

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Εργαστήριο ετερογενών μιγματών και σύστηματών καύσης

Πειραματική διερεύνηση φαινομένων καύσης σε πρότυπο πορώδη καυστήρα με εφαρμογή τεχνικής Schlieren και ανάλυσης καυσαερίων

Διπλωματική Εργάσια

ΚΑΤΟΥΦΑ ΜΑΓΔΑΛΗΝΗ

Επιβλέπουσα: ΦΟΥΝΤΗ ΜΑΡΙΑ

ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Μαρία Φούντη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου τη συγκεκριμένη εργασία. Η ολοκλήρωση αυτού του εγχειρήματος δε θα ήταν δυνατή χωρίς την πολύτιμη συμβολή του Καθηγητή Αντώνη Χατζηαποστόλου και του Δρ. Χρήστου Κεραμιώτη. Τους ευχαριστώ θερμά για την άριστη συνεργασία, την αμέριστη υποστήριξή τους και το προσωπικό ενδιαφέρον που έδειξαν.

Επίσης, δεν μπορώ να παραλείψω τους φίλους και συμφοιτητές μου, «ευγενική χορηγία» των οποίων υπήρξε ο φωτογραφικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες τις εργασίας. Συγκεκριμένα, ευχαριστώ το Μάκη Λουβερδή ο οποίος μας παρείχε επαγγελματικό εξοπλισμό και καταλυτικές συμβουλές και τους Θεοδώρα Γαβρά και Φάνη Βαλλιανάτο που μου εμπιστεύθηκαν τις φωτογραφικές τους μηχανές.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την συμπαράσταση και πολύτιμη βοήθεια σε κάθε μου βήμα.

Περίληψη

Η ανάπτυξη και εφαρμογή πειραματικών διαγνωστικών μεθόδων στα συστήματα καύσης είναι αναγκαία για τη βελτιστοποίηση των υπαρχόντων και το σχεδιασμό νέων καινοτόμων τεχνολογιών καύσης. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη και εφαρμογή της τεχνικής Schlieren και του συστήματος συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων σε πρότυπο πορώδη καυστήρα ορθογωνικής διατομής και δύο στρωμάτων. Συγκεκριμένα, κατασκευάστηκαν δύο είδη διατάξεων Schlieren, ένα με φακούς και ένα τύπου Ζ με κάτοπτρα, τα οποία εφαρμόστηκαν αρχικά σε απλούστερα συστήματα καύσης. Έγινε απεικόνιση μιας απλής φλόγας διάχυσης, στη συνέχεια της φλόγας από έναν καυστήρα Bunsen και τέλος, της φλόγας του πορώδους καυστήρα αφού είχε αφαιρεθεί το δεύτερο στρώμα κεραμικού υλικού. Η μέθοδος αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτική καθώς τα αποτελέσματα παρείγαν σημαντικές ποιοτικές πληροφορίες για τη δομή κάθε φλόγας. Στο δεύτερο σκέλος της εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις θερμοκρασιών, με χρήση θερμοστοιχείου και θερμοκάμερας, και εκπομπών καυσαερίων, με το σύστημα συνεχούς ανάλυσης αερίων, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του πορώδους καυστήρα κατά τη λειτουργία του με αέρια συμβατικά και εναλλακτικά καύσιμα, που αποτελούσαν μίγματα CH₄, CO, H₂, CO₂ σε διαφορετικές αναλογίες. Η μελέτη παραμετροποιήθηκε με το λόγο αέρα καύσης, για τιμές $1.1 \le \lambda \le 1.8$, και το θερμικό φορτίο σε εύρος 200-800 kW/m². Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίστηκε η περιοχή ευσταθούς λειτουργίας του καυστήρα και εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης CO₂ στο ρεύμα καυσίμου καθώς και η παρουσία των συστατικών CO/ H2 στο καύσιμο μίγμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο καυστήρας παράγει πολύ γαμηλές εκπομπές ΝΟχ και CO για οποιοδήποτε μίγμα καυσίμων και έχει αυξημένο βαθμό απόδοσης ακτινοβολίας.

Abstract

The development and implementation of experimental diagnostic techniques on combustion processes are necessary for the optimization of the existing combustion technologies and the design of new innovative ones. The present thesis aims at the development and implementation of a Schlieren system and a continuous gas analysis system on a porous burner of a two layer, flat, rectangular geometry. Specifically, two different Schlieren setups were constructed: a lens type and a Z-type 2-mirror system. These setups were implemented in different combustion systems of incrising complexity. A simple diffusion flame, a premixed flame from a Bunsen burner and, finally, a flame from a porous burner, after the second porous matrix had been removed, were illustrated. The Schlieren method was proved extremely efficient given that the results showed significant qualitative information on the flame structure. In the second part of the thesis, measurements of exhaust concentrations were realized using the continuous gas analysis system. In addition, temperature rates were obtained by a thermocouple and a thermal camera. These measurements were taken when the porous burner operated with conventional and alternative fuels which constituded mixtures of CH₄, CO, H₂, CO₂ in different ratios. This survey was realized for different air-fuel ratios, for rates $1.1 \le \lambda \le 1.8$, and different thermal loads ranging from 200 to 800 kW/m². In this way, the stability range of the porous burner was defined. Furthermore, the impact of CO₂ addition on the fuel stream and the presence of CO/ H₂ in the fuel mixture were observed. The results indicated that the burner exhibits very low NOx and CO emissions in each fuel mixture and presents increased radiation efficiency.

iv

Περιεχόμενα

Κατάλογος εικόνων	3
Κατάλογος διαγραμμάτων	5
Κατάλογος πινάκων	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή	8
1.1 Καύση – Καυστήρες - Φλόγες	8
1.2 Καύσιμα	10
1.3 Διαγνωστικές μέθοδοι φαινομένων καύσης	15
1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η μέθοδος Schlieren	
Εισαγωγή	
2.1 Η διάδοση του φωτός και το φαινόμενο της διάθλασης	19
2.2 Φακοί και Κάτοπτρα	21
2.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά των φακών	21
2.2.2 Σχηματισμός πραγματικού και φανταστικού ειδώλου από φακούς	23
2.2.3 Σφάλματα φακών	24
2.2.4 Βασικά χαρακτηριστικά των κατόπτρων	26
2.2.5 Σχηματισμός ειδώλου στα κοίλα κάτοπτρα	27
2.2.6 Σφάλματα κατόπτρων	
2.3 Διαφορές μεταξύ σκιαγραφίας και τεχνικής Schlieren	29
2.4 Βασικές διατάξεις Schlieren	31
2.4.1 Σύστημα Schlieren με φακούς και σημειακή πηγή φωτός	31
2.4.2 Σύστημα Schlieren με φακούς και εκτεταμένη πηγή φωτός	33
2.4.3 Σύστημα Schlieren τύπου Ζ με 2 κάτοπτρα	37
2.4.4 Συστήματα Schlieren με χρήση άλλων πηγών φωτός	

2.5 Εφαρμογές	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανάλυση καυσαερίων	41
Εισαγωγή	41
3.1 Καυσαέρια	41
3.2 Περιγραφή συστήματος συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων (continuous gas analysis-CGA)	42
3.2.1 Ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα CGA	43
3.2.1.1 Φασματοσκοπικοί ανιχνευτές χωρίς διασπορά	44
3.2.1.2 Ηλεκτροχημική ανίχνευση	47
3.3 Σύνοψη	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογή συστήματος Schlieren	49
Εισαγωγή	49
4.1 Διαδικασία κατασκευής συστήματος Schlieren με φακούς	49
4.1.1 Διαδικασία ευθυγράμμισης	51
4.1.2 Ρύθμιση των αποστάσεων	51
4.1.3 Τοποθέτηση της ακμής του μαχαιριού	53
4.1.4 Διαδικασία λήψης φωτογραφίας	54
4.2 Διαδικασία κατασκευής συστήματος Schlieren τύπου Z με κάτοπτρα	55
4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων	56
4.3.1 Σύστημα τύπου Z με κάτοπτρα διαμέτρου 6'	57
4.3.2 Σύστημα τύπου Z με κάτοπτρα διαμέτρου 8΄	60
4.3.3 Σύστημα Schlieren με φακούς	64
4.4 Συμπεράσματα	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Χαρακτηρισμός πορώδους καυστήρα με χρήση της μεθόδου CGA	.73
Εισαγωγή	73
5.1 Πειραματική διάταξη	74
5.1.1 Πορώδης καυστήρας	75
5.1.2 Θερμοστοιχείο	78
5.1.3 Θερμοκάμερα	79
5.1.4 Ψηφιακά παροχόμετρα (digital mass flow controller-MFC)	81
5.1.5 Αναλυτής καυσαερίων	81
5.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και Επεξεργασία μετρήσεων	82
5.3 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	84
5.3.1 Αποτελέσματα για το καύσιμο Α	85

5.3.2 Αποτελέσματα για το καύσιμο Β	92
5.3.3 Σύγκριση καυσίμων Α και Β	98
5.3.4 Σύγκριση διαφορετικών καυσίμων ως προς το βαθμό απόδοσης ακτιν	νοβολίας
	106
5.4 Συμπεράσματα	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα	109
Βιβλιογραφία	111

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Φωτογραφία από διάταξη Schlieren του καθηγητή Hubert Schardin (1950).
Απεικονίζεται μια σφαίρα και η φλόγα από δύο κεριά19
Εικόνα 2. Εκτροπή φωτεινής ακτίνας κατά τη διέλευσή της μέσα από ανομοιογενείς
περιοχές του μέσου διάδοσης20
Εικόνα 3. Εκτροπή μιας ακτίνας φωτός κατά τη διέλευσή της από ένα μέσο σε ένα
άλλο με διαφορετκό δείκτη διάθλασης21
Εικόνα 4. Διατάξεις πρισμάτων που προσομοιώνουν τη λειτουργία των φακών:
(α) Συγκλίνων, (β) Αποκλίνων [21]
Εικόνα 5. Οι δυο βασικοί τύποι φακών: (α) συγκλίνων (β) αποκλίνων. Με Ε
συμβολίζεται η κύρια εστία και f η εστιακή απόσταση [21]22
Εικόνα 6. Γραφικός προσδιορισμός της θέσης και του μεγέθους ειδώλου24
Εικόνα 7. Σφαιρική εκτροπή [22]25
Εικόνα 8. Χρωματικό σφάλμα25
Εικόνα 9. Αχρωματικός διπλός φακός26
Εικόνα 10. Παράλληλη δέσμη φωτός προσπίπτει σε σφαιρικό κοίλο και σφαρικό
κυρτό κάτοπτρο αντίστοιχα [20]26
Εικόνα 11: Σχηματισμός πραγματικού και φανταστικού ειδώλου αντίστοιχα ενός
σημειακού αντικειμένου σε κοίλα κάτοπτρα [20]27
Εικόνα 12: Σχηματισμός ειδώλου σημειακού αντικειμένου εκτός του κυρίου άξονα
του κατόπτρου [20]
Εικόνα 13: Σχηματισμός ειδώλου ενός αντικειμένου με πραγματικές διαστάσεις [20]
Εικόνα 14: Σχηματική αναπαράσταση απλής διάταξης άμεσης σκιαγραφίας29
Εικόνα 15: Σχηματική αναπαράσταση τυπικής διάταξης Schlieren με σημειακή πηγή.

Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση απλοποιημένου συστήματος Schlieren με
σημειακή πηγή φωτός [15]
Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση απλοποιημένου συστήματος Schlieren με
εκτεταμένη πηγή φωτός [15]
Εικόνα 18:Σχηματική αναπαράσταση του επιπέδου της λεπίδας του μαχαιριού. Το
ορθογώνιο μήκους b και ύψους h παριστάνει το «σύνθετο» είδωλο της πηγής, το
οποίο αποκόπτεται από την ακμή του μαγαιριού, αφήνοντας ένα ύψος α ασκίαστο.
Εξαιτίας της διάθλασης σε κάποιο σημείο του αντικειμένου Schlieren, ένα ασθενές
στοιχειώδες είδωλο της πηγής μετατοπίζεται προς τα πάνω και προς τα δεξιά και
αποκόπτεται από την ακμή αφήνοντας ασκίαστο ένα τμήμα ύψους $\alpha + \Delta \alpha$ [15]35
Εικόνα 19. Ολοκλησωμένο σύστημα Schlieren με διπλούς φακούς που οδηγεί την
$ε_{\rm r}$ εικόνα απευθείας στο εστιακό επίπεδο μιας φωτονοαφικής μηνανής [15] 36
Eικόνα 20: Διάταξη Schlieren τύπου Z [15] 37
Eucova 20: Εμαναξή Semicron τοπού Σ [19]. Εικόνα 21: Θεομότητα που εκπέμπει το ανθοώπινο σώμα [15] 39
Εικόνα 21: Οθρμοτητα που εκπεμπεί το ανορωπινο σωμα [19]
συνκεκοιμένη φωτονοαφία Schlieren [15] ένει νοησιμοποιηθεί σε πολλά
επιστημονικά άρθοα που αναφέρονται σε επιδημίες
$F_{\rm IK}$ όνα 23. Φωτογοαφίες Schlieren που απεικονίζουν τη θεομότητα που εκπέμπει ένα
β_{Source} β_{Source
$F_{\rm LK}$ δυα 24. Κωνικά βλήματα διαφορετικής γωνίας εκτρξεύονται με υπεριγητική
$T_{\rm regularized}$
F_{μ} μεσά σε ευψλεκτο αεριο μιγμα προκαλώντας εκρηζη[50]40
Eucova 25. On tikonotijoji akouotikou neutou pe tij μ eutou Seimeren [41]40 Eucova 26. Atábasa precommunoù koluaras kaŭsans asolop ulouaras, ulora se
Είκονα 20. Διαθοσή υλερηχητικου κυματός καθόης αερίου μιγματός, μεσά σε 40
$F_{\rm uc}$ διαθοχικά εμποθία [40]40 Ευρόμα 27 Αμάδοση του μετόπου της αλόγας μετά από άκοη τη σε combustion homb
Ω_1 ($\varphi = \pi \varphi \varphi = \varphi $
$\int \int du $
$F_{\rm rec}$
Eucova 28. Movozpopatiki aktivopozia zposnitici os ostypu obolac, $hazooc a \dots 44$
Eucova 29. Zymatiki avalupuotaon μ iag tohtiki gotatache NDIK [45]40 Eucova 20. Súgranua Schlieren ug agroue got regaristika gro sovagrado 50.
Eucova 30. Zbotníhu Senneren ne gukou π 00 kurackebaotníke oto epydotního30 Eucóva 21. Doobol π zov vývazoc zov lavazňog záve zzrv graví zov varajov [15]
E κονά 51. Προρολή του νηματός του λαμλτήρα λάνω στην ακμή του μαχαιριου.[15]
Eucour 22: A survé service restriction to size 3 and 3 and 5 and 3 and 5
EIKOVU 52. Apziku, sotiussiui to siouko too kupitipu nuvu otij keniou (u) kui otij
Sovezeta anokontetat to μ (so (p)
Eikova 33. Enlopaoli η_{ζ} μετατοπισης της λεπισας κατα μηκός του οπτικού αζόνα z
περιοχή της δεσμής από κατώ. (α)η λεπιδά είναι πιο κοντά στο 2 φακό απ ό,τι θα (a)
επρεπε (β) σωστη τοποθετηση λεπιοας (γ) η λεπιοα ειναι πιο μακρια από το 2° φακό
$\alpha \pi$ 0, $\tau t \theta \alpha \epsilon \pi \rho \epsilon \pi \epsilon [15]$
Εικονα 54. Δυστημα Schneren τυπου Z που κατασκευαστηκε στο εργαστηριο56
Εικονα 35. Ψωτογραφιες Schleren, απο συστημα τυπου Ζ, που απεικονίζουν μια
φλογά οιαχυσης προερχομένη απο φιαλη υγραεριού οικιακής χρησης57
Εικονα 36. Ψωτογραφιες Schlieren, απο συστημα τύπου Ζ, της ίδιας φλόγας με
διαφορετικο βαθμο μεγεθυνσης58

Εικόνα 37. Φωτογραφίες Schlieren, από σύστημα τύπου Ζ, στις οποίες η εικόνα	
αποτυπώνεται απευθείας στο εστιακό επίπεδο της φωτογραφικής μηχανής59)
Εικόνα 38. Φωτογραφίες Schlieren, από σύστημα τύπου Ζ, μιας φλόγας διάχυσης60)
Εικόνα 39. Δέσμη καυσίμου από φιάλη υγραερίου. Το άκαυστο αέριο εξέρχεται από	
το ακροφύσιο και διασκορπίζεται στον αέρα που το περιβάλλει6	1
Εικόνα 40. Φλόγα διάχυσης από τη φιάλη υγραερίου62	2
Εικόνα 41. Αέριο και φλόγα από τον αναπτήρα	2
Εικόνα 42. Φωτογραφίες Schlieren που προέκυψαν από σύστημα τύπου Ζ με	
σημειακή πηγή λευκού φωτός	3
Εικόνα 43. Σύγκριση απλής φλόγας διάχυσης με τη φλόγα προανάμιξης του	
καυστήρα Bunsen	5
Εικόνα 44. (a) Σχηματική αναπαράσταση καυστήρα Bunsen, (b) Κωνική φλόγα	
προανάμιξης καυστήρα Bunsen [54]60	5
Εικόνα 45. Φλόγες από καυστήρα Bunsen με καύσιμο αέριο προπάνιο6	7
Εικόνα 46. Φλόγα από καυστήρα Bunsen και απλή φλόγα διάχυσης68	3
Εικόνα 47: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης για την καταγραφή	
θερμοκρασιών και εκπομπών καυσαερίων	5
Εικόνα 48: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά πορώδους καυστήρα78	3
Εικόνα 49. Σχηματική αναπαράσταση θερμοστοιχείου)
Εικόνα 50: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [60]80)

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Επίδραση του λόγου καυσίμου-αέρα φ στη στρωτή ταχύτητα καύσης	
για μίγματα μεθανίου-αέρα υπό ατμοσφαιρική πίεση [66]	.66
Διάγραμμα 2. Συγκέντρωση Ο2 (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για	<i>.</i>
διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Α	.85
Διάγραμμα 3. Συγκέντρωση CO2 (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο γι	ια
διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Α	.86
Διάγραμμα 4. Συγκέντρωση Ο2 και CO2 (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό	
φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Α	.87
Διάγραμμα 5. Εκπομπές CO σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα	
επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α	.87
Διάγραμμα 6. Εκπομπές ΝΟ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα	
επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α	.88
Διάγραμμα 7. Εκπομπές NO2 σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα	
επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α	.89

Διάγραμμα 8. Εκπομπές NO και NO2 σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για
διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α
Διάγραμμα 9. Εκπομπές ΝΟχ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα
επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α90
Διάγραμμα 10. Θερμοκρασία καυσαερίων σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για
διάφορα επίπεδα θερμικού φορτίου για το καύσιμο Α90
Διάγραμμα 11. Βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο
για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Α
Διάγραμμα 12. Συγκέντρωση Ο ₂ (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για
διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Β92
Διάγραμμα 13. Συγκέντρωση CO ₂ (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για
διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Β93
Διάγραμμα 14. Συγκέντρωση O_2 και CO_2 (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό
φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Β
Διάγραμμα 15. Εκπομπές CO σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα
επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Β
Διάγραμμα 16. Εκπομπές ΝΟ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα
επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Β95
Διάγραμμα 17. Εκπομπές NO ₂ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα
επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Β
Διάγραμμα 18. Εκπομπές NO και NO ₂ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για
διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Β96
Διάγραμμα 19. Εκπομπές ΝΟχ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα
επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Β96
Διάγραμμα 20. Θερμοκρασία καυσαερίων σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για
διάφορα επίπεδα θερμικού φορτίου για το καύσιμο Β
Διάγραμμα 21. Βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο
για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Β
Διάγραμμα 22. Επί ξηρώ συγκεντρώσεις Ο2 και CO2 σε συνάρτηση με το θερμικό
φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης και για δύο διαφορετικά καύσιμα:
μαύρο-κόκκινο χρώμα για το καύσιμο Α και γκρι-μπλε για το καύσιμο Β
Διάγραμμα 23. Εκπομπές CO σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα
επίπεδα θερμικής ισχύος και για δύο καύσιμα: μαύρο χρώμα για το καύσιμο Α και
ροζ για το καύσιμο Β
Διάγραμμα 24. Εκπομπές ΝΟχ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα
επίπεδα θερμικής ισχύος και για δύο καύσιμα: μαύρο χρώμα για το καύσιμο Α και
ροζ για το καύσιμο Β
Διάγραμμα 25. Θερμοκρασία καυσαερίων σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για
διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος και για δύο καύσιμα: μαύρο χρώμα για το καύσιμο
Α και ροζ για το καύσιμο Β
Διάγραμμα 26. Θερμοκρασία της πορώδους επιφάνειας του καυστήρα σε συνάρτηση
με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος και για δύο καύσιμα:
μαύρο χρώμα για το καύσιμο Α και ροζ για το καύσιμο Β

Κατάλογος πινάκων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή

1.1 Καύση - Καυστήρες - Φλόγες

Σήμερα, παρά την αυξανόμενη αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. αιολική και ηλιακή) και την συνεχή ανάπτυξη των αντίστοιχων τεχνολογιών, τα συστήματα καύσης εξακολουθούν να κυριαρχούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στις μεταφορές και τη θέρμανση [1]. Σε παγκόσμια κλίμακα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται κατά 85% από την καύση ορυκτών καυσίμων [2]. Στις μεταφορές, τα αυτοκίνητα, τα φορτηγά και τα πλοία κινούνται με μηχανές εσωτερικής καύσης, ενώ τα αεροπλάνα και οι πύραυλοι διαθέτουν σύγχρονα προωθητικά συστήματα, αεριοστροβίλους, στους οποίους επίσης λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της καύσης. Στον τομέα της θέρμανσης, χρησιμοποιούνται συστήματα καύσης αέριων, υγρών και κυρίως στερεών καυσίμων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το τζάκι, οι καυστήρες πετρελαίου, ξύλου, πέλλετ και οι λέβητες φυσικού αερίου και υγραερίου. Επιπλέον η καύση είναι στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος σε θέματα ασφαλείας, όπως είναι η πρόληψη πυρκαγιών και εκρήξεων.

Τέλος, το φαινόμενο της καύσης αποτελεί αντικείμενο μελέτης λόγω της σοβαρής επίδρασης που έχει στο περιβάλλον. Πολλά προϊόντα της καύσης, είτε αποτελούν ρύπους για τον ατμοσφαιρικό αέρα και σε μεγάλες συγκεντρώσεις είναι επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία είτε εντείνουν άλλα περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου [3]. Είναι, λοιπόν σημαντικό να βελτιωθούν τα συστήματα καύσης ώστε να επιβαρύνουν όσο το δυνατόν λιγότερο το περιβάλλον.

<u>Καύση</u> ονομάζεται κάθε εξώθερμη χημική αντίδραση ενός υλικού καυσίμου με το οξυγόνο (οξειδωτικό), η οποία συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας. Το καύσιμο αντιδρά με το οξυγόνο του αέρα και παράγει προϊόντα, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και ο υδρατμός, που έχουν χαμηλότερη ενέργεια χημικών δεσμών συγκριτικά με τα αντιδρώντα. Ο βαθμός απόδοσης θερμότητας είναι υψηλός, ώστε η εκπεμπόμενη θερμική ενέργεια να είναι τεχνικά εκμεταλλεύσιμη [2].

<u>Ταξινόμηση φλογών</u>

Ανάλογα με τον τρόπο ανάμιξης του καυσίμου με το οξειδωτικό, οι φλόγες, το οπτικό αποτέλεσμα της καύσης, διακρίνονται σε φλόγες προανάμιξης και φλόγες διάχυσης. Οι φλόγες προανάμιξης φέρουν σε πλήρη ανάμιξη το μίγμα των αντιδρώντων πριν από την έναυση. Αντιθέτως στις φλόγες διάχυσης η ανάμιξη καυσίμου-οξειδωτικού γίνεται ταυτόχρονα με την καύση, όπως συμβαίνει κατά τη καύση του κεριού. Με συνδυασμό των δύο παραπάνω τύπων φλογών μπορούν να προκύψουν οι φλόγες μερικής προανάμιξης. Ο Γερμανός Robert Bunsen ήταν ο πρώτος επιστήμονας μηγανικός που το 1855 κατασκεύασε έναν καυστήρα με φλόγα προανάμιξης, ο οποίος ονομάστηκε καυστήρας Bunsen, ενώ η πρώτη θεωρητική προσέγγιση και έρευνα πάνω σε φλόγες διάχυσης έγινε το 1928 από τους Burke και Schumman [4]. Μία άλλη ταξινόμηση των φλογών γίνεται ανάλογα με τη ροή που επικρατεί στην περιογή της φλόγας. Έτσι, οι φλόγες διαγωρίζονται σε στρωτές και τυρβώδεις. Ως κριτήριο διαχωρισμού χρησιμοποιείται ο αριθμός Reynolds (Re): όταν η ροή χαρακτηρίζεται από αριθμό Re μικρότερο από 10³ η φλόγα θεωρείται στρωτή ενώ όταν ο Re είναι μεγαλύτερος από 10³ η φλόγα θεωρείται τυρβώδης. Τόσο οι φλόγες προανάμιξης όσο και οι φλόγες διάχυσης μπορούν να είναι είτε στρωτές είτε τυρβώδεις.

Ο καυστήρας Bunsen είναι η πιο γνωστή περίπτωση μελέτης στρωτής φλόγας προανάμιξης. Ο συγκεκριμένος τύπος καυστήρα παρέχει την ανάμιξη του μίγματος των αντιδρώντων σε στρωτές συνθήκες. Το καύσιμο εισάγεται χωριστά από τον αέρα στη βάση του καυστήρα και αναμιγνύεται με αυτόν μέσα στο σωλήνα-καυστήρα Bunsen [4]. Γενικό χαραστηριστικό των στρωτών φλογών προανάμιξης είναι ότι η καύση ελέγχεται αποκλειστικά από τη χημική αντίδραση μεταξύ του μίγματος των αντιδρώντων η οποία λαμβάνει χώρα σε μια λεπτή ζώνη και διαδίδεται με αρκετά χαμηλή ταχύτητα. Η πτώση πίεσης κατά την καύση είναι πολύ μικρή (1 Pa) και η θερμοκρασία στην περιοχή της χημικής αντίδρασης είναι αρκετά υψηλή [2].

Στις προαναμιγμένες τυρβώδεις φλόγες η έκλυση θερμότητας είναι πιο έντονη από ότι στις στρωτές. Η τύρβη αυξάνει την ταχύτητα διάδοσης της φλόγας ενώ δεν επηρεάζει τη χημεία της αντίδρασης. Οι φλόγες αυτές χρησιμοποιούνται εκτενώς σε μηχανές εσωτερικής καύσης, σε αεριοστροβίλους και σε βιομηχανικούς καυστήρες αερίων καυσίμων. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε πολλές οικιακές συσκευές και σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως κατεργασία κεραμικών, τούβλων, πορσελάνης και επεξεργασία μετάλλων [2].

Φλόγες διάχυσης παρουσιάζονται σε εφαρμογές όπου τα δύο ρεύματα, καυσίμου και οξειδωτικού, προσάγονται στο θάλαμο καύσης ξεχωριστά έτσι ώστε η έκλυση ενέργειας να εξαρτάται αρχικώς από τον τρόπο και το ρυθμό ανάμιξής τους. Αναπτύσσονται ως περιπτώσεις καύσης αερίων καυσίμων, μετά την εξάτμιση υγρών καυσίμων και κατά την έκλυση πτητικών κατά την καύση στερεών καυσίμων. Ένα τυπικό παράδειγμα στρωτής φλόγας διάχυσης είναι η φλόγα ενός κεριού, ενώ τυρβώδεις φλόγες διάχυσης συναντώνται στην πλειοψηφία των πρακτικών συστημάτων καύσης, κυρίως λόγω της ευκολίας ελέγχου τους [2].

Οι φλόγες μπορούν να ταξινομηθούν, επίσης, ανάλογα με την κατάσταση των αντιδρώντων κατά τη διάρκεια της καύσης σε **ομογενείς** και **ετερογενείς**. Στα ομογενή συστήματα όλα τα αντιδρώντα βρίσκονται στην ίδια κατάσταση (στερεή, υγρή ή αέρια) και οι ιδιότητες είναι παντού ίδιες και δεν αλλάζουν με το χώρο ή το χρόνο. Στα ετερογενή συστήματα, που είναι και τα συστήματα που εμφανίζονται ευρέως στην πράξη, η κατάσταση καυσίμου και οξειδωτικού είναι διαφορετική και η σύσταση και οι φυσικές ιδιότητες του καυσίμου μεταβάλλονται στο χώρο.

Άλλοι διαχωρισμοί των φλογών γίνονται είτε με βάση το είδος του μηχανισμού που ελέγχει την αντίδραση της καύσης, οπότε οι φλόγες διακρίνονται σε φυσικοελεγχόμενες και χημικο-επηρεαζόμενες, είτε ανάλογα με τον τρόπο έγχυσης καυσίμου και οξειδωτικού και την απαγωγή των καυσαερίων, οπότε οι φλόγες χωρίζονται σε συνεχείς και διακοπτόμενες [2]

<u>Καυστήρες</u>

Ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια ταξινόμησης των φλογών που αναφέρθηκαν είναι το είδος της φλόγας που διαμορφώνεται με βάση την προανάμιξη ή μη του μίγματος των αντιδρώντων πριν την έναυση και σύμφωνα με αυτό διακρίνονται και οι τύποι καυστήρων. Έτσι, υπάρχουν οι καυστήρες προανάμιξης και οι καυστήρες διάχυσης. Επίσης, οι καυστήρες διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιούν και τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής που εξυπηρετούν.

1.2 Καύσιμα

Τα καύσιμα χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: **στερεά** (π.χ. τύρφη, φαιάνθρακες, λιθάνθρακες, βιομάζα, R.D.F.), **υγρά** (π.χ. υγραέριο, μαζούτ, βενζίνη, κηροζίνη) και **αέρια** (π.χ. φυσικό αέριο, βιοαέριο, φωταέριο, αέριο πυρόλυσης).

Μια άλλη διάκριση των καυσίμων γίνεται σε:

Φυσικά καύσιμα, τα οποία χρησιμοποιούνται απ΄ ευθείας από τη φύση (π.χ. οι λιθάνθρακες, το ακατέργαστο πετρέλαιο ή νάφθα, το φυσικό αέριο κ.λ.π.) και *Τεχνητά καύσιμα*, τα οποία χρησιμοποιούνται κατόπιν επεξεργασίας (π.χ. το κωκ, οι μπρικέττες, το πετρέλαιο θέρμανσης, το πετρέλαιο ντήζελ, η βενζίνη, το οινόπνευμα, το φωταέριο κ.λπ.) [3]. Βασικό χαρακτηριστικό ενός καυσίμου είναι η <u>θερμογόνος ικανότητα</u>, δηλαδή η θερμική ενέργεια που μπορεί να αποδώσει το καύσιμο εάν καεί ένα kmol αυτού σε αδιαβατικές συνθήκες [2].

Το είδος του καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα σύστημα καύσης καθορίζει, κατ'επέκταση τον τύπο του καυστήρα και του θαλάμου καύσης, το σύστημα επεξεργασίας του καυσίμου, τα συστήματα αντιρρυπαντικής προστασίας και το κόστος της εγκατάστασης. Η θερμογόνος ικανότητα είναι, λοιπόν, ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν ποιο καύσιμο θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε εφαρμογή, ανάλογα με την απαίτηση που υπάρχει σε θερμική ισχύ. Σημαντικό ρόλο, επίσης, για την επιλογή του καυσίμου παίζουν η τοπική διαθεσιμότητά του και η ευκολία στην αποθήκευση και μεταφορά του. Τα ευρέως διαδεδομένα υγρά καύσιμα έχουν υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο και ταυτόχρονα είναι ασφαλή στη μεταφορά και αποθήκευση. Τα στερεά αποτελούν φθηνή και άμεσα διαθέσιμη πηγή ενέργειας και επίσης μεταφέρονται και αποθηκεύονται εύκολα. Σε αυτό μειονεκτούν τα αέρια καύσιμα, τα οποία έχουν μικρότερη θερμογόνο ικανότητα από τα υγρά [6].

Ωστόσο, τα αέρια καύσιμα πλεονεκτούν έναντι των υγρών και των στερεών ως προς τη διαδικασία προετοιμασίας τους μέχρι να φτάσουν σε μορφή κατάλληλη για να καούν. Συγκεκριμένα, τα στερεά καύσιμα πρέπει να υποστούν ξήρανση για απομάκρυνση της υγρασίας, περαιτέρω θέρμανση για απομάκρυνση των πτητικών ενώσεων και τέλος αεριοποίηση. Να σημειωθεί ότι ανάλογα με την τεχνολογία καύσης που χρησιμοποιείται μπορεί να χρειαστεί και κονιοποίηση του στερεού καυσίμου [3]. Στα υγρά καύσιμα απαιτείται διάσπαση σε δέσμη σταγονιδίων (σπρέι) και στη συνέχεια εξάτμιση των σταγονιδίων. Αντίθετα, τα αέρια καύσιμα δεν απαιτούν ιδιαίτερη προετοιμασία για την καύση τους καθώς είναι στην κατάλληλη μορφή για να αναμιχθούν κατευθείαν με το οξειδωτικό.

Η σύσταση του καυσίμου είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό που ενδιαφέρει γιατί καθορίζει το είδος και την ποσότητα των ρύπων που αυτό παράγει. Για παράδειγμα, τα στερεά καύσιμα περιέχουν τέφρα, υγρασία, θειούχες και αζωτούχες ενώσεις, που ελευθερώνονται κατά την καύση και επιβαρύνουν το περιβάλλον ή είναι επιβλαβείς και για την ίδια την εγκατάσταση [3]. Βέβαια, με βελτίωση των συνθηκών καύσης και χρήση αντιρρυπαντικών διατάξεων το πρόβλημα αυτό διορθώνεται σε ένα βαθμό αλλά αυξάνεται το κόστος της εγκατάστασης.

Συμπερασματικά, τα καύσιμα οφείλουν να πληρούν αλληλοσυγκρουόμενες απαιτήσεις. Το υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο, η ευκολία και το χαμηλό κόστος κτήσης, μεταφοράς και αποθήκευσης, το μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα συνήθως δεν συμβαδίζουν. Όμως, τα αέρια πλεονεκτούν σε πολλούς τομείς. Αναμιγνύονται εύκολα με το οξειδωτικό και απαιτούν μικρότερες θερμοκρασίες για να αναφλεγούν. Έτσι, μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν σε πολλά είδη καυστήρων. Λόγω της καλύτερης προανάμιξης με το οξειδωτικό και της πιο ομογενοποιημένης προσαγωγής στο θάλαμο καύσης, η καύση γίνεται με μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και παράγονται λιγότεροι ρύποι και προϊόντα ατελούς καύσης και δεν αφήνουν επικαθίσεις [6]. Τέλος, ως προς τη θερμογόνο δύναμη, τα αέρια αποδίδουν περισσότερη ενέργεια από τα στερεά, αντισταθμίζοντας το μειονέκτημα της υψηλότερης τιμής.

Σήμερα, η άνοδος των τιμών των συμβατικών καυσίμων, η μείωση των διαθέσιμων αποθεμάτων και η απαίτηση για χαμηλές εκπομπές ρύπων από τη νομοθεσία, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στην ανάπτυξη των εναλλακτικών καυσίμων ή, όπως αλλιώς λέγονται, βιοκαυσίμων, όπως είναι το βιοαέριο, η βιομάζα, το συνθετικό αέριο, η βιοαιθανόλη, το βιοντήζελ και το υδρογόνο. Η παγκόσμια κοινότητα προσανατολίζεται προς την ενεργειακή κυρίως χρήση των αερίων βιοκαυσίμων. Παρακάτω αναφέρονται χαρακτηριστικά παραδείγματα αέριων ορυκτών και εναλλακτικών καυσίμων.

