



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

2023

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΙΝΗΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

MOVEMENT OF NANOPARTICLES IN FUEL CELLS

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΓΚΙΛΛ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ: ΔΡ. ΣΑΡΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
ΔΡ. ΚΑΡΒΕΛΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

2023

ΚΙΝΗΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή :

A/α	ΟΝΟΜΑ - ΕΠΩΝΥΜΟ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1.	Ιωάννης Σαρρής	
2.	Ευάγγελος Καρβέλας	
3.	Γεώργιος Σοφιάδης	

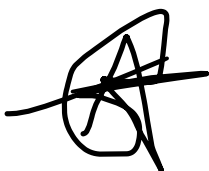
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γκιλλ Αλέξανδρος του Κρίστοφερ, με αριθμό μητρώου 46147594 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο/Η Δηλών/ούσα



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου τις τελευταίες δεκαετίες έχει κερδίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, κυβερνήσεων και οργανισμών ως μία εναλλακτική φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία παραγωγής ενέργειας, ικανή να δώσει λύσεις στα σημαντικά παγκόσμια προβλήματα της κλιματικής κρίσης και της ενεργειακής ασφάλειας. Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και μοντελοποίηση της κίνησης των νανοσωματιδίων σε κυψέλες καυσίμου κάτω από διαφορετικούς αριθμούς Reynolds.

Αρχικά αναλύεται η τεχνολογία αυτή της κυψέλης καυσίμου, παρουσιάζεται το ιστορικό υπόβαθρο, η αρχή λειτουργίας καθώς και τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματά της. Στην συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι τύποι και οι εφαρμογές των κυψελών καυσίμου στην καθημερινότητά μας και για το πώς αυτές μπορούν να αποτελέσουν μία από τις καθαρότερες και πιο αποδοτικές τεχνολογίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ιδιαίτερη έμφαση στη διπλωματική εργασία δίνεται στο υπολογιστικό μέρος με την μοντελοποίηση αλλά και το πώς κινούνται τα νανοσωματίδια μέσα στις κυψέλες καυσίμου κάτω από διάφορες συνθήκες.

ABSTRACT

Fuel cell technology in recent decades has gained the interest of the scientific community, governments and organisations as an alternative environmentally friendly energy production technology, capable of providing solutions to the major global problems of the climate crisis and energy security. The aim of this thesis is to study and model the motion of nanoparticles in fuel cells under different Reynolds numbers.

Firstly, this fuel cell technology is examined, its historical background, operating principle and its disadvantages and advantages are presented. Then the types and applications of fuel cells in our everyday life are described in detail and how they can be one of the cleanest and most efficient technologies for electricity production.

Special emphasis in the thesis is given to the experimental part with the modelling and how the nanoparticles move inside the fuel cells under different conditions.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. 1: Διάταξη κυψέλης καυσίμου	14
Σχήμα 1. 2 : Συνεχής ηλεκτρική τάση από το καύσιμο	20
Σχήμα 1. 3 : Τύποι και χαρακτηριστικά κυψελών καυσίμου.....	24
Σχήμα 1. 4: Απεικόνιση λειτουργίας βασικών κυψελών καυσίμου.....	25
Σχήμα 1. 5: Κυψέλη PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).....	25
Σχήμα 1. 6: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου	28
Σχήμα 1. 7: Απεικόνιση κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).....	29
Σχήμα 1. 8: Λειτουργία κυψέλης καυσίμου τήγματος καρβιδίων (MCFC)	31
Σχήμα 1. 9: Λειτουργία κυψέλης σταθερού οξειδίου (SOFC)	33
Σχήμα 1. 10 : Δομή OpenFoam	46

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. 1:Απεικόνιση κυψελών καυσίμου	9
Εικόνα 1. 2: Νανοσωματίδια σε κυψέλη καυσίμου	12
Εικόνα 1. 3 : Δομή του πολυτετραφθοροαιθυλενίου (PTFE).....	17
Εικόνα 1. 4: Απεικόνιση διπολικών πλακών απλού σχεδίου.....	18
Εικόνα 1. 5: Εσωτερική αναδίπλωση όπου μια πιο σύνθετη διπολική πλάκα επιτρέπει την τροφοδοσία των αντιδρώντων αερίων στα ηλεκτρόδια μέσω εσωτερικών σωλήνων	19
Εικόνα 1. 6: Ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη καυσίμου	35
Εικόνα 1. 7: Λεωφορείο κυψέλης καυσίμου υδρογόνου	36
Εικόνα 1. 8: Παραδείγματα φορτηγών βαρέως τύπου με κυψέλη καυσίμου	36
Εικόνα 1. 9: Ανεφοδιασμός φορτηγού μεσαίου τύπου κυψέλης καυσίμου.....	37
Εικόνα 1. 10: Περονοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα με κυψέλη καυσίμου	37
Εικόνα 1. 11: Σκάφος κυψέλης καυσίμου	38
Εικόνα 1. 12: Κύριες γεωμετρίες καναλιών ροής.....	42
Εικόνα 1. 13: ParaFoam window	49

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Εικόνα 1.1 1: Γεωμετρία διασταυρούμενης ροής.....	54
Εικόνα 1.1 2: Είσοδος V_{in} -Εξοδος V_{out}	55
Εικόνα 1.1 3: Διάγραμμα χρόνου παραμονής σωματιδίων στο πλέγμα για κάθε τιμή Reynolds (Time (s)-Reynolds).....	57
Εικόνα 1.1 4: Εντολή εκκίνησης της προσομοίωσης	58
Εικόνα 1.1 5: Δημιουργία πλέγματος και επιλογή μοντέλων για την επίλυση.....	58
Εικόνα 1.1 6: Παράδειγμα τρέχουσας προσομοίωσης (Time=24,13..., Re100).....	59
Εικόνα 1.1 7: Interdigitated Geometry (Time=20, Re=500)	59
Εικόνα 1.1 8: Interdigitated Geometry (Time=350, Re=500).....	60
Εικόνα 1.1 9: Εστιασμένη όψη του προφίλ ταχύτητας στους αγωγούς (glyph vectors).	61
Εικόνα 1.1 10: Εστιασμένη όψη του προφίλ ταχύτητας χωρίς τοιχώματα και απεικόνιση των διανυσμάτων των ταχυτήτων.	61
Εικόνα 1.1 11: Απεικόνιση σε διάγραμμα του προφίλ ταχύτητας σε διάφορες τιμές αποστάσεων μέσα σε αγωγό.	62

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ABSTRACT.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ ΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ....	Error! Bookmark not defined.
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1 Ιστορική αναδρομή κυψελών καυσίμου	10
1.2 Το ιστορικό της Νανοτεχνολογίας και Νανοσωματίδια σε κυψέλες καυσίμου	11
2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	14
2.1 Αρχή λειτουργίας.....	14
2.2 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου.....	22
3. ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	23
3.1 Τύποι κυψελών καυσίμου	23
3.1.1 Κυψέλη καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC).....	25
3.1.2 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC).....	27
3.1.3 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).....	29
3.1.4 Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)	31
3.1.5 Κυψέλη στερεού οξειδίου (SOFC)	32
3.2 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου	35
4. OpenFoam.....	43
5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	51
6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	63
7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ -ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ	64

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι κύψελες καυσίμου είναι διατάξεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας το υδρογόνο σαν καύσιμο. Θεωρούνται μια προηγμένη τεχνολογία και είναι πολλά υποσχόμενες για την παραγωγή καθαρής ενέργειας, καθώς δεν παράγουν εκπομπές CO₂ και άλλων ρυπογόνων ουσιών. Επιπλέον, μπορούν να λειτουργούν με εύκολα ανανεώσιμα καύσιμα όπως είναι το υδρογόνο, που μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια.

Ο μηχανισμός της κυψέλης καυσίμου μετατρέπει το υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό παράγοντας θερμότητα ταυτόχρονα με την ηλεκτρική ενέργεια. Καθώς η αντίδραση είναι εξώθερμη, παράγεται θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα.

Όπως θα δούμε η έρευνα συνεχίστηκε και γίνεται ακόμα προσπάθεια βελτίωσης των αποδόσεων κυρίως με την βελτίωση του καταλύτη που χρησιμοποιούν οι διατάξεις αυτές, πράγμα που απαιτεί μελέτη τους στην κλίμακα του νανομέτρου. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με τον τύπο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Το πιο γνωστό είδος είναι η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίου (PEM), οι οποίες λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και παράγουν ισχύ αρκετή για την ικανοποίηση των διαφόρων ενεργειακών αναγκών.

Παρά το γεγονός ότι οι κυψέλες καυσίμου βασίζονται στο υδρογόνο, οποιοδήποτε υλικό το οποίο περιέχει υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, όπως η μεθανόλη, η αιθανόλη, το φυσικό αέριο και διάφορα άλλα παράγωγα του πετρελαίου.



Εικόνα 1. 1: Απεικόνιση κυψελών καυσίμου

1.1 Ιστορική αναδρομή κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου έκαναν την εμφάνιση τους κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα, με την πρώτη αναφορά να γίνεται από τον Άγγλο χημικό Davy, ο οποίος δεν μπόρεσε να τεκμηριώσει την έρευνα του και έτσι αυτή παραμερίστηκε από τη διεθνή κοινότητα (Barbir, 2005). Τα πρώτα βήματα στη λειτουργία και ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου την έκανε ο Γερμανός επιστήμονας Christian Friedrich Schonbein το 1838.

Η πρώτη κυψέλη καυσίμου αναπτύχθηκε στην Μ. Βρετανία το 1839 από τον Sir William Grove. Ο Grove υποστήριζε ότι εφόσον μπορούσαν να γίνουν δυο διαφορετικά στοιχεία βοηθούμενα από την ηλεκτρική ενέργεια το νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο με την βοήθεια μιας αντίστροφης διαδικασίας και εφόσον έχει προκληθεί αντίδραση του υδρογόνου και του οξυγόνου παράγοντας ηλεκτρισμό θα είναι εφικτή να υλοποιηθεί. Προκειμένου να εφαρμοστεί η διαδικασία αυτή έβαλε δυο λωρίδες πλατίνας σε χωριστές σφραγισμένες φιάλες όπου η μια περιείχε υδρογόνο μέσα και η άλλη οξυγόνο. Έτσι όταν οι φιάλες αυτές ήταν βυθισμένες σε ένα ηλεκτρικό οξύ μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος ξεκίνησε να εισρέει ανάμεσα από τα δυο ηλεκτρόδια και άρχισε να παράγεται υγρό από τις φιάλες οξυγόνου. Για να μεγαλώσει η ποσότητα της ηλεκτρικής τάσης όπου παράγονταν, ο Grove προέβει στην σύνδεση των συσκευών στην σειρά έτσι ώστε να είναι σε θέση να φτιάξει τις μπαταρίες αερίου όπως της ονόμασε ο ίδιος.

Στο διάστημα όπου μεσολάβησε, επιστήμονες αλλά και μηχανικοί διαπίστωσαν ότι θα έπρεπε να ξεπεραστούν πολλές δυσκολίες για να διατεθεί στο εμπόριο αυτή η ευρεσιτεχνία. Μέχρι περίπου τα μέσα του 19ου αιώνα η εφαρμογή του κινητήρα εσωτερικής καύσης αποτελούσε το κέντρο βάρους των επιστημόνων αλλά και η πολύ μεγάλη εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων είχε σαν αποτέλεσμα οι επιστήμονες να απομακρυνθούν από την εκμετάλλευση της ιδέας της κυψέλης καυσίμου. Το επόμενο μεγάλο βήμα σε ότι αφορά την ιστορική εξέλιξη των κυψελών καυσίμου πραγματοποιήθηκε από τον μηχανικό Thomas Francis Bacon στην Αγγλία και συγκεκριμένα στο πανεπιστήμιο του Cambridge. Το έτος 1932 έγινε επαναγορά της κυψέλης καυσίμου η οποία είχε αναπτυχθεί από τους Mond και Langer καθώς τροποποίησαν την ιδέα του αρχικού σχεδίου.

Μετά την πάροδο 27 ετών ο Bacon θα αρχίσει να κατασκευάζει μια κυψέλη καυσίμου η οποία θα είναι πλήρως λειτουργική και θα διατίθεται στο εμπόριο.

Την δεκαετία του 1970 η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου αρχίζει σταδιακά να αναπτύσσεται για συστήματα επίγεια και αργότερα μέχρι και το 1980 οι έρευνες όπου διεξήχθησαν είχαν σαν άμεσο στόχο να αναπτύξουν υλικά τα οποία θα ήταν σε θέση να δώσουν την μέγιστη απόδοση ενέργειας μειώνοντας δραστικά το κόστος λειτουργίας των κυψελών καυσίμων. Στην διάρκεια των τελευταίων ετών έχουν γίνει σοβαρές προσπάθειες έτσι ώστε οι κυψέλες καυσίμου να χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

1.2 Το ιστορικό της Νανοτεχνολογίας και Νανοσωματίδια σε κυψέλες καυσίμου

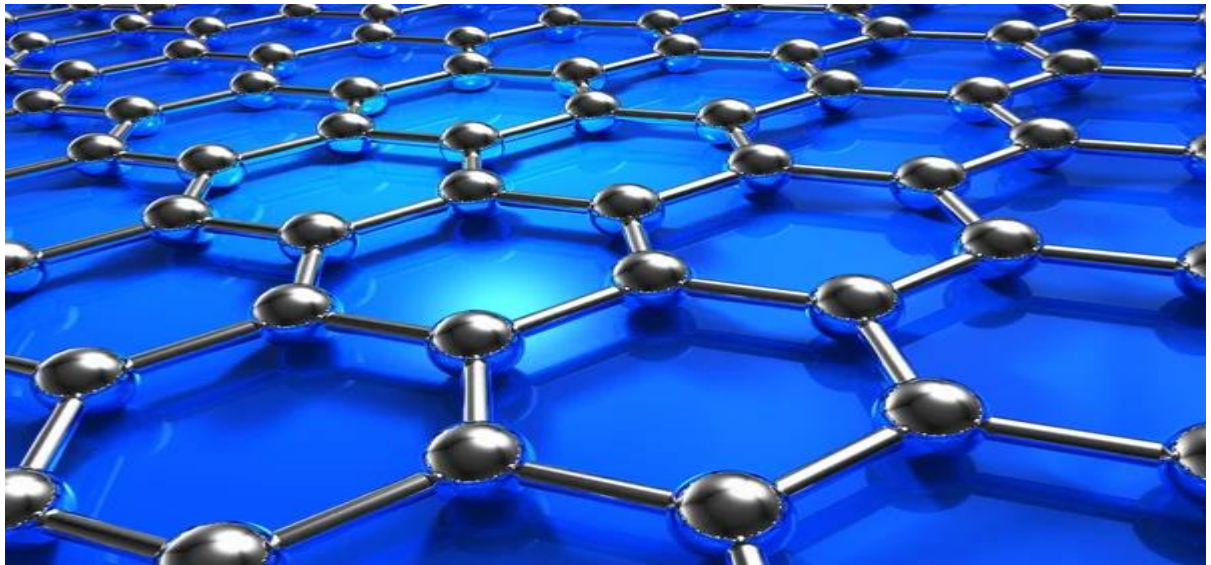
Το 1959, ο Αμερικανός φυσικός και νομπελίστας Richard Feynman έθεσε τα επιστημονικά θεμέλια για την επανάσταση της νανοτεχνολογίας. Ισχυρίστηκε ότι δεν υπάρχει τίποτα στους νόμους της φυσικής που να απαγορεύει τη διάταξη ατόμων κατά βούληση, υποστηρίζοντας έτσι ότι απώτερος στόχος είναι να μπορούμε να μεταχειριζόμαστε τα άτομα ακριβώς με τον τρόπο που θέλουμε εμείς.

Ο ίδιος υποστήριζε πως το μοναδικό εμπόδιο για την μεταχείριση της ύλης σε μοριακό και ατομικό επίπεδο ήταν η έλλειψη πειραματικών οργάνων σε νανοσκοπική κλίμακα. Η μετάβαση από μεγαλύτερα σε ολοένα και μικρότερα μεγέθη οδήγησε στον επανασχεδιασμό των πειραματικών διατάξεων εφόσον άλλαζε και ο συσχετισμός των δυνάμεων.

Η Νανοτεχνολογία και η Νανοεπιστήμη δεν αποτελούν εντελώς καινούργιες έννοιες. Πολλές χημικές ουσίες και διεργασίες διαθέτουν χαρακτηριστικά σε επίπεδο νανοκλίμακας. Για παράδειγμα, εδώ και δεκαετίες οι χημικοί ασχολούνται με την σύνθεση των πολυμερών, μεγάλα μόρια δομημένα από μικροσκοπικές υπομονάδες. Επιπλέον, η Νανοτεχνολογία χρησιμοποιείται για πάνω από είκοσι χρόνια για την κατασκευή μικροσκοπικών χαρακτηριστικών στα microchip των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Ο κόσμος μας διαθέτει αρκετές δομές νανοκλίμακας όπως είναι το γάλα, ένα κολλοειδές σε επίπεδο νανοκλίμακας, οι εξελιγμένες πρωτεΐνες που ελέγχουν ένα ευρύ φάσμα βιολογικών δραστηριοτήτων την απελευθέρωση ενέργειας και επισκευή κυττάρων. Τα νανοσωματίδια εμφανίζονται φυσικά και έχουν δημιουργηθεί εδώ και πάρα πολλά χρόνια, όπως τα προϊόντα καύσης και το μαγείρεμα των τροφίμων.

