάνσεις στην ποιότητα του φυσικού αερίου θα μπορούσαν να δημιουργήσουν προβλήματα (i) στην ανταπόκριση σε θέματα λειτουργικής ασφάλειας και απόδοσης, (ii) στη διασφάλιση της ακεραιότητας και της λειτουργικότητας του συστήματος για μεταφορά του αερίου και (iii) στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Σε περίπτωση όπου το εισαγόμενο αέριο δεν ικανοποιεί τις προδιαγραφές των αγωγών μεταφοράς, υπάρχουν επιλογές για :

- Ρύθμιση της ποιότητας του αερίου στο σημείο παραγωγής

- Προσαρμογή της ποιότητας του αερίου στα σημεία εισόδου για την κάλυψη των υπαρχόντων ορίων
- Δυνατότητα διεύρυνσης των ορίων των προδιαγραφών του αερίου, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις που μπορεί να έχουν στη λειτουργία του εξοπλισμού καύσης.

Η δυνατότητα εναλλαξιμότητας του φυσικού αερίου εξασφαλίζει ότι οποιοσδήποτε εξοπλισμός καύσης που χρησιμοποιεί κάποιο υποκατάστατο αέριο καύσιμο θα συνεχίσει να ανταποκρίνεται στα πρότυπα επιδόσεων για τα οποία είχε εγκριθεί. Αυτό καθορίζεται από την ποιότητα του αερίου. Η εναλλαξιμότητα αποτελεί ένα υποσύνολο των προδιαγραφών ποιότητας του φυσικού αερίου και είναι αυτή που καθορίζει ότι το αέριο που παρέχεται σε κάποιους χρήστες θα χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο με ασφάλεια και με την ίδια αποδοτικότητα.

Ο τύπος του καυσίμου ή ποιότητα είναι γνωστό ότι έχει ένα αντίκτυπο στη λειτουργία της καύσης και την αποδοτικότητα και τα συστήματα σχεδιάζονται για να προχωράνε στην καύση ενός συγκεκριμένου καυσίμου. Εάν τα χαρακτηριστικά του καυσίμου αλλάξουν τότε η απόδοση του συστήματος μπορεί να επιδεινωθεί. Η εναλλαξιμότητα των αερίων επιτυγχάνεται όταν η καύση δεν αλλάζει ουσιαστικά όταν ένα φυσικό αέριο αντικαθίσταται από κάποιο άλλο, ιδιαίτερα όσον αφορά ασφάλεια, αποτελεσματικότητα και εκπομπές. Ένα ανάλογο αυτού είναι το παράδειγμα των μηχανών εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν διαφορετικά καύσιμα με διαφορετικούς αριθμούς οκτανίων. Ενώ οι μηχανές γενικά συνεχίζουν να λειτουργούν, οι εκπομπές ρύπων αλλάζουν και η ενέργεια που παράγεται ποικίλλει.

Ο δείκτης Wobbe (Wobbe Index) χρησιμοποιείται για να συγκρίνει το ενεργειακό αποτέλεσμα καύσης από διαφορετικής σύνθεσης αέρια καύσιμα σε μια συσκευή. Αν δύο καύσιμα έχουν ταυτόσημους Δείκτες Wobbe, για δεδομένη πίεση η παραγωγή ενέργειας θα είναι η ίδια.

Ο δείκτης Wobbe (IW) ή αριθμός Wobbe είναι δείκτης της εναλλαγής των αερίων καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο, υγραέριο (LPG), και του φυσικού αερίου της πόλης και υπολογίζεται διαιρώντας τη θερμογόνο ικανότητα του αερίου με την τετραγωνική ρίζα της σχετικής του πυκνότητας. Δηλαδή

$$\text{Δείκτης Wobbe} = \frac{\text{Θερμογόνος Ικανότητα}}{\sqrt{\text{Σχετική Πυκνότητα}}}$$

Προφανώς, διακρίνεται σε ανώτερος και κατώτερος, αντίστοιχα με τη θερμογόνο δύναμη. Χρησιμοποιείται ως παράμετρος για να δείξει την ικανότητα του συνολικού χειρισμού του καυσίμου και του συστήματος έγχυσης να ανταποκριθεί στη σύνθεση του καυσίμου. Εάν ο αριθμός αυτός διαφέρει πάρα πολύ από το πρότυπο σχεδιασμού χρειάζεται να γίνουν αλλαγές στο σύστημα. Ένας υψηλός δείκτης Wobbe συχνά υποδεικνύει την παρουσία ανώτερων και βαρύτερων υδρογονανθράκων στο καύσιμο, ενώ ένας χαμηλός δείκτης είναι, συχνά, δείγμα της παρουσίας μη αναφλέξιμων συστατικών του καυσίμου ή της παρουσίας σημαντικών ποσοτήτων υδρογόνου ή διοξειδίου του άνθρακα.

Ένα καλό κριτήριο σχεδιασμού είναι ότι τα αέρια που έχουν δείκτη Wobbe εντός των ορίων $\pm 10\%$ μπορούν να αντικατασταθούν χωρίς να γίνουν προσαρμογές στο σύστημα ελέγχου του καυσίμου. Τόσο οι αεριοστρόβιλος φτωχής προανεμιγμένης καύσης, όσο και αυτοί που πραγματοποιείται συμβατική καύση, μπορούν να σχεδιαστούν να χρησιμοποιούν πρότυπο καύσιμο με εύρος δείκτη Wobbe $1220 \pm 10\%$. Τα συστήματα φτωχής προανεμιγμένης καύσης σε βιομηχανικούς αεριοστρόβιλος σχεδιάζονται συνήθως για φυσικό αέριο τυπικής σύνθεσης. Η χρήση διαφορετικών αερίων συνήθως απαιτεί προσεκτικό υπολογισμό και έλεγχο.

Ωστόσο, ο δείκτης Wobbe δεν αποτυπώνει τις επιδράσεις άλλων ιδιοτήτων του καυσίμου. Η συνολική σύνθεση του καυσίμου πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη και, αν περισσότερα αντιδραστικά στοιχεία είναι παρόντα σε σημαντικές ποσότητες (όπως υδρογόνο, αλκένια και μονοξείδιο του άνθρακα), μπορεί να απαιτούνται πρόσθετες αλλαγές στο σύστημα καυσίμου.

Κεφάλαιο 3

Ευελιξία Εναλλαγής Καυσίμων σε Συστήματα Καύσης

Fuel Flexibility/Interchangeability

3.1 Εισαγωγή στην Ευελιξία Καυσίμων Αεριοστρόβιλων

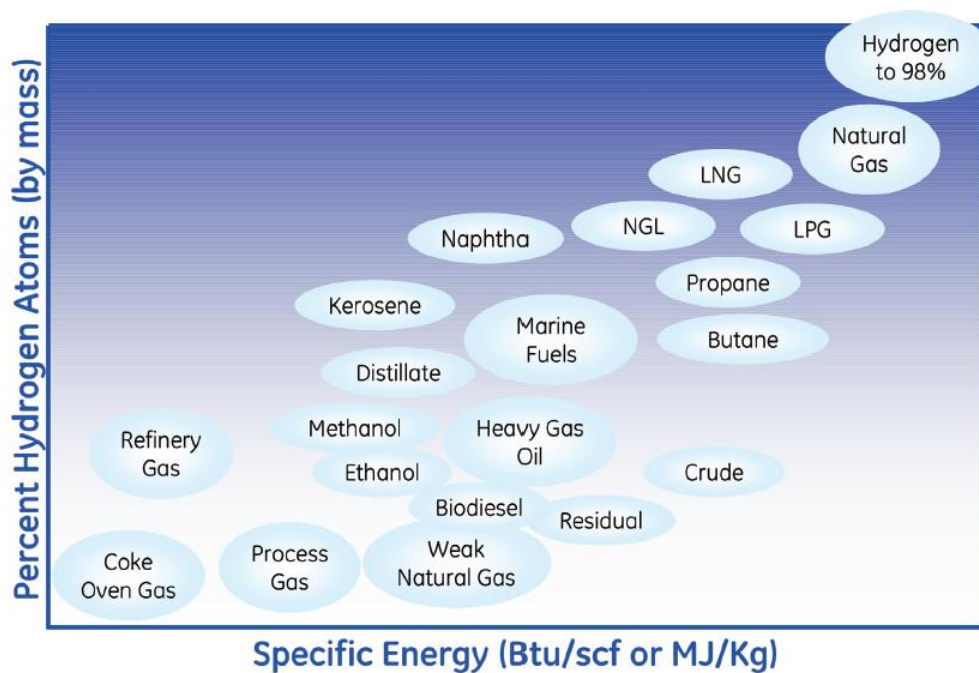
(Addressing Gas Turbine Fuel Flexibility)

Το παγκόσμιο ενεργειακό τοπίο στις μέρες μας βιώνει σημαντικές αλλαγές καθώς τα τρέχοντα οικονομικά θέματα εξελίσσονται.

Η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας συνεχίζει να αναγκάζει κυβερνήσεις και τους παροχείς ενέργειας να αναζητήσουν εναλλακτικές λύσεις για την κάλυψη των αναγκών αυτών. Για να μπορέσουν να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες ανάγκες, οι παροχείς αυτοί πρέπει να έρθουν αντιμέτωποι με σοβαρά ζητήματα όπως η παροχή και το κόστος των καυσίμων, αλλά και οι επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Με περιορισμένες πηγές καυσίμων και αυξημένο το ζήτημα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η προσπάθεια εύρεσης καυσίμων με μεγαλύτερη απόδοση και χαμηλότερες εκπομπές μοιάζει πολύ λογική.

Τα συστήματα παραγωγής που στηρίζονται σε αεριοστρόβιλους προσφέρουν αποδοτικές λύσεις μετατροπής ενέργειας για την αντιμετώπιση του ζητήματος της ανάγκης χρήσης ποικίλων καυσίμων με ταυτόχρονη λειτουργία φιλική προς το περιβάλλον. Καθώς τα έθνη αναζητούν και αποσκοπούν στην εγχώρια ενεργειακή τους ασφάλεια, μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και μειωμένη επίδραση από το μεταβλητό κόστος των καυσίμων, έχουν προχωρήσει σε εξέταση εναλλακτικών ή ‘μη παραδοσιακών’ πηγών καυσίμων για μεγάλη παραγωγή ενέργειας (P. Nag *et al.* 2010)

Τα πιθανά καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν σε αεριοστρόβιλους υψηλής αποδοτικότητας απεικονίζονται στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 3.1. Σχηματική απεικόνιση των καυσίμων που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αεριοστρόβιλους heavy duty.

Η Μέση Ανατολή σήμερα βιώνει στις μέρες μας οικονομική ανάπτυξη και αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση. Εκτός της ανάγκης για ικανοποίηση των αυξημένων αναγκών, τόσο του πληθυσμού όσο και της βιομηχανίας, η περιοχή βρίσκεται κάτω από συνεχή πίεση για να κάνει το πετρέλαιο και το αέριο άμεσα και περισσότερο διαθέσιμα για την υποστήριξη των παγκόσμιων αναγκών. Η προσπάθεια αυτή μοιάζει μονόδρομος και είναι καθοδηγούμενη από την έρευνα για υψηλότερη απόδοση και μικρότερο ποσοστό ρύπων στο πλαίσιο της ασφάλειας στις παροχές του αερίου (R. Jones *et al.* 2011)

Με δεδομένο ότι οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (Natural Gas Combined Cycle – NGCC) παρέχουν πολύ υψηλή απόδοση, θα υπάρξει αυξανόμενη ζήτηση για το φυσικό αέριο, η οποία θα δημιουργήσει πίεση για αυξανόμενη διαθεσιμότητα υγροποιημένου φυσικού αερίου (Liquefied Natural Gas- LNG). Ταυτόχρονα, οι χώρες θα εξακολουθήσουν να αναζητούν διαθέσιμους φυσικούς πόρους, όπως υγρά καύσιμα και γαιάνθρακα, σαν τρόπο για να αυξηθεί η ενεργειακή σταθερότητα και η ασφάλεια.

Οι αεριοστρόβιλοι – θερμικές μηχανές που χρησιμοποιούν αέριο υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας ως καύσιμο – χρησιμοποιούνται εκτενώς σε όλη τη βιομηχανία των ΗΠΑ για να τροφοδοτούν τις βιομηχανικές διεργασίες. Η πλειοψηφία των στροβίλων λειτουργούν χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο λόγω της διαθεσιμότητάς του, του φθηνού κόστους και της αξιοπιστίας. Ωστόσο, ένας συνδυασμός τελευταίων

παραγόντων , όπως η μεταβλητότητα στην παροχή των καυσίμων και των τιμών, η παγκόσμια ανησυχία για τις εκπομπές άνθρακα και ο αυξημένος κίνδυνος της εξάρτησης από μία μόνο πηγή ενέργειας, έχουν κάνει την ευκαιρία χρήσης υποκατάστατων του φυσικού αερίου , όπως βιομηχανικές, δημοτικές και γεωργικές πηγές ενέργειας, πολύ ελκυστική από περιβαλλοντική και οικονομική άποψη. Παρ' όλα αυτά, ένα σημαντικό εμπόδιο για την αξιοποίηση των καυσίμων αυτών είναι η αδυναμία των αεριοστρόβιλων να λειτουργήσουν αποδοτικά όταν τροφοδοτούνται από αυτά τα καύσιμα.

Η κατασκευή αεριοστρόβιλων με δυνατότητα εναλλαγής καυσίμου (fuel-flexible gas turbines) , οι οποίοι παρέχουν μια –υψηλής απόδοσης και χαμηλών εκπομπών- πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, θα έχουν σημαντικά ενεργειακά, οικονομικά και πολιτικά οφέλη, συμπεριλαμβανομένων των κάτωθι :

1. Οικονομικά οφέλη μέσω της αποφυγής των τελών διάθεσης αποβλήτων.
2. Απελευθέρωση σημαντικά λιγότερων ρύπων αέρα λόγω της προηγμένης τεχνολογίας καύσης.
3. Μείωση των στερεών επικίνδυνων αποβλήτων μέσω της χρήσης της τεχνολογίας αεριοποιητών.
4. Χρήση μιας αναξιοποίητης πηγής ενέργειας με σημαντική δυνατότητα αντικατάστασης από τη βιομάζα, τα αστικά στερεά απόβλητα και άλλα ευκαιριακά καύσιμα.

3.2 Καύσιμα Αεριοστρόβιλων

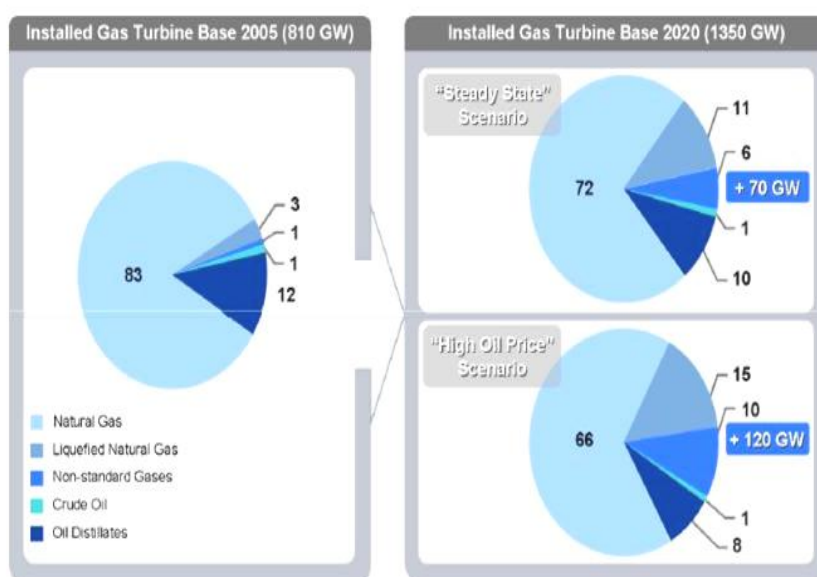
(Gas Turbine Fuels)

Εκτός από τα τυπικά καύσιμα φυσικό αέριο (τυπική θερμογόνος ικανότητα μεταξύ 39 MJ/Kg και 46 MJ/Kg) και Ντίζελ No2 (42 MJ/Kg), υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για αέρια χαμηλού BTU (1BTU = 1055 Joules), συνθετικά αέρια (syngas) ,ακόμη και υγρών καυσίμων (μαζούτ, νάφθα και συμπυκνώματα αερίου). Τα αέρια χαμηλών BTU είναι καύσιμα με θερμογόνο δύναμη μεταξύ 10 και 35 MJ/kg. Ο όρος syngas αναφέρεται σε συνθετικά παραγόμενα αέρια που έχουν ακόμη χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη, μεταξύ 4 και 12 MJ/Kg.

Το παρακάτω σχήμα (Εικόνα 4.2) χρησιμοποιεί δύο σενάρια βασισμένα στη στην αλλαγή της τιμής του πετρελαίου για να δείξει την κατανομή ανά χρησιμοποιούμενο καύσιμο που θα χρησιμοποιούνται στον τομέα των αεριοστρόβιλων το 2020.

Το 2005 το τυπικό αέριο καύσιμο ήταν η βασική καύσιμη ύλη στο πεδίο των αεριοστρόβιλων με ποσοστό που ανερχόταν στο 86%. Σε αυτό συμπεριλαμβάνεται και το Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG) , το οποίο έχει κατά βάση ιδιότητες κοντινές σε αυτές του φυσικού αερίου.

Τα υγρά και τα μη-τυπικά καύσιμα αποτελούσαν τη δεύτερη μεγάλη ομάδα το έτος αυτό σε σχετικά μικρό ποσοστό 14%. Όμως, τα μη-τυπικά αέρια καύσιμα ,όπως το syngas ή τα καύσιμα χαμηλού BTU παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης το 2020 αυξανόμενα κατά 6%.



Εικόνα 3.2. Τα ποσοστά των μη συμβατικών καυσίμων και του υγροποιημένου φυσικού αερίου αυξάνονται ουσιαστικά.

Το syngas είναι ο άλλος παράγοντας αυξημένης σημασίας στις νέες τάσεις της αγοράς. Ο λόγος είναι το αυξημένο ενδιαφέρον για ευελιξία στα καύσιμα, καθώς και δέσμευση και αποθήκευση CO₂ για την υποστήριξη καθαρών περιβαλλοντικών στόχων.

3.3 Εφαρμογές καυσίμων

3.3.1 Κλασικά Καύσιμα Αεριοστρόβιλων (Traditional Gas Turbine Fuels)

Το φυσικό αέριο αποτελεί σημαντική πηγή καυσίμου για παραγωγή ενέργειας και θα εξακολουθήσει να τροφοδοτεί ένα μεγάλο μέρος του τομέα παραγωγής ενέργειας. Οι

πηγές φυσικού αερίου δεν είναι κατανεμημένες εξίσου παγκοσμίως και η ζήτηση στη Μέση Ανατολή για την περιορισμένη παροχή του έχει οδηγήσει σε ενδιαφέρον για χρήση δευτερευόντων αερίων και υγρών για την αντιμετώπιση των ενεργειακών αναγκών. Για τη συμπλήρωση της διαθέσιμης παροχής, ολοένα και περισσότερη έμφαση δίδεται στην ανάπτυξη δραστηριοτήτων με Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (Liquefied Natural Gas – LNG).

Σύνοψη και Χαρακτηριστικά του LNG (Overview and features of LNG)

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο γίνεται όλο και περισσότερο μια σημαντική πηγή ενέργειας ανά τον κόσμο. Ο κύριος λόγος υγροποίησης του αερίου είναι η ως και 600 φορές μείωση του όγκου λόγω αλλαγής φάσεως από αέριο σε υγρό. Στη φυσική του αέρια μορφή, το φυσικό αέριο είναι μια τεράστια πηγή ενέργειας που πολλές φορές είναι εξαιρετικά δύσκολη στο χειρισμό. Η αποθήκευση του αερίου απαιτεί τεράστια υπόγεια σπήλαια ή μεγάλες συμπυκνωμένες δεξαμενές αποθήκευσης. Η μεταφορά του φυσικού αερίου από τις πηγές παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης απαιτεί μεγάλα δίκτυα αγωγών. Κατά συνέπεια μπορούν να εξεταστούν μόνο χερσαίες ή σχετικά μικρές υποθαλάσσιες διαδρομές. Τέλος, το φυσικό αέριο σε ατμοσφαιρική πίεση είναι πάρα πολύ ογκώδες για να θεωρηθεί ως καύσιμο για λόγους μεταφορών και πρέπει να συμπιεστεί στο μικρότερο βαθμό.

Η υγροποίηση του φυσικού αερίου χρησιμοποιείται για την υπερνίκηση των παραπάνω εμποδίων, επιτρέποντας τη μεταφορά του σε μεγαλύτερες αποστάσεις και εφαρμογή του LNG ως πηγή ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, το LNG που παράγεται στη Μέση Ανατολή καλύπτει περίπου το 10% της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας της Ιαπωνίας. Η αποθήκευση του κοντά σε αστικές περιοχές επιτρέπει την κάλυψη των αναγκών αιχμής σε φυσικό αέριο χωρίς να απαιτηθεί η κατασκευή πρόσθετων αγωγών.

Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας παραγωγής του, το LNG διαφέρει από το καθαρό φυσικό αέριο σε κάποιες ιδιότητες. Μέσα από τη διαδικασία αυτή παρουσιάζονται αλλαγές στη σύνθεση του αερίου, με αυξημένες περιεκτικότητες ανωτέρων υδρογονανθράκων και υψηλότερες θερμογόνες δυνάμεις. Οι θερμογόνες δυνάμεις μπορούν να μειωθούν από τη στοχευμένη προσθήκη αδρανών αερίων όπως το άζωτο (N₂) κατά τη διάρκεια της επαναεριοποίησης. Ωστόσο, για την καύση η θερμογόνος δύναμη είναι λιγότερο σχετική όσο ο δείκτης Wobbe. Ο δείκτης Wobbe συσχετίζει τη θερμογόνος δύναμη ενός αερίου με την πυκνότητά του και είναι, επομένως, μια μεταβλητή σημασίας στην καύση για την ικανότητα του καυστήρα.

Ο πίνακας 2 δείχνει τυπικές τιμές συνθέσεις υγροποιημένου φυσικού αερίου με την παρουσία ανωτέρων C, καθώς και τις θερμογόνες ικανότητες τους και τους δείκτες Wobbe. Η απόκλιση από το καθαρό φυσικό αέριο είναι λιγότερη από 10%, αλλά

ακόμη και αυτές οι μικρές μεταβολές μπορούν να προκαλέσουν αστάθειες αν δεν εφαρμοστούν κάποιες τροποποιήσεις. Με ένα μη τροποποιημένο σύστημα, οι αυξανόμενες θερμογόνες δυνάμεις μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα μια μικρή αύξηση εκπομπών.

		C2	C3	C4+	Hu	Wb
		mol%	mol%	mol%	MJ/kg	MJ/Nm ³
US average, GRI-92/0123		3.20	0.70	0.40	49.70	49.00
Liquefied natural gas resources	Brunei	4.75	3.20	2.29	49.20	50.90
	Trinidad	3.40	0.39	0.07	49.80	48.80
	Algeria	8.61	1.18	0.32	49.50	49.60
	Indonesia	6.41	2.38	1.03	49.40	50.30
	Nigeria	5.05	2.95	1.47	49.30	50.50
	Qatar	7.07	2.50	1.16	49.30	50.50
	Abu Dhabi	12.57	1.33	0.14	49.30	50.30
	Malaysia	6.88	3.98	1.50	49.20	51.10
	Australia	9.04	3.60	0.95	49.20	50.90
	Oman	8.31	3.32	1.76	49.10	51.10

Πίνακας 2. Σύσταση πηγών Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου

3.3.2 Μη Κλασσικά Καύσιμα Αεριοστρόβιλων (Non – Traditional Gas Turbine Fuels)

Στο σύγχρονο παγκόσμιο και μεταβαλλόμενο ενεργειακό τοπίο, υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον για στροφή προς μη παραδοσιακά καύσιμα, αξιοποιώντας την εμπειρία που έχει αποκτηθεί κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων δεκαετιών. Ως μηχανές συνεχούς ροής με στιβαρή κατασκευή και καθολικά συστήματα καύσης, οι αεριοστρόβιλοι έχουν εξελιχθεί και έχουν δυνατότητες να δέχονται μεγάλη ποικιλία καυσίμων. Υπάρχουν πολλά εναλλακτικά καύσιμα αλλά δεν είναι όλα εφαρμόσιμα σε κάθε περιοχή. Η ταξινόμηση των εναλλακτικών αυτών καυσίμων μπορεί να γίνει ως εξής :

- Πετρέλαια, συμπεριλαμβανομένου και του φυσικού πετρελαίου και άλλων παραγώγων διύλισής του, τα οποία θερμαίνονται σε αποδεκτά επίπεδα για να αποκτήσουν το κατάλληλο ιξώδες για καύση σε αεριοστρόβιλο.
- Παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών – προερχόμενα από πετρέλαιο, φυσικό αέριο ή τομείς του χάλυβα.
- Συνθετικό αέριο (Syngas) και συνθετικά καύσιμα (Synfuels) – Μπορεί να παραχθεί από πολλές πηγές, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου, γαιάνθρακα, βιομάζα ή σχεδόν οποιοδήποτε υδρογονάνθρακα με αντίδραση με ατμό ή οξυγόνο. Το syngas είναι ένας κρίσιμος ενδιάμεσος πόρος για παραγωγή υδρογόνου, αμμωνίας, μεθανόλης και συνθετικών καυσίμων υδρογονανθράκων. Επίσης, χρησιμοποιείται και ως ένα ενδιάμεσο στην παραγωγή συνθετικού πετρελαίου για τη χρήση του ως καύσιμο ή λιπαντικό.
- Βιοκαύσιμα – περισσότερο ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο τον κόσμο. Είναι πρωταρχικού ενδιαφέροντος λόγω του συνολικού τους ουδέτερου ισοζυγίου άνθρακα.

Αυτές οι κατηγορίες αντιπροσωπεύουν δυνητικά άφθονες πηγές ενέργειας και προσφέρουν ελπιδοφόρες προοπτικές.

3.3.2.1 Αργό Πετρέλαιο (Crude Oil)

Το αργό πετρέλαιο είναι μια φυσικά εμφανιζόμενη ουσία που ευρίσκεται σε συγκεκριμένους πετρώδεις σχηματισμούς στο έδαφος. Είναι ένα μαύρο, κολλώδες υγρό που κατηγοριοποιείται ως υδρογονάνθρακας. Αυτό σημαίνει ότι είναι μία ένωση που περιέχει μόρια δομημένα από άτομα άνθρακα και υδρογόνου, με ή χωρίς μεταλλικά στοιχεία όπως το οξυγόνο και το θείο. Το αργό πετρέλαιο ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό, τόσο στην ικανότητα του όσο και στη σύνθεση. Μπορεί να είναι ένα κιτρινωπό υγρό ή μαύρο στερεό σαν πίσσα. Το κόκκινο, πράσινο ή καφέ χρώμα δεν είναι ασυνήθιστο. Τα παράγωγα του φυσικού αερίου που προκύπτουν από επεξεργασία καυσίμων, π.χ. διύλιση, είναι συνηθισμένα καύσιμα.

Μολονότι διάφοροι τύποι αυτών των υδρογονανθράκων βασίζονται στο πετρέλαιο, διαφέρουν στη διαμόρφωση τους. Τα άτομα του άνθρακα μπορούν να συνδέονται σε ένα δαχτυλίδι ή αλυσίδα, έκαστο με πλήρες ή μερικό συμπλήρωμα ατόμων υδρογόνου. Ο αριθμός των ατόμων άνθρακα καθορίζει το σχετικό 'βάρος' ή πυκνότητα του πετρελαίου. Τα αέρια γενικά έχουν ένα ως τέσσερα άτομα άνθρακα, ενώ τα βαρέα πετρέλαια μπορούν να χουν και 50 και οι άσφαλτοι εκατοντάδες. Μερικοί υδρογονάνθρακες ενώνονται εύκολα με άλλα υλικά και μερικοί αντιστέκονται σε τέτοιο δεσμό.

Μια σημαντική λεπτομέρεια για τις διυλίσεις στο να ξεχωρίζονται τα διάφορα συστατικά του αργού πετρελαίου κατά βάρος και σημείο βρασμού είναι ότι οι

υδρογονάνθρακες επίσης διαφέρουν στις θερμοκρασίες βρασμού τους. Οι πιο ελαφροί υδρογονάνθρακες, τα αέρια, βράζουν κάτω από τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Τα συστατικά του αργού πετρελαίου συνήθως ανάγκασαν τη βενζίνη να βράζει στο διάστημα από 12°C ως 200°C

Εφαρμογή του αργού πετρελαίου

Σε πολλές εγκαταστάσεις για έρευνα και εντοπισμό κοιτασμάτων πετρελαίου, η χρήση των τοπικά διαθέσιμων καυσίμων για την παραγωγή της ενέργειας που απαιτείται είναι μια βασική προϋπόθεση, καθώς οι μονάδες βρίσκονται συχνά σε απομακρυσμένες χερσαίες ή υπεράκτιες περιοχές, με περιορισμένη ή και χωρίς καθόλου πρόσβαση σε διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός από αυτό, η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ακριβών καυσίμων είναι προβληματική και αντιοικονομική. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται αέριο ως καύσιμο παραγωγής ενέργειας, αλλά σε ορισμένες περιοχές με πολλά κοιτάσματα πετρελαίου δεν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι αερίου για να τροφοδοτούν το σταθμό καθ' όλη τη διάρκεια του έργου. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί το αργό πετρέλαιο που παράγεται ως κύριο καύσιμο για την παραγωγή ενέργειας.