Φυσικό αέριο (natural gas)

Το φυσικό αέριο είναι ορυκτό καύσιμο που δημιουργήθηκε από την αποσύνθεση φυτικών και ζωικών οργανισμών σε υπόγειες κοιλότητες υπό την επίδραση υψηλών πιέσεων, θερμοκρασιών και βακτηρίων. Η χημική του ενέργεια προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια που ήταν αποθηκευμένη στους οργανισμούς αυτούς. Είναι μίγμα υδρογονανθράκων που περιέχει κυρίως μεθάνιο (CH4) σε ποσοστό 70-90%, και σε μικρότερη ποσότητα άλλους υδρογονάνθρακες, όπως αιθάνιο (C2H6) σε ποσοστό 5-15% και βουτάνιο και προπάνιο σε ποσοστά μικρότερα του 5%. Σε πολύ μικρές ποσότητες περιέχει άλλες ενώσεις, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), άζωτο (N₂) και υδρόθειο (H₂S). Το φυσικό αέριο εξορύσσεται από υπόγειες δεξαμενές στις οποίες είτε βρίσκεται μόνο του είτε μαζί με πετρέλαιο. Επίσης, μπορεί να βρεθεί και μαζί με κοιτάσματα άνθρακα. Μεταφέρεται με δύο τρόπους: σε αέρια μορφή και σε υψηλή πίεση μέσω αγωγών μεγάλου μήκους ή σε υγρή μορφή μέσα σε δεξαμενές πλοίων. Πριν τη μεταφορά για τη διάθεσή του στην αγορά πρέπει να υποστεί διεργασίες καθαρισμού ώστε να απομακρυνθούν ανεπιθύμητα συστατικά, όπως είναι το θείο, το άζωτο, ο υδρατμός. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται ευρύτατα στις μεταφορές (αυτοκίνητα, λεωφορεία), στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σε αεριοστροβίλους, ατμοστροβίλους και σε μονάδες συμπαραγωγής) και για οικιακές ανάγκες (θέρμανση, μαγείρεμα). Άλλες εφαρμογές του είναι στη βιομηχανία υφασμάτων, πλαστικών, γυαλιού, γρωμάτων, λιπασμάτων. Επίσης, σήμερα χρησιμοποιείται ως καύσιμο και σε υγρή μορφή (liquefied natural gas- LNG) ή αξιοπιείται για την παραγωγή υδρογόνου. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει συγκριτικά με άλλα καύσιμα είναι ότι η καύση του είναι φιλική προς το περιβάλλον. Δεν παράγει επικίνδυνους ρύπους και συγκεκριμένα επειδή δεν περιέχει θείο δεν παράγει διοξείδιο του θείου, ενώ οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι χαμηλότερες ανά μονάδα καύσιμης ύλης σε σχέση με άλλα συμβατικά καύσιμα όπως το πετρέλαιο [2]. Επιπλέον, έχει σχετικά υψηλή θερμογόνο ικανότητα (από 30 έως 40 MJ/m^3) και είναι σχετικά φθηνό. Δεν χρειάζεται εκτεταμένη επεξεργασία πριν από τη χρήση του ούτε αποθηκευτικούς χώρους, καθώς η παροχή από το δίκτυο διανομής είναι συνεχής. Λόγω της φιλικότητάς του προς το περιβάλλον, παρότι είναι ορυκτό καύσιμο, χαρακτηρίζεται «εναλλακτικό».

Βιοαέριο (biogas)

Το βιοαέριο αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Παράγεται από την αναερόβια χώνευση κτηνοτροφικών κυρίως αποβλήτων (λύματα από χοιροστάσια, βουστάσια), αγροτοβιομηχανικών αποβλήτων και λυμάτων, καθώς και από αστικά οργανικά απορρίμματα (XYTA) [7]. Αποτελείται κυρίως από μεθάνιο- CH₄ (σε ποσοστό 50-75%) και διοξείδιο του άνθρακα- CO₂ (σε ποσοστό 25-50%) και μπορεί να περιέχει μικρές ποσότητες από άζωτο, υδρογόνο, οξυγόνο, υδρόθειο. Η θερμογόνος δύναμή του κυμαίνεται από 20 έως 25 MJ/m³ και εξαρτάται άμεσα από το ποσοστό του περιεχόμενου σε αυτό μεθανίου, αφού το CO2 δεν καίγεται. Το βιοαέριο αξιοποιείται ενεργειακά, μέσω της τροφοδοσίας του σε μηχανές εσωτερικής καύσης, σε καυστήρες αερίου ή σε αεριοστρόβιλο σε μονάδες συμπαραγωγής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας. Μάλιστα, με την κατάλληλη επεξεργασία και αναβάθμιση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως καύσιμο μεταφορών. Παράλληλα, το αναβαθμισμένο βιοαέριο μπορεί να διοχετευθεί στο δίκτυο του φυσικού αερίου και να χρησιμοποιηθεί για ηλεκτρική και θερμική ενέργεια. Πειραματικά χρησιμοποιείται και για παραγωγή υδρογόνου, τροφοδοτώντας κυψέλες καυσίμου (fuel cells). Η ανάπτυξη και εγκατάσταση τεγνολογιών βιοαερίου, αποτελεί μία εναλλακτική λύση με σημαντικά πλεονεκτήματα, καθώς προσφέρει περιβαλλοντικά φιλική ενέργεια, έχει πολύ μικρό αποτύπωμα διοξειδίου του άνθρακα, δεν παράγει αέρια του θερμοκηπίου και ταυτόγρονα επιλύει το συνεχώς διογκούμενο πρόβλημα της διάθεσης των απορριμμάτων [8]. Τέλος θεωρείται πολύ ασφαλές καύσιμο γιατί εξαιτίας του μεγάλου ποσοστού διοξειδίου του άνθρακα που περιέχει αποτρέπεται ο κίνδυνος έκρηξης.

Συνθετικό αέριο (syngas)

Το συνθετικό αέριο είναι εναλλακτικό καύσιμο και αποτελεί μίγμα αερίων, κυρίως υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα ενώ συχνά μπορεί να περιέχει και διοξείδιο του άνθρακα. Έχει μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο από το φυσικό αέριο και η θερμογόνος δύναμή του ποικίλει ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής του. Έτσι αν έχει παραχθεί από αεριοποίηση βιομάζας με χρήση αέρα (η πιο οικονομική και συνήθης επιλογή), το αέριο σύνθεσης έχει καθαρή θερμογόνο δύναμη περίπου 4,6 MJ/ m³ (περίπου το 1/7 εκείνης του φυσικού αερίου), ενώ όταν στη διεργασία χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο αντί για αέρας, η θερμογόνος δύναμή του μπορεί ακόμα και να τριπλασιασθεί. Χρησιμοποιείται συχνά ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης και σε αεριοστροβίλους σε μονάδες συμπαραγωγής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας [9]. Επίσης, χρησιμοποιείται στην παραγωγή συνθετικού φυσικού αερίου (synthetic natural gas-SNG) και αμμωνίας ή

μεθανόλης. Το συνθετικό αέριο αποτελεί ενδιάμενο πρϊόν στην παραγωγή συνθετικού πετρελαίου, για χρήση του ως καύσιμο ή λιπαντικό, μέσω της διεργασίας Fischer– Tropsch. Εκτός από την αεριοποίηση της βιομάζας που αναφέρθηκε, το συνθετικό αέριο μπορεί να παραχθεί και από την αεριοποίηση του άνθρακα και την αναμόρφωση με ατμό του φυσικού αερίου ή υγρών υδρονανθράκων. Τέλος, ειδικά τα τελευταία χρόνια, παράγεται και από κάποιους τύπους από διεργασιών που χρησιμοποιούν απορρίματα για παραγωγή θερμικής ή ηλεκτρικής ενέργειας (waste-to-energy), όπως είναι η αποτέφρωση απορριμάτων.

Ευρέως διαδεδομένο είναι, επίσης, το υγροποιημένο αέριο πετρελαίου (liquefied petroleum gas- LPG), κοινώς υγραέριο, το οποίο συγκαταλέγεται και αυτό στα εναλλακτικά καύσιμα. Αποτελείται από ελαφρά κλάσματα αργού πετρελαίου, τα οποία είναι αέρια όταν βρίσκονται υπό συνήθεις ατμοσφαιρικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Επίσης ο όρος LPG αναφέρεται στα κλάσματα που αφαιρούνται από το φυσικό αέριο προτού αυτό οδεύσει προς κατανάλωση και τα οποία είναι υγρά όταν είναι υπό υψηλή πίεση. Ουσιαστικά δηλαδή το LPG είναι μίγμα προπανίου και βουτανίου το οποίο είτε προέρχεται από αργό πετρέλαιο είτε προέρχεται από την ξήρανση του φυσικού αερίου. Η αναλογία προπανίου-βουτανίου μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την εποχή, πιο πολύ προπάνιο το χειμώνα, πιο πολύ βουτάνιο το καλοκαίρι. Συνήθως προστίθεται σε μικρή αναλογία κάποιο συστατικό με πολύ ισχυρή οσμή ώστε να είναι εύκολα ανιχνεύσιμες τυχόν διαρροές. Είναι ένα ιδιαίτερα εύφλεκτο προϊόν (όπως όλοι οι υδρογονάνθρακες) και επιπλέον όταν είναι υγροποιημένο υπό πίεση υπάρχει ο κίνδυνος έκρηξης από απότομη εκτόνωση. Ως εκ τούτου, ισχύουν αυστηρές προδιαγραφές και κανονισμοί για τον χειρισμό, αποθήκευση και διάθεση του. Χρησιμοποιείται ως καύσιμο, και θεωρείται πιο "καθαρό" από τους υγρούς υδρογονάνθρακες διότι έχει μεγαλύτερη αναλογία υδρογόνου-άνθρακα και άρα μικρότερες εκπομπές CO₂. Ως καύσιμο χρησιμοποιείται για οικιακή χρήση (μαγείρεμα, θέρμανση, παραγωγή ζεστού νερού) και στις μεταφορές. Επίσης χρησιμοποιείται ως ψυκτικό εργαζόμενο μέσο σε βιομηγανικά συστήματα ψύξης [10]. Το υγραέριο ή LPG δεν πρέπει να συγχέεται με το φυσικό αέριο που είναι κυρίως μεθάνιο αλλά ούτε και με το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG). Το υγραέριο είναι καύσιμο υψηλής απόδοσης και αναφλέγεται με τον αέρα σε αναλογία υγραερίου-αέρα μεταξύ 1:50 και 1:10 (το όριο αυτό είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο για το φυσικό αέριο). Η θερμογόνος ικανότητα του υγραερίου είναι περίπου 2,5 φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη του φυσικού αερίου.

Τέλος, είναι λιγότερο επιβλαβές για το περιβάλλον σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα. Εκπέμπει κατά την καύση του πολύ μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) σε σχέση με τα συμβατικά και 30 φορές μικρότερες ποσότητες οξειδίων του αζώτου (NO_x), ενώ δεν περιέχει ούτε θείο ούτε βαρέα μέταλλα όπως αυτά που συναντώνται στα υγρά παράγωγα του αργού πετρελαίου (ντίζελ και το μαζούτ).

1.3 Διαγνωστικές μέθοδοι φαινομένων καύσης

Η καύση αποτελεί ένα σύνολο σύνθετων, πολυδιάστατων αλληλεπιδράσεων φαινομένων χημικής κινητικής και ρευστομηχανικής. Η διαγνωστική των φαινομένων καύσης συμβάλλει στη θεμελιώδη κατανόηση αυτών. Συγκεκριμένα, οι λεπτομερείς μετρήσεις χημικών ειδών, θερμοκρασιών, ροϊκών πεδίων και σωματιδίων παρέχουν τις αναγκαίες πληροφορίες για τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την καύση. Παράλληλα, τα υπολογιστικά μοντέλα που αναπτύσσονται, τροφοδοτούνται από τα δεδομένα των μετρήσεων και μπορούν να επιβεβαιώσουν την ισχύ τους [11]. Έτσι, επιτυγχάνεται βελτιστοποίηση της απόδοσης των συστημάτων καύσης με την ελάχιστη δυνατή κατανάλωση καυσίμου και εκπομπή ρύπων, κάτι που είναι αναγκαίο δεδομένων της εξάντλησης των ορυκτών πόρων και της αυστηρής νομοθεσίας για τους ρύπους. Επομένως, η εφαρμογή πειραματικών διαγνωστικών μεθόδων σε φαινόμενα καύσης είναι αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού και της ανάπτυξης νέων και καθαρότερων τεχνολογιών καύσης.

Οι διαγνωστικές μέθοδοι των φαινομένων καύσης χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις παρεμβατικές ή συμβατικές και τις μη παρεμβατικές ή οπτικές μεθόδους. Παραδοσιακά οι πρώτες διαγνωστικές μέθοδοι ήταν παρεμβατικές. Αυτές χρησιμοποιούν μια γραμμή δειγματοληψίας για να οδηγήσουν το δείγμα στον αναλυτή, η απόληξη της οποίας διαταράσσει αεροδυναμικά, θερμικά και χημικά σε τοπικό επίπεδο τη φλόγα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παρεμβατικών μεθόδων είναι τα θερμοζεύγη για μέτρηση της θερμοκρασίας και τα ανεμόμετρα θερμού νήματος για μετρήσεις ταχυτήτων. Οι συγκεντρώσεις χημικών ειδών μετρώνται με μεθόδους που ποικίλουν από σχετικά απλά συστήματα συνεχούς ανάλυσης μέχρι πολύπλοκες διατάξεις αέριας χρωματογραφίας και φασματοσκοπίας μάζας [11]. Από αυτά που αναφέρθηκαν, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένα σύστημα συνεχούς ανάλυσης αερίων και ένα θερμοζεύγος για την καταγραφή εκπομπών ρύπων και θερμοκρασιακών επιπέδων αντίστοιχα. Στον αντίποδα, στις οπτικές μεθόδους μία ακτίνα φωτός, συνήθως laser, διεισδύει στη φλόγα και το παραγόμενο σήμα συλλέγεται και αναλύεται. Πλεονεκτούν έναντι των συμβατικών μεθόδων καθώς δε διαταράσσουν τις τοπικές συνθήκες της ροής και παρέχουν σε πραγματικό χρόνο διδιάστατες μετρήσεις με μεγάλη χωρική και χρονική διακριτική ικανότητα [12],[13]. Στην πλειοψηφία τους οι μέθοδοι αυτές παρέχουν ποσοτικά αποτελέσματα, δηλαδή χρησιμοποιούνται για μετρήσεις θερμοκρασιών, συγκεντρώσεων και ταχυτήτων, όπως κάνουν, για παράδειγμα, οι διάφορες τεχνικές διασκορπισμού λέιζερ (π.χ. Ramman, Mie, Rayleigh scattering) [14] η τεχνική φασματοσκοπίας φθορισμού επαγόμενου από λέιζερ (LIF), τεχνικές απορρόφησης λέιζερ [13]. Ωστόσο, υπάρχουν και οπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ποιοτική, κυρίως, αξιολόγηση φαινομένων καύσης, όπως είναι η τεχνική Schlieren και η σκιαγραφία. Αυτές οι τεχνικές, εκ των οποίων η πρώτη εφαρμόζεται στην παρούσα μελέτη, απεικονίζουν τις θερμοκρασιακές διαφορές που επικρατούν σε μια φλόγα ή τη διάδοση ενός ωστικού κύματος παραγόμενου από έκρηξη [15], παρέχοντας σημαντικές πληροφορίες για την εξέλιξη και την κατανόηση του κάθε φαινομένου.

Οι διάφορες διαγνωστικές μέθοδοι βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στον έλεγχο των συνθηκών καύσης σε μηγανές εσωτερικής καύσης, αεριοστροβίλους και καυστήρες θέρμανσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο αισθητήρας λ που υπάργει στα αυτοκίνητα και ρυθμίζει συνέχεια το μίγμα αέρα-καυσίμου, ανάλογα με τις συγκεντρώσεις των καυσερίων. Συγκεκριμένα, μετρά τη συγκέντρωση οξυγόνου στα καυσαέρια, δηλαδή προσδιορίζει αν η καύση γίνεται με περίσσεια ή όχι οξυγόνου, και αποστέλλει τις αντίστοιχες πληροφορίες στην ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου του συστήματος ψεκασμού για διόρθωση της αναλογίας του καυσίμου μίγματος στη στοιχειομετρική [16]. Επίσης, ανάλυση των καυσαερίων γίνεται και για τη ρύθμιση των καυστήρων θέρμανσης κατά τη συντήρησή τους, όπου γίνεται μέτρηση του δείκτη αιθάλης (με αντλία αναρρόφησης καυσαερίων και ειδικό γαρτί φιλτραρίσματος), της συγκέντρωσης διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα και μέτρηση της θερμοκρασίας [17]. Τέλος, ηλεκτρονικοί αναλυτές καυσαερίων χρησιμοποιούνται σε οποιοδήποτε βιομηχανικό καυστήρα για τον έλεγχο της συγκέντρωσης των καυσαερίων και τον προσδιορισμό του βαθμού απόδοσης του συστήματος [18].

Οι διαγνωστικές μέθοδοι, εκτός από την εφαρμογή τους για τη ρύθμιση των συνθηκών καύσης σε υπάρχοντα συστήματα, χρησιμοποιούνται και σε ερευνητικό επίπεδο για τη βελτιστοποίηση των συστημάτων καύσης. Στόχος είναι η αύξηση του βαθμού απόδοσης με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών ρύπων, κυρίως των οξειδίων αζώτου και θείου και του μονοξειδίου του άνθρακα.

1.4 Δομή της διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσονται, εφαρμόζονται και αξιολογούνται δύο διαγνωστικές μέθοδοι καύσης: η τεχνική Schlieren και το σύστημα συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων. Η πρώτη είναι οπτική μέθοδος και στα πλαίσια της παρούσας μελέτης παρέχει μόνο ποιοτικά αποτελέσματα εφαρμοζόμενη σε φλόγες τόσο απλών όσο και σύνθετων συστημάτων. Η δεύτερη είναι συμβατική τεχνική και χρησιμοποιείται για την πληρέστερη μελέτη ενός πρότυπου καυστήρα προανάμιξης, του πορώδους καυστήρα.

Αρχικά, παρουσιάζεται το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση των δύο μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν. Περιγράφονται τυπικές διατάξεις της μεθόδου Schlieren, αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας τους και παρουσιάζονται αποτελέσματα αυτών από τη βιβλιογραφία. Επίσης, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας του αναλυτή καυσαερίων και η απαιτούμενη πειραματική εγκατάσταση για να διεξαχθούν οι μετρήσεις.

Στη συνέχεια, περιγράφεται η διάταξη Schlieren που υλοποιήθηκε στο εργαστήριο και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από φλόγες βαθμωτής πολυπλοκότητας. Συγκεκριμένα, αντικείμενα μελέτης ήταν ένα φλογίδιο διάχυσης από φιάλη υγραερίου οικιακής χρήσης, η φλογα προανάμιξης ενός καυστήρα Bunsen και, τελικά, η φλόγα από έναν καυστήρα πορώδους αδρανούς μέσου. Η οπτικοποίηση των θερμοκρασιακών επιπέδων της κάθε φλόγας και η καταγραφή αυτών σε φωτογραφίες επιβεβαιώνει την ισχύ της μεθόδου και αποδεικνύει στοιχεία της θεωρίας που είναι γνωστά για τις φλόγες προανάμιξης. Ο αναλυτής καυσαερίων μαζί με τα θερμοστοιχεία, τη θερμογραφική κάμερα, τους μετρητές παροχής μάζας, το απαιτούμενο λογισμικό και άλλα επιμέρους στοιχεία, συγκροτούν την πειραματική εγκατάσταση που παρουσιάζεται στη συνέγεια της εργασίας. Αυτή γρησιμοποιείται για καταγραφή θερμοκρασιών και καυσαερίων σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας του πορώδους καυστήρα και για διαφορετικά καύσιμα. Πιο συγκεκριμένα, γίνονται μετρήσεις κατά τη λειτουργία του καυστήρα με εναλλακτικά καύσιμα, που αποτελούν μίγματα μεθανίου, υδρογόνου, μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, αναμεμιγμένα διαφορετικές αναλογίες στο καθένα. μετρήσεις σε Οı πραγματοποιούνται για διάφορες τιμές του λόγου αέρα κάυσης λ και του θερμικού φορτίου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και αναλύονται, καταλήγοντας σε συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του καυστήρα ως προς τις εκπομπές ρύπων καθώς και την επίδραση που έχει η σύσταση του καυσίμου στις τιμές των μετρούμενων μεγεθών.

Τελικώς, η μελέτη των παραπάνω διατάξεων οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με τη διαδικασία διεξαγωγής ενός πειράματος με την τεχνική Schlieren, από την προσπάθεια εφαρμογής των θεωρητικών αρχών για την υλοποίηση της εγκατάστασης μέχρι την συλλογή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Τα δεδομένα των μετρήσεων που προέκυψαν από το δεύτερο σκέλος της εργασίας, παρέχουν τη δυνατότητα χαρακτηρισμού του πρότυπου πορώδους καυστήρα αναφορικά με τη λειτουργία του με εναλλακτικά καύσιμα σε διάφορα επίπεδα ισχύος και λόγους αέρα καύσης με ιδιαίτερη έμφαση στις μειωμένες εκπομπές ρύπων που παρουσιάζει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η μέθοδος Schlieren

Εισαγωγή

Ο όρος Schlieren αναφέρεται σε ανομοιογενείς περιοχές ενός διαφανούς μέσου, συνήθως μη ορατές από το ανθρώπινο μάτι, οι οποίες λόγω διαφορετικής πυκνότητας έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης και προκαλούν εκτροπή των ακτίνων του φωτός που διέρχονται από μέσα τους. Οι ανομοιογένειες αυτές εμφανίζονται είτε σε στερεά είτε σε υγρά είτε σε αέρια διαφανή μέσα και μπορεί να είναι αποτέλεσμα θερμοκρασιακών διαφορών, ροών υψηλής ταχύτητας (π.χ. ωστικό κύμα) ή ανάμιξης ανόμοιων υλικών [15].

Η τεχνική Schlieren και η τεχνική της σκιαγραφίας (shadowgraph) είναι μέθοδοι με τις οποίες οπτικοποιούνται αυτές οι διαφορές πυκνότητας ενός μέσου. Οι τεχνικές αυτές στηρίζονται στις βασικές αρχές της οπτικής και χρησιμοποιούνται ήδη εδώ και τέσσερις αιώνες. Συγκεκριμένα, η σκιαγραφία μελετήθηκε για πρώτη φορά από το φυσικό Ρόμπερτ Χουκ το 17° αιώνα, ενώ το 19° αιώνα ο Όγκαστ Τόπλερ παρουσίασε το πρώτο σύστημα Schlieren [15],[19]. Η βασική διαφορά τους είναι ότι η μέθοδος Schlieren χρησιμοποιεί την κόψη ενός ξυραφιού για να αυξήσει την ευαισθησία και έτσι το οπτικό αποτέλεσμα έχει μεγαλύτερη ανάλυση. Πολλοί επιστήμονες στην πάροδο των χρόνων μελέτησαν, εφάρμοσαν και εξέλιξαν, ακολουθώντας την πρόοδο την τεχνολογίας, τις οπτικές αυτές τεχνικές. Ωστόσο, οι βασικές διατάξεις παραμένουν οι ίδιες, καθώς η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη διάδοση του φωτός.



Εικόνα 1: Φωτογραφία από διάταξη Schlieren του καθηγητή Hubert Schardin (1950). Απεικονίζεται μια σφαίρα και η φλόγα από δύο κεριά.

2.1 Η διάδοση του φωτός και το φαινόμενο της διάθλασης

Το φώς διαδίδεται ευθύγραμμα και με σταθερή ταχύτητα μέσα σε ένα ομογενές μέσο. Στο κενό η ταχύτητά του είναι $C_0=3*10^8$ m/s, ενώ όταν συναντά ύλη επιβραδύνεται. Το μέγεθος που εκφράζει τη δυσκολία που συναντά το φως για να περάσει μέσα από ένα διαφανές υλικό, ονομάζεται δείκτης διάθλασης του υλικού αυτού, είναι χαρακτηριστικό μέγεθος για κάθε υλικό και ορίζεται ως το πηλίκο της ταχύτητας του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα του φωτός στο εν λόγω μέσο. Δηλαδή, n=C₀/C [23].

Για τον αέρα και τα υπόλοιπα αέρια υλικά, υπάρχει μια σχέση που συνδέει το δείκτη διάθλασης με την πυκνότητα του αερίου: n-1=k*p ,όπου k είναι ο συντελεστής Γκλάντστον-Ντέηλ, περίπου ίσος με 0.23 cm³/g για τον αέρα, σε πρότυπες συνθήκες, και για άλλα αέρια κυμαίνεται από 0.1 έως 1.5 cm³/g. Πρακτικά, ο δείκτης διάθλασης των κοινών αερίων έχει πολύ μικρή διαφορά από τη μονάδα, της τάξεως των τριών ή τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων. Για παράδειγμα, ο αέρας έχει n=1.000292 (σε συνθήκες 0°C και 1 bar), το ήλιο n=1.000035, ο τεραχλωράνθρακας n=1.001768. Έτσι, η εξάρτηση του n από την πυκνότητα ρ είναι πολύ μικρή. Μεταβολή της πυκνότητας του αερίου κατά δύο τάξεις μεγέθους προκαλεί αλλαγή στο δείκτη διάθλασης μόνο κατά 3% [15]. Αυτό συνεπάγεται ότι αν πρέπει να ανιχνευτούν οπτικά μικρές διαφοροποιήσεις στην πυκνότητα του αερίου είναι αναγκαίος πολύ ευαίσθητος οπτικός εξοπλισμός.

Όταν το φως διαδίδεται από ένα υλικό σε ένα άλλο που έχει διαφορετικό δείκτη διάθλασης τότε εκτρέπεται από την ευθύγραμμη πορεία του. Αυτό είναι το φαινόμενο της διάθλασης. Πρακτικά, στα αέρια μέσα, ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από τη

θερμοκρασία, την πυκνότητα, την πίεση και την σύσταση του αερίου. Έτσι, διάθλαση μπορεί να παρατηρηθεί και μέσα στο ίδιο αέριο εάν υπάρχουν θερμοκρασιακές διαφορές ή διακυμάνσεις στην πίεση, που συνεπάγονται και διαφορές στην πυκνότητα.

Θεωρώντας σε ένα Καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων τον άξονα z ως τον άξονα διάδοσης της αδιατάραχτης δέσμης φωτός, στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εκτροπή μιας ακτίνας όταν αυτή συναντά ένα μέσο με διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Αποδεικνύεται ότι η διάθλαση γίνεται κατ' αναλογία προς τις παραγώγους του δείκτη διάθλασης στο επίπεδο x-y.



Εικόνα 2. Εκτροπή φωτεινής ακτίνας κατά τη διέλευσή της μέσα από ανομοιογενείς περιοχές του μέσου διάδοσης.

Η προκύπτουσα καμπυλότητα των ακτίνων δίνεται από τις σχέσεις:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x}, \qquad \qquad \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y}$$

Ολοκληρώνοντας τις παραπάνω σχέσεις, για την κατεύθυνση χ και y αντίστοιχα, παίρνουμε τη γωνιακή εκτροπή ε της ακτίνας:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial x} \partial z, \qquad \varepsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} \partial z$$

Στην περίπτωση του διδιάστατου Schlieren και για συγκεκριμένο μήκος L του οπτικού άξονα (άξονα z), οι σχέσεις αυτές γίνονται:

$$\varepsilon_x = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial x}, \qquad \varepsilon_y = \frac{L}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y}$$

Όπου n_0 ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος μέσου.

Οι παραπάνω σχέσεις δείχνουν ότι η διάθλαση δεν οφείλεται στο δείκτη διάθλασης η αλλά στη μεταβολή αυτού $\frac{\partial n}{\partial x}$ και $\frac{\partial n}{\partial y}$. Επιπλέον, συνεπάγεται ότι οι φωτεινές ακτίνες εκτρέπονται πάντα προς τις περιοχές με τον υψηλότερο δείκτη διάθλασης. Αυτό γίνεται περισσότερο κατανοητό στο σχήμα που ακολουθεί και λαμβάνοντας υπόψιν το Νόμο του Σνέλ: $n_1 sin \theta_1 = n_2 sin \theta_2$.



Εικόνα 3. Εκτροπή μιας ακτίνας φωτός κατά τη διέλευσή της από ένα μέσο σε ένα άλλο με διαφορετκό δείκτη διάθλασης

Η ακτίνα διέρχεται από το μέσο 1 στο μέσο 2 για τα οποία ισχύει $n_1 < n_2$. Η γωνία διάθλασης θ_2 (γωνία μεταξύ της καθέτου στη διαχωριστική επιφάνεια και της διαθλώμενης ακτίνας) είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης θ_1 (γωνία μεταξύ της καθέτου και της προσπίπτουσας ακτίνας). Δηλαδή, η ακτίνα πλησιάζει την κάθετο όταν βρίσκεται στο μέσο με το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης.

2.2 Φακοί και Κάτοπτρα

2.2.1 Βασικά χαρακτηριστικά των φακών

<u>Φακός</u> ονομάζεται κάθε ομογενές, ισότροπο και διαφανές οπτικό μέσο που διαμορφώνεται από δυο σφαιρικές επιφάνειες (ή από μια σφαιρική και μια επίπεδη) [21]. Βασική του λειτουργία είναι ο σχηματισμός του ειδώλου ενός πραγματικού αντικειμένου. Τέτοιας μορφής είδωλα είναι συνήθως μεγαλύτερα από τα αντικείμενα. Αν και η πλειοψηφία των φακών είναι κατασκευασμένη από απλό γυαλί, ειδικές κατηγορίες φακών κατασκευάζονται από άλλα διαφανή υλικά, όπως για παράδειγμα πλαστικό ή quartz.



Εικόνα 4. Διατάξεις πρισμάτων που προσομοιώνουν τη λειτουργία των φακών: (α)Συγκλίνων, (β)Αποκλίνων [21]

Για να γίνει κατανοητή η αρχή βάσει της οποίας λειτουργεί ένας φακός, αυτός προσομοιάζεται με μια σειρά από πρίσματα τοποθετημένα όπως στην Εικόνα 4. Στην πρώτη περίπτωση τα πρίσματα διαθλούν τις προσπίπτουσες παράλληλες ακτίνες και τις συγκλίνουν έτσι που να εστιάσουν στο σημείο Ε. Στη δεύτερη περίπτωση οι ακτίνες αποκλίνουν και εμφανίζονται ως να προέρχονται από ένα κοινό σημείο (Ε΄). Και στις δυο περιπτώσεις η μέγιστη εκτροπή των ακτίνων εμφανίζεται στα πρίσματα που βρίσκονται στα άκρα των διατάξεων, ενώ δεν παρατηρείται εκτροπή των κεντρικών ακτίνων λόγω του ότι το κεντρικό πρίσμα έχει τις έδρες του παράλληλες. Στην πραγματικότητα ο φακός δεν αποτελείται από ομάδα πρισμάτων, αλλά από συμπαγές κομμάτι γυαλιού του οποίου οι επιφάνειες έχουν σχήμα σφαιρικό.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται σε τομή οι δυο βασικοί τύποι φακών. Ο πρώτος φακός που είναι πιο παχύς στο κέντρο και λεπτότερος στα άκρα καλείται συγκλίνων ή θετικός φακός, ενώ ο δεύτερος που είναι πιο λεπτός στο κέντρο και παχύτερος στα άκρα καλείται αποκλίνων ή αρνητικός φακός. Συνήθως οι χρησιμοποιούμενοι φακοί είναι λεπτοί, δηλ. το πάχος τους είναι μικρό σχετικά με το άνοιγμά τους, ή ισοδύναμα, οι προσπίπτουσες στον φακό ακτίνες βρίσκονται κοντά στον κύριο άξονά του.



Εικόνα 5. Οι δυο βασικοί τύποι φακών: (α) συγκλίνων (β) αποκλίνων. Με Ε συμβολίζεται η κύρια εστία και f η εστιακή απόσταση [21]

Από τα βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν ένα απλό λεπτό φακό αυτά που ενδιαφέρουν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είναι:

Ο κύριος άξονας που είναι η ευθεία που διέρχεται από το κέντρο του φακού και είναι κάθετη προς τις δυο πλευρές του στα σημεία που τις συναντά (ενώνει δηλαδή τα δυο κέντρα K₁, K₂ καμπυλότητας του φακού).

Το **οπτικό κέντρο Ο** από το οποίο διέρχεται ο κύριος άξονας (κάθε άλλη ευθεία που διέρχεται από το οπτικό κέντρο χωρίς να είναι κάθετη προς τις πλευρές του φακού αποτελεί το δευτερεύοντα άξονα).

Η κύρια εστία Ε πο βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα και ορίζεται, για μεν το συγκλίνοντα φακό, ως το σημείο εκείνο που θα συγκλίνει μια δέσμη παράλληλων προς τον κύριο άξονα ακτίνων, για δε τον αποκλίνοντα φακό ως το σημείο από το οποίο φαίνεται να ξεκινά μια δέσμη παράλληλων προς τον κύριο άξονα ακτίνων. Λόγω συμμετρίας, κάθε φακός παρουσιάζει δυο εστίες, μια σε κάθε πλευρά του και στην ίδια απόσταση από το οπτικό του κέντρο.

Η εστιακή απόσταση f που είναι η απόσταση μεταξύ της κύριας εστίας και του οπτικού κέντρου και εξαρτάται από την καμπυλότητα των επιφανειών του φακού και από το δείκτη διάθλασης του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η καμπυλότητα των σφαιρικών επιφανειών του φακού, τόσο μικρότερη θα είναι η εστιακή του απόσταση. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι μεγαλύτερη καμπυλότητα των επιφανειών προκαλεί μεγαλύτερη εκτροπή των ακτίνων που διέρχονται από το φακό κοντά στα άκρα του.

Μια πολύ βασική αρχή αναφορικά με τους φακούς είναι η αντιστροφή των ακτίνων. Αν μια σημειακή πηγή φωτός τοποθετηθεί στο σημείο Ε (Εικόνα 5α), οι φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν στο φακό θα διαθλαστούν σε μια δέσμη παράλληλων ακτίνων που διαδίδεται προς τ΄ αριστερά. Κατά παρόμοιο τρόπο, στην Εικόνα 5β, αν οι ακτίνες συγκλίνουν προς την εστία Ε θα διαθλαστούν από το φακό σε μια δέσμη παράλληλων ακτίνων.

2.2.2 Σχηματισμός πραγματικού και φανταστικού ειδώλου από φακούς

Όταν ένα αντικείμενο τοποθετηθεί από τη μια πλευρά ενός συγκλίνοντα φακού και πίσω από την κύρια εστία του Ε τότε από την άλλη πλευρά του φακού θα σχηματιστεί ένα πραγματικό είδωλο (Εικόνα 6). Να σημειωθεί ότι όσο το αντικείμενο πλησιάζει προς την εστία τόσο το είδωλό του θα μεγαλώνει (μεγέθυνση) και τόσο πιο μακριά θα σχηματίζεται από το φακό. Το αντίθετο συμβαίνει όταν το αντικείμενο απομακρύνεται από την εστία, δηλαδή το είδωλο μικραίνει και σχηματίζεται πιο κοντά στο φακό [22]. Γενικά, ο προσδιορισμός της θέσης του ειδώλου δίνεται αριθμητικά από τον τύπο των λεπτών φακών: 1/x+1/y=1/f, όπου x και y οι αποστάσεις του αντικειμένου και ειδώλου αντίστοιχα από το φακό.



Εικόνα 6. Γραφικός προσδιορισμός της θέσης και του μεγέθους ειδώλου

Όπως αναφέρθηκε, το είδωλο που σχηματίστηκε από το φακό στο Σχήμα 4 είναι πραγματικό. Ως πραγματικά ορίζονται τα είδωλα που μπορούν να απεικονιστούν σε πέτασμα και διαμορφώνονται από την τομή των ακτίνων. Τα φανταστικά είδωλα δεν είναι πραγματικά, δεν μπορούν να απεικονιστούν σε πέτασμα και διαμορφώνονται από την τομή των ακτίνων. Τα φανταστικά είδωλα δεν είναι πραγματικά, δεν μπορούν να απεικονιστούν σε πέτασμα και διαμορφώνονται από την τομή των ακτίνων. Τα φανταστικά είδωλα δεν είναι πραγματικά, δεν μπορούν να απεικονιστούν σε πέτασμα και διαμορφώνονται από την τομή των ακτίνων. Τα φανταστικά είδωλα μπορούν να σχηματιστούν: (α) από συγκλίνοντα φακό αν το αντικείμενο τοποθετηθεί κοντά στο φακό και μέσα στην εστία και (β) από αποκλίνοντα φακό με το αντικείμενο τοποθετημένο σε οποιοδήποτε σημείο. Το γεγονός ότι ένα φανταστικό είδωλο δεν μπορεί να απεικονιστεί σε πέτασμα δεν σημαίνει ότι είναι και ανύπαρκτο, έχει δηλαδή συγκεκριμένη θέση στην οποία σχηματίζεται καθώς και συγκεκριμένο μέγεθος και μπορεί να παρατηρηθεί με το μάτι, αν κοιτάξουμε μέσα από το φακό.