Η νανοτεχνολογία μπορεί να θεωρηθεί ως πραγματικά διεπιστημονική επειδή ενθαρρύνει τη συνεργασία ερευνητών, οι οποίοι παλιότερα ανήκαν σε διαφορετικούς τομείς, και τώρα μοιράζονται τις γνώσεις, τα εργαλεία και τις τεχνικές. Η κατανόηση της φυσικής και της χημείας της ύλης και των διαδικασιών σε νανοκλίμακα είναι σχετική με όλους τους επιστημονικούς κλάδους, από τη χημεία και τη φυσική, έως τη βιολογία, τη μηχανική και την ιατρική. Οι προοδευτικές αυτές εξελίξεις σε καθένα από αυτούς τους τομείς για την διερεύνηση σε όλο και πιο μικροσκοπική κλίμακα τώρα χαρακτηρίζονται με τον όρο της νανοτεχνολογίας.

Η ανάπτυξη κάθε νέας επιστήμης ή τεχνολογίας συνεπάγεται υποσχέσεις αλλά ταυτόχρονα και κινδύνους για την κοινωνία. Είναι ευθύνη της κοινωνίας, καθώς και των πολιτών, των επιστημόνων, των κυβερνήσεων και των επιχειρήσεων να συμφωνήσουν σχετικά με τον καλύτερο τρόπο ανάπτυξης αυτού του είδους των τεχνολογιών, ελαχιστοποιώντας, ταυτόχρονα, τους κινδύνους τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον.



Εικόνα 1. 2: Νανοδομημένα σε κυψέλη καυσίμου

Οι κύριες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι διαθέσιμες στη φύση, όπως η ηλιακή, αιολική, γεωθερμική ή παλιρροϊκή ενέργεια μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια και μεταφέρονται αποτελεσματικά στον καταναλωτή σε αντίθεση με το υδρογόνο που πρέπει να παραχθεί, να μεταφερθεί, να αποθηκευτεί και να αξιοποιηθεί από τον τελικό χρήστη. Με δεδομένο όμως ότι το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια κυρίως με τη χρήση κυψελών καυσίμου με μοναδικό προϊόν καύσης το νερό η χρήση του οδηγεί σε ένα πλήρως φιλικό προς το περιβάλλον ενεργειακό σύστημα, με την επακόλουθη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της εξάρτησής της από τα ορυκτά καύσιμα.

Αν και η παραγωγή υδρογόνου, η αποθήκευση και μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι κάτι νέο, η επιστημονική κοινότητα ερευνά ακόμα αποτελεσματικές μεθόδους για να κάνει το μέλλον της οικονομίας του υδρογόνου βιώσιμο. Δεδομένου ότι το υδρογόνο είναι μάλλον φορέας ενέργειας παρά πηγή ενέργειας ο τρόπος που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του είναι καθοριστικός για να θεωρηθεί φιλικό προς το περιβάλλον. Προς το παρόν, το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου γίνεται με την αναμόρφωση με ατμό του μεθανίου του φυσικού αερίου και μόνο το 5% περίπου της εμπορικής παραγωγής υδρογόνου προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

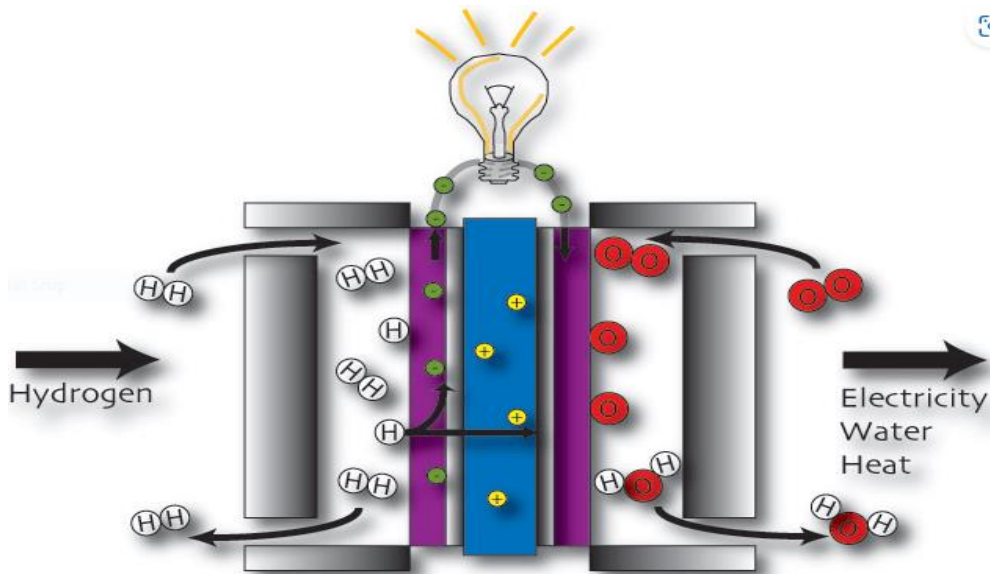
Πολλές διαφορετικές τεχνολογίες έχουν ήδη αναπτυχθεί για την μετατροπή του υδρογόνου. Για παράδειγμα, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε κινητήρες όσο και σε κυψέλες καυσίμου. Οι κινητήρες μπορούν να καίνε υδρογόνο με τον ίδιο τρόπο όπως τη βενζίνη ή το φυσικό αέριο, ενώ οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες και πιο αποδοτικές από τις αντιδράσεις καύσης σε παραγωγή ενέργειας, και οι κυψέλες καυσίμων είναι από τις πιο ελκυστικές και πολλά υποσχόμενες πράσινες τεχνολογίες.

Σε αυτό το πλαίσιο, η συμβολή της νανοτεχνολογίας μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος και να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα με την χρήση νανουλικών και ερευνητικές ομάδες σε όλο τον επιστημονικό κόσμο εργάζονται προς αυτή την κατεύθυνση.

Τα νανοσωματίδια (nanoparticles) μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση της απόδοσης και της διάρκειας ζωής των κυψελών καυσίμου. Αυτό συμβαίνει γιατί οι κύψελες καυσίμου λειτουργούν με μια σειρά χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων τους. Τα νανοσωματίδια μπορούν να βελτιώσουν αυτές τις αντιδράσεις, καθιστώντας τις πιο αποδοτικές και μεγαλύτερης διάρκειας. Συγκεκριμένα, τα νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν την πυκνότητα των ηλεκτροδίων, να αυξήσουν την επιφάνεια επαφής ανάμεσα στα καύσιμα και τα ηλεκτρόδια, και να βελτιώσουν τη διασπορά του καυσίμου στις κυψέλες καυσίμου. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη απόδοση, μείωση των απωλειών θερμότητας και καλύτερη αντιμετώπιση της απόσυρσης των κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, η χρήση νανοσωματιδίων μπορεί να βελτιώσει την αντοχή των κυψελών καυσίμου στη διάβρωση.

2. ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Αρχή λειτουργίας



Σχήμα 1. 1: Διάταξη κυψέλης καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από τρία κύρια μέρη, τον ηλεκτρολύτη, την άνοδο και την κάθοδο. Όλα τα μέρη αυτά συμβάλουν στην ορθή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.

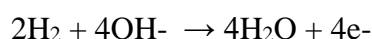
Ο ηλεκτρολύτης αποτελεί το βασικό τμήμα μιας κυψέλης καυσίμου και η κύρια λειτουργία του είναι να επιτρέπει την μετακίνηση των ιόντων στο εσωτερικό του. Αξίζει να σημειωθεί ότι θα πρέπει να έχει υψηλή ιοντική αγωγιμότητα έτσι ώστε να επιτρέπει μόνο σε ιόντα υδρογόνου H⁺ να διέρχονται από αυτόν και όχι σε ηλεκτρόνια. Σε διαφορετική περίπτωση, αν τα ηλεκτρόνια περνούσαν από τον ηλεκτρολύτη, θα παρουσιάζονταν προβλήματα όπως το βραχυκύκλωμα, με αποτέλεσμα τη μη ομαλή λειτουργία του στοιχείου. Επιπλέον, ο ηλεκτρολύτης είναι το στοιχείο που καθορίζει τις συνθήκες λειτουργίας καθώς διαχωρίζει το καύσιμο και το οξειδωτικό, έτσι ώστε να αποφεύγεται η απευθείας αντίδραση τους.

Υπάρχουν είδη ηλεκτρολυτών, ανάλογα με το είδος υπάρχουν και διαφορές όπως για παράδειγμα την θερμοκρασία λειτουργίας. Η θερμοκρασία λειτουργίας παίζει σημαντικό ρόλο για το είδος του καταλύτη που θα χρησιμοποιηθεί. Όταν οι κυψέλες καυσίμου έχουν υγρό ηλεκτρολύτη η θερμοκρασία λειτουργίας είναι χαμηλή περίπου στους 250°C, τέτοιες κυψέλες είναι οι αλκαλικές και του φωσφορικού οξέος. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται καταλύτης σε στερεά κατάσταση η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεγαλύτερη από 650°C. Εάν είχε χρησιμοποιηθεί υγρός καταλύτης σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες θα υπήρχε αλλοίωση του λόγω εξάτμισης. Για αυτόν τον λόγο σε χαμηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται ακριβότεροι ηλεκτρολύτες, σε αντίθεση με αυτούς που χρησιμοποιούνται στις υψηλότερες θερμοκρασίες αφού οι αντιδράσεις μπορούν να καταλύονται από λιγότερο δραστικούς καταλύτες, ενώ παράλληλα αυξάνεται η ιοντική αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη.

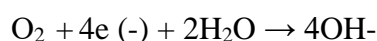
Για τον ηλεκτρολύτη υπάρχουν κάποια αλκαλικά και όξινα διαλύματα καθώς και στερεά σώματα. Στην άνοδο ενός όξινου ηλεκτρολύτη, το υδρογόνο ιονίζεται στο ηλεκτρόδιο απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια και δημιουργώντας πρωτόνια. Η αντίδραση αυτή απελευθερώνει ενέργεια. Στην κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια, σχηματίζοντας έτσι νερό.

Ένα οξύ είναι ένα ρευστό με ελεύθερα ιόντα υδρογόνου H^+ , που τα εξυπηρετεί ώστε να μετακινηθούν από την άνοδο στην κάθοδο. Ορισμένα πολυμερή μπορούν επίσης να κατασκευαστούν ώστε να περιέχουν κινητά ιόντα υδρογόνου H^+ . Αυτά τα υλικά ονομάζονται μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων, καθώς ένα ιόν H^+ είναι επίσης πρωτόνιο.

Στην άνοδο, τα ιόντα υδροξειδίου (OH^-) αντιδρούν με το υδρογόνο, απελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια και παράγοντας νερό. Σε μια κυψέλη καυσίμου αλκαλικού ηλεκτρολύτη η συνολική αντίδραση είναι η ίδια, αλλά οι αντιδράσεις σε κάθε ηλεκτρόδιο είναι διαφορετικές. Η αντίδραση αυτή φαίνεται στην εξίσωση που ακολουθεί:



Στην κάθοδο γίνεται αντίδραση του οξυγόνου με τα ηλεκτρόνια που λαμβάνονται από το ηλεκτρόδιο άνοδο και το νερό στον ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας νέα ιόντα υδροξειδίου (OH^-) σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:



Όταν ο ηλεκτρολύτης είναι όξινος τότε το ιόν που μεταφέρεται από την άνοδο στην κάθοδο είναι κατιόν του υδρογόνου και η παραγωγή του νερού γίνεται στην κάθοδο. Αντίθετα όταν ο ηλεκτρολύτης είναι αλκαλικός το ιόν αποτελεί το ανιόν υδροξυλίου και μεταφέρεται από την κάθοδο προς την άνοδο και το νερό σχηματίζεται στην άνοδο.

Στα ηλεκτρόδια (άνοδος και κάθοδος), μετατρέπεται η χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια, επειδή γίνεται διάσπαση του ατόμου του καυσίμου και ελευθερώνονται τα ηλεκτρόνια. Εφόσον γίνει η διάσπαση τα ιόντα στην συνέχεια περνούν στον ηλεκτρολύτη και τα ηλεκτρόνια πηγαίνουν στην κάθοδο μέσω του εξωτερικού κυκλώματος δημιουργώντας τον ηλεκτρισμό.

Συνεπώς, τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι πορώδη ώστε να μπορούν να τα διαπερνούν τα ιόντα, τα αέρια μόρια και τα ηλεκτρόνια ενώ ταυτόχρονα πρέπει να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν αντιδράσεις οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν στην δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος μέσω του κυκλώματος.

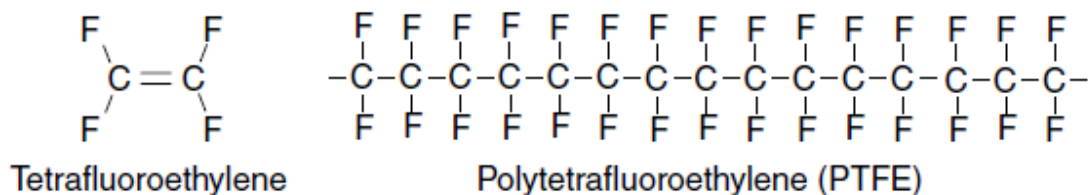
Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο που αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο της και την κάθοδο που αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο της κυψέλης καυσίμου. Αναλυτικότερα, στην άνοδο το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με το υδρογόνο και έτσι γίνεται η διάσπαση του σε κατιόντα και ηλεκτρόνια τα οποία οδηγούνται στο εξωτερικό κύκλωμα έτσι ώστε να δημιουργηθεί ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από το εξωτερικό κύκλωμα φτάνουν στην κάθοδο. Στην κάθοδο αυτά αντιδρούν με το οξυγόνο και τα κατιόντα υδρογόνου που περνούν μέσω της μεμβράνης από την άνοδο στην κάθοδο για την παραγωγή νερού. Σημαντικό ρόλο παίζει η ταχύτητα που γίνονται οι αντιδράσεις γιατί επηρεάζει την απόδοση της κυψέλης καυσίμου. Η αύξηση της ταχύτητας επιτυγχάνεται με την αύξηση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων ή προσθέτοντας κάποιον καταλύτη στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ή με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Ο καταλύτης που χρησιμοποιείται είναι ένα σκληρό και πορώδες υλικό που τοποθετείται στην πλευρά των ηλεκτροδίων που βρίσκεται ο ηλεκτρολύτης και βοηθά ώστε η επιφάνεια του να μπορεί να εκτεθεί στο υδρογόνο και το οξυγόνο, τα οποία απλώνονται ομοιόμορφα εξαιτίας των καναλιών που έχουν χαραγμένα επί των ηλεκτροδίων.

ΣΤΡΩΜΑ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ

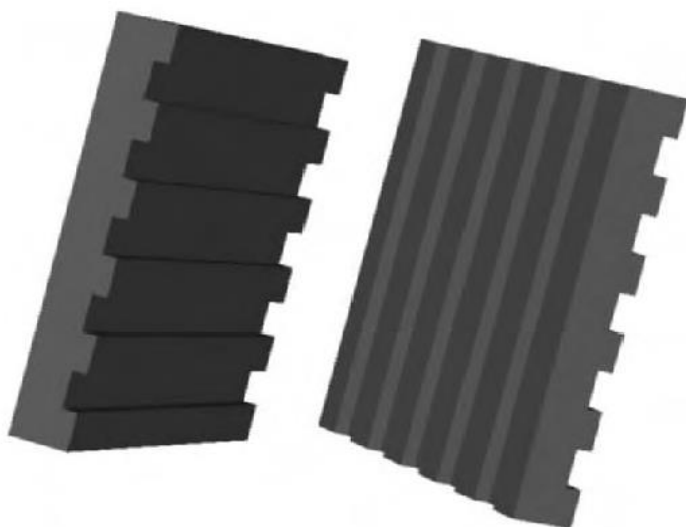
Το στρώμα διάχυσης αερίων είναι ένα στρώμα από λεπτό πορώδες υλικό άνθρακα. Είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο για αποτελεσματική διάχυση του κάθε αερίου (καυσίμου ή αέρα) στον καταλύτη, δηλαδή την σωστή κατανομή των αερίων πάνω στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Το υλικό κατασκευής διαλέγεται έτσι ώστε το ρεύμα να είναι το μέγιστο που μπορεί να παραχθεί το οποίο εισέρχεται από την άνοδο και εξέρχεται από την κάθοδο. Λειτουργία του στρώματος διάχυσης αερίων είναι και να διοχετεύει το νερό του προϊόντος μακριά από τα ηλεκτρόδια, ενσωματώνει ένα υδρόφοβο υλικό, όπως πολυτετραφθοροαιθυλένιο ή αλλιώς μικροπορώδες στρώμα.