Ενώ υπάρχουν πολλές πιθανές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας που μπορούν να αξιοποιήσουν επεξεργασμένο πετρέλαιο ως καύσιμο, υπάρχουν ,συχνά, επίσης ζητήματα χώρου και βάρους , ειδικά στις υπεράκτιες πλατφόρμες, που πρέπει να μελετηθούν όταν εξετάζουμε τις επιλογές του σταθμού.



Εικόνα 3.3. Τυπική υπεράκτια πλατφόρμα εξόρυξης αερίου/πετρελαίο

Το παράδειγμα του Αεριοστρόβιλου SGT-500

Ο βιομηχανικός αεριοστρόβιλος SGT-500 της Siemens είναι ένας υψηλά αξιόπιστος αεριοστρόβιλος με εξαιρετική δυνατότητα εναλλαξιμότητας καυσίμων. Συνδυάζει την αξιοπιστία και την ισχύ ενός βιομηχανικού σχεδιασμού και χαμηλά επίπεδα

εκπομπών της τελευταίας τεχνολογίας στροβίλων για μια μεγάλη ποικιλία καυσίμων και εφαρμογών σε χαμηλά κόστη λειτουργίας. Ο αεριοστρόβιλος SGT-500 έχει υπηρετήσει τη βιομηχανική παραγωγή ενέργειας για παραπάνω από 50 χρόνια. Εισήχθη το 1955 και είχε σχεδιαστεί για λειτουργία με βαρύ αργό πετρέλαιο κάτω από δύσκολες συνθήκες. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θαλάσσιες όσο και άλλες εφαρμογές πετρελαίου και φυσικού αερίου, είτε σε χερσαίες είτε υπεράκτιες μονάδες.

Λόγω των μεγάλων και ευρύχωρων καυστήρων και της χαμηλής του θερμοκρασίας ανάφλεξης, ο SGT-500 έχει την ικανότητα να λειτουργεί με ένα μεγάλο εύρος καυσίμων. Αυτά, σύμφωνα με εμπειρικά δεδομένα, περιλαμβάνουν βαριά κλάσματα πετρελαίου, νάφθα, αργό πετρέλαιο, υψηλά αρωματικά αέρια εμπλουτισμένα με υδρογόνο, όπως επίσης και αέρια υψηλής περιεκτικότητας σε υδροθείο. Επιπλέον, το σύστημα του καυστήρα έχει την ικανότητα εύκολης προσαρμογής σε επιπλέον υγρά και αέρια καύσιμα, φιλικά προς το περιβάλλον.

- **Εξαιρετική ικανότητα χρήσης αργού πετρελαίου**

Ο σχεδιασμός του καυστήρα είναι τέτοιος που δύναται να δεχθεί υγρά καύσιμα με ιξώδη ως 20 cSt (1 cSt = 1 cm²/s), περισσότερο από το διπλάσιο του επιτρεπόμενου ιξώδους των περισσότερων αεριοστρόβιλων. Σε συνδυασμό με το πεπιεσμένο σύστημα καυσίμου που επιτρέπει στο καύσιμο να προθερμανθεί σε τόσο υψηλή θερμοκρασία όπως 150° C για την ελάττωση του ιξώδους του καυσίμου, είναι δυνατό να γίνει χρήση καυσίμων με ιξώδη 750 cSt στους 50° C ή υψηλότερα στον SGT-500. Αυτό επιτρέπει στο χειριστή να χρησιμοποιεί βαρύ αργό πετρέλαιο καθώς και κλάσματα τους από διεργασίες διύλισης. Όπου είναι απαραίτητο και υπάρχει αναγκαιότητα για συμμόρφωση με αυστηρές περιβαλλοντικές νομοθεσίες, μπορεί να γίνει έγχυση νερού για τη μείωση των εκπομπών NO_x, όπου είναι εφικτό να επιτευχθούν εκπομπές NO_x κάτω από 50 ppm σε όλο το φάσμα του φορτίου.

- **Μεικτή χρήση καυσίμου**

Η διπλή λειτουργία καυσίμων – λειτουργία με 100% αέριο ή 100% υγρό καύσιμο, με δυνατότητα εναλλαγής μεταξύ των καυσίμων ενώ ευρίσκεται σε λειτουργία- είναι ένα τυπικό χαρακτηριστικό των αεριοστρόβιλων της Siemens. Σε περιπτώσεις όπου το σχετικό αέριο βρίσκεται σε ποσότητες πολύ μικρές για να επιτραπεί η λειτουργία με 100% αέριο καύσιμο, ο αεριοστρόβιλος SGT-500 παρουσιάζει το πλεονέκτημα της ικανότητας λειτουργίας με μίγμα αερίου και υγρού καυσίμου. Το ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο ροής καυσίμου εξαρτάται από το φορτίο , αλλά σε περίπτωση

ανεπαρκούς ροής αέριου καυσίμου, ο αεριοστρόβιλος θα επανέλθει σε λειτουργία 100% υγρού καυσίμου.

- **Υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα**

Η λειτουργία σε μερικά φορτία, με ακόμη μικρότερες θερμοκρασίες ανάφλεξης, επίσης συμβάλλει στη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Με τη λειτουργία με καύσιμα αργού πετρελαίου στο 90% του πλήρους φορτίου ή λιγότερο, ο αεριοστρόβιλος SGT-500 προσφέρει υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα

3.3.2.2 Παραπροϊόντα βιομηχανικών διεργασιών

Μια σειρά από βιομηχανικές διεργασίες παράγουν παραπροϊόντα που είναι κατάλληλα για καύση σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα, η απόσταξη του αργού πετρελαίου, η υδροαλκυλίωση, η υδρογονοπυρόλυση σε διυλιστήρια και πετροχημικές βιομηχανίες παράγουν πολύτιμα αέρια που γενικά αναμιγνύονται μεταξύ τους και αποτελούν το δίκτυο αέριου καυσίμου του σταθμού. Οι μονάδες αεριοστρόβιλων βαρέως τύπου (Heavy Duty Gas Turbine units) μπορούν να επωφεληθούν ακόμη περισσότερο από τη χρήση τέτοιων εναλλακτικών καυσίμων για τους εξής λόγους:

- Αναπτύσσουν καλύτερες αποδόσεις στην παραγωγή ενέργειας σε σχέση με τους κύκλους ατμού.
- Οι αναλογίες ενέργειας/θέρμανσης του συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας βασισμένου σε αεριοστρόβιλο ανταποκρίνονται στις σύγχρονες απαιτήσεις των βιομηχανικών εγκαταστάσεων.
- Ικανοποιούν και τα αυστηρότερα πρότυπα αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας που έχουν τοποθετηθεί από διυλιστήρια και πετροχημικές βιομηχανίες.
- Μπορούν να λειτουργήσουν πάνω από 8.000 ώρες χωρίς διακοπή.
- Δέχονται και άλλα εναλλακτικά καύσιμα: πετρέλαια, νάφθα, αέρια με βάση προπάνιο – βουτάνιο, καθώς και βαρέα κλάσματα πετρελαίου.

3.3.2.3 Συνθετικό αέριο και Συνθετικά καύσιμα (Syngas and Synfuels)

Τα καύσιμα που έχουν ως κύριο συστατικό τον άνθρακα, όπως βαρέα προϊόντα διύλισης, γαιάνθρακας ή λιγνίτης που ανήκουν στην κατηγορία των συνθετικών

καυσίμων θα παίξουν ένα σημαντικό ρόλο ως εναλλακτικά καύσιμα, με την προϋπόθεση ότι η καύση τους πραγματοποιείται σε συνθήκες αποδοτικές και ευνοϊκές προς το περιβάλλον.

Το συνθετικό αέριο παρέχει αυξημένες δυνατότητες ευελιξίας για τη χρήση των διαθέσιμων πηγών ενέργειας. Η αεριοποίηση είναι μια διαδικασία που μετατρέπει οργανικά ή ορυκτά ανθρακούχα υλικά, όπως η βιομάζα, σε ένα αέριο μίγμα που ονομάζεται αέριο σύνθεσης ή συνθετικό αέριο (Syn gas) και είναι το ίδιο ένα είδος καυσίμου. Το συνθετικό αέριο μπορεί να καεί άμεσα σε κινητήρες αερίου, ή να μετατραπεί μέσω της διεργασίας Fischer-Tropsch σε συνθετικά καύσιμα.

Το πλεονέκτημα της αεριοποίησης είναι ότι η χρήση του αερίου σύνθεσης είναι δυναμικά πιο αποτελεσματική από ότι η άμεση καύση του αρχικού καυσίμου, επειδή μπορεί να καίγεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες ή ακόμη και σε κυψέλες καυσίμου. Επιπλέον, η μέθοδος υψηλής θερμοκρασίας αφαιρεί τα διαβρωτικά στοιχεία της τέφρας όπως το χλώριο και το κάλιο, επιτρέποντας την παραγωγή καθαρού αερίου από προβληματικά καύσιμα.

Τόσο από προοπτική αποδοτικότητας, όσο και από περιβαλλοντική σκοπιά, το Ολοκληρωμένο Σύστημα Αεριοποίησης Συνδυασμένου Κύκλου (Integrated Gasification Combined Cycle – IGCC) αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογική λύση για τις μακροπρόθεσμες ανάγκες ισχύος. Το IGCC στην πραγματικότητα συνδυάζει :

- Προηγμένη απόδοση μετατροπής
- Στερεές και υγρές πρώτες ύλες από τοπικές πηγές
- Χαμηλό κόστος επένδυσης
- Μεγαλύτερο έλεγχο στην εκπομπή μολυσματικών παραγόντων (NO_x, SO_x, Υδράργυρος, Αιωρούμενα Σωματίδια)
- Ετοιμότητα δέσμευσης CO₂, σε συνδυασμό με δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα
- Ευελιξία καυσίμων

Το καθαρισμένο συνθετικό αέριο (purified natural gas) όχι μόνο παρέχει αυξημένη δυνατότητα ευελιξίας των αξιοποιήσιμων πηγών ενέργειας, αλλά επιτρέπει και τη χρήση τους στους αεριοστρόβιλους, όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρισμού, θερμικής ενέργειας και την παράγεια και αποθήκευση του διοξειδίου του άνθρακα.

Η διαφορά – όπως ορίζεται από τη Siemens – μεταξύ ενός αρτίου χαμηλών BTU και του συνθετικού αερίου είναι ότι το πρώτο δεν περιέχει κάποια ποσότητα υδρογόνου πέρα από τα τυπικά του συστατικά. Από την άλλη, το συνθετικό αέριο έχει ένα κύριο συστατικό, το οποίο είναι το υδρογόνο. Η φύση του υδρογόνου είναι ότι έχει την

υψηλότερη αντιδραστικότητα και ταχύτητα φλόγας σε σχέση με όλα τα άλλα εύφλεκτα αέρια. Αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος καύσης και στις σχετικές δοκιμές καύσης υψηλής πίεσης.

Για να αντιστοιχηθεί η αντιδραστικότητα του συνθετικού αερίου με την κινητική της καύσης των τυπικών καυσίμων, αυτό αναμιγνύεται με άζωτο (ένα παραπροϊόν από τη μονάδα διαχωρισμού του αέρα), διοξείδιο του άνθρακα και/ή ατμό ως αδρανείς ποσότητες.

Το συνθετικό αέριο έχει πολύ χαμηλή θερμογόνο ικανότητα ανάμεσα σε 4 και 12 MJ/Kg με αποτέλεσμα η ροή καυσίμου – σε σταθερή θερμική ισχύ εισόδου - να είναι υψηλότερη σε σχέση με των τυπικών καυσίμων. Η ιδιότητα αυτή πρέπει να ληφθεί υπόψη και σε συνδυασμό με το όριο αντοχής σε πίεση για το συμπιεστή του αεριοστρόβιλου και το σχεδιασμό του. Λόγω της χαμηλής κατώτερης θερμογόνου ικανότητας, το σύστημα αερίου καυσίμου πρέπει να τροποποιηθεί βασισμένο σε αποδεδειγμένες τεχνολογίες σχεδιασμού για να ανταποκριθεί στις μεγάλες ποσότητες του καυσίμου. Υψηλότερη «προσπάθεια» ανταπόκρισης στην αυξημένη ροή αποδίδει αύξηση στην ενέργεια εξόδου και στην αποδοτικότητα.

3.3.2.4 Ανανεώσιμα Υγρά – Βιοκαύσιμα

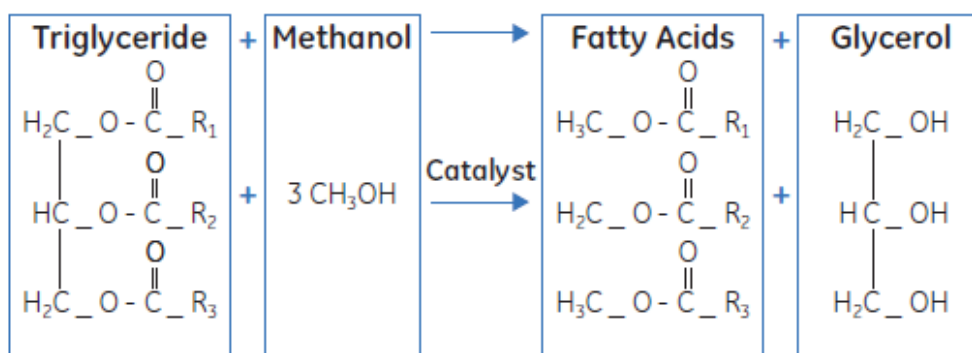
Καθώς πολλές χώρες στον κόσμο βρίσκονται σε αναζήτηση ευκαιριών νέων καυσίμων, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον και ανησυχία για τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Μια προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος αυτού είναι η χρησιμοποίηση καυσίμων «ουδέτερων» ως προς άνθρακα. Αυτά είναι καύσιμα που δεν προσθέτουν κάποια παραπάνω ποσότητα άνθρακα στο τωρινό περιβάλλον. Μια τέτοια λύση είναι τα βιο-καύσιμα, τα οποία κατ' ουσία «ανακυκλώνουν» τον άνθρακα ήδη στο περιβάλλον. (Από την άλλη, τα ορυκτά καύσιμα επιστρέφουν τον άνθρακα πίσω στο περιβάλλον μετά από χιλιάδες ή εκατομμύρια χρόνια δέσμευσης.). Υπάρχουν πολλά βιο-καύσιμα και βιο-πρώτες ύλες που βρίσκονται υπό εξέταση σε όλο τον κόσμο. Αυτές οι πρώτες ύλες μπορεί να περιλαμβάνουν καλαμπόκι, σόγια, φοινικέλαιο και κραμβέλαιο.

Πολλαπλές χημικές διεργασίες λαμβάνουν αυτές τα – φυτικής προέλευσης – στοιχεία και τα μετατρέπουν σε καύσιμα βασισμένα σε αλκοόλες, όπως η μεθανόλη και η εθανόλη, ή σε καύσιμα σαν το πετρέλαιο, όπως το βιοντίζελ. Οι δημοφιλέστερες ταξινομήσεις των υγρών βιο-καυσίμων είναι:

- Φυτικά έλαια, ως παρθένα ή ανακυκλωμένα προϊόντα
- Αλκοόλες
- Εστεροποιημένα φυτικά έλαια ή αλκυλεστέρες λιπαρών οξέων

Κοιτώντας πιο προσεκτικά το ευρύ πεδίο των βιο-καυσίμων, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι υπάρχει μια προοδευτική πορεία μεταξύ των προϊόντων που έχουν γεωργική προέλευση και αυτών που έχουν ορυκτή. Η μεθανόλη είναι ένα διπλό – πολύπλευρο προϊόν που προέρχεται από διαδικασίες μετατροπής είτε Βιομάζας σε Υγρό , είτε Αερίου σε Υγρό. Μερικά προϊόντα μπορούν να περιλαμβάνουν στην προετοιμασία τους τόσο ανανεώσιμες, όσο και ορυκτές πρώτες ύλες.

Ένα καύσιμο που προσελκύει σε μεγάλο βαθμό την προσοχή στον τομέα των αεριοστρόβιλων είναι το βιοντίζελ. Το βιοντίζελ ή «αλκυλεστέρες ανώτερων λιπαρών οξέων» είναι μετασχηματισμοί τριγλυκεριδίων τα οποία παράγονται από την αντίδραση ενός μορίου τριγλυκεριδίου με τρία μόρια μιας μονοαλκοόλης που εκτοπίζει τη γλυκερόλη από το τριγλυκερίδιο, μέσω μιας αντίδρασης τρανς-εστεροποίησης , όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Εικόνα 3.4. Αντίδραση τρανς-εστεροποίησης βιοντίζελ

Η πιο χρησιμοποιούμενη μονοαλκοόλη είναι η μεθανόλη, όπου στη συνέχεια αποδίδει ένα μεθυλεστέρα λιπαρού οξέος (Fatty Acid Methyl Ester – FAME). Ωστόσο και η αιθανόλη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, που οδηγεί σε ένα αιθυλεστέρα λιπαρού οξέος (Fatty Acid Ethyl Ester – FAEE). Καθώς ο FAME είναι μακράν το πιο διαδεδομένο προϊόν, χρησιμοποιείται στο εξής ως συνώνυμο για τον FAEE ή το βιοντίζελ.

Έχουν υπάρξει πολλές αναφορές και εκθέσεις για διάφορους αεριοστρόβιλους που λειτουργούν με μίγματα βιοντίζελ. Σε όλες τις δοκιμές, οι εκπομπές NO_x ήταν τουλάχιστον τόσο χαμηλές όσο οι ανάλογες στη λειτουργία με πετρέλαιο Ντίζελ και, σε μερικές περιπτώσεις, οι εκπομπές ήταν χαμηλότερες. Πιο συγκεκριμένα λαμβάνοντας υπόψη τις δοκιμές που έγιναν στον αεριοστρόβιλο βαρέως τύπου 6B και χρησιμοποιώντας ως βάση σύγκρισης το πετρέλαιο Ντίζελ , τα αποτελέσματα συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία :

- Οι εκπομπές SO_x είναι ελάχιστες (κάτω από 1 ppm), όπως ήταν αναμενόμενο

- Όχι ορατό νέφος. Η θολότητα του καπνού χαμηλότερη συγκριτικά με αυτή του πετρελαίου ντίζελ.
- Οι εκπομπές Μονοξειδίου του Άνθρακα και Πτητικών Οργανικών Ενώσεων είναι τόσο λίγες όσο και με το πετρέλαιο ντίζελ.
- Η εκπομπή NOx είναι χαμηλότερη συγκριτικά με του πετρελαίου ντίζελ.
- Η τεχνική μείωσης των εκπομπών NOx με ψεκασμό νερού είναι φυσιολογική και όμοια με αυτήν του πετρελαίου ντίζελ.

Λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα για μείωση των εκπομπών άνθρακα, το βιοντίζελ μπορεί να αποτελέσει μια 'ελκυστική' εναλλακτική των αποσταγμένων καυσίμων όταν είναι διαθέσιμο.

Συμπεράσματα

Μια ανάλυση των νεοεμφανιζόμενων καυσίμων δείχνει ότι ο τομέας παραγωγής ενέργειας θα αντιμετωπίσει μεγάλες προκλήσεις. Η προβλεψιμότητα των συμβατικών πηγών καυσίμων και οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις δημιουργούν πολλά προβλήματα σε διάφορα μακροπρόθεσμα σχέδια. Σαν αποτέλεσμα, υπάρχει μεγάλη προτεραιότητα να διερευνηθούν όλα τα βιώσιμα κανάλια εναλλακτικής ενέργειας.

Οποιαδήποτε λογική αξιοποίηση των εναλλακτικών καυσίμων μπορεί να δημιουργήσει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη. Σε ένα περιβάλλον με περιορισμούς στις εκπομπές άνθρακα, η τάση της τεχνολογίας για συστήματα καύσης είναι τέτοια που επιτρέπει την καύση συνθετικού αερίου και καύσιμα εμπλουτισμένα με υδρογόνο, προσφέροντας την απαιτούμενη λειτουργικότητα. Στο νέο αυτό πλαίσιο, η μεγάλη πείρα από τη λειτουργία των αεριοστροβίλων, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ενός μεγάλου συμπλέγματος καυσίμων δημιουργεί ευνοϊκές προοπτικές για το μέλλον.

Κεφάλαιο 4

Φυσικό Αέριο και Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

(Natural Gas and Internal Combustion Engines)

Η ατμοσφαιρική ρύπανση στις μέρες έχει μετατραπεί σε ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα, τόσο σε αστικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο με την αύξηση του πληθυσμού και, κατ' επέκταση, των αναγκών του. Αυτό έχει οδηγήσει σε αυξημένο ενδιαφέρον για τη χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου ως καύσιμο για μηχανές εσωτερικής καύσης. Οι πηγές φυσικού αερίου είναι πάρα πολλές και διαδεδομένες γεωγραφικά και δεν είναι περιορισμένες λόγω πολιτικών ευαισθησιών όπως το αργό πετρέλαιο. Σύμφωνα με τα ως τώρα επίπεδα κατανάλωσης, το υπολογισμένο ανανεώσιμο αέριο, συμπεριλαμβανομένων και των αποθεμάτων, επαρκεί για περίπου 200 χρόνια. Για να υπάρξει όμως κέρδος από τη χρήση του φυσικού αερίου στις μηχανές εσωτερικής καύσης, απαραίτητο είναι να μελετηθεί η καύση του κάτω από ιδανικές συνθήκες και να εξεταστεί η επίδραση διαφόρων παραμέτρων σε αυτή (S. O. Akansu *et al.* 2004)

4.1 Επισκόπηση

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση εναλλακτικού καυσίμου στις μηχανές εσωτερικής καύσης έχει λάβει ανανεωμένη προσοχή. Η αβεβαιότητα στη διαθεσιμότητα καυσίμων που έχουν ως βάση το πετρέλαιο έχει δημιουργήσει την ανάγκη για αναζήτηση εναλλακτικών καυσίμων. Στη σύγχρονη εποχή, η έμφαση και το κίνητρο για μείωση των εκπομπών των ρύπων από μηχανές που στηρίζονταν στο πετρέλαιο έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και μελέτη πολλών εναλλακτικών καυσίμων. Οι συμβατικές μηχανές Diesel και βενζίνης ρυπαίνουν περισσότερο. Οι, προσεχώς, αυστηρές προδιαγραφές εκπομπών ρύπων σε συνδυασμό με την αύξηση του κόστους των καυσίμων και η εξάντληση των πόρων του αργού πετρελαίου έχουν δώσει ώθηση να γίνει έρευνα σε εναλλακτικά καύσιμα, φιλικά προς το περιβάλλον.

Με την συνεχώς και αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση που υφίσταται και ανησυχία για την προστασία του περιβάλλοντος, η καθαρή καύση με υψηλή απόδοση έχει λάβει αυξημένη προσοχή. Η περαιτέρω μείωση στις εκπομπές της μηχανής από τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων έχει γίνει ένας από τους σημαντικότερους τομείς στην ανάπτυξη των μηχανών. Διάφορα καύσιμα έχουν θεωρηθεί ως υποκατάστατα των καυσίμων που έχουν βάση υδρογονάνθρακες. Τα καύσιμα που φιλοδοξούν να

αντικαταστήσουν τα καύσιμα με βάση το πετρέλαιο περιλαμβάνουν αλκοόλες, υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (Liquefied Petroleum Gas - LPG), συμπιεσμένο φυσικό αέριο (Compressed Natural Gas - CNG), υδρογόνο, φυτικά έλαια, βιοαέριο και υγροποιημένο φυσικό αέριο (Liquefied Natural Gas). Ειδικότερα, το φυσικό αέριο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο και δημοφιλές εναλλακτικό καύσιμο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οχήματα σε δύο μορφές, ως συμπιεσμένο και ως υγροποιημένο (CNG και LNG). Μολονότι το LNG έχει χρησιμοποιηθεί σε μερικά οχήματα κατά το παρόν, το κόστος για την ανατροφοδότηση των δεξαμενών LNG δε συγκρίνεται με του CNG. Το CNG παράγει χαμηλές εκπομπές υδρογονανθράκων (HC) και διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και αμελητέα SO_x και σωματιδιακή ύλη (Particulate Matter – PM), καθιστώντας το «καθαρό» καύσιμο.

Το συμπιεσμένο φυσικό αέριο έχει την ικανότητα να αποτελεί ένα καύσιμο με ισχυρά πλεονεκτήματα όσον αφορά την απόδοση, το κόστος και τις εκπομπές όταν χρησιμοποιείται σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Λόγω του υψηλότερου αριθμού οκτανίων του, η απόδοση της μηχανής μπορεί να αυξηθεί μέσω υψηλότερων βαθμών συμπίεσης. Παράγει επίσης χαμηλότερες εκπομπές ρύπων και είναι διαθέσιμο σε αφθονία σε πολλά μέρη του κόσμου.

Εξετάζονται εν συντομία πτυχές της χρήσης του συμπιεσμένου φυσικού αερίου όπως σύνθεση, μέτρηση, αποθήκευση, καύση και αποδοτικότητα.

Σύνθεση αερίου στις Μ.Ε.Κ.

Το φυσικό αέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο με ένα μικρό ποσοστό αιθανίου, προπανίου και βουτανίου. Πολύ μικρές συγκεντρώσεις αδρανών αερίων όπως το άζωτο (N₂) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) παρουσιάζονται επίσης. Το μεθάνιο υπάρχει στο αέριο σε ποσοστό 90 ως 95%. Στην αέρια φάση του είναι ελαφρύτερο από τον αέρα, άχρωμο και άοσμο. Εάν υπάρχει κάποια οσμή, αυτή οφείλεται σε ακαθαρσίες όπως μερκαπτάνες και άλλα προϊόντα τα οποία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες ως προληπτικό μέτρο ασφαλείας, ειδικά στις αστικές περιοχές, καθώς μπορεί να παρέχει ένα προειδοποιητικό σήμα σε περίπτωση διαρροής. Ένας ακριβής προσδιορισμός της σύνθεσης των φυσικών αερίων μπορεί να γίνει μέσω Αέριας Χρωματογραφίας (Gas Chromatography – GC) και Φασματομετρίας Μάζας (Mass Spectrometry). Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο GC καθίσταται δυνατή η επίτευξη ακρίβειας της τάξης του εκατομμυριοστού. Η σύνθεση του αερίου μπορεί να ποικίλλει από πηγή σε πηγή ή ακόμα και στην ίδια πηγή σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Μία από τις κύριες παραμέτρους που επηρεάζουν την απόδοση της μηχανής είναι η σύνθεση του φυσικού αερίου. Για το λόγο αυτό οι σχεδιαστές των Μ.Ε.Κ. οφείλουν να λάβουν υπόψη τους κάποιους παράγοντες όταν καλούνται να κρατήσουν αμετάβλητη την λειτουργία της μηχανής στην περίπτωση που οι χρήστες την τροφοδοτούν με φυσικό αέριο διαφορετικού προμηθευτή.

Για την αντικατάσταση ενός καυσίμου με ένα άλλο χωρίς αναπροσαρμογή της μηχανής, πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως ίσο ποσοστό χημικής ενέργειας εισόδου, ίση αντικροτικότητα (knock resistance) και ο ίσος χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης. Για τα δύο πρώτα κριτήρια χρησιμοποιούνται ο Δείκτης Wobbe (Wobbe number) και ο Αριθμός Μεθανίου (Methane Number-MN).

Ο Δείκτης Wobbe ορίζεται ως ο λόγος της κατώτερης θερμογόνου ικανότητας του καυσίμου διά της τετραγωνικής ρίζας της ειδικής βαρύτητας του αέριου καυσίμου. Αλλάζει με τη σύνθεση και φυσικά υποδεικνύει τη ροή χημικής ενέργειας μέσα στη μηχανή. Ως εκ τούτου, εάν ο δείκτης Wobbe διατηρείται σταθερός, η απόδοση δεν πρέπει να αλλάξει με την αλλαγή στη σύνθεση του καυσίμου. Οι αλλαγές στον αριθμό αυτό υποδεικνύουν επίσης αλλαγές στο λόγο αντιστοιχίας. Ο λόγος αντιστοιχίας είναι ο πραγματικός λόγος καυσίμου-αέρα διά το στοιχειομετρικό λόγο καυσίμου-αέρα. Τα μίγματα με λόγο αντιστοιχίας μεγαλύτερο του 1 αποκαλούνται πλούσια, ενώ με μικρότερο του 1 φτωχά. Σε μηχανές «φτωχής καύσης αέριου καυσίμου», μεταβολές στα καύσιμα μπορούν να διαφοροποιήσουν το λόγο αντιστοιχίας της μηχανής καθώς και το όριο ανάφλεξης του μίγματος με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη μηχανή να ρετάρει (engine misfire).

Για την ταξινόμηση των αέριων καυσίμων σε σχέση με την ευαισθησία τους στην κρουστική καύση (knock) χρησιμοποιείται μια ποσότητα που αποκαλείται *Αριθμός Μεθανίου (Methane Number-MN)*. Στο μεθάνιο ως υψηλά αντικροτικό καύσιμο έχει αποδοθεί στην ποσότητα αυτή αυθαίρετη τιμή ίση με 100, ενώ αντίθετα στο υδρογόνο που παρουσιάζει ευαισθησία στην κρουστική καύση ο MN παίρνει την τιμή 0. Στο μίγμα CH₄/H₂ το ποσοστό κατ' όγκο του μεθανίου ισούται με τον MN του μίγματος. Ο δείκτης αυτός στα διάφορα μίγματα καυσίμων μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά εφαρμόζοντας το καύσιμο σε μια πειραματική μηχανή και αυξάνοντας το λόγο συμπίεσης έως ότου παρουσιαστεί το φαινόμενο της κρουστικής καύσης. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αυξάνει την αντικροτικότητα ενός καυσίμου. Συνεπώς, το εύρος τιμών του MN μπορεί να υπερβαίνει το 100 συγκρίνοντας την αντικροτικότητα ενός δεδομένου καυσίμου σε σχέση με αυτή ενός μίγματος CH₄/CO₂.