Ο λόγος των υψών ειδώλου προς αντικείμενο h_1/h_0 (Εικόνα 6) σε οποιαδήποτε περίπτωση σχηματισμού ειδώλου καλείται εγκάρσια μεγέθυνση m (magnification ratio):

$m = h_1/h_0$. [23]

Λόγω ομοιότητας τριγώνων, η παραπάνω σχέση γράφεται: m=y/x.

2.2.3 Σφάλματα φακών

Ένα βασικό πρόβλημα των φακών και των συστημάτων φακών είναι η ατέλεια των ειδώλων τους. Η βασική θεωρία των φακών στηρίζεται στη υπόθεση ότι οι φωτεινές ακτίνες,που προέρχονται από το αντικείμενο, σχηματίζουν μικρές γωνίες με τον κύριο άξονα. Αυτό βεβαίως δεν είναι πάντα αληθές με αποτέλεσμα το είδωλο σημειακού αντικειμένου να μην είναι σημείο αλλά κηλίδα. Συνεπώς το είδωλο εμφανίζεται ασαφές ή και σε άλλες περιπτώσεις παραμορφωμένο. Τα σφάλματα που ενδιαφέρουν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας είνα η σφαιρική εκτροπή και το χρωματικό σφάλμα.

Σφαιρική εκτροπή συμβαίνει διότι οι ακτίνες που προσπίπτουν στην περιοχή κοντά στο κέντρο του φακού υφίστανται μικρότερη εκτροπή απ' ότι οι ακτίνες που

προσπίπτουν σε περιφερειακά σημεία του φακού (Εικόνα 7). Συνεπώς οι αξονικές ακτίνες εστιάζουν σε διαφορετικό σημείο απ' ότι οι περιφερειακές ακτίνες. Εάν μετά το φακό τοποθετηθεί πέτασμα με σκοπό το σχηματισμό ειδώλου σημειακού αντικειμένου, θα παρατηρηθεί αντί σημείου κηλίδα (σφαιρική εκτροπη ή σφάλμα απο σφαιρικότητα) [21].



Εικόνα 7. Σφαιρική εκτροπή [22]

Το χρωματικό σφάλμα οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε μήκος κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχει διαφορετκό δείκτη διάθλασης. Έτσι, όταν διαφορετικά μήκη κύματος διέρχονται από το ίδιο μέσο εκτρέπονται υπό διαφορετική γωνία. Για παράδειγμα, επειδή το ιώδες φως έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης απ' ότι το ερυθρό φως, η εστιακή του απόσταση θα είναι μικρότερη της εστιακής απόστασης που αντιστοιχεί στο ερυθρό φως (Εικόνα 8). Συνεπώς αν σημειακό αντικείμενο που εκπέμπει λεύκο φως τοποθετηθεί μπροστά σε φακό θα αποικονισθεί σε έγχρωμη κηλίδα (χρωματικό σφάλμα).



Εικόνα 8. Χρωματικό σφάλμα

Τα δύο παραπάνω είδη σφαλμάτων περιορίζονται με τη χρήση ενός αχρωματικού φακού, ο οποίος είναι σχεδιασμένος ώστε να εστιάζει δύο μήκη κύματος (συνήθως το ερυθρό και το κυανό) στο ίδιο σημείο. Ο πιο συνηθισμένος τύπος αχρωματικού φακού είναι ο διπλός αχρωματικός, ο οποίος αποτελείται από δύο ξεχωριστούς φακούς, έναν συγκλίνων (concave) και έναν αποκλίνων (convex) (Εικόνα 9).Τα δύο αυτά στοιχεία του αχρωματικού φακού είναι κολλημένα το ένα πάνω στο άλλο, ευθυγραμμισμένα και σχηματισμένα, ώστε το χρωματικό σφάλμα του ενός να αντισταθμίζει το αντίστοιχο σφάλμα του άλλου.



Εικόνα 9. Αχρωματικός διπλός φακός

2.2.4 Βασικά χαρακτηριστικά των κατόπτρων

<u>Κάτοπτρο</u> θεωρείται κάθε λεία και στιλπνή επιφάνεια η οποία ανακλά όλο το φως που προσπίπτει πάνω της.

Τα κάτοπτρα διακρίνονται σε επίπεδα και καμπύλα. Σε ένα επίπεδο κάτοπτρο μια παράλληλη δέσμη φωτός αλλάζει διεύθυνση κίνησης αλλά εξακολουθεί να παραμένει παράλληλη. Τα είδωλα που παράγονται από επίπεδα κάτοπτρα είναι φανταστικά και έχουν το μέγεθος του πραγματικού αντικειμένου. Τα καμπύλα κάτοπτρα διακρίνονται στα κοίλα, στα οποία η ανάκλαση δημιουργείται από την εσωτερική πλευρά της καμπύλης επιφάνειάς τους, και τα κυρτά, στα οποία συμβαίνει το αντίθετο [20]. Τα καμπύλα κάτοπτρα μπορεί να είναι σφαιρικά ή παραβολικά.



Εικόνα 10. Παράλληλη δέσμη φωτός προσπίπτει σε σφαιρικό κοίλο και σφαρικό κυρτό κάτοπτρο αντίστοιχα [20]

Στην Εικόνα 10 φαίνονται δύο σφαιρικά κάτοπτρα. Τα κοίλα και κυρτά κάτοπτρα έχουν μια ακτίνα καμπυλότητας P και ένα κέντρο καμπυλότητας O. Av A είναι το κέντρο του κατόπτρου, η ευθεία που διέρχεται από τα σημεία A και O ονομάζεται κύριος άξονας του κατόπτρου. Το σημείο που βρίσκεται στο μέσο του τμήματος AO

ονομάζεται κύρια εστία Ε και η απόσταση ΑΕ εστιακή απόσταση f. Στα κοίλα κάτοπτρα η κύρια εστία βρίσκεται μπροστά από το κάτοπτρο ενώ στα κυρτά πίσω από αυτό, (όπως φαίνεται στην Εικόνα 10). Όταν μια παράλληλη δέσμη προσπίπτει πάνω σε ένα κοίλο κάτοπτρο τότε η ανακλώμενη διέρχεται από την εστία Ε, όπως επίσης όταν μια σημειακή πηγή φωτός τοποθετείται στην εστία τότε η ανακλώμενη δέσμη προσπίπτει σέσμη από το κάτοπτρο είναι παράλληλη. Αντίθετα όταν μια παράλληλη δέσμη προσπίπτει σροσπίπτει σε ένα κυρτό κάτοπτρο τότε η προέκταση των ανακλώμενων ακτίνων διέρχεται από την κύρια εστία Ε.

2.2.5 Σχηματισμός ειδώλου στα κοίλα κάτοπτρα

Στην παρούσα εργασία ενδιαφέρουν μόνο τα κοίλα κάτοπτρα. Θεωρούμε, λοιπόν, ένα σημειακό φωτεινό αντικείμενο Α πάνω στον κύριο άξονα ενός κοίλου κατόπτρου το οποίο βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από την εστιακή απόσταση του κατόπτρου. Όλες οι ακτίνες που ξεκινούν από το Α, μετά την ανάκλασή τους στο κάτοπτρο, θα περνούν από το Α΄, το οποίο ονομάζεται **είδωλο του Α** και το οποίο είναι **πραγματικό** διότι προκύπτει από το σημείο τομής των ανακλώμενων ακτινών (Εικόνα 11α). Αν αρχίσουμε να πλησιάζουμε το αντικείμενο , τότε το είδωλο αρχίζει να απομακρύνεται και φθάνει στο άπειρο όταν το φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται μεταξύ της κύριας εστίας και της κορυφής του κατόπτρου (Εικόνα 11β), τότε η φωτεινή δέσμη μετά την ανάκλαση αποκλίνει και συνεπώς το είδωλο είναι **φανταστικό** γιατί προέρχεται από τομή προεκτάσεων ακτίνων.



Εικόνα 11: Σχηματισμός πραγματικού και φανταστικού ειδώλου αντίστοιχα ενός σημειακού αντικειμένου σε κοίλα κάτοπτρα [20]

Αν x και y είναι αντίστοιχα οι αποστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου από την κορυφή του κατόπτρου ισχύει η σχέση, όμοια με αυτή που ισχύει και για τους φακούς: 1/x+1/y=1/f.

Στην περίπτωση που το φωτεινό αντικείμενο Α δεν βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα του κατόπτρου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω αλλά βρίσκεται εκτός αυτού (Εικόνα 12), τότε οι ακτίνες μετά την ανάκλαση τέμνονται σε ένα σημείο Α΄ το οποίο δεν βρίσκεται ούτε αυτό πάνω στον κύριο άξονα.



Εικόνα 12: Σχηματισμός ειδώλου σημειακού αντικειμένου εκτός του κυρίου άξονα του κατόπτρου [20]

Εάν στη θέση του σημειακού φωτεινού αντικειμένου Α που θεωρήσαμε πριν υπάρχει ένα αντικείμενο AB με διαστάσεις, τότε μετά την ανάκλαση δημιουργείται το ανεστραμμένο είδωλο A'B', όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 13: Σχηματισμός ειδώλου ενός αντικειμένου με πραγματικές διαστάσεις [20]

Όπως και στην περίπτωση των φακών, ορίζεται και για τα κάτοπτρα το μέγεθος m (μεγέθυνση-magnification ratio), για το οποίο ισχύει: m = (A'B')/(AB) και m = y/x.

2.2.6 Σφάλματα κατόπτρων

Στην περίπτωση των σφαιρικών κατόπτρων όταν αυτά έχουν σχετικά μεγάλο άνοιγμα ή όταν οι προσπίπτουσες ακτίνες δεν είναι κοντά στον κύριο άξονα του κατόπτρου, εμφανίζεται σφαιρική εκτροπή. Οι προσπίπτουσες ακτίνες δεν συγκλίνουν όλες προς το ίδιο σημείο με αποτέλεσμα, εάν το αντικείμενο είναι σημειακό, το είδωλο να προκύπτει μη σημειακό (κηλίδα) ενώ, εάν το αντικείμενο έχει διαστάσεις, το σχηματιζόμενο είδωλο να έχει ασαφή όρια. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με τα παραβολικά κάτοπτρα των οποίων η ανακλαστική επιφάνεια έχει σχήμα παραβολοειδούς εκ περιστροφής. Τότε αποδεικνύεται ότι οι ακτίνες θα διέλθουν όλες από ένα σημείο ανεξάρτητα από το άνοιγμα του κατόπτρου.

Δύο άλλα σφάλματα που εμφανίζουν τα κάτοπτρα είναι η κόμη και ο αστιγματισμός. Εάν το σημειακό αντικείμενο τοποθετηθεί πάνω σε δευτερεύοντα άξονα του κατόπτρου με μεγάλη κλίση, το είδωλο λαμβάνει τη μορφή κηλίδας με ιδιαίτερο σχήμα και άνιση κατανομή του φωτισμού της. Το σφάλμα αυτό ονομάζεται κόμη λόγω του σχήματος της κηλίδας που ομοιάζει με το σχήμα κομήτη. Οι διαστάσεις της κόμης εξαρτώνται από τη γωνία που σχηματίζουν ο κύριος και δευτερεύων άξονας αλλά κυρίως από το γωνιακό άνοιγμα της διάταξης. Εκτός της κόμης, για σημείο τοποθετημένο σε δευτερεύοντα άξονα με μεγάλη κλίση, δημιουγείται και δεύτερο σφάλμα που ονομάζεται αστιγματισμός. Έτσι οι ακτίνες που προέρχονται από το φωτεινό σημείο μετά την έξοδο τους από το φακό δεν εστιάζουν σε σημείο, αλλά διέρχονται από τμήματα δύο ευθειών καθέτων μεταξύ τους.

2.3 Διαφορές μεταξύ σκιαγραφίας και τεχνικής Schlieren

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι τυπικές διατάξεις της μεθόδου της σκιαγραφίας και της τεχνικής Schlieren.



Εικόνα 14: Σχηματική αναπαράσταση απλής διάταξης άμεσης σκιαγραφίας.



Εικόνα 15: Σχηματική αναπαράσταση τυπικής διάταξης Schlieren με σημειακή πηγή.

Οι δύο οπτικές μέθοδοι είναι συναφείς αλλά παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Η βασικότερη είναι η ύπαρξη της κόψης του μαχαιριού, ή γενικότερα μιας ακμής, που αποκόπτει τις μισές ακτίνες φωτός στη μέθοδο Schlieren, κάτι το οποίο απουσιάζει από τη διάταξη της σκιαγραφίας. Επιπλέον, στη μέθοδο Schlieren η τελική εικόνα διαμορφώνεται από φακό (ή κάτοπτρο) με αποτέλεσμα να είναι μια σαφής απεικόνιση του αντικειμένου ενώ στη σκιαγραφία η εικόνα που δημιουργείται δεν είναι εστιασμένη, είναι μια απλή σκιά. Σημαντικό είναι, επίσης, το γεγονός ότι στην τεχνική Schlieren το επίπεδο φωτισμού αντιστοιχεί στην πρώτη χωρική παράγωγο του δείκτη διάθλασης $\frac{\partial n}{\partial x}$, ενώ στη σκιαγραφία αντιστιχεί στη δεύτερη χωρική παράγωγο $\frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$. Κατ'επέκταση, το αποτέλεσμα του Schlieren οφείλεται στη γωνία εκτροπής ε της φωτεινής ακτίνας, ενώ αντίστοιχα το σκιαγράφημα δείχνει τη μετατόπιση Δα της ακτίνας, η οποία προκαλείται από την γωνιακή εκτροπή.

Μία ακόμη διαφορά μεταξύ των δύο τεχνικών αφορά στον εξοπλισμό που απαιτείται για την εφαρμογή τους. Η σκιαγραφία είναι αρκετά εύκολη μέθοδος ως προς την υλοποίησή της καθώς δε χρειάζεται υψηλή τεχνολογία, όπως αποδεικνύει και το γεγονός ότι σκιαγραφήματα δημιουργούνται από μόνα τους στη φύση με πηγή φωτός τον ήλιο. Αντίθετα, η μέθοδος Schlieren απαιτεί ειδικό οπτικό εξοπλισμό με μεγάλο κόστος (λάμπες, κάτοπτρα, φακούς) και γι' αυτό το λόγο εφαρμόζεται κυρίως μέσα σε εργαστήρια, ενώ ως φαινόμενο στη φύση μπορεί να παρατηρηθεί κάτω από πολύ περιοριρισμένες συνθήκες.

Ένα πλεονέκτημα της σκιαγραφίας είναι ότι επιτρέπει μεγάλης κλίμακας απεικονίσεις. Δείχνει τα βασικά χαρακτηριστικά του αντικειμένου χωρίς μεγάλες αλλαγές στο φωτισμό. Παρόλο που, γενικά, είναι λιγότερο ευαίσθητη μέθοδος απο το Schlieren, σε ειδικές περιπτώσεις συμβαίνει ο όρος $\frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$ να είναι πολύ μεγαλύτερος
από τον $\frac{\partial n}{\partial x}$, όπως στην περίπτωση αέριας ροής που περιλαμβάνει ωστικά κύματα ή φαινόμενα τύρβης, συνήθως γύρω από υπερηχητικά βλήμματα. Η σκιαγραφία παρέχει, χάρις την διπλή διαφοροποίησή της, συγκεκριμένης κλίμακας εικόνες τυρβώδους ροής. Τα ωστικά κύματα, ως φυσικά βηματικά φαινόμενα, παράγουν πολύ μεγάλες μεταβολές στο δείκτη διάθλασης (δηλαδή μεγάλες τιμές της παραγώγου του) με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ως έντονες γραμμές σε ένα σκιαγράφημα.

Ωστόσο, για την απεικόνιση ασθενέστερων διαταραχών (π.χ. μικρότερων μεταβολών στην πίεση ή τη θερμοκρασία ενός μέσου), η μέθοδος Schlieren κρατά το προβάδισμα λόγω υψηλής ευαισθησίας. Παρέχει μια σαφή απεικόνιση του φαινομένου σε κλίμακα 1:1 και τονίζει ιδιαίτερα τις λεπτομέρειες του προς μελέτη αντικειμένου. Έτσι, έχει τη δυνατότητα προσαρμογής και εφαρμογής σε ένα ευρύ φάσμα μελετών και πειραμάτων.

Παρά τις σημαντικές διαφορές τους, οι δύο παραπάνω τεχνικές αποτελούν ολοκληρωμένα οπτικά συστήματα που μπορούν να προβάλουν την πληροφορία σε χαρτί ή στο εστιακό επίπεδο μιας φωτογραφικής μηχανής. Κατ'επέκταση είναι κατάλληλα για διδιάστατα κυρίως φαινόμενα, αλλά εξίσου χρήσιμα και σε οποιοδήποτε τριδιάστατο φαινόμενο. Ακόμη και όταν το αντικείμενο μελέτης δεν έχει επίπεδες επιφάνειες, γίνεται η θεώρηση ενός ισοδύναμου επιπέδου στο οποίο προβάλλονται οι αποκλίσεις των ακτίνων.

2.4 Βασικές διατάξεις Schlieren

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες διατάξεων Schlieren: αυτή που χρησιμοποιεί φακούς (lens-type Schlieren system) και εκείνη που περιλαμβάνει κάτοπτρα (mirrortype Schlieren system). Παρακάτω παρουσιάζονται βασικά ολοκληρωμένα συστήματα Schlieren και από τις δύο κατηγορίες και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας τους.

2.4.1 Σύστημα Schlieren με φακούς και σημειακή πηγή φωτός.

Το σύστημα αποτελείται από ένα ζεύγος φακών, μια σημειακή πηγή φωτός, την κόψη ενός μαχαιριού (knife-edge), που είναι συνήθως η ακμή ενός απλού ξυραφιού, και ένα επίπεδο προβολής (screen). Αρχικά, ακολουθούμε την πορεία του φωτός χωρίς να λάβουμε υπόψιν την ακμή και προς το παρόν χωρίς να τοποθετήσουμε κάποιο αντικείμενο στην περιοχή μελέτης (test area). Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5 η δέσμη φωτός από τη σημειακή πηγή γίνεται παράλληλη από τον πρώτο φακό και στη

συνέχεια ξαναεστιάζεται από το δεύτερο φακό. Από εκεί η δέσμη προχωρά στο επίπεδο προβολής (οθόνη). Η περιοχή δοκιμής όπου θα βρεθεί το αντικείμενο μελέτης (S) βρίσκεται μέσα στην παράλληλη δέσμη φωτός μεταξύ των δύο φακών. Έτσι, στην οθόνη σχηματίζεται ένα πραγματικό ανεστραμμένο είδωλο της περιοχής δοκιμής. Σ'αυτό το σημείο το όλο οπτικό σύστημα είναι απλώς ένα σύστημα προβολής το οποίο αποτυπώνει αδιαφανή αντικείμενα της περιοχής δοκιμής ως σιλουέτες πάνω στην οθόνη. Τα διαφανή αντικείμενα Schlieren δεν προβάλλονται καθόλου μέχρι να προστεθεί η ακμή στην εστία του δεύτερου φακού. Καθώς το η ακμή προχωράει προς την εστία και αποκόπτει σταδιακά το φως της πηγής, η φωτεινή οθόνη σκοτεινιάζει. Ο ακριβής τρόπος με τον οποίο πρέπει να τοποθετηθεί η ακμή του μαχαιριού αναλύεται στο 4° κεφάλαιο.



Εικόνα 16: Σχηματική αναπαράσταση απλοποιημένου συστήματος Schlieren με σημειακή πηγή φωτός [15].

Προσθέτοντας ένα αντικέιμενο Schlieren S, δηλαδή ένα διαφανές ανομοιογενές μέσο, μεταξύ των δύο φακών, αυτό προκαλεί εκτροπή των ακτίνων φωτός από την αρχική τους παράλληλη πορεία. Ωστόσο, ο δεύτερος φακός εστιάζει τις ακτίνες που διέρχονται από κάθε σημείο του S σε ένα αντίστοιχο σημείο στην οθόνη. Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται δύο τέτοιες ακτίνες, οι οποίες διερχόμενες από το S εκτρέπονται προς διαφορετικές κατευθύνσεις, η μία προς τα πάνω και η άλλη προς τα κάτω, και αποκλίνουν από την εστία του δεύτερου φακού. Αυτή που διαθλάται προς τα πάνω φωτίζει ένα σημείο πάνω στην οθόνη, ενώ η δεύτερη χτυπά πάνω στην ακμή με αποτέλεσμα το αντίστοιχο σημείο της οθόνης να παραμένει σκοτεινό μέσα σε ένα φωτεινό φόντο. Γι'αυτή τη συγκεκριμένη περιοχή του αντικειμένου Schlieren, η διαφορά φάσης (π.χ. διαφορά θερμοκρασίας ή πίεσης ή πυκνότητας), που προκαλεί την κλίση του δείκτη διάθλασης στην κατακόρυφη κατεύθυνση, $\frac{\partial n}{\partial y}$, μετατρέπεται σε

διαφορά έντασης φωτός και το αόρατο γίνεται ορατό. Γενικεύοντας το παραπάνω παράδειγμα των δύο ακτίνων, ένα αντικείμενο Schlieren διαθλά πολλές τέτοιες ακτίνες σε πολλές κατευθύνσεις. Όσες ακτίνες εκτρέπονται προς τα κάτω, αποκόπτονται από την ακμή δημιουργώντας με σκιές τουλάχιστον μία μερική εικόνα του αντικειμένου πάνω στη φωτισμένη οθόνη. Αυτό είναι ένα υπεραπλουστευμένο παράδειγμα της τεχνικής Schlieren που, όμως, παρουσιάζει στην ουσία του τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος. Στο σύστημα που περιγράφηκε η ακμή του μαχαιριού (ή ξυραφιού) είναι τοποθετημένη οριζόντια, οπότε ανιχνεύει μόνο τις κατακόρυφες συνιστώσες $\frac{\partial n}{\partial y}$ της κλίσης του δείκτη διάθλασης σε ένα αντικείμενο Schlieren. Γενικά, μια απλή ακμή μαχαιριού επιδρά μόνο στις διαθλάσεις των ακτίνων που έχουν συνιστώσες κάθετες σε αυτήν. Δηλαδή μπορούν να αποτυπωθούν μόνο οι μεταβολές του δείκτη διάθλασης που συμβαίνουν στην κατεύθυνση που ειναι κάθετη στην ακμή. Έτσι, οι διαθλάσεις που συμβαίνουν παράλληλα σ'αυτήν, οφειλόμενες στο $\frac{\partial n}{\partial x}$, μετακινούν τις ακτίνες κατά μήκος της κόψης και όχι εγκάρσια σ'αυτή, άρα δεν μπορούν να γίνουν ορατές στην οθόνη. Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι για να αποτυπωθεί σωστά το φαινόμενο Schlieren πρέπει να συνδυαστούν δύο εικόνες εκ των οποίν η μία να προκύπτει από οριζόντια και η άλλη από κατακόρυφη ακμή. Ακόμα καλύτερο είναι το αποτέλεσμα αν αντί για μια απλή ακμή μαχαιριού, χρησιμοποιηθεί μία αδιαφανής μάσκα με μια κυκλική οπή. Ωστόσο, στην πράξη χάριν ευκολίας τα περισσότερα συστήματα Schlieren χρησιμοποιούν μια απλή κόψη ξυραφιού με ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Συμπερασματικά, το σύστημα Schlieren με σημειακή πηγή φωτός είναι η ιδανική περίπτωση εφαρμογής της τεχνικής. Αυτό που υλοποιείται, όμως, στην πραγματικότητα είναι το σύστημα Schlieren με εκτεταμένη μακρόστενη πηγή φωτός.

2.4.2 Σύστημα Schlieren με φακούς και εκτεταμένη πηγή φωτός.

Όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, το ζεύγος φακών της προηγούμενης προσέγγισης παραμένει, αλλά προστίθεται και ένας τρίτος συγκλίνων φακός μετά την ακμή. Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση της σημειακής πηγής δεν χρειαζόταν ο τρίτος φακός γιατί, επειδή το φως προέρχεται από ένα και μόνο σημείο, είναι αυτομάτως εστιασμένο όταν φτάνει στην οθόνη.



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση απλοποιημένου συστήματος Schlieren με εκτεταμένη πηγή φωτός [15].

Το σύστημα συντεταγμένων είναι το ίδιο, με κύριο άξονα τον άξονα z, όπως δείχνει η εικόνα. Μια μη συγκεντρωμένη δέσμη φωτός κατευθύνεται από την εκτεταμένη πηγή φωτός, η οποία σχεδιάζεται ως βέλος με κατεύθυνση προς τα κάτω στο σχήμα και συνήθως έχει τη μορφή μιας ορθογωνικής σχισμής στο επίπεδο x-y. Η δέσμη ευθυγραμμίζεται από τον πρώτο φακό, διασχίζει την περιοχή μελέτης και επανεστιάζεται από τον δεύτερο φακό σχηματίζοντας ένα ανεστραμμένο είδωλο της πηγής πάνω στην ακμή του μαχαιριού. Επειδή η πηγή δεν είναι πλέον ένα σημείο, η ευθυγράμμιση από τον πρώτο φακό δεν παράγει ακριβώς παράλληλες ακτίνες. Στην πραγματικότητα, είναι σαν να υπάρχει μια συστοιχία σημειακών πηγών κατανεμημένων καθ'ύψος της εκτεταμένης πηγής και καθεμιά από αυτές τις σημειακές πηγές να παράγει μια ξεχωριστή δέσμη φωτός η οποία εστιάζεται σε ένα αντίστοιχο σημείο πάνω στην ακμή. Αυτό φαίνεται στο σχήμα, όπου έχουν σχεδιαστεί μόνο οι ακραίες ακτίνες από την κορυφή και τη βάση της πηγής.

Η κόψη του μαχαιριού αποκόπτει ένα κομμάτι, ας θεωρήσουμε το μισό, του ειδώλου της εκτεταμένης πηγής. Πίσω από την ακμή αυτή ένας τρίτος φακός, που θα μπορούσε να είναι ένας συγκλίνων φακός ή ο φακός μιας φωτογραφικής μηχανής, χρησιμοποιείται για να εστιάσει το ανεστραμμένο είδωλο της υπό μελέτης περιοχής Schlieren πάνω στην οθόνη προβολής. Η πηγή φωτός, η ακμή, η περιοχή δοκιμής και η οθόνη πρέπει να βρίσκονται όλα στο ίδιο επίπεδο. Έτσι, ένα ακριβές είδωλο της πηγής δημιουργείται πάνω στην ακμή και ένα πραγματικό είδωλο του αντικειμένου Schlieren εμφανίζεται στην οθόνη.

Επειδή η πηγή φωτός έχει ένα συγκεκριμένο μέγεθος, κάθε σημείο της περιοχής δοκιμής φωτίζεται από αμέτρητες ακτίνες στο εσωτερικό του κώνου που δημιουργούν τα όρια της πηγής. Δηλαδή κάθε σημείο της πηγής φωτίζει κάθε σημείο της περιοχής δοκιμής. Αυτό προσδίδει βάθος πεδίου στο σύστημα Schlieren, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει στην περίπτωση της σημειακής πηγής. Επίσης, έχει ένα πολύ σημαντικό αποτέλεσμα: τη δημιουργία ενός «σύνθετου» ή «μεικτού» ειδώλου της πηγής πάνω στο επίπεδο της λεπίδας του μαχαιριού. Αυτό το είδωλο είναι η υπέρθεση πολλών ξεχωριστών στοιχειωδών ειδώλων της φωτεινής πηγής προερχόμενων από κάθε σημείο της περιοχής δοκιμής. Έτσι, κάθε σημείο της περιοχής δοκιμής προσθέτει ένα ολόκληρο στοιχειώδες είδωλο της πηγής στο τελικό «σύνθετο» είδωλο που δημιουργείται πάνω στην ακμή. Εάν δεν υπάρχει αντικείμενο Schlieren στην περιοχή δοκιμής τότε καθώς η ακμή προγωρά για να αποκόψει όλο και μεγαλύτερο κομμάτι του «σύνθετου» ειδώλου της πηγής, αυτό που συμβαίνει είναι ότι αποκόπτει κάθε στοιχειώδες είδωλο εξίσου. Επομένως, αφού κάθε σημείο της περιοχής δοκιμής στερείται εξίσου το φως, η οθόνη σκοτεινιάζει ομοιόμορφα. Αυτό είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του ειδώλου Schlieren.

Εξετάζουμε, ένα σημείο του αντικειμένου Schlieren S που βρίσκεται στην υπό μελέτη περιοχή. Σε αντίθεση με την Εικόνα 16 όπου μία μόνο ακτίνα εκτρέπεται, σε αυτήν την περίπτωση μία δέσμη ακτίνων προερχόμενη από όλα τα σημεία της φωτεινής πηγής υφίσταται διάθλαση υπό γωνία ε. Αυτή η δέσμη, που φαίνεται με διακεκομένη γραμμή στην Εικόνα 17, προχωρά για να σχηματίσει ένα στοιχειώδες είδωλο της

πηγής στο επίπεδο της λεπίδας του μαχαιριού το οποίο εξαιτίας της διάθλασης είναι μετατοπισμένο σε σχέση με το αδιατάραχτο «σύνθετο» είδωλο της πηγής. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 18.



Εικόνα 18:Σχηματική αναπαράσταση του επιπέδου της λεπίδας του μαχαιριού. Το ορθογώνιο μήκους b και ύψους h παριστάνει το «σύνθετο» είδωλο της πηγής, το οποίο αποκόπτεται από την ακμή του μαχαιριού, αφήνοντας ένα ύψος α ασκίαστο. Εξαιτίας της διάθλασης σε κάποιο σημείο του αντικειμένου Schlieren, ένα ασθενές στοιχειώδες είδωλο της πηγής μετατοπίζεται προς τα πάνω και προς τα δεξιά και αποκόπτεται από την ακμή αφήνοντας ασκίαστο ένα τμήμα ύψους α+Δα [15].

Παρά τη μετατόπιση αυτή στο επίπεδο της λεπίδας, η δέσμη ακτίνων επιστρέφει, περνώντας από τον τρίτο φακό, στην ίδια σχετική θέση πάνω στο επίπεδο της οθόνης. Αυτό συμβαίνει, σύμφωνα με τις ιδιότητες ενός φακού, ανεξάρτητα από τη γωνία ε με την οποία οι ακτίνες αφήνουν την περιοχή δοκιμής. Με αυτόν τον τρόπο διαχωρίζονται οι διαθλώμενες ακτίνες από τις αδιατάραχτες που δημιουργούν το γενικότερο φωτισμένο φόντο. Αφού διαχωρίζονται, οι διαθλώμενες ακτίνες υφίστανται ένα διαφορετικό ποσοστό αποκοπής από την ακμή, με αποτέλεσμα όταν επανασυνδυάζονται στην οθόνη να προσδίδουν διακυμάνσεις στην ένταση του φωτός πάνω στο ήδη φωτισμένο φόντο. Η τελική εικόνα δημιουργείται από πολλά τέτοια σημεία διαφορετικής φωτεινότητας που αντιστοιχούν στο μέγεθος, το σχήμα και την πυκνότητα του αντικειμένου Schlieren. Επομένως, αυτή η διάταξη υπερέχει αυτής στην Εικόνα 16 γιατί η εκτεταμένη πηγή φωτός επιτρέπει τη δημιουργία εικόνας σε συνεχή κλίμακα του γκρι και όχι απλή εναλλαγή άσπρου-μαύρου. Βέβαια, και σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να αποτυπωθούν μόνο διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης που συμβαίνουν σε διεύθυνση κάθετη αυτής της ακμής του μαχαιριού.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο τρίτος συγκλίνων φακός δεν είναι απαραίτητος παρόλο που συχνά χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει το μέγεθος του ειδώλου στην οθόνη. Ακόμη και χωρίς αυτόν, ο δεύτερος φακός μπορεί να δημιουργήσει μια ικανοποιητική εικόνα του Schlieren εάν τοποθετηθεί σε κατάλληλη απόσταση από το αντικείμενο Schlieren. Επίσης, να επισημανθεί ότι μια γυμνή λάμπα είναι σπάνια επαρκής για να χρησιμοποιηθεί ως εκτεταμένη πηγή φωτός. Αυτό που χρειάζεται επιπλέον είναι ένας συγκεντρωτικός φακός και ένα σλιτ, δηλαδή ένα λεπτό έλασμα που φέρει μια σχισμή από την οποία διέρχεται το φως. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια φωτεινή πηγή μεγάλης έντασης και με σαφή όρια στην εστία του πρώτου φακού.

Το απλοποιημένο σχήμα της Εικόνα 17 βελτιώνεται με εφαρμογή όσων αναφέρθηκαν και καταλήγει στο ολοκληρωμένο σύστημα Schlieren της Εικόνα 19. Όπως φαίνεται, για τη δημιουργία μιας δυνατής σε ένταση φωτεινής πηγής με σαφή όρια χρησιμοποιείται ένα λαμπτήρας, ένας συγκεντρωτικός φακός και ένα σλιτ. Η περιοχή παράλληλης δέσμης φωτός δημιουργείται από δύο διπλούς φακούς, και τέλος η εικόνα αποτυπώνεται απευθείας στο εστιακό επίπεδο μιας φωτογραφικής μηχανής (στο φιλμ αν πρόκειται για αναλογική ή στον αισθητήρα αν πρόκειται για ψηφιακή).



Εικόνα 19: Ολοκληρωμένο σύστημα Schlieren με διπλούς φακούς που οδηγεί την εικόνα απευθείας στο εστιακό επίπεδο μιας φωτογραφικής μηχανής [15].

Παρόλο που τα συστήματα Schlieren με φακούς αποτελούνται από οπτικά οποία βρίσκονται στην ίδια ευθεία και κατ'επέκταση εξαρτήματα τα ευθυγραμμίζονται πιο εύκολα, ευρεία εφαρμογή βρίσκουν και τα συστήματα Schlieren τύπου Ζ με κάτοπτρα. Η ευθυγράμμιση των οπτικών σε αυτήν την περίπτωση είναι πιο δύσκολη και προκαλούνται συχνά φαινόμενα εκτροπής του φωτός και οπτικά σφάλματα (κόμη και αστιγματισμός). Να σημειωθεί, όμως, ότι και στο σύστημα με τους φακούς προκαλούνται σφάλματα. Συγκεκριμένα προκαλούνται χρωματικά σφάλματα, τα οποία αναφέρθηκαν και νωρίτερα, ακόμα και αν γρησιμοποιηθούν ακριβοί αγρωματικοί φακοί. Αυτό συμβαίνει λόγω της μερικής αποκοπής του φάσματος του λευκού φωτός από την κόψη του μαχαιριού και προκαλεί συχνά χρωματικές ανωμαλίες στην εικόνα Schlieren. Τέλος, το γεγονός ότι οι σύγχρονοι φακοί απαιτούν υψηλής ποιότητας επεξεργασία τόσο στο εσωτερικό όσο και στις εξωτερικές επιφάνειές τους, αυξάνει το κόστος των συστημάτων Schlieren με φακούς σε σχέση με τα συστήματα με κάτοπτρα, τα οποία απαιτούν μία μόνο εξωτερική επιφάνεια τέλεια λειασμένη.

2.4.3 Σύστημα Schlieren τύπου Ζ με 2 κάτοπτρα

Υπάρχουν διάφορες διατάξεις Schlieren που υλοποιούνται με σφαιρικά ή παραβολικά και εκτός άξονα κάτοπτρα. Η πλέον διαδεδομένη διάταξη με κάτοπτρα είναι η τύπου Ζ που πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον αστρονόμο Herschel [15] και χρησιμοποιεί δύο αντιθέτως στραμμένα, εντός-άξονα (in-axis) τηλεσκοπικά παραβολικά κάτοπτρα μεταξύ των οποίων βρίσκεται η υπό μελέτη περιοχή. Το όνομα οφείλεται στο σχήμα της διάταξης άρα και της διαδρομής που ακολουθεί το φως, όπως φαίνεται στην Εικόνα 20.



Εικόνα 20: Διάταξη Schlieren τύπου Ζ [15].