Εικόνα 1. 3 : Δομή του πολυτετραφθοροαιθυλενίου (PTFE)

Η λειτουργία του πολυτετραφθοροαιθυλενίου είναι να εμποδίζει το νερό να «συσσωρεύεται» εντός του όγκου πόρων του στρώματος υποστήριξης ώστε το υδρογόνο και το οξυγόνο να μπορούν να διαχέονται στα ηλεκτρόδια, μπορεί ουσιαστικά να βοηθήσει στη ρύθμιση της ισορροπίας του νερού που χρειάζεται και για να κρατηθεί η αγωγιμότητα της μεμβράνης. Το στρώμα παρέχει μηχανική υποστήριξη και αποτελεί μέρος του ηλεκτροδίου, συνεπώς μπορεί να υπάρχει στην άνοδο και στην κάθοδο.

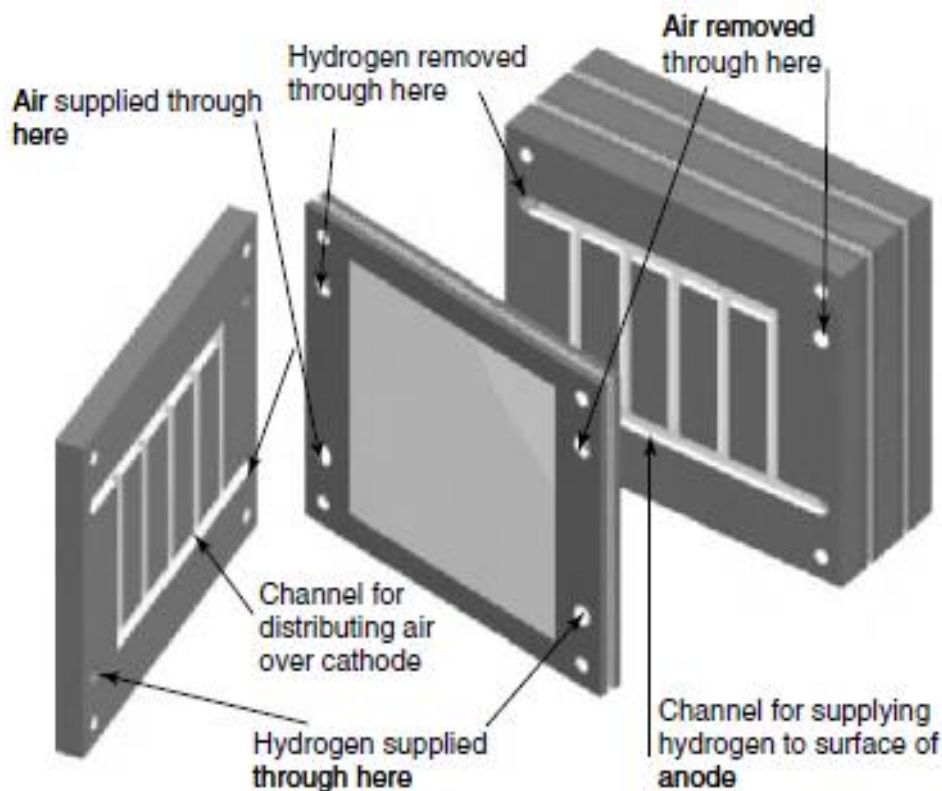
ΔΙΠΟΛΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ



Εικόνα 1. 4: Απεικόνιση διπολικών πλακών απλού σχεδίου

Οι διπολικές πλάκες είναι τοποθετημένες στην εξωτερική πλευρά κάθε στρώματος διάχυσης αερίων και αποτελούν το τελευταίο κατασκευαστικό μέρος της διάταξης. Σε μια κυψέλη καυσίμου οι διπολικές πλάκες πρέπει να κατασκευάζονται από υλικό με καλή αγωγιμότητα. Ένα τέτοιο υλικό αποτελεί ο γραφίτης ή το ανοξείδωτο ατσάλι. Οι διπολικές πλάκες χρησιμεύουν για την παροχή πεδίου ροής αερίων αλλά και σαν συλλέκτης ρεύματος.

Στο εσωτερικό των πλακών τα κανάλια είναι κομμένα μέσα τους έτσι ώστε τα αέρια να μπορούν να ρέουν πάνω από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Επίσης κατασκευάζονται έτσι ώστε να μπορούν να έχουν καλή ηλεκτρική επαφή με την επιφάνεια κάθε ηλεκτροδίου. Έχουν κάθετα κανάλια για την τροφοδοσία υδρογόνου στην άνοδο και οριζόντια κανάλια για την τροφοδοσία οξυγόνου (ή αέρα) στην κάθοδο. Το αποτέλεσμα είναι το ηλεκτρικό ρεύμα περνά περισσότερο ή λιγότερο ευθεία μέσα από τις κυψέλες και όχι πάνω από την επιφάνεια κάθε ηλεκτροδίου το ένα μετά το άλλο.



Εικόνα 1. 5: Εσωτερική αναδίπλωση όπου μια πιο σύνθετη διπολική πλάκα επιτρέπει την τροφοδοσία των αντιδρώντων αερίων στα ηλεκτρόδια μέσω εσωτερικών σωλήνων

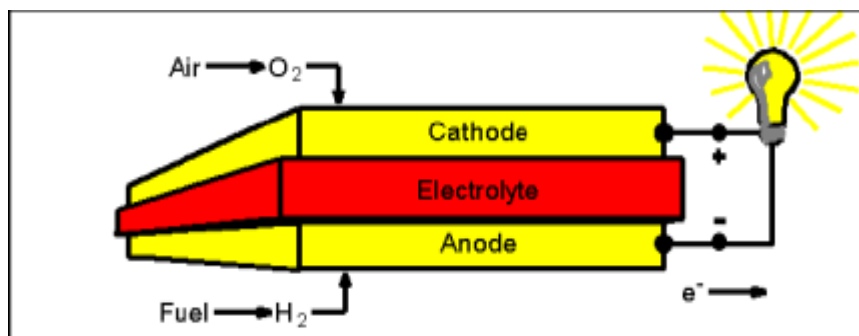
Η τάση μιας κυψέλης καυσίμου είναι αρκετά μικρή, περίπου 0,7 V κατά την άντληση χρήσιμου ρεύματος. Για να παραχθεί μεγαλύτερη τάση θα πρέπει να συνδεθούν περισσότερες κυψέλες σε σειρά. Μια τέτοια συλλογή κυψελών καυσίμου σε σειρά είναι γνωστή ως «στοίβα». Ο πιο προφανής τρόπος για να γίνει αυτό είναι απλά συνδέοντας την άκρη του καθενός άνοδος στην κάθοδο της επόμενης κυψέλης, σε όλη τη γραμμή. Στην μέθοδο όμως υπάρχει ένα αρνητικό που έχει να κάνει με την ροή των ηλεκτρονίων τα οποία πρέπει να ρέουν κατά μήκος της επιφάνειας του ηλεκτροδίου στο σημείο συλλογής ρεύματος στην άκρη. Τα ηλεκτρόδια μπορεί να είναι αρκετά καλοί αγωγοί, αλλά εάν κάθε στοιχείο λειτουργεί μόνο στα 0,7 V περίπου, ακόμη και μια μικρή πτώση τάσης είναι σημαντική.

Μια πολύ καλύτερη μέθοδος διασύνδεσης κυψελών είναι η χρήση μιας «διπολικής πλάκας». Αυτό κάνει συνδέσεις σε όλη την επιφάνεια μιας καθόδου και της ανόδου της επόμενης κυψέλης. Ταυτόχρονα, η διπολική πλάκα χρησιμεύει ως μέσο τροφοδοσίας οξυγόνου στην κάθοδο και καυσίμου αερίου στην άνοδο. Αν και πρέπει

να γίνει μια καλή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, οι δύο παροχές αερίου πρέπει να διαχωρίζονται.

Με την χρήση των διπολικών πλακών στην σύνδεση των κυψελών καυσίμου επιτυγχάνεται το γεγονός ότι το ηλεκτρικό ρεύμα περνά από τη μια κυψέλη στην άλλη και όχι από την επιφάνεια του ενός ηλεκτροδίου στο άλλο. Ιδανικότερα η διπολική πλάκα πρέπει να κατασκευάζεται όσο γίνεται πιο λεπτή και να μπορεί να γίνεται ελάχιστη η ηλεκτρική αντίσταση και να επιτυγχάνεται μικρή στοίβαξη των κυψελών καυσίμου.

Ωστόσο, αυτό καθιστά στενά τα κανάλια για τη ροή αερίου με αποτέλεσμα να γίνεται πιο δύσκολη η εισαγωγή τους μέσα στην κυψέλη. Επιπλέον, στις διπολικές πλάκες πρέπει να υπάρχουν περαιτέρω κανάλια για τη μεταφορά ενός ψυκτικού υγρού, το οποίο χρησιμεύει στην απομάκρυνση θερμότητας από την περιοχή επαφής των διπολικών πλακών όταν αυτές συνδέονται για τον σχηματισμό μιας σειράς κυψελών καυσίμου.



Σχήμα 1. 2 : Συνεχής ηλεκτρική τάση από το καύσιμο

Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου είναι σχεδόν παρόμοια με αυτή ενός ηλεκτροχημικού συσσωρευτή. Η κυψέλη καυσίμου, όπως αναφέραμε, αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο και παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Σε αντίθεση με έναν ηλεκτροχημικό συσσωρευτή, μια κυψέλη καυσίμου απαιτεί συνεχή τροφοδοσία καυσίμου και οξυγόνου. Επιπρόσθετα, τα ηλεκτρόδια της κυψέλης δεν υποβάλλονται σε αλλαγές ως προς τη χημική τους σύσταση, ενώ οι μπαταρίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Η πραγματοποίηση αυτών των αντιδράσεων βασίζεται σε αντιδρώντα στοιχεία, τα οποία ήδη υπάρχουν μέσα στους συσσωρευτές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μπαταρίες να εκφορτίζονται, όταν τα αντιδρώντα εξαντλούνται. Μία κυψέλη καυσίμου δε μπορεί να «εκφορτιστεί» εφόσον το καύσιμο και το οξυγόνο τροφοδοτούνται διαρκώς. Το υδρογόνο ως καύσιμο μπορεί να παρουσιάζεται είτε ως μίγμα με άλλα αέρια (όπως CO₂, N₂, CO), είτε υπό μορφή υδρογονανθράκων όπως το φυσικό αέριο, CH₄, είτε σε μορφή υγρών υδρογονανθράκων όπως μεθανόλη, CH₃OH. Ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει αρκετό οξυγόνο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις κυψέλες καυσίμου. Τέλος, τα προϊόντα που παράγονται από την ηλεκτροχημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα μέσα στην κυψέλη καυσίμου είναι νερό και αρκετή ποσότητα θερμότητας.

Ως προς την λειτουργία τους οι κυψέλες καυσίμου είναι υπεύθυνες για την μετατροπή της χημικής ενέργειας ενός καυσίμου, σε ηλεκτρική ενέργεια και ένα μικρό μέρος της σε θερμότητα. Σε μία κυψέλη η άνοδος (το αρνητικό ηλεκτρόδιο) τροφοδοτείται συνέχεια με καύσιμο (υδρογόνο), ενώ με ένα οξειδωτικό μέσο που συνήθως αυτό είναι οξυγόνο από αέρα τροφοδοτείται η κάθοδος (θετικό ηλεκτρόδιο). Σε κάθε ένα από τα δύο ηλεκτρόδια γίνονται διεργασίες. Έχουν και τα δύο ένα στρώμα καταλύτη και επίσης ενώνονται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος. Στο ηλεκτρόδιο της ανόδου το υδρογόνο το οποίο ιονίζεται όταν έρχεται σε επαφή με τον καταλύτη διασπάται και τότε προκύπτουν τα φορτισμένα ιόντα, δηλαδή τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από την διάσπαση οδηγούνται από το εξωτερικό κύκλωμα στην κάθοδο, τα οποία με αυτήν την κίνηση προκαλούν την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στην κυψέλη καυσίμου. Τα ιόντα του υδρογόνου μέσω του ηλεκτρολύτη περνούν στην πλευρά της καθόδου όπου υπάρχει ήδη το οξυγόνο, που δίνεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα, και διασπάται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να γίνεται μία αντίδραση του διασπασμένου οξυγόνου με τα ηλεκτρόνια που έχουν έρθει μέσω του εξωτερικού κυκλώματος και τα πρωτόνια. Το αποτέλεσμα αυτής της αντίδρασης είναι ο σχηματισμός νερού και η παραγωγή θερμότητας.

2.2 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλες πηγές ενέργειας όπως είναι:

- Η κυψέλη καυσίμου συνήθως λειτουργεί με καθαρό αέριο υδρογόνου, το οποίο είναι άφθονο στο περιβάλλον και παρά τις προκλήσεις όσον αφορά τον διαχωρισμό του από το νερό, είναι πλούσια πηγή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και μπορεί να παραχθεί από την ηλιακή ενέργεια όπως και άλλες μορφές ενέργειας.
- Η τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου διαθέτει υψηλής πυκνότητας ενέργεια και μεγάλο βαθμό απόδοσης περίπου 80% σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης που ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στο (12-15)%. Αυτό οφείλεται στην απευθείας μετατροπή χημικής ενέργειας του καυσίμου σε ηλεκτρική.
- Η κυψέλη καυσίμου είναι αθόρυβη σε κανονική λειτουργία και αυτό επειδή δεν αποτελείται από μηχανικά κινούμενα μέρη.
- Συμβάλλουν ελάχιστα έως και καθόλου στην μόλυνση του περιβάλλοντος και την ποιότητα του αέρα λόγω της λειτουργίας του με υδρογόνο που έχει ως παραπροϊόντα μόνο το καθαρό νερό και την θερμότητα.
- Η χρήση κυψελών καυσίμου μπορεί να οδηγήσει στην απεξάρτηση εισαγωγής πηγών καυσίμων όπως το πετρέλαιο, εφόσον το υδρογόνο μπορεί να αξιοποιηθεί και να παραχθεί, θεωρητικά, από όλες τις χώρες, συμβάλλοντας σημαντικά στην ενεργειακή ασφάλεια.
- Ιδανική η εφαρμογή της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου υδρογόνου σε απομονωμένες περιοχές ως εναλλακτική λύση για την θέρμανση η οποία είναι με βάση το diesel. Αυτό θα μειώσει την ανάγκη μεταφοράς καυσίμων και θα βελτιώσει την ποιότητα ζωής όσων ζουν σε απομακρυσμένες περιοχές, προσφέροντας μια καθαρή και μη ρυπογόνο ενέργεια που λαμβάνεται από έναν άμεσα διαθέσιμο φυσικό πόρο.

Αντιθέτως κάποια από τα αρνητικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου είναι:

- Το υψηλό κόστος επένδυσης, όπως για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου, ο εξοπλισμός-εγκατάσταση μηχανημάτων και τα χρησιμοποιούμενα υλικά όπως η πλατίνα.
- Η δυσκολία στην μεταφορά, το υδρογόνο ως καύσιμο είναι αρκετά εύφλεκτο υλικό και δεν εξασφαλίζει την ασφαλή τροφοδοσία των καταναλωτών με το υπάρχων δίκτυο.
- Ο εξοπλισμός που χρειάζεται για τη λειτουργία της, είναι βαρύτερος και πιο ογκώδης σε σχέση με αυτόν των μηχανών εσωτερικής καύσης για να παράγουν την ίδια ποσότητα ενέργειας .
- Η παραγωγή του υδρογόνου , παρά την αφθονία του χρειάζεται αρκετή ποσότητα ενέργειας για να γίνει ο διαχωρισμός του από το νερό μέσω ηλεκτρόλυσης ή η εξαγωγή του από διάφορους υδρογονάνθρακες.

3. ΤΥΠΟΙ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

3.1 Τύποι κυψελών καυσίμου

Για την ανάπτυξη διαφόρων ειδών κυψελών καυσίμου σημαντικό ρόλο έχει η κάλυψη των δομικών και λειτουργικών αναγκών που παρουσιάζονται στην πράξη.

Οι ανάγκες αυτές που καλούνται προς επίλυση είναι η μικρή διαθεσιμότητα του καυσίμου υδρογόνου, η χαμηλή τιμή στην ένταση του ρεύματος και η ισχύς που παράγεται από την κυψέλη.

Παρόλο που η λειτουργία ορισμένων κυψελών στηρίζεται σε διαφορετικές χημικές αντιδράσεις, η βασική ηλεκτροχημική αντίδραση του σχηματισμού του νερού αποτελεί κοινό σημείο αναφοράς για όλους τους τύπους.

Κύριοι παράγοντες διάκρισης των τύπων αυτών είναι η θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης και το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Ο κάθε τύπος αναπτύσσεται κατάλληλα ώστε να καλύπτει εύρος εφαρμογών που αποσκοπούν στην συνεχή εξέλιξη των τεχνολογικών μέσων και διαρκώς διευρύνεται.

Στην συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας που δείχνει τα βασικά χαρακτηριστικά των κύριων τύπων κυψελών καυσίμου.