Αέριο Καύσιμο	Αριθμός Μεθανίου
Μεθάνιο	100
Υδρογόνο	0
Αιθάνιο	44
Προπάνιο	32
Βουτάνιο	8
Μονοξείδιο του Άνθρακα	62
Βιοαέριο από Βιολογικούς Σταθμούς (40% CO ₂)	140
Υγραέριο (40% Βουτάνιο)	25
Φυσικό Αέριο	89

Πίνακας 3. Αριθμός Μεθανίου (Methane Number) ορισμένων καυσίμων

Σε γενικές γραμμές, για το φυσικό αέριο ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης, δεν σημειώνονται αξιοσημείωτες αλλαγές στο λόγο αέρα-καυσίμου, στη στρωτή ταχύτητα καύσης (laminar burning velocity), η οποία επηρεάζει το χρόνο ανάφλεξης και στην αντικροτικότητα όταν ο δείκτης Wobbe παραμένει σταθερός. Επομένως, ο δείκτης Wobbe είναι το πιο σημαντικό κριτήριο ευελιξίας μιγμάτων φυσικού αερίου στις μηχανές.

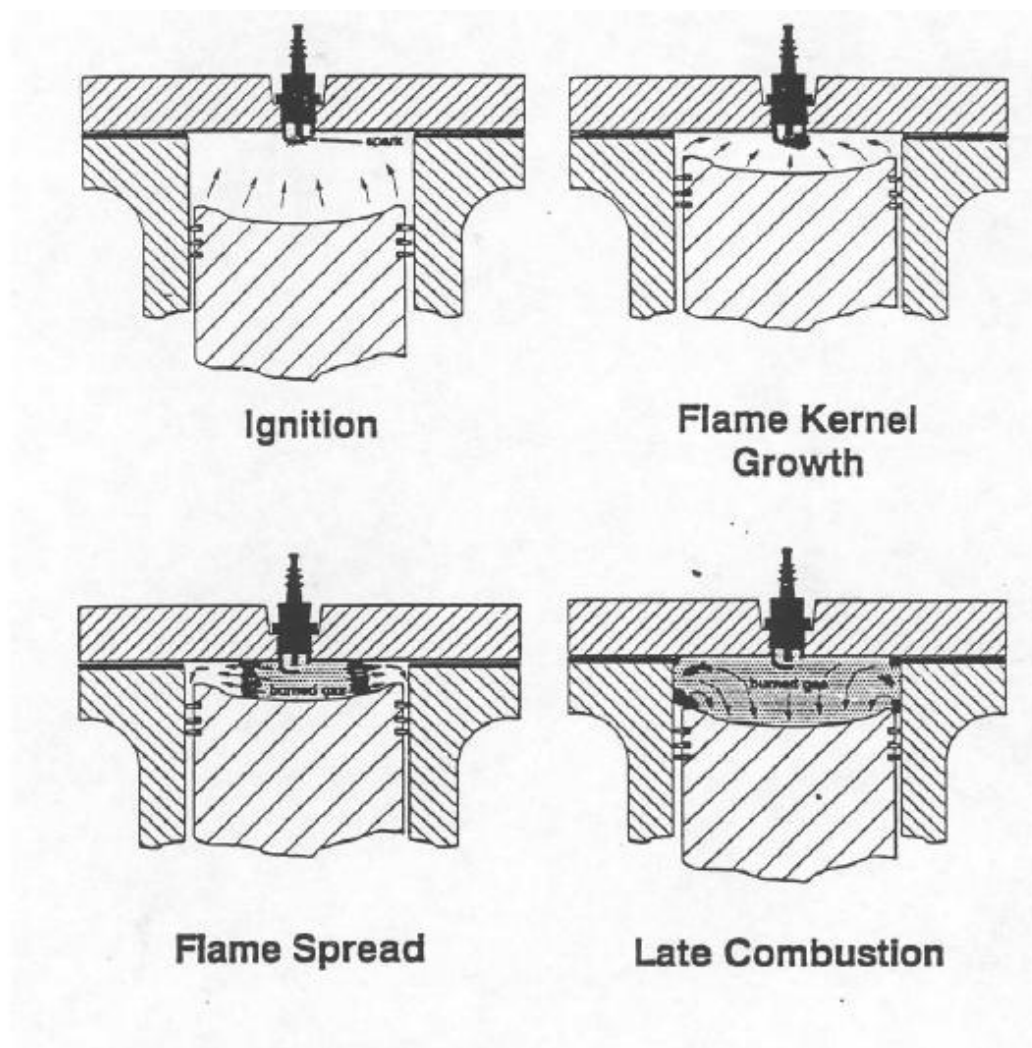
4.2 Χαρακτηριστικά καύσης και εκπομπών στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

Οι ανησυχίες για τις εκπομπές ρύπων που σχετίζονται με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, τις αρνητικές επιπτώσεις που αυτές επιφέρουν στην υγεία και το περιβάλλον σε συνδυασμό με την αναζήτηση για άλλες πηγές ενέργειας εξακολουθούν να είναι δύο σημαντικά θέματα συζήτησης στην αυτοκινητοβιομηχανία. Οι τυπικές τιμές ορίων των εκπομπών θα γίνουν ακόμη πιο αυστηρές καθώς προχωράμε προς την επόμενη δεκαετία. Για τους λόγους αυτούς, εκτεταμένες μελέτες πραγματοποιήθηκαν σε εναλλακτικά καύσιμα όπως η μεθανόλη, αιθανόλη, βουτανόλη, φυσικό αέριο (NG) και υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (Liquefied Petroleum Gas). Το φυσικό αέριο έχει σημαντική θέση ανάμεσα στα εναλλακτικά καύσιμα και ικανότητα για χαμηλές εκπομπές ρύπων όταν χρησιμοποιείται στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Η αφθονία του, το χαμηλό κόστος και τα προσφιλή για το περιβάλλον χαρακτηριστικά των εκπομπών του το καθιστούν σημαντικό εναλλακτικό καύσιμο για ορισμένες εφαρμογές (K. Bhandari *et al.* 2005)

Όπως και άλλα καύσιμα αυτοκινήτων, το φυσικό αέριο παράγει ενέργεια σε μια μηχανή μέσω της καύσης και διάδοση στο θάλαμο καύσης. Έτσι, η απόδοση της μηχανής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό τόσο από το σχεδιασμό της μηχανής όσο και τα χαρακτηριστικά καύσης του καυσίμου.

Στην εικόνα 4 παρατηρούμε τη διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε μια τυπική μηχανή ανάφλεξης με σπινθήρα (Spark Ignition(SI) engine) . Μετά από τον αρχικό σπινθήρα, υπάρχει ένας χρόνος καθυστέρησης (ή αλλιώς περίοδος ανάπτυξης φλόγας) που ο πυρήνας της φλόγας που δημιουργήθηκε από το σπινθήρα μεγαλώνει σε σημαντικό βαθμό. Ακολούθως, το μέτωπο της φλόγας εξαπλώνεται μέσα στο θάλαμο καύσης. Ο ρυθμός εξάπλωσης καθορίζεται από την ταχύτητα καύσης. Αυτή η αύξηση του όγκου των θερμών καυσαερίων πίσω από το μέτωπο της φλόγας πιέζει το πιο ψυχρό άκαυστο τμήμα προς τα έξω. Μολονότι η πυκνότητα των άκαυστων αερίων είναι υψηλότερη μπροστά στον καυσαερίων, η πίεση του κυλίνδρου αυξάνεται, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του άκαυστου τμήματος . Τελικά, κατά τα

τέλη της καύσης τα εναπομείναντα στοιχεία του άκαυστου μίγματος αναφλέγονται καθώς το έμβολο κατεβαίνει.



Εικόνα 4.1. Ακολουθία της καύσης σε μηχανή ανάφλεξης με σπινθήρα

4.2.1 Στρωτή ταχύτητα καύσης (Laminar Burning Velocity, S_L)

Είναι η σχετική ταχύτητα διάδοσης της φλόγας ως προς την ταχύτητα του μίγματος των αντιδρώντων και είναι μια χρήσιμη παράμετρος καύσης που χαρακτηρίζει το συνολικό βαθμό αντίδρασης σε φλόγα προανάμιξης. Παραλλαγές αυτής της παραμέτρου επηρεάζουν την απόδοση της μηχανής. Γενικά, θεωρείται ως μια θεμελιώδης σταθερά, εξαρτώμενη μόνο από την αρχική θερμοκρασία, πίεση και σύνθεση του μίγματος.

Σε γενικές γραμμές, για μίγμα δεδομένης σύνθεσης και θερμοκρασίας, προθέρμανση των αντιδρώντων πριν την καύση αυξάνει τη συνολική ταχύτητα καύσης, ενώ από την άλλη για ένα μίγμα σταθερής θερμοκρασίας και σύνθεσης, αυξημένη πίεση

συνεπάγεται μείωση της ταχύτητας καύσης του μίγματος, του οποίου η ταχύτητα αυτή σε ατμοσφαιρική πίεση είναι κάτω από περίπου 50 cm/s,

Η σύνθεση του μίγματος είναι μία άλλη παράμετρος που επηρεάζει τη στρωτή ταχύτητα καύσης. Περιλαμβάνει και τη σύνθεση του καυσίμου και το λόγο αντιστοιχίας αέρα/καυσίμου. Το φυσικό αέριο έχει ταχύτητα καύσης μικρότερη από τα περισσότερα άλλα καύσιμα λόγω των αργών χαρακτηριστικών καύσης του βασικού του συστατικού, του μεθανίου. Ο πίνακας 4 παρουσιάζει ενδεικτικά τη στρωτή ταχύτητα καύσης μερικών μιγμάτων.

Αέριο Μίγμα	Ταχύτητα Κάυσης (cm/s)
Μεθάνιο-Αέρας	45
Αιθάνιο-Αέρας	48
Προπάνιο-Αέρας	46
Κανονικό Επτάνιο-Αέρας	43
Ακετυλένιο-Αέρας	160
Αιθυλένιο-Αέρας	79
Βενζόλιο-Αέρας	45
(Κανονικό) Εξάνιο-Αέρας	40
Υδρογόνο-Αέρας	350
Μεθάνιο-Οξυγόνο	450
Ακετυλένιο-Οξυγόνο	1140
Υδρογόνο-Οξυγόνο	1400

Πίνακας 4. στρωτή ταχύτητα καύσης αερίων σε πίεση $P=1 \text{ atm}$ και θερμοκρασία $T=298 \text{ K}$.

Αδρανή αέρια, όπως το άζωτο και το διοξείδιο του άνθρακα, μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ταχύτητα καύσης, λειτουργώντας ως διαλύτες. Οι επιδράσεις τους είναι θερμικές, προκαλώντας μια μείωση στη θερμοκρασία της φλόγας, επομένως και μείωση της στρωτής ταχύτητας καύσης. Η χαμηλή ταχύτητα καύσης του φυσικού αερίου έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη διάρκεια καύσης, έτσι ώστε η απόδοση του κινητήρα είναι μειωμένη, εκτός εάν ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης παρατείνεται προκειμένου να αντισταθμιστεί αυτό το αποτέλεσμα.

4.2.2 Αυτανάφλεξη (Autoignition)

Το φαινόμενο της αυτανάφλεξης είναι σημαντικό, ειδικά για καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε κινητήρες Diesel. Οι παράμετροι που επηρεάζουν το χρόνο καθυστέρησης αυτανάφλεξης είναι η σύνθεση του καυσίμου, η πίεση και η θερμοκρασία του μίγματος. Πολύ μικρός ή πολύ μεγάλος χρόνος καθυστέρησης αυτανάφλεξης καθιστά το καύσιμο ακατάλληλο για χρήση στις παραπάνω μηχανές. Δεν υπάρχει σαφής ορισμός για το χρόνο αυτό. Οι ορισμοί που χρησιμοποιούνται συνήθως βασίζονται στις αλλαγές στην πίεση του κυλίνδρου μετά την έγχυση του

καυσίμου. Μελέτες και πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί για τη μέτρηση του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης του φυσικού αερίου, σύμφωνα με τις οποίες δεν είναι πρακτικό να χρησιμοποιηθεί το συγκεκριμένο καύσιμο σε ένα συμβατικό κινητήρα Diesel. Στην περίπτωση αυτή, θα χρειαζόταν είτε να εγκατασταθεί ένα σύστημα ανάφλεξης ή να γίνει χρήση κάποιου άλλου, εύκολα αναφλέξιμου καυσίμου.

4.2.3 Σχηματισμός Ρύπων

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης του φυσικού αερίου στις μηχανές είναι τα χαρακτηριστικά καύσης του που το ξεχωρίζουν από τα περισσότερα άλλα διαθέσιμα καύσιμα. Οι κυριότεροι ρύποι από την καύση του φυσικού αερίου είναι άκαυστοι υδρογονάνθρακες, μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου (NOx) και ένα μικρό ποσοστό άλλων ρύπων, όπως σωματίδια, διοξείδιο του θείου και αλδεΐδες. Η εκπομπή υδρογονανθράκων είναι αποτέλεσμα στοιχείων του μίγματος αέρα/καυσίμου που δεν κάηκαν πλήρως ή κάηκαν μερικώς τη στιγμή που ανοίγει η βαλβίδα εξαγωγής. Ο σχηματισμός τους είναι επίσης συνάρτηση του διαθέσιμου αέρα. Η ύπαρξη περίσσειας αέρα για καύση τείνει να κάνει την καύση πλήρη έως τη στιγμή που το μίγμα γίνεται πολύ φτωχό (υπερβολικός αέρας) και η μηχανή ρετάρει, αυξάνοντας τις εκπομπές υδρογονανθράκων. Οι συνολικές εκπομπές υδρογονανθράκων από το φυσικό αέριο τείνουν να ναι αρκετά υψηλές, αφού το μεθάνιο είναι το πιο αργό στοιχείο να αντιδράσει σε σχέση με τους περισσότερους άλλους υδρογονάνθρακες. Ωστόσο, από τις εκπομπές το περισσότερο είναι μεθάνιο, το οποίο δεν έχει σχεδόν κανένα ρόλο στη φωτοχημεία ή το σχηματισμό αιθαλομίχλης. Στην πραγματικότητα, τα οχήματα που τροφοδοτούνται από φυσικό αέριο έχουν λιγότερη ικανότητα-συμβολή στο σχηματισμό αιθαλομίχλης, καθώς υπολογίζεται ότι εκπέμπουν από 50% ως 80% λιγότερο αντιδραστικούς υδρογονάνθρακες σε σχέση με τα οχήματα βενζίνης λόγω της εξαιρετικής ανάμιξης του αερίου με τον αέρα και των χαμηλών εκπομπών κατά την ψυχρή εκκίνηση.

Οι εκπομπές CO είναι αποτέλεσμα ατελούς καύσης. Όσο καλύτερα ένα καύσιμο αναμιγνύεται με τον αέρα και όσο μεγαλύτερη περίσσεια αέρα υπάρχει, τόσο περισσότερο πλήρης είναι η καύση. Επομένως, οι εκπομπές CO είναι εξ' ολοκλήρου μια συνάρτηση του λόγου αντιστοιχίας αέρα/καύσης και ένας βαθμός που δείχνει κατά πόσο το καύσιμο εξατμίζεται ολοκληρωτικά και αναμιγνύεται πλήρως. Τα οχήματα με βενζίνη παράγουν ένα μεγάλο ποσοστό από τις εκπομπές CO τους κατά τη διάρκεια της ψυχρής εκκίνησης όταν το καύσιμο δεν έχει αναμιχθεί πλήρως. Τα οχήματα φυσικού αερίου εκπέμπουν 50% ως 90% λιγότερο CO σε σχέση με τα προηγούμενα λόγω, ακριβώς, της εξαιρετικής ανάμιξης κατά τη διάρκεια της ψυχρής εκκίνησης.

Ο σχηματισμός των NOx σε μια μηχανή είναι κατά κύριο λόγο συνάρτηση της διαθεσιμότητας οξυγόνου, της θερμοκρασίας αντίδρασης και της διάρκειας κατά την οποία τα καυσαέρια μένουν σε αυτή τη θερμοκρασία. Τόσο τα πολύ πτωχά, όσο και τα πολύ πλούσια μίγματα μειώνουν το σχηματισμό NOx. Στην πρώτη περίπτωση, εξαιτίας της μειωμένης θερμοκρασίας καύσης και στη δεύτερη λόγω της μειωμένης διαθεσιμότητας οξυγόνου. Το φυσικό αέριο έχει χαμηλή θερμοκρασία φλόγας, η οποία μειώνει το μέγιστο βαθμό σχηματισμού NOx. Ωστόσο, η χρήση υψηλού λόγου συμπίεσης για υψηλότερη απόδοση και ο αυξανόμενος χρόνος ανάφλεξης για την εξισορρόπηση της χαμηλής ταχύτητας φλόγας του καυσίμου τείνουν να αυξήσουν το σχηματισμό αυτό. Εξαιτίας των δύο αυτών αντικρουόμενων επιδράσεων, τα οχήματα φυσικού αερίου εκπέμπουν είτε μεγαλύτερα είτε λιγότερα ποσοστά NOx. Σε γενικές γραμμές, οι μηχανές εσωτερικής καύσης ανάφλεξης με σπινθήρα που τροφοδοτούνται από φυσικό αέριο και λειτουργούν κοντά σε στοιχειομετρικές συνθήκες τείνουν να εκπέμπουν σημαντικά υψηλά επίπεδα NOx. Αλλά και αυτά μπορούν να βελτιωθούν χρησιμοποιώντας υψηλότερη επανακυκλοφορία καυσαερίων (Exhaust Gas Recirculation – EGR) ή τεχνολογίες φτωχής καύσης.

Με την παραγωγή λιγότερων αντιδραστικών υδρογονανθράκων, τα οχήματα που κινούνται με φυσικό αέριο παρουσιάζουν πλεονεκτήματα στο πρόβλημα σχηματισμού αιθαλομίχλης σε πολλές αστικές περιοχές. Για τις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές, τα οχήματα αυτά επίσης παρουσιάζουν οφέλη μολονότι το μεθάνιο το ίδιο συντελεί στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Εκτιμάται ότι μια λίβρα μεθανίου συμβάλλει το ίδιο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου όσο 11,6 λίβρες διοξειδίου του άνθρακα. Εντούτοις, ο τύπος αυτός των οχημάτων παράγει λιγότερο CO₂ διότι, για την ίδια μονάδα ενέργειας, το φυσικό αέριο περιέχει λιγότερο άνθρακα από οποιοδήποτε άλλο ορυκτό καύσιμο.

Αφού το μονοξείδιο του άνθρακα παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην καταστροφή των ριζών OH, η μείωση των εκπομπών CO λόγω της χρήσης φυσικού αερίου πρέπει επίσης να αυξάνει τη συγκέντρωση OH στην ατμόσφαιρα. Αυτό βοηθάει στο να αυξηθεί το παγκόσμιο ποσοστό της διάσπασης του μεθανίου καθώς η αλληλεπίδραση μεθανίου και OH είναι ο κύριος μηχανισμός για την αφαίρεση του μεθανίου. Αυτό αντισταθμίζει επίσης την αύξηση των άμεσων εκπομπών μεθανίου.

4.2.4 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Το φυσικό αέριο φέρεται να έχει ανώτερες ιδιότητες σε σχέση με τα υπόλοιπα εναλλακτικά καύσιμα των οχημάτων.
2. Η σύνθεση του φυσικού αερίου ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό με διαφορετικές πηγές. Έτσι, ένας κατάλληλος δείκτης είναι απαραίτητος. Ο αριθμός Wobbe είναι μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη όταν το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται στη μηχανή.
3. Η στρωτή ταχύτητα καύσης του φυσικού αερίου είναι σχετικά μικρή συγκρινόμενη με άλλων καυσίμων.
4. Το φυσικό αέριο δεν είναι πρακτικό εάν δεν παρέχεται υψηλής ποιότητας πηγή ανάφλεξης.
5. Οι εκπομπές ρύπων από τα οχήματα φυσικού αερίου δείχνουν να είναι πιο ευνοϊκές τόσο στο παγκόσμιο όσο και στο τοπικό περιβάλλον σε σχέση με αυτές των τωρινών οχημάτων εξαιτίας των λιγότερων εκπομπών CO 'δραστικών' υδρογονανθράκων.
6. Ο σχεδιασμός του θαλάμου καύσης είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στη χρήση του φυσικού αερίου. Υψηλοί λόγοι συμπίεσης και υψηλές τυρβώδεις αναταράξεις μπορούν και παρέχουν καλύτερη απόδοση μηχανής και έλεγχο εκπομπών.
7. Η τεχνολογία φτωχής καύσης σε μηχανές εσωτερικής καύσης ανάφλεξης με σπινθήρα είναι μια ανώτερη επιλογή που παρέχει καλύτερες εκπομπές, απόδοση και οικονομία καυσίμου.
8. Ο έλεγχος του λόγου αντιστοιχίας αέρα/καυσίμου στις μηχανές φυσικού αερίου είναι περισσότερο σημαντικός και δυσκολότερος από αυτόν στους βενζινοκινητήρες. Κατά συνέπεια, ειδικό σύστημα μέτρησης και ανάμιξης καυσίμου πρέπει να χρησιμοποιηθεί.
9. Αφού για το φυσικό αέριο απαιτείται υψηλότερη ενέργεια ανάφλεξης, πρέπει να χρησιμοποιείται ισχυρότερο σύστημα ανάφλεξης στις μηχανές αερίου ανάφλεξης με σπινθήρα έναντι των βενζινοκινητήρων.

Κεφάλαιο 5

Μίγματα Υδρογόνου – Φυσικού Αερίου (HCNG blends)

5.1 Επισκόπηση

Κατά την τελευταία δεκαετία, ο αριθμός των οχημάτων που κινούνται με φυσικό αέριο έχει αυξηθεί σημαντικά σε παγκόσμιο επίπεδο, με τη μεγαλύτερη συμβολή να προέρχεται από τις περιοχές Ασίας-Ειρηνικού και Λατινικής Αμερικής. Το φυσικό αέριο είναι ένα καθαρό καύσιμο που διαθέτει το χαμηλότερο περιεχόμενο σε άνθρακα από όλα τα καύσιμα υδρογονανθράκων. Ως εκ τούτου θεωρείται ότι είναι μία καλή εναλλακτική λύση για το πετρέλαιο και τη βενζίνη λόγω των χαμηλότερων επιπέδων εκπομπών υδρογονανθράκων πλην μεθανίου (non-methane hydrocarbons, NMHC) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Επιπροσθέτως, επηρεάζεται λιγότερο από τις διακυμάνσεις των τιμών και τα αποθέματά του είναι περισσότερο ομοιόμορφα διαδεδομένα ανά τον κόσμο σε σχέση με το πετρέλαιο.

Το υδρογόνο έχει θεωρηθεί ως ένα μελλοντικό δευτερεύον καύσιμο για το παγκόσμιο σύστημα παραγωγής ενέργειας λόγω της έλλειψης άνθρακα στη σύστασή του. Η ταχεία αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και πολύ αυστηρές περιβαλλοντικές νομοθεσίες είναι σημαντικοί παράγοντες-κίνητρα για τη χρήση του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμων και μηχανές εσωτερικής καύσης. Είναι ένα εξαιρετικό πρόσθετο για τη βελτίωση της καύσης των καυσίμων υδρογονανθράκων λόγω της χαμηλής του ενέργειας ανάφλεξης, υψηλή αντιδραστικότητα, ικανότητα διαχύσεως και ταχύτητα καύσης. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης μπορούν να τροφοδοτηθούν από καθαρό υδρογόνο ή με μίγματα υδρογονανθράκων και υδρογόνου.

Τα χαρακτηριστικά αυτά του υδρογόνου καθιστούν ικανή τη συντέλεση φτώχης καύσης, υψηλή απόδοση και χαμηλές εκπομπές καυσαερίων στην περιοχή του χαμηλού φορτίου. Το υδρογόνο είναι ένα καθαρό καύσιμο που δεν παράγει επιβλαβή καυσαέρια και προσθέτοντας το στο φυσικό αέριο, θα βελτιωθεί η απόδοση της μηχανής. Τεχνολογίες για τη χρήση του σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης έχουν μελετηθεί από το 1800, ενώ έχουν εισαχθεί πολλές τεχνικές για τον εμπλουτισμό μειγμάτων φυσικού αερίου με υδρογόνο (Hydrogen-Natural Gas blends - HCNG) προκειμένου να μειωθούν οι επιβλαβείς εκπομπές των καυσαερίων.

Τα μίγματα αυτά περιέχουν τα πλεονεκτήματα τόσο του μεθανίου όσο και του υδρογόνου και αντιμετωπίζονται ως το πρώτο βήμα προς τη μελλοντική οικονομία του υδρογόνου. Οι μηχανές μπορούν να βαθμονομηθούν για χαμηλότερες εκπομπές NOx ή αερίων του θερμοκηπίου. Κάθε μηχανή φυσικού αερίου είναι συμβατή να λειτουργεί με HCNG και αυτό με ελάχιστες τροποποιήσεις. Επιτρέπει επίσης στις κυβερνήσεις και στους οργανισμούς να κάνουν προώθηση της χρήσης του υδρογόνου σε μεγαλύτερο αριθμό ανθρώπων με λιγότερο κόστος. Ωστόσο, καθώς η ποσότητα του υδρογόνου αυξάνεται πάνω από ένα συγκεκριμένο ποσό, εμφανίζονται φαινόμενα μη φυσιολογικής καύσης, όπως προανάφλεξη και κρουστική καύση. Λόγω της χαμηλής απόστασης σβέσης και της υψηλής ταχύτητας καύσης, τα τοιχώματα του θαλάμου καύσης γίνονται θερμότερα, γεγονός που προκαλεί περισσότερες απώλειες στο νερό ψύξης. Επομένως, η ποσότητα του υδρογόνου που προστίθεται πρέπει να βελτιστοποιείται για να ισοσταθμίζονται τα κέρδη και οι απώλειες (K. Nanthagopal *et al.* 2011)

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 2) συγκρίνει τις κύριες φυσικές ιδιότητες για τα καθαρά καύσιμα, μεθάνιο και υδρογόνο. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται οι κατώτερες θερμογόνες δυνάμεις (Lower Heating Values – LHV) , ο λόγος αέρα-καυσίμου (Air – Fuel Ratio - AFR) και η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα για στοιχειομετρικό μίγμα αέρα-καυσίμου (LHV_{stoich,mix}).

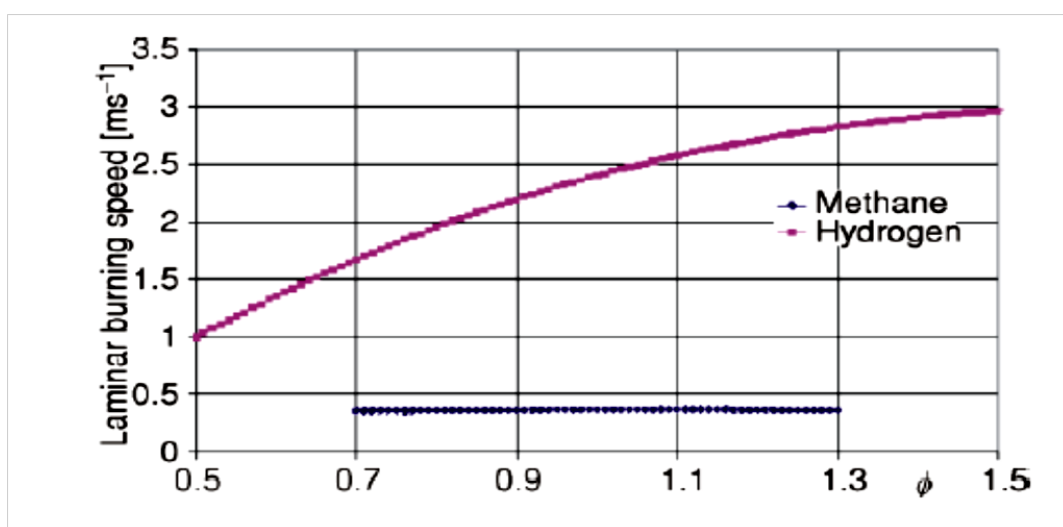
	CH4	H2
Αδιαβατική θερμοκρασία Φλόγας στοιχειομετρικών μιγμάτων (K)	2210	2400
Όρια Αναφλεξιμότητας σε αέρα στους 25°C και 1 bar (% κατ' όγκο)	5,0-15	4,0-75
Ελάχιστη Ενέργεια Ανάφλεξης σε αέρα με φ=1 και 1 bar (mJ)	0,47	0,02
LHV (MJ/Kg)	50,0	120,3
LHV _{vol} (MJ/Nm ³)	35,3	10,6
AFR _{stoich}	17,2	34,3
LHV _{stoich,mix} (MJ/Nm ³)	3.351	3.143

Πίνακας 5. Ιδιότητες CH₄ και H₂

Όταν χρησιμοποιείται σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης, η προσθήκη ακόμη και μιας μικρής ποσότητας υδρογόνου στο φυσικό αέριο (5-30% κατ' όγκο) οδηγεί σε πολλά πλεονεκτήματα, λόγω κάποιων ιδιαίτερων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων.

- Η προσθήκη υδρογόνου αυξάνει την αναλογία Υδρογόνου/Ανθρακα (H/C) του καυσίμου. Υψηλότερη τιμή της αναλογίας αυτής έχει ως αποτέλεσμα λιγότερο CO₂ ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας και ,συνεπώς, μειώνει την εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου.