Τα κάτοπτρα που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες διατάξεις είναι συνήθως δύο όμοια, συμμετρικά, εντός άξονα παραβολικά. Τα πλεονεκτήματα της παράλληλης δέσμης φωτός που αναφέρθηκαν στο σύστημα με τους φακούς εξακολουθούν να ισχύουν και στην περίπτωση του συστήματος Ζ. Τα κάτοπτρα, όμως, υπερτερούν γιατί για ένα δεδομένο κόστος της διάταξης επιτρέπουν μεγαλύτερης διαμέτρου περιοχή μελέτης.

Σε μια διάταξη Ζ υπάρχουν κάποιοι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται η επιτυχία της μεθόδου να αποτυπώσει σωστά το φαινόμενο Schlieren. Η απόσταση μεταξύ των δύο κατόπτρων προτείνεται να είναι τουλάχιστον διπλάσια της εστιακής απόστασης των κατόπτρων που χρησιμοποιούνται κάθε φορά, ώστε να δημιουργείται ο απαιτούμενος χώρος για την περιοχή δοκιμής. Στην πράξη, αρκεί η απόσταση αυτή να είναι μεγαλύτερη της εστιακής απόστασης του κατόπτρου. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που ενδιαφέρει είναι ο αριθμός λ του κατόπτρου. Αυτός ορίζεται ως το πηλίκο της εστιακής απόστασης προς τη διάμετρο αυτού, δηλαδή $\lambda=f/D$. Θα πρέπει ο αριθμός λ να είναι μεγάλη σε σχέση με τη διάμετρο του κατόπτρου. Επιπλέον, οι γωνίες κατά τις οποίες στρέφονται τα δύο κάτοπτρα ως προς τον οπτικό τους άξονα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες. Ο μικρός αριθμός λ (συγκεκριμένα τα μικρής εστιακής απόστασης κάτοπτρα) και οι μεγάλες γωνίες στρέψης ευνοούν τα οπτικά σφάλματα της κόμης και του αστιγματισμού. Εάν, ωστόσο, οι γωνίες στρέψης των δύο κατόπτρον είναι ίσες και φυσικά πολύ μικρές, μπορεί να εξαλειφθεί το

φαινόμενο της κόμης, κάτι το οποίο δεν μπορεί, δυστυχώς, να γίνει για τον αστιγματισμό.

2.4.4 Συστήματα Schlieren με χρήση άλλων πηγών φωτός

Σε όλες τις παραπάνω διατάξεις η πηγή φωτός αποτελεί λευκό φως από έναν κοινό λαμπτήρα πυρακτώσεως (στην περίπτωση της εκτεταμένης πηγής) ή από ένα led (στην περίπτωση της σημειακής πηγής). Πρέπει να αναφερθεί ότι το σύστημα Schlieren υλοποιείται και με μονοχρωματκό φως, δηλαδή με κάποιο λέιζερ ως πηγή φωτός. Στην περίπτωση αυτή όμως, δημιουργούνται φαινόμενα συμβολής, καθώς το λέιζερ είναι σύμφωνο φως, και η τελική εικόνα αποτελείται από εναλλασσόμενες λωρίδες φωτός και σκιάς που αλλοιώνουν την απεικόνιση του φαινομένου Schlieren. Το πρόβλημα αυτο λύνεται με χρήση κατάλληλου οπτικού εξοπλισμού,αλλά κάτι τέτοιο δεν ανήκει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

2.5 Εφαρμογές

Τα συστήματα Schlieren και σκιαγραφίας βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε πληθώρα επιστημονικών πεδίων: μηχανολογία, μηχανική των ρευστών, φυσική, βιολογία. Μπορούν να αποτυπώσουν φαινόμενα τόσο σε στερεά όσο και σε υγρά και αέρια σώματα. Για παράδειγμα, αναφορικά με τα στερεά μέσα, έχουν χρησιμοποιηθεί στην τεχνολογία του γυαλιού για ανίχνευση πιθανών ραγισμάτων ή διαφορών στην πυκνότητά του [15] και των πολυμερών για χαρακτηρισμό ατελειών σε λεπτά φύλλα πολυμερών υλικών [24]. Ειδικότερα η σκιαγραφία εφαρμόζεται στη μελέτη της αστοχίας διαφόρων υλικών λόγω θραύσης [25] καθώς και σε βαλλιστικές εξετάσεις κατά την κρούση βλήματος πάνω σε συμπαγές σώμα [26].

Το γεγονός ότι οι μέθοδοι αυτές μπορούν να αποτυπώσουν τις διαφορές στην πυκνότητα ενός υλικού ή μεταξύ διαφορετικών υλικών, τις καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμες σε εφαρμογές σε υγρά μέσα για τη μελέτη μεταφοράς μάζας και θερμότητας με συναγωγή [27],[28]. Ακόμη, έχουν χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση επιφανειακών κυμάτων [29], δέσμης υγρού που διασκορπίζεται σε μικρά σταγονίδια (σπρέι) και τη μελέτη υπερήχων μέσα σε νερό [15]. Και στα υγρά, η βαλλιστική μελέτη εφαρμόζει τις οπτικές αυτές μεθόδους για στρατιωτικούς σκοπούς και ιατροδικαστικούς ελέγχους.

Σε ό,τι αφορά την εφαρμογή σε αέρια σώματα, ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο ρόλος των δύο τεχνικών στην οπτικοποίηση της ροής γύρω από αεροπλάνα και βλήμματα. Σε συνδυασμό με μία κάμερα υψηλής ταχύτητας αποτυπώνεται με εξαιρετική

ακρίβεια η δημιουργία ενός ωστικού κύματος λόγω των ακαριαίων μεταβολών που συμβαίνουν στην πίεση, τη θερμοκρασία και την πυκνότητα του αερίου [30]. Μπορεί ακόμη να γίνει απεικόνιση της υπερηχητικής ροής γύρω από μια δέσμη αερίου και των ηχητικών κυμάτων που προκαλούνται από αυτήν. Επίσης, η σκιαγραφία και η μέθοδος Schlieren έχουν βρει εφαρμογή στους τομείς της γεωργίας (για μελέτη της ροής θερμότητας μέσα σε θερμοκήπια) [31], της αρχιτεκτονικής (για μελέτη της ακουστικής των χώρων) [32], της θέρμανσης και του κλιματισμού (ομοίως για μελέτη της της ροής θερμότητας σε εσωτερικούς χώρους) [15], της βιοιατρικής (σε οφθαλμολογικές μελέτες και στην επιδημιολογία) [33], [34], [35], [36] και σε βιομηχανική κλίμακα (για ανίχνευση διαρροής αερίων καυσίμων) [37].

Στον τομέα της μηχανολογίας και πιο συγκεκριμένα της καύσης οι μέθοδοι αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στην εξαγωγή και ποσοτικών, εκτός των ποιοτικών, αποτελεσμάτων. Ειδικότερα η μέθοδος Schlieren χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της στρωτής ταχύτητας καύσης αερίων και υγρών καυσίμων. Σε δοχείο όπου λαμβάνει χώρα ελεγχόμενη έκρηξη μικρής κλίμακας (combustion bomb), εφαρμόζεται η τεχνική για να αποτυπώσει, με τη βοήθεια φωτογραφικής μηχανής υψηλής ταχύτητας, τη διάδοση του μετώπου της φλόγας ώστε να επεξεργαστούν τα αποτελέσματα για τη μέτρηση της ταχύτητας καύσης [38],[40]. Αυτή η μελέτη επιτρέπει το χαρακτηρισμό των καυσίμων, ιδιαίτερα των νέων και εναλλακτικών που χρησιμοποιούνται σε νέες τεχνολογίες (για παράδειγμα μίγματα υγρογονανθράκων με υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα). Τέλος, η μέθοδος Schlieren εφαρμόζεται και σε μηχανές εσωτερικής καύσης όπου υπάρχει ανάγκη για μελέτη της ροής του μίγματος καυσίμου-αέρα, μελέτη της διάδοσης του μετώπου της φλόγας και των συνθηκών έγχυσης και αεριοποίησης του καυσίμου στον κύλινδρο [15], [39].

Οι πιο διαδεδομένες φωτογραφίες Schlieren απεικονίζουν τη θερμότητα που εκπέμπει ένας ανθρώπινος οργανισμός ή ένα αντικείμενο που φλέγεται ή θερμαίνεται.



Εικόνα 21: Θερμότητα που εκπέμπει το ανθρώπινο σώμα [15]



Εικόνα 22: Ο βήχας προκαλεί θερμό αέρα να εξέλθει από τους πνεύμονες. Η συγκεκριμένη φωτογραφία Schlieren [15] έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά επιστημονικά άρθρα που αναφέρονται σε επιδημίες



Εικόνα 23. Φωτογραφίες Schlieren που απεικονίζουν τη θερμότητα που εκπέμπει ένα θερμαινόμενο τείχος στο νερό που το περιβάλλει [28]



Εικόνα 24. Κωνικά βλήματα διαφορετικής γωνίας εκτοξεύονται με υπερηχητική ταχύτητα μέσα σε εύφλεκτο αέριο μίγμα προκαλώντας έκρηξη[30]



Εικόνα 25: Οπτικοποίηση ακουστικού πεδίου με τη μέθοδο Schlieren [41]



Εικόνα 26. Διάδοση υπερηχητικού κύματος καύσης αερίου μίγματος, μέσα σε κύλινδρο με διαδοχικά εμπόδια [40]



Εικόνα 27 Διάδοση του μετώπου της φλόγας μετά από έκρηξη σε combustion bomb. Οι φωτογραφίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της στρωτής ταχύτητας καύσης[42]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανάλυση καυσαερίων

Εισαγωγή

Η μέτρηση και ανάλυση των αερίων προϊόντων ενός συστήματος καύσης παρέχει σημαντικά στοιχεία για τον προσδιορισμό τόσο του βαθμού απόδοσης της διαδικασίας της κάυσης όσο και των εκπεμπόμενων από την εγκατάσταση ρύπων. Τα συνηθέστερα μετρούμενα αέρια συστατικά των καυσαερίων είναι το οξυγόνο (O2) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO2), που αποτελούν κύρια προϊόντα της καύσης, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του θείου (SO_x) και του αζώτου (NOx), οι υδρογονάνθρακες C_xH_v), η αιθάλη και τα στερεά σωματίδια. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται είτε με εξειδικευμένες για κάθε ουσία συσκευές, είτε με τη χρήση ενός σύνθετου οργάνου, του αναλυτή καυσαερίων, ο οποίος ενσωματώνει τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αρχικά αναφορά στους κυριότερους ρύπους που καταγράφηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης και στη συνέχεια θα περιγραφεί ο τρόπος λειτουργίας του αναλυτή καυσαερίων. Να σημειωθεί ότι επειδή τα καύσιμα που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις ήταν αέρια, δε γίνεται λόγος για τέφρα και στερεά σωματίδια ενώ δεν σχηματίστηκε καθόλου SO_x καθώς τα καύσιμα δεν περιείχαν θείο. Τέλος, προηγούμενες μελέτες με εφαρμογή της μεθόδου αέριας χρωματογραφίας (GC) στο συγκεκριμένο σύστημα καύσης έχουν δείξει ότι δεν υπάρχουν καθόλου, ή τουλάχιστον δεν είναι ανιχνεύσιμες, συγκεντρώσεις C_xH_v [44].

3.1 Καυσαέρια

Τα κύρια προϊόντα της καύσης με οξειδωτικό τον αέρα είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), ο υδρατμός (H₂O), το άζωτο (N₂) και στην περίπτωση καύσης

φτωχού μίγματος το οξυγόνο (O₂). Από αυτά εκείνο που προκαλεί περιβαλλοντικά προβλήματα, όταν παράγεται σε μεγάλες συγκεντρώσεις, είναι το CO₂. Δεν συγκαταλέγεται στους ρύπους, ωστόσο εντείνει το φαινόμενο του θερμοκηπίου και υπάρχουν αυστηροί περιορισμοί για τα επίπεδα εκπομπών του [3].

Επικίνδυνοι ρύποι που παράγονται από την καύση και ενδιαφέρουν στην παρούσα εργσία είναι το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x), οι οποίοι ευθύνονται για το φωτογημικό νέφος, την αιθαλομίγλη, και άλλες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Το CO είναι προϊόν ατελούς καύσης. Παράγεται σε περιπτώσεις πολύ πλούσιου μίγματος όπου το οξυγόνο δεν επαρκεί για να οξειδώσει πλήρως τον άνθρακα. Οι συνθήκες που ευνοούν το σχηματισμό του είναι περιπτώσεις που το καύσιμο περιέχει υγρασία ή περιπτώσεις στις οποίες δεν επιτυγχάνεται σωστή ανάμιξη καυσίμου και οξειδωτικού [2]. Τα οξείδια του αζώτου (NO_x), που είναι κατά κύριο λόγο το μονοξείδιο (NO) και το διοξείδιο (NO₂), σγηματίζονται κατά την καύση στη φλόγα και τις γύρω από αυτή περιοχές υψηλών θερμοκρασιών, με οξείδωση των μορίων του αζώτου του αέρα καύσης και του καυσίμου. Διακρίνονται σε θερμικά, σε άμεσα και σε NO_x καυσίμου. Τα θερμικά NO_x παράγονται από το άζωτο που περιέχει ο αέρας καύσης και ο σχηματισμός τους ευνοείται από τις υψηλές θερμοκρασίες και εξαρτάται άμεσα από αυτές. Τα άμεσα NO_x παράγονται με τη συμμετοχή υδρογονανθράκων στην αντίδραση αλλά το ποσοστό σχηματισμού τους σε σχέση με τα συνολικά NO_x είναι πολύ μικρο. Τέλος, τα NO_x καυσίμου σχηματίζονται από την οξείδωση του αζώτου που περιέχεται στο καύσιμο [3],[43].

3.2 Περιγραφή συστήματος συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων (continuous gas analysis-CGA)

Υπάρχουν διάφορα συστήματα ανάλυσης αερίων που επιτρέπουν την απευθείας παρακολούθηση των εκπομπών καυσαερίων και χρησιμοποιούν μη καταστρεπτικά όργανα μέτρησης. Τα συστήματα συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων (continuous gas analysis-CGA) ανιχνεύουν συνεχώς και σε πραγματικό χρόνο τις συγκεντρώσεις ενός ή περισσοτέρων αερίων συστατικών ενός αερίου μίγματος και παρέχουν στην έξοδο ένα γραμμικοποιημένο σήμα για περαιτέρω αξιολόγηση [45]. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στις αρχές της φασματοσκοπίας και πιο συγκεκριμένα της φασματοφωτομετρίας που θα εξηγηθούν παρακάτω. Τα συστήματα αυτά έχουν σπονδυλωτό σχεδιασμό που τους επιτρέπει να προσαρμόζονται σε οποιαδήποτε ανάγκη, παρέχουν μακροπρόθεσμη και αξιόπιστη λειτουργία και έχουν τη δυνατότητα αναβάθμισης με νέα χαρακτηριστικά. Επιπλέον, η εφαρμογή τέτοιων διαγνωστικών εργαλείων σε συνδυασμό με μια εξελιγμένη τεχνική, όπως είναι η αέρια χρωματογραφία, είναι ωφέλιμη όσον αφορά στην παροχή συμπληρωματικών στοιχείων, αποφεύγοντας περαιτέρω πολυπλοκότητες. Για παράδειγμα, η συνεχής παρακολούθηση των οξειδίων του αζώτου με ένα συνεχές σύστημα μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με ένα σύνολο λεπτομερών μετρήσεων χημικών ειδών, αντί να στηθεί μια χρωματογραφική μέθοδος η οποία θα περιλαμβάνει όλα τα προηγούμενα. Αυτά τα πλεονεκτήματα των συστημάτων CGA τα καθιστούν ιδιαίτερα χρήσιμα για τον έλεγχο των διεργασιών της διάταξης (process control). Επίσης, χρησιμοποιούνται συχνά σε βιομηχανική κλίμακα για βελτιστοποίηση των επιδόσεων, αφού καλύπτουν την πλειονότητα των μεταβλητών που πρέπει να παρακολουθούνται [6]. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά είδη συνεχούς ανάλυσης με παρόμοιες όμως αρχές λειτουργίας. Αυτή η παράγραφος παρουσιάζει τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε, τα χαρακτηριστικά και τις αρχές λειτουργίας των ανιχνευτών, οι οποίοι αποτελούν βασικά στοιχεία του συστήματος, προβάλλοντας το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθεί στο κεφάλαιο 5.

3.2.1 Ανιχνευτές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα CGA

Τα ολοκληρωμένα συστήματα CGA μπορούν να ενσωματώσουν πληθώρα συστημάτων ανίχνευσης για την ανάλυση των κυρίων προϊόντων της καύσης, όπως επίσης και για την ποσοτικοποίηση των εκπομπών σημαντικών ρύπων. Η επιλογή του κατάλληλου ανιχνευτή είναι αδιαμφισβήτητα συνδεδεμένη με τη διαδικασία που θα παρακολουθηθεί. Μελέτες ταχέως μεταβαλλόμενων φαινομένων, για παράδειγμα, θα απαιτούσαν τη χρήση ενός ανιχνευτή με μικρό χρόνο απόκρισης, όπως είναι η ενσωμάτωση ενός ανιχνευτή χημειοφωταύγειας για την παρακολούθηση οξειδίων του αζώτου σε μελέτη μεταβατικής λειτουργίας κινητήρα ντήζελ [46]. Από την άλλη πλευρά, ένα ολοκληρωμένο σύστημα καταγραφής εκπομπών θα έπρεπε να καλύπτει τις διαγνωστικές ανάγκες για όλα τα γημικά είδη που ενδιαφέρουν, όπως είναι για παράδειγμα η καταγραφή των οξειδίων του θείου σε μελέτες όπου το καύσιμο περιέχει θείο [47]. Με άλλα λόγια, το χρησιμοποιούμενο διαγνωστικό εργαλείο πρέπει να περιλαμβάνει ανιχνευτές που καλύπτουν όλα τα είδη του ενδιαφέροντος και επιπλέον πληρούν τις προδιαγραφές ανίχνευσης. Έτσι, παρακάτω παρουσιάζονται οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, οι οποίοι περιλαμβάνουν υπέρυθρα (ABB Uras26) και υπεριώδη (ABB Limas11) φωτόμετρα ρυθμισμένα για την ανίχνευση των οξειδίων του άνθρακα και του αζώτου, όπως επίσης και ηλεκτροχημικό ανιχνευτή για την ανίχνευση του οξυγόνου. Οι διάφοροι τύποι ανιγνευτών ήταν ενσωματωμένοι σε μια κεντρική μονάδα με κοινό έλεγγο και διασύνδεση. Τα χαρακτηριστικά τους, η ακρίβειά τους και οι διαδικασίες βαθμονόμησής τους παρουσιάζονται παρακάτω.

3.2.1.1 Φασματοσκοπικοί ανιχνευτές χωρίς διασπορά

Πριν την ανάλυση της αρχής λειτουργίας ενός μη σκεδαζόμενου ανιχνευτή, είναι απαραίτητη η αναφορά στην έννοια της φασματοσκοπίας και της φασματοφωτομετρίας. Οι μεταπηδήσεις ηλεκτρονίων από μια ενεργειακή στάθμη σε μια άλλη μέσα στα άτομα ή μόρια καθώς και οι περιστροφικές κινήσεις και δονήσεις ομάδων ατόμων και μορίων αποτελούν μεταβολές που συνοδεύονται από απορρόφηση ή αποβολή ενέργειας. Όταν ένα σύστημα απορροφά ενέργεια διεγείρεται από την βασική κατάσταση ενώ όταν ένα διεγερμένο σύστημα επανέρχεται στην βασική ή σε μια ενδιάμεση ενεργειακή κατάσταση, αποβάλλει ενέργεια. Οι ενεργειακές αυτές μεταβολές γίνονται με την μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με χαρακτηριστικό μήκος κύματος ή συχνότητα ανάλογα με το είδος της ηλεκτρονικής μετάπτωσης ή μοριακής κίνησης. Η Φασματοσκοπία σκοπεύει στον προσδιορισμό της συχνότητας ή του μήκους κύματος της απορροφούμενης ή εκπεμπόμενης κάθε φορά ακτινοβολίας καθώς και στον καθορισμό των ποσοτικών σχέσεων και των νόμων που διέπουν αυτές τις μεταβολές. Η απορροφούμενη ή εκπεμπόμενη ακτινοβολία εξαρτάται από το είδος της μεταβολής, από την ηλεκτρονική διαμόρφωση των ατόμων ή μορίων, από την φύση των δεσμών ανάμεσα στα άτομα κ.ά. Φασματοφωτομετρία είναι το τμήμα της φασματοσκοπίας που ασχολείται με τις ποσοτικές σχέσεις που αφορούν στην ένταση της απορροφούμενης (ή εκπεμπόμενης) ακτινοβολίας και με τους νόμους της απορρόφησης του φωτός [48].

Οι βασικές αρχές της απορρόφησης του φωτός από ένα υλικό μέσο περιγράφονται από το νόμο των Beer-Lambert. Σύμφωνα με αυτόν, ο λόγος της έντασης Ιο της μονοχρωματικής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα δείγμα μιας ουσίας μήκους d ως προς την ένταση Ι της εξερχόμενης από το δείγμα ακτινοβολίας μεταβάλλεται με το μήκος του δείγματος σύμφωνα με την επόμενη σχέση:



Εικόνα 28. Μονοχρωματική ακτινοβολία προσπίπτει σε δείγμα ουσίας πάχους d

Όπως αναφέρθηκε, στη σχέση αυτή Ιο είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, Ι είναι η ένταση της ακτινοβολίας αφού περάσει μέσα από ένα δείγμα μήκους d και c είναι η μοριακή συγκέντρωση του δείγματος ως προς το είδος που απορροφάται. Η ποσότητα ε καλείται συντελεστής μοριακής απορρόφησης, αλλά ονομάζεται ευρέως και συντελεστής απόσβεσης. Ο συντελεστής μοριακής απορρόφησης εξαρτάται από τη συχνότητα της εισερχόμενης ακτινοβολίας και είναι μέγιστος εκεί που η απορρόφηση είναι πιο έντονη. Το αδιάστατο αποτέλεσμα $A = \varepsilon \cdot c \cdot d$ ονομάζεται απορρόφηση ή οπτική πυκνότητα του δείγματος και ο λόγος Ι/Ιο είναι η διαπερατότητα Τ [49].

Γίνεται εμφανές ότι καθώς μια ροή αερίου διέρχεται μέσα από μια την κυψελίδα του δείγματος, η οποία είναι γνωστών διαστάσεων, η συγκέντρωσή της στα απορροφούμενα είδη που μας ενδιαφέρουν μπορεί να προσδιοριστεί από τη μετρούμενη διαπερατότητα. Ο όρος «χωρίς διασπορά» αναφέρεται στο γεγονός ότι όλο το φως περνάει μέσα από το αέριο δείγμα και φιλτράρεται μετά, αμέσως πριν από τον ανιχνευτή. Οι υπέρυθροι ανιχνευτές με διασπορά χρησιμοποιούν ένα πλέγμα ή ένα πρίσμα για να προ-επιλέξουν το επιθυμητό μήκος κύματος του φωτός και να περάσουν μόνο μέσω αυτού το αέριο δείγμα στον ανιχνευτή. Οι υπέρυθροι ανιχνευτές με διασπορά χρησιμοποιούν ένα πλέγμα ή ένα πρίσμα για να αρο-επιλέξουν το επιθυμητό μήκος κύματος του φωτός και να περάσουν μόνο μέσω αυτού το αέριο δείγμα στον ανιχνευτή. Οι υπέρυθροι ανιχνευτές με διασπορά συνήθως χρησιμοποιούνται σε υψηλής ανάλυσης όργανα λόγω της ικανότητάς τους να ανιχνεύουν ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος.

Υπέρυθροι αισθητήρες χωρίς διασπορά

Η υπέρυθρη ανάλυση αερίων είναι μια από τις πιο βασικές τεχνικές ανίχνευσης αερίων [50]. Όλα τα αέρια απορροφούν υπέρυθρη φωτεινή ενέργεια διαφόρων μηκών κύματος. Πολύπλοκα αέρια και αέρια με πολύπλοκο φάσμα απορρόφησης μπορούν να ποσοτικοποιηθούν με ακρίβεια χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική [51]. Η φασματοσκοπία μη σκεδαζόμενης υπέρυθρης απορρόφησης (Non-dispersive infrared absorption spectroscopy - NDIR) είναι σήμερα η καλύτερη μεθοδολογία που επιλέγεται για την ακριβή και αξιόπιστη μέτρηση της συγκέντρωσης των αερίων. Ένας αισθητήρας χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση συγκεκριμένου εύρους του υπέρυθρου φάσματος αντίστοιχου με το χαρακτηριστικό μήκος κύματος του εκάστοτε υπό μελέτη αερίου. Όταν το αέριο αυτό περνά μεταξύ της υπέρυθρης πηγής και των ανιχνευτών, το φάσμα απορρόφησης αλλάζει και ηλεκτρονικά όργανα γρησιμοποιούνται για να προωθήσουν αυτήν την πληροφορία και να προσδιορίσουν τη συγκέντρωση του αερίου. Πιο λεπτομερώς, αυτές οι τεχνικές βασίζονται στα χαρακτηριστικά που αφορούν την ενεργειακή απορρόφηση ενός συγκεκριμένου αερίου στην υπέρυθρη περιοχή. Τα βασικά εξαρτήματα είναι η υπέρυθρη πηγή, ο θάλαμος του δείγματος ή φωτεινός σωλήνας, το φίλτρο του μήκους κύματος και ο υπέρυθρος ανιχνευτής. Το αέριο διοχετεύεται μέσα στο θάλαμο του δείγματος και η συγκέντρωση του αερίου μετράται με ηλεκτρο-οπτικό τρόπο μέσω της απορρόφησης ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος στο υπέρυθρο. Στους περισσότερους εξοπλισμούς της τεχνικής NDIR, όπως δείχνει και η Εικόνα 29, η υπέρυθρη ακτινοβολία διέρχεται μέσα από δύο πανομοιότυπες κυψελίδες και φτάνει στον ανιχνευτή. Η πρώτη κυψελίδα γεμίζεται με ένα μη απορροφητικό αέριο, όπως είναι το άζωτο, και λειτουργεί ως ένα κελί αναφοράς, ενώ η δεύτερη κυψελίδα είναι ένα μετρητικό κελί από το οποίο διέρχεται η συνεχής ροή του αερίου δείγματος που

πρόκειται να αναλυθεί. Ο ανιχνευτής έχει ένα οπτικό φίλτρο μπροστά από αυτό, το οποίο περιορίζει όλο το φως εκτός από το μήκος κύματος που τα μόρια του επιλεγμένου αερίου μπορούν να απορροφήσουν. Τα μόρια των άλλων αερίων δεν απορροφούν το φως αυτού του μήκους κύματος και δεν επηρεάζουν το ποσό του φωτός που φτάνει στον ανιχνευτή. Η ενέργεια στην περιοχή που μας ενδιαφέρει απορροφάται από το αέριο στο μετρητικό κελί εξασθενώντας την ενέργεια που διέρχεται από το κελί και πέφτει πάνω στον ανιχνευτή. Αυτή η εξασθενημένη ενέργεια συγκρίνεται με το μη εξασθενημένο σήμα από το κελί αναφοράς και η διαφορά είναι ανάλογη με το ποσό του απορροφούμενου αερίου στο μετρητικό κελί.



Εικόνα 29: Σχηματική αναπαράσταση μιας τυπικής διάταξης NDIR [45]

Πιο συγκεκριμένα, η χρησιμοποιούμενη μέθοδος της συνεχούς μη σκεδαζόμενης υπέρυθρης φωτομετρίας μπορεί επιλεκτικά να μετρήσει συγκεντρώσεις μέχρι τεσσάρων δειγμάτων ταυτόχρονα. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, ο ανιχνευτής ρυθμίστηκε για να μετρά επιλεκτικά τη συγκέντρωση του μονοξειδίου του άνθρακα CO στο υπέρυθρο φάσμα γύρω στα 4.7 μm και του διοξειδίου του άνθρακα στο υπέρυθρο φάσμα κοντά στα 4.2 μm. Η χρησιμοποιούμενη ανάλυση αερίου είχε ενσωματωμένο ένα κελί βαθμονόμησης και βαθμονομήθηκε για να ανιχνεύει το CO σε ένα εύρος από 0 έως 10000 ppm και το CO₂ σε εύρος από 0 έως 25% (vol.) με 2% εύρος σφάλματος πλήρους κλίμακας. Επομένως, η συνολική αβεβαιότητα, το σφάλμα γραμμικότητας που είναι περίπου 1%, το σφάλμα μηδενικής απόκρισης που είναι 1% και η ευαισθησία που είναι 3%, συνεισφέρουν όλα μαζί σε ένα συνολικό σφάλμα μέτρησης που είναι 4% περίπου.

Υπεριώδεις (ultraviolet-UV) φασματοσκοπικοί ανιχνευτές χωρίς διασπορά

Παρά το γεγονός ότι πολλές τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση των οξειδίων του αζώτου στο υπέρυθρο φως [52], το υπεριώδες χρησιμοποιείται συχνά για την ανάλυση των οξειδίων του αζώτου και του θείου επίσης. Η υπεριώδης ανίχνευση επίσης, πλεονεκτεί έναντι των ανιχνευτών της χημειοφωταύγειας λόγω του γεγονότος ότι γενικά δεν είναι τόσο ευαίσθητη στα κύρια αέρια προϊόντα της καύσης. Το διοξείδιο του άνθρακα CO₂ και το νερό H₂O δεν απορροφούν καλά την υπεριώδη ακτινοβολία και δεν έχουν την ικανότητα να επηρεάσουν τη UV μέτρηση των οξειδίων του αζώτου. Συχνά, όταν χρησιμοποιείται η αρχή της UV μέτρησης, αυτή στην πραγματικότητα καλείται μη σκεδαζόμενη υπεριώδης αρχή (non dispersive ultraviolet principle - NDUV). Η μέτρηση γίνεται οδηγώντας μια ροή αερίου μέσα από μια κυψελίδα όπου η πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας και το οπτικό φίλτρο έχουν τοποθετηθεί στη μια άκρη της κυψελίδας και ο ανιγνευτής στην άλλη. Η πηγή φωτός εκπέμπει διασκορπισμένη υπεριώδη ακτινοβολία σε ένα μήκος κύματος που καθορίζεται από το οπτικό φίλτρο που είναι εγκατεστημένο μεταξύ της πηγής φωτός και της κυψελίδας. Η απορρόφηση του φωτός το οποίο διοχετεύεται μέσα στην κυψελίδα είναι μια έκφραση της συγκέντρωσης του αερίου, που πρόκειται να αναλυθεί, όπως περιγράφηκε νωρίτερα. Το ποσό του φωτός που διέρχεται μέσα από το αέριο μετράται από τον ανιχνευτή στην άλλη πλευρά της κυψελίδας.

Πιο συγκεκριμένα, αυτός ο χρησιμοποιούμενος ανιχνευτής (ABB Limas11) είναι μια μέθοδος φωτομέτρησης η οποία εύκολα ρυθμίζεται για να ανταποκριθεί σε μεμονωμένες απαιτήσεις της διαδικασίας μέτρησης. Η αρχή της μέτρησης είναι ιδιαίτερα αξιόπιστη λόγω της υψηλής σταθερότητάς της η οποία βασίζεται στην αρχή του σήματος της τετραπλής δέσμης. Επομένως, μένει ανεπηρέαστη από τη μόλυνση μέσα στα κελιά. Ένας υψηλός βαθμός επιλεξιμότητας παρέγεται χρησιμοποιώντας φίλτρα παρεμβολής και αερίου όπως επίσης κάνοντας τη βέλτιστη επιλογή του μετρούμενου μήκους κύματος και του μήκους κύματος αναφοράς. Αυτό επιτρέπει ηλεκτρονική διόρθωση εγκάρσιας (ή χιαστί) ευαισθησίας. Η ανάλυση αερίων που γρησιμοποιήθηκε είγε ένα ενσωματωμένο κελί βαθμονόμησης και βαθμονομήθηκε για να ανιχνεύει το μονοξείδιο του αζώτου NO (κοντά στα 226 nm) σε μια κλίμακα από 0 έως 100 ppm με 2% εύρος σφάλματος πλήρους κλίμακας. Επομένως, η συνολική αβεβαιότητα, το σφάλμα γραμμικότητας που είναι περίπου 0.5%, το σφάλμα λόγω επαναληψιμότητας των μετρήσεων που υπολογίζεται στο 0.5%, το σφάλμα μηδενικής απόκρισης που είναι 1% και η ευαισθησία που είναι 0.1%, συνεισφέρουν όλα μαζί σε ένα συνολικό σφάλμα μέτρησης που είναι 2% περίπου.

3.2.1.2 Ηλεκτροχημική ανίχνευση

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του O₂. Η αρχή λειτουργίας της είναι η εξής: Το προς μέτρηση δείγμα χωρίζεται από ένα δείγμα αναφοράς με μια μεμβράνη ηλεκτρολύτη (οξείδιο του ζιρκονίου). Ο ιονισμός των δύο δειγμάτων

προκαλεί διαφορετική συγκέντρωση ιόντων οξυγόνου στις δύο πλευρές του ηλεκτρολύτη, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται στα άκρα του ηλεκτρική τάση, η οποία μπορεί να μετρηθεί και με κατάλληλη βαθμονόμηση να υπολογιστεί η περιεκτικότητα του δείγματος σε O₂.

Εκτός από τη μέθοδο της ηλεκτροχημικής ανίχνευσης, η συγκέντρωση του οξυγόνου μπορεί να μετρηθεί και με την τεχνική της καταλυτικής καύσης ή με παραμαγνητικούς αισθητήρες [2].

3.3 Σύνοψη

Η διαγνωστική των φαινομένων καύσης χρησιμοποιεί πολλά διαφορετικά εργαλεία και βρίσκει ευρεία εφαρμογή στις ταυτόχρονες μετρήσεις μιας πληθώρας παραμέτρων της κάυσης, με σκοπό να αναπτύξουν την ορθή κατανόηση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας, της σταθεροποίησης της φλόγας, της κινητικής των αντιδράσεων, της παραγωγής ρύπων και πολλών άλλων σχετικών με την καύση θεμάτων. Επομένως, υπάρχουν διαγνωστικά εργαλεία που παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία, όπως τμηματική ή συνεχής και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθηση των εκπομπών, αναλυτική χημεία ή αρχές φασματομετρικής ανίχνευσης και τα λοιπά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Εφαρμογή συστήματος Schlieren

Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκαν δύο διαφορετικά συστήματα Schlieren, βασισμένα στο θεωρητικό υπόβαθρο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, τα οποία εφαρμόστηκαν σε φλόγες συστημάτων αυξανόμενης πολυπλοκότητας. Πιο συγκεκριμένα κατασκευάστηκε, αρχικά, ένα σύστημα Schlieren τύπου Z με κάτοπτρα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση μιας απλής φλόγας διάχυσης από φιάλη υγραερίου οικιακής χρήσης. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε στη φλόγα από τη φιάλη υγραερίου οικιακής χρήσης, σε έναν καυστήρα προανάμιξης τύπου Bunsen και τελικά σε έναν πορώδη καυστήρα. Στο κεφάλαιο αυτό εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκαν τα δύο συστήματα Schlieren και παρουσιάζονται οι φωτογραφίες που προέκυψαν από αυτά. Παρόλο που το πρώτο σύστημα που υλοποιήθηκε είναι αυτό με τα κάτοπτρα και ακολούθησε αυτό με τους φακούς, χάριν ευκολίας η διαδικασία κατασκευής του συστήματος με τους φακούς παρουσιάζεται πρώτη.

4.1 Διαδικασία κατασκευής συστήματος Schlieren με φακούς

Το σύστημα Schlieren με φακούς και εκτεταμένη πηγή φωτός αποτελούνταν από: έναν λαμπτήρα αλογόνου ισχύος 60 W, ως εκτεταμένη πηγή φωτός, με το αντίστοιχο τροφοδοτικό ισχύος, έναν συγκεντρωτικό φακό διπλό αχρωματικό διαμέτρου 25 mm και εστιακής απόστασης f=30mm, μια ορθογωνική σχισμή ρυθμιζόμενων διαστάσεων, δύο συγκλίνοντες φακούς ίδιας διαμέτρου 75 mm για τη δημιουργία του πεδίου Schlieren (δηλαδή της παράλληλης δέσμης φωτός) εκ των οποίων ο ένας είχε εστιακή απόσταση 300 mm και ο άλλος 150 mm, η ακμή ενός μαχαιριού, ένα ρυζόχαρτο ως επίπεδο προβολής και μια φωτογραφική μηχανή. Όλος ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την κατασκευή του συστήματος Schlieren με φακούς, που φαίνεται στην Εικόνα 30, προσαρμόστηκε πάνω σε ράγες-οδηγούς αλουμινίου για να είναι ευθυγραμμισμένα, τουλάχιστον ως προς τη διεύθυνση z, τα οπτικά κέντρα των φακών. Η διαδικασία της ευθυγράμμισης είναι πολύ σημαντική και αναφέρεται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο. Η ακμή του μαχαιριού είναι τοποθετημένη κατακόρυφα και στην ίδια κατεύθυνση τοποθετήθηκαν ο λαμπτήρας και η σχισμή (slit). Οι αποστάσεις μεταξύ των διαφόρων εξαρτημάτων της διάταξης καθορίζονται με βάση τις αρχές της οπτικής.