Τύποι Κυψελών Καυσίμου					
Ηλεκτρολύτης	Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)	Αλκάλια (AFC)	Φωσφορικό Οξύ (PAFC)	Τηγμένα ανθρακικά άλατα (MCFC)	Σταθεροποιημένα οξείδια (SOFC)
Θερμοκρασία Λειτουργίας	80 °C	60-150 °C	Περίπου 200 °C	650 °C	800-1000 °C
Ηλεκτρικός φορέας	Ιόν υδρογόνου	Ιόν υδρογόνου	Ιόν υδρογόνου	Ανθρακικό ιόν	Ιόν οξυγόνου
Καταλύτης	Πλατίνα	Πλατίνα	Πλατίνα	Νικέλιο	Τιτανικό Ασβέστιο
Απόδοση (%)	40-50	70	40-60	>60	>60
Κυριότερες εφαρμογές	Μεταφορές, ηλεκτροπαραγωγή, φορητές ηλεκτρονικές συσκευές	Διάστημα	Ηλεκτροπαραγωγή και συμπαραγωγή σε κτηριακές εγκαταστάσεις	Κεντρικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, συμπαραγωγής	Κεντρικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, συμπαραγωγής

Σχήμα 1. 3 : Τύποι και χαρακτηριστικά κυψελών καυσίμου

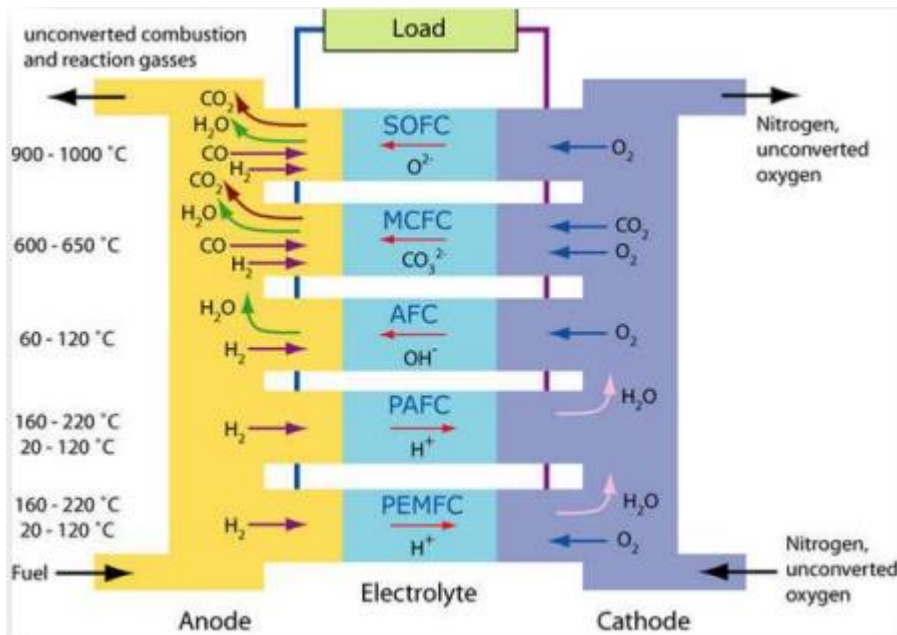
Η επιλογή του ηλεκτρολύτη υπαγορεύει το εύρος της θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Η θερμοκρασία λειτουργίας και η διάρκεια ζωής καθορίζουν ουσιαστικά τις φυσικοχημικές και θερμομηχανικές ιδιότητες των υλικών, που χρησιμοποιούνται στα δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου (δηλ. ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτης, αλληλοσύνδεση, κλπ).

Οι υδατικοί ηλεκτρολύτες περιορίζονται σε θερμοκρασίες περίπου 200°C ή χαμηλότερα, λόγω της υψηλής πίεσης ατμών τους και της ταχείας αποικοδόμησης σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Η θερμοκρασία λειτουργίας παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του βαθμού επεξεργασίας που απαιτείται στα καύσιμα.

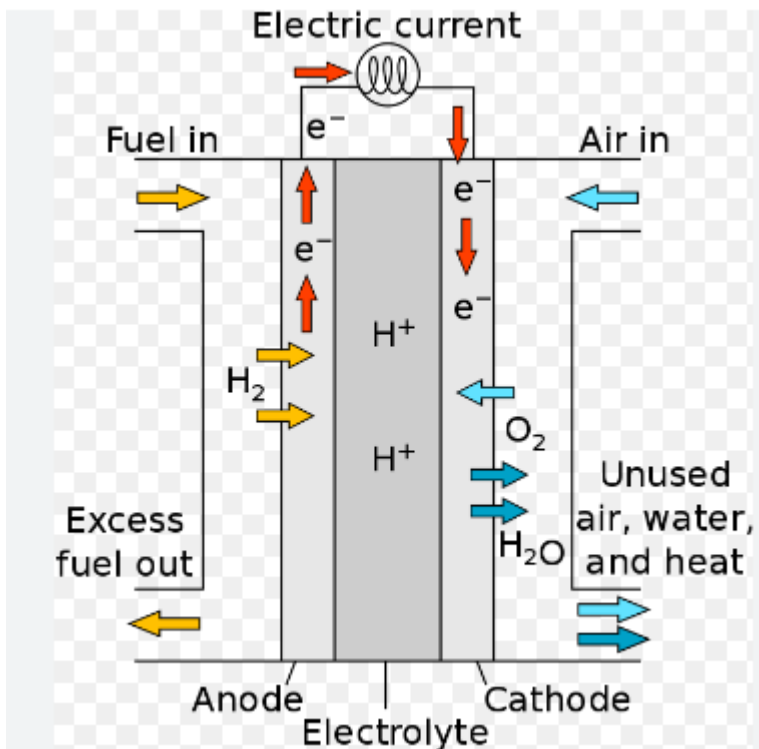
Σε χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου, όλο το καύσιμο θα πρέπει να μετατραπεί σε υδρογόνο πριν από την είσοδο στην κυψέλη καυσίμου. Επιπροσθέτως, σε χαμηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου, ο καταλύτης (κυρίως πλατίνα) στην άνοδο επηρεάζεται αρνητικά από το CO.

Σε υψηλής θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου το CO και το CH₄, μπορούν να μετατραπούν εσωτερικά σε υδρογόνο ή ακόμη να οξειδωθούν άμεσα ηλεκτροχημικά.



Σχήμα 1. 4: Απεικόνιση λειτουργίας βασικών κυψελών καυσίμου

3.1.1 Κυψέλη καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC)



Σχήμα 1. 5: Κυψέλη PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Σε γενικές γραμμές, οι PEMFC έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, μικρό χρόνο έναρξης λειτουργίας και υψηλή ηλεκτρική απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 40-50%. Ο μικρός χρόνος εκκίνησης που οφείλεται στη χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους (συνήθως από 60 έως 80 °C), τις καθιστά ιδιαίτερα πρακτικές σε εφαρμογές μεταφορών, σε στατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας αλλά και στη χρήση τους ως εφεδρικές γεννήτριες.

Οι κυψέλες PEM διαθέτουν μεμβράνη από πολυμερές στερεό ως ηλεκτρολύτη, το οποίο άγει επιτυχώς τα κατιόντα του υδρογόνου, εμποδίζει τα ηλεκτρόνια να τη διασχίσουν και διαχωρίζει αποτελεσματικά το καύσιμο από την οξειδωτική ουσία. Ασφαλέστερο καύσιμο για αυτό τον τύπο κυψελών είναι το υδρογόνο. Το εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας είναι αρκετά χαμηλό εξαιτίας των περιορισμών που εισάγει η χρήση του πολυμερούς ηλεκτρολύτη. Τα μόρια υδρογόνου διασπώνται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια στην άνοδο της κυψέλης, με τη βοήθεια καταλύτη από λευκόχρυσο (Pt) ώστε έπειτα να οδεύσουν προς την κάθοδο. Η χρήση καταλύτη από λευκόχρυσο είναι απαραίτητη ώστε να επιταχυνθεί η αντίδραση σχηματισμού του νερού, η οποία είναι αρκετά αργή λόγω των χαμηλών θερμοκρασιών λειτουργίας της κυψέλης, οι οποίες καθιστούν δύσκολη την απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας.

Κάτι τέτοιο δε διευκολύνει τη χρήση της θερμότητας προς συμπαραγωγή ή την παραγωγή ατμού σε κάποιο υβριδικό σύστημα. Σημαντικό ζήτημα για υψηλή απόδοση αποτελεί η διαχείριση του νερού. Το παραγόμενο νερό χρησιμοποιείται για την απαραίτητη ενυδάτωση της πολυμερούς μεμβράνης ενώ ταυτόχρονα πρέπει να ελέγχεται η ποσότητα που παραμένει στην κυψέλη ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική κατακράτηση. Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολύτης είναι υψηλού κόστους και μηχανικά σταθερός, γεγονός που αποτρέπει την εμφάνιση προβλημάτων σε σχέση με τα χρησιμοποιούμενα υλικά ακόμα και υπό συνθήκες διάβρωσης.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM χρησιμοποιούν στερεό ηλεκτρολύτη που παρέχει εξαιρετική αντίσταση στην crossover-flow του αερίου.

Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου τύπου PEM επιτρέπει την ταχεία εκκίνηση. Επιπλέον, λόγω της μη διάβρωσης των δομικών στοιχείων της κυψέλης, δεν απαιτείται η χρήση υλικών ανθεκτικών στην διάβρωση (αυξημένο κόστος) που απαιτείται σε άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, τόσο στην κατασκευή της συστοιχίας όσο και στα βοηθητικά υποσυστήματα. Αποτελέσματα δοκιμών αποδεικνύουν ότι οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM μπορούν να παράγουν υψηλής πυκνότητας ρεύμα άνω των 2W/cm² και προσφέρονται ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου καθαρό υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.

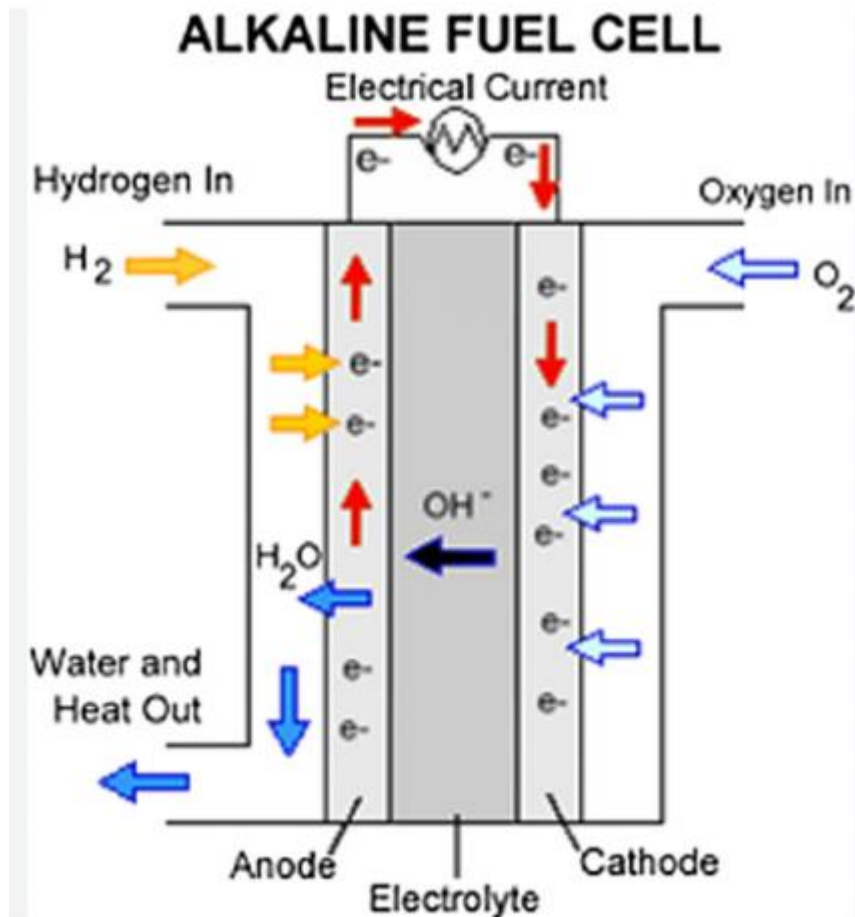
ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Το μικρό εύρος και η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας κάνει την διαχείριση της θερμότητας δύσκολη, ειδικά σε πολύ υψηλές πυκνότητες ρεύματος, και καθιστά δύσκολη την χρήση της απορριπτόμενης θερμότητας. Η διαχείριση του νερού είναι μια άλλη σημαντική πρόκληση στον σχεδιασμό κυψελών καυσίμου τύπου PEM, καθώς πρέπει εξασφαλιστεί η επαρκής ενυδάτωση του ηλεκτρολύτη χωρίς όμως να «πλημμυρίσει».

Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM είναι αρκετά ευαίσθητες σε δηλητηρίαση ακόμα και σε επίπεδα ιχνών προσμείξεων που περιλαμβάνουν CO, ενώσεις θείου και αμμωνία. Σε κάποιο βαθμό, ορισμένα από αυτά τα μειονεκτήματα μπορούν να εξουδετερωθούν, μειώνοντας την πυκνότητα του ρεύματος λειτουργίας και αυξάνοντας την φόρτιση του καταλύτη του ηλεκτροδίου, αλλά παράλληλα αυξάνεται και το κόστος του συστήματος. Εάν χρησιμοποιούνται ως καύσιμα υδρογονάνθρακες, η εκτεταμένη επεξεργασία των καυσίμων που απαιτείται επιδρά αρνητικά στο μέγεθος του συστήματος, στην πολυπλοκότητα, στην αποτελεσματικότητα και στο κόστος. Τέλος, για κυψέλες καυσίμου τύπου PEM υδρογόνου, η ανάγκη υποδομών υδρογόνου αποτελεί εμπόδιο για την εμπορευματοποίησή τους.

3.1.2 Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC)

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC) ήταν μία από τις πρώτες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που αναπτύχθηκαν και ήταν ο πρώτος τύπος που χρησιμοποιήθηκε ευρέως στο διαστημικό πρόγραμμα των ΗΠΑ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και νερού στο διαστημόπλοιο. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν διάλυμα υδροξειδίου του καλίου σε νερό ως ηλεκτρολύτη και μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια ποικιλία μη πολύτιμων μετάλλων ως καταλύτη στην άνοδο και την κάθοδο. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί νέες αλκαλικές κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν πολυμερή μεμβράνη ως ηλεκτρολύτη. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου είναι στενά συνδεδεμένες με τις συμβατικές κυψέλες καυσίμου PEM, με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούν αλκαλική μεμβράνη αντί για όξινη μεμβράνη. Οι υψηλές επιδόσεις των AFC οφείλονται στον ρυθμό με τον οποίο λαμβάνουν χώρα οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις στην κυψέλη. Έχουν επίσης επιδείξει αποδόσεις άνω του 60% σε διαστημικές εφαρμογές.



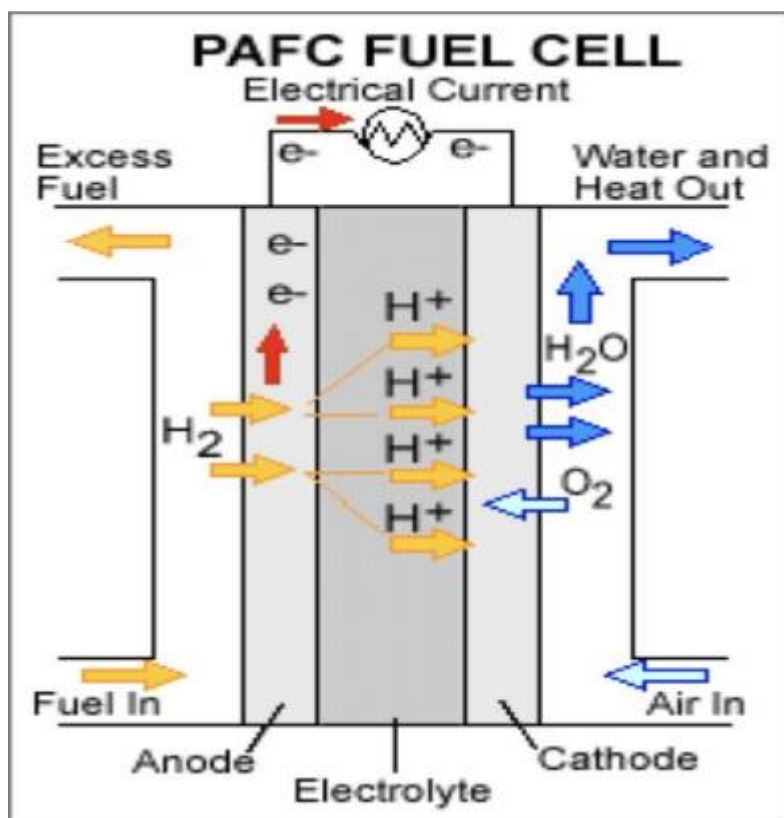
Σχήμα 1. 6: Αλκαλική κυψέλη καυσίμου

Μια βασική πρόκληση για αυτόν τον τύπο κυψέλης καυσίμου είναι ότι είναι ευαίσθητη στη δηλητηρίαση από το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Στην πραγματικότητα, ακόμη και η μικρή ποσότητα CO_2 στον αέρα μπορεί να επηρεάσει δραματικά την απόδοση και την αντοχή της κυψέλης λόγω του σχηματισμού ανθρακικών αλάτων. Οι αλκαλικές κυψέλες με υγρούς ηλεκτρολύτες μπορούν να λειτουργούν σε λειτουργία ανακυκλοφορίας, η οποία επιτρέπει την αναγέννηση του ηλεκτρολύτη για να μειωθούν οι επιπτώσεις του σχηματισμού ανθρακικών αλάτων στον ηλεκτρολύτη, αλλά η λειτουργία ανακυκλοφορίας εισάγει προβλήματα με τα ρεύματα παράκαμψης. Τα συστήματα υγρού ηλεκτρολύτη υποφέρουν επίσης από πρόσθετες ανησυχίες, όπως η αυξημένη διάβρωση και οι δυσκολίες χειρισμού διαφορετικών πιέσεων. Οι κυψέλες καυσίμου αλκαλικής μεμβράνης (AMFC) αντιμετωπίζουν αυτές τις ανησυχίες και έχουν μικρότερη ευαισθησία στη δηλητηρίαση από CO_2 από ό,τι οι AFC με υγρό ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, το CO_2 εξακολουθεί να επηρεάζει τις επιδόσεις και οι επιδόσεις και η διάρκεια ζωής των AMFCs εξακολουθούν να υστερούν σε σχέση με τις PEMFCs. Οι AMFCs εξετάζονται για εφαρμογές στην κλίμακα W έως kW. Οι προκλήσεις για τις AMFC περιλαμβάνουν την ανοχή στο διοξείδιο του άνθρακα, την αγωγιμότητα και την ανθεκτικότητα της μεμβράνης, τη λειτουργία σε υψηλότερες θερμοκρασίες, τη διαχείριση του νερού, την πυκνότητα ισχύος και την ηλεκτροκατάλυση της ανόδου.