- Το φυσικό αέριο έχει χαμηλή ταχύτητα φλόγας ενώ το υδρογόνο έχει ταχύτητα φλόγας περίπου 8 φορές υψηλότερη, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1. Επομένως, όταν έχουμε περίσσεια αέρα πολύ υψηλότερη από τις στοιχειομετρικές συνθήκες, η καύση του φυσικού αερίου δεν είναι τόσο σταθερή όσο του HCNG. Το πρόβλημα που συναντάται χρησιμοποιώντας φυσικό αέριο είναι ότι στη μηχανή θα αντιμετωπίσουμε ζήτημα ατελούς καύσης προτού επιτευχθούν ικανοποιητικές μειώσεις στις εκπομπές NOx. Η πρόσθεση υδρογόνου στο καύσιμο διευρύνει το ποσό της αραίωσης του μίγματος που μπορεί να επιτευχθεί διατηρώντας αποδοτική καύση.



Εικόνα 5.1. Στρωτή Ταχύτητα Καύσης Υδρογόνου και HCNG (15% Υδρογόνο)

- Το υδρογόνο έχει επίσης πολύ χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου και, ως αποτέλεσμα, η θερμογόνος δύναμη των μιγμάτων HCNG μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό του υδρογόνου σε αυτά.

Ο πίνακας 6 δείχνει τα κύρια χαρακτηριστικά καυσίμων μιγμάτων υδρογόνου και φυσικού αερίου με 10% (HCNG10), 20% (HCNG20) και 30% (HCNG30) υδρογόνου κατ' όγκο. Η συγκέντρωση του υδρογόνου κατ' όγκο υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$H_2[\%vol.] = \frac{V_{H_2}}{V_{NG} + V_{H_2}}$$

Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη ανά όγκο είναι η ενέργεια καυσίμου ανά μονάδα όγκου, άρα ένα μέτρο της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στη δεξαμενή καυσίμου. Είναι 7% χαμηλότερη σε σχέση με του φυσικού αερίου για το HCNG10, 14% για το HCNG20 και 21% για το HCNG30. Η $LHV_{stoich,mix}$, η οποία είναι ανάλογη με την ισχύ εξόδου της μηχανής, επηρεάζεται σε αμελητέο βαθμό από την προσθήκη υδρογόνου.

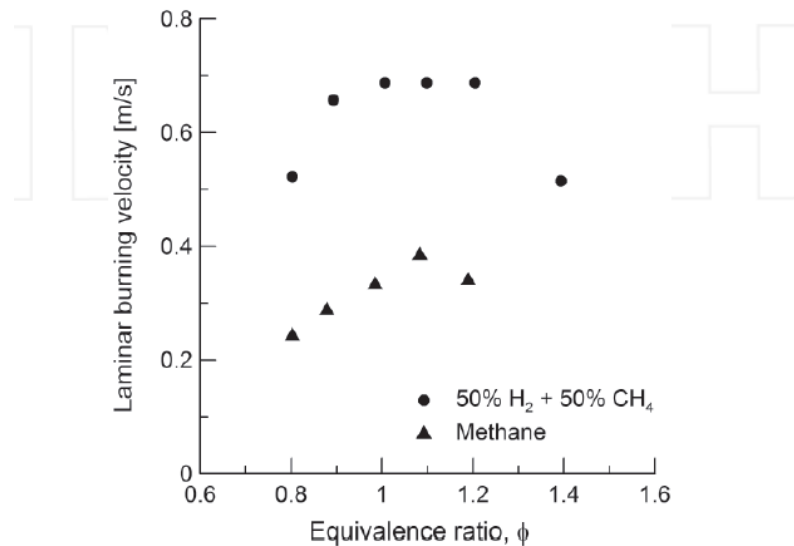
	Natural Gas	HCNG10	HCNG20	HCNG30
H ₂ [% vol.]	-	10	20	30
H ₂ [% energy]	-	3.2	7.0	14.4
LHV [MJ/kg]	45.3	46.2	46.7	48.5
LHV _{vol} [MJ/Nm ³]	36.9	34.3	31.7	29.2
AFR _{stoich}	15.6	15.8	16.1	16.4
LHV _{stoich, mix} [MJ/Nm ³]	3.375	3.367	3.358	3.349

Πίνακας 6. Ιδιότητες καυσίμων Φυσικού Αερίου και μιγμάτων Υδρογόνου- Φυσικού Αερίου.

- Μίγματα HCNG των οποίων τα ποσοστά σε περιεκτικότητα υδρογόνου κυμαίνονται από 15% ως 30% διευρύνουν το όριο για πτωχό μίγμα διασφαλίζοντας πλήρη καύση το οποίο μειώνει τις εκπομπές HC και CO.
- Η στρωτή ταχύτητα καύσης του υδρογόνου είναι σχεδόν 8 φορές υψηλότερη από αυτή του φυσικού αερίου, έτσι η προσθήκη υδρογόνου μπορεί να αυξήσει την ταχύτητα καύσης του μίγματος, γεγονός που προσδίδει κάποια οφέλη όπως μικρότερη διάρκεια καύσης, μεγαλύτερο βαθμό καύσης σταθερού όγκου και βελτιωμένη αναγραφόμενη θερμική απόδοση.

5.2 Χαρακτηριστικά καύσης

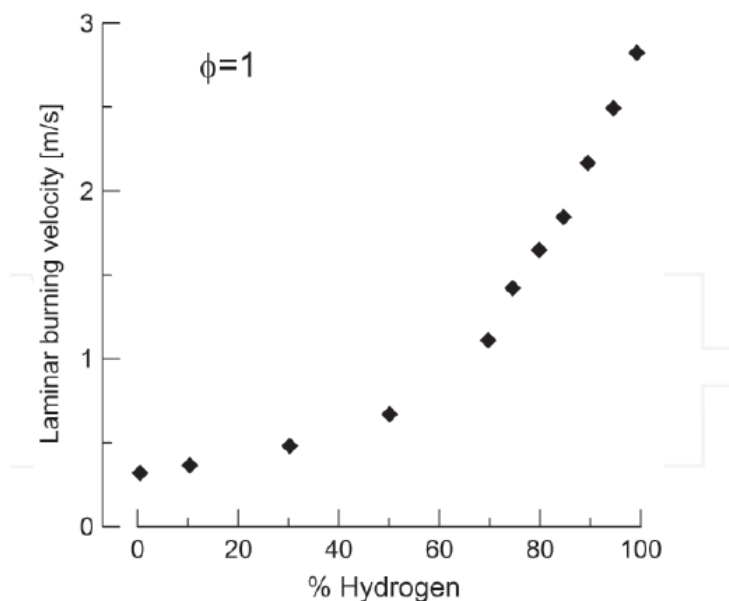
Αφού η στρωτή ταχύτητα καύσης (Laminar Combustion Speed) του υδρογόνου είναι περίπου οχτώ φορές μεγαλύτερη από αυτή του μεθανίου, παρέχει μια μείωση της διάρκειας καύσης όταν αναμιγνύεται με φυσικό αέριο σε μικρές συγκεντρώσεις. Πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί για τη μέτρηση της ταχύτητας της φλόγας μιγμάτων αέρα, υδρογόνου – καυσίμου σε διαφορετικές συγκεντρώσεις υδρογόνου και λόγους αντιστοιχίας (ϕ) (A. Mariani *et al.* 2012)



Εικόνα 5.2. Ταχύτητα φλόγας διαφορετικών καυσίμων συναρτήσει του λόγου αντιστοιχίας ϕ .

Η εικόνα 5.2 απεικονίζει την ταχύτητα φλόγας για το μεθάνιο και για ένα μίγμα 50% υδρογόνου – 50% μεθάνιο συναρτήσει του λόγου αντιστοιχίας. Η μέγιστη ταχύτητα φλόγας για το μίγμα είναι 0,69 m/s ενώ για το μεθάνιο 0,39 m/s, για λόγο αντιστοιχίας 1,1. Παρατηρείται επίσης ότι οι εύφλεκτες περιοχές διευρύνθηκαν όσο το περιεχόμενο του υδρογόνου αυξήθηκε στα μίγματα.

Στην εικόνα 5.3, παρατηρούμε τη μη γραμμική εξάρτηση της ταχύτητας της φλόγας συναρτήσει της περιεκτικότητας του υδρογόνου.



Εικόνα 5.3. Ταχύτητες φλόγας συναρτήσει της περιεκτικότητας υδρογόνου σε μίγματα μεθανίου-υδρογόνου για λόγο αντιστοιχίας $\phi=1$.

5.3 Πλεονεκτήματα των μιγμάτων HCNG

Τα παρακάτω είναι μερικά από τα πλεονεκτήματα της χρήσης των μιγμάτων υδρογόνου-φυσικού αερίου ως καύσιμα :

1. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την υπάρχουσα υποδομή για το συμπιεσμένο φυσικό αέριο. Απαιτεί μόνο μικρή αποθήκευση του υδρογόνου και μια στήλη για την ανάμιξη του υδρογόνου με το αέριο.
2. Οι ιδιότητες ασφάλειας είναι παρόμοιες με αυτές του συμπιεσμένου φυσικού αερίου. Τα μίγματα HCNG είναι ευκολότερο να χειριστούν από το υδρογόνο λόγω χαμηλότερου ρίσκου εξαιτίας του πολύ χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου από το υδρογόνο (μόνο μέχρι 30% κατ' όγκο).
3. Επεκτείνει το όριο μη αναφλεξιμότητας σε συνθήκες πτωχής καύσης.
4. Μικρές τροποποιήσεις απαιτούνται στη μηχανή λόγω της μέτριας συγκέντρωσης υδρογόνου στο μίγμα καυσίμου. Επιπλέον, δεν υπονομεύονται κ δεν χάνονται τα εξαιρετικά αντικρουστικά (anti-knock) χαρακτηριστικά του συμπιεσμένου φυσικού αερίου.
5. Το φαινόμενο της ευθραυστότητας στα εξαρτήματα της μηχανής λόγω της παρουσίας υδρογόνου δεν παρουσιάζεται. Ως εκ τούτου καμία σημαντική αλλαγή δεν αναμένεται στο σύστημα καυσίμου και τα εξαρτήματα του κινητήρα.
6. Οι τιμές των εκπομπών NOx αυξάνονται γενικά με την αύξηση της περιεκτικότητας του υδρογόνου. Ωστόσο, με τη χρήση π.χ. ενός καταλύτικου μετατροπέα, οι τιμές αυτές μπορούν να μειωθούν σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα.
7. Οι τιμές των εκπομπών HC, CO₂ και CO μειώνονται με την αύξηση του ποσοστού του υδρογόνου.
8. Κάτω από δεδομένες συνθήκες (περίπου 20% υδρογόνο) η απόδοση μπορεί να αυξάνεται και μειώνεται η κατανάλωση καυσίμου.

Συμπερασματικά, από άποψη περιβαλλοντικών, οικονομικών και τεχνικών προοπτικών, η ανάμειξη φυσικού αερίου με σχετικά μικρές ποσότητες υδρογόνου μπορεί να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά των εκπομπών μηχανών εσωτερικής καύσης. Ωστόσο, η διαδεδομένη χρήση της τεχνολογίας καυσίμου του υδρογόνου δημιουργεί νέα προβλήματα που σχετίζονται με την παραγωγή, τη μεταφορά, την αποθήκευση και το κόστος. Επί του παρόντος, το υδρογόνο είναι πιο ακριβό από τα ορυκτά καύσιμα. Η χρήση του ως καύσιμο των οχημάτων θα κριθεί με βάση την οικονομία. Βέβαια, η ικανότητα του να μειώνει την εκπομπή αερίων και ρύπων από το φαινόμενο του θερμοκηπίου και η ευκαιρία να αποκτούμε ένα καύσιμο που παράγεται από ένα μεγάλο αριθμό ανανεώσιμων πηγών πάντα θα καθιστούν το υδρογόνο ως βασικό υποψήφιο για την επίλυση του παγκόσμιου ενεργειακού ζητήματος (C. Park *et al.* 2011)

Κεφάλαιο 6

(Υπόβαθρα της μελέτης της καύσης : Εστιάζοντας στη Στρωτή Ταχύτητα Καύσης και το Χρόνο Ανάφλεξης)

Backgrounds of the Fuel Research: Focusing on Laminar Flame Speed and Ignition Delay

Ο κύριος σκοπός των ερευνών που γίνονται στον τομέα της καύσης είναι η απόκτηση μιας εις βάθος κατανόησης των μηχανισμών ανάφλεξης, της κατανομής των διάφορων ειδών του μίγματος, του τρόπου διάδοσης της φλόγας και της απελευθέρωσης ενέργειας εύφλεκτων μιγμάτων. Τα πρακτικά αποτελέσματα τέτοιας γνώσης είναι προφανώς ο έλεγχος της διαδικασίας της καύσης, τόσο από άποψη ασφάλειας, όσο και για τη χρησιμοποίηση της ως πηγή ενέργειας.

Υπάρχουν δύο συμπληρωματικές εμπειρικές προσεγγίσεις για τη μελέτη των διεργασιών της καύσης, μία μικροσκοπική και μία μακροσκοπική. Ο στόχος της πρώτης, στην οποία χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησης υψηλής ανάλυσης και σύντομου χρόνου απόκρισης, είναι να παράσχει λεπτομερείς περιγραφές της δομής της φλόγας μέσω της πληροφόρησης για τη ροή του ρευστού, τη θερμοκρασία, τη σύνθεση, το βαθμό αντίδρασης και συντελεστές μεταφοράς των διάφορων ειδών που υπάρχουν στη φλόγα. Όσον αφορά τη μακροσκοπική ανάλυση, αυτή παρέχει πληροφορίες και δεδομένα για την επίδραση των θερμοδυναμικών μεταβλητών, όπως είναι η σύνθεση, η θερμοκρασία και η πίεση, αλλά και για τη συνολική συμπεριφορά του καιόμενου μίγματος που καθορίζεται από : όρια ανάφλεξης, ενέργειες για την ανάφλεξη, θερμοκρασίες και καθυστερήσεις, φαινόμενα αστάθειας, ταχύτητες καύσης τόσο για στρωτή, όσο και για τυρβώδη φλόγα, αλλά και ανωμαλίες όπως φαινόμενα εμφάνισης κρουστικής καύσης.

- *Στρωτή Ταχύτητα Καύσης (Laminar Flame Speed)*

Η στρωτή ταχύτητα καύσης είναι μία σημαντική παράμετρος ενός μίγματος καυσίμου καθώς περιέχει θεμελιώδεις πληροφορίες σχετικά με την αντιδραστικότητα, την ικανότητα διάχυσης και τα χαρακτηριστικά της εξώθερμης αντίδρασης. Η ακριβής γνώση του μεγέθους αυτού είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό της μηχανής, τη μοντελοποίηση της τυρβώδους καύσης και τη δημιουργία μηχανισμών χημικής κινητικής. Επιπροσθέτως, ο προσδιορισμός της ταχύτητας καύσης είναι πολύ σημαντικός για τους υπολογισμούς που γίνονται για προστασία από εκρήξεις και στον εξαερισμό της δεξαμενής καυσίμου.

Η στρωτή ταχύτητα καύσης ορίζεται ως η γραμμική ταχύτητα του μετώπου της φλόγας σε σχέση με την ταχύτητα των άκαυστων αντιδρώντων του μίγματος.

Από μια απλοποιημένη ανάλυση μιας φλόγας βασισμένη σε μια ισορροπία ανάμεσα στην έκλυση θερμότητας και τη διάχυση, η ταχύτητα της καύσης μπορεί να μοντελοποιηθεί ως :

$$SL = \sqrt{\frac{a \cdot RR}{\rho}}$$

όπου : a είναι η θερμική διάχυση, RR ο συνολικός βαθμός αντίδρασης , ρ η πυκνότητα του άκαυστου αερίου.

Η ακριβής γνώση της μακροσκοπικής αυτής ιδιότητας, μαζί με την επίδραση και άλλων μεταβλητών σε αυτή, είναι απαραίτητη για κάθε μελέτη του φαινομένου της καύσης.

Οι μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό της θεμελιώδους ταχύτητας της φλόγας περιλαμβάνουν φλόγες που είναι είτε στάσιμες είτε διαδίδονται σε σχέση με ένα άκαυστο μίγμα που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει κωνικές, επίπεδες ή αντιθέτου ροής φλόγες και η δεύτερη αναφέρεται σε σφαιρικά διαδιδόμενες φλόγες. Στη σημερινή εποχή, η σφαιρικά διαδιδόμενη φλόγα έχει εφαρμοσθεί ευρέως για τον υπολογισμό των στρωτών ταχυτήτων καύσης για έναν αριθμό καυσίμων και αποτελεί την καλύτερη επιλογή για τον υπολογισμό σε υψηλότερες πιέσεις και θερμοκρασίες.

- **Χρόνος Καθυστέρησης Ανάφλεξης (Ignition Delay Time)**

Ως βασική χαρακτηριστική παράμετρος της καύσης καυσίμων, ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης είναι πολύ σημαντικός για την περιγραφή του φαινομένου της αυτανάφλεξης , την κατανόηση του μηχανισμού της ανάφλεξης , την ανάλυση της πορείας των χημικών αντιδράσεων, αλλά και για τη δημιουργία, την επικύρωση και τη βελτίωση των μοντέλων χημικής κινητικής.

Πολλές πειραματικές διεργασίες έχουν πραγματοποιηθεί σε διατάξεις, όπως ο σωλήνας κρουστικού κύματος (shock tube) σε μίγματα Υδρογονανθράκων/Οξυγόνου

(O₂)/Αργού(Ar) για τη μελέτη των χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης τους. Οι μελέτες αυτές πραγματοποιούνταν συνήθως ανεξάρτητα από τη σύνθεση του εξεταζόμενου μίγματος φυσικού αερίου. Η επίδραση της πρόσθεσης ένα από τα ακόλουθα καύσιμα , C₂H₆, C₃H₈, C₄H₁₀ σε ένα μίγμα βασισμένο σε CH₄/O₂ είναι να μειώσει σε πολύ αισθητό βαθμό τους χρόνους καθυστέρησης ανάφλεξης.

Ο Spadaccini και ο Colket (1994) παρουσίασαν τα αποτελέσματα πειραμάτων σε σωλήνα κρουστικού κύματος, για την καύση μιγμάτων μεθανίου , παρουσία υψηλότερων υδρογονανθράκων, περισσότερο αντιπροσωπευτικά στη σύσταση του φυσικού αερίου. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μια εμπειρική σχέση του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης συναρτηθεί της πίεσης, θερμοκρασίας και των μοριακών συγκεντρώσεων του μίγματος :

$$\tau = A \cdot \exp\left(\frac{\theta}{T}\right) \cdot [CH_4]^a \cdot [O_2]^b \cdot [C_xH_y]^c \quad (1)$$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται περιληπτικά οι παράμετροι συσχέτισης για καύσιμα σε μίγματα O₂/Ar, για την εξίσωση (1), όπου το C_xH_y αντιπροσωπεύει υδρογονάνθρακα υψηλότερο από το CH₄.

Καύσιμο	A	θ(K)	a	b	c
CH ₄	2,21×10 ⁻¹⁴	22500	0,33	-1,05	0
CH ₄ /C ₂ H ₆	1,32×10 ⁻¹³	18772	0,61	-1,05	-0,24
CH ₄ /C ₃ H ₈	4,04×10 ⁻¹⁴	21553	0,95	-1,05	-0,46
CH ₄ /n-C ₄ H ₁₀	1,49×10 ⁻¹⁵	19586	0,88	-1,05	-0,68
Φυσικό αέριο	1,77×10 ⁻¹⁴	18963	0,66	-1,05	-0,39

Οι μετρήσεις των χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης, από τα ανακλώμενα κρουστικά κύματα, βασίστηκαν στην έναρξη των εκπομπών OH. Στη αρχή πρότειναν διαφορετικές εξισώσεις για μεμονωμένα μίγματα δύο καυσίμων (μεθάνιο/C_xH_y/O₂/Ar) , όπου το C_xH_y αντιπροσωπευει έναν από τους εξής υδρογονάνθρακες : αιθάνιο , προπάνιο ή κανονικό βουτάνιο. Η συγκέντρωση του C_xH_y στο μίγμα ποίκιλλε μεταξύ 0,02 και 0,10. Στην ειδική περίπτωση όπου C₂H₆ προστίθεται στο μίγμα , προκύπτει η παρακάτω σχέση :

$$\tau(s) = 1,32 \cdot 10^{-13} \cdot \exp\left(\frac{18772}{T}\right) \cdot [CH_4]^{0,61} \cdot [O_2]^{-1,05} \cdot [C_2H_6]^{-0,24}$$

Πρότειναν επίσης μια συνολική έκφραση των χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης που ισχύει για κάθε υψηλότερο υδρογονάνθρακα που προστίθεται στο μίγμα:

$$\tau(s) = 1,77 \cdot 10^{-14} \cdot \exp\left(\frac{18963}{T}\right) \cdot [CH_4]^{0,66} \cdot [O_2]^{-1,05} \cdot [C_xH_y]^{-0,39}$$

όπου το C_xH_y αντιπροσωπεύει όλους τους ανώτερους υδρογονάνθρακες που συμπεριλαμβάνονται στη σύνθεση του φυσικού αερίου. Η μοριακή συγκέντρωση στο μίγμα ήταν ανάμεσα από 0,02 έως 0,2. Η θερμοκρασία μεταβαλλόταν από 1250 – 1800 K.

Κεφάλαιο 7

Πειραματικές Διατάξεις

(Experimental Apparatus)

Ιδανικοί Αντιδραστήρες

Η ακριβής προσομοίωση των χημικά ενεργών ροών απαιτεί εκτός από την επίλυση της χημικής κινητικής και της θερμοδυναμικής και την επίλυση εξισώσεων των φαινομένων μεταφοράς. Για αυτόν τον λόγο τα ακριβή μοντέλα αντιδραστήρων είναι απαραίτητα πολυδιάστατα. Ωστόσο, υπάρχουν τόσο μαθηματικοί όσο και πρακτικοί λόγοι θεώρησης ιδανικών μοντέλων περιορισμένων διαστάσεων.

Πλήρως Αναμεμειγμένος Αντιδραστήρας (PSR, Perfectly Stirred Reactor)

Το περιεχόμενο ενός καλά αναμεμειγμένου ή πλήρως αναμεμειγμένου αντιδραστήρα θεωρείται χωρικά ομοιόμορφο λόγω του υψηλού ρυθμού διάχυσης ή της επιβαλλόμενης τυρβώδους ανάμειξης. Δηλαδή, ο ρυθμός μετατροπής των αντιδρώντων σε προϊόντα εξαρτάται από τους ρυθμούς των χημικών αντιδράσεων και όχι από τις διαδικασίες ανάμειξης.

Θεωρείται λοιπόν ότι ο πλήρως αναμεμειγμένος αντιδραστήρας εξαρτάται μόνο από την χημική κινητική. Ένα βασικό χαρακτηριστικό στοιχείο του πλήρως αναμεμειγμένου αντιδραστήρα είναι η παραδοχή ότι λόγω της μεγάλης ανάμειξης που επικρατεί στον αντιδραστήρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους υπολογισμούς, οι χωρικοί μέσοι όροι των ιδιοτήτων. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μοντελοποίησης του πλήρως αναμεμειγμένου αντιδραστήρα είναι οι μικρές υπολογιστικές απαιτήσεις για την επίλυση του μαθηματικού προβλήματος. Έτσι μπορούν να εφαρμοστούν και να διερευνηθούν μεγάλοι, λεπτομερείς μηχανισμοί χημικής κινητικής. Επιπλέον της παραδοχής γρήγορης ανάμειξης, η μοντελοποίηση του πλήρως αναμεμειγμένου αντιδραστήρα απαιτεί και τις εξής παραδοχές. Η μεταφορά μάζας στα τοιχώματα του αντιδραστήρα υποτίθεται ότι πραγματοποιείται απείρως γρήγορα. Για αυτό το λόγο, η σχετική σπουδαιότητα των αντιδράσεων επιφάνειας έναντι των αντιδράσεων αέριας φάσης προσδιορίζεται μόνο από τους λόγους επιφάνειας-όγκου κάθε υλικού και από τους ρυθμούς των αντιδράσεων [και όχι από τους περιορισμούς μεταφοράς (transport constraints)]. Επιπλέον, η ροή μέσω του αντιδραστήρα πρέπει να χαρακτηρίζεται από έναν ονομαστικό χρόνο παραμονής, που προκύπτει από τον ρυθμό ροής και από τον όγκο του αντιδραστήρα.

7.1 Σωλήνας κρουστικού κύματος (Shock Tube)

Οι άνθρωποι που ασχολούνται με την κατασκευή μοντέλων χημικής κινητικής κάνουν εκτενή χρήση δεδομένων 'σωλήνων κρουστικού κύματος (*shock tube*)' για την ανάπτυξη, θεμελίωση και επικύρωση των μηχανισμών αντίδρασης της καύσης.

Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από μετρήσεις χρησιμοποιώντας μια σειρά διαγνώσεων και μια ποικιλία από shock tubes, καύσιμα και αρχικές συνθήκες. Με τη μεγάλη ποικιλία των διαθέσιμων δεδομένων, είναι χρήσιμο να γίνει κατανοητό ότι δεν είναι όλα τα δεδομένα του ίδιου τύπου και της ίδιας ποιότητας, ούτε είναι όλα κατάλληλα για απλή, άμεση σύγκριση με τις προβλέψεις των μηχανισμών αντίδρασης.

Οι σωλήνες κρουστικού κύματος είναι σχεδόν ιδανικές συσκευές για τη μελέτη φαινομένων ανάφλεξης σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς παρέχουν καλά ελεγχόμενες αλλαγές στην θερμοκρασία και την πίεση και καλά καθορισμένο χρόνο μηδέν και χρόνους καθυστέρησης ανάφλεξης, ενώ δεν επηρεάζονται από την επιφάνεια ή από προβλήματα μεταφοράς, τουλάχιστον μέσα στα όρια του τυπικού χρόνου παρατήρησης. Επιπλέον, οι πειραματικές αυτές διατάξεις μπορούν αξιόπιστα να αναπαράγουν πιέσεις και θερμοκρασίες από ένα πείραμα shock tube σε ένα άλλο. Συνεπώς, τα δεδομένα των χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης που προκύπτουν από τα πειράματα αυτά μπορούν και παρέχουν σημαντικούς στόχους προς επικύρωση για τη λεπτομερή μοντελοποίηση της κινητικής της αέριας φάσης καυσίμων (D.F. Davidson *et al.* 2004)

Υπόβαθρο

Ένας σωλήνας κρουστικού κύματος είναι μία συσκευή για την παραγωγή ροών αερίου ή συνθήκες αερίου που είναι δύσκολο να επιτευχθούν από άλλες πειραματικές διατάξεις. Χρησιμοποιούνται συχνά για να μελετηθεί η κινητική των αντιδράσεων σε αέρια φάση σε υψηλή θερμοκρασία. Από τη φύση του, ο σωλήνας αυτός παράγει τις επιθυμητές μας συνθήκες για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Στην απλούστερη του διαμόρφωση, ο σωλήνας κρουστικού κύματος αποτελείται από ένα μακρύ σωλήνα σταθερής περιοχής στον οποίο ένα διάφραγμα αρχικά χωρίζει δύο σώματα αερίου σε διαφορετικές πιέσεις (Εικ. 7.1α)

Το πιο μικρό σε μήκος τμήμα του σωλήνα είναι σε υψηλότερη πίεση και ονομάζεται 'τμήμα οδηγού (*driver section*)'. Το εναπομείναν μακρύτερο κομμάτι του σωλήνα βρίσκεται σε χαμηλότερη πίεση και αποκαλείται 'οδηγούμενο τμήμα (*driven section*)' του σωλήνα. Τα αέρια στα δύο τμήματα αυτά δεν χρειάζεται να είναι τα ίδια και μπορούν, επίσης, να είναι σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Όταν το διάφραγμα απομακρύνεται ταχέως, για παράδειγμα κάνοντας το να σπάσει, μια ροή μικρής διάρκειας πραγματοποιείται στο σωλήνα. Ένα συμπιεσμένο κύμα (shock (compression) wave) μεταφέρεται στο οδηγούμενο τμήμα χαμηλής πίεσης,

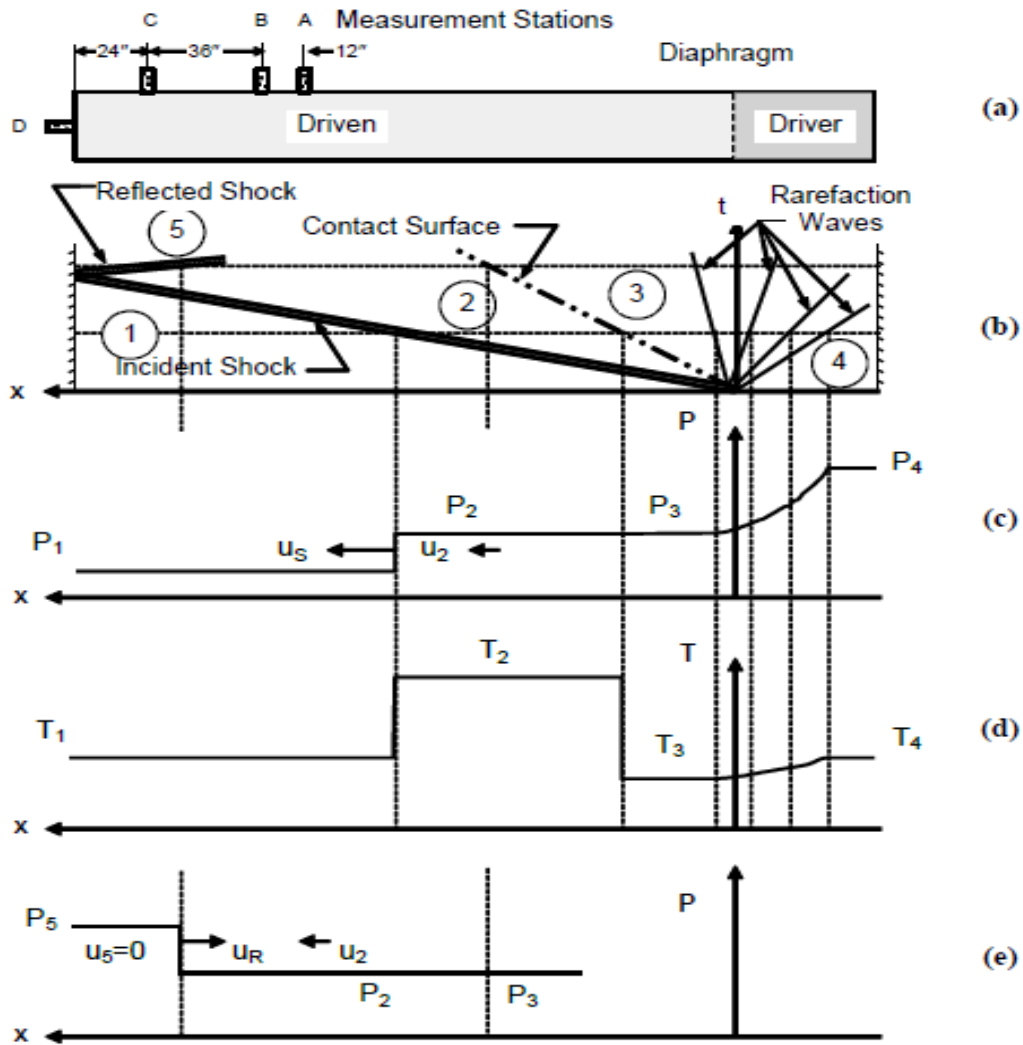
ενώ μία ακολουθία από κύματα αραιώσης (rarefaction (expansion) waves) ταξιδεύει στο τμήμα οδηγού υψηλής πίεσης (Εικ 7.1 b).