Εικόνα 30. Σύστημα Schlieren με φακούς που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο

4.1.1 Διαδικασία ευθυγράμμισης

Τα οπτικά είναι προσαρμοσμένα πάνω σε βάσεις ρυθμιζόμενου ύψους οι οποίες φέρουν μικρομετρικά. Στον άξονα z είναι ευθυγραμμισμένα τα οπτικά κέντρα λόγω της ράγας-οδηγού. Κατά τους άξονες y και x πρέπει να ρυθμιστεί η θέση τους με τη βοήθεια μικρομετρικών που έχουν δυνατότητα κατακόρυφης και πλάγιας μετακίνησης. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας ένα λευκό χαρτί σε κάθε θέση της διάταξης για να παρακολουθείται η πορεία της δέσμης φωτός και ανάλογα να ρυθμίζεται η θέση των οπτικών. Για παράδειγμα είναι αναγκαία η τοποθέτηση του χαρτιού μετά την σχισμή (slit) για να ελέγχεται η ομοιομορφία της δέσμης φωτός. Επίσης, χρήσιμο είναι ένα ημιδιαφανές χαρτί κυκλικού σχήματος συγκεκριμένης διαμέτρου, της διαμέτρου των φακών του πεδίου Schlieren, με το οποίο ελέγχεται η παραλληλία της δέσμης μεταξύ των δύο φακών. Είναι, τέλος, συνήθης τεχνική να χρησιμοποιείται η δέσμη ενός λέιζερ, που έχει το πλεονέκτημα της σημειακής πηγής φωτός, για να σημειώνονται τα οπτικά κέντρα των φακών και άρα να διευκολύνεται η ευθυγράμμιση.

4.1.2 Ρύθμιση των αποστάσεων

Όπως αναφέρθηκε, οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων της διάταξης είναι συγκεκριμένες και έχουν μεγάλη σημασία για την επιτυχία της μεθόδου. Συγκεκριμένα, οι απόστασεις λαμπτήρα-συγκεντρωτικού φακού (εστιακής απόστασης f=30mm) και συγκεντρωτικού φακού-σχισμής διαμορφώνονται έτσι ώστε:

(α) να γίνεται προβολή του νήματος του λαμπτήρα πάνω στην σχισμή και

(β) η δέσμη φωτός που φτάνει στον 1° συγκλίνοντα φακό (f=300mm) να καλύπτει όλη τη διάμετρό του για να αξιοποιείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη φωτεινή περιοχή δοκιμής.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι το πλάτος της ορθογωνικής σχισμής έχει επιλεγεί έτσι ώστε να αποκόπτει περιμετρικά το φως που έρχεται από τη λάμπα και να δημιουργεί κατά το δυνατόν μια ομοιόμορφη πηγή φωτός πλησιάζοντας την περίπτωση της εκτεταμένης πηγής που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ευαισθησία του συστήματος [53]. Προβάλοντας το είδωλο του νήματος της λάμπας πάνω στη σχισμή η εικόνα που δημιουργείται μοιάζει με την παρακάτω. Οι διαστάσεις της σχισμής ρυθμίζονται έτσι ώστε να διέρχεται από αυτήν μόνο το κεντρικό κομμάτι της εικόνας του νήματος, όπως δείχνει η διακεκομμένη γραμμή (Εικόνα 31).



Εικόνα 31. Προβολή του νήματος του λαμπτήρα πάνω στην ακμή του μαχαιριού.[15]

Στη συνέχεια, η απόσταση που τοποθετείται ο $1^{o\varsigma}$ φακός του πεδίου Schlieren, δηλαδή ο $1^{o\varsigma}$ συγκλίνων φακός (f=300mm), από την σχισμή πρέπει να είναι η εστιακή απόσταση του φακού αυτού. Η σχισμή τοποθετείται στην εστία του φακού, ώστε η κωνική δέσμη φωτός να γίνει παράλληλη καθώς θα μπαίνει στην περιοχή δοκιμής.

Μετά το 2° φακό του πεδίου Schlieren (f=150mm), η ακμή του μαχαιριού τοποθετείται ακριβώς στην εστία του φακού, εν προκειμένω στα 150mm. Από εκεί το φως προχωρά είτε απευθείας μέσα στο φακό της φωτογραφικής μηχανής είτε πάνω στην οθόνη προβολής (ημιδιαφανές χαρτί). Στην περίπτωση που το φαινόμενο αποτυπώνεται απευθείας στον αισθητήρα της φωτογραφικής μηχανής, η θέση που πρέπει να τοποθετηθεί αυτή εξαρτάται από την εστιακή απόσταση τόσο του 2^{°υ} φακού του πεδίου Schlieren όσο και του φακού της μηχανής. Πρακτικά, η θέση αυτή προξόκυψε να είναι ακριβώς μετά την ακμή του μαχαιριού, σχεδόν στην εστία του 2^{°υ} φακού. Από την άλλη, εάν γίνει προβολή του φαινομένου σε ημιδιαφανές χαρτί αυτό τοποθετείται σε απόσταση από την ακμή του μαχαιριού τέτοια ώστε η εικόνα Schlieren να είναι εστιασμένη. Η απόσταση αυτή (y) έχει άμεση σχέση με την απόσταση του 2^{°υ} φακού, όπως υποδεικνύεται απο την σχέση 1/x+1/y=1/f.

Η απόσταση των δύο φακών του πεδίου Schlieren, δηλαδή της περιοχής παράλληλης δέσμης, δεν είναι καθοριστική για το φαινόμενο Schlieren. Αυτό που έχει σημασία είναι η απόσταση του αντικειμένου Schlieren από τον δεύτερο φακό του πεδίου (f=150mm) και εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο θα αποτυπώσουμε την εικόνα Schlieren. Δηλαδή:

(α) Εάν το επίπεδο προβολής της εικόνας Schlieren είναι το εστιακό επίπεδο της φωτογραφικής μηχανής, δηλαδή εάν γίνει φωτογράφιση απευθείας μετά την ακμή του μαχαιριού χωρίς το ρυζόχαρτο, τότε η απόσταση αυτή πρέπει να είναι ίση ή μικρότερη της εστιακής απόστασης του 2^{ου} φακού (f=150mm). Με αυτόν τον τρόπο η φωτογραφική μηχανή μπορεί να εστιάσει πάνω στο αντικείμενο Schlieren και η εικόνα να είναι καθαρή.

(β) Εάν το επίπεδο προβολής της εικόνας Schlieren είναι το ρυζόχαρτο, τότε η απόσταση αυτή υπαγορεύεται από το βαθμό μεγέθυνσης που είναι επιθυμητό να έχει το είδωλο του αντικειμένου Schlieren πάνω στο χαρτί. Έτσι, για να γίνει προβολή του αντικειμένου Schlieren στην πραγματική του διάσταση πάνω στο ρυζόχαρτο, δηλαδή για να έχει βαθμό μεγέθυνσης m=y/x=1, η απόσταση αυτή (αντικειμένου Schlieren – 2^{ov} φακού) θα πρέπει να είναι διπλάσια της εστιακής απόστασης του φακού, δηλαδή 300mm.

4.1.3 Τοποθέτηση της ακμής του μαχαιριού

Η σωστή τοποθέτηση της ακμής του μαχαιριού (που στην περίπτωση αυτή είναι η λεπίδα ενός κοινού ξυραφιού) στην εστία του 2^{ου} φακού του πεδίου Schlieren αποτελεί ίσως την πιο χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία στην κατασκευή του συστήματος. Αναφέρθηκε προηγούμενα ότι η κατεύθυνση της λεπίδας του ξυραφιού πρέπει να είναι ίδια με αυτή της μεγάλης διάστασης της λάμπας και της σχισμής και στην προκειμένη περίπτωση είναι κατακόρυφη. Η λεπίδα του ξυραφιού είναι προσαρμοσμένη πάνω σε βάση με μικρομετρικά που επιτρέπουν την κίνηση στους άξονες z και x. Είναι γνωστό ότι η λεπίδα τοποθετείται στην εστία του φακού αλλά η ακριβής θέση της είναι το σημείο στο οποίο το νήμα του λαμπτήρα σχηματίζει ένα εστιασμένο είδωλο πάνω στη λεπίδα. Αυτή η θέση βρίσκεται με τη βοήθεια ενός χαρτιού το οποίο κινώντας το μπρος-πίσω κατά την κατεύθυνση z, κοντά στην εστία, προσδιορίζεται το ακριβές σημείο στο οποίο φαίνεται καθαρά το νήμα του λαμπτήρα κατά τον άξονα x με το αντίστοιχο μικρομετρικό, έτσι ώστε η λεπίδα να αποκόπτει το μισό είδωλο του νήματος όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 32: Αρχικά, εστιάζεται το είδωλο του λαμπτήρα πάνω στη λεπίδα (α) και στη συνέχεια αποκόπτεται το μισό (β)

Σκοπός είναι η φωτεινή περιοχή που δημιουργείται από το φως της πηγής πάνω στην οθόνη προβολής – ρυζόχαρτο να υποφωτιστεί ομοιόμορφα. Σε περίπτωση που σκοτεινιάζει μόνο από τη μία πλευρά πρέπει με τα μικρομετρικά να ξαναρυθμιστεί η θέση της λεπίδας.



Εικόνα 33: Επίδραση της μετατόπισης της λεπίδας κατά μήκος του οπτικού άξονα z στην εικόνα Schlieren καθώς η λεπίδα, τοποθετημένη οριζόντια, εισέρχεται στην περιοχή της δέσμης από κάτω. (α)η λεπίδα είναι πιο κοντά στο 2° φακό απ'ό,τι θα έπρεπε (β) σωστή τοποθέτηση λεπίδας (γ) η λεπίδα είναι πιο μακριά από το 2° φακό απ'ό,τι θα έπρεπε. (β) σωστή τοποθέτηση λεπίδας (γ) η λεπίδα είναι πιο μακριά από το 2° φακό απ'ό,τι θα έπρεπε χ

4.1.4 Διαδικασία λήψης φωτογραφίας

Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή της διάταξης, ακολουθεί η λήψη της φωτογραφίας Schlieren. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, στο σύστημα Schlieren με φακούς και εκτεταμένη πηγή φωτός έγινε λήψη φωτογραφίας μέσω ενός ημιδιαφανούς χαρτιού (ρυζόχαρτο) που είχε το ρόλο της οθόνης προβολής. Οι αποστάσεις ήταν διαμορφωμένες όπως αναφέρθηκαν παραπάνω. Η διαδικασία είναι η εξής:

Αρχικά, τοποθετείται στη θέση του αντικειμένου Schlieren η φλόγα από τη φιάλη υγραερίου, η οποία έχει μικρές διαστάσεις και διευκολύνει τη διαδικασία. Έχοντας σβησμένο το λαμπτήρα, γίνεται απλά προβολή της φλόγας πάνω στο ρυζόχαρτο. Κινώντας το χαρτί αυτό μπρος-πίσω γίνεται αναζήτηση της ακριβούς θέσης στην οποία εστιάζεται το είδωλο της φλόγας. Η θέση αυτή θα βρίσκεται στην απόσταση γ που αναφέρθηκε προηγούμενα. Στη συνέχεια, πρέπει να ανάψει ο λαμπτήρας και να τοποθετηθεί η φωτογραφική μηχανή πίσω από το ημιδιαφανές χαρτί. Η απόσταση του φακού της φωτογραφικής μηγανής από το γαρτί εξαρτάται από την ακριβή εστιακή απόσταση (ζουμ) του φακού (εφόσον χρησιμοποιούμε φακό μεταβλητής εστιακής απόστασης – zoom) και το μέγεθος του διαφράγματος. Γενικά, επιδιώκεται να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη περιοχή της φωτογραφίας με τη δέσμη φωτός από το Schlieren. Έτσι, επιλέγεται η μέγιστη εστιακή απόσταση που επιτρέπει ο φακός της μηγανής τοποθετημένος σε όσο το δυνατόν μικρότερη απόσταση από το χαρτί.. Να σημειωθεί ότι για να μπορέσει να εστιάσει η φωτογραφική μηχανή, θα πρέπει να γίνει χειροκίνητα με τη ρύθμιση manual focus, όχι αυτόματα. Τέλος, για να επιτευχθεί το κατάλληλο επίπεδο φωτισμού στη φωτογραφία πρέπει να ρυθμιστεί επίσης χειροκίνητα η ταχύτητα και το διάφραγμα.

Καταλήγοντας, ένα σύστημα Schlieren με φακούς όπως περιγράφηκε στην παρούσα παράγραφο μπορεί να αποδώσει φωτογραφίες με διαφορετική ανάλυση αν αποκόπτεται κάθε φορά μικρότερο ή μεγαλύτερο ποσοστό της δέσμης φωτός με την ακμή του μαχαιριού, μετακινώντας τη με τα μικρομετρικά κατά τον άξονα x. Δηλαδή,

ανάλογα με το ποσοστό αποκοπής της φωτεινής δέσμης, το φαινόμενο Schlieren αποτυπώνεται ασθενέστερα (για μικρό ποσοστό αποκοπής) ή εντονότερα (για μεγαλύτερο ποσοστό αποκοπής).

4.2 Διαδικασία κατασκευής συστήματος Schlieren τύπου Ζ με κάτοπτρα

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα Schlieren τύπου Z (Εικόνα 34) είναι ο ακόλουθος: ως πηγές φωτός χρησιμοποιήθηκαν μία λάμπα αλογόνου ισχύος 60 W και ένα LED ισχύος 1 W με το αντίστοιχο τροφοδοτικό ισχύος, συγκεντρωτικός φακός διπλός αχρωματικός διαμέτρου 25 mm και εστιακής απόστασης 30 mm, ίριδα, δύο ζεύγη κατόπτρων εκ των οποίων το ένα ζεύγος αποτελούνταν από σφαιρικά κάτοπτρα διαμέτρου 6 ιντσών (152 mm) και εστιακής απόστασης 12 ιντσών (304,8 mm) και το άλλο ζεύγος από παραβολικά κάτοπτρα διαμέτρου 8 ιντσών (203 mm) και εστιακής απόστασης 1200 mm, ακμή μαχαιριού και ρυζόχαρτο ως επίπεδο προβολής.

Ο τρόπος με τον οποίο συναρμολογείται ένα σύστημα Schlieren τύπου Z, αναφορικά με τις αποστάσεις, την ευθυγράμμιση των οπτικών κέντρων, την τοποθέτηση της ακμής του μαχαιριού και τη λήψη της φωτογραφίας, βασίζεται στις ίδιες αρχές με αυτές που αναφέρθηκαν για το σύστημα με τους φακούς. Η διαφορά είναι ότι αντί για σχισμή στην εστία του 1^{ov} κατόπτρου τοποθετήθηκε μία ίριδα, η διάμετρος της οποίας ρυθμιζόταν ανάλογα με την ένταση του φωτός που χρειαζόταν και την κατά το δυνατόν ομοιομορφία της δέσμης που δημιουργούνταν μετά από αυτήν. Οι αποστάσεις λάμπας – συγκεντρωτικού φακού και συγκεντρωτικού φακού σύσιμε τη διάμετρο του κατόπτρου. Μάλιστα, ο συγκεντρωτικός φακός διαμέτρου 25 mm και εστιακής απόστασης 30 mm, επιλέχθηκε μεταξύ άλλων ίδιας διαμέτρου και διαφορετικής εστιακής απόστασης. Ήταν ο πιο κατάλληλος στη μεγέθυνση της δέσμης ώστε να καλύπτει όλη τη διάμετρο των 150 ή 200 mm και ταυτόχρονα να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή ένταση φωτός.

Το σημαντικότερο, όμως, ζήτημα που απασχολεί την κατασκευή του συστήματος Ζ είναι η ρύθμιση των γωνιών στρέψης των δύο κατόπτρων από τον οπτικό τους άξονα. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο **2.4.3**, αυτές πρέπει να είναι ελάχιστες ώστε να ελαχιστοποιούνται και τα σφάλματα της κόμης και του αστιγματισμού. Συγκεκριμένα, για τα δεδομένα κάτοπτρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αναγκαίο η κάθε γωνία στρέψης να είναι έως 7° περίπου. Για το λόγο αυτό έπρεπε η απόσταση μεταξύ των δύο κατόπτρων, και άρα το μήκος της περιοχής παράλληλης δέσμης, να αυξηθεί κατά το δυνατόν περισσότερο, όσο βέβαια το επέτρεπαν οι ράγες-οδηγοί πάνω στις οποίες ήταν προσαρμοσμένος όλος ο οπτικός εξοπλισμός.

Από τις διατάξεις τύπου Ζ που υλοποιήθηκαν στο εργαστήριο ελήφθησαν φωτογραφίες τόσο πάνω σε ρυζόχαρτο όσο και απευθείας πάνω στο φακό της φωτογραφικής μηχανής. Η διαδικασία λήψης της φωτογραφίας στην περίπτωση με το ρυζόχαρτο ήταν η ίδια με αυτή που περιγράφηκε και στο σύστημα με τους φακούς. Στην περίπτωση της απευθείας φωτογράφισης της φωτεινής δέσμης, ο φακός της φωτογραφικής μηχανής τοποθετήθηκε ακριβώς μετά τη λεπίδα του ξυραφιού, σχεδόν στην εστία του 2^{ου} κατόπτρου. Επιλέχθηκε μέγιστο άνοιγμα του διαφράγματος της μηχανής και εστίαση του φακού στο άπειρο και μη αυτόματη ρύθμιση της ταχύτητας. Με αυτόν τον τρόπο ο φωτογραφικός φακός εστιάζει μέσω του κατόπτρου πάνω στο αντικείμενο Schlieren και δέχεται ολόκληρη τη φωτεινή δέσμη για να αποτυπωθεί σωστά το φαινόμενο.



Εικόνα 34. Σύστημα Schlieren τύπου Ζ που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο

4.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται με την ίδια σειρά με την οποία διεξήχθησαν τα πειράματα, δηλαδή αρχικά παρουσιάζονται οι φωτογραφίες που προέκυψαν από το σύστημα Schlieren τύπου Z και στη συνέχεια αυτές που προέκυψαν από το σύστημα με τους φακούς. Κάθε ένα από τα δύο συστήματα μελετήθηκε και εφαρμόστηκε πολλές φορές δοκιμάζοντας αλλαγές στις αποστάσεις και στον εξοπλισμό προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Τα

αποτελέσματα από κάθε διάταξη που υλοποιήθηκε παρουσιάζονται συνοδευόμενα από τις αντίστοιχες παρατηρήσεις. Σημειώνεται ότι η διάταξη Schlieren χρησιμοποιήθηκε σε εφαρμογές βαθμωτής πολυπλοκότητας, ήτοι σε φλογίδιο διάχυσης, σε καυστήρα προανάμιξης τύπου Bunsen και τελικά σε καυστήρα πορώδους αδρανούς μέσου.

4.3.1 Σύστημα τύπου Ζ με κάτοπτρα διαμέτρου 6΄

<u>1^η διάταξη</u>

Για τη διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκαν μία λάμπα αλογόνου ισχύος 60 W και το αντίστοιχο τροφοδοτικό ισχύος, συγκεντρωτικός φακός διπλός αχρωματικός διαμέτρου 25 mm και εστιακής απόστασης 30 mm, ίριδα, δύο σφαιρικά κάτοπτρα διαμέτρου 6 ιντσών (152 mm) και εστιακής απόστασης 12 ιντσών (304,8 mm), ακμή μαχαιριού, ημιδιαφανές χαρτί και φωτογραφική μηχανή Sony A550 με φακό ζουμ 18-55 mm. Το υπό μελέτη αντικείμενο Schlieren ήταν ένα φλογίδιο διάχυσης τροφοδοτούμενο από φιάλη υγραερίου οικιακής χρήσης. Η προβολή του φαινομένου έγινε πάνω στο ημιδιαφανές χαρτί και η εικόνα αυτή αποτυπώθηκε από τη φωτογραφική μηχανή. Οι φωτογραφίες φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 35. Φωτογραφίες Schlieren, από σύστημα τύπου Ζ, που απεικονίζουν μια φλόγα διάχυσης προερχόμενη από φιάλη υγραερίου οικιακής χρήσης

Οι φωτογραφίες 1 και 2 απεικονίζουν φλόγες οι οποίες διαταράσσονται σταδιακά από ρεύμα αέρα. Η φωτογραφία 1 απεικονίζει μια προσκολλημένη στο ακροφύσιο φλόγα με μικρή εξωτερική διαταραχή. Ο εξωτερικός αέρας (κάθετο προς τη ροη ρεύμα) αυξάνεται προκαλώντας μεγαλύτερη διαταραχή στη φωτογραφία 2, η οποία όμως αιχμαλωτίζει εξίσου καλά την πρώτη ζώνη της φλόγας. Στη φωτογραφία 2 φαίνεται επίσης η τυρβώδης ανάμιξη καυσαερίων και αέρα κατάντη της φλόγας. Στην 3^η φωτογραφία δεν υπάρχει φλόγα παρά φαίνεται μόνο η δέσμη του άκαυστου αερίου της φιάλης, συνεπώς η τεχνική αντικατοπτρίζει τη διαφορά πυκνοτήτων μεταξύ ρεύματος καυσίμου και αέρα. Στην 4^η φωτογραφία αποτυπώνεται μια φλόγα αποκολλημένη από το ακροφύσιο, λόγω αύξησης της ταχύτητας εξόδου της ροής καυσίμου από το ακροφύσιο. Να σημειωθεί ότι οι φωτογραφίες αυτές προέρχονται από δύο διαφορετικές διατάξεις στις οποίες αλλάζει η γωνία στρέψης των κατόπτρων. Αρχικά, επιχειρήθηκε γωνία στρέψης 10° και στη συνέχεια 7°. Στην περίπτωση της μικρότερης γωνίας στρέψης η εστία μετά το 2° κάτοπτρο ήταν σαφώς καλύτερη, καθώς δεν υπήρχαν παραμορφώσεις. Ωστόσο, αποδείχθηκε ότι δεν υπήρξαν μεγάλες αλλαγές στην ποιότητα της εικόνας.

<u>2^η διάταξη</u>

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος εξοπλισμός, εκτός από τη φωτογραφική μηχανή, η οποία ήταν η NIKON D700 με φακό macro σταθερής εστιακής απόστασης 105mm. Οι αποστάσεις της διάταξης μεταβάλλονταν έτσι ώστε να αποτυπώνεται κάθε φορά το φαινόμενο Schlieren με διαφορετικό βαθμό μεγέθυνσης. Στην πρώτη εικόνα, η οποία έχει ληφθεί με το μικρότερο βαθμό μεγέθυνσης και το είδωλο αποτυπώθηκε περίπου με κλίμακα 1:1, το φαινόμενο Schlieren είναι πιο εμφανές.



Εικόνα 36. Φωτογραφίες Schlieren, από σύστημα τύπου Ζ, της ίδιας φλόγας με διαφορετικό βαθμό μεγέθυνσης

Αναφορικά με την περιγραφή της φλόγας στις παραπάνω φωτογραφίες παρατηρείται παρόμοια δομή σε όλες τις περιπτώσεις. Ομοίως, παρατηρείται η εξαγωγή του καυσίμου, λόφω της διαφοράς πυκνοτήτων καυσίμου και αέρα και, εν συνεχεία, η ζώνη καύσης. Επίσης διακρίνεται η περιοχή των θερμών καυσαερίων πλησίον της κυρίως φλόγας, λόγω αφενός της διαφορετικής τους σύστασης και αφετέρου της διαφοράς θερμοκρασίας.

3^η διάταξη

Σε αυτήν την περίπτωση ο εξοπλισμός είναι ο ίδιος εκτός από τη φωτογραφική μηχανή, που εδώ χρησιμοποιήθηκε η Olympus omd EM-5 με φακό μεταβλητής εστιακής απόστασης 12-50 mm. Μια επιπλέον διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες δύο διατάξεις είναι ότι εδώ το φαινόμενο Schlieren προβάλλεται απευθείας στο εστιακό επίπεδο (αισθητήρα) της φωτογραφικής μηχανής και δεν χρησιμοποιείται το ημιδιαφανές χαρτί. Γι'αυτό το λόγο ο φακός εστιάζεται χειροκίνητα (manual focus) μέσω του 2^{ου} κατόπτρου πάνω στο αντικείμενο Schlieren. Όπως φαίνεται στις φωτογραφίες η διάμετρος της φωτεινής δέσμης ήταν μικρότερη από τις άλλες φορές με αποτέλεσμα να απεικονίζεται μικρότερο τμήμα της περιοχής δοκιμής.



Εικόνα 37. Φωτογραφίες Schlieren, από σύστημα τύπου Ζ, στις οποίες η εικόνα αποτυπώνεται απευθείας στο εστιακό επίπεδο της φωτογραφικής μηχανής

Επειδή απεικονίζεται μικρότερο τμήμα της υπό μελέτη περιοχής Schlieren, αποτυπώνεται μόνο η περιοχή περιμετρικά της ζώνης της φλόγας. Η φλόγα είναι προσκολλημένη στο ακροφύσιο και η μικρή κλίση της προς τα δεξιά, ιδιαίτερα στη δεύετρη φωτογραφία, υποδηλώνει κάποια εξωτερική διαταραχή από ρεύμα αέρα κάθετο σε αυτήν. Διακρίνεται εμφανώς η δέσμη του άκαυστου αερίου που εξέρχεται από το ακροφύσιο καθώς και η περιοχή των θερμών καυσαερίων που περιβάλλει τη φλόγα.

4.3.2 Σύστημα τύπου Ζ με κάτοπτρα διαμέτρου 8΄

<u>4^η διάταξη</u>

Στη διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό ζεύγος κατόπτρων και το φαινόμενο προβλήθηκε πάνω σε ημιδιαφανές χαρτί, από όπου αποτυπώθηκε με τη φωτογραφική μηχανή. Συγκεκριμένα, ο εξοπλισμός ήταν: λάμπα αλογόνου ισχύος 60 W και το αντίστοιχο τροφοδοτικό ισχύος, συγκεντρωτικός φακός διπλός αχρωματικός διαμέτρου 25 mm και εστιακής απόστασης 30 mm, ίριδα, δύο παραβολικά κάτοπτρα διαμέτρου 8 ιντσών (203 mm) και εστιακής απόστασης 1200 mm, ακμή μαχαιριού, ημιδιαφανές χαρτί και φωτογραφική μηχανή Olympus OMD EM-5 με φακό 12-50 mm.



Έναυση της φλόγας υγραερίου με αναπτήρα



Φλόγα διάχυσης από φιάλη υγραερίου



Φλόγα διάχυσης ανασηκωμένη

Εικόνα 38. Φωτογραφίες Schlieren, από σύστημα τύπου Ζ, μιας φλόγας διάχυσης

Τα παραβολικά κάτοπτρα είναι τα ιδανικά για σύστημα Schlieren τύπου Z και αυτό επιβεβαιώθηκε σε αυτήν τη διάταξη, αφού βελτιώθηκε η εστία μετά το 2° κάτοπτρο. Έγινε περισσότερο σημειακή, καθώς τα παραβολικά κάτοπτρα δεν προκαλούν σφαιρικά σφάλματα και επιπλέον τα συγκεκριμένα είναι μεγαλύτερης εστιακής απόστασης με αποτέλεσμα να μειώνονται τα σφάλματα της κόμης και του αστιγματισμού.

Η πρώτη φωτογραφία αποτυπώνει τη στιγμή της έναυσης της φλόγας με τη βοήθεια πιλοτικής φλόγας (αναπτήρα). Επομένως, απεικονίζονται δύο διαφορετικές φλόγες: αυτή που δημιουργεί ο αναπτήρας και αυτή που παράγει το ακροφύσιο. Οι έντονες θερμοκρασιακές διαφορές που προκαλούνται από την πιλοτική φλόγα είναι εμφανείς. Απομακρύνοντας τον αναπτήρα και αφήνοντας τη ροή γύρω από το ακροφύσιο να

σταθεροποιηθεί, η εικόνα που εμφανίζεται είναι αυτή που αντιστοιχεί στη δεύτερη φωτογραφία. Σε αυτήν αποτυπώνεται η φλόγα προσκολλημένη στο ακροφύσιο, η δέσμη άκαυστου αερίου που εισέρχεται στη ζώνη της καύσης και η περιοχή των θερμών καυσαερίων που την περιβάλλει. Τέλος, στην τρίτη φωτογραφία αυξάνεται η ταχύτητα της ροής του καυσίμου με αποτέλεσμα η φλόγα να αποκολάται από το ακροφύσιο και μάλιστα να διατηρείται αποκολλημένη σε μεγάλη απόσταση κατάντη αυτού. Η ορατή φλόγα βρίσκεται εκτός του πεδίου λήψης της φωτογραφίας γι' αυτό και δεν απεικονίζεται σε αυτήν. Είναι, ωστόσο, εμφανής η θέση στην οποία αναμιγνύονται το άκαυστο ρεύμα καυσίμου και το ρεύμα του εισερχόμενου στην περιοχή της καύσης αέρα. Αυτό είναι και το βασικό χαρακτηριστικό μιας φλόγας διάχυσης, ότι η ανάμιξη καυσίμου και οξειδωτικού γίνεται ταυτόχρονα με την καύση.

<u>5^η διάταξη</u>

Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε η φωτογραφική μηχανή NIKON D700 με φακό 70-200mm για να αποτυπώσει το φαινόμενο Schlieren απευθείας στο εστιακό της επίπεδο, χωρίς δηλαδή να γίνει πρώτα προβολή πάνω σε ημιδιαφανές χαρτί. Σε ό,τι αφορά τον υπόλοιπο εξοπλισμό, αυτός παραμένει ίδιος.



Εικόνα 39. Δέσμη καυσίμου από φιάλη υγραερίου. Το άκαυστο αέριο εξέρχεται από το ακροφύσιο και διασκορπίζεται στον αέρα που το περιβάλλει.

Η Εικόνα 39 αποτυπώνει τη δέσμη του άκαυστου αερίου που εξέρχεται από το ακροφύσιο. Στην πρώτη φωτογραφία παρατηρείται ότι μετά από κάποιο ύψος κατάντη του ακροφυσίου η δέσμη του αερίου διασκορπίζεται σταδιακά στον αέρα που την περιβάλλει. Μειώνοντας την παροχή του καυσίμου, δηλαδή μειώνοντας την ταχύτητα της ροής του εξερχόμενου αερίου, ο διασκορπισμός της δέσμης συμβαίνει σε χαμηλότερο ύψος κατάντη του ακροφυσίου, όπως φαίνεται στη δεύτερη φωτογραφία.



Έναυση του αερίου με αναπτήρα Φλόγα από φ

ήρα Φλόγα από φιάλη υγραερίου Εικόνα 40. Φλόγα διάχυσης από τη φιάλη υγραερίου



Στην πρώτη φωτογραφία της Εικόνα 40 αποτυπώνεται η έναυση της φλόγας υγραερίου από τον αναπτήρα. Λόγω του κίτρινου φωτός της πηγής δεν ήταν δυνατό να αποτυπωθούν οι φλόγες του αναπτήρα και του ακροφυσίου. Ωστόσο, καταγράφονται με μεγάλη ανάλυση οι ροές των καυσαερίων πάνω από κάθε φλόγα και η τυρβώδης ανάμιξή τους με τον αέρα που τις περιβάλλει. Επίσης, διακρίνεται το άκαυστο αέριο που εξέρχεται τόσο από τον αναπτήρα όσο και από το ακροφύσιο. Μάλιστα, στην περίπτωση του αερίου από το ακροφύσιο, αποτυπώνεται με μεγάλη ακάλυση οι ροξειδωτικό ακριβώτα, αποτυπώνεται με μεγάλη ακάλυση του αερίου από το ακροφύσιο, αποτυπώνεται με μεγάλη ακρίβεια η ανάμιξή του με το οξειδωτικό ακριβώς πριν από τη ζώνη της καύσης. Η δεύτερη φωτογραφία δείχνει τη φλόγα προσκολλημένη στο ακροφύσιο. Επίσης, φαίνονται τα θερμά καυσαέρια που την περιβάλλουν και καθώς απομακρύνονται από αυτήν αναμιγνύονται με τον αέρα. Τέλος, παρουσιάζεται η ανασηκωμένη φλόγα που προκύπτει με αύξηση της ροής του καυσίμου.



Εικόνα 41. Αέριο και φλόγα από τον αναπτήρα

Αντικείμενο Schlieren στην Εικόνα 41 είναι το αέριο καύσιμο και η φλόγα από τον αναπτήρα. Η πρώτη φωτογραφία απεικονίζει το αέριο που εξέρχεται από τον αναπτήρα και αναμιγνύεται με τον αέρα χωρίς να καεί. Η επόμενη αποτυπώνει τη φλόγα που παράγει ο αναπτήρας συνοδευόμενη από τα θερμά καυσαέρια.

Να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη διάταξη Schlieren απέδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα στην απεικόνιση του φαινομένου από όσες επιχειρήθηκαν. Ο φακός της φωτογραφικής μηχανής τοποθετήθηκε ακριβώς πίσω από την ακμή του μαχαιριού, η ρύθμιση της ταχύτητας και του διαφράγματος έγινε χειροκίνητα με το διάφραγμα να είναι τελείως ανοιχτό και η εστίαση έγινε επίσης χειροκίνητα στο άπειρο.

Παρατηρήθηκε μάλιστα ότι η αποκολλημένη φλόγα ήταν πολύ ευαίσθητη στον ήχο καθώς μετατοπιζόταν στιγμιαία με τον ήχο που παρήγαγε το κλείστρο της μηχανής κατά τη λήψη της φωτογραφίας.

<u>6^η διάταξη</u>

Στη συνέχεια, επιχειρήθηκε στην ίδια διάταξη με την προηγούμενη να χρησιμοποιηθεί ως σημειακή πηγή φωτός ένα LED λευκού χρώματος ισχύος 1W και να γίνει και πάλι λήψη της φωτογραφίας απευθείας χωρίς τη χρήση ημιδιαφανούς χαρτιού με τη φωτογραφική μηχανή NIKON d7100 και το φακό 70-200mm. Και σε αυτήν την περίπτωση ο φακός της φωτογραφικής μηχανής τοποθετήθηκε ακριβώς πίσω από την ακμή του μαχαιριού. Η ρύθμιση της ταχύτητας και του διαφράγματος έγινε χειροκίνητα με το διάφραγμα να είναι τελείως ανοιχτό και η εστίαση έγινε επίσης χειροκίνητα στο άπειρο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην Εικόνα 42.



Εικόνα 42. Φωτογραφίες Schlieren που προέκυψαν από σύστημα τύπου Ζ με σημειακή πηγή λευκού φωτός

Στην πρώτη φωτογραφία ως πηγή φωτός χρησιμοποιήθηκε μόνο το LED. Όμως η εστία μετά το 2° κάτοπτρο ήταν πολύ μεγάλη και εμφανίζονταν ανεπιθύμητες αντανακλάσεις από το εσωτερικό του LED (πράσινο χρώμα) με αποτέλεσμα τελικά το φαινόμενο Schlieren να μην απεικονίζεται πολύ έντονα. Ωστόσο, φαίνονται και η δέσμη του άκαυστου αερίου στην έξοδο του ακροφυσίου και η ζώνη της καύσης και τα θερμά καυσαέρια που την περιβάλλουν.

Στη συνέχεια, δοκιμάστηκαν pinholes (μικρές οπές) διαφορετικών διαμέτρων μπροστά από το LED, τα οποία μείωσαν την ένταση του φωτός. Στη δεύτερη φωτογραφία χρησιμοποιήθηκε pinhole 5mm και στην τρίτη ακόμη μικρότερο. Παρατηρήθηκε ότι η εστία ήταν μικρότερη με αποτέλεσμα το φαινόμενο Schlieren να εμφανίζεται πιο έντονο. Όπως δείχνουν και οι φωτογραφίες (2^η και 3^η) υπάρχει μεγαλύτερη διαβάθμιση στα χρώματα που εμφανίζονται και αντιστοιχούν σε διαφορετικά θερμοκρασιακά επίπεδα ή διαφορετική πυκνότητα. Είναι εντυπωσιακή η λεπτομέρεια με την οποία καταγράφεται η ανάμιξη καυσίμου και εισερχόμενου αέρα στην περίπτωση της αποκολλημένης φλόγας.