3.1.3 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) άρχισαν να αναπτύσσονται τη δεκαετία του 1960 και στη συνέχεια έχουν βελτιωθεί από ειδικούς όσον αφορά τις επιδόσεις και το κόστος. Οι εξελίξεις αυτές προκάλεσαν την εφαρμογή αυτού του τύπου κυψελών καυσίμου για πρώιμες σταθερές εφαρμογές.

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος χρησιμοποιούν φωσφορικό οξύ (H_3PO_4) ως ηλεκτρολύτη. Δεδομένου ότι η ιοντική αγωγιμότητα του φωσφορικού οξέος δεν είναι επαρκής σε χαμηλές θερμοκρασίες, οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος λειτουργούν σε θερμοκρασία σχεδόν $200^{\circ}C$.



Σχήμα 1. 7: Απεικόνιση κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι χημικές αντιδράσεις στην κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι παρόμοιες με τις χημικές αντιδράσεις στην κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Ο φορέας φορτίου είναι το υδρογόνο (H⁺). Στην πλευρά της ανόδου το υδρογόνο διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Το κινητό ιόν υδρογόνου διέρχεται από τον ηλεκτρολύτη και έρχεται στην πλευρά της καθόδου της κυψέλης καυσίμου. Τα ηλεκτρόνια έρχονται στην κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού δρόμου που το φορτίο είναι τοποθετημένο. Στην πλευρά της καθόδου τα ιόντα υδρογόνου ενώνονται με το οξυγόνο και σχηματίζουν νερό και θερμότητα. Οι χημικές αντιδράσεις στην πλευρά της ανόδου και της καθόδου σε ένα φωσφορικό οξύ φαίνονται παρακάτω:

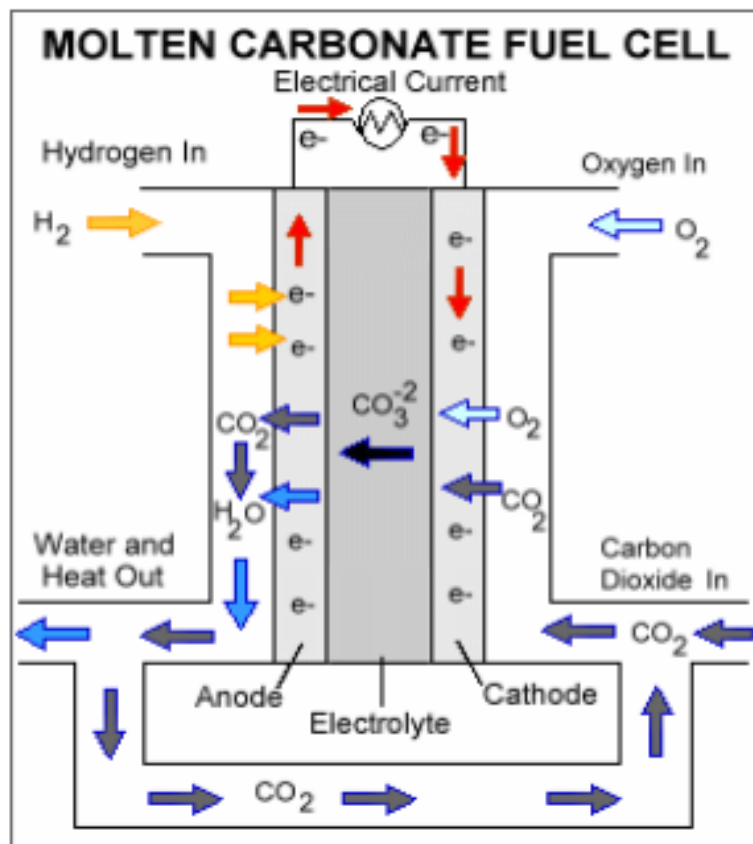
- Αντίδραση ανόδου $2 \text{H}_2 \Rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$
- Αντίδραση καθόδου $\text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
- Συνολική αντίδραση κυψέλης $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Η απόδοση της κυψέλης καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι περίπου 40%. Κατά τη λειτουργία της η θερμοκρασία των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές θέρμανσης, προκειμένου να αυξηθεί η συνολική απόδοση.

Ένα άλλο πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι ότι ο ηλεκτρολύτης δεν επηρεάζεται πολύ λόγω της δηλητηρίασης του διοξειδίου του άνθρακα, οπότε οι κυψέλες καυσίμου αυτές μπορούν να λειτουργούν εύκολα με αναμorfωμένα ορυκτά καύσιμα.

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος έχουν ηλεκτρική ισχύ άνω των 50 kW και εφαρμόζονται σε μικρές εφαρμογές σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.

3.1.4 Κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)



Σχήμα 1. 8: Λειτουργία κυψέλης καυσίμου τήγματος καρβιδίων (MCFC)

Οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικού άλατος (MCFC) αναπτύσσονται επί του παρόντος για σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το φυσικό αέριο και τον άνθρακα για ηλεκτρικές, βιομηχανικές και στρατιωτικές εφαρμογές. Οι MCFC είναι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας που χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρολύτη αποτελούμενο από ένα μίγμα λιωμένου ανθρακικού άλατος που αιωρείται σε μια πορώδη, χημικά αδρανή κεραμική μήτρα οξειδίου του λιθίου και αλουμινίου. Επειδή λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες 650°C (περίπου 1.200°F), μπορούν να χρησιμοποιηθούν μη πολύτιμα μέταλλα ως καταλύτες στην άνοδο και την κάθοδο, μειώνοντας το κόστος.

Η βελτιωμένη απόδοση είναι ένας άλλος λόγος για τον οποίο οι κυψέλες καυσίμου MCFC προσφέρουν σημαντική μείωση του κόστους σε σχέση με τις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος. Οι κυψέλες καυσίμου λιωμένου ανθρακικού άλατος, όταν συνδυάζονται με τουρμπίνα, μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις που προσεγγίζουν το 65%, σημαντικά υψηλότερες από τις αποδόσεις 37%-42% μιας εγκατάστασης κυψελών καυσίμου φωσφορικού οξέος. Όταν η απορριπτόμενη θερμότητα συλλαμβάνεται και χρησιμοποιείται, η συνολική απόδοση καυσίμου μπορεί να ξεπεράσει το 85%.

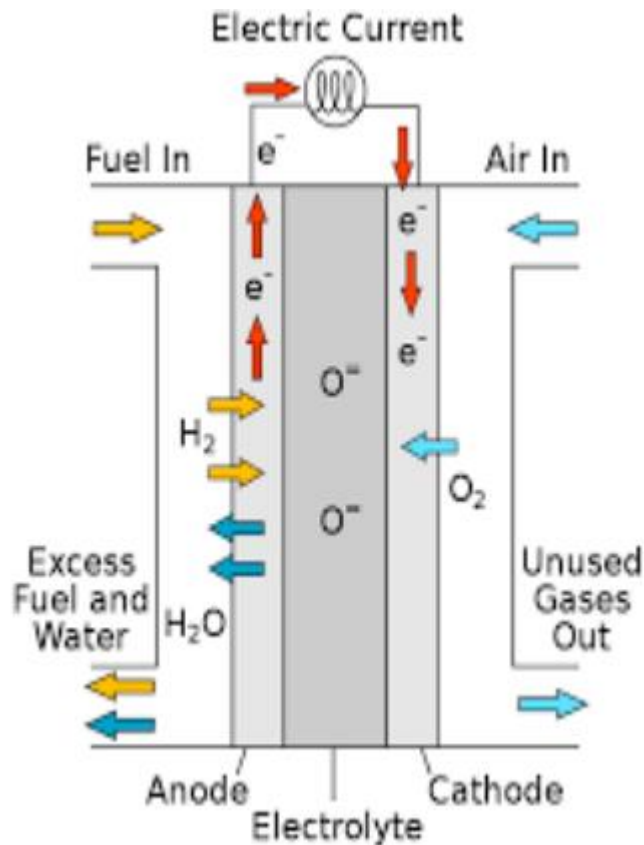
Σε αντίθεση με τις αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, τις κυψέλες φωσφορικού οξέος και τις κυψέλες καυσίμου PEM, οι κυψέλες MCFC δεν απαιτούν εξωτερικό αναμορφωτή για τη μετατροπή καυσίμων όπως το φυσικό αέριο και το βιοαέριο σε υδρογόνο. Στις υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν οι MCFC, το μεθάνιο και άλλοι ελαφροί υδρογονάνθρακες σε αυτά τα καύσιμα μετατρέπονται σε υδρογόνο μέσα στην ίδια την κυψέλη καυσίμου με μια διαδικασία που ονομάζεται εσωτερική αναμόρφωση, η οποία επίσης μειώνει το κόστος.

Το κύριο μειονέκτημα της τρέχουσας τεχνολογίας MCFC είναι η ανθεκτικότητα. Οι υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες λειτουργούν αυτές οι κυψέλες και ο διαβρωτικός ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται επιταχύνουν τη διάσπαση και τη διάβρωση των εξαρτημάτων, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής των κυψελών. Οι επιστήμονες διερευνούν επί του παρόντος υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση για τα εξαρτήματα καθώς και σχέδια κυψελών καυσίμου που διπλασιάζουν τη διάρκεια ζωής των κυψελών από τις τρέχουσες 40.000 ώρες χωρίς μείωση της απόδοσης.

3.1.5 Κυψέλη στερεού οξειδίου (SOFC)

Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) έχει την υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας μεταξύ άλλων κυψελών καυσίμου. Λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα από 600°C-1000°C. Για να λειτουργήσουν σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιείται στερεό κεραμικό ως ηλεκτρολύτης. Αυτό το στερεό κεραμικό υλικό επιτρέπει τη ροή ιόντων οξυγόνου (O_2^-) στο εσωτερικό του.

Το ιόν οξυγόνου (O_2^-) είναι ο φορέας φορτίου στις κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου. Μόρια οξυγόνου έρχονται στην πλευρά της καθόδου και διασπώνται σε ιόντα οξυγόνου. Αυτά τα ιόντα οξυγόνου περνούν μέσω του ηλεκτρολύτη στην πλευρά της ανόδου. Στην πλευρά της ανόδου, τα ιόντα οξυγόνου έρχονται αντιμέτωπα με τα μόρια υδρογόνου. Κατά την αντίδραση αυτή παράγονται νερό και ηλεκτρόνια. Τα σχηματιζόμενα ηλεκτρόνια καταλήγουν στην κάθοδο χρησιμοποιώντας μια εξωτερική διαδρομή στην οποία είναι τοποθετημένο το φορτίο.



Σχήμα 1. 9: Λειτουργία κυψέλης σταθερού οξειδίου (SOFC)

Οι χημικές αντιδράσεις στην πλευρά της ανόδου και της καθόδου σε μια κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου:

- Αντίδραση ανόδου $2 \text{H}_2 + 2 \text{O}^{2-} \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^-$
- Αντίδραση καθόδου $\text{O}_2 + 4 \text{e}^- \Rightarrow 2 \text{O}^{2-}$
- Συνολική αντίδραση κυψέλης $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Η περιορισμένη αγωγιμότητα των στερεών ηλεκτρολυτών που απαιτούνται για τη λειτουργία της κυψέλης στους περίπου 1000°C, η χρήση πιο λεπτού ηλεκτρολύτη και η βελτιωμένη κάθοδος έχουν επιτρέψει τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας στους 650°- 850°C.

Η έρευνα εστιάζεται στο να μειωθεί και άλλο η θερμοκρασία λειτουργίας. Κατά την τελευταία δεκαετία, αυτό επέτρεψε την ανάπτυξη συμπαγών και υψηλής απόδοσης SOFC χρησιμοποιώντας σχετικά χαμηλού κόστους υλικά κατασκευής.

Ως συνέπεια της βελτίωσης της απόδοσης, οι SOFC χρησιμοποιούνται τώρα για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων σταθερών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συστημάτων παροχής κινητικής ενέργειας, βοηθητικής ενέργειας σε οχήματα καθώς και σε ειδικές εφαρμογές.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η SOFC είναι η κυψέλη καυσίμου με τη μεγαλύτερη συνεχόμενη περίοδο ανάπτυξης, ξεκινώντας στα τέλη της δεκαετίας του 1950, πολλά χρόνια πριν από την AFC. Επειδή ο ηλεκτρολύτης είναι στερεό, η κυψέλη μπορεί να χυτεύεται σε διάφορα σχήματα, όπως σε σωληνοειδή ή επίπεδη μορφή. Λόγω της στερεής κεραμικής κατασκευής της μοναδιαίας κυψέλης αποφεύγονται τυχόν προβλήματα διαβρώσεων. Η στερεά φύση του ηλεκτρολύτη επιτρέπει επίσης την ακριβή μηχανική του τριφασικού συνόρου και αποτρέπει την κίνηση του ηλεκτρολύτη ή τις «πλημμύρες» στα ηλεκτρόδια. Το CO είναι άμεσα χρησιμοποιήσιμο ως καύσιμο, όπως και στην MCFC και δεν υπάρχει απαίτηση για παροχή CO₂ στην κάθοδο.

Οι επίπεδες μονάδες λεπτών ηλεκτρολυτών SOFC έχουν αποδειχθεί ότι είναι ικανές να παρέχουν πυκνότητες ισχύος κοντά σε αυτές που επιτυγχάνονται με τις PEFC. Όπως και με την MCFC, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, η απορριπτόμενη θερμότητα ανακτάται για συμπαραγωγικές εφαρμογές, ενώ λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των απαερίων της αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοδυναμικούς κύκλους ηλεκτροπαραγωγής με αεριοστρόβιλο και ατμοστρόβιλο.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας της SOFC παρέχει και κάποια μειονεκτήματα. Η αναντιστοιχία στην θερμική διαστολή των υλικών, και το «σφράγισμα» των κυττάρων κάνουν δύσκολη την διαμόρφωση της επίπεδης πλάκας. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας τοποθετεί σοβαρούς περιορισμούς σχετικά με την επιλογή των υλικών και απαιτούνται δύσκολες διαδικασίες κατασκευής. Η διάβρωση των μεταλλικών δομικών στοιχείων της συστοιχίας (όπως οι διασυνδέσεις σε ορισμένα σχέδια) είναι μια πρόκληση. Αυτοί οι παράγοντες περιορίζουν τα επίπεδα πυκνότητας ισχύος (αν και είναι σημαντικά υψηλότερα από ότι σε PAFC και MCFC), τον θερμικό κύκλο και την διάρκεια ζωής της συστοιχίας (αν και αυτή είναι μεγαλύτερη απ' ότι για MCFC και PEFC).

3.2 Εφαρμογές κυψελών καυσίμου

Η ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου έχει σημειώσει αξιοσημείωτη πρόοδο την τελευταία δεκαετία λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, καθώς και για την αντιμετώπιση των ανησυχιών σχετικά με τις περιβαλλοντικές συνέπειες της χρήσης ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την κίνηση των οχημάτων.

Επειδή μια κυψέλη καυσίμου μετατρέπει τη χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική, η θεωρητική της απόδοση δεν περιορίζεται από το πρόβλημα της ανεπάρκειας Carnot για τη μετατροπή της θερμότητας σε έργο, σε αντίθεση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τον κινητήρα εσωτερικής καύσης. Κατά συνέπεια, ένα σύστημα κυψελών καυσίμου μπορεί να παρουσιάσει υψηλότερη απόδοση από την μετατροπή καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια (γενικά 40-60% απόδοση με βάση τη χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου) από όλα σχεδόν τα άλλα συστήματα μετατροπής ενέργειας. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου που λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο παράγουν μόνο νερό, εξαλείφοντας έτσι όλες τις εκπομπές σε τοπικό επίπεδο. Οι εκπομπές από ένα σύστημα κυψελών καυσίμου που λειτουργεί με καύσιμα υδρογονανθράκων θα διέπονται από την επεξεργασία των καυσαερίων, τα οποία μπορούν να καούν περαιτέρω, μειώνοντας τις εκπομπές CO και άκαυστων υδρογονανθράκων σε επίπεδα ιχνών.