Οι περιοχές ροής που προκαλούνται ανάμεσα σε αυτά τα κύματα διαχωρίζονται από μια διεπαφή , ή επιφάνεια επαφής, κατά μήκος της οποίας η πίεση και η ταχύτητα είναι ίσες αλλά η πυκνότητα και η θερμοκρασία είναι αρκετά διαφορετικές. (Εικ 7.1 c-d). Η επιφάνεια επαφής είναι επίσης η διεπαφή μεταξύ των αερίων του οδηγούμενου τμήματος και του τμήματος οδηγού , ως εκ τούτου διαφορετικά αέρια μπορεί επίσης να είναι παρόν σε κάθε πλευρά της επιφάνειας επαφής.

Καθώς αυτό διαδίδεται διαμέσω του οδηγούμενου αερίου, το κρουστικό κύμα αυξάνει τη θερμοκρασία του αερίου αυτού. Καθώς η αναλογία πίεσης κατά μήκος του διαφράγματος ($P4/P1$, Εικ 5 b) αυξάνεται , ο αριθμός Mach του προωθούμενου κύματος αυξάνει επίσης. Σε σύγκριση με μια κατάσταση όπου το οδηγούμενο αέριο και το αέριο οδηγός είναι ταυτόσημα, για παράδειγμα αέρας και αέρας, ένα κύμα με κάποιο δεδομένο αριθμό Mach μπορεί πιο εύκολα να παραχθεί (με μία χαμηλότερη αναλογία πίεσης λειτουργίας στο σωλήνα σοκ) χρησιμοποιώντας ένα ελαφρύτερο αέριο οδηγό , όπως το ήλιο (He) ή το υδρογόνο. Ισχυρότερα κύματα σοκ παράγονται γενικά από αέριο χαμηλής πυκνότητας όπως τα δύο αυτά. Η πρακτική συνέπεια είναι ότι ισχυρότερα κύματα σοκ μπορούν να σπάσουν το διάφραγμα με μικρότερη αναλογία $P4/P1$. Ωστόσο, η χρήση του υδρογόνου μπορεί να προκαλέσει διάφορα ζητήματα ασφαλείας (επίσης ανάλογα και με τον όγκο του σωλήνα). Εισάγοντας ένα αέριο υψηλότερης πυκνότητας όπως το Αργό (Argon), η ταχύτητα του ήχου επηρεάζεται. Αυτή είναι μία από τις διαθέσιμες στρατηγικές για να ελέγχεται η στιγμιαία ταχύτητα (μία δευτερεύουσα , η πρωταρχική είναι με την αναλογία $P4/P1$). Μία κατάλληλη αναλογία Ηλίου-Αργού (He/Ar) μπορεί να οδηγήσει σε ένα αποκαλούμενο παρατεταμένο κύμα, παρατείνοντας έτσι το χρόνο παρατήρησης.

Ακόμη μεγαλύτεροι αριθμοί Mach σοκ μπορούν να επιτευχθούν με τη θέρμανση του αερίου οδηγού. Και στις δύο περιπτώσεις, είναι η αύξηση της ταχύτητας του ήχου για το αέριο οδηγό που προκαλεί την αύξηση του αριθμού Mach του κρουστικού κύμα για σταθερή αναλογία πίεσης, $P4/P1$.

Μόλις το κρουστικό κύμα που πραγματοποιείται φτάσει στο ακραίο τοίχωμα του σωλήνα σοκ, ένα ανακλώμενο σοκ ταξιδεύει πίσω στο αντίθετο ρεύμα των αερίων, προκειμένου να τα επιβραδύνει και ουσιαστικά να σταματήσει τη ροή τους αφού δεν μπορούν να περάσουν το ακραίο τοίχωμα (Εικ 7.1 e). Ο αριθμός Mach του ανακλώμενου κύματος 2 είναι επίσης μία συνάρτηση , κυρίως των αρχικών συνθηκών του shock tube.



Εικόνα 7.1. . Σωλήνας σοκ και διάδοση κυμάτων : (α) Σχηματική εγκατάσταση του σωλήνα κρουστικού κύματος, (β) Διάγραμμα x-t που υποδεικνύει την ιδανική διάδοση της (μονοδιάστατης) συμπίεσης και των κυμάτων που προκύπτουν όταν σπάει το διάφραγμα, ορισμός των περιοχών 1-5 , (c) Κατανομή πίεσης στο σωλήνα κρουστικού κύματος στο συγκεκριμένο χρόνο που υποδεικνύεται στο (b), (d) Κατανομή θερμοκρασίας για τις ίδιες συνθήκες όπως το (c), (e) κατανομή πίεσης σε αργότερο χρόνο, μετά την εμφάνιση του ανακλώμενου κρουστικού κύματος.

7.2 Μηχανή Ταχείας Συμπίεσης

(Rapid Compression Machine (RCM))

Οι μηχανές ταχείας συμπίεσης (rapid compression machine) είναι όργανα σχεδιασμένα για την προσομοίωση ενός κύκλου μιας μηχανής εσωτερικής καύσης. Είναι τεχνικές συσκευές καύσης που παραδοσιακά χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση της κινητικής της ανάφλεξης των καυσίμων σε ένα καλώς-σχεδιασμένο και μηδενικών διαστάσεων σύστημα. Το τεστ σε περιβάλλον RCM επιδιώκει να αποσυνδέσει χημικές διεργασίες από τη διαδικασία μεταφοράς, όπως η εξάτμιση και

η ανάμιξη, με σκοπό να απομονωθεί η χημική αντίδραση προς μελέτη σε προδιαγεγραμμένη κατάσταση (π.χ. θερμοκρασία, πίεση, συγκέντρωση αντιδρώντων). Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από μία μηχανή ταχείας συμπίεσης χρησιμοποιούνται για την επικύρωση της συμπεριφοράς (π.χ. χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης) και των προγνωστικών των αναλυτικών μηχανισμών χημικής κινητικής για τη συγκέντρωση των ειδών.

Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για να μετρήσουν χρόνους καθυστέρησης ανάφλεξης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, της πίεσης και της αναλογίας καυσίμου/οξυγόνου διαλύτη. Μπορούν να εξοπλιστούν και με διαγνωστικά για να καθοριστούν τα πεδία θερμοκρασίας και ροής μέσα στο θάλαμο αντίδρασης και να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις των αντιδρώντων, ενδιάμεσων και τελικών ειδών που παράγονται κατά τη διάρκεια της καύσης (C. J. Sung *et al.* 2014)

Οι μηχανές ταχείας συμπίεσης χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μελέτη της ροής μέσα στον κύλινδρο και της διαδικασίας της αυτανάφλεξης. Τα φαινόμενα αυτά έχουν μελετηθεί και από μηχανικής και από χημικής πλευράς.

Λαμβάνοντας υπόψη το στόχο της κατασκευής μιας μηχανής ταχείας συμπίεσης και τον τελικό της σκοπό, είναι πολύ λογικό να προκύπτουν ορισμένα ερωτήματα σχετικά με την αξία της χημικής κινητικής και τις μετρήσεις της συσκευής :

1. Μπορεί μια RCM να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργηθεί ένα πειραματικό περιβάλλον που θα είναι πραγματικά ομογενές, χωρίς σημαντικές αποκλίσεις στη θερμοκρασία και τις συγκεντρώσεις που θα επηρέαζαν τις μετρήσεις και θα απέτρεπε τη χρήση των μετρήσεων για τη θεμελίωση μηχανισμού ;
2. Υπάρχουν περιορισμοί στην αξία των δεδομένων που παρέχονται από μία RCM; Για ποιες πειραματικές συνθήκες και για ποια πειραματικά καύσιμα μπορούν οι μετρήσεις σε μια RCM να θεωρηθούν κατάλληλες για θεμελίωση μηχανισμού;

Σχεδιασμός RCM

(RCM Design)

Ο σχεδιασμός των μηχανών ταχείας συμπίεσης έχει επικεντρωθεί στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με τη δημιουργία ομογενών προανεμιγμένων μειγμάτων μη πτητικών καυσίμων και, κατά συνέπεια, στην απόκτηση κινητικών δεδομένων για τα καύσιμα αυτά. Νέες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί για τη δημιουργία προανεμιγμένων μιγμάτων, οι οποίες βασίζονται σε ένα μπεκ ψεκασμού για να φορτώσουν υγρό καύσιμο αμέσως στο θάλαμο δοκιμής για κάθε τεστ ή βασίζονται σε

υγρή συμπίεση ενός καυσίμου σε μορφή αεροζόλ σε οξειδωτικό αέριο. Οι προσεγγίσεις αυτές επεκτείνουν το εύρος των δοκιμασιών των παραδοσιακών RCM και πλήθος μελετών και ερευνών έχει ολοκληρωθεί για την αξιολόγηση των στρατηγικών αυτών ως προς την ικανότητα τους να παρέχουν κινητικά δεδομένα υψηλής αξιοπιστίας.

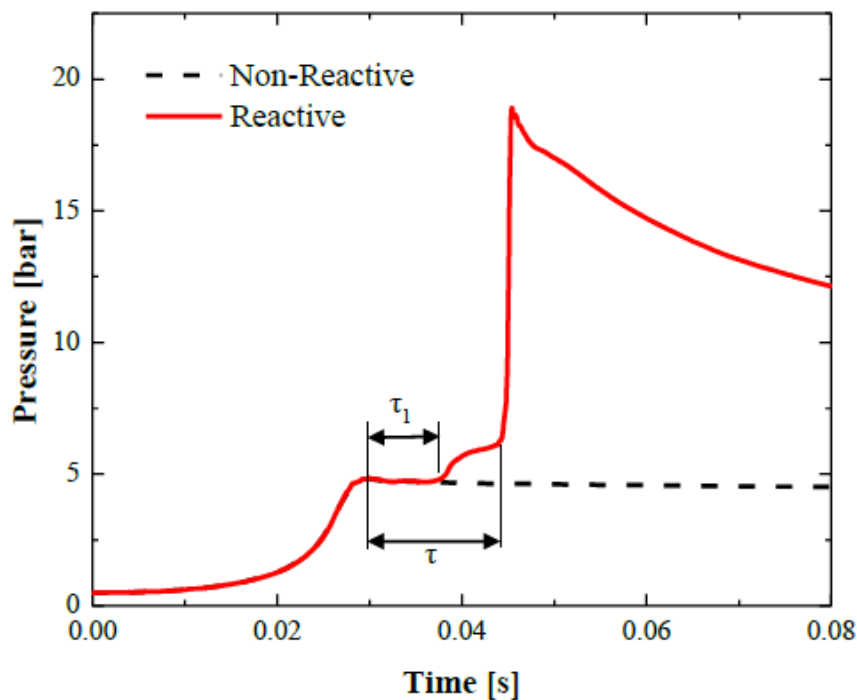
Μια μηχανή συμπίεσης κατάλληλη για τη μελέτη μικρών χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης θα πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Η συμπίεση θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ταχεία.
- Στο τέλος της διαδρομής το έμβολο δεν θα πρέπει να επανέρχεται (piston rebound).
- Ο κύλινδρος εργασίας θα πρέπει να είναι χωρίς λιπαντικό.
- Πρέπει να υπάρχουν μέσα για την καταγραφή της πίεσης του αερίου και της θέσης του εμβόλου ως συνάρτηση του χρόνου.
- Πρέπει να προβλέπονται μέσα για τη μεταβολή του λόφου συμπίεσης και της αρχικής πίεσης και θερμοκρασίας του καιόμενου μίγματος.

Η ταχεία συμπίεση είναι απαραίτητη προκειμένου να μειωθούν οι θερμικές απώλειες στην έκταση που μπορεί να προσεγγιστεί στενά η αδιαβατική διαδικασία. Είναι επίσης σημαντικό η συμπίεση να είναι ταχεία σε περίπτωση που πρόκειται να μελετηθούν καύσιμα με μικρό χρόνο.

Όπως περιγράφηκε και πιο πάνω, μία RCM είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για τη μελέτη του φαινομένου της αυτανάφλεξης κάτω από υψηλά επαναλαμβανόμενες, επαρκώς χαρακτηρισμένες και ελεγχόμενες συνθήκες. Χρησιμοποιούνται για να μετρηθούν άμεσα οι χρόνοι καθυστέρησης ανάφλεξης καθώς και για να εκτελεστούν οπτικά διαγνωστικά τεστ για τη συλλογή δεδομένων για τη μελέτη άλλων φαινομένων αυτανάφλεξης. Η μηχανή αυτή προσομοιώνει τη συμπίεση του μίγματος καθώς το έμβολο ανέρχεται από το Κάτω Νεκρό Σημείο στο Άνω Νεκρό Σημείο του κυλίνδρου κατά το χρόνο συμπίεσης σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης. Οι RCM σχεδιάζονται συνήθως να λειτουργούν με χρόνους συμπίεσης από 20 ως 50 ms, δημιουργώντας έτσι ένα περιβάλλον με πιέσεις συμπιεσμένου αέρα έως και 100 bar και θερμοκρασίες μεταξύ 600 – 900 K.

Τα δεδομένα από μία RCM αποτελούνται από την πίεση στο θάλαμο καύσης που μετριέται κατά τη διάρκεια του πειράματος. Μια τυπική απεικόνιση της πίεσης ενός πειράματος που λαμβάνει χώρα αντίδραση (reactive experiment) και ενός που δε λαμβάνει (non-reactive) δίδεται στην εικόνα 8.2 .



Εικόνα 7.2. Δειγματική απεικόνιση της πίεσης για πείραμα που πραγματοποιείται αντίδραση (reactive experiment) και για πείραμα που δεν πραγματοποιείται (non-reactive experiment)

Η διακεκομμένη γραμμή είναι τα δεδομένα για το πείραμα που δε λαμβάνει χώρο αντίδραση, στο οποίο φαίνεται μια αύξηση στην πίεση λόγω συμπίεσης και μια βαθμιαία πτώση κατά τη διάρκεια της περιόδου μετά τη συμπίεση. Αυτή η πτώση πίεσης οφείλεται κυρίως στις απώλειες θερμότητας προς τα γύρω όρια, μολονότι και το σφράγισμα όποιων διαρροών μπορεί επίσης να συνεισφέρει. Η συμπαγής γραμμή αναφέρεται στην απεικόνιση την πίεσης για πείραμα που πραγματοποιείται αντίδραση. Η πίεση συμπίεσης PC (η τιμή της πίεσης στο τέλος της συμπίεσης) είναι η ίδια και για τα δύο πειράματα. Η έκλυση θερμότητας λόγω ανάφλεξης προκαλεί μια δεύτερη απότομη αύξηση στην πίεση στο πείραμα που πραγματοποιείται αντίδραση. Οι χρόνοι καθυστέρησης ανάφλεξης υπολογίζονται ως το διάστημα από το σημείο καμψής της πίεσης, που υποδεικνύει ότι το έμβολο έχει φτάσει στο Άνω Νεκρό Σημείο(Top Dead Center – TDC) έως το χρόνο που συμβαίνει η ανάφλεξη (το σημείο με τη μεγαλύτερη αύξηση πίεσης) (βλ. Εικόνα 1.1). Το πρώτο στάδιο της ανάφλεξης αντιπροσωπεύεται από το χρόνο τ_1 και η συνολική καθυστέρηση ανάφλεξης από το χρόνο τ .

Η θερμοκρασία είναι δύσκολο να μετρηθεί άμεσα σε μια RCM επειδή οι αποκρίσεις των οργάνων μέτρησης της (θερμοαντιστάσεις – θερμοστοιχεία) δεν επιτρέπουν η

αλλαγή στη θερμοκρασία να καταγραφεί στον πραγματικό της χρόνο. Επομένως, η θερμοκρασία συμπίεσης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ισηντροπικές σχέσεις. Για να ληφθούν υπόψη οι απώλειες θερμότητας σε πειράματα σε μια RCM, πραγματοποιούνται πειράματα όπου δε λαμβάνει χώρα αντίδραση, στα οποία το περιεχόμενο του μίγματος σε οξυγόνο αντικαθίσταται από άζωτο και στη συνέχεια προσομειώνεται για να παράγουν ένα ιστορικό όγκου/χρόνου που χρησιμοποιείται ως είσοδος στο πρόγραμμα Chemkin Pro. Το άζωτο χρησιμοποιείται επειδή έχει παρόμοιες θερμοδυναμικές ιδιότητες με αυτές του οξυγόνου. Ο ακριβής προσδιορισμός της θερμοκρασίας εντός του θαλάμου καύσης στο Άνω Νεκρό Σημείο είναι υψίστης σημασίας για τον ορθό χαρακτηρισμό ενός καυσίμου. Οι χρόνοι καθυστέρησης ανάφλεξης αναφέρονται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας συμπίεσης (T_c), της θερμοκρασίας δηλαδή στο τέλος της συμπίεσης.

Συμπερασματικά, μια ιδανική μηχανή ταχείας συμπίεσεως πρέπει να έχει τη δυνατότητα να δοκιμάζεται με γρήγορους χρόνους συμπίεσης σε ένα μεγάλο εύρος λόγων συμπίεσης, ενώ πραγματοποιείται συλλογή δεδομένων πίεσης και δειγματοληψία αερίων. Μερικές RCM έχουν επανασχεδιαστεί για να προσφέρουν μεγαλύτερο έλεγχο πάνω σε πειραματικές διαδικασίες. Η βασική ιδέα αξιοποίησης των μηχανών αυτών είναι να γίνεται μια εις βάθος κατανόηση διαφόρων φαινομένων που σχετίζονται με τη λειτουργία των μηχανών εσωτερικής καύσης

Κεφάλαιο 8

Μοντελοποίηση Χημικής Κινητικής

(Detailed Chemical Kinetics)

8.1 Μελέτη χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης μινυμάτων Φυσικού αερίου με υπολογιστική προσομοίωση αναλυτικής χημικής κινητικής

Κατά τα τελευταία χρόνια η μοντελοποίηση της χημικής κινητικής έχει γίνει ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση των συστημάτων καύσης. Η διάθεση πολλών δεδομένων σχετικά με την κινητική, οι βελτιωμένες τεχνικές για την εκτίμηση του βαθμού αντίδρασης συγκεκριμένων αντιδράσεων και η ολοένα και συνεχόμενη ανάπτυξη στο μέγεθος, στην ταχύτητα και στη διαθεσιμότητα μεγάλων υπολογιστών έχουν οδηγήσει στην αυξανόμενη μοντελοποίηση της χημικής κινητικής.

Τον τελευταίο καιρό τα μοντέλα κινητικής που έχουν αναπτυχθεί έχουν βρει εφαρμογή και είναι χρήσιμα στην ανάλυση συστημάτων πρακτικής μετατροπής ενέργειας, όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης.

Παρόλο που σε ένα περιβάλλον καύσης μπορούμε να συναντήσουμε πολλά είδη καυσίμων, οι υδρογονάνθρακες αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία. Παρόλο που στη μελέτη αυτή ασχολούμαστε με την καύση υδρογονανθράκων, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι ο ίδιος τρόπος προσέγγισης και ανάλυσης μπορεί να εφαρμοστεί και σε διαφορετικά καύσιμα.

Σε γενικές γραμμές, ο μηχανισμός αντίδρασης παρέχει μια περιγραφή των στοιχειωδών βημάτων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της μετατροπής του καυσίμου και οξείδωσης του σε τελικά προϊόντα. Ο όρος «στοιχειώδη» χρησιμοποιείται εσκεμμένα, δεδομένου ότι κάθε μηχανισμός είναι στην πραγματικότητα μία προσέγγιση στην οποία όλες οι ενδιάμεσες καταστάσεις με χαρακτηριστική διάρκεια ζωής πολύ μικρή για να θεωρήσουμε ότι μπορεί να επηρεάσει τα χαρακτηριστικά της καύσης και, συνεπώς, μπορούν και παραμελούνται.

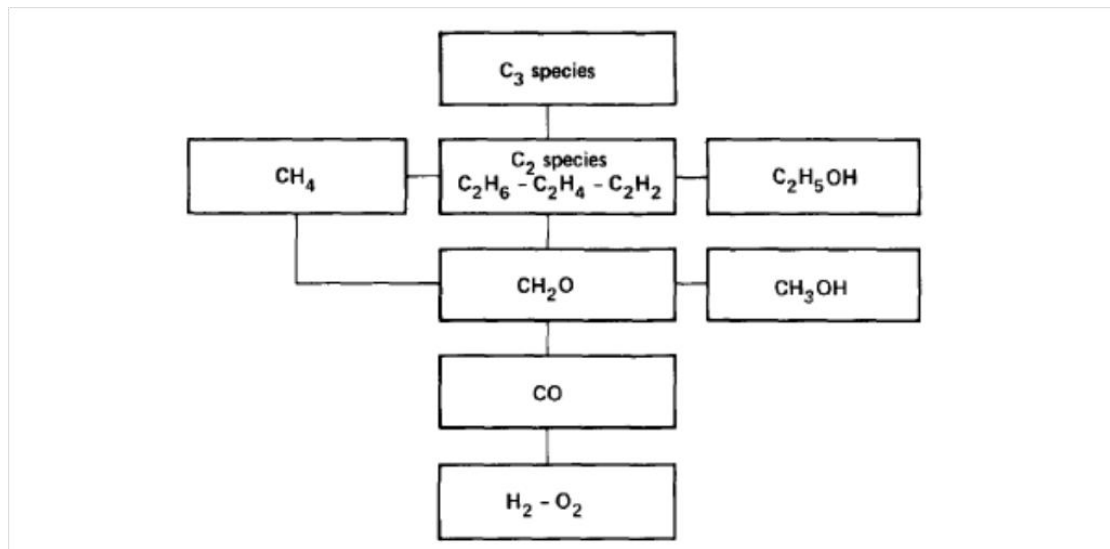
Σε πρακτικό επίπεδο, ο μηχανισμός αποτελείται από όλα εκείνα τα χημικά είδη τα οποία επηρεάζουν ένα δεδομένο συμβάν κατά τη διάρκεια της καύσης, μαζί με τις

στοιχειώσεις αντιδράσεις μεταξύ των ειδών αυτών. Με μια πρώτη ματιά, αυτό μοιάζει να χρειάζεται και να απαιτεί ένα τεράστιο αριθμό αντιδράσεων. Για N είδη θα υπήρχαν N^2 ζεύγη αντίδρασης και για κάθε ζεύγος θα υπήρχε ένας αριθμός πιθανών προϊόντων. Ευτυχώς όμως, η περίπτωση αυτή δεν υφίσταται, διότι πολλές αντιδράσεις που μαθηματικώς είναι δυνατές, είτε σε επίπεδο χημικής κινητικής δεν συμβαίνουν τελείως, είτε ο βαθμός τους είναι πολύ μικρός.

Επομένως, η κατασκευή ενός ρεαλιστικού μηχανισμού αντιδράσεων περιλαμβάνει κυρίως τον προσδιορισμό των αντιδράσεων αυτών που λαμβάνουν χώρο στην πραγματικότητα και είναι αρκετά γρήγορες ώστε να έχουν μια επίπτωση στη συνολική διαδικασία της καύσης (C. K. Westbrook *et al.* 1984)

Η καύση ενός καυσίμου υδρογονάνθρακα αποτελείται κυρίως από τη διαδοχική διάσπαση του αρχικού μορίου καυσίμου σε μικρότερα ενδιάμεσα είδη που, στην τελική, μετατρέπονται σε τελικά προϊόντα, μαζί με, συνήθως, H_2O και CO_2 . Σε πολλές περιπτώσεις, τα ενδιάμεσα αυτά προϊόντα χρησιμοποιούνται και τα ίδια ως καύσιμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το εθυλένιο (C_2H_4) που είναι ένα σημαντικό ενδιάμεσο προϊόν της καύσης του προπανίου (C_3H_8) και άλλων υδρογονανθράκων, όπου μπορεί και το ίδιο να αποτελέσει πρωτογενές καύσιμο. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το υδρογόνο (H_2) είναι κοινά είδη που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της οξειδωσης όλων των υδρογονανθράκων και οι ρίζες H , OH , O , HO , HCO και άλλες είναι κοινές στην καύση των υδρογονανθράκων. Αυτές οι παρατηρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν προσφέροντας μεγάλα πλεονεκτήματα στη δημιουργία μηχανισμών κινητικής για την αντίδραση σύνθετων καυσίμων (W. K. Metcalfe *et al.* 2013)

Από τα παραπάνω λοιπόν, συμπεραίνουμε ότι ένας μηχανισμός μπορεί να αναπτυχθεί συστηματικά, ξεκινώντας με τις απλούστερες αντιδράσεις και είδη που αποτελούν συνήθη υποστοιχεία στην καύση πιο πολύπλοκων ειδών και διαδοχικά ενσωματώνονται νέα είδη με σκοπό να αυξηθεί η πολυπλοκότητα. Σε κάθε επίπεδο, πρέπει τα νέα κομμάτια του μηχανισμού που προστίθενται, να ελέγχονται και να επικυρώνονται μέσα από μια διεξοδική σύγκριση μεταξύ αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων. Αυτή η ιεραρχική δομή συνοψίζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 8.1. Ιεραρχική κατασκευή και συνολική συσχέτιση ανάμεσα στους μηχανισμούς οξειδωσης για καύσιμα απλών υδρογονανθράκων.

Ο έλεγχος αυτός κάθε επιπέδου του μηχανισμού είναι μια πολύπλοκη και δύσκολη διαδικασία. Δεν αρκεί μόνο να ελέγχουμε ένα μηχανισμό συγκρίνοντας το με ένα και μόνο πείραμα, γιατί διαφορετικές στοιχειώδεις αντιδράσεις μπορεί να παίζουν κυρίαρχο και πρωταρχικό ρόλο σε διαφορετικές πειραματικές συνθήκες.

Για παράδειγμα, σε πολλά συστήματα υδρογονανθράκων, οι αντιδράσεις μεταξύ μορίων καυσίμου και ατόμων υδρογόνου κατέχουν δεσπόζουσα θέση σε συνθήκες πλούσιας καύσης, αλλά λιγότερη σημασία έχουν σε συνθήκες πτωχής, όπου οι αντιδράσεις μεταξύ του καυσίμου και των ριζών O και OH είναι οι πιο σημαντικές.

8.2 Το Υπολογιστικό πρόγραμμα Chemkin

Το CHEMKIN αποτελεί ένα λογισμικό εργαλείο για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων χημικής κινητικής. Χρησιμοποιείται σε παγκόσμια βάση για τη μελέτη της καύσης, των χημικών διαδικασιών, στον τομέα της μικροηλεκτρονικής και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Το CHEMKIN επιλύει χιλιάδες προβλήματα συνδυασμών αντίδρασης με σκοπό την απόκτηση εμπεριστατωμένης εικόνας μιας συγκεκριμένης διαδικασίας, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλά χημικά είδη και διάφορα εύρη συγκεντρώσεων και θερμοκρασίες αερίων.

Ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο χημικής κινητικής για τους αεριοστρόβιλους και τις μηχανές εσωτερικής καύσης και επηρεάζεται από τη σύνθεση του καυσίμου. Η καθυστέρηση ανάφλεξης είναι επίσης μία από τις πρωταρχικές μεθόδους για τη σύγκριση ενός μοντέλου καυσίμου (ή μηχανισμού) με πειραματικά δεδομένα. Οι σχεδιαστές των μηχανών πρέπει να κάνουν εκτίμηση του πως οι διάφορες μορφές και συνθέσεις των καυσίμων, τα

βιοκαύσιμα και πρόσθετα στοιχεία επηρεάζουν την απόδοση των μηχανών, για περιπτώσεις όπως φαινόμενα κρουστική καύση και χρόνος ανάφλεξης.

Ο γρήγορος και ισχυρός Κλειστός, Ομογενής αντιδραστήρας (Closed Homogeneous Reactor) του προγράμματος Chemkin μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξεταστεί η επίδραση διαφόρων συνθέσεων καυσίμου στην καθυστέρηση της ανάφλεξης μέσω αυτοματοποιημένων παραμετρικών μελετών για τις συνθήκες λειτουργίας.