4.3.3 Σύστημα Schlieren με φακούς

Το σύστημα Schlieren με φακούς εφαρμόστηκε σε τρία συστήματα βαθμωτής πολυπλοκότητας. Αναλυτικότερα, τα αντικείμενα υπό μελέτη ήταν με τη σειρά που παρουσιάζονται ένα φλογίδιο υγραερίου, ένας καυστήρας τύπου Bunsen και ένας καυστήρας πορώδους αδρανούς μέσου. Ο εξοπλισμός του συστήματος ήταν ένας λαμπτήρας αλογόνου ισχύος 60 W, ως εκτεταμένη πηγή φωτός, με το αντίστοιχο τροφοδοτικό ισχύος, ένας συγκεντρωτικός φακός διπλός αχρωματικός διαμέτρου 25 mm και εστιακής απόστασης f=30mm, μια ορθογωνική σχισμή ρυθμιζόμενων διαστάσεων, δύο συγκλίνοντες φακοί ίδιας διαμέτρου 75 mm για τη δημιουργία του πεδίου Schlieren (δηλαδή της παράλληλης δέσμης φωτός) εκ των οποίων ο ένας είχε εστιακή απόσταση 300 mm και ο άλλος 150 mm, η ακμή ενός μαχαιριού, ένα ρυζόχαρτο ως επίπεδο προβολής και η φωτογραφική μηχανή Olympus OMD EM-5 με φακό 12-50 mm.

Αρχικά μελετήθηκαν η φλόγα από τη φιάλη υγραερίου οικιακής χρήσης, η φλόγα ενός αναπτήρα και η φλόγα από έναν καυστήρα Bunsen. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



(α) Φλόγα από φιάλη υγραερίου

(β) Φλόγα υγραερίου και αναπτήρας (γ) Φλόγα από καυστήρα Bunsen

Εικόνα 43. Σύγκριση απλής φλόγας διάχυσης με τη φλόγα προανάμιξης του καυστήρα Bunsen

Είναι γνωστό ότι ο καυστήρας Bunsen αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα καυστήρα προανάμιξης. Η ανάμιξη αέρα και καυσίμου γίνεται στη βάση του καυστήρα, ώστε μέχρι αυτά να φτάσουν στην κορυφή του να έχουν αναμιχθεί πλήρως. Μια τυπική φλόγα από καυστήρα Bunsen αποτελείται από δύο τμήματα: την εσωτερική φλόγα προανάμιξης πλούσιου μίγματος και τη φλόγα διάχυσης που την περιβάλει (Εικόνα 44a). Η δευτερεύουσα αυτή φλόγα διάχυσης προκύπτει από το μονοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο, που είναι προϊόντα της εσωτερικής πλούσιας σε καύσιμο φλόγας προανάμιξης, όταν αυτά αλληλεπιδράσουν με τον αέρα του περιβάλλοντος. [54]. Αυτό ακριβώς αποτυπώνει και το φαινόμενο Schlieren στην τρίτη φωτογραφία (Εικόνα 43γ) : τον εσωτερικό κώνο της φλόγας προανάμιξης και τη φλόγα διάχυσης που τον περιβάλλει. Μάλιστα, τέτοιες φωτογραφίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες καθώς μετρώντας την εσωτερική γωνία του κώνου μπορεί να υπολογιστεί η στρωτή ταχύτητα καύσης (laminar burning velocity- S_L). Η στρωτή ταχύτητα καύσης ορίζεται ως η σχετική ταχύτητα διάδοσης της φλόγας ως προς την ταχύτητα του μίγματος των αντιδρώντων και εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου, από τη σύνθεση του μίγματος των αντιδρώντων (αν είναι υπέρ- ή υπό- ή στοιχειομετρικό) και από την αρχική πίεση και θερμοκρασία [2]. Μέσω της τεχνικής Schlieren αναδεικνύεται ο εσωτερικός κώνος συνεπώς δύναται να προσδιοριστεί η γωνία που αυτός σχηματίζει με το ακροφύσιο. Μέσω του προσδιορισμού της γωνίας προκύπτει η στρωτή ταχύτητα καύσης, που είναι μέγεθος βασικό της φλόγας προανάμιξης, για τη δεδομένη σύσταση των αντιδρώντων [54].

Πιο συγκεκριμένα, η σχέση που συνδέει τη στρωτή ταχύτητα καύσης (S_L) και τη γωνία του κώνου α είναι: $S_L = V_u sina$, όπου V_u είναι η ταχύτητα με την οποία το άκαυστο μίγμα εξέρχεται από τον καυστήρα (Εικόνα 44). Θεωρώντας την τιμή της V_u πολύ μικρή, αφού πρόκειται για στρωτή ροή, η τιμή της ταχύτητας S_L είναι ευθέως ανάλογη με το sina. Κατ' επέκταση, η γωνία του κώνου α μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο που μεταβάλλεται η ταχύτητα S_L.



Εικόνα 44. (a) Σχηματική αναπαράσταση καυστήρα Bunsen, (b) Κωνική φλόγα προανάμιξης καυστήρα Bunsen [54]

Η στρωτή ταχύτητα καύσης S_L εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου, από τη σύνθεση του μίγματος των αντιδρώντων και από την αρχική πίεση και θερμοκρασία. Συγκεκριμένα η στοιχειομετρία του μίγματος αντιδρώντων, δηλαδή ο λόγος ισοδυναμίας φ, για παρόμοια καύσιμα επηρεάζει την ταχύτητα S_L με τον ίδιο τρόπο που επηρεάζει και τη θερμοκρασία της φλόγας [54]. Επομένως, αναμένονται μέγιστες ταχύτητες καύσης σε περιοχές ελαφρώς πλούσιου μίγματος, όπως υποδεικνύει και το Διάγραμμα 1 που αφορά καύσιμο μεθάνιο.



Διάγραμμα 1. Επίδραση του λόγου καυσίμου-αέρα φ στη στρωτή ταχύτητα καύσης για μίγματα μεθανίουαέρα υπό ατμοσφαιρική πίεση [66]
Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν, οι φωτογραφίες που παρουσιάζονται στην Εικόνα 45 και απεικονίζουν διαφορετικές φλόγες από τον καυστήρα Bunsen, μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την επίδραση που έχει η στοιχειομετρία του μίγματος στη στρωτή ταχύτητα καύσης.



Εικόνα 45. Φλόγες από καυστήρα Bunsen με καύσιμο αέριο προπάνιο.

Να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια λήψης των φωτογραφιών της Εικόνα 45 αυτό που άλλαζε ήταν η παροχή του αέρα στη βάση του καυστήρα. Η πρώτη φωτογραφία αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη ποσότητα παρεχόμενου αέρα από τη βάση του καυστήρα, δηλαδή μικρότερη τιμή του λόγου ισοδυναμίας φ, σε σχέση με τις υπόλοιπες φωτογραφίες. Στη δεύτερη έχει μειωθεί η παροχή του αέρα, δηλαδή είναι μεγαλύτερη η τιμή του φ. Τέλος, στην τρίτη φωτογραφία έχει διακοπεί τελείως η παροχή του αέρα από τη βάση του καυστήρα και διοχετεύεται μόνο καύσιμο. Έτσι, η φλόγα αυτή αποτελεί φλόγα διάχυσης, αφού το καύσιμο και το οξειδωτικό (αέρας περιβάλλοντος) αναμιγνύονται έξω από τον καυστήρα, με αποτέλεσμα να μην σχηματίζεται ο εσωτερικός κώνος της φλόγας προανάμιξης που φαίνεται στις δύο πρώτες φωτογραφίες.

Συγκρίνοντας τις δύο πρώτες φωτογραφίες, παρατηρείται ότι στη δεύτερη, η οποία αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τιμή του φ, η γωνία του κώνου α είναι μικρότερη. Επομένως, λόγω της σχέσης που συνδέει τη γωνία α και την τιμή της S_L , η στρωτή ταχύτητα καύσης στη δεύτερη φωτογραφία, θα είναι μικρότερη. Εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι, για το ίδιο καύσιμο και τις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, καθώς ο λόγος ισοδυναμίας φ αυξάνεται, αυξάνεται και η στρωτή ταχύτητα καύσης. Με δεδομένο ότι τα μίγματα στις περιπτώσεις αυτές ήταν φτωχά σε καύσιμο (φ<1), τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης συμβαδίζουν απόλυτα με αυτά στα οποία καταλήγει και το Διάγραμμα 1, που παρατίθεται στην προηγούμενη σελίδα.



Φλόγα καυστήρα Bunsen
Φλόγα από τη φιάλη υγραερίου
Εικόνα 46. Φλόγα από καυστήρα Bunsen και απλή φλόγα διάχυσης

Στην Εικόνα 46 απεικονίζονται συγκριτικά δύο διαφορετικές φλόγες διάχυσης προερχόμενες από διαφορετικά συστήματα καύσης. Η πρώτη είναι φλόγα που δημιουργείται από καυστήρα τύπου Bunsen στον οποίο δεν διοχετεύεται παροχή αέρα από τη βάση του αλλά μόνο παροχή καυσίμου. Έτσι, η φλόγα που προκύπτει είναι φλόγα διάχυσης αφού το καύσιμο και το οξειδωτικό (αέρας περιβάλλοντος) αναμιγνύονται έξω από τον καυστήρα καθώς ταυτόχρονα λαμβάνει χώρα η καύση. Παρατηρείται ότι η φλόγα από τον καυστήρα Bunsen παρουσιάζει μεγαλύτερες θερμοκρασιακές διαφορές σε σχέση με τη φλόγα από τη φιάλη υγραερίου και επομένως εμφανίζεται πιο έντονα το φαινόμενο Schlieren.

Το σύστημα Schlieren εφαρμόστηκε τελικά σε έναν πορώδη καυστήρα ο οποίος αποτελεί αντικείμενο μελέτης όλης της παρούσας εργασίας. Όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 5 ο καυστήρας είναι ορθογωνικός και αποτελείται από δύο στρώματα κεραμικού υλικού. Η καύση λαμβάνει χώρα στο δεύτερο στρώμα και η φλόγα εγκλωβίζεται στο εσωτερικό του καυστήρα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η μελέτη του καυστήρα με το σύστημα Schlieren έγινε αφού αφαιρέθηκε το δεύτερο στρώμα. Οι φωτογραφίες αντιστοιχούν σε συνθήκες καύσης με αέριο προπάνιο για αυξανόμενο λόγο αέρα καύσης.

	Φωτογραφία Schlieren	Απλή φωτογραφία	Παρατη- ρήσεις
1			λ<1
2			λ=1
3			λ>1
4		mönnunnan	λ>1



Πίνακας 1. Φωτογραφίες Schlieren και φωτογραφίες ορατής φλόγας ενός πορώδους καυστήρα από τον οποίο έχει αφαιρεθεί το ένα στρώμα κεραμικού υλικού.

Η πρώτη στήλη φωτογραφιών δείχνει το φαινόμενο Schlieren από την πλευρά της μικρής διάστασης του ορθογωνικού καυστήρα ενώ στη δεύτερη στήλη φαίνονται οι αντίστοιχες φωτογραφίες της ορατής φλόγας από την πλευρά της μεγάλης διάστασης. Να σημειωθεί ότι οι εικόνες αντιστοιχούν σε διαφορετικές συνθήκες στοιχειομετρίας και έχουν τοποθετηθεί στον Πίνακας 1 με σειρά αυξανόμενου λ. Γενικά, παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις μικρής τιμής του λ, δηλαδή για καύση με πλούσιο ή στοιχειομετρικό ή ελαφρώς φτωχό μίγμα (φωτογραφίες 1-4) υπάρχει ομοιομορφία στην κατανομή των μικρών φλογών πάνω στην επιφάνεια του καυστήρα, ενώ στα πολύ από την είσοδο του αέρα του περιβάλλοντος περιμετρικά του καυστήρα. Σε όλες τις περιπτώσεις οι φλόγες τείνουν να συγκεντρωθούν προς το κέντρο του καυστήρα, πιθανώς λόγω της περιφερειακής εισαγωγής του αέρα ή της ύπαρξης εξαερισμού για την απαγωγή των καυσαερίων.

Πιο συγκεκριμένα, για λ<1 (φωτ.1), στην επιφάνεια του καυστήρα διακρίνονται οι μικρές φλόγες προανάμιξης αλλά το βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι εμφανίζεται έντονη φλόγα διάχυσης η οποία φτάνει σε μεγάλο ύψος κατάντη του καυστήρα και ακτινοβολεί. Σε αυτή την περίπτωση η λειτουργία του καυστήρα είναι σταθερή και

δεν επηρεάζεται από εισερχόμενο αέρα περιμετρικά. Εξετάζοντας την περίπτωση στοιχειομετρικής καύσης (φωτ.2), το φαινόμενο της διάχυσης μειώνεται σε μεγάλο βαθμό. Παρατηρούνται οι μικρές μπλε φλόγες προανάμιξης που εξέρχονται από τις οπές του πρώτου στρώματος του καυστήρα και κατανέμονται ομοιόμορφα στην επιφάνειά του. Η ομοιόμορφη κατανομή των φλογών οφείλεται στην ομοιόμορφη προσαγωγή του μίγματος καυσίμου-αέρα στην ανάντη πλευρά του πορώδους στρώματος. Τέλος, για λ >1 και μάλιστα όσο το λ αυξάνεται, είναι εμφανής η ασταθής λειτουργία του καυστήρα. Οι μικρές φλόγες προανάμιξης επηρεάζονται πολύ από τον εισερχόμενο αέρα περιμετρικά του καυστήρα. Οι περιφερειακές φλόγες σβήνουν, οι υπόλοιπες τείνουν να συγκεντρωθούν στο κέντρο του καυστήρα και αποκολλώνται από την επιφάνειά του.

Επίσης, είναι γνωστό για τις φλόγες προανάμιξης ότι εάν το μίγμα είναι πλούσιο σε καύσιμο τότε η φλόγα έχει χρώμα κίτρινο, ενώ εάν το μίγμα είναι φτωχό η φλόγα έχει χρώμα μπλε [2]. Αυτό επιβεβαιώνεται από τις παραπάνω φωτογραφίες. Καθώς το μίγμα από υπερστοιχειομετρικό (φωτ.1) γίνεται υποστοιχειομετρικό (φωτ.7), το χρώμα της φλόγας από κίτρινο γίνεται μπλε.

Οι φωτογραφίες Schlieren, στις περιπτώσεις που οι φλόγες είναι προσκολημένες στην επιφάνεια του καυστήρα, αποτυπώνουν τα μικρά αυτά φλογίδια, το μήκος των οποίων φαίνεται να μειώνεται καθώς η τιμή του λ αυξάνεται. Όταν οι φλόγες αποκολλώνται αυτό που απεικονίζει το φαινόμενο Schlieren είναι οι δέσμες προαναμεμιγμένου καυσίμου-αέρα που εξέρχονται από τις οπές της πορώδους επιφάνειας. Οι δέσμες αυτές δεν αποτυπώνονται τόσο έντονα όσο η δέσμη του άκαυστου αερίου στη φλόγα διάχυσης από τη φιάλη υγραερίου, αφού στην προκειμένη περίπτωση πρόκειται για προαναμεμιγμένο καύσιμο και οξειδωτικό και η διαφορά στην πυκνότητα είναι μικρότερη.

Συμπερασματικά, η λειτουργία του πορώδους καυστήρα χωρίς το δεύτερο στρώμα κεραμικού υλικού επηρεάζεται έντονα από τη στοιχειομετρία του μίγματος καυσίμου/οξειδωτικού και γίνεται ασταθής σε περιοχές φτωχού μίγματος. Ωστόσο, η λειτουργία του καυστήρα αυτού εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο για $1.1 \le \lambda \le 1.8$ και αποδεικνύεται σταθερή όταν αυτός λειτουργεί και με τα δύο πορώδη στρώματα.

4.4 Συμπεράσματα

Η τεχνική Schlieren αποτελεί οπτική μέθοδο για τη διαγνωστική των φαινομένων καύσης ικανή να παρέχει τόσο ποιοτικές όσο και ποσοτικές πληροφορίες για τη διαδικασία της καύσης χωρίς να παρεμβαίνει σε αυτήν. Παρουσιάζει με μεγάλη ακρίβεια τη δομή της φλόγας και τις θερμοκρασιακές διαφορές που επικρατούν σε

αυτήν. Επίσης, τα οπτικά αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό βασικών μεγεθών της καύσης όπως είναι η στρωτή ταχύτητα καύσης. Η υλοποίηση της μεθόδου απαιτεί ποικίλο οπτικό και φωτογραφικό εξοπλισμό προηγμένης τεχνολογίας και χρονοβόρα διαδικασία κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Χαρακτηρισμός πορώδους καυστήρα με χρήση της μεθόδου CGA

Εισαγωγή

Το σύστημα συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων αποτελεί, όπως αναφέρθηκε, μια συμβατική τεχνική ιδιαίτερα αξιόπιστη για τη διαγνωστική των φαινομένων καύσης. Υπό τη σκοπιά της αναζήτησης νέων εναλλακτικών καυσίμων με μειωμένες εκπομπές ρύπων, η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε σε δύο καύσιμα που περιείχαν σε διαφορετικές αναλογίες μεθάνιο (CH₄), μονοξείδιο (CO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και υδρογόνο (H₂). Πιο συγκεκριμένα, αρχικά, το καύσιμο που χρησιμοποιήθηκε αποτελούνταν από 38% CH₄, 26% CO, 16% H₂ και 20% CO₂ και στο εξής θα αναφέρεται ως καύσιμο Α. Στη συνέχεια, μελετήθηκε ένα διαφορετικό μίγμα αυτών των αερίων που περιείχε 47% CH4, 33% CO και 20% H2 και θα αναφέρεται ως καύσιμο Β. Οι αναλογίες αυτές επιλέχθηκαν έτσι ώστε το καύσιμο Α να προσομοιάζει ένα περίπου ισομοριακό μίγμα συνθετικού αερίου (τυπικής σύστασης CO/ H₂=3/2) και βιοαερίου (τυπικής σύστασης CH₄/CO₂=3/2). Αντίστοιγα, το καύσιμο Β προσομοιάζει ισομοριακό μίγμα φυσικού αερίου, το οποίο αποτελείται κυρίως από CH₄, και συνθετικού αερίου τυπικής σύστασης CO/H₂=3/2. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε μια φιάλη που περιείχε εξ' αρχής το μίγμα 47% CH_4 , 33% CO, 20% H_2 yia the troopodóthon tou kaugtúpa me to kaúgimo B kai gth συνέχεια αναμίχθηκε μία ροή καυσίμου από τη φιάλη αυτή με άλλη ροή καυσίμου από φιάλη που περιείχε 100% CO₂ για τη λειτουργία του καυστήρα με το καύσιμο Α. Με τον τρόπο αυτό μελετήθηκε η επίδραση που είχε η προσθήκη CO2 στο ρεύμα καυσίμου στα θερμοκρασιακά επίπεδα και τις εκπομπές καυσαερίων. Η μελέτη αυτή παραμετροποιήθηκε με το λόγο αέρα καύσης και το ονομαστικό θερμικό φορτίο. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις θερμοκρασιών και εκπομπών για κάθε καύσιμο έγιναν για τιμές του λόγου αέρα καύσης $1.1 \le \lambda \le 1.8$ και του θερμικού φορτίου 200kW/m²- 800kW/m^2 . Τέλος, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της σύστασης του καυσίμου στη συμπεριφορά του καυστήρα ως προς την ακτινοβολία, αυτός τροφοδοτήθηκε με τρίτο μίγμα αερίων (θα αναφέρεται ως καύσιμο Γ) που περιείχε 40% CO₂ και 60%

από το μίγμα της φιάλης με το καύσιμο B, για λ=1.2 και εύρος θερμικής ισχύος 200kW/m²-800kW/m².

Η επιλογή του καυστήρα στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ο πορώδης καυστήρας έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να λειτουργήσει σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, με μίγματα αερίων καυσίμων οποιασδήποτε σύστασης, και υπό διάφορες συνθήκες λόγου αέρα καύσης, ιδιαίτερα σε περιοχές φτωχού μίγματος και με καύσιμα χαμηλής θερμογόνου δύναμης, ενώ παρουσιάζει χαμηλές εκπομπές ρύπων [55],[64]. Έχει, λοιπόν, ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου καυστήρα υπό τις συνθήκες λειτουργίας και για τα μίγματα αερίων που αναφέρθηκαν.

5.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις φαίνεται στην Εικόνα 47 που ακολουθεί και ο εξοπλισμός περιγράφεται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους. Συνοπτικά, η διάταξη αποτελείται από έναν πρότυπο καυστήρα προανάμιξης πορώδους μέσου ο οποίος είναι προσαρμοσμένος σε ένα σύστημα που επιτρέπει την κατακόρυφη και πλάγια μετατόπισή του. Ο καυστήρας τροφοδοτείται με μίγμα αέρα και καυσίμου, οι ογκομετρικές παροχές των οποίων ρυθμίζονται από ψηφιακά παροχόμετρα. Τα ξεχωριστά ρεύματα του αέρα και του καυσίμου αναμιγνύονται σε μια απόσταση μεγαλύτερη των 40 διαμέτρων ανάντη του καυστήρα και στη συνέχεια το μίγμα διοχετεύεται στην είσοδο αυτού. Η δειγματοληψία γίνεται απευθείας στην έξοδο των καυσαερίων με έναν καθετήρα (probe) από οξείδιο του αργιλίου (Al₂O₃) τοποθετημένο στο κέντρο του καυστήρα. Έχει αποδειχθεί [56] ότι οι θερμοκρασίες και οι συγκεντρώσεις των καυσαερίων για τον συγκεκριμένο καυστήρα είναι ίδιες σε όλη την επιφάνειά του, επομένως η επιλογή του κέντρου του καυστήρα ως θέση για το άκρο της γραμμής δειγματοληψίας είναι αντιπροσωπευτική της συμπεριφοράς του σε οποιοδήποτε σημείο στην επιφάνειά του. Η γραμμή δειγματοληψίας οδηγεί το δείγμα των καυσαερίων στο σύστημα συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων αφού πρώτα διέλθει από μια υδατοπαγίδα για συμπύκνωση και αφαίρεση του νερού. Δηλαδή, η μέτρηση των καυσαερίων γίνεται επί ξηρώ. Στο ίδιο σημείο με τον καθετήρα είναι τοποθετημένο και ένα κεραμικά μονωμένο θερμοστοιχείο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Η θερμοκρασία της πορώδους επιφάνειας του καυστήρα καταγράφεται ταυτόχρονα από μια θερμοκάμερα τοποθετημένη κάθετα και σε απόσταση 1 μέτρου πάνω από την επιφάνεια του καυστήρα. Τέλος, ο αναλυτής καυσαερίων παρακολουθούσε σε πραγματικό χρόνο και κατέγραφε τις εκπομπές των O₂, CO₂, NO, NO₂, CO. Να σημειωθεί ότι επειδή κανένα από τα δύο καύσιμα δεν περιέχει θείο, δεν υπήρχε παραγωγή SO2 στα καυσαέρια, γι' αυτό και δε γίνεται λόγος σε αυτό. Επίσης, δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για την ανίχνευση υδρογονανθράκων στα καυσαέρια καθώς πειραματική μελέτη στον συγκεκριμένο καυστήρα με καύσιμο βιοαέριο και εφαρμογή της μεθόδου αέριας χρωματογραφίας (GC) έχει δείξει ότι δεν υπάρχουν καθόλου, ή τουλάχιστον δεν είναι ανιχνεύσιμες, τέτοιες συγκεντρώσεις [44].



Εικόνα 47: Σχηματική αναπαράσταση πειραματικής διάταξης για την καταγραφή θερμοκρασιών και εκπομπών καυσαερίων

5.1.1 Πορώδης καυστήρας

Ο πορώδης καυστήρας είναι ένας καυστήρας προανάμιξης προηγμένης τεχνολογίας που παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Η αρχή λειτουργίας του έγκειται στο ότι το προαναμεμιγμένο καύσιμο και οξειδωτικό καίγονται στις κοιλότητες ενός υπεραγώγιμου πορώδους υλικού, το οποίο επιτρέπει την ανακυκλοφορία της παραγόμενης θερμότητας από τα προϊόντα στα αντιδρώντα, ενώ η φλόγα εγκλωβίζεται στο πορώδες πλέγμα και δεν είναι εμφανής-ελεύθερη όπως συμβαίνει σε άλλους συμβατικούς καυστήρες αερίων. Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές αρχές που διέπουν την καύση μέσα σε ένα πορώδες υλικό, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και οι εφαρμογές ενός πορώδους καυστήρα καταλήγοντας στον καυστήρα που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη της παρούσας εργασίας.

Η καύση μέσα στον πορώδη καυστήρα λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες «περίσσειας ενθαλπίας». Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διαδικασία κατά την οποία η ενθαλπία των προϊόντων της καύσης χρησιμοποιείται για την προθέρμανση των εισερχόμενων στον καυστήρα αντιδρώντων. Επειδή η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται από θερμοκρασίες φλόγας και ταχύτητες καύσης υψηλότερες από την αντίστοιχη αδιαβατική θερμοκρασία φλόγας και στρωτή ταχύτητα καύσης, συχνά αναφέρεται και ως «υπεραδιαβατική» καύση. Τα όρια αναφλεξιμότητας για

ένα μίγμα καυσίμου/αέρα ορίζονται ως οι ακραίες τιμές των συγκεντρώσεων του καυσίμου στο μίγμα μεταξύ των οποίων μπορεί να υπάρξει αυτοσυντηρούμενη φλόγα. Επειδή το φτωχό όριο, δηλαδή το κάτω όριο, αναφλεξιμότητας ενός μίγματος μειώνεται καθώς η αρχική θερμοκρασία του μίγματος αυξάνεται [56], η καύση με περίσσεια ενθαλπίας οδηγεί σε μείωση του ορίου αυτού. Επομένως, ο πορώδης καυστήρας παρουσιάζει διευρυμένα όρια αναφλεξιμότητας για ένα δεδομένο καύσιμο σε σχέση με άλλους καυστήρες.

Ένας πορώδης καυστήρας μπορεί να αποτελείται από δύο περιοχές οι οποίες αντιστοιχούν στις ζώνες μιας φλόγας προανάμιξης. Η πρώτη περιοχή στην οποία εισέρχεται το μίγμα καυσίμου/αέρα αποτελείται από μικρούς πόρους και είναι η ζώνη προθέρμανσης των αντιδρώντων. Η δεύτερη περιοχή αντιστοιχεί στη ζώνη της καύσης και αποτελείται από μεγάλους πόρους [57]. Η πορώδης δομή επιτρέπει, όπως αναφέρθηκε, την ανακυκλοφορία της θερμότητας. Η ανακυκλοφορία περιλαμβάνει έναν συνδυασμό και των τριών τρόπων μετάδοσης θερμότητας – αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία - και η διαδικασία αυτή μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά ως εξής: Κατάντι της ζώνης αντίδρασης, τα καυσαέρια έχουν υψηλότερη θερμοκρασία από τις στερεές πορώδεις δομές του καυστήρα και έτσι θερμότητα μεταφέρεται με συναγωγή από τα θερμά προϊόντα της καύσης στο πορώδες πλέγμα που τα περιβάλει. Το θερμό πλέον στερεό, με τη σειρά του, μεταφέρει με αγωγή και ακτινοβολία θερμότητα προς την ανάντι κατεύθυνση με αποτέλεσμα πριν τη ζώνη της αντίδρασης το πορώδες μέσο να έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία από τα αέρια αντιδρώντα και να τους μεταφέρει θερμότητα με συναγωγή. Με αυτόν τον τρόπο προθερμαίνεται το εισερχόμενο στον καυστήρα αέριο μίγμα μέχρι της θερμοκρασία έναυσης στην οποία λαμβάνει χώρα η αντίδραση και συνεχίζεται η ίδια διαδικασία [55].

Η μεγάλη θερμοχωρητικότητα του πορώδους μέσου διευκολύνει τη σταθεροποίηση της φλόγας σε περιπτώσεις που αυτή διαταράσσεται λόγω αλλαγής του θερμικού φορτίου ή του λόγου αέρα καύσης. Η δομή ενός πορώδους καυστήρα, όπως αυτή που αναφέρθηκε παραπάνω, με δύο περιοχές διαφορετικού μεγέθους πόρων, βοηθά επίσης στην επέκταση του εύρους σταθερότητας της φλόγας, καθώς η ζώνη της αντίδρασης σταθεροποιείται στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο περιοχών και η ανάντι περιοχή με τη δομή των μικρών πόρων αποτρέπει την οπισθοδρόμηση (flashback) της φλόγας [58]. Η σταθεροποίηση της φλόγας έχει ως αποτέλεσμα και ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του καυστήρα. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία μέσα στο πορώδες καθ'ύψος του καυστήρα αυξάνεται στη ζώνη της προθέρμανσης, φτάνει σε μια μέγιστη τιμή στη ζώνη αντίδρασης κοντά στη διεπιφάνεια των δύο περιοχών του καυστήρα και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την έξοδο των καυσαερίων από αυτόν [57]. Αυτό οφείλεται, προφανώς, στο γεγονός ότι το πορώδες απάγει μέρος της θερμότητας από τη ζώνη της καύσης και το μεταφέρει στη ζώνη προθέρμανσης. Με αυτόν τον τρόπο η θερμοκρασία της φλόγας διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα με αποτέλεσμα να μειώνεται η δημιουργία των θερμικών οξειδίων του αζώτου. Επίσης, η ομοιογενής κατανομή της θερμοκρασίας διατηρεί χαμηλές τις συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα στα εξερχόμενα καυσαέρια για πλήρες εύρος ισχύος.

Λόγω των χαρακτηριστικών και των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν, ο πορώδης καυστήρας ενδείκνυται για διαφορετικά πεδία εφαρμογών. Χρησιμοποιείται σε διεργασίες θέρμανσης σε βιομηχανική, εμπορική και οικιακή κλίμακα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι στη θέρμανση του χώρου, σε χημικές διεργασίες και στην κατεργασία μετάλλων, στην ανόπτηση του γυαλιού, στην ξήρανση επιστρώσεων και χρώματος, στην επεξεργασία τροφίμων, στην ξήρανση χαρτιού [57].

Τα κύρια σχεδιαστικά χαρακτηριστικά ενός πορώδους καυστήρα αφορούν τον αριθμό, το μήκος, τον προσανατολισμό, το σχήμα, την πυκνότητα και το υλικό των διαφορετικών πορώδων δομών. Η πυκνότητα του πορώδους πλέγματος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η υψηλή πυκνότητα πορώδους δομής αυξάνει τη μετάδοση της θερμότητας με αγωγή και συναγωγής, ενώ η υψηλή διαπερατότητα ελαττώνει την επαγόμενη πτώση πίεσης. Ωστόσο, η επιλογή υλικού και το γεωμετρικό σχήμα της δομής είναι οι πιο κρίσιμοι παράγοντες σχεδιασμού καθώς καθορίζουν την αντοχή του υλικού σε θερμικές τάσεις, χημική αδράνεια και κόπωση. Για το λόγο αυτό τα κεραμικά υλικά είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα σε πορώδεις καυστήρες. Τα πιο συνήθη κεραμικά υλικά είναι το οξείδιο του αλουμινίου, το καρβίδιο του πυριτίου και το οξείδιο του ζιρκονίου. Αντιστοίχως, οι πιο διαδεδομένες δομές είναι τα δικτυωτά μακρο-πλέγματα, τα ελάσματα και οι πληρωμένες κλίνες. Το οξείδιο του αλουμινίου χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον σε ελασματικές δομές ενώ το καρβίδιο του πυριτίου σε αμιγώς πορώδεις δομές [6].

Ο πορώδης καυστήρας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη φαίνεται στην Εικόνα 48. Είναι ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 185x135mm και έχει δύο περιοχές. Η πρώτη περιοχή, κατασκευασμένη από οξείδιο του αλουμινίου (Al₂O₃), αποτελείται από οπές ενός χιλιοστού κατανεμημένες ανά πέντε χιλιοστά. Η περιοχή αυτή παρέχει ομοιόμορφα το προαναμεμιγμένο καύσιμο και οξειδωτικό, δρώντας επίσης ως φλογοπαγίδα σε περιπτώσεις όπου η ταχύτητα καύσης ανάντι της ροής είναι μικρότερη της ταχύτητας του εισερχόμενου μίγματος. Η δεύτερη περιοχή είναι κατασκευασμένη από καρβίδιο του πυριτίου (SiSiC) και είναι μια αμιγώς πορώδης δομή κατανομής 10ppi, δηλαδή 10 πόροι ανά ίντσα, στην οποία λαμβάνει χώρα η καύση. Καθ'ύψος, στην κατεύθυνση της διάδοσης της φλόγας, οι δύο περιοχές έχουν συνολικό μήκος 15 mm και 20 mm.



Εικόνα 48: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά πορώδους καυστήρα

5.1.2 Θερμοστοιχείο

Η θερμοκρασία των καυσαερίων μετρήθηκε με ένα θερμοστοιχείο τοποθετημένο στο κέντρο του καυστήρα και σε μηδενικό ύψος από την επιφάνειά του.

Γενικά, το θερμοστοιχείο ή θερμοζεύγος είναι ο ευρύτερα χρησιμοποιούμενος μεταλλάκτης θερμοκρασίας για τη μέτρηση ή τον έλεγχο αυτής. Στην απλούστερή του μορφή αποτελείται από δύο αγωγούς από διαφορετικά μέταλλα ή κράματα μετάλλων, οι οποίοι βρίσκονται σε επαφή στο ένα άκρο τους. Η λειτουργία του βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck, ή θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, σύμφωνα με το οποίο αν δύο μεταλλικοί αγωγοί, οπωσδήποτε διαφορετικών υλικών, έρθουν σε επαφή, τότε στα άκρα τους αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη Εικόνα 49. Η ηλεκτρεγερτική αυτή δύναμη οφείλει την ύπαρξή της σε καθαρά θερμικά αίτια και το μέγεθός της εξαρτάται από το είδος των υλικών των δύο μεταλλικών αγωγών και από τη θερμοκρασία που επικρατεί στο σημείο επαφής τους [59]. Η μέτρηση, λοιπόν, της θερμοκρασίας Τ_M του σημείου επαφής (θέση 1) ανάγεται σε μέτρηση της τάσης στα άκρα των αγωγών (θέση 2). Στη θέση 2, τα δύο άκρα των υλικών Α και Β συνδέονται με τους αγωγούς του μοναδικού τρίτου μετάλλου (καλώδια), μέσω των οποίων το θερμοστοιχείο συνδέεται με το βολτόμετρο. Εκεί η θερμοκρασία που επικρατεί ονομάζεται θερμοκρασία αναφοράς T_R και διατηρείται τεχνητά σταθερή (π.χ. στους 0 °C). Η ζητούμενη θερμοκρασία Τ_M υπολογίζεται από τη σχέση

 $E(T_M) = V + E(T_R)$, όπου E(T) είναι η χαρακτηριστική συνάρτηση του θερμοστοιχείου, που εξαρτάται από τον τύπο του θερμοστοιχείου, δηλαδή το ζεύγος των μετάλλων, και V είναι η μετρούμενη από το βολτόμετρο διαφορά δυναμικού.

Σήμερα, τα θερμοστοιχεία έχουν ευρεία επιστημονική και βιομηχανική εφαρμογή. Χρησιμοποιούνται για μετρήσεις θερμοκρασίας σε κλιβάνους, στην έξοδο των καυσαερίων των αεριοστροβίλων, σε μηχανές ντήζελ και άλλες βιομηχανικές διαδικασίες. Χρησιμοποιούνται επίσης, σε οικιακούς, επαγγελματικούς και δημόσιους χώρους ως αισθητήρες θερμοκρασίας στους θερμοστάτες και αισθητήρες πυρκαγιάς σε διατάξεις ασφαλείας μεγάλων συσκευών που λειτουργούν με αέριο.



Εικόνα 49. Σχηματική αναπαράσταση θερμοστοιχείου

Το θερμοστοιχείο που χρησιμοποίηθηκε για την παρούσα μελέτη είναι τύπου S. Δηλαδή αποτελείται από ζεύγος ενός αγωγού που είναι κράμα μετάλλων λευκόχρυσου-Pt (90%) και ροδίου-Rh (10%) και ενός αγωγού που αποτελείται από 100% λευκόχρυσο-Pt. Μάλιστα, στο θετικό ακροδέκτη (+) συνδέεται το κράμα 90%Pt-10%Rh και στον αρνητικό (-) ο αγωγός από Pt. Η περιοχή λειτουργίας του συγκεκριμένου θερμοστοιχείου είναι 50 - 1768 °C και το πλεονέκτημά του είναι ότι παρουσιάζει υψηλή αντίσταση σε οξείδωση και διάβρωση [59].