Παρακάτω θα δούμε διάφορες εφαρμογές της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμων.

❖ Αυτοκίνητα FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)

Όλοι οι μεγάλοι κατασκευαστές αυτοκινήτων έχουν ένα όχημα κυψελών καυσίμου είτε σε εξέλιξη είτε σε δοκιμή αυτή τη στιγμή, και αρκετοί έχουν αρχίσει να το εκμισθώνουν και να το δοκιμάζουν σε μεγαλύτερες ποσότητες.



Εικόνα 1. 6: Ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη καυσίμου

Τα FCEV είναι οχήματα μηδενικών εκπομπών και δεν παράγουν ρύπους παρά μόνο υδρατμούς. Επιπλέον, σε σύγκριση με τα οχήματα εσωτερικής καύσης, τα FCEV μειώνουν σημαντικά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα των αερίων του θερμοκηπίου, ακόμη και όταν λαμβάνεται υπόψη ο πλήρης κύκλος ζωής του καυσίμου υδρογόνου.

Όταν χρησιμοποιείται υδρογόνο που παράγεται από ηλιακή ή αιολική ηλεκτρόλυση, οι συνολικές εκπομπές CO₂ στον κύκλο ζωής εξαλείφονται εντελώς.

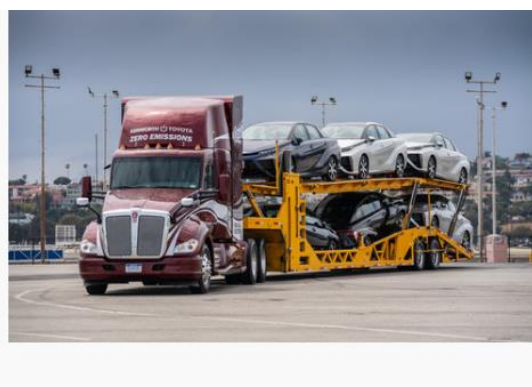
❖ Λεωφορεία με κυψέλες καυσίμου

Τα λεωφορεία κυψελών καυσίμου που δεν παράγουν εκπομπές, αποτελούν ελκυστικές επιλογές για τις αστικές περιοχές, λειτουργώντας αθόρυβα και μειώνοντας το κόστος συντήρησης. Τα λεωφορεία κυψελών καυσίμου παρουσιάζουν επίσης πλεονεκτήματα λειτουργίας σε ακραίες θερμοκρασίες, ιδίως σε σχέση με τις εναλλακτικές λύσεις που λειτουργούν με μπαταρίες.



Εικόνα 1. 7: Λεωφορείο κυψέλης καυσίμου υδρογόνου

❖ Φορτηγά Βαρέως Τύπου



Εικόνα 1. 8: Παραδείγματα φορτηγών βαρέως τύπου με κυψέλη καυσίμου

Ομοίως με τα λεωφορεία με κυψέλες καυσίμου, τα φορτηγά βαρέως τύπου μπορούν να χρησιμοποιήσουν κυψέλες καυσίμου για τη μείωση των εκπομπών και να παρέχουν αξιόπιστα οχήματα για διάφορους σκοπούς. Οι μελλοντικές εφαρμογές για τα φορτηγά βαρέως τύπου περιλαμβάνουν επίσης μεταφορές μεγάλων αποστάσεων.

❖ Φορτηγά Μεσαίου Τύπου



Εικόνα 1. 9: Ανεφοδιασμός φορτηγού μεσαίου τύπου κυψέλης καυσίμου

Τα οχήματα κυψελών καυσίμου αναπτύσσονται σε μεγαλύτερους στόλους οχημάτων διανομής, παρέχοντας καθαρή και αξιόπιστη μεταφορά για τοπικά δίκτυα. Είτε αποτελούν τη μοναδική πηγή ενέργειας για το όχημα είτε σε συνδυασμό με μπαταρίες, οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν αξιόπιστα και επεκτείνουν την εμβέλεια του οχήματος σε σχέση με τα οχήματα που λειτουργούν αποκλειστικά με μπαταρίες.

❖ Περονοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα



Εικόνα 1. 10: Περονοφόρα ανυψωτικά μηχανήματα με κυψέλη καυσίμου

Τα περονοφόρα οχήματα κυψελών καυσίμου έχουν τη δυνατότητα να μειώσουν αποτελεσματικά το συνολικό κόστος εφοδιασμού, δεδομένου ότι απαιτούν ελάχιστο ανεφοδιασμό και σημαντικά λιγότερη συντήρηση από τα ηλεκτρικά περονοφόρα οχήματα, των οποίων οι μπαταρίες πρέπει να φορτίζονται περιοδικά, να γεμίζουν με νερό και να αντικαθίστανται. Λόγω της συχνής εκκίνησης και διακοπής κατά τη χρήση, τα ηλεκτρικά περονοφόρα οχήματα παρουσιάζουν επίσης πολλές διακοπές στην είσοδο και την έξοδο ρεύματος ενώ οι κυψέλες καυσίμου εξασφαλίζουν σταθερή παροχή ισχύος και απόδοση, εξαλείφοντας τη μείωση της τάσης εξόδου που συμβαίνει κατά την εκφόρτιση των μπαταριών.

❖ Θαλάσσια σκάφη κυψελών καυσίμου



Εικόνα 1. 11: Σκάφος κυψέλης καυσίμου

Θαλάσσια σκάφη διαφόρων μεγεθών δοκιμάζουν επί του παρόντος κυψέλες καυσίμου σε νέες δυνατότητες στο νερό. Αρκετά οχηματαγωγά πλοία σε όλο τον κόσμο έχουν αρχίσει να λειτουργούν με υδρογόνο, ενώ μεγαλύτερα μοντέλα κυψελών καυσίμου αποτελούν πρωτότυπα και εξετάζονται για πλοία μεταφοράς κοντέινερ. Σκάφη από μεγάλα έως μικρά αναζητούν τις κυψέλες καυσίμου για να επιτύχουν τους στόχους για τις εκπομπές ρύπων και να διατηρήσουν τους ανθρώπους και το φορτίο σε κίνηση.

❖ **Αεροπλάνα με κυψέλη καυσίμου**

Οι κυψέλες καυσίμου είναι μια ελκυστική επιλογή για τις αερομεταφορές, καθώς παράγουν μηδενικές ή χαμηλές εκπομπές και δεν προκαλούν σχεδόν καθόλου θόρυβο. Ο στρατός ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για αυτή την εφαρμογή λόγω του χαμηλού θορύβου, της χαμηλής θερμικής υπογραφής και της ικανότητας επίτευξης μεγάλου ύψους. Εταιρείες όπως η Boeing ασχολούνται έντονα με την ανάπτυξη ενός αεροπλάνου με κυψέλες καυσίμου.

❖ **Υποβρύχια**

Πρόωση ντίζελ με σύστημα πρόωσης ανεξάρτητο από τον αέρα με χρήση κυψελών καυσίμου υδρογόνου με μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη της Siemens.

❖ **Συστήματα έκτακτης ανάγκης**

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έκτακτης ανάγκης είναι ένας τύπος συστήματος κυψελών καυσίμου, ο οποίος μπορεί να περιλαμβάνει φωτισμό, γεννήτριες και άλλες συσκευές, για την παροχή εφεδρικών πόρων σε περίπτωση κρίσης ή όταν τα κανονικά συστήματα αποτύχουν. Βρίσκουν χρήσεις σε μια ευρεία ποικιλία ρυθμίσεων, από κατοικίες μέχρι νοσοκομεία, επιστημονικά εργαστήρια, κέντρα δεδομένων, τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό και σύγχρονα ναυτικά πλοία.

❖ **Τηλεπικοινωνίες**

Οι κυψέλες καυσίμου έχουν αποδείξει ότι είναι αρκετά αξιόπιστες. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες για την παροχή ενέργειας για τηλεπικοινωνιακές τοποθεσίες 1kW έως 5kW χωρίς θόρυβο ή εκπομπές, και είναι ανθεκτικές, παρέχοντας ενέργεια σε τοποθεσίες που είτε είναι δύσκολα προσβάσιμες είτε υπόκεινται σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

❖ **Συνεχής παροχή ρεύματος**

Μια συνεχής και αδιάλειπτη παροχή ρεύματος (UPS) παρέχει ισχύ έκτακτης ανάγκης και, ανάλογα με την τοπολογία, παρέχει επίσης ρύθμιση γραμμής στον συνδεδεμένο εξοπλισμό, παρέχοντας ρεύμα από ξεχωριστή πηγή όταν δεν είναι διαθέσιμη η ισχύς του δικτύου κοινής ωφέλειας. Σε αντίθεση με μια εφεδρική γεννήτρια, μπορεί να παρέχει άμεση προστασία από μια στιγμιαία διακοπή ρεύματος.

ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΡΟΗΣ

Γενικά , η δομή ροής εξυπηρετεί δύο κύριους σκοπούς:

(1) παρέχει τα αντιδρώντα αέρια και απομακρύνει τα προϊόντα της αντίδρασης και

(2) συλλέγει το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει η κυψέλη καυσίμου.

Παρά τις φαινομενικά απλές αυτές εργασίες, οι δομές ροής υπόκεινται σε ένα δύσκολο σύνολο κριτηρίων επιλογής υλικών:

- Υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Υψηλή αντοχή στη διάβρωση
- Υψηλή χημική συμβατότητα
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- Υψηλή στεγανότητα σε αέρια
- Υψηλή μηχανική αντοχή
- Χαμηλό βάρος και όγκος
- Ευκολία κατασκευής
- Αποτελεσματικότητα κόστους

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό για πλάκες ροής κυψελών καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας είναι ο γραφίτης.

Ο γραφίτης ικανοποιεί τα περισσότερα από τα κριτήρια που συζητήθηκαν παραπάνω εκτός από: (1) ευκολία κατασκευής, (2) κόστος, (3) υψηλή μηχανική αντοχή. Τα κριτήρια αυτά δεν πληρούνται λόγω των απαιτήσεων δαπανηρής κατεργασίας και της εγγενούς ευθραυστότητας του υλικού. Παραδόξως, η κατεργασία του γραφίτη είναι τόσο δαπανηρή που οι πλάκες γραφίτη μπορούν να καταλάβουν μέχρι και το μισό κόστος ενός συστήματος κυψελών καυσίμου.

Οι εναλλακτικές λύσεις για τον γραφίτη περιλαμβάνουν μέταλλα ανθεκτικά στη διάβρωση, όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας. Σε γενικές γραμμές, οι μεταλλικές πλάκες προσφέρουν λιγότερο δαπανηρή κατασκευή και υψηλότερη μηχανική αντοχή σε

σύγκριση με τις πλάκες γραφίτη. Ακόμη και ένα λεπτό στρώμα μεταλλικού οξειδίου θα αυξήσει την αντίσταση επαφής μεταξύ της ροής της πλάκας ροής και του ηλεκτροδίου, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου. Το πρόβλημα αυτό έχει εν μέρει ξεπεραστεί με τη χρήση επιφανειακών επιστρώσεων ανθεκτικών στη διάβρωση, αν και η μακροπρόθεσμη σταθερότητα αυτών των επιστρώσεων χρειάζεται βελτίωση.

ΜΟΤΙΒΑ ΔΟΜΩΝ ΡΟΗΣ

Οι πλάκες ροής περιέχουν δεκάδες ή και εκατοντάδες λεπτά κανάλια (ή αυλάκια) για τη διανομή της ροής του αερίου στην επιφάνεια της κυψέλης καυσίμου.

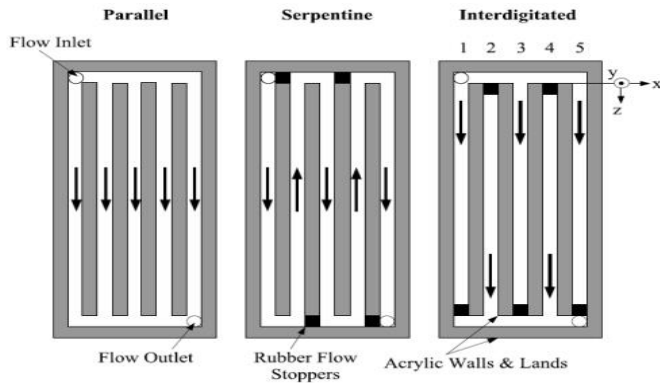
Το σχήμα, το μέγεθος και το μοτίβο των καναλιών ροής μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου. Η επιλογή του σωστού μοτίβου ροής είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για τις PEMFC.

Στις PEMFC οι προσπάθειες σχεδιασμού του πεδίου ροής συχνά επικεντρώνονται στην ικανότητα απομάκρυνσης του νερού από την πλευρά της καθόδου.

Οι κακώς σχεδιασμένες πλάκες πεδίου ροής αφήνουν ορισμένες περιοχές πλημμυρισμένες με υγρό νερό, εμποδίζοντας έτσι την πρόσβαση στο αέριο και μειώνοντας το ρεύμα εξόδου της κυψέλης. Τέτοιες αποκλεισμένες περιοχές όχι μόνο μειώνουν την απόδοση, αλλά μπορούν να προκαλέσουν μη αναστρέψιμη βλάβη στην κυψέλη καυσίμου.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πολικότητα μπορεί να διατηρηθεί τοπικά σε περιοχές με έλλειψη αερίου, οδηγώντας σε διάβρωση και υποβάθμιση του υλικού. Αν και χρησιμοποιείται μεγάλη ποικιλία προτύπων ροής από ερευνητικές ομάδες και προγραμματιστές, τα περισσότερα εμπίπτουν σε βασικά αρχέτυπα προτύπων ροής:

1. Παράλληλη ροή
2. Σπειροειδής ροή
3. Διασταυρούμενη ροή



Εικόνα 1. 12: Κύριες γεωμετρίες καναλιών ροής

Παράλληλη ροή: Στην παράλληλη διαμόρφωση η ροή εισέρχεται ομοιόμορφα σε κάθε ευθύ κανάλι και εξέρχεται από την έξοδο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της παράλληλης διάταξης είναι η χαμηλή συνολική πτώση πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου αερίου. Ωστόσο, όταν το πλάτος του πεδίου ροής είναι σχετικά μεγάλο, η κατανομή της ροής σε κάθε κανάλι μπορεί να μην είναι ομοιόμορφη. Αυτό προκαλεί συσσώρευση νερού σε ορισμένες περιοχές του καναλιού, οδηγώντας σε αύξηση των απωλειών μεταφοράς μάζας (και αντίστοιχη μείωση της πυκνότητας ρεύματος). Αρκετοί κατασκευαστές κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν αυτόν τον τύπο καναλιού στα φορητά τους συστήματα κυψελών καυσίμου.

Σπειροειδή ροή: Αυτή είναι η πιο κοινή γεωμετρία που συναντάται σε πρωτότυπα κυψελών καυσίμου. Το πλεονέκτημα του ελικοειδούς σχήματος έγκειται στην ικανότητα απομάκρυνσης του νερού. Μόνο μία διαδρομή ροής υπάρχει στο μοτίβο, οπότε το υγρό αναγκάζεται να εξέλθει από το κανάλι. Δυστυχώς, σε κυψέλες μεγάλων επιφανειών, ο σερπαντινένιος σχεδιασμός οδηγεί σε μεγάλη πτώση πίεσης.

Έχουν διερευνηθεί διάφορες παραλλαγές του ελικοειδούς σχεδιασμού των ελικοειδών και παράλληλων μοτίβων, ο οποίος χρησιμοποιείται ως γνωστόν στις στοίβες Ballard PEMFC.

Διασταυρούμενη ροή: Ο πεπλεγμένος σχεδιασμός προωθεί την εξαναγκασμένη συναγωγή των αντιδρώντων αερίων μέσω του στρώματος διάχυσης αερίων. Αντικείμενο μεγάλης πρόσφατης προσοχής, η έρευνα δείχνει ότι αυτός ο σχεδιασμός παρέχει πολύ καλύτερη διαχείριση των υγρών, οδηγώντας σε βελτιωμένη μεταφορά μάζας. Η εξαναγκασμένη συναγωγή μέσω του στρώματος διάχυσης αερίων οδηγεί σε σημαντικές απώλειες πτώσης πίεσης. Ωστόσο, υπάρχουν ενδείξεις ότι αυτό το σημαντικό μειονέκτημα μπορεί να ξεπεραστεί εν μέρει με τη χρήση εξαιρετικά μικρών αποστάσεων μεταξύ των νευρώσεων.

4. OpenFoam

Το OpenFoam (Open Source Field Operation and Manipulation) είναι μια εργαλειοθήκη C++ για την ανάπτυξη εξατομικευμένων αριθμητικών επιλυτών και βοηθητικών προγραμμάτων πριν και μετά την επεξεργασία για την επίλυση προβλημάτων μηχανικής συνεχούς ροής, συμπεριλαμβανομένης της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Ο κώδικας κυκλοφορεί ως ελεύθερο λογισμικό ανοικτού κώδικα.

Οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν προσαρμοσμένα αντικείμενα, όπως οριακές συνθήκες ή μοντέλα τύρβης, τα οποία θα λειτουργούν με τους υπάρχοντες επιλυτές χωρίς να χρειάζεται να τροποποιήσουν ή να μεταγλωττιστεί εκ νέου ο υπάρχων πηγαίος κώδικας. Το OpenFoam το πετυχαίνει αυτό συνδυάζοντας εικονικούς κατασκευαστές με τη χρήση απλοποιημένων βασικών κλάσεων ως διεπαφές, με αποτέλεσμα αυτό να δίνει στο OpenFoam καλές ιδιότητες επεκτασιμότητας. Το OpenFoam αναφέρεται σε αυτή τη δυνατότητα ως επιλογή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης.

ΔΟΜΗ ΤΟΥ OPENFOAM

Το OpenFoam αποτελείται από μια μεγάλη βάση βιβλιοθήκης, η οποία προσφέρει τις βασικές δυνατότητες του κώδικα:

- Λειτουργίες τανυστών και πεδίων
- Διακριτοποίηση μερικών διαφορικών εξισώσεων με χρήση κατανοητού από τον άνθρωπο συντακτικού
- Επίλυση γραμμικών συστημάτων
- Επίλυση συνήθων διαφορικών εξισώσεων
- Αυτόματη παραλληλοποίηση πράξεων υψηλού επιπέδου
- Δυναμικό πλέγμα
- Γενικά φυσικά μοντέλα
- Ρεολογικά μοντέλα
- Θερμοδυναμικά μοντέλα και βάση δεδομένων
- Μοντέλα τύρβης
- Μοντέλα χημικών αντιδράσεων και κινητικής
- Μέθοδοι παρακολούθησης σωματιδίων κατά Λαγκράνζ
- Μοντέλα μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία
- Μεθοδολογίες πολλαπλών πλαισίων αναφοράς και ενός πλαισίου αναφοράς

Οι δυνατότητες που παρέχει η βιβλιοθήκη χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την ανάπτυξη εφαρμογών. Οι εφαρμογές γράφονται χρησιμοποιώντας τη σύνταξη υψηλού επιπέδου που εισήγαγε το OpenFoam, η οποία στοχεύει στην αναπαραγωγή της συμβατικής μαθηματικής σημειογραφίας.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες εφαρμογών:

- **Επιλύτριες:** εκτελούν τους πραγματικούς υπολογισμούς για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος μηχανικής της συνέχειας
- **Βοηθητικά προγράμματα:** χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία του πλέγματος, τη ρύθμιση της περίπτωσης προσομοίωσης, την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την εκτέλεση άλλων λειτουργιών εκτός από την επίλυση του υπό εξέταση προβλήματος.

Κάθε εφαρμογή παρέχει συγκεκριμένες δυνατότητες: για παράδειγμα, η εφαρμογή που ονομάζεται blockMesh χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πλεγμάτων από ένα αρχείο εισόδου που παρέχεται από τον χρήστη, ενώ μια άλλη εφαρμογή που ονομάζεται icoFoam επιλύει τις εξισώσεις Navier-Stokes για ασυμπίεστη στρωτή ροή.

ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ OPENFOAM

Οι επιλυτές OpenFOAM περιλαμβάνουν:

- Βασικούς επιλύτες CFD
- Ασυμπίεστη ροή με δυνατότητες RANS και LES
- Επιλύτες συμπιεζόμενης ροής με δυνατότητες RANS και LES
- Επιλύτες ροής με κινητήρια δύναμη την άνωση
- DNS και LES
- Επιλύτες πολυφασικής ροής
- Επιλύτες παρακολούθησης σωματιδίων
- Επιλύτες για προβλήματα καύσης
- Επιλύτες για συζυγή μεταφορά θερμότητας
- Επιλύτες μοριακής δυναμικής
- Επιλύτες άμεσης προσομοίωσης Monte Carlo
- Ηλεκτρομαγνητικοί επιλύτες
- Επιλυτές στερεάς δυναμικής

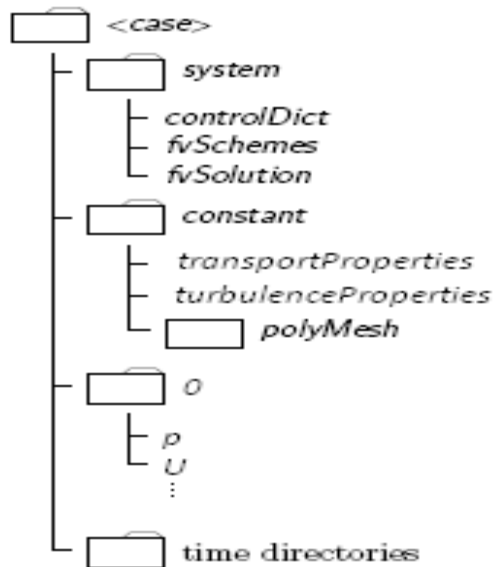
Εκτός από τους τυπικούς επιλυτές, η σύνταξη του OpenFoam προσφέρεται για την εύκολη δημιουργία προσαρμοσμένων επιλυτών.

Τα βοηθητικά προγράμματα του OpenFoam υποδιαιρούνται σε:

- Βοηθητικά προγράμματα πλέγματος
- Δημιουργία πλέγματος: δημιουργούν υπολογιστικά πλέγματα ξεκινώντας είτε από ένα αρχείο εισόδου (blockMesh), είτε από μια γενική γεωμετρία που καθορίζεται ως αρχείο STL, η οποία πλέκεται αυτόματα με εξαγωνικά πλέγματα (snappyHexMesh)
- Μετατροπή πλέγματος: μετατρέπουν πλέγματα που παράγονται με άλλα εργαλεία στη μορφή OpenFoam.
- Χειρισμός πλέγματος: εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες στο πλέγμα, όπως τοπική βελτίωση, ορισμός περιοχών και άλλα.
- Βοηθητικά προγράμματα παράλληλης επεξεργασίας: παρέχουν εργαλεία για την αποσύνθεση, ανακατασκευή και ανακατανομή της υπολογιστικής περίπτωσης για την εκτέλεση παράλληλων υπολογισμών
- Βοηθητικά προγράμματα προεπεξεργασίας: εργαλεία για την προετοιμασία των περιπτώσεων προσομοίωσης
- Βοηθητικά προγράμματα μετα-επεξεργασίας: εργαλεία για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των περιπτώσεων προσομοίωσης, συμπεριλαμβανομένου ενός πρόσθετου για τη διασύνδεση του OpenFoam και του ParaView.
- Βοηθητικά προγράμματα επιφάνειας
- Θερμοφυσικά βοηθητικά προγράμματα

Το OpenFoam παρέχει ένα σύνολο από παραδείγματα που βρίσκονται στο \$FOAM_TUTORIALS και χωρίζονται σε φακέλους ανάλογα με τον επιλύτη που χρησιμοποιείται στο παράδειγμα. Συνήθως όταν ένας χρήστης θέλει να τρέξει μια «υπόθεση» (case), αντιγράφει την αρχική περίπτωση που μοιάζει περισσότερο με αυτή που θέλει να εκτελέσει και αργότερα θα κάνει τις τροποποιήσεις που απαιτούνται.

Η βασική δομή του OpenFoam είναι η εξής:



Σχήμα 1. 10 : Δομή OpenFoam

SYSTEM FOLDER

Σε αυτόν το φάκελο τοποθετούνται τρία αρχεία: controlDict, fvSchemes και fvSolution.

Στο controlDict ορίζονται οι παράμετροι δεδομένων I/O και χρόνου εκτέλεσης, συμπεριλαμβανομένων του χρόνου έναρξης/λήξης του χρονικού βήματος.

Στο αρχείο fvSchemes ορίζονται τα αριθμητικά σχήματα για τους όρους.

CONSTANT FOLDER

Σε αυτόν τον φάκελο τοποθετούνται ένα αρχείο (transportProperties) και ένας φάκελος (polyMesh).

Στο transportProperties περιλαμβάνονται οι ιδιότητες του ρευστού με το οποίο εργαζόμαστε, π.χ. το ιξώδες του ρευστού.

Στο φάκελο polyMesh βρίσκονται όλα τα δεδομένα για το πλέγμα (σημεία, ακμές, επιφάνειες ...). Αυτός ο φάκελος μπορεί να δημιουργηθεί με διάφορους τρόπους: με το χέρι, μετατροπή των δεδομένων από άλλο λογισμικό στο OpenFoam ή με τη χρήση προ-εφαρμογών του OpenFoam (snappyHexMesh, blockMesh...).

0 FOLDER

Οι οριακές συνθήκες περιλαμβάνονται σε αυτόν τον φάκελο. Ανάλογα με το μοντέλο με το οποίο εργαζόμαστε, θα πρέπει να συμπεριληφθούν διαφορετικά αρχεία οριακών συνθηκών, εκτός από τις τυπικές οριακές συνθήκες όπως η ταχύτητα, η πίεση κ.λπ. Για παράδειγμα, χρησιμοποιούμε το simpleFoam , οπότε θα πρέπει να συμπεριληφθούν και οι οριακές συνθήκες σταθερής κατάστασης. Οι οριακές συνθήκες θα οριστούν για κάθε τοίχο και η δομή θα είναι η ακόλουθη:

```
Name_of_the wall
{
  type Type of wall           Wall, patch, symmetryPlane...
  value Value                 ← Σε περίπτωση που είναι απαραίτητο
                              (ανάλογα τον τύπο)
}
```

Ανάλογα με τον ορισμό του τοίχου στο constant/polyMesh/boundary το όριο θα οριστεί ο τύπος της συνθήκης.

TIME DIRECTORIES

Περιέχει αρχεία δεδομένων για συγκεκριμένα πεδία, όπως αρχικές τιμές και οριακές συνθήκες ή αποτελέσματα. Σε αυτό το έργο θα εργαστούμε με μοντέλα σταθερής κατάστασης, οπότε ο φάκελος 'time directories' δεν θα συμπεριληφθεί στο φάκελο case.

STANDARD SOLVERS AND LIBRARIES

Οι επιλυτές τοποθετούνται στον κατάλογο \$FOAM_APP/solvers και χωρίζονται σε καταλόγους ανά κατηγορία μηχανικής συνέχειας, καύσης και ανάλυσης τάσεων στερεών σωμάτων.

Όσον αφορά τις τυποποιημένες βιβλιοθήκες, διαχωρίζονται σε General βιβλιοθήκες (παρέχουν γενικά μαθήματα) και σε Model βιβλιοθήκες (καθορίζουν μοντέλα για τη μηχανική της συνέχειας). Και οι δύο τοποθετούνται στον κατάλογο \$FOAM_LIB/\$WM_OPTIONS.

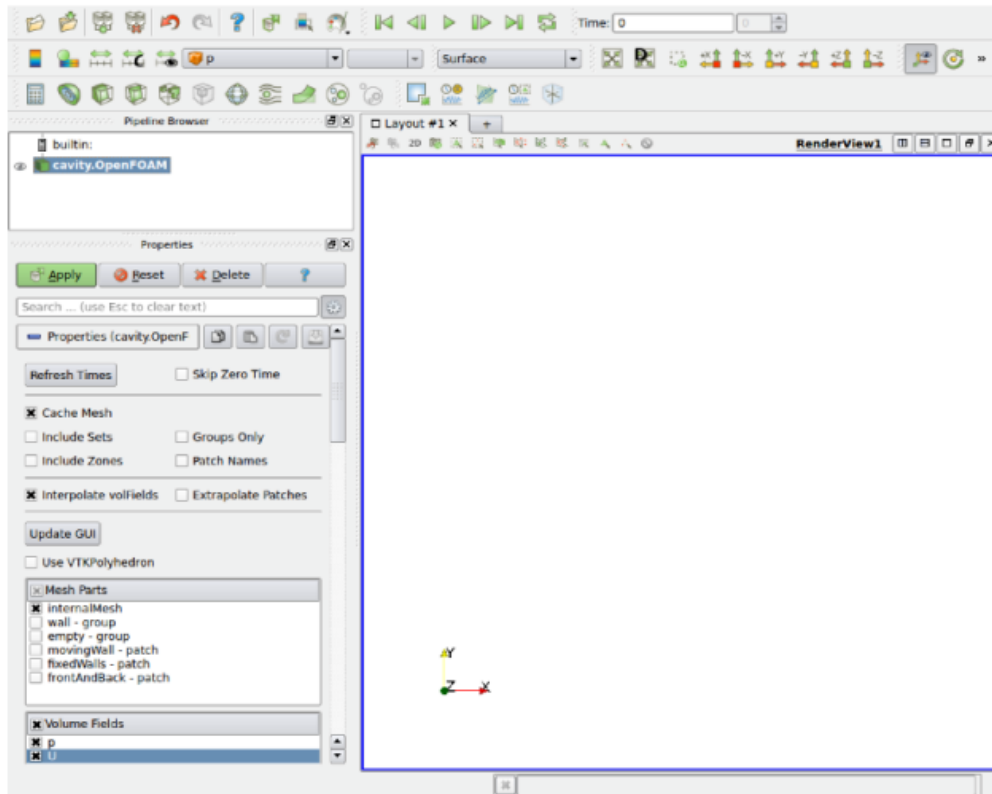
ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ PARAVIEW

Το ParaView είναι μια εφαρμογή ανάλυσης και απεικόνισης δεδομένων ανοικτού κώδικα, πολλαπλών πλατφορμών. Το ParaView μπορεί να κατασκευάσει γρήγορα απεικονίσεις για να αναλύσει τα δεδομένα τους χρησιμοποιώντας ποιοτικές και ποσοτικές τεχνικές. Η εξερεύνηση των δεδομένων μπορεί να γίνει διαδραστικά σε 3D ή προγραμματιστικά χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες επεξεργασίας παρτίδων του ParaView.

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ PARAVIEW/PARAFOAM

Το paraFoam είναι μια εντολή ή δέσμη ενεργειών που εκκινεί το ParaView χρησιμοποιώντας τη μονάδα ανάγνωσης που παρέχεται με το OpenFOAM. Εκτελείται όπως οποιοδήποτε από τα βοηθητικά προγράμματα του OpenFOAM είτε με την απλή εντολή μέσα από τον κατάλογο case είτε με την επιλογή -case με όρισμα τη διαδρομή του case, π.χ:

```
paraFoam -case <caseDir>
```

Εικόνα 1. 13: ParaFoam window

Το ParaView εκκινείται και ανοίγει το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 1.9. Ο έλεγχος της υπόθεσης που τρέχει γίνεται από το αριστερό πάνελ, το οποίο περιέχει τα εξής:

- Πρόγραμμα περιήγησης αγωγών (Pipeline Browser)

Απαριθμεί τις ενότητες που έχουν ανοίξει στο ParaView, όπου οι επιλεγμένες ενότητες επισημαίνονται με μπλε χρώμα και τα γραφικά για τη συγκεκριμένη ενότητα μπορούν να ενεργοποιηθούν/απενεργοποιηθούν κάνοντας κλικ στο κουμπί "eye".

- Πίνακας ιδιοτήτων (Properties Panel)

Περιέχει τις επιλογές εισόδου για την περίπτωση, όπως χρόνους, περιοχές και πεδία, περιλαμβάνει τον πίνακα Display που ελέγχει την εικονική αναπαράσταση της επιλεγμένης ενότητας, π.χ. χρώματα,

- Άλλοι πίνακες (Other Panels)

Μπορούν να επιλεγούν από το μενού View (Προβολή), συμπεριλαμβανομένου του πίνακα Information (Πληροφορίες) που παρέχει στατιστικά στοιχεία της υπόθεσης, όπως η γεωμετρία και το μέγεθος του πλέγματος.

Το ParaView λειτουργεί με μια δενδρική δομή, στην οποία τα δεδομένα μπορούν να φιλτραριστούν από την κορυφαία ενότητα υποθέσεων για να δημιουργηθούν σύνολα υπομονάδων. Για παράδειγμα, ένα διάγραμμα περιγράμματος, της πίεσης θα μπορούσε να είναι μια υποενότητα της ενότητας υπόθεσης που περιέχει όλα τα δεδομένα πίεσης. Το δυνατό σημείο του ParaView είναι ότι ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει έναν αριθμό υπομονάδων και να εμφανίσει όποιες θεωρεί ότι δημιουργούν την επιθυμητή εικόνα ή κινούμενη εικόνα. Για παράδειγμα, μπορεί να προσθέσει κάποια στερεά γεωμετρία, πλέγμα και διανύσματα ταχύτητας, σε μια απεικόνιση περιγράμματος της πίεσης, ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας οποιοδήποτε από τα στοιχεία ανάλογα με τις ανάγκες.

Η γενική λειτουργία του συστήματος βασίζεται στο ότι ο χρήστης κάνει μια επιλογή και στη συνέχεια πατάει το πράσινο κουμπί Apply (Εφαρμογή) στον πίνακα Properties (Ιδιότητες).