Η προσομοίωση που γίνεται βασίζεται στη μελέτη του σωλήνα κρουστικού κύματος και της μηχανής ταχείας συμπίεσης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση των χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης τριών από τα κύρια συστατικά του φυσικού αερίου: του μεθανίου (CH_4), του αιθανίου (C_2H_6) και του προπανίου (C_3H_8). Για την προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε το ιδανικό μοντέλο κλειστού ομογενούς αντιδραστήρα, για διάφορα εύρη συνθηκών και σύγκριση τους με πειραματικά δεδομένα. Οι αναλυτικοί μηχανισμοί αντίδρασης που εξετάστηκαν στην εργασία αυτή ήταν τρεις (3): Ο μηχανισμός προερχόμενος από το Εργαστήριο Ετερογενών Μιγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (NTUA mechanism) (G. Vourliotakis et al 2009, 2011), ο μηχανισμός GRI (GRI-mechanism) και ο μηχανισμός Aramco (Aramco mech).

Το CHEMKIN παρέχει επίσης τη δυνατότητα να διαφοροποιούνται τα κριτήρια του χρόνου ανάφλεξης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του. Τα κριτήρια αυτά περιλαμβάνουν: Την κρίσιμη θερμοκρασία T_c , μέγιστη συγκέντρωση των ειδών συγκεκριμένων συστατικών, συγκεκριμένη θερμοκρασία ανάφλεξης, συγκεκριμένη αύξηση θερμοκρασίας πέραν της αρχικής κλπ. Τα δεδομένα αναφέρονται συχνά βασιζόμενα σε πολλά από αυτά τα κριτήρια. Ενώ διαφορετικοί ορισμοί οδηγούν συνήθως σε παρόμοιες τιμές χρόνων ανάφλεξης, υπάρχουν περιπτώσεις όπως με μίγματα πολύ φτωχά σε καύσιμο, όπου οι ορισμοί οδηγούν σε σημαντικά διαφορετικές τιμές. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούμε την κρίσιμη θερμοκρασία T_c και τη μέγιστη συγκέντρωση των ριζών OH σαν κριτήρια ανάφλεξης και στη συνέχεια συγκρίνονται οι ομοιότητες στους υπολογισμένους χρόνους ανάφλεξης.

8.3 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

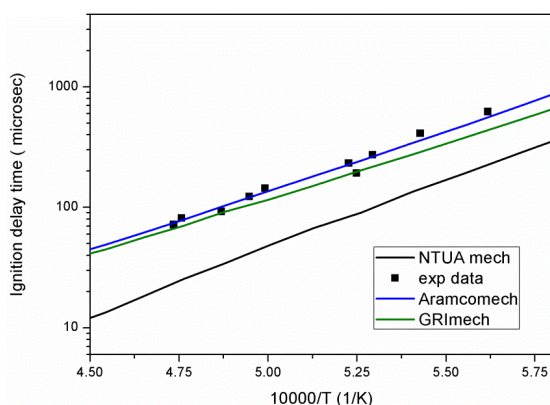
Στην παρούσα υποπαράγραφο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διπλωματικής εργασίας. Τα αποτελέσματα αφορούν σε πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την καύση μιγμάτων υδρογονανθράκων σε περιβάλλον σωλήνα κρουστικού κύματος και μηχανής ταχείας συμπίεσης, καθώς επίσης και υπολογιστικές προλέξεις με τα τρία μοντέλα αναλυτικής χημικής κινητικής. Τα εξεταζόμενα μίγματα μελετήθηκαν σε διάφορες συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και λόγου αντιστοιχίας φ. Αποτελούνταν από: καθαρό μεθάνιο, αιθάνιο και προπάνιο, μίγματα αυτών με προσθήκη υδρογόνου καθώς και μίγματα φυσικού αερίου που περιείχαν στη σύστασή τους και τους τρεις αυτούς υδρογονάνθρακες.

8.3.1 Μίγματα Καθαρού Μεθανίου σε Πίεση 1,7 atm , 1,3 atm, 1,2 atm

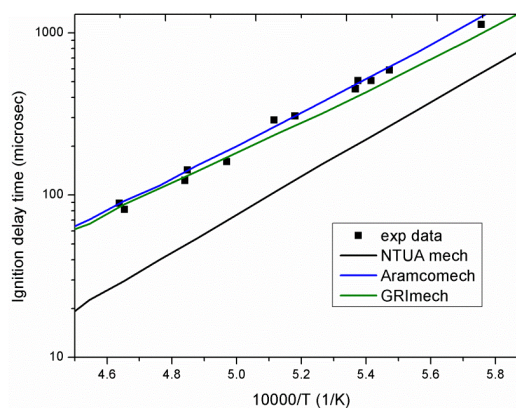
Στην παρούσα υποπαράγραφο εξετάζονται τα αποτελέσματα του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης για την καύση μιγμάτων μεθανίου - οξυγόνου σε υψηλή αραιώση με Αργό. Τα ανωτέρω μίγματα εξετάζονται υπό πίεση ελαφρώς υψηλότερη της ατμοσφαιρικής (1.2 - 1.7atm) και για μίγματα υποστοιχειομετρικά, στοιχειομετρικά και πλούσια σε καύσιμο (C.H. Osorio *et al.* 2013).

Οι συνθήκες που εξετάστηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον κάτωθι πίνακα:

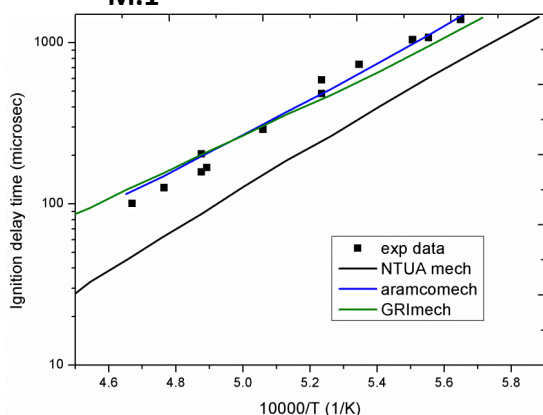
Μίγμα	CH4(%)	O2(%)	Ar(%)	ϕ	P(atm)
M.1	0,4	1,6	98	0,5	1,7
M.2	0,67	1,33	98	1	1,3
M.3	1	1	98	2	1,2



M.1



M.2



M.3

Ανάλυση αποτελεσμάτων

- Σε όλες τις περιπτώσεις ο μηχανισμός NTUA (NTUA mech) υποεκτιμά το χρόνο καθυστέρησης ανάφλεξης για τα πειραματικά δεδομένα.

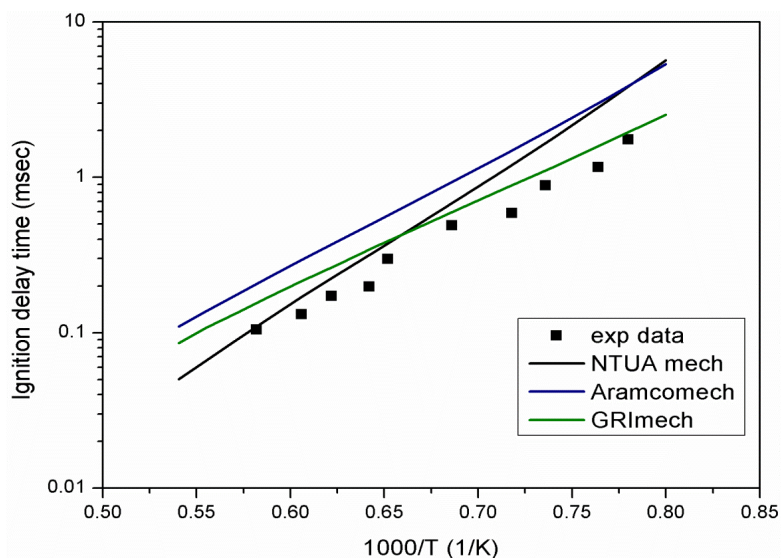
- Οι υπόλοιποι 2 μηχανισμοί, Aramcomech και GRImech, βρίσκονται σε απόλυτη συμφωνία, τόσο με τα πειραματικά δεδομένα, όσο και μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, η μεταξύ τους συμφωνία μπορεί να παρατηρηθεί ότι αυξάνεται όσο το υπό εξέταση μίγμα γίνεται πιο πλούσιο σε καύσιμο (από $\phi=0,5$ σε $\phi=1$).
- Σε κάθε περίπτωση, η ασυμφωνία μεταξύ των δύο αυτών μηχανισμών μειώνεται για υψηλότερες θερμοκρασίες.
- Ο μηχανισμός NTUA υποεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα κατά περίπου 40% για τα μίγματα M1,M2 ενώ το ποσοστό αυτό μειώνεται αισθητά για το μίγμα M3. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από την ευαισθησία του συγκεκριμένου μηχανισμού από τη στοιχειομετρία, καθώς από το M2 στο M3 η πίεση δεν μεταβάλλεται σημαντικά ενώ η στοιχειομετρία αλλάζει από $\phi=1$ σε $\phi=2$.

8.3.2 Υποστοιχειομετρικά Μίγματα Μεθανίου/Υδρογόνου σε Πίεση 1 atm και 10 atm

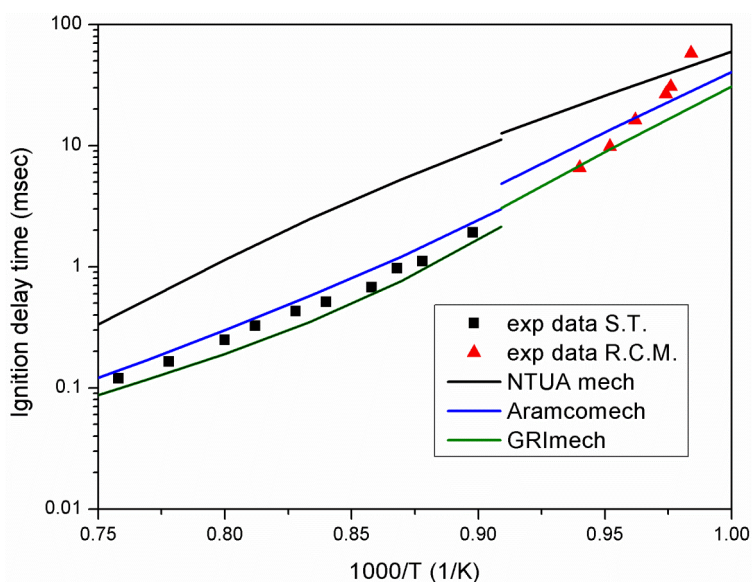
Στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζεται ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης μιγμάτων μεθανίου-οξυγόνου, με προσθήκη ενός ποσοστού υδρογόνου. Η σύσταση των μιγμάτων είναι η ακόλουθη:

Μίγμα	CH4(%)	H2(%)	O2(%)	Ar(%)	N2(%)	ϕ	P(atm)
M.4	1,135	0,486	8,378	90	0	0,3	1
M.5	1,25	1,875	6,875	90	0	0,5	10
M.6	1,25	1,875	6,875	45	45	0,5	10

Επισημαίνεται ότι το μίγμα M.6 χρησιμοποιήθηκε για πείραμα σε μηχανή ταχείας συμπίεσης (RCM) και, σε αντίθεση, με τα άλλα δύο που χρησιμοποιήθηκαν σε σωλήνα κρουστικού κύματος (ST), έχει διαφορετική σύσταση διαλύτη (45% αργό/45% άζωτο) (N. Donohoe *et al.* 2014).



M.4



M.5, M.6

Ανάλυση Διαγραμμάτων

- Παρατηρείται ότι για $P=1$ atm ο μηχανισμός NTUA προσεγγίζει σε πολύ υψηλό βαθμό τα πειραματικά δεδομένα στις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ τείνει να τα υπερεκτιμά για χαμηλές θερμοκρασίες. Σε γενικές γραμμές υπάρχει συμφωνία τόσο μεταξύ των μηχανισμών όσο και των μηχανισμών με τα πειραματικά δεδομένα.
- Με την αύξηση της πίεσης και την αύξηση της περιεκτικότητας του μίγματος σε υδρογόνο παρατηρείται ότι ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης μειώνεται αισθητά, γεγονός που μπορεί να ερμηνευθεί από την υψηλή αντιδραστικότητα που έχει το στοιχείο του υδρογόνου (ο λόγος αντιστοιχίας δε μεταβάλλεται αισθητά για τα μίγματα M.4 και M.5).

8.3.3 Μίγματα Μεθανίου αραιωμένα με N2 και CO2

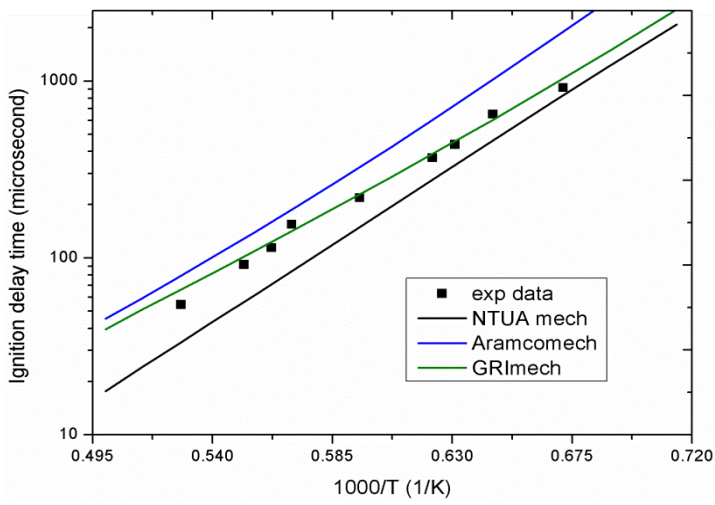
Στη συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα για το χρόνο καθυστέρησης ανάφλεξης μιγμάτων μεθανίου κατόπιν αραιώσεως (dilution) με N2 και CO2. Οι επιμέρους διαφορές των μιγμάτων M7 έως M21 αναφέρονται αναλυτικά στον κάτωθι πίνακα (W. Zeng *et al.* 2015).

Είναι αξιοσημείωτο ότι οι τρεις υπό εξέταση μηχανισμοί παρουσιάζουν συστηματικά παρόμοια συμπεριφορά, τόσο αναφορικά με τις μεταξύ τους προλέξεις όσο και αναφορικά με τη σύσταση του διαλύτη.

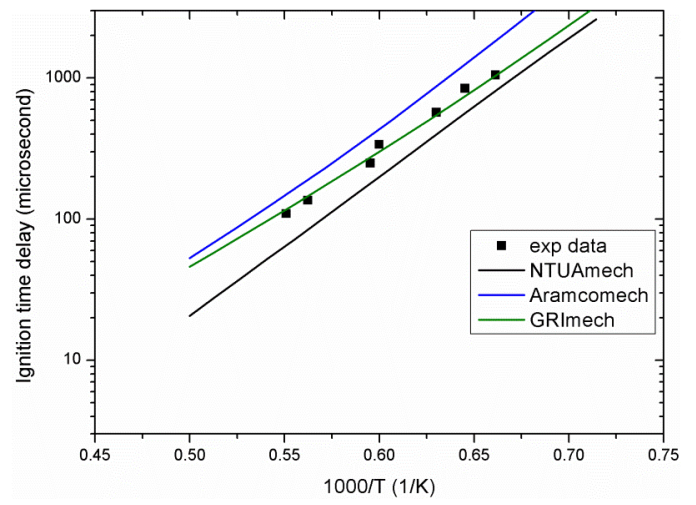
Ο μηχανισμός NTUA παρουσιάζει εξαιρετική συμφωνία πειραματικών δεδομένων και υπολογιστικών προλέξεων για υπο-στοιχειομετρικά, στοιχειομετρικά και πλούσια σε καύσιμο μίγματα ανεξαρτήτως του διαλύτη.

Mixture	CH4	O2	Ar	N2	CO2	Φ	P
M. 7	0.0499	0.1995	0	0.7506	0	0.5	0.1 Mpa
M.12	0.095	0.19	0	0.715	0	1	0.1 MPa
M.17	0.1736	0.1736	0	0.6528	0	2	0.1 MPa
M.8	0.0399	0.1596	0	0.8005	0	0.5	0.1 MPa
M.13	0.076	0.152	0	0.772	0	1	0.1 MPa
M.18	0.1389	0.1389	0	0.7222	0	2	0.1 Mpa
M.9	0.0399	0.1596	0	0.6005	0.2	0.5	0.1 Mpa
M.14	0.076	0.152	0	0.572	0.2	1	0.1 Mpa
M.19	0.1389	0.1389	0	0.5222	0.2	2	0.1 Mpa
M.10	0.0249	0.0998	0	0.8753	0	0.5	0.1 Mpa
M.15	0.0475	0.095	0	0.8575	0	1	0.1 Mpa
M.20	0.0868	0.0868	0	0.8264	0	2	0.1 Mpa
M.11	0.0249	0.0998	0	0.3753	0.5	0.5	0.1 Mpa
M.16	0.0475	0.095	0	0.3575	0.5	1	0.1 Mpa
M.21	0.0868	0.0868	0	0.3264	0.5	2	0.1 Mpa

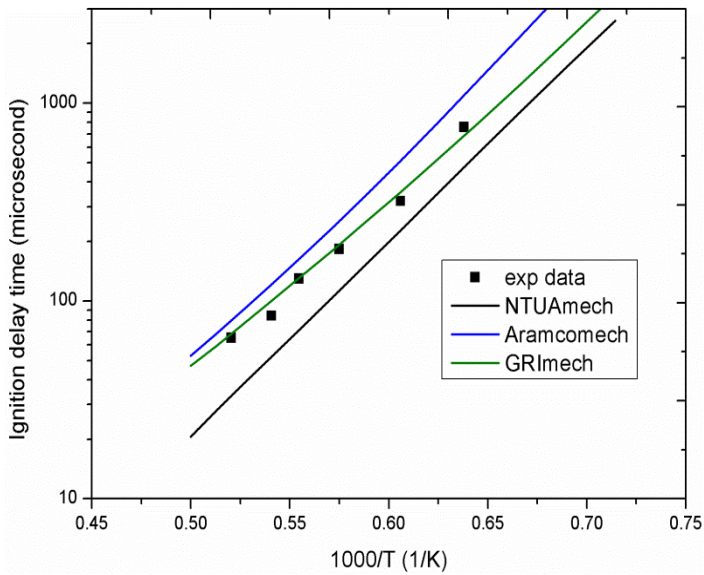
8.3.4 Υποστοιχειομετρικά Μίγματα Καθαρού Μεθανίου αραιωμένα με N2 και CO2



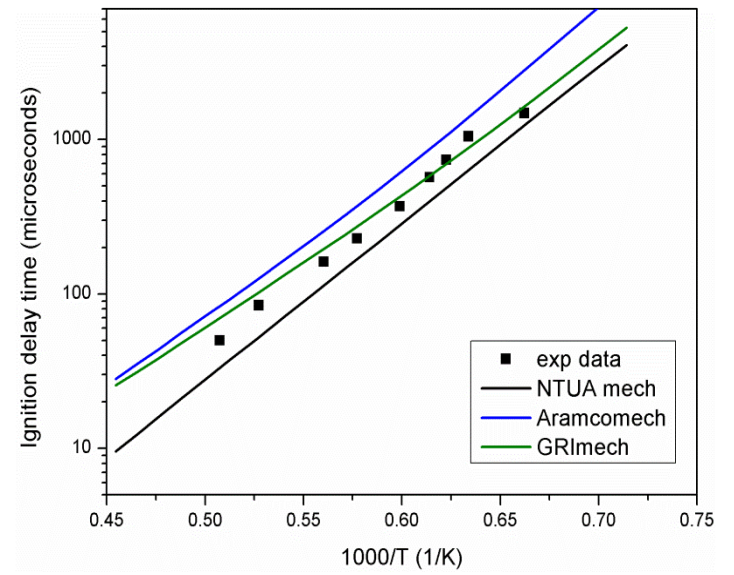
M.7



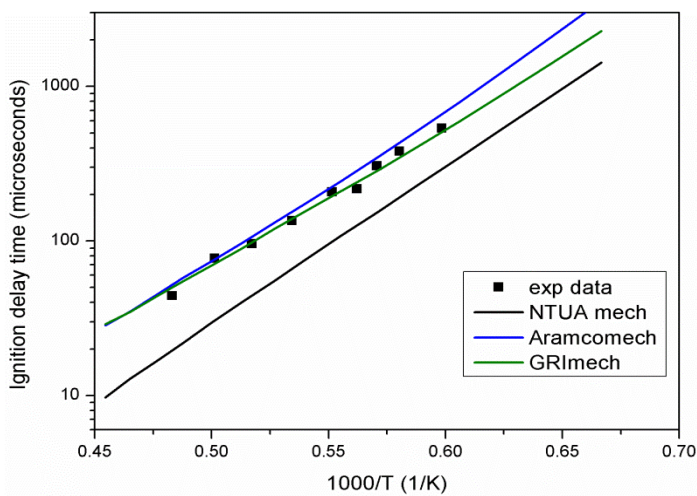
M.8



M.9

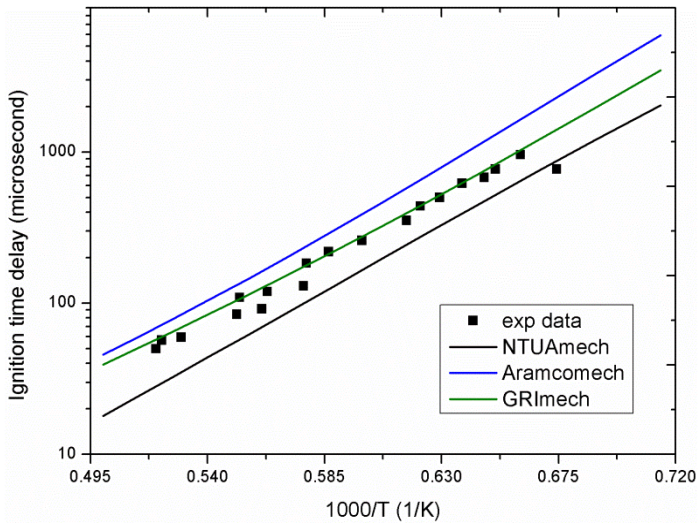


M.10

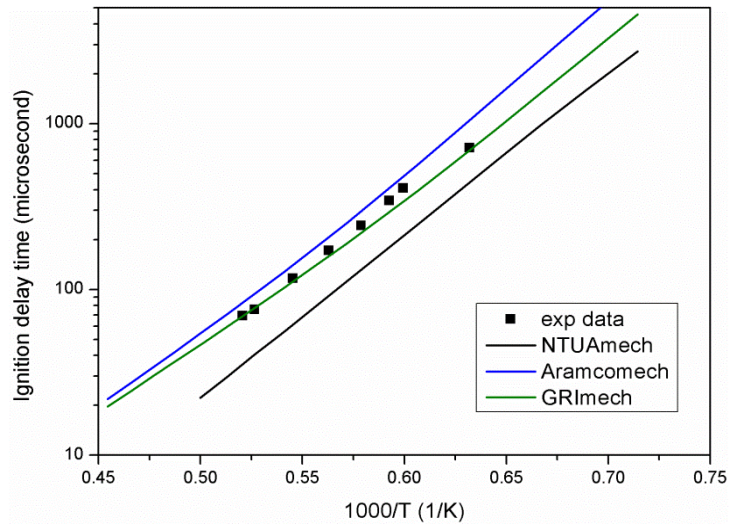


M.11

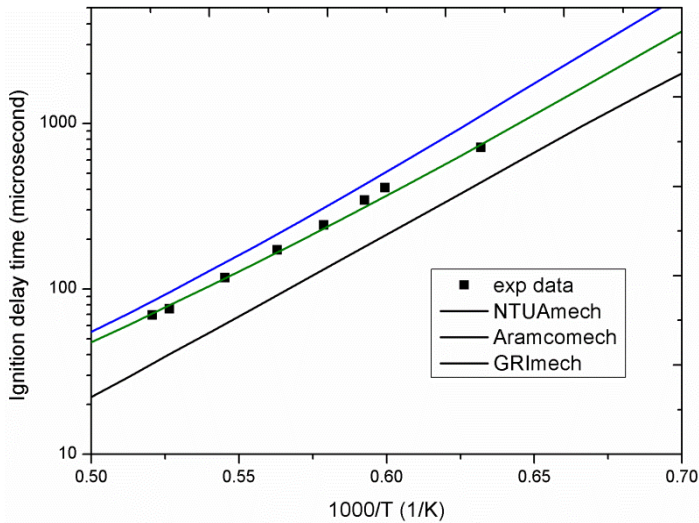
8.3.5 Στοιχειομετρικά Μίγματα Καθαρού Μεθανίου αραιωμένα με N2 και CO2



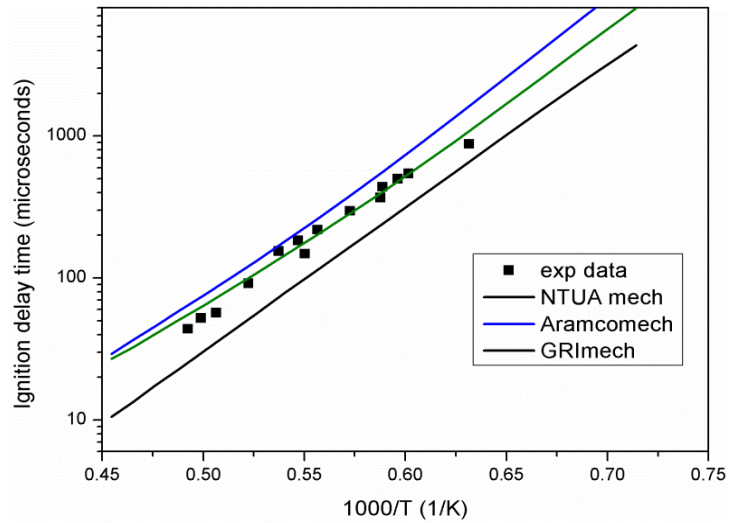
M.12



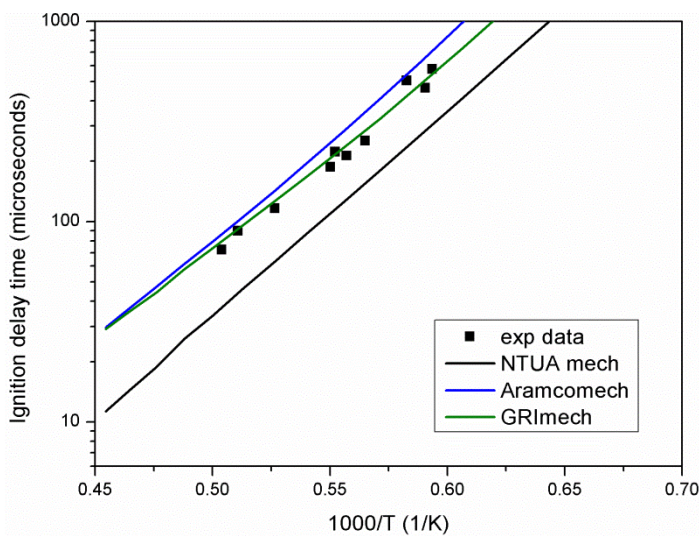
M.13



M.14

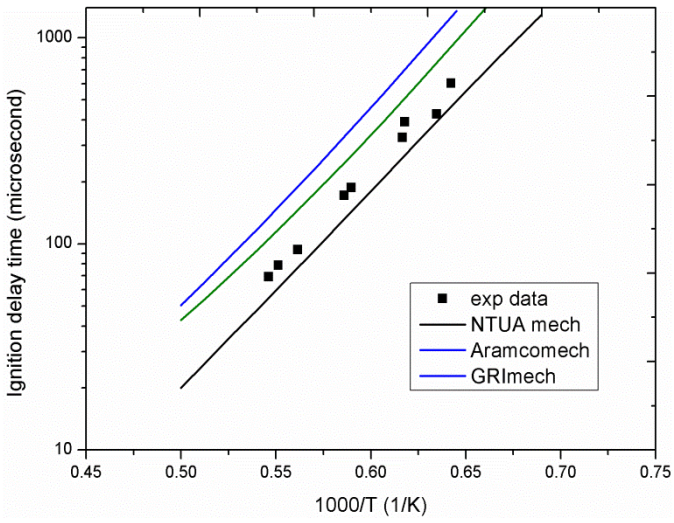


M.15

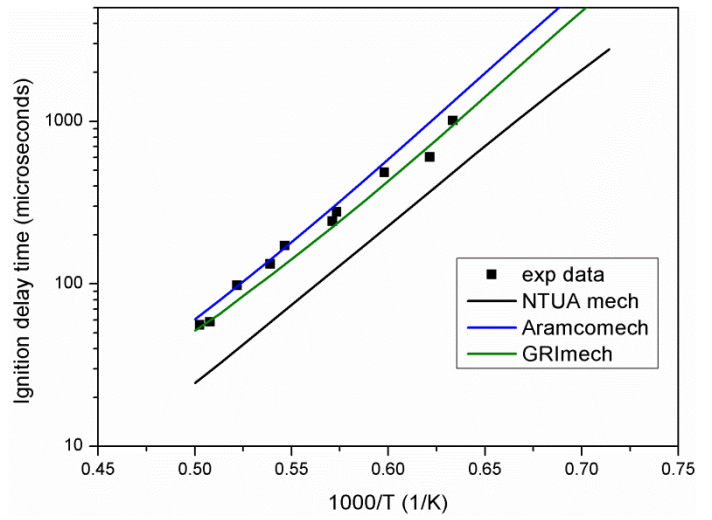


M.16

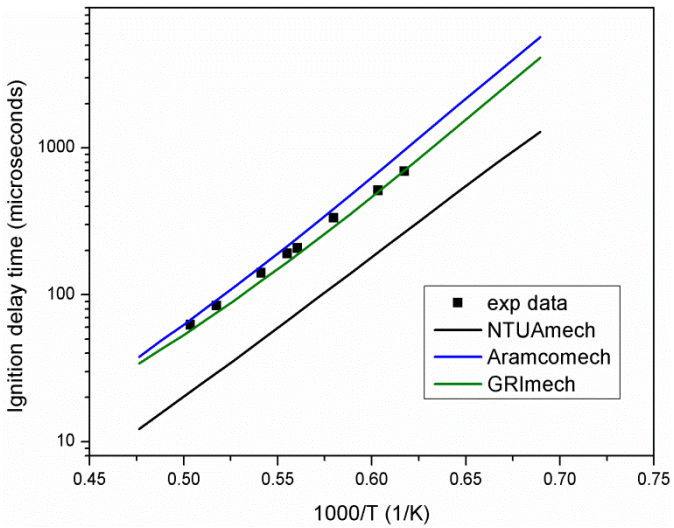
8.3.6 Πλούσια Μίγματα Καθαρού Μεθανίου αραιωμένα με N2 και CO2