5.1.3 Θερμοκάμερα

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του πορώδους κελύφους στην άνω επιφάνεια του καυστήρα από όπου εξέρχονταν τα καυσαέρια έγινε με μία θερμοκάμερα η οποία λειτουργεί με τη μέθοδο της υπέρυθρης θερμογραφίας.

Η υπέρυθρη θερμογραφία είναι μη καταστρεπτική, μη παρεμβατική μέθοδος κατά την οποία με χρήση κατάλληλης συσκευής θερμικής απεικόνισης, ανιχνεύονται, απεικονίζονται και καταγράφονται θερμικές διακυμάνσεις και θερμοκρασίες στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Αν και η μέθοδος εφαρμόζεται κλασσικά σε επιφάνειες στερεών σωμάτων, χρησιμοποιείται με επιτυχία στην ανίχνευση θερμών αέριων μαζών όπως π.χ. στην ανίχνευση στρατιωτικών στόχων από τα θερμά καυσαέρια. Η υπέρυθρη θερμογραφία χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία για προληπτική συντήρηση, λειτουργικό έλεγχο, ποιοτικό έλεγχο, επιτόπιο έλεγχο σε ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό και διάφορες κατασκευές. Άλλες εφαρμογές της υπέρυθρης θερμογραφίας είναι σε αμυντικά συστήματα, σε περιπτώσεις έρευνας και διάσωσης, ιατρικές εφαρμογές, έλεγχος μόνωσης κτιρίων κ.α. Πρέπει να τονιστεί ότι με την υπέρυθρη θερμογραφία γίνεται ανίχνευση των επιφανειακών θερμοκρασιών ενός αντικειμένου σε βάθος μέχρι 5 μm και όχι στη μάζα του αντικειμένου.

Η μέθοδος βασίζεται στο φυσικό φαινόμενο της ακτινοβολίας όλων των σωμάτων σε μεγάλο εύρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που περιλαμβάνει κυρίως το ορατό και το υπέρυθρο. Η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι μέρος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με μήκη κύματος μεγαλύτερα από αυτά του ορατού φωτός και μικρότερα των ραδιοκυμάτων. Το εύρος του μήκους κύματος εκτείνεται σε 3 τάξεις μεγέθους από 750 nm μέχρι 1 mm. Η μέθοδος αποκαλείται υπέρυθρη επειδή το ελάχιστο μήκος κύματος του υπέρυθρου φάσματος είναι μεγαλύτερο από τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο ορατό ερυθρό χρώμα (620~750 nm). Στον άξονα με τα μήκη κύματος του οπτικού φωτός. Στην Εικόνα 50 φαίνεται η κατανομή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε περιοχές. Το εύρος των μηκών που θα επιλεγεί για την εφαρμογή της μεθόδου εξαρτάται από την εφαρμογή και τους αισθητήρες.



Εικόνα 50: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [60]

Οι συσκευές θερμικής απεικόνισης που χρησιμοποιούνται αποκαλούνται θερμογραφικές κάμερες ή θερμοκάμερες και η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτήν των αντίστοιχων που χρησιμοποιούνται για καταγραφή εικόνας. Οι διαφορές τους είναι στον αισθητήρα ο οποίος είναι ευαίσθητος στα μήκη κύματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας και στο υλικό κατασκευής των οπτικών το οποίο πρέπει να είναι διαπερατό για τα συγκεκριμένα μήκη κύματος. Οι θερμοκάμερες πρακτικά ανιχνεύουν την ένταση της θερμικής ακτινοβολίας και με κατάλληλο λογισμικό το οποίο κάνει χρήση των φυσικών νόμων που διέπουν την ακτινοβολία υπολογίζουν τη θερμοκρασία που αντιστοιχεί στην ένταση της ακτινοβολίας λαμβάνοντας υπ' όψη το συντελεστή θερμικής εκπομπής ε της επιφάνειας του αντικειμένου. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως το πηλίκο της ακτινοβολίας της επιφάνειας προς την ακτινοβολία μέλανος σώματος της ίδιας θερμοκρασίας [61]. Κατά την απεικόνιση γίνεται αντιστοίχηση των θερμοκρασιών με χρώματα ώστε να γίνονται αντιληπτές από τον χειριστή οι κατανομές θερμοκρασίας στην επιφάνεια. Συνήθως οι υψηλές θερμοκρασίες αποτυπώνονται με φωτεινά χρώματα ενώ οι χαμηλές με σκοτεινά.

Οι εικόνες που δίνει η θερμοκάμερα αποκαλούνται θερμογραφήματα. Με τις θερμοκάμερες υπάρχει η δυνατότητα να φαίνεται σε πραγματικό χρόνο η μεταβολή της θερμοκρασιακής κατανομής και να καταγράφονται τα θερμογραφήματα σε ψηφιακή μορφή είτε σαν απλές εικόνες είτε με τις τιμές της έντασης της ακτινοβολίας ώστε να γίνει περαιτέρω επεξεργασία τους σε Η/Υ. Η ένταση της ακτινοβολίας μιας επιφάνειας ενός αντικειμένου εξαρτάται γενικότερα από τη θερμοκρασία και τις ιδιότητες της επιφάνειας.

Η θερμογραφική κάμερα FLIR PM 595 που με την οποία έγιναν οι μετρήσεις θερμοκρασίας στην επιφάνεια του καυστήρα είναι της εταιρείας FLIR. Είναι φορητή με μη ψυχόμενο αισθητήρα. Τα χαρακτηριστικά της είναι τα εξής:

- ανιχνεύσιμα μήκη κύματος: 7.5 ~ 13 μm
- αισθητήρας: 320 X 240 pixels
- διακριτική ικανότητα: 0.1 °C
- μέγιστο σφάλμα: ±2 %
- ρυθμός λήψης: 50 fps

Η κάμερα φέρει κάρτα μνήμης στην οποία αποθηκεύονται τα θερμογραφήματα. Όλες οι παράμετροι που αφορούν τις συνθήκες των μετρήσεων όπως είναι ο συντελεστής εκπομπής, η απόσταση κάμερας – αντικειμένου, η θερμοκρασία περιβάλλοντος κ.α. είναι ρυθμίσιμες από το λογισμικό της κάμερας.

5.1.4 Ψηφιακά παροχόμετρα (digital mass flow controller-MFC)

Όλα τα παροχόμετρα έχουν μία θύρα εισόδου, μία θύρα εξόδου, έναν αισθητήρα ροής μάζας και μια αναλογική βαλβίδα ελέγχου. Το MFC είναι εφοδιασμένο με ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου στο οποίο δίνεται ένα σήμα εισόδου από το χειριστή (ή ένα εξωτερικό κύκλωμα / υπολογιστή) για να συγκρίνει την τιμή από τον αισθητήρα ροής μάζας και στη συνέχεια ρυθμίζει την αναλογική βαλβίδα αναλόγως ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη ροή. Ο ρυθμός της ροής καθορίζεται ως ποσοστό της ροής μιας βαθμονομημένης κλίμακας που διαθέτει και τροφοδοτείται στο MFC ως σήμα τάσης.

Τα ψηφιακά παροχόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της εισερχόμενης ροής αέρα και καυσίμου στον καυστήρα είναι της εταιρίας Bronkhorst και έχουν συνολική χωρητικότητα 1600 slpm για τον αέρα και 120 slpm για τη ροή του καυσίμου.

5.1.5 Αναλυτής καυσαερίων

Η αρχή λειτουργίας του αναλυτή καυσαερίων, τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του και η ακρίβεια των μετρήσεών του αναφέρθηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 3.

5.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας και Επεξεργασία μετρήσεων

Η σύσταση των δύο καυσίμων που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά φαίνεται στον Πίνακας 2 και οι εξισώσεις στοιχειομετρικής και υπερστοιχειομετρικής καύσης αυτών παρατίθενται παρακάτω.

Καύσιμο	CH ₄	CO	H_2	CO ₂		
Α	38%	26%	16%	20%		
В	47%	33%	20%	0		

Πίνακας 2. Σύσταση καυσίμων

Καύσιμο Α

Στοιχειομετρική καύση (λ=1)

 $(0.473CH_4 + 0.329CO + 0.198H_2) + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 4.55\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 0.108H_2 + 0.108H_2$

<u>Υποστοιχειομετρική καύση (λ>1)</u>

 $0.8(0.473CH_4 + 0.329CO + 0.198H_2) + 0.2CO_2 + 2.99\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 2.84CO_2 + 0.95H_2O + 11.23\lambda N_2 + (2.99\lambda - 2.99)O_2 + 0.95H_2O + 0.95$

Καύσιμο Β

Στοιχειομετρική καύση (λ=1)

 $1(0.473CH_4 + 0.329CO + 0.198H_2) + 1.21(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 4.55N_2$

<u>Υποστοιχειομετρική καύση (λ>1)</u>

 $1(0.473CH_4 + 0.329CO + 0.198H_2) + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 4.55\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 1.25\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 1.25\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 1.25\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 1.25\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 1.25\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 1.25\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 1.25\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.14H_2O + 1.25\lambda N_2 + (1.21\lambda - 1.21)O_2 + 1.21\lambda(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.8CO_2 + 1.21$

Αρχικά, διεξήχθησαν τα πειράματα με το καύσιμο Α και στη συνέχεια με το καύσιμο Β. Υπήρχαν δύο φιάλες αερίων, η μια περιείχε εξ'αρχής το καύσιμο Β και η άλλη περιείχε 100% CO₂. Για τη ροή του καυσίμου Α αναμίχθηκαν μια παροχή από την πρώτη φιάλη, που ήταν το 80% της συνολικής, και μια παροχή από τη δεύτερη, η οποία αποτελούσε το 20% της συνολικής παροχής του Α. Ο καυστήρας λειτούργησε, και για τις δύο περιπτώσεις καυσίμων, σε τιμές ονομαστικού φορτίου 200, 400, 600, 800 kW/m² και για λόγο αέρα καύσης στο εύρος $1.1 \le \lambda \le 1.8$ με αύξηση κατά 0.1 κάθε φορά. Ωστόσο, υπήρχαν κάποιες συνθήκες λειτουργίας οι οποίες δεν εφαρμόστηκαν. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του καυσίμου Α για λ=1,8 και θερμική ισχύ 200 kW/m² δεν ήταν δυνατή η λειτουργία του καυστήρα γιατί το χαμηλό θερμικό φορτίο σε συνθήκες σβέσης (blowoff) του καυστήρα. Επίσης, στην περίπτωση του καυσίμου/οξειδωτικού δημιουργούσαν

για λ =1.1 και θερμική ισχύ 800 kW/m², το υψηλό θερμικό φορτίο σε συνδυασμό με συνθήκες καύσης κοντά στη στοιχειομετρία (όπου εξ'ορισμού έχουμε μεγαλύτερες θερμοκρασίες), αύξαναν πολύ τη θερμοκρασία στην επιφάνεια του καυστήρα και υπήρχε κίνδυνος καταστροφής του κεραμικού υλικού. Τέλος, για κάθε τιμή θερμικής ισχύος που μελετήθηκε, η παροχή του εκάστοτε καυσίμου προφανώς διατηρούνταν σταθερή ενώ γινόταν αύξηση της παροχής του αέρα στο μίγμα καθώς το λ αυξανόταν.

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων και θερμοκρασιών καταγράφηκαν από τον αναλυτή καυσαερίων, το θερμοστοιχείο και τη θερμοκάμερα και παρουσιάζονται σε διαγράμματα στην επόμενη παράγραφο. Επιπλέον των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, παρουσιάζεται στα διαγράμματα και το γραμμομοριακό κλάσμα για τα CO₂ και O₂, που αποτελούν κύρια προϊόντα της καύσης, και υπολογίστηκαν θεωρητικά από τη στοιχειομετρία της αντίδρασης για κάθε τιμή του λόγου αέρα καύσης.

Το γραμμομοριακό κλάσμα ενός συστατικού μέσα σε ένα μίγμα με n συνολικά διαφορετικά συστατικά, ορίζεται ως $X_i = \frac{n_i}{n_s}$, i=1,2,...n, όπου n_i είναι ο αριθμός γραμμομορίων κάθε συστατικού i και n_s είναι ο συνολικός αριθμός γραμμομορίων του μίγματος [2]. Το γραμμομοριακό κλάσμα, στην περίπτωση αέριων συστατικών

ισούται με το κλάσμα των αντίστοιχων όγκων.

Σε όλα τα διαγράμματα, εκτός από τις μετρηθείσες τιμές, σημειώνεται και το εύρος του σφάλματος της κάθε μέτρησης με κατακόρυφες μπάρες. Σε καθε μέτρηση που γινόταν ο αναλυτής και το θερμοστοιχείο λάμβαναν 10 τιμές και τελικά κατέγραφαν το μέσο όρο αυτών συνοδευόμενο από την τυπική απόκλιση. Το σφάλμα αυτό αφορά τη διασπορά των μετρήσεων. Οι μπάρες σφάλματος στα διαγράμματα καλύπτουν ένα εύρος τιμών ± 2 φορές την τυπική απόκλιση γύρω από τη μέση τιμή. Δηλαδή, θεωρώντας ότι οι 10 τιμές της κάθε μέτρησης ακολουθούν κανονική κατανομή, οι μπάρες σφάλματος καλύπτουν το 95% των τιμών. Αντίθετα, στην περίπτωση της θερμοκάμερας, για κάθε μέτρηση καταγράφηκε μία μόνο τιμή και το σφάλμα αυτής θεωρήθηκε στο $\pm 2\%$ όπως προτείνει ο κατασκευαστής.

Με δεδομένη τη θερμοκρασία της επιφάνειας του καυστήρα (T_{IR}) που καταγράφηκε με τη θερμοκάμερα υπολογίστηκε ο βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας n_{rad} για κάθε περίπτωση λειτουργίας από τη σχέση [62]

$$n_{rad} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{IR}^4 - T_{\infty}^4)}{\vec{V} \cdot H_u}$$

Όπου T_∞ είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος (20°C), T_{IR} η θερμοκρασία της πορώδους επιφάνειας του καυστήρα, σ η σταθερά Stefan – Boltzmann ίση με $5,67*10^{-8}$, \dot{V} η ογκομετρική παροχή του καυσίμου και Hu η κατώτερη θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου. Το μέγεθος ε είναι ο συντελεστής εκπομπής ακτινοβολίας

της επιφάνειας του καυστήρα και για το καρβίδιο του πυριτίου σε θερμοκρασίες άνω των 1000°C λαμβάνεται ίσος με 0,99.

Τέλος, ο καυστήρας τροφοδοτήθηκε με το καύσιμο Γ σύστασης 40% CO₂, 28% CH₄, 12% H₂, 20% CO, το οποίο προήλθε κατά 40% από τη φιάλη που περιείχε μόνο CO₂ και κατά 61% από τη φιάλη του καυσίμου B. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας του καυστήρα για λ =1.2 και θερμικά φορτία 200, 400, 600, 800 kW/m², προκειμένου να υπολογιστεί ο βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας. Αυτός συγκρίθηκε με το βαθμό απόδοσης ακτινοβολίας των καυσίμων A και B καθώς και του βιοαερίου και του καθαρού CH₄ για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας. Τα δεδομένα για το βιοαέριο και το μεθάνιο αφορούν τον ίδιο καυστήρα και έχουν ληφθεί από προηγούμενες μελέτες [44].

5.3 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για το καύσιμο A, σύστασης 38% CH₄, 26% CO, 16% H₂ και 20% CO₂ και το καύσιμο B, σύστασης 47% CH₄, 33% CO και 20% H₂. Αρχικά, παρατίθενται και σχολιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις μετρήσεις για το καύσιμο A και ακολουθούν αντίστοιχα τα διαγράμματα και ο σχολιασμός για το καύσιμο B. Τέλος, παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των δύο καυσίμων που επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την προσθήκη CO₂ στο ρεύμα καυσίμου αλλά και τη συμπεριφορά του πορώδους καυστήρα σχετικά με τις εκπομπές ρύπων.

5.3.1 Αποτελέσματα για το καύσιμο Α



Διάγραμμα 2. Συγκέντρωση Ο₂ (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Α

Το Διάγραμμα 2 δείχνει την επί τοις εκατό (%) συγκέντρωση του οξυγόνου (O₂) στα προϊόντα της καύσης του μίγματος Α, για διάφορες τιμές θερμικού φορτίου και λόγου αέρα καύσης. Τα σύμβολα στο διάγραμμα είναι τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν από τον αναλυτή καυσαερίων ενώ οι γραμμές αφορούν τις αντίστοιχες τιμές γραμμομοριακού κλάσματος που υπολογίσθηκαν θεωρητικά από την ισορροπία της αντίδρασης για το συγκεκριμένο καύσιμο και για κάθε τιμή του λ. Η συγκέντρωση του O₂ στα προϊόντα δεν εξαρτάται από το θερμικό φορτίο αλλά μόνο από τη στοιχειομετρία της αντίδρασης, δηλαδή την τιμή του λ. Υπάρχει συμφωνία μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών τιμών για τιμές του λ μεγαλύτερες από 1.4 ενώ για μικρότερες τιμές του λ η διαφορά τους φτάνει μέχρι και το 30%. Αυτό μπορεί να είναι ενδεικτικό της ασταθούς λειτουργίας του καυστήρα σε συνθήκες που είναι πιο κοντά στη στοιχειομετρική καύση. Σε ό,τι αφορά την περιοχή ευσταθούς λειτουργίας όμως, η ταύτιση πειραματικών και θεωρητικών τιμών δείχνει ότι η καύση ολοκληρώνεται αποτελεσματικά πλησιάζοντας τις συνθήκες της τέλειας καύσης.



Διάγραμμα 3. Συγκέντρωση CO2 (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Α

Το Διάγραμμα 3 παρουσιάζει τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), ενός επίσης κύριου προϊόντος της καύσης, του μίγματος Α για διαφορετικές τιμές θερμικού φορτίου και λόγου αέρα καύσης. Ομοίως, τιμές της συγκέντρωσης του CO₂ δεν επηρεάζονται από την αύξηση του θερμικού φορτίου αλλά μόνο από την τιμή του λ. Όπως και στο διάγραμμα της συγκέντρωσης του O₂, έτσι και στο παρόν διάγραμμα παρουσιάζονται τόσο τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων όσο και οι θεωρητικές τιμές του γραμμομοριακού κλάσματος του CO₂, οι οποίες διαφέρουν κατά 4% περίπου σε όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας. Η μικρή αυτή απόκλιση μπορεί να είναι αποτέλεσμα σφαλμάτων είτε στα παροχόμετρα είτε στον αναλυτή καυσαερίων. Ωστόσο, είναι μέσα στα αποδεκτά όρια και μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει ταύτιση θεωρητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, κάτι που είναι ενδεικτικό των ιδανικών συνθηκών καύσης που παρέχει ο καυστήρας.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εκπομπές CO_2 και O_2 , οι θεωρητικές και οι πειραματικές τιμές, για το καύσιμο A σε ένα διάγραμμα (Διάγραμμα 4).



Διάγραμμα 4. Συγκέντρωση Ο₂ και CO₂ (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Α

Το Διάγραμμα 5 παρουσιάζει τις εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα (CO) κατά την καύση του μίγματος Α για διάφορες τιμές θερμικών φορτίων και λόγου αέρα καύσης. Οι τιμές των εκπομπών ποικίλουν από 20 έως 1000 ppm περίπου.



Διάγραμμα 5. Εκπομπές CO σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α

Για κάθε τιμή θερμικής ισχύος παρατηρούνται μέγιστες εκπομπές κοντά στη στοιχειομετρία, δηλαδή για λ =1.1. Για εύρος του λόγου αέρα καύσης $1.4 \le \lambda \le 1.6$ οι εκπομπές του CO είναι συστηματικά μειωμένες και δεν παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, ενώ έξω από αυτήν την περιοχή αυξάνονται σημαντικά και εμφανίζουν μεγάλες μεταβολές καθώς το λ κινείται προς τα δύο άκρα λ =1,1 και λ =1,8. Επίσης,

καθώς το θερμικό φορτίο αυξάνεται, παρατηρείται αύξηση των εκπομπών CO έως και 6 φορές πάνω περίπου, όπως συμβαίνει για παράδειγμα στην περίπτωση του λ =1,5 όπου στα 200 kW/m² οι εκπομπές είναι 30 ppm ενώ στα 800 kW/m² φτάνουν τα 200 ppm. Η αύξηση της θερμικής ισχύος προκαλεί αύξηση των εκπομπών CO διότι για μεγαλύτερη θερμική ισχύ απαιτείται περισσότερο καύσιμο, επομένως αυξάνεται η ταχύτητα της εισερχόμενης ροής στον καυστήρα με αποτέλεσμα ο χρόνος παραμονής των αντιδρώντων στη ζώνη της καύσης να είναι μικρότερος και να ευνοείται ο σχηματισμός CO, που είναι προϊόν ατελούς καύσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εκπομπές των οξειδίων του αζώτου που προέκυψαν από την καύση του μίγματος Α για τις διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης και του θερμικού φορτίου.



Διάγραμμα 6. Εκπομπές NO σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α

Πιο συγκεκριμένα, στο Διάγραμμα 6 φαίνονται οι εκπομπές του μονοξειδίου του αζώτου (NO) οι οποίες δεν ξεπερνούν τα 18 ppm, τιμή που εμφανίζεται μόνο για λ =1,1 και για μεγάλα θερμικά φορτία. Οι μέγιστες τιμές, γενικά, εμφανίζονται κοντά στη στοιχειομετρία ενώ καθώς το λ αυξάνεται αυτές φθίνουν σημαντικά μέχρι τα 1-2ppm. Η αύξηση του θερμικού φορτίου συνοδεύεται από μικρή αύξηση των εκπομπών λόγω του ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ευνοεί το σχηματισμό οξειδίων του αζώτου. Ωστόσο, είναι εμφανές ότι το μέγεθος που βασικά επηρεάζει τις εκπομπές του NO είναι ο λόγος αέρα καύσης και όχι η θερμική ισχύς. Μάλιστα, παρατηρείται ότι από τα 600 kW/m² στα 800 kW/m² η αύξηση είναι ελάχιστη.

Οι εκπομπές του διοξειδίου του αζώτου (NO₂), όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7, κινούνται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα, σε τιμές από 0 έως 3 ppm. Σε αντίθεση με τις

τιμές των NO δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από το θερμικό φορτίο ούτε από το λόγο αέρα καύσης.



Διάγραμμα 7. Εκπομπές ΝΟ₂ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α

Συγκεντρωτικά, οι εκπομπές των NO και NO₂ για το καύσιμο μίγμα A φαίνονται στο Διάγραμμα 8 που ακολουθεί. Οι εκπομπές NO είναι προφανώς μεγαλύτερες των εκπομπών NO₂ με τη διαφορά να μεγαλώνει όσο πιο κοντά βρισκόμαστε στη στοιχειομετρία. Μάλιστα, για λ =1.1 το NO είναι το 90% των συνολικά παραγόμενων οξειδίων του αζώτου (NO_x) ενώ το NO₂ είναι μόλις το 10% αυτών.



Διάγραμμα 8. Εκπομπές ΝΟ και ΝΟ2 σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α

Ενδιαφέρον έχει η απεικόνιση των συνολικά παραγόμενων οξειδίων του αζώτου (NOx) που γίνεται στο Διάγραμμα 9. Οι τιμές των εκπομπών μεταβάλλονται με τον

ίδιο τρόπο που μεταβάλλονται και οι τιμές του ΝΟ. Η μείωση των εκπομπών ΝΟχ με αύξηση του λόγου αέρα καύσης οφείλεται στο γεγονός ότι τα παραγόμενα ΝΟχ στην περίπτωση αυτή είναι κυρίως θερμικά ΝΟχ και άρα ο σχηματισμός τους ευνοείται με αύξηση της θερμοκρασίας. Εφόσον με αύξηση του λ μειώνεται η θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10 που ακολουθεί, θα μειώνονται και οι εκπομπές ΝΟχ. Δεν είναι, λοιπόν, τυχαίο ότι οι καμπύλες των ΝΟχ συμφωνούν με τις καμπύλες της θερμοκρασίας καυσαερίων.



Διάγραμμα 9. Εκπομπές NOx σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Α

Το Διάγραμμα 10 παρουσιάζει τη θερμοκρασία των καυσαερίων που μετρήθηκε με το θερμοστοιχείο για την περίπτωση του καυσίμου που περιέχει CO₂, για διάφορα επίπεδα ισχύος και διαφορετικές τιμές του λόγου αέρα καύσης.



Διάγραμμα 10. Θερμοκρασία καυσαερίων σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικού φορτίου για το καύσιμο Α

Το εύρος των θερμοκρασιών των καυσαερίων που καταγράφηκαν για τα δεδομένα θερμικά φορτία είναι από 800°C έως 1200°C. Με την αύξηση του θερμικού φορτίου στο οποίο λειτουργεί ο καυστήρας αυξάνεται και η θερμοκρασία των καυσαερίων. Παρατηρείται, επίσης, μια γραμμική σχέση ανάμεσα στη θερμοκρασία και το λ. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση της τιμής του λ, δηλαδή αύξηση της περιεκτικότητας του μίγματος σε αέρα, συνεπάγεται μείωση της θερμοκρασίας για το ίδιο επίπεδο ισχύος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, για ένα συγκεκριμένο θερμικό φορτίο η ποσότητα καυσίμου στο μίγμα διατηρείται σταθερή και καθώς το λ αυξάνεται, στο μίγμα προστίθεται περισσότερη ποσότητα αέρα, με αποτέλεσμα αυτή να αραιώνει το μίγμα και να ρίχνει τη θερμοκρασία. Να σημειωθεί επίσης ότι για κάθε επίπεδο ισχύος η μεγαλύτερη θερμοκρασία παρατηρείται κοντά στη στοιχειομετρία, δηλαδή για λ =1,1. Αυτό συμφωνεί με όσα είναι γνωστά για το προφίλ της θερμοκρασίας στις φλόγες προανάμιξης σύμφωνα με το οποίο οι υψηλότερη θερμοκρασία επιτυγχάνεται για την στοιχειομετρική καύση.

Στη συνέχεια, Διάγραμμα 11, απεικονίζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης ακτινοβολίας n_{rad} της επιφάνειας του καυστήρα σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο και το λόγο αέρα καύσης για το καύσιμο Α.



Διάγραμμα 11. Βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Α

Παρατηρούνται γενικά υψηλές τιμές του βαθμού απόδοσης ακτινοβολίας που φτάνουν έως και 70%. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται σε χαμηλά θερμικά φορτία, ενώ μειώνονται καθώς το θερμικό φορτίο αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει διότι σε χαμηλά επίπεδα θερμικής ισχύος ο βασικός μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας είναι η

ακτινοβολία, ενώ με την αύξηση της θερμικής ισχύος, επειδή αυτή συνοδεύεται από αύξηση της ταχύτητας της ροής, η θερμότητα μεταδίδεται κυρίως με συναγωγή. Ωστόσο, ακόμα και στα υψηλά θερμικά φορτία ο βαθμός μετάδοσης ακτινοβολίας, διατηρείται σε υψηλά επίπεδα, γεγονός που οφείλεται στις ιδιότητες του υλικού του καυστήρα και στο σχεδιασμό του. Επίσης, ο βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας επηρεάζεται και από το λόγο αέρα καύσης. Συγκεκριμένα, αυξάνεται σε συνθήκες καύσης κοντά στη στοιχειομετρία (μικρές τιμές του λ), λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών που παρατηρούνται εκεί. Η αύξηση αυτή είναι της τάξεως του 10% μεταξύ διαδοχικών τιμών του λ.

5.3.2 Αποτελέσματα για το καύσιμο Β

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για το καύσιμο B, το οποίο δεν περιέχει CO₂. Η μορφή των διαγραμμάτων είναι η ίδια για τα δύο διαφορετικά καύσιμα για κάθε μετρούμενο μέγεθος και επομένως, όλες οι παρατηρήσεις που έγιναν για τα διαγράμματα του καυσίμου A ισχύουν και εδώ.

Πιο συγκεκριμένα τα διαγράμματα 12, 13 και 14 παρουσιάζουν τις επί ξηρώ συγκεντρώσεις οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα στα προϊόντα της καύσης. Τα σύμβολα αντιστοιχούν στα πειραματικά αποτελέσματα ενώ οι γραμμές στα θεωρητικά.



Διάγραμμα 12. Συγκέντρωση Ο2 (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Β

Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις O₂, όπως και στο καύσιμο A, η διαφορά πειραματικών και θεωρητικών τιμών είναι αμελητέα για τιμές του λ μικρότερες από 1.4 και αυξάνεται σε συνθήκες καύσης κοντά στη στοιχειομετρία, όπου φτάνει το 20%.



Διάγραμμα 13. Συγκέντρωση CO₂ (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Β

Οι πειραματικές τιμές εκπομπών του CO₂ αποκλίνουν κατά 5% από τις αντίστοιχες θεωρητικές για κάθε περίπτωση λειτουργίας όπως συνέβαινε και με το καύσιμο Α. Αυτό σημαίνει ότι η σύσταση του καυσίμου δεν επηρέασε τις συνθήκες της καύσης και τα αποτελέσματα των πειραμάτων ήταν και στις δύο περιπτώσεις καυσίμων αυτά που αναμένονταν από τη θεωρία.



Διάγραμμα 14. Συγκέντρωση Ο₂ και CO₂ (επί ξηρώ) σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Β

Ακολουθεί το Διάγραμμα 15 που παρουσιάζει τις εκπομπές CO για το καύσιμο B. Παρατηρούμε ότι εμφανίζονται γενικά χαμηλότερες εκπομπές σε σχέση με το καύσιμο A. Όλες οι τιμές είναι χαμηλότερες των 400 ppm εκτός από μία μόνο περίπτωση όπου φτάνει τα 700 ppm (για 600 kW/m² και λ =1.1). Μάλιστα, στην περιοχή 1.4 $\leq \lambda \leq$ 1.6, όπου δεν παρουσιάζονται μεγάλες διακυμάνσεις, οι εκπομπές δεν ξεπερνούν τα 150 ppm σε όλες τις περιπτώσεις θερμικής ισχύος.



Διάγραμμα 15. Εκπομπές CO σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Β

Τα διαγράμματα 16-19 καταγράφουν τις εκπομπές των οξειδίων του αζώτου: NO, NO₂, NO_x. Οι τιμές αυτών εμφανίζονται ελαφρά αυξημένες σε σχέση με το καύσιμο Α. Πιο συγκεκριμένα, για το καύσιμο Β, που δεν περιέχει CO₂, οι εκπομπές NO φτάνουν τα 20 ppm κοντά στη στοιχειομετρία και για υψηλά θερμικά φορτία και μειώνονται σε τιμές κάτω του 1 ppm καθώς το λ αυξάνεται.



Διάγραμμα 16. Εκπομπές NO σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο B

Τέλος, τα επίπεδα NO₂ διατηρούνται χαμηλά κάτω των 4 ppm και δεν επηρεάζονται από το θερμικό φορτίο ή το λόγο αέρα καύσης.



Διάγραμμα 17. Εκπομπές NO₂ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο B



Διάγραμμα 18. Εκπομπές ΝΟ και ΝΟ₂ σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Β

Οι τιμές των NOx κινούνται στα επίπεδα από 2 έως 25 ppm και επηρεάζονται σημαντικά από το λόγο αέρα καύσης, λόγω του ότι αποτελούν θερμικά NO_x και η θερμοκρασία έχει άμεση σχέση με την τιμή του λ.



Διάγραμμα 19. Εκπομπές NOx σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος για το καύσιμο Β

Οι θερμοκρασίες των καυσαερίων του καυσίμου Β που καταγράφηκαν από το θερμοστοιχείο για τα διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος και τις διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 20. Το εύρος των θερμοκρασιών είναι και εδώ από 800°C -1200 °C και υπάρχει άμεση εξάρτηση της θερμοκρασίας από τη θερμική ισχύ και το λ.



Διάγραμμα 20. Θερμοκρασία καυσαερίων σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικού φορτίου για το καύσιμο Β

Τέλος, το Διάγραμμα 21, δείχνει τον αυξημένο σε σχέση με το καύσιμο Α, βαθμό απόδοσης της ακτινοβολίας. Οι τιμές του κινούνται σε πολύ υψηλά επίπεδα από 20% έως 80% σε κάθε περίπτωση λειτουργίας.



Διάγραμμα 21. Βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης για το καύσιμο Β

5.3.3 Σύγκριση καυσίμων Α και Β

Είναι σημαντικό να παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκριτικά για τα δύο καύσιμα για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την παρουσία CO_2 στο ρεύμα του καυσίμου και για να γίνει χαρακτηρισμός του πορώδους καυστήρα αναφορικά με τις εκπομπές ρύπων.



Διάγραμμα 22. Επί ξηρώ συγκεντρώσεις Ο₂ και CO₂ σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για διάφορες τιμές του λόγου αέρα καύσης και για δύο διαφορετικά καύσιμα: μαύρο-κόκκινο χρώμα για το καύσιμο Α και γκριμπλε για το καύσιμο Β

Στο Διάγραμμα 22 φαίνονται με σύμβολα οι συγκεντρώσεις O_2 και CO_2 που μετρήθηκαν και για τα δύο καύσιμα για τρεις τιμές του λόγου αέρα καύσης (λ=1.3, 1.5 και 1.7) και εύρος θερμικής ισχύος 200kW/m²-800kW/m², ενώ με γραμμές παριστάνονται οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές. Πιο συγκεκριμένα, τα χρώματα μαύρο-κόκκινο αντιστοιχούν στο καύσιμο A, που περιέχει CO_2 , και τα χρώματα μπλε-γκρι στο καύσιμο B, που δεν περιέχει CO_2 . Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται σε μετρήσεις επί ξηρώ, χωρίς να έχει γίνει αναγωγή σε συνθήκες συγκεκριμένου επιπέδου οξυγόνου. Στην περίπτωση του καυσίμου A οι εκπομπές του CO_2 είναι μεγαλύτερες, αφού αυτό υπαγορεύει και η στοιχειομετρία της αντίδρασης (στην εξίσωση της καύσης του καυσίμου A οι εκπομπές O_2 είναι και για τα δύο καύσιμα

περίπου ίδιες για τον ίδιο λόγο αέρα καύσης αφού η συγκέντρωση του O₂ στα προϊόντα εξαρτάται από την περίσσεια αέρα στο μίγμα, δηλαδή από την τιμή του λ. Το γεγονός ότι και στις δύο περιπτώσεις καυσίμων τα αποτελέσματα των μετρήσεων συμφωνούν με τα αντίστοιχα θεωρητικά (η διαφορά τους είναι μικρότερη από 5%) δείχνει ότι οι συνθήκες καύσης που επικρατούν στον πορώδη καυστήρα είναι ιδανικές και προσεγγίζουν συνθήκες τέλειας καύσης. Η άποψη αυτή ενισχύεται και από το γεγονός ότι οι εκπομπές CO και NOx κινούνται σε χαμηλά επίπεδα.

Στη συνέχεια ακολουθεί το διάγραμμα εκπομπών CO (Διάγραμμα 23). Οι εκπομπές για το καύσιμο A που περιέχει CO₂ (μαύρες καμπύλες) είναι συστηματικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες του καυσίμου B για το ίδιο θερμικό φορτίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η προσθήκη CO₂ στο ρεύμα καυσίμου αυξάνει την εισερχόμενη παροχή στον καυστήρα και άρα αυξάνει την ταχύτητα της ροής με αποτέλεσμα να μειώνεται ο χρόνος παραμονής των αντιδρώντων στη ζώνη της καύσης. Έτσι, το CO δεν προλαβαίνει να οξειδωθεί περαιτέρω και παραμένει σε υψηλά επίπεδα. Ωστόσο, παρόλο που η οξείδωση του CO ολοκληρώνεται κυρίως μέσα στο πορώδες μέσο, οι μετρηθείσες τιμές που παρουσιάζονται εδώ αναμένεται να μειωθούν κι άλλο όσο τα καυσαέρια απομακρύνονται από την έξοδο του καυστήρα, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες και η μεγάλη ακτινοβολία ευνοούν τη μετατροπή του CO σε CO₂ [56].



Διάγραμμα 23. Εκπομπές CO σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος και για δύο καύσιμα: μαύρο χρώμα για το καύσιμο Α και ροζ για το καύσιμο Β

Εξετάζοντας πιο συγκεκριμένα τα επίπεδα των συγκεντρώσεων, σε τιμές του λόγου αέρα καύσης $1.2 \leq \lambda \leq 1.7$ η διαφορά μεταξύ των εκπομπών για τα δύο καύσιμα είναι

περίπου 30% για τα αντίστοιχα θερμικά φορτία. Γενικά, και για τα δύο καύσιμα, σε εύρος του λόγου αέρα καύσης $1.4 \le \lambda \le 1.6$ οι εκπομπές του CO είναι συστηματικά μειωμένες και δεν εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Αυτό το εύρος είναι η περιοχή ευσταθούς λειτουργίας του πορώδους καυστήρα και οι εκπομπές φτάνουν έως τα 300 ppm. Μάλιστα στα 200 kW/m² τα επίπεδα CO μειώνονται πολύ και παραμένουν κάτω από τα 30 ppm και στις δύο περιπτώσεις καυσίμων.

Να σημειωθεί ότι οι τιμές εκπομπών CO που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη συμφωνούν πλήρως με τις αντίστοιχες τιμές κατά τη λειτουργία του ίδιου καυστήρα με διαφορετικά καύσιμα. Συγκεκριμένα, έχει υπολογιστεί ότι κατά την καύση βιοαερίου οι εκπομπές CO δεν ξεπερνούν τα 300 ppm ακόμα και σε θερμικό φορτίο 1000 kW/m² [44], ενώ κατά την καύση LPG σε συνθήκες 1.2<λ<1.6 και 200 kW/m² οι εκπομπές κινούνται σε χαμηλά επίπεδα κάτω των 30 ppm [56]. Επομένως, ο πορώδης καυστήρας εμφανίζει ευελιξία στην καύση αερίων μιγμάτων διαφορετικής σύστασης και χαμηλής θερμογόνου δύναμης διατηρώντας πάντα χαμηλές τις εκπομπές CO.

Παρακάτω (Διάγραμμα 24) παρουσιάζονται οι εκπομπές NOx. Παρατηρούνται, γενικά, μικρότερες τιμές των συγκεντρώσεων για το καύσιμο Α, που περιέχει CO₂. Αφού πρόκειται κυρίως για θερμικά NOx και οι θερμοκρασίες καυσαερίων για το καύσιμο Β είναι υψηλότερες, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 25, είναι επόμενο σε αυτό να εμφανίζονται περισσότερες εκπομπές οξειδίων του αζώτου.



Διάγραμμα 24. Εκπομπές NOx σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος και για δύο καύσιμα: μαύρο χρώμα για το καύσιμο Α και ροζ για το καύσιμο Β

Πιο συγκεκριμένα, σε χαμηλά θερμικά φορτία, π.χ. στα 200 kW/m², η παρουσία του CO2 στη ροή του καυσίμου μειώνει τα επίπεδα NOx περίπου κατά 40%, ενώ καθώς αυξάνεται το θερμικό φορτίο, το μίγμα με το CO2 παράγει περίπου 20-25% χαμηλότερες τιμές NOx. Να σημειωθεί ότι ακόμα και στη δυσμενέστερη περίπτωση, από άποψη εκπομπών, λειτουργίας του καυστήρα οι εκπομπές NOx δεν ξεπερνούν τα 25 ppm, τιμή που είναι χαμηλή. Μάλιστα, στην περιοχή ευσταθούς λειτουργίας αυτού, για $1.4 \le \lambda \le 1.6$, οι τιμές κυμαίνονται από 0 έως 10 ppm, σε κάθε περίπτωση. Οι τιμές αυτές συμφωνούν με προηγούμενες μελέτες που έχουν γίνει στον ίδιο καυστήρα κατά τη λειτουργία του με LPG [56] ή βιοαέριο [44] όπου κι εκεί οι εκπομπές NOx δεν ξεπερνούσαν τα 25 ppm Επομένως, η τεχνολογία του πορώδους καυστήρα φαίνεται να είναι ιδιαίτερα επωφελής ως προς τις χαμηλές εκπομπές NOx. Έχει αποδειχθεί, μάλιστα [56] ότι οι τιμές των παραγόμενων ΝΟχ εμφανίζουν ένα άνω όριο όσο και αν αυξηθεί το θερμικό φορτίο. Δηλαδή φτάνουν σε μια μέγιστη τιμή για ένα συγκεκριμένο περιεγόμενο αέρα και δεν επηρεάζονται περαιτέρω από τα επίπεδα θερμικής ισγύος, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και από την παρούσα μελέτη αφού μεταξύ των φορτίων 600 kW/m² και 800 kW/m² η αύξηση των εκπομπών είναι αμελητέα.

Η θερμοκρασία των καυσαερίων, που μετρήθηκε με το θερμοστοιχείο, και η θερμοκρασία της πορώδους επιφάνειας του καυστήρα, που μετρήθηκε με τη θερμοκάμερα, φαίνονται αντίστοιχα στα διαγράμματα 25 και 26. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τόσο τα καυσαέρια όσο και η επιφάνεια του καυστήρα φτάνουν τα θερμοκρασιακά επίπεδα των 1200 °C κοντά στη στοιχειομετρική περιοχή. Η αύξηση του θερμικού φορτίου έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες θερμοκρασίες ενώ η αύξηση του λόγου αέρα καύσης οδηγεί στο αντίθετο αποτέλεσμα.



Διάγραμμα 25. Θερμοκρασία καυσαερίων σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος και για δύο καύσιμα: μαύρο χρώμα για το καύσιμο Α και ροζ για το καύσιμο Β



Διάγραμμα 26. Θερμοκρασία της πορώδους επιφάνειας του καυστήρα σε συνάρτηση με το λόγο αέρα καύσης για διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος και για δύο καύσιμα: μαύρο χρώμα για το καύσιμο Α και ροζ για το καύσιμο Β

Το καύσιμο που περιέχει CO_2 (μαύρες καμπύλες) εμφανίζει υψηλότερες θερμοκρασίες και στα δύο διαγράμματα. Ωστόσο, η προσθήκη του CO_2 στη ροή του καυσίμου, δεν επηρεάζει και τις δύο θερμοκρασίες το ίδιο. Η διαφορά στις τιμές της θερμοκρασίας του καυστήρα ανάμεσα στα δύο καύσιμα φτάνει τους 100 °C για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας, δηλαδή η προσθήκη CO_2 στο ρεύμα του καυσίμου επιδρά στη θερμοκρασία του καυστήρα με τον ίδιο τρόπο που επιδρά και η αύξηση του θερμικού φορτίου. Αντιθέτως, οι θερμοκρασίες των καυσαερίων επηρεάζονται κυρίως από το θερμικό φορτίο παρά από τη σύσταση του καυσίμου, καθώς μεταξύ των δύο καυσίμων οι θερμοκρασίες εμφανίζουν διαφορές της τάξεως του 5% περίπου για τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας.

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα παρατηρείται ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του καυστήρα είναι υψηλότερη από αυτήν των καυσαερίων, για το ίδιο θερμικό φορτίο και τις ίδιες συνθήκες στοιχειομετρίας, και η διαφορά τους μειώνεται με την αύξηση του θερμικού φορτίου. Η κλίση της θερμοκρασίας στα δύο διαγράμματα υποδηλώνει ότι οι μετρήσεις του θερμοστοιχείου επηρεάζονται περισσότερο από την αύξηση του περιεχόμενου στο μίγμα αέρα, δηλαδή πλησιάζοντας προς περιοχές φτωχότερου σε καύσιμο μίγματος, σε σχέση με τις αντίστοιχες θερμοκρασίες της επιφάνειας του καυστήρα. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό είναι ότι όσο αυξάνεται η θερμική ισχύς, οι τιμές της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του καυστήρα, πλησιάζουν συστηματικά τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας των καυσαερίων. Για παράδειγμα, σε χαμηλές τιμές του ονομαστικού φορτίου, π.χ. στα 200 kW/m², η διαφορά τους κυμαίνεται στους 50 °C.
Η θερμοκάμερα εκτός από τις τιμές των θερμοκρασιών του Διάγραμμα 26 κατέγραψε και τα αντίστοιχα θερμογραφήματα της επιφάνειας του καυστήρα, τα οποία παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν, για κάθε καύσιμο.

Καύσιμο Α	200kW/m ²	400kW/m ²	600kW/m ²	800kW/m ²
λ=1.2				
λ=1.3				
λ=1.4				
λ=1.5				
λ=1.6				
λ=1.7				

Πίνακας 3. Θερμογραφήματα της άνω επιφάνειας του καυστήρα για διάφορα θερμικά φορτία και τιμές του λόγου αέρα καύσης κατά την καύση του μίγματος Α που περιέχει CO₂

Καύσιμο Β	200kW/m ²	400kW/m ²	600kW/m ²	800kW/m ²
λ=1.2				
λ=1.3				
λ=1.4				
λ=1.5				
λ=1.6				
λ=1.7				

Πίνακας 4. Θερμογραφήματα της άνω επιφάνειας του καυστήρα για διάφορα θερμικά φορτία και τιμές του λόγου αέρα καύσης κατά την καύση του μίγματος Β

Οι παραπάνω εικόνες επιβεβαιώνουν ότι σε ολόκληρη την επιφάνεια του καυστήρα υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας για κάθε περίπτωση λειτουργίας. Φαίνεται, επίσης, η επίδραση της θερμικής ισχύος και του λόγου αέρα καύσης στη θερμοκρασία της πορώδους επιφάνειας. Καθώς το θερμικό φορτίο αυξάνεται το χρώμα της εικόνας από πορτοκαλί γίνεται κίτρινο και στη συνέχεια λευκό, μεταβολή ενδεικτική της αύξησης της θερμοκρασίας. Το ίδιο συμβαίνει και καθώς το λ

Ο βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας και για τα δύο καύσιμα φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν, όπου το Διάγραμμα 27 αναφέρεται σε τιμές του λόγου αέρα καύσης λ =1.2, 1.4, 1.6, 1.8 και το Διάγραμμα 28 σε λ =1.3, 1.5, 1.7. Η διάκριση αυτή έγινε για καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Η προσθήκη CO₂ στο ρεύμα καυσίμου μειώνει το βαθμό απόδοσης ακτινοβολίας αφού μειώνει και τη θερμοκρασία της επιφάνειας του καυστήρα. Η επίδραση της σύστασης του καυσίμου είναι μεγαλύτερη σε συνθήκες καύσης κοντά στη στοιχειομετρία καθώς για λ =1.1 ή λ =1.2 ο βαθμός n_{rad} διαφέρει κατά 20% ανάμεσα στα δύο καύσιμα ενώ για λ =1.8 η διαφορά τους είναι

στο 15%. Γενικά, όμως, οι βαθμοί απόδοσης ακτινοβολίας που παρουσιάζει ο καυστήρας και για τα δύο αυτά καύσιμα είναι ιδιαίτερα υψηλοί. Αυτό αποδεικνύεται και στην επόμενη παράγραφο όπου γίνεται σύγκριση του βαθμού απόδοσης ακτινοβολίας και με άλλους τύπους καυσίμων.



Διάγραμμα 27. Βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για τιμές του λόγου αέρα καύσης λ=1.2, 1.4, 1.6, 1.8 και για δύο καύσιμα: μαύρο χρώμα για το καύσιμο Α και ροζ για το καύσιμο





Διάγραμμα 28. Βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για τιμές του λόγου αέρα καύσης λ=1.1, 1.3, 1.5, 1.7 και για δύο καύσιμα: μαύρο χρώμα για το καύσιμο Α και ροζ για το καύσιμο Β

5.3.4 Σύγκριση διαφορετικών καυσίμων ως προς το βαθμό απόδοσης ακτινοβολίας

Σε αυτήν την παράγραφο συγκρίνεται ο βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας του υπό μελέτη καυστήρα για διαφορετικά είδη αερίων καυσίμων για λόγο αέρα καύσης λ=1.2 και έυρος θερμικής ισχύος 200-800 kW/m². Η επιλογή της συγκεκριμένης τιμής του λ έγινε γιατί σε αυτές τις συνθήκες η ακτινοβολία του καυστήρα είναι πολύ έντονη και ταυτόχρονα οι εκπομπές ρύπων κινούνται σε χαμηλά επίπεδα. Αναλυτικά η σύσταση κάθε καυσίμου φαίνεται στον πίνακα 4 και ο βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας στο Διάγραμμα 29.

Το καύσιμο Α που προσομοιάζει μίγμα βιοαερίου και συνθετικού αερίου έχει το διπλάσιο βαθμό απόδοσης ακτινοβολίας σε σχέση με το βιοάεριο. Αυτό οφείλεται στο ότι στην περίπτωση του μίγματος Α, το περιεχόμενο CO/H2 υποκαθιστά σε μεγάλο βαθμό το CO2 σε σχέση με το βιοαέριο, με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες να είναι μεγαλύτερες και άρα να εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία. Συγκρίνοντας το καύσιμο Γ με το βιοαέριο, τα οποία περιέχουν το ίδιο ποσοστό CO₂, παρατηρείται ότι, σε χαμηλά θερμικά φορτία το καύσιμο Γ έχει έως και 40% μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης ακτινοβολίας ενώ σε υψηλότερα θερμικά φορτία η διαφορά μεταξύ των δύο βαθμών είναι μικρότερη από 25%. Τη διαφορά αυτή προκαλεί η προσθήκη των CO και H₂ στο ρεύμα καυσίμου που αντικαθιστά τη μισή ποσότητα του μεθανίου συγκριτικά με το βιοαέριο. Τα καύσιμα Α και Γ είναι μίγματα των ίδιων αερίων αλλά με διαφορετικές αναλογίες. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα του Γ σε CO₂, το οποίο αραιώνει το μίγμα, έχει άμεση επίδραση στο βαθμό απόδοσης ακτινοβολίας, αφού από το διάγραμμα φαίνεται να τον μειώνει κατά 10% περίπου. Επίσης, η επίδραση του CO2 ως αραιωτικό συστατικό φαίνεται και συγκρίνοντας το καθαρό μεθάνιο με το βιοαέριο. Το μεθάνιο παρουσιάζει σχεδόν διπλάσιο βαθμό απόδοσης ακτινοβολίας σε σχέση με το βιοάεριο. Τέλος, το καύσιμο που εμφανίζει με μεγάλη διαφορά τον υψηλότερο βαθμό είναι το καύσιμο Β που δεν περιέχει καθόλου CO2 αλλά περιέχει το μεγαλύτερο ποσοστό σε H2. Οι τιμές του βαθμού απόδοσης ακτινοβολίας γι' αυτό το καύσιμο κυμαίνονται από 40% για υψηλά θερμικά φορτία έως και 80% για τα 200 kW/m^2 .

Καύσιμο	CH ₄	CO	H_2	CO ₂
Καύσιμο Α	38%	26%	16%	20%
Καύσιμο Β	47%	33%	20%	0
Καύσιμο Γ	28%	20%	12%	40%
Βιοαέριο	60%	0	0	40%
Μεθάνιο	100%	0	0	0

|--|



Διάγραμμα 29. Βαθμός απόδοσης ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το θερμικό φορτίο για λόγο αέρα καύσης λ=1,2 για διαφορετικά καύσιμα

5.4 Συμπεράσματα

Η μέθοδος συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με το θερμοστοιχείο και τη θερμοκάμερα για τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός πορώδους καυστήρα αδρανούς μέσου κατά τη λειτουργία του με εναλλακτικά καύσιμα που αποτελούν μίγματα CH₄, CO, H₂, CO₂ σε διαφορετικές αναλογίες. Μελετήθηκε, με αυτόν τον τρόπο, η επίδραση που έχει η προσθήκη CO₂ στο ρεύμα καυσίμου στα θερμοκρασιακά επίπεδα και τις εκπομπές καυσαερίων. Συγκεκριμένα, η αραίωση του καυσίμου με CO₂ είχε ως αποτέλεσμα ελαφρώς χαμηλότερες θερμοκρασίες και άρα λιγότερες εκπομπές NO_x σε σχέση με το καύσιμο που δεν περιείχε CO₂. Παράλληλα, όμως, μείωσε το χρόνο παραμονής του καυσίμου στη ζώνη αντίδρασης και εμφάνισε μεγαλύτερες τιμές εκπομπών CO. Ωστόσο, η παρουσία των συστατικών CO/H₂ σε όλες τις περιπτώσεις καυσίμων που μελετήθηκαν αποδείχθηκε επωφελής καθώς είχε ως αποτέλεσμα αδοσης ακτινοβολίας κάτι που είναι θεμιτό για τη λειτουργία του πορώδους καυστήρα ο οποίος χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές που απαιτούν μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία.

Ο συγκεκριμένος τύπος καυστήρα αποδείχθηκε ότι παρουσιάζει πλεονεκτήματα ως προς την εύκολη εναλλαγή των καυσίμων και τις χαμηλές εκπομπές ρύπων σε περιπτώσεις υποστοιχειομετρικής καύσης και για εύρος θερμικών φορτίων 200-800 kW/m². Μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιοδήποτε μίγμα αερίων που μελετήθηκε παρέχοντας ιδανικές συνθήκες καύσης και διατηρώντας χαμηλά τα επίπεδα εκπομπών στην περιοχή ευσταθούς λειτουργίας του, δηλαδή για $1.4 \le \lambda \le 1.6$, για κάθε περίπτωση θερμικής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα οι εκπομπές NO_x κινούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα καθώς δεν ξεπερνούν τα 25 ppm ενώ το CO παραμένει κάτω από τα 300 ppm σε κάθε περίπτωση ευσταθούς λειτουργίας και κάτω από τα 30 ppm σε χαμηλά θερμικά φορτία. Τέλος, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και ο σχεδιασμός του επιτρέπουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης ακτινοβολίας σε κάθε περίπτωση καυσίμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν και εφαρμόστηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι διαγνωστικής των φαινομένων καύσης, η μέθοδος Schlieren και η μέθοδος συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων. Η πρώτη αποτελεί οπτική μη παρεμβατική μέθοδο και εφαρμόστηκε για την απεικόνιση των φλογών τριών συστημάτων καύσης διαφορετικής πολυπλοκότητας: μιας φλόγας διάχυσης από φιάλη υγραερίου οικιακής χρήσης, της φλόγας προανάμιξης ενός καυστήρα Bunsen και της φλόγας στο εσωτερικό ενός πορώδους καυστήρα. Η δεύτερη είναι συμβατική τεχνική και εφαρμόστηκε για τη μελέτη της συμπεριφοράς ενός πορώδους καυστήρα κατά τη λειτουργία του με αέρια εναλλακτικά καύσιμα.

Η μέθοδος Schlieren χρησιμοποιείται για περισσότερους από δύο αιώνες σε ποικίλες εφαρμογές διαφορετικών επιστημονικών πεδίων. Ωστόσο, αποτελεί ακόμα μια από τις σημαντικότερες μεθόδους στη διαγνωστική των φαινομένων καύσης, η οποία βελτιώνεται συνεχώς με την πρόοδο της τεχνολογίας. Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί ποικίλο οπτικό εξοπλισμό και τη διαδικασία κατασκευής της διάταξης από το χρήστη. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη μέθοδο αυτή είναι κατά βάση ποιοτικά αλλά χρησιμοποιούνται και για την εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων, όπως για παράδειγμα τον υπολογισμό της στρωτής ταχύτητας καύσης. Συγκεκριμένα, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η τεχνική Schlieren χρησιμοποιήθηκε μόνο για την ποιοτική μελέτη της δομής της φλόγας. Στην περίπτωση της φλόγας διάχυσης από τις φωτογραφίες διακρίνονταν οι ξεχωριστές ροές των αντιδρώντων, δηλαδή η δέσμη του άκαυστου αερίου που εξέρχεται από το ακροφύσιο και αναμιγνύεται με την εισερχόμενη στη φλόγα ροή του αέρα. Στον καυστήρα Bunsen αποτυπώθηκε λεπτομερώς η χαρακτηριστική φλόγα προανάμιξης κωνικής μορφής η οποία περιβαλλόταν από δευτερεύουσα φλόγα διάχυσης. Η περαιτέρω μελέτη της φλόγας αυτής θα επέτρεπε τον υπολογισμό της στρωτής ταχύτητας καύσης για το δεδομένο μίγμα καυσίμου/αέρα. Τέλος, επειδή ο πορώδης καυστήρας δεσμεύει τη φλόγα στο εσωτερικό του, αφαιρέθηκε το ένα εκ των δύο στρωμάτων κεραμικού υλικού από τα οποία αποτελείται, για να είναι εμφανείς οι μικρές φλόγες προανάμιξης που δημιουργούνται. Παράλληλα με τις εικόνες Schlieren καταγράφηκαν και φωτογραφίες των μικρών αυτών ορατών φλογών για διαφορετικές συνθήκες στοιχειομετρίας. Παρατηρήθηκε ότι η λειτουργία του καυστήρα χωρίς το δεύτερο πορώδες στρώμα εξαρτάται σημαντικά από το λόγο αέρα/καυσίμου (λ) και ότι η λειτουργία του γινόταν ασταθής σε περιπτώσεις φτωχού μίγματος. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις πλούσιου ή στοιχειομετρικού μίγματος υπήρχε ομοιομορφία στην κατανομή των μικρών φλογών πάνω στην επιφάνεια του καυστήρα, ενώ στα πολύ φτωχά μίγματα τα φλογίδια ανασηκώνονταν και επηρεάζονταν πολύ από την είσοδο του αέρα του περιβάλλοντος περιμετρικά του καυστήρα.

Στο δεύτερο σκέλος της εργασίας, ο πορώδης καυστήρας τέθηκε σε λειτουργία με τα δύο στρώματα κεραμικών υλικών διευρύνοντας την περιοχή ευσταθούς λειτουργίας σε περιοχές υποστοιχειομετρικής καύσης. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η λειτουργία του με εναλλακτικά καύσιμα που αποτελούσαν μίγματα CH₄, CO, H₂, CO₂ σε διαφορετικές αναλογίες. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση του συστήματος συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων σε συνδυασμό με μια θερμοκαμερα και ένα θερμοστοιχείο για την καταγραφή των εκπομπών καυσαερίων και των θερμοκρασιακών επιπέδων. Το σύστημα συνεχούς ανάλυσης καυσαερίων αποτελεί μια ιδιαίτερα αξιόπιστη μέθοδο διαγνωστικής των φαινομένων καύσης που, όμως, σε σχέση με την τεχνική Schlieren παρουσιάζει μεγαλύτερη ευκολία στο χειρισμό καθώς είναι εξ'αρχής ένα ολοκληρωμένο σύστημα, στο οποίο ο χρήστης χρειάζεται να επέμβει μόνο για τη βαθμονόμηση του. Οι αναλογίες των μιγμάτων των αερίων που τροφοδοτούσαν τον καυστήρα επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε τα καύσιμα να προσομοιάζουν ένα ισομοριακό μίγμα συνθετικού αερίου και βιοαερίου, ένα επίσης ισομοριακό μίγμα φυσικού αερίου και συνθετικού αερίου και τέλος ένα μίγμα του οποίου η περιεκτικότητα σε CO₂ ήταν ίδια με αυτή του βιοαερίου. Μελετήθηκε, με αυτόν τον τρόπο, η επίδραση που έχει η προσθήκη CO2 στο ρεύμα καυσίμου στα θερμοκρασιακά επίπεδα και τις εκπομπές καυσαερίων. Συγκεκριμένα, η αραίωση του καυσίμου με CO₂ είχε ως αποτέλεσμα ελαφρώς χαμηλότερες θερμοκρασίες και άρα λιγότερες εκπομπές NO_x σε σχέση με το καύσιμο που δεν περιείχε CO₂. Όμως, παράλληλα, η παρουσία του CO₂ στο ρεύμα καυσίμου είχε ως συνέπεια μικρότερο χρόνο παραμονής των αντιδρώντων μέσα στον καυστήρα και άρα αυξημένες εκπομπές CO. Επίσης, η παρουσία των συστατικών CO/H2 σε όλες τις περιπτώσεις καυσίμων που μελετήθηκαν αποδείχθηκε επωφελής καθώς είχε ως αποτέλεσμα μεγάλους βαθμούς απόδοσης ακτινοβολίας.

Η τεχνολογία του πορώδους καυστήρα αποδείχθηκε ιδιαίτερα επωφελής. Έχει την ικανότητα να λειτουργεί με οποιοδήποτε μίγμα καυσίμων, χαμηλής μάλιστα θερμογόνου δύναμης, διατηρώντας χαμηλά τα επίπεδα εκπομπών στην περιοχή ευσταθούς λειτουργίας του, δηλαδή για $1.4 \le \lambda \le 1.6$, για κάθε περίπτωση θερμικής ισχύος 200-800 kW/m² που μελετήθηκε. Πιο συγκεκριμένα οι εκπομπές NO_x κινούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα καθώς δεν ξεπερνούν τα 25 ppm ενώ το CO παραμένει κάτω από τα 300 ppm σε κάθε περίπτωση ευσταθούς λειτουργίας και κάτω από τα 30 ppm σε χαμηλά θερμικά φορτία. Τέλος, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά και ο σχεδιασμός του επιτρέπουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης ακτινοβολίας σε κάθε περίπτωση καυσίμου.

Βιβλιογραφία

- Aldén, M., Bood, J., Li, Z., Richter, M.. Visualization and understanding of combustion processes using spatially and temporally resolved laser diagnostic techniques. 2011, Proceedings of the Combustion Institute, 33 (1), pp. 69-97.
- [2] Μ. Φούντη, Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2005.
- [3] Σ. Καρέλλας, Ε. Κακαράς, Αντιρρυπαντική Τεχνολογία Θερμικών Σταθμών, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2011.
- [4] Kenneth K. Kuo, Principles of Combustion, Jonh Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [5] "Αισθητήρας λ." *http://el.wikipedia.org/*. Web.
- [6] Χ. Κεραμιώτης, Ανάπτυξη παρεμβατικών και μη διαγνωστικών μεθόδων και αξιολόγηση σε συστήματα καύσης προανάμιξης. Εφαρμογή σε καυστήρα πορώδους αδρανούς μέσου, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 2013.
- [7] N. de Arespacochaga, C. Valderrama, C. Mesa, L. Bouchy, J.L. Cortina. Biogas deep clean-up based on adsorption technologies for Solid Oxide Fuel Cell applications. Chemical Engineering Journal. 2014;255:593-603
- [8] M.R. Hamedi, A. Tsolakis, C.S. Lau. Biogas upgrading for on-board hydrogen production: Reforming process CFD modelling. International Journal of Hydrogen Energy, 2014:39;12532-12540
- [9] Yuhua Ai, Zhen Zhou, Zheng Chen, Wenjun Kong. Laminar flame speed and Markstein length of syngas at normal and elevated pressures and temperatures. Fuel 137 (2014) 339–345
- [10] N.C. Surawski, B. Miljevic, T.A. Bodisco, R. Situ, R.J. Brown, Z.D. Ristovski. Performance and gaseous and particle emissions from a liquefied petroleum gas (LPG) fumigated compression ignition engine. Fuel. 2014:133;17–25
- [11] Chigier N. (Ed.), Combustion Measurements, Hemishpere Publishing Corporation, USA, 1991.
- [12]Kohse Höinghaus K. and Jeffries JB. (Eds.), Applied Combustion Diagnostics, Taylor Francis, New York, 2002.
- [13]Eckbreth AC, Recent advances in laser diagnostics for temperature and species concentration in combustion, Symposium (Int) Combust. 1981;18:1471–1488.

- [14]Zhao FQ, Hiroyasu H, The application of laser Rayleigh scattering to combustion diagnostics. Prog. Energy Combust. Sci. 1993;19:447–485.
- [15]G. S. Settles, Shlieren and Shadowgraph techniques, Visualizing phenomena in transparent media, Germany: Springer, 2006.
- [16] Φαντάκης, Παναγιώτης. "Η ρύθμιση του καυστήρα πετρελαίου." , Web. http://users.sch.gr/fantakis/PROTH.htm
- [17] "Μέτρηση & έλεγχος." Web. http://www.sigmahellas.gr/index.php?lang=1&thecatid=2&thesubcatid=71.
- [18]Eurotron Instruments (UK) Ltd. *HVAC/building Instrumentation*. Web. http://www.skt-testing.gr/datafiles/file/HVAC09.pdf>
- [19] Amrita Mazumdar. Principles and techniques of Schlieren imaging systems, 2013 Technical Report CUCS-016-13
- [20] Βαμβακάς, Ι., Β. Μπάρτζης. "Κοίλα κάτοπτρα." http://physics.teiath.gr/. Web.
- [21] Βαρσάμης. "Μέτρηση της εστιακής απόστασης φακού." http://ikaros.teipir.gr/. Web.
- [22] "Lenses and Mirrors." http://www.phy.duke.edu/. Web.
- [23] Hugh D. Young, Πανεπιστημιακή Φυσική, Τόμος Β', Ηλεκτρομαγνητισμός-Οπτική-Σύγχρονη Φυσική, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1994
- [24] W. H. McCallum, How to caracterize polymer films optically, SPE Journal, 1972
- [25]Beinert J., Kalthoff J.F., Seidelmann U., Soltesz U., Das Schattenoptische Verfahren und seine Anwendung in der Bruchmechanik, *VDI-Berichte*, 1977.
- [26] Kassel, P.C., Jr and J.D. DiBattista, An ultra-high-speed photographic system for investigating hypervelocity impact phenomena, *NASA TN D-6128*, 1971
- [27] W. Merzkirch, Flow visualization, New York: Academic Press, 1987.
- [28] Tanda G., Fossa M., Misale M., Heat transfer measurements in water using a Schlieren technique, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014;71:451-458
- [29]L. Rayleigh, On the tension of water surfaces, clean and contaminated, *Phil. Mag.*, 1980.
- [30] Verreault J., Higgins J. A., Initiation of detonation by conical projectiles. Proceedings of the Combustion Institute. 2011; 33(2): 2311-2318
- [31] Settles G.S., Airflow visaualization in a model greenhouse, in *Proc. 15th Intl. Congr. for Plastics in Agriculture*, Hersey, 2000
- [32] W. C. Sabine, Theatre acoustics, Amerian Architect, 1913.
- [33] J. Rienitz, Optical inhomogeneities: Schlieren and shadowgraph methods in the seventeeth and eighteeth centuries, *Endeavor*, 1997
- [34] J. W. Tang, T. J. Liebner, B. A. Craven, G. S. Settles, A Schlieren optical study of the human cough with and without wearing masks for aerosol infection control. J. R. Soc. Interface. 2009;6 :727-736
- [35]J-P Lafautemail, O. Leroy, M. Wevers, S. Devolder, L. Baert, Schlieren photography study of energy absorption by uric acid nuclei, Ultrasound in Medicine and Biology. 2000;26(2): 335–340

- [36] F. D. Hanke1, R. H. H. Kröger, U. Siebert, G. Dehnhardt, Multifocal lenses in a monochromat: the harbour seal. J Exp Biol. 2008;211: 3315-3322.
- [37]L. Vasiliev, Schlieren methods, New York: Israel Program for Scientific Translations, 1971
- [38] K. Takizawa, A. Takahashi, K. Tokuhashi, S. Kondo, A. Sekiya, Burning velocity measurements of nitrogen-containing compounds. Journal of Hazardous Materials. 2008;155:144-152.
- [39] French W., Rose D., Kelly-Zion P., Pursell C., Analysis of Evaporating Fuel Films Using Shadowgraph and Schlieren Imaging Techniques, SAE Technical Paper. 2008-01-2443.
- [40] M. Kellenberger, G. Ciccarelli. Propagation mechanisms of supersonic combustion waves. Proceedings of the Combustion Institute, 2014, DOI: 10.1016/j.proci.2014.08.002
- [41]N Kudo, H Ouchi, K Yamamoto, H Sekimizu. A simple Schlieren system for visualizing a sound field of pulsed ultrasound 2004 J. Phys.: Conf. Ser. 1 146
- [42] M. Aghsaee, D. Nativel, M. Bozkurt, M. Fikri, N. Chaumeix, C. Schulz, Experimental study of the kinetics of ethanol pyrolysis and oxidation behind reflected shock waves and in laminar flames. Proceedings of the Combustion Institute. 2014. DOI: 10.1016/j.proci.2014.05.063
- [43] Irvin Glassman, Combustion, Academic Press, 1997.
- [44]Ch. Keramiotis, M.A. Founti, An experimental investigation of stability and operation on a biogas fueled porous burner. Fuel. 2013; 103: 278–284.
- [45] Stefan Voß, Abgasanalyse für Verbrennungsprozesse (lecture presentation), Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Lehrstuhl für Gas- und Wärmetechnische Anlagen, TU Bergakademie Freiberg, 2012
- [46]Giakoumis EG, Rakopoulos CD, Dimaratos AM, Rakopoulos DC. Exhaust emissions of diesel engines operating under transient conditions with biodiesel fuel blends. Prog. Energy Combust. Sci. 2012;38:691–715
- [47]Fryda L, Panopoulos K, Vourliotis P, Pavlidou E and Kakaras E. Experimental investigation of fluidised bed co-combustion of meat and bone meal with coals and olive bagasse. Fuel 2006;85:1685–1699
- [48] Τσιπλακίδης , Δ. "Εργαστηριακή άσκηση: Φασματοφωτομετρία." users.auth.gr/~dtsiplak. Web.
- [49]Ingle JDJ and Crouch SR. Spectrochemical Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1988.
- [50]Luft KF. Infrared techniques for the measurement of carbon monoxide. Ann. Occup. Hyg. 1975;18:45–51.
- [51]Lammel G, Schweizer S and Renaud P. MEMS infrared gas spectrometer based on a porous silicon tunable filter. The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2001: 578-581.
- [52] Wang CH, Crowder JG, Mannheim V, Ashley T, Dutton DT, Johnson AD, Pryce G. and Smith SD. Detection of nitrogen dioxide using a room temperature operation mid-infrared lnSb light emitting diode. Electronics Letters 1998;35:300– 301

- [53] Toepler, A. Optischen Studien nach der Methode der Schlierenbeobachtung. Poggendorfs Annalen der Physik und Chemie, 131:33-55, 1867
- [54] S. R. Turns, An Introduction to Combustion, Concepts and Applications, Mc Graw Hill, 2000.
- [55] Wood S, Harris AT. Porous burner for lean-burn applications. Prog Energy Combust Sci 2008;34:667–84.
- [56] Ch. Keramiotis, B. Stelzner, D. Trimis and M. Founti, Porous burners for lowemission combustion: An experimental investigation, Energy, 2012;45(1):213–219
- [57]Brenner G, Pickenäcker K, Pickenäcker O, Trimis D, Wawrzinek K, Weber T. Numerical and experimental investigation of matrix-stabilized methane/air combustion in porous inert media. Combust. Flame 2000;123:201–13
- [58] Trimis D, Durst F. Combustion in a Porous Medium-Advances and Applications. Comb Sci Tech 1996;121:153–68.
- [59]Σ. Ε. Σιμόπουλος, Μετρήσεις Τεχνικών Μεγεθών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1989
- [60] Science Mission Directorate. "Introduction to The Electromagnetic Spectrum" Mission: Science. 2010. National Aeronautics and Space Administration. 07 Oct. 2014 http://missionscience.nasa.gov/ems/01_intro.html
- [61]Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Fundamentals of heat and mass transfer, Wiley, 1990
- [62] R. W. Francisco Jr., F. Rua, M. Costa, R. C. Catapan, A. A. M. Oliveira, On the Combustion of Hydrogen-Rich Gaseous Fuels with Low Calorific Value in a Porous Burner, Energy Fuels 2010; 24: 880–887
- [63]B. Stelzner, Ch. Keramiotis, S. Voß, M. Founti and D. Trimis. Analysis of the flame structure for lean methane-air combustion in porous inert media by resolving the hydroxyl radical, Proceedings of the Combustion Institute, 2014
- [64]S. Wood, D. F. Fletcher, S. D. Joseph, A. Dawson, A. T. Harris, Design and Evaluation of a Porous Burner for the Mitigation of Anthropogenic Methane Emissions, Environ. Sci. Technol., 2009;43:9329-9334
- [65] Rumminger MD, Dibble RW, Heberle NH, Crosley DR. Gas temperature above a porous radiant burner: Comparison of measurements and model predictions. Symp. (Int) Combust. 1996;26:1755–62.
- [66]G.E. Andrews, D. Bradley, The burning velocity of methane-air mixtures, Combust. Flame, 19 (1972), pp. 275–288