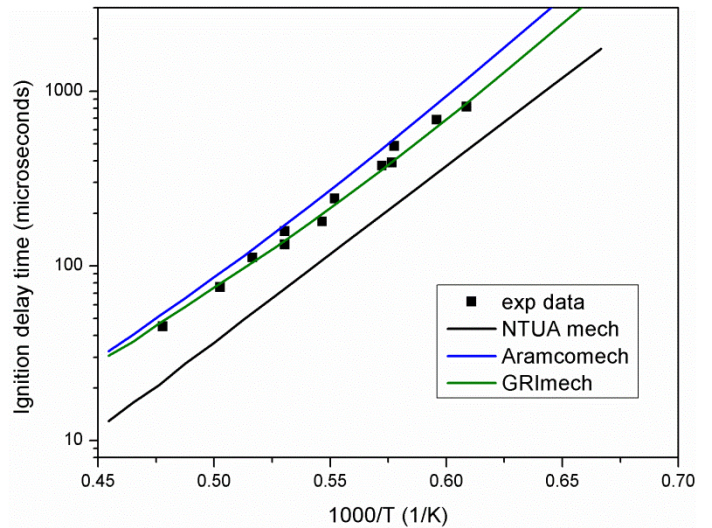
M.17



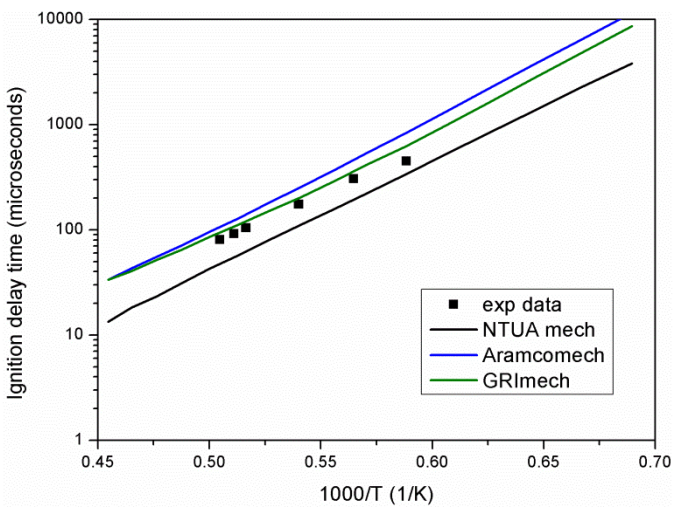
M.18



M.19



M.20



M.21

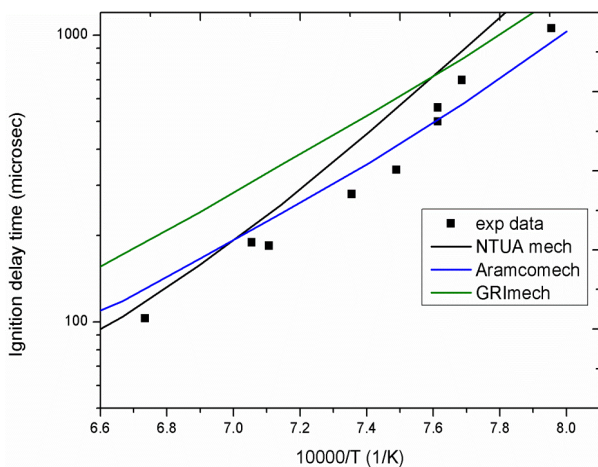
8.3.7 Μίγματα Καθαρού Αιθανίου σε Πίεση 1,4 atm και 1,3 atm

Σύγκριση Μιγμάτων E.1 , E.2, E.3

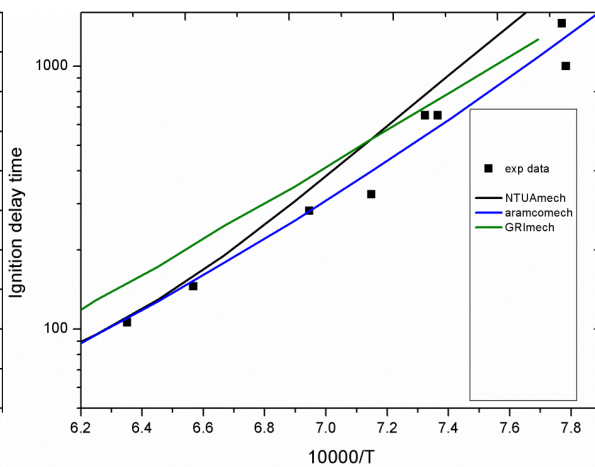
Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης μιγμάτων αιθανίου-οξυγόνου, υψηλά αραιωμένα με αργό. Η μελέτη τους έγινε σε πίεση 1,4 και 1,3 atm και αφορά μίγματα με λόγους αντιστοιχίας $\phi = 0,5, 1, 2$ (C.H. Osorio *et al.* 2013).

Η πειραματική τους σύνθεση είναι η παρακάτω :

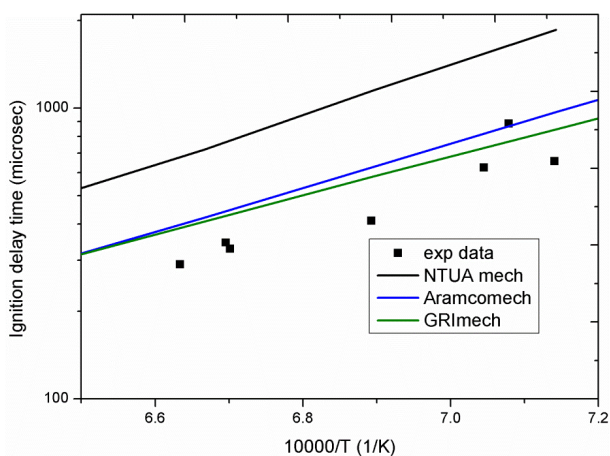
Μίγμα	C2H6(%)	O2(%)	Ar(%)	ϕ	P(atm)
E.1	0,25	1,75	98	0,5	1,4
E.2	0,44	1,56	98	1	1,4
E.3	0,73	1,27	98	2	1,3



E. 1



E.2



E. 3

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

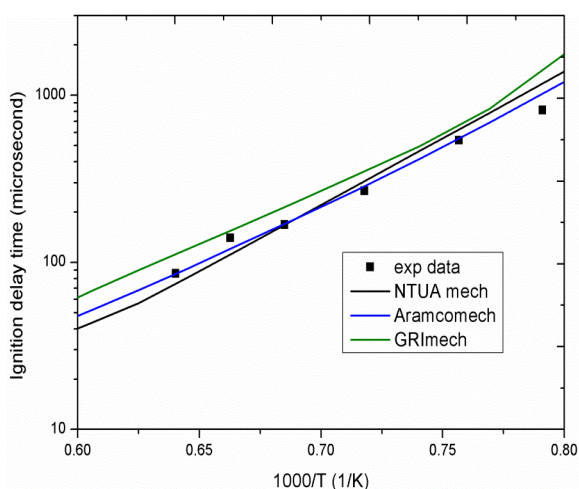
- Σε γενικές γραμμές ο μηχανισμός NTUA υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα και βρίσκεται σε συμφωνία με το μηχανισμό Aramco.. Πιο συγκεκριμένα, στα μίγματα E.1, E.2, τα προσεγγίζει στις υψηλές θερμοκρασίες ενώ έπεται χρονικά αυτών για της χαμηλές. Στο πλούσιο σε καύσιμο μίγμα παρουσιάζεται μεγάλη χρονικά απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα, που θα μπορούσε να ερμηνευθεί από την ευαισθησία του συγκεκριμένου μηχανισμού ως προς τη στοιχειομετρία (από $\phi=1$ σε $\phi=2$), καθώς η πίεση δε μεταβάλλεται σημαντικά (από $p=1,4$ atm σε $p=1,3$ atm).
- Αύξηση του λόγου αντιστοιχίας ϕ έχει ως αποτέλεσμα να αναφλέγεται πιο αργά το μίγμα, δηλαδή μεγαλύτερο χρόνο καθυστέρησης ανάφλεξης.

8.3.8 Στοιχειομετρικά Μίγματα Καθαρού Αιθανίου σε Πίεση 1,2 atm , 4 atm, 16 atm

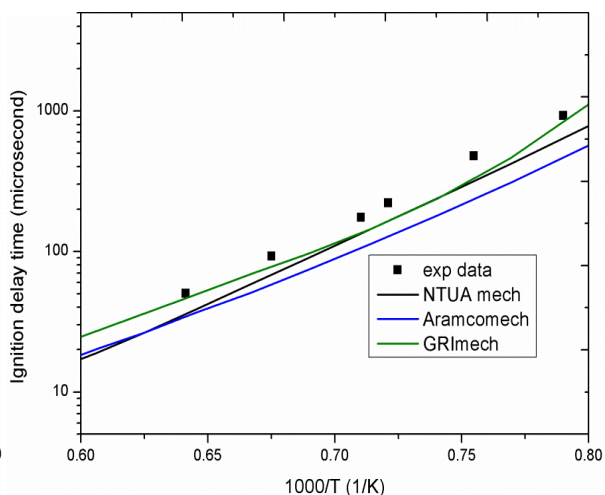
Σύγκριση Μιγμάτων E.4, E.5, E.6

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης στοιχειομετρικών μιγμάτων αιθανίου-οξυγόνου, παρουσία υψηλής συγκέντρωσης αργού. Τα μίγματα αυτά μελετήθηκαν σε πιέσεις 1,4 , 4 και 16 atm και η σύσταση τους είναι η εξής :

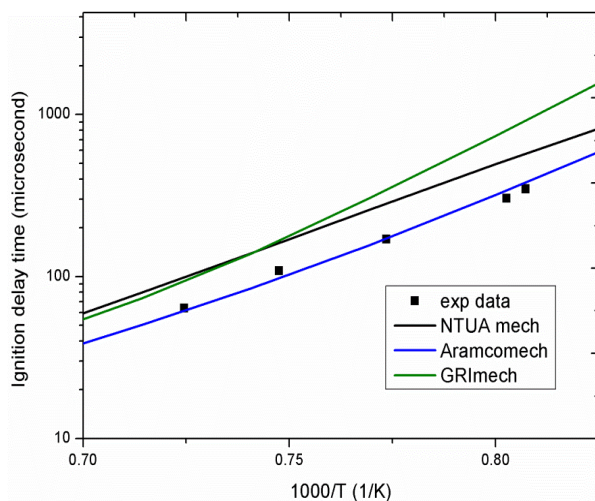
Μίγμα	C ₂ H ₆ (%)	O ₂ (%)	Ar(%)	ϕ	P(atm)
E.4	1,133	3,964	94,904	1	1,4
E.5	1,133	3,964	94,904	1	4
E.6	1,133	3,964	94,904	1	16



E. 4



E.5



E. 6

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

- Παρατηρείται ότι στις 1,4 atm ο μηχανισμός NTUA προσεγγίζει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα, κάτι που δε συμβαίνει καθώς η πίεση αυξάνεται καθώς στις 4 atm τα υποεκτιμά, ενώ όταν η πίεση τετραπλασιάζεται (16 atm) έπεται χρονικά αυτών.
- Για τις πιέσεις των 1,4 και 4 atm οι τρεις μηχανισμοί προσεγγίζουν ο ένας τον άλλον με ικανοποιητική ακρίβεια, ενώ συγκεκριμένα στις 16 atm ο μηχανισμός Aramco προηγείται χρονικά των άλλων δύο κατά περίπου 25μsec. Στην τελευταία περίπτωση, παρουσιάζεται και μια απόκλιση μεταξύ των μηχανισμών NTUA και GRI σε χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ όσο η θερμοκρασία αυξάνει οι δύο μηχανισμοί προσεγγίζονται με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια.
- Αύξηση της πίεσης στα στοιχειομετρικά αυτά μίγματα οδηγεί σε μείωση του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης.

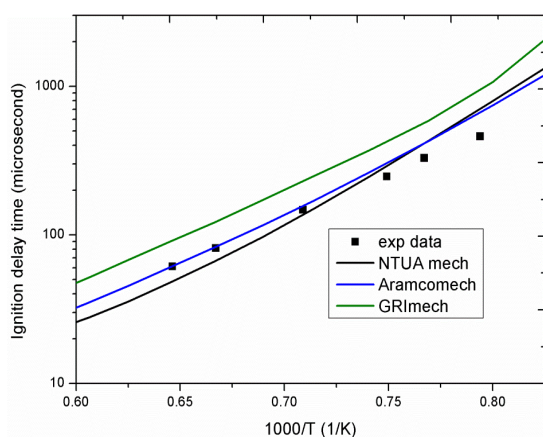
8.3.9 Στοιχειομετρικά Μίγματα Αιθανίου/Υδρογόνου σε Πιέσεις 1,2atm, 4atm και 16 atm

Σύγκριση Διαγραμμάτων E.7, E.8, E.9

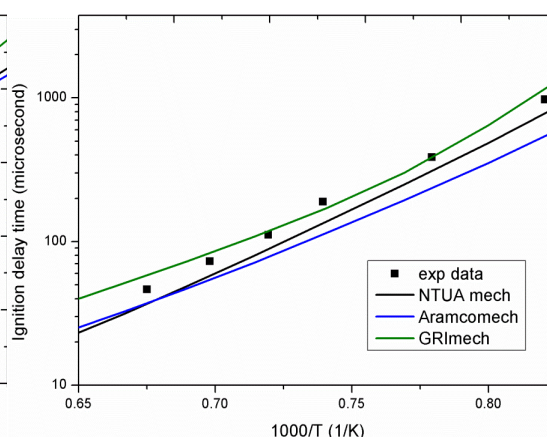
Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης για την καύση μιγμάτων αιθανίου-οξυγόνου, αραιωμένα σε υψηλή συγκέντρωση αργού, με υψηλή προσθήκη υδρογόνου ($X_{H_2}=70\%$). Τα μίγματα μελετήθηκαν για πίεση 1,2 atm, 4 atm και 16 atm. (L. Pan *et al.* 2014).

Η σύσταση τους αναγράφεται στον κάτωθι πίνακα:

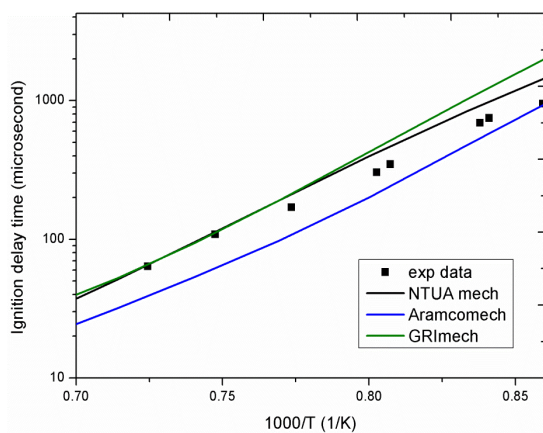
Μίγμα	C2H6(%)	H2(%)	O2(%)	Ar(%)	ϕ	P(atm)
E.7	0,783	1,827	3,653	93,737	1	1,2
E.8	0,783	1,827	3,653	93,737	1	4
E.9	0,783	1,827	3,653	93,737	1	16



E. 7



E. 8

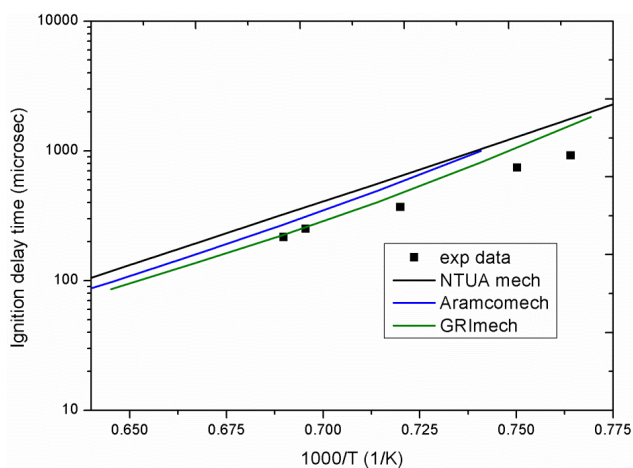


E. 9

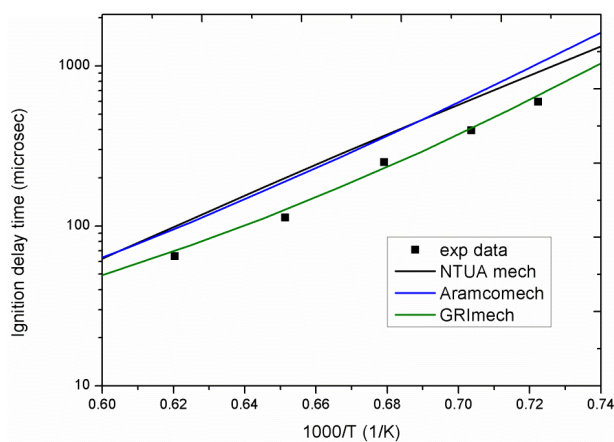
Στα ανωτέρω μίγματα καθίσταται εμφανής η αδυναμία του μηχανισμού NTUA να προβλέψει τις τιμές του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης για υψηλές πιέσεις, γεγονός που οφείλεται στο ότι ο μηχανισμός δεν έχει βελτιστοποιηθεί για αυτό το πεδίο λειτουργίας

8.3.10 Μίγματα Καθαρού Προπανίου ευρισκόμενα σε Ίδιες Συνθήκες Πίεσης

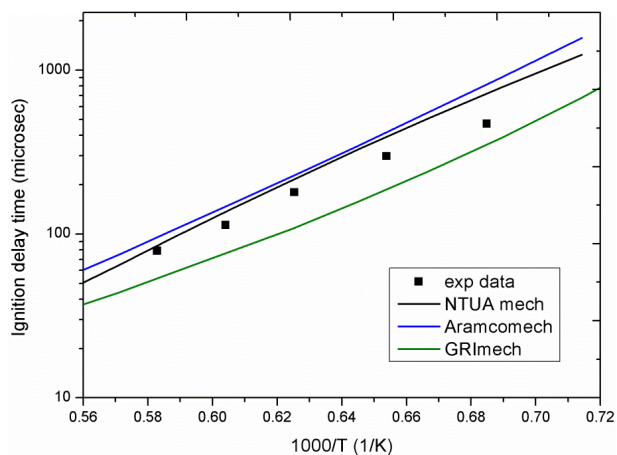
1. $P=1,2 \text{ bar}$



P. 1

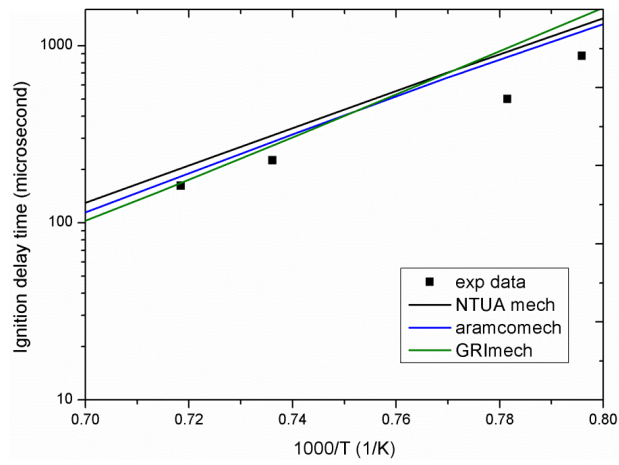


P. 2

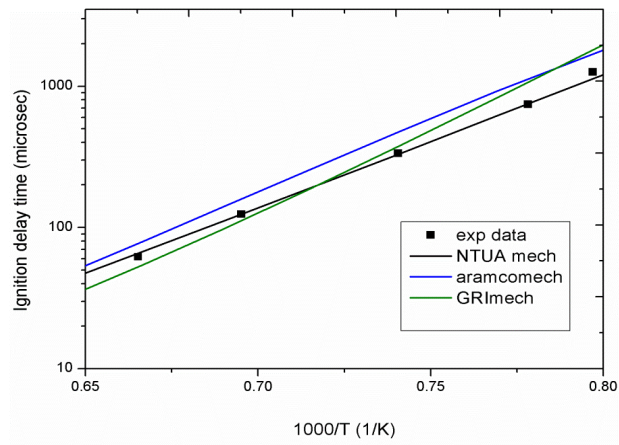


P. 3

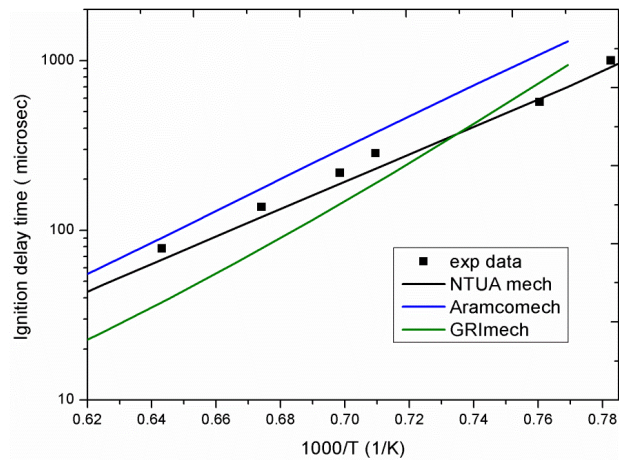
2. $P=10$ bar



P. 4



P. 5



P. 6

Σύγκριση Μιγμάτων P.1,P.2,P.3,P.4,P.5,P.6

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης μιγμάτων καθαρού προπανίου-οξυγόνου, σε υψηλή αραιώση με αργό. Τα εξεταζόμενα μίγματα είναι υποστοιχειομετρικά, στοιχειομετρικά και πλούσια σε καύσιμα, ενώ μελετήθηκαν σε δύο διαφορετικές συνθήκες πίεσης, 1,2 bar και 10 bar (C. Tang *et al.* 2013). Η σύνθεση τους αναγράφεται ως εξής :

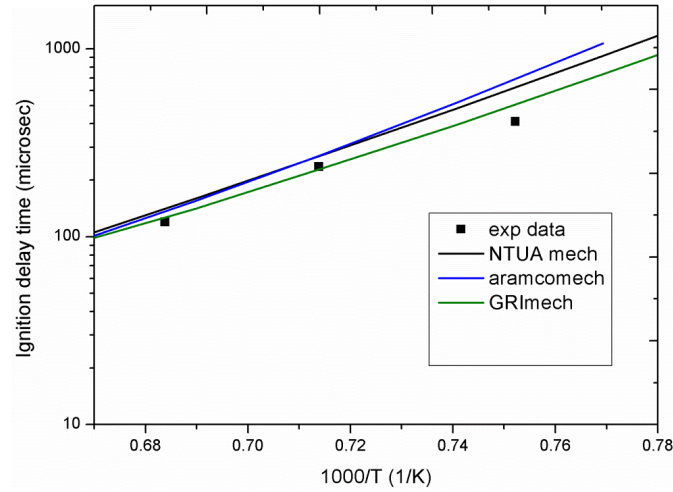
Μίγμα	C3H8(%)	O2(%)	Ar(%)	φ	P(bar)
P.1	0,514	5,142	94,344	0,5	1,2
P.2	1,008	5,038	93,954	1	1,2
P.3	1,937	4,843	93,220	2	1,2
P.4	0,514	5,142	94,344	0,5	10
P.5	1,008	5,038	93,954	1	10
P.6	1,937	4,843	93,220	2	10

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

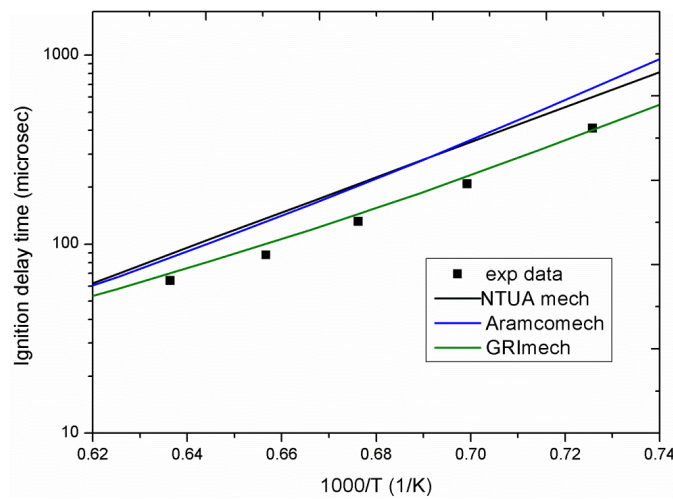
- Στις τρεις πρώτες περιπτώσεις ($p=1,2$ bar) παρατηρείται ότι ο μηχανισμός NTUA υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα και βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με το μηχανισμό Aramco.
- Μεταξύ των δύο αυτών μηχανισμών και τον μηχανισμό GRI παρατηρείται μια απόκλιση η οποία και αλλάζει με την αλλαγή της στοιχειομετρίας. Πιο συγκεκριμένα , ενώ στην περίπτωση του φτωχού μίγματος ($\phi=0,5$) και οι 3 μηχανισμοί συμφωνούν άριστα μεταξύ τους, , η μεταβολή της στοιχειομετρίας σε $\phi=1$ και, τελικά, σε $\phi=2$, δημιουργεί μία απόκλιση που αυξάνεται με την αύξηση του ϕ .
- Αύξηση της στοιχειομετρίας οδηγεί σε αύξηση του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης.
- Η μεταβολή των συνθηκών πίεσης στις οποίες εξετάστηκαν τα μίγματα (από 1,2 bar σε 10 bar) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης κάθε μίγματος.
- Όσον αφορά τη μελέτη των μιγμάτων στα 10 bar, ο μηχανισμός NTUA υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα για $\phi=0,5$, τα προσεγγίζει άριστα σε συνθήκες στοιχειομετρίας, ενώ για πλούσιο μίγμα τα προσεγγίζει σε χαμηλές θερμοκρασίες και τα υποεκτιμά όσο η θερμοκρασία αυξάνεται.
- Στα 10 bar, παρατηρείται ότι και οι τρεις εξεταζόμενοι μηχανισμοί βρίσκονται σε απόλυτη συμφωνία μεταξύ τους για το φτωχό μίγμα, ενώ καθώς η στοιχειομετρία μεταβάλλεται σε $\phi=1$ και , εν τέλει, σε $\phi=2$ αρχίζει κ δημιουργείται απόκλιση μεταξύ τους.

8.3.11 Μίγματα Προπανίου/Υδρογόνου ευρισκόμενα σε Ίδιες Συνθήκες Πίεσης.

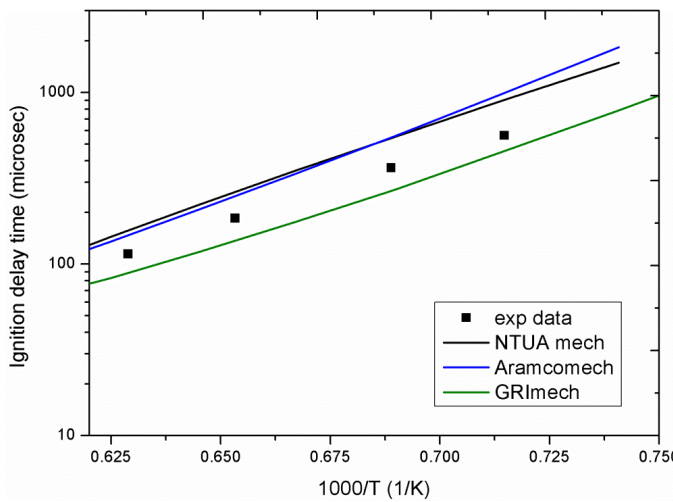
1. $P=1,2 \text{ bar}$



P. 7

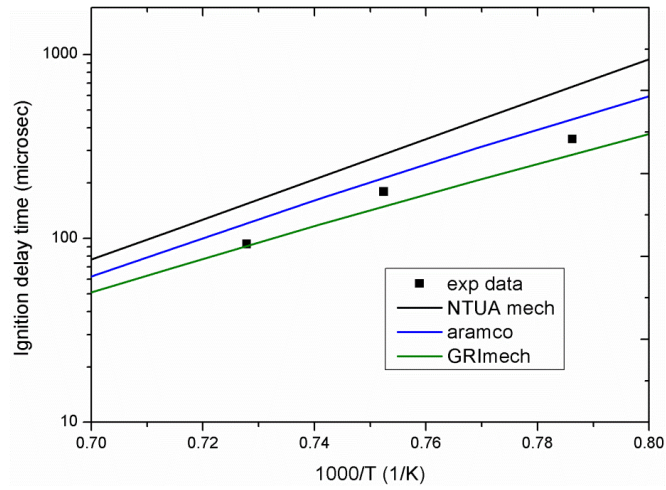


P. 8

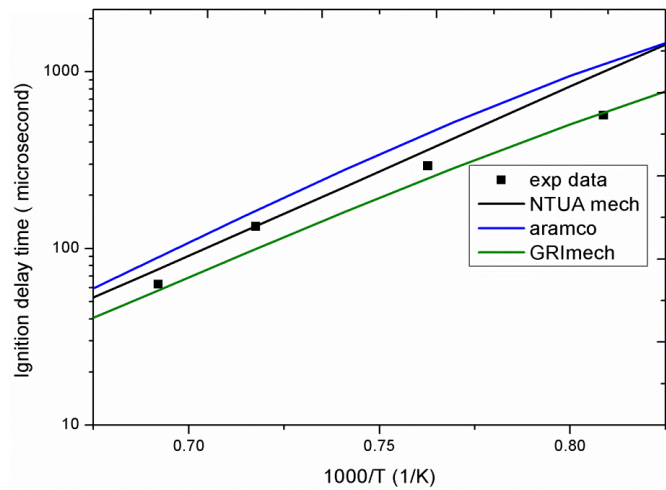


P. 9

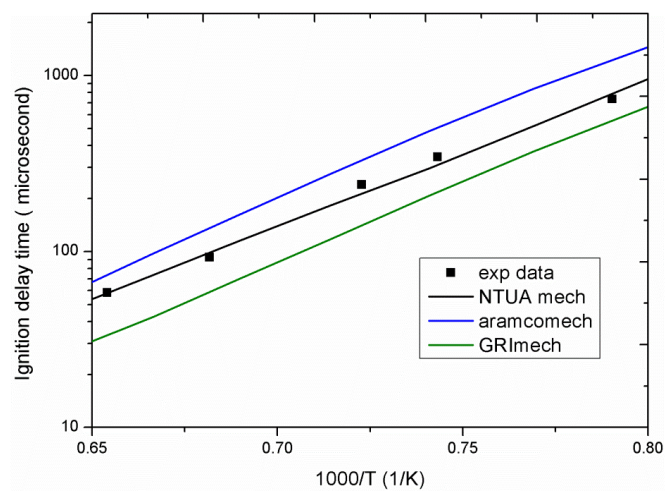
2. $P=10\text{ bar}$



P. 10



P. 11



P. 12

Σύγκριση Μιγμάτων P.7, P.8, P.9, P.10, P.11, P.12

Στην υποπαράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης για την καύση μιγμάτων προπανίου-οξυγόνου, σε υψηλή αραίωση με αργό, με υψηλή προσθήκη υδρογόνου ($X_{H_2}=70\%$). Οι εξεταζόμενες συνθήκες πίεσης είναι 1,2 bar και 10 bar και η μελέτη έγινε για μίγματα φτωχά, στοιχειομετρικά και πλούσια σε καύσιμο (C. Tang *et al.* 2013).

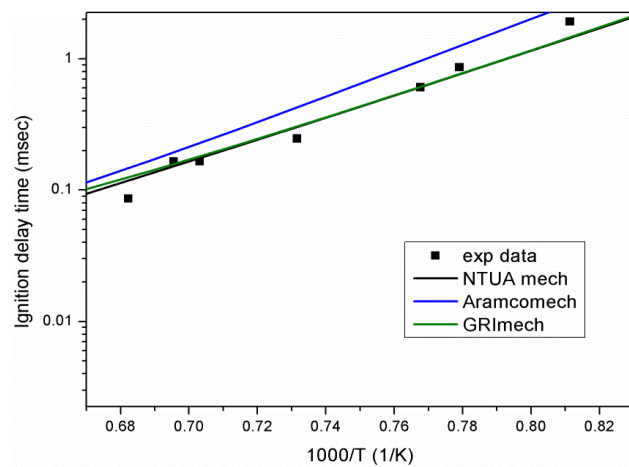
Η σύνθεση τους είναι η ακόλουθη:

Μίγμα	C ₃ H ₈ (%)	H ₂ (%)	O ₂ (%)	Ar(%)	φ	P(bar)
P.7	0,403	0,940	4,968	93,689	0,5	1,2
P.8	0,765	1,784	4,715	92,737	1	1,2
P.9	1,388	3,238	4,279	91,096	2	1,2
P.10	0,403	0,940	4,968	93,689	0,5	10
P.11	0,765	1,784	4,715	92,737	1	10
P.12	1,388	3,238	4,279	91,096	2	10

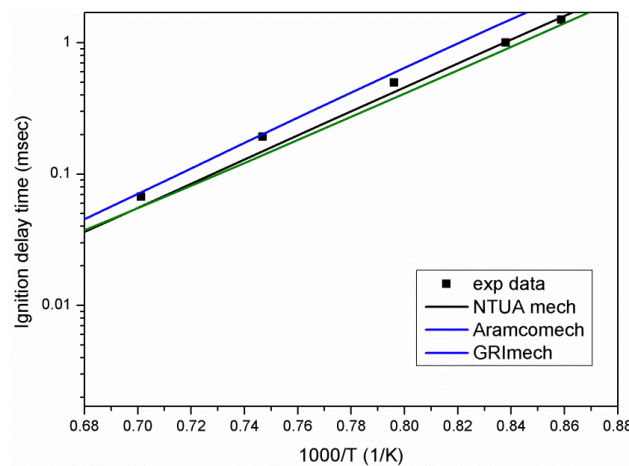
Ανάλυση Αποτελεσμάτων

- Όπως προκύπτει και από τα άνωθι διαγράμματα, στα 1,2 bar ο μηχανισμός NTUA υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα για κάθε διαφορετική στοιχειομετρία, ενώ βρίσκεται σε εξαιρετική συμφωνία με το μηχανισμό Aramco και στις 3 περιπτώσεις ($\phi=0,5$, $\phi=1$, $\phi=2$).
- Μεταβολή της στοιχειομετρίας με διατήρηση σταθερής πίεσης (1,2 bar) έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται μια απόκλιση ανάμεσα στο μηχανισμό GRI και τους υπόλοιπους 2, η οποία και τείνει να αυξάνεται καθώς το μίγμα γίνεται πλούσιο.
- Καθώς η πίεση αυξάνεται στα 10 bar, ο μηχανισμός NTUA εξακολουθεί να υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα για $\phi=0,5$, σε συνθήκες στοιχειομετρίας τα υπερεκτιμά σε χαμηλές θερμοκρασίες και τα προσεγγίζει στις υψηλές, ενώ για πλούσιο σε καύσιμο μίγμα συμφωνεί με ιδανικό τρόπο με αυτά.
- Σε γενικές γραμμές, τα πλούσια μίγματα δίνουν υψηλότερους χρόνους καθυστέρησης ανάφλεξης συγκριτικά με τα υπόλοιπα.
- Η ομοιότητα των χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης των μιγμάτων καθαρού προπανίου, αλλά και αυτών με $X_{H_2}=70\%$, μαρτυρά ότι η ανάφλεξη του μίγματος καυσίμου διέπεται κυρίως από τη χημεία του προπανίου και, ακόμη, μέχρι και 70% προσθήκη υδρογόνου δε μεταβάλλει απαραίτητως την εξάρτηση του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης από το λόγο αντιστοιχίας.

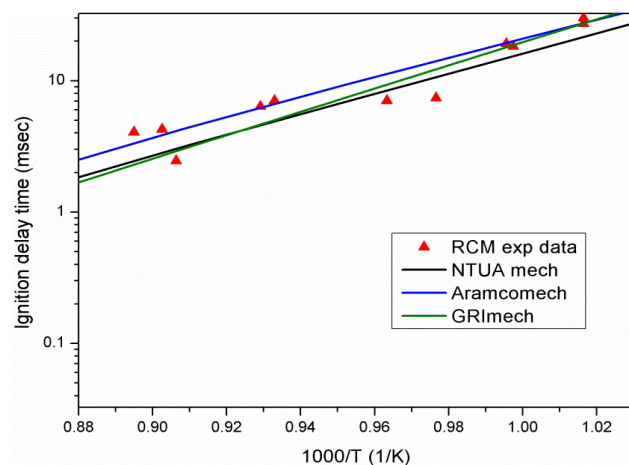
8.3.12 Μίγματα Μεθανίου/Αιθανίου/Προπανίου Ίδια Σύνθεσης και Στοιχειομετρίας



N.G. 1



N.G. 2



N.G. 3

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης για την καύση μιγμάτων που περιέχουν μεθάνιο, αιθάνιο και προπάνιο, αραιωμένα με Αργό. Τα ανωτέρω μίγματα έχουν την ίδια ακριβώς σύνθεση (70%

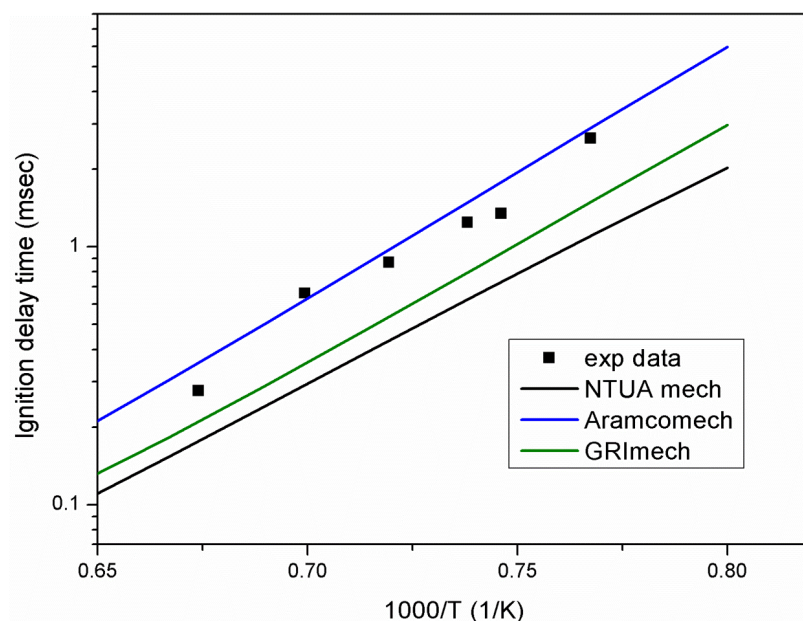
CH₄/15% C₂H₆/ 15% C₂H₆) και είναι υποστοιχειομετρικά ($\phi=0,5$) . Η διαφοροποίηση τους έγκειται στις διαφορετικές συνθήκες πίεσης που εξετάζονται (1, 6,5 , 10 atm), ενώ τα πειραματικά δεδομένα του μίγματος 3 (N.G.3) προέκυψαν από πείραμα σε μηχανή ταχείας συμπίεσης (RCM) σε αντίθεση με τα μίγματα N.G.1 και N.G.2 όπου μελετήθηκαν σε σωλήνα κρουστικού κύματος (ST) (D. Healy *et al.* 2008). Οι συνθήκες που εξετάστηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στον κάτωθι πίνακα:

Μίγμα	CH ₄ (%)	C ₂ H ₆ (%)	C ₃ H ₈ (%)	Ar(%)	O ₂ (%)	ϕ	P(atm)
N.G. 1	2,64	0,57	0,57	76,02	20,21	0,5	1
N.G. 2	2,64	0,57	0,57	76,02	20,21	0,5	6,5
N.G. 3	2,64	0,57	0,57	76,02	20,21	0,5	10

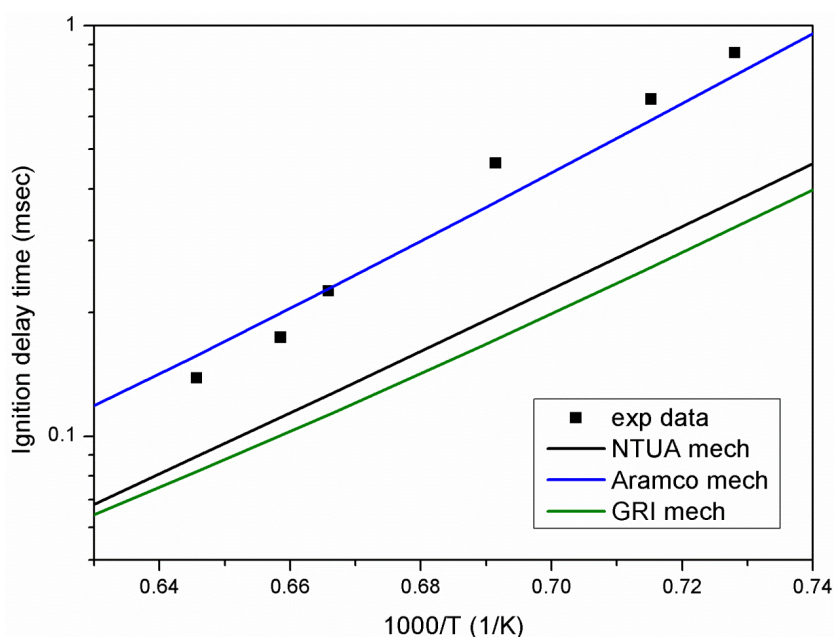
Ανάλυση Αποτελεσμάτων

- Και οι τρεις εξεταζόμενοι μηχανισμοί παρατηρείται ότι συμφωνούν σε πολύ υψηλό βαθμό με τα πειραματικά δεδομένα. Ειδικότερα , οι μηχανισμοί NTUA και GRI συμφωνούν απόλυτα μεταξύ τους για καθεμιά από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, ενώ για τις δύο πρώτες περιπτώσεις (πειραματικά δεδομένα από ST) ο μηχανισμός της Aramco ελαφρώς υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα, με την απόκλιση αυτή να μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- Η αύξηση της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα να γίνεται μεγαλύτερη αντιδραστικότητα μεταξύ των αντιδρώντων , συνεπώς ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης μειώνεται, όπως φαίνεται και από τα μίγματα N.G.1 και N.G.2 και τη μεταβολή της πίεσης τους από 1 σε 6,5 atm.
- Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται από τα άνωθι διαγράμματα ότι η αύξηση της πίεσης για τα δύο πρώτα μίγματα έχει ως αποτέλεσμα η αντιδραστικότητα να ξεκινάει στους 1175 K για πίεση 6,5 atm, έναντι των 1230 K στη 1 atm. Από την άλλη, για πίεση 10 atm και σε περιβάλλον RCM, η αντιδραστικότητα ξεκινάει να λαμβάνει τόπο στους 975 K.

8.3.13 Μίγματα Μεθανίου/Αιθανίου/Προπανίου Διαφορετικής Σύνθεσης και Στοιχειομετρίας



N.G. 4



N.G. 5

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης δύο μιγμάτων διαφορετικής σύνθεσης και στοιχειομετρίας, αραιωμένα με Αργό, με πίεση που όμως δε μεταβάλλεται σημαντικά (1,2 και 1,1 atm). Η αναλογία των μιγμάτων είναι η ακόλουθη : το μίγμα NG4 έχει 90% CH₄/ 6,6% C₂H₆/ 3,3% C₃H₈, ενώ το NG5 διαμορφώνεται ως 70% CH₄/ 20% C₂H₆/ 10% C₃H₈ (D. Healy *et al.* 2008). Η ακριβή τους σύνθεση φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Μίγμα	CH ₄ (%)	C ₂ H ₆ (%)	C ₃ H ₈ (%)	Ar(%)	O ₂ (%)	φ	P(atm)
N.G. 4	7,84	0,58	0,29	72,11	1,917	1	1,2
N.G. 5	9,74	2,78	1,39	68,01	1,808	2	1,1

Ανάλυση Αποτελεσμάτων

- Και στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις ο μηχανισμός NTUA υποεκτιμά το χρόνο καθυστέρησης ανάφλεξης των πειραματικών δεδομένων, ενώ βρίσκεται σε πολύ καλή συμφωνία με το μηχανισμό GRI. Παρατηρείται ότι στο μίγμα N.G.4 ο μηχανισμός NTUA είναι πιο γρήγορος χρονικά από τον GRI, ενώ στο μίγμα N.G.5 έπεται αυτού. Αυτό θα μπορούσε να εξηγηθεί από την ευαισθησία του συγκεκριμένου μηχανισμού ως προς τη στοιχειομετρία, καθώς έχουμε μεταβολή από $\phi=1$ σε $\phi=2$, ενώ η πτώση πίεσης είναι σχεδόν αμελητέα (από 1,2 σε 1,1 atm).
- Ο μηχανισμός της Aramco βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.
- Καθώς το μίγμα γίνεται πλούσιο (μεταβολή στοιχειομετρίας από $\phi=1$ σε $\phi=2$), παρατηρούμε ότι μειώνεται ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης.
- Σε χαμηλές θερμοκρασίες, το πλούσιο μίγμα αναφλέγεται πιο εύκολα, αλλά υπολογίζεται ότι ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης θα παραταθεί κατά ένα μικρό ποσοστό σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Κεφάλαιο 9

Συμπεράσματα

9.1 Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης, που αποτελεί μια σημαντική και κρίσιμη παράμετρο για την καύση διαφόρων καυσίμων σε μηχανές εσωτερικής καύσης και αεριοστροβίλους. Τα μίγματα που εξετάστηκαν περιείχαν μεθάνιο, αιθάνιο και προπάνιο, τρία δηλαδή από τα βασικότερα συστατικά του φυσικού αερίου. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η καύση μιγμάτων καθαρού μεθανίου, καθαρού αιθανίου και καθαρού προπανίου, καθώς επίσης και μίγματα αυτών με υδρογόνο. Η μελέτη των μιγμάτων υδρογονανθράκων/υδρογόνου έγινε διότι το υδρογόνο αποτελεί ένα δραστηκότατο στοιχείο, που μπορεί να αλλάξει σημαντικά τη χημεία της καύσης. Η επιλογή του υδρογόνου έγινε καθώς αναφέρεται συχνά και στη βιβλιογραφία ως μελλοντικό εναλλακτικό καύσιμο.

Η μελέτη της χημικής κινητικής των μιγμάτων αυτών έγινε με τη χρήση τριών λεπτομερών μηχανισμών χημικής κινητικής. Αυτοί, παρουσιάζονται παρακάτω:

- Μηχανισμός C1-C6 HMCS NTUA

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε ο επικυρωμένος λεπτομερής μηχανισμός χημικής κινητικής με C1-C6.HMCS.NTUA του εργαστηρίου ετερογενών μιγμάτων και συστημάτων καύσης. Ο μηχανισμός δημιουργήθηκε από τους Lindstedt and Skevis (1997, 2000) και αναπτύχθηκε περαιτέρω στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Γ. Βουρλιωτάκη (2012). Το μοντέλο αυτό, το οποίο έχει τύχει αποδοχής στην διεθνή βιβλιογραφία, έχει επικυρωθεί βάσει μετρήσεων στρωτής ταχύτητας φλόγας, χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης καθώς και για την αναπαραγωγή των παραγόμενων χημικών ενώσεων σε φλόγες προανάμιξης. Η παρούσα έκδοση του μηχανισμού αποτελείται από 740 στοιχειώδεις, αντιστρεπτές αντιδράσεις ανάμεσα σε 142 χημικά είδη. Το μοντέλο έχει αναπτυχθεί με συστηματικό τρόπο, ακολουθώντας την ιεραρχική δομή των μηχανισμών, και έχει επικυρωθεί ενάντια σε πειραματικά δεδομένα από διαφορετικά καύσιμα (G. Vourliotakis *et al.* 2012, 2015)

- Μηχανισμός GRI Mech 3.0

Ο μηχανισμός GRI-Mech 3.0 (Smith *et al.* 1995) αποτελεί ένα βελτιστοποιημένο μηχανισμό σχεδιασμένο για τη μοντελοποίηση της καύσης του φυσικού αερίου. Η διαδικασία βελτιστοποίησης του έναντι της παλαιάς έκδοσης 2.11 έχει σχεδιαστεί για να παρέχει βασικές κινητικές αρχές, οι οποίες με τη σειρά τους βοηθούν στην

καλύτερη προβλεψιμότητα μοντελοποίησης των βασικών ιδιοτήτων της καύσης. Βελτιώσεις έχουν γίνει στις κατηγορίες της επικαιροποίησης της κινητικής με σύγχρονα βιβλιογραφικά αποτελέσματα, συμπεριλαμβανομένων μερικών νέων και βελτιωμένων πειραμάτων που στόχο έχουν τη βελτιστοποίηση και την επέκταση του μηχανισμού και την εξέταση της ευαισθησίας στη θερμοδυναμική.

Επειδή το φυσικό αέριο περιέχει προπάνιο (και μερικούς ανώτερους υδρογονάνθρακες που μπορούν περίπου να αντιπροσωπευθούν από το προπάνιο) , στο μηχανισμό συμπεριλαμβάνεται ένα ελάχιστο σύνολο δεδομένων που περιγράφει την κινητική του και χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση των ειδών αυτών.

Ο συγκεκριμένος μηχανισμός περιέχει 325 αντιδράσεις και 53 είδη (συμπεριλαμβανομένου και του Ar).

- Μηχανισμός AramcoMech 1.3

Ο λεπτομερής μηχανισμός χημικής κινητικής AramcoMech (Metcalf *et al.* 2013) αναπτύχθηκε για την περιγραφή της καύσης μικρών υδρογονανθράκων και οξυγονούχων υδρογονανθράκων. Οι τιμές για τους ρυθμούς αντίδρασης των διαφόρων αντιδράσεων επιλέχθηκαν με κριτική αξιολόγηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και χωρίς να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση σε μεθόδους βελτιστοποίησης. Ο μηχανισμός αυτός έχει αξιολογηθεί εναντίον σε ένα ευρύ φάσμα πειραματικών δεδομένων με ποικίλες αρχικές συνθήκες και σε πληθώρα πειραματικών εφαρμογών, όπως αντιδραστήρες εμβολικής ροής, σωλήνες κρουστικού κύματος καθώς και σε φλόγες. Ο μηχανισμός περιέχει έγκυρους ρυθμούς αντίδρασης για κορεσμένους, ακόρεστους καθώς και οξυγονούχους υδρογονάνθρακες.

9.2 Κύρια συμπεράσματα της εργασίας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια συνοπτικά συμπεράσματα της εργασίας.

- ❖ Στα μίγματα καθαρού μεθανίου ο μηχανισμός NTUA (HMCS NTUA) υποεκτιμά τον χρόνο καθυστέρησης ανάφλεξης, ενώ οι μηχανισμοί, AramcoMech και GRI Mech, βρίσκονται σε καλύτερη συμφωνία, τόσο με τα πειραματικά δεδομένα, όσο και μεταξύ τους.
- ❖ Σε ατμοσφαιρικές συνθήκες ο μηχανισμός NTUA προσεγγίζει σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά δεδομένα στις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ τείνει να τα υπερεκτιμά για χαμηλές θερμοκρασίες
- ❖ Με την αύξηση της πίεσης και την αύξηση της περιεκτικότητας του μίγματος σε υδρογόνο παρατηρείται ότι ο χρόνος καθυστέρησης ανάφλεξης μειώνεται αισθητά, γεγονός που μπορεί να ερμηνευθεί από την υψηλή αντιδραστικότητα που έχει το υδρογόνο.

- ❖ Ο μηχανισμός NTUA παρουσιάζει εξαιρετική συμφωνία πειραματικών δεδομένων και υπολογιστικών προλέξεων για υπο-στοιχειομετρικά, στοιχειομετρικά και πλούσια σε καύσιμο μίγματα ανεξαρτήτως του διαλύτη
- ❖ Σε γενικές γραμμές ο μηχανισμός NTUA υπερεκτιμά τα πειραματικά δεδομένα μιγμάτων Αιθανίου και βρίσκεται σε συμφωνία με το μηχανισμό Aramco. Εν προκειμένω, σε χαμηλές πιέσεις ο μηχανισμός προσεγγίζει τα δεδομένα στις υψηλές θερμοκρασίες ενώ έπεται χρονικά αυτών για της χαμηλές. Στο πλούσιο σε καύσιμο μίγμα παρουσιάζεται μεγάλη χρονικά απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα, που θα μπορούσε να ερμηνευθεί από την ευαισθησία του συγκεκριμένου μηχανισμού ως προς τη στοιχειομετρία. Τέλος η αύξηση του λόγου αντιστοιχίας φ έχει ως αποτέλεσμα να αναφέρεται πιο αργά το μίγμα, δηλαδή μεγαλύτερο χρόνο καθυστέρησης ανάφλεξης.
- ❖ Η ομοιότητα των χρόνων καθυστέρησης ανάφλεξης των μιγμάτων καθαρού προπανίου, αλλά και αυτών με $X_{H_2}=70\%$, μαρτυρά ότι η ανάφλεξη του μίγματος καυσίμου διέπεται κυρίως από τη χημεία του προπανίου και ,ακόμη, μέχρι και 70% προσθήκη υδρογόνου δε μεταβάλλει απαραίτητως την εξάρτηση του χρόνου καθυστέρησης ανάφλεξης από το λόγο αντιστοιχίας.
- ❖ Η χρήση λεπτομερών μηχανισμών χημικής κινητικής είναι αναγκαία για την διεξαγωγή αξιόπιστων μελετών εναλλαξιμότητας καυσίμων σε πρακτικές εφαρμογές (αεριοστροβίλοι και MEK).

9.3 Προτάσεις μελλοντικής εργασίας

Παρακάτω περιγράφονται κάποιες γενικές κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα θέματα που διερευνήθηκαν στην παρούσα εργασία

- ❖ Στην κατεύθυνση της περαιτέρω ανάπτυξης του λεπτομερούς μηχανισμού χημικής κινητικής NTUA, μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση του συστήματος H_2/O_2 , προκειμένου ο μηχανισμός να μοντελοποιεί επαρκώς τα πειραματικά δεδομένα από αντιδραστήρες υδρογόνου.
- ❖ Στην κατεύθυνση της αξιολόγησης λεπτομερών μοντέλων χημικής κινητικής, μπορεί να γίνει ανάπτυξη μεθοδολογιών και εργαλείων για τη σύγκριση διαφορετικών μηχανισμών χημικής κινητικής στο ίδιο σύνολο πειραματικών δεδομένων και με το ίδιο επίπεδο αριθμητικής ακρίβειας.

10. Βιβλιογραφικές αναφορές

- S. O. Akansu *et al.* Internal Combustion Engines fueled by Natural Gas – hydrogen mixtures *International Journal of Hydrogen Energy* 29 (2004) 1527-1539
- K. Bhandari *et al.* Performance and emissions of natural gas fueled internal combustion engine: A review *J Sci Ind Res India* 64 (2005) 333-338
- D.F. Davidson *et al.* Interpreting Shock Tube Ignition Data *Int J Chem* 36 (2004) 510–523
- N. Donohoe *et al.* Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures *Combust and Flame* 161 (6) (2014) 1432–1443
- D. Healy *et al.* Methane/ethane/propane mixture oxidation at high pressures and at high, intermediate and low temperatures *Combust and Flame* 155 (2008) 441-448
- R. Jones *et al.* Addressing Gas Turbine Fuel Flexibility *GE Energy* GER4601(2011) Report
- A. Mariani *et al.* (2012) A Review of Hydrogen-Natural Gas Blend Fuels in Internal Combustion Engines, Fossil Fuel and the Environment, Dr. Shahriar Khan (Ed.), ISBN: 978-953-51-0277-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/fossil-fuel-and-the-environment/a-review-of-use-of-hcng-fuels-in-internal-combustion-engines>
- W. K. Metcalfe *et al.* A Hierarchical and Comparative Kinetic Modeling Study of C1 – C2 Hydrocarbon and Oxygenated Fuels *Int J Chem* 45 (2013) 638–675
- P. Nag *et al.* Fuel Flexibility for Siemens' Gas Turbines / 30th Energy Buyers' Conference (2010)
- K. Nanthagopal *et al.* HYDROGEN ENRICHED COMPRESSED NATURAL GAS – A FUTURISTIC FUEL FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES *Thermal Science* 15 (2011) 1145 - 1154

- C.H. Osorio *et al.* Effect of CF₃Br on C1-C3 ignition and laminar flame speed: Numerical and experimental evaluation *Combust and Flame* 160 (2013) 1044-1059
- L. Pan *et al.* Shock tube and kinetic study of C₂H₆/H₂/O₂/Ar mixtures at elevated pressures *Int J Hydrogen Energ* 39 (2014) 6024-6033
- C. Park *et al.* The influences of hydrogen on the performance and emission characteristics of a heavy duty natural gas engine *Int J Hydrogen Energ* (2011) 3739–3745
- C. J. Sung *et al.* Using rapid compression machines for chemical kinetics studies *Progress In Energy and Combustion Science* 44 (2014) 1-18
- C. Tang *et al.* Further study on the ignition delay times of propane-hydrogen-oxygen-argon mixtures: Effect of equivalence ratio *Combust and Flame* 160 (2013) 2283-2290
- G. Vourliotakis *et al.* Combustion chemistry aspects of alternative fuels reforming for high-temperature fuel cell applications *Int J Hydrogen Energ* 37 (2012) 16649-16662
- G. Vourliotakis *et al.* Detailed kinetic modelling of non-catalytic ethanol reforming for SOFC applications *Int. J. Hydrogen Energy* 34 (2009) 7626-7637
- G. Vourliotakis *et al.* A detailed kinetic modeling study of benzene oxidation and combustion in premixed flames and ideal reactors *Energ Fuel* 25 (2011) 1950-1963
- G. Vourliotakis *et al.* Some aspects of combustion chemistry of C1-C2 oxygenated fuels in low pressure premixed flames *Proc Combust Inst* 35 (2015) 437–445
- C. K. Westbrook *et al.* Chemical Kinetic Modeling of Hydrocarbon Combustion *Prog. Energ Combust* 10 (1984) 1-57
- J. Zhang *et al.* Comparative Study on Ignition Delay Times of C1-C4 Alkanes *Energy Fuel* 27 (6) (2013) 3480-3487

- W. Zeng *et al.* Experimental and modeling study on effects of N₂ and CO₂ on ignition characteristics of methane/air mixture *J Adv Res.* 6 (2) (2015) 189-201