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

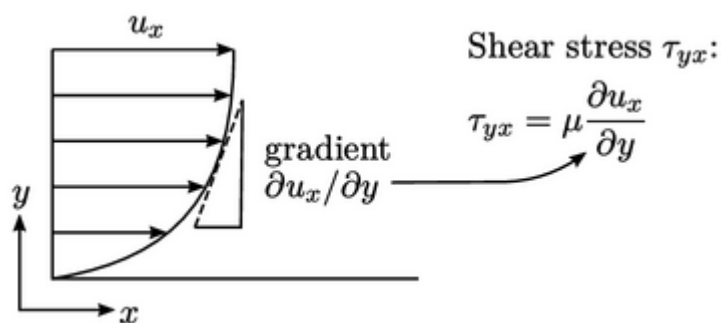
Οι κυψέλες καυσίμου περιέχουν δεκάδες ή και εκατοντάδες λεπτά κανάλια για τη διανομή της ροής του καυσίμου στην επιφάνεια της κυψέλης. Το σχήμα, το μέγεθος και το μοτίβο των καναλιών ροής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοσή της. Οι ερευνητικές ομάδες και οι προγραμματιστές χρησιμοποιούν μεγάλη ποικιλία σχεδίων ροής. Στην παρούσα μελέτη, θα εξετάσουμε και θα παρουσιάσουμε κυρίως την γεωμετρία της διασταυρούμενης ροής ή πεπλεγμένη ροή (Interdigitated geometry) δίνοντας έμφαση στην κίνηση των νανοσωματιδίων στις κυψέλες καυσίμου κάτω από διαφορετικές τιμές Reynolds.

Αρχικά θα αναφερθούμε στα υπολογιστικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση της ροής και την κίνηση των νανοσωματιδίων αλλά και τις ανάλογες οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στις ακόλουθες προσομοιώσεις.

Newtonian Model

Με το μοντέλο αυτό δηλώνει ότι ένα ρευστό σε ηρεμία (ή ομοιόμορφη ταχύτητα) δεν υποστηρίζει την εξίσωση των διατμητικών τάσεων t (shear stress) και εκφράζεται ως εξής:

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mu \text{dev } \mathbf{D} \quad \text{and} \quad \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\tau} - p\mathbf{I}$$



Το μοντέλο είναι μια συνεχής αναπαράσταση του νόμου του ιξώδους του Νεύτωνα που ορίζει ότι η διατμητική τάση t_{yx} είναι ανάλογη της κλίσης της ταχύτητας με το δυναμικό ιξώδες μ .

Το Νευτώνειο μοντέλο υποστηρίζει ότι το ρευστό είναι ισότροπο, δηλαδή η τιμή της εξίσωσης είναι ανεξάρτητη από την κατεύθυνση στην οποία μετράται και ότι το ιξώδες όγκου που συνδέεται με μια μεταβολή του όγκου του ρευστού είναι μηδενικό.

Navier-Stokes

Ο κώδικας ξεκινάει με τον υπολογισμό του πεδίου ροής επιλύοντας τις ασυμπίεστες εξισώσεις Navier-Stokes.

Οι εξισώσεις Navier-Stokes για μονοφασική ροή με σταθερή πυκνότητα και ιξώδες είναι οι ακόλουθες:

$$\nabla(\rho \vec{U}) = 0$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + U \nabla U = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 U$$

$$Re = \frac{U_{in} D_h}{\nu}$$

Η χρονική παράγωγος $\frac{\partial \psi}{\partial t}$ σε μια εξίσωση μπορεί να διακριτοποιηθεί ως μια πεπερασμένη διαφορά στο χρόνο. Ο χρόνος t εκφράζεται σε διακριτά διαστήματα, ή βήματα, διάρκειας Δt .

Ο Euler υπολογίζει την παράγωγο από το πεδίο ροής στον τρέχοντα χρόνο Ψ και το προηγούμενο, ή παλιό, χρονικό επίπεδο Ψ^o ως εξής:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} \rightarrow \frac{\Psi - \Psi^o}{\Delta t}$$

Η μέθοδος Euler χρησιμοποιήθηκε για την χρονική ολοκλήρωση των εξισώσεων της διακριτής μεθόδου Lagrange που υπολογίζουν την κίνηση των σωματιδίων μέσα στην ροή.

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες στρωτής ροής (laminar flow) στους σωλήνες. Οι οριακές συνθήκες απαιτούνται για να ολοκληρώσουν το πρόβλημα προς επίλυση γιαυτό και τις θέτουμε για όλες τις οριακές επιφάνειες.

Dirichlet

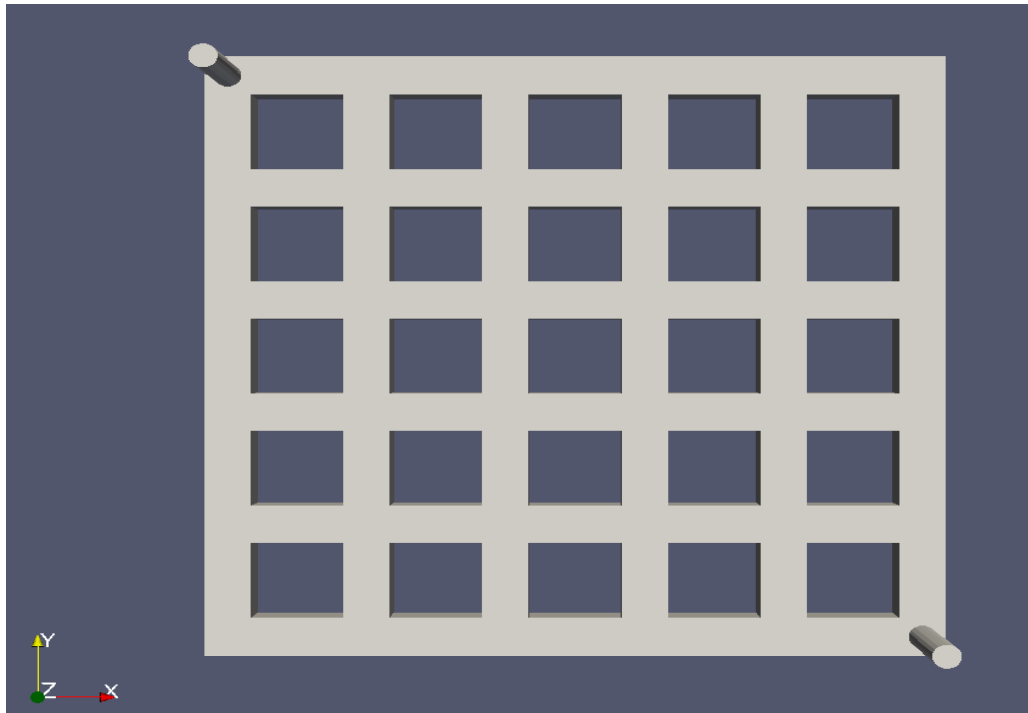
Ορίζει την τιμή της εξαρτωμένης μεταβλητής στο όριο και καλείται ως “Fixed Value”.

Όλα τα όρια είναι τοίχοι (walls) εκτός από την είσοδο και την έξοδο της ροής που είναι V_{in} και V_{out} αντίστοιχα.

Για την επίλυση των εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανοικτού κώδικα OpenFoam.

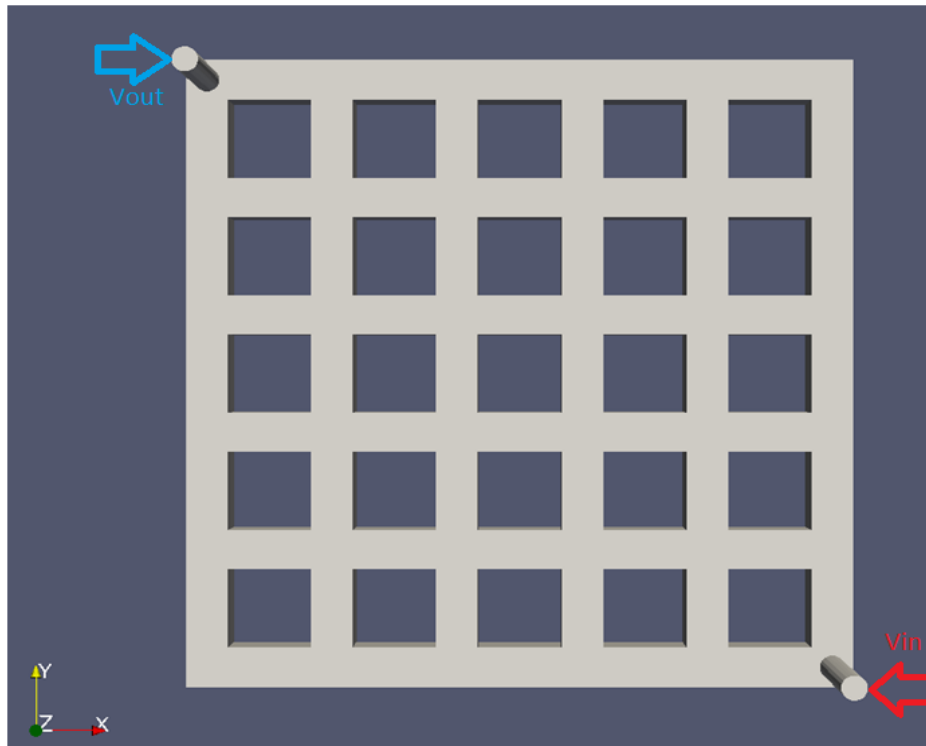
“IcoUncoupledKinematicParcelFoam”

Μεταβατικός επιλύτης για την παθητική μεταφορά ενός μόνο κινηματικού νέφους σωματιδίων, με προαιρετικές αλλαγές στην κίνηση του πλέγματος και στην τοπολογία του πλέγματος.



Εικόνα 1.1 1: Γεωμετρία διασταυρούμενης ροής

Το διασταυρούμενο πεδίο ροής αποτελείται από πολλούς οριζόντιους και κάθετους αγωγούς. Το μικρό μήκος κάθε αγωγού και ο αριθμός των αγωγών δημιουργούν μεγάλη πολυπλοκότητα. Η ιδέα είναι ότι τυχόν θύλακες ακάθαρτων αερίων θα μετατοπιστούν από τη διαδικασία στροβιλισμού της πιθανώς ασταθούς ροής του αερίου μέσα στο σύστημα. Ο διασταυρούμενος σχεδιασμός προωθεί την εξαναγκασμένη συναγωγή των αντιδρώντων αερίων μέσω του στρώματος διάχυσης αερίου.



Εικόνα 1.1 2: Είσοδος V_{in} -Εξόδος V_{out}

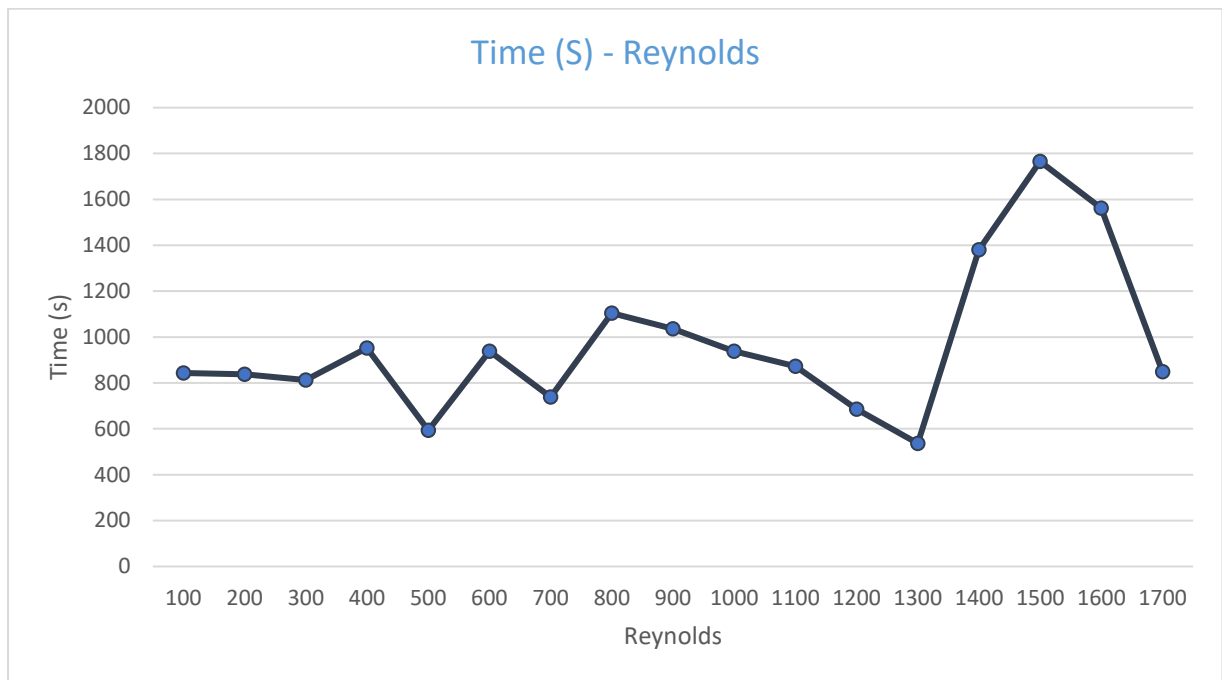
Η είσοδος της ροής γίνεται από την κορυφή του σωλήνα στη δεξιά πλευρά (V_{in}) και η έξοδος από την κορυφή του σωλήνα στην αριστερή πλευρά (V_{out}). Στόχος είναι η καταγραφή των τιμών χρόνου την στιγμή που εξέρχεται και το τελευταίο σωματίδιο από το πλέγμα στην έξοδο V_{out} .

Η υπολογιστική μέθοδος οδήγησης σωματιδίων δοκιμάστηκε σε σειρές προσομοιώσεων με διαφορετικές τιμές Reynolds. Οι τιμές αυτές είναι καταγεγραμμένες στον παρακάτω πίνακα απεικόνισης.

Πίνακας απεικόνισης χρόνου παραμονής σωματιδίων υπό διάφορες τιμές Reynolds

Reynolds	Time (S)
Re100	842,91
Re200	837,21
Re300	812,67
Re400	952,11
Re500	593,16
Re600	937,66
Re700	738,31
Re800	1103,672
Re900	1035,771
Re1000	938,117
Re1100	873,225
Re1200	685,178
Re1300	536,519
Re1400	1380,500
Re1500	1765,447
Re1600	1562,197
Re1700	848,794

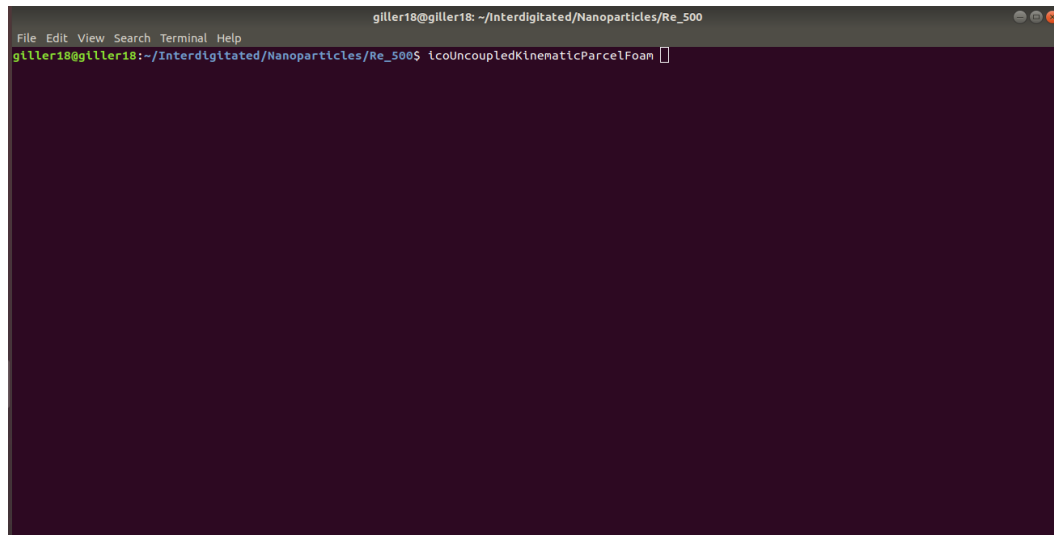
Για την συγκεκριμένη μέθοδο που ακολουθήσαμε εισαγάγαμε 10 νανοσωματίδια κάθε φορά που εκτελούσαμε την προσομοίωση. Ανά δευτερόλεπτο είχαμε την εισαγωγή κάθε σωματιδίου (parcelsPerSecond=1), με διάμετρο $10e^{-15}$ και ρυθμό ροής $5,7e^{-15}$ (Flow Rate), εξετάζαμε τον χρόνο παραμονής των σωματιδίων στο γεωμετρικό πλέγμα της κυψέλης καυσίμου.



Εικόνα 1.1 3: Διάγραμμα χρόνου παραμονής σωματιδίων στο πλέγμα για κάθε τιμή Reynolds (Time (s)-Reynolds).

Ο χρόνος παραμονής των σωματιδίων παρατηρούμε ότι σε αρκετές περιπτώσεις αυξάνεται στις μεγαλύτερες τιμές Reynolds ενώ ο χρόνος για τις μικρότερες τιμές Reynolds είναι σταθερά μικρότερος.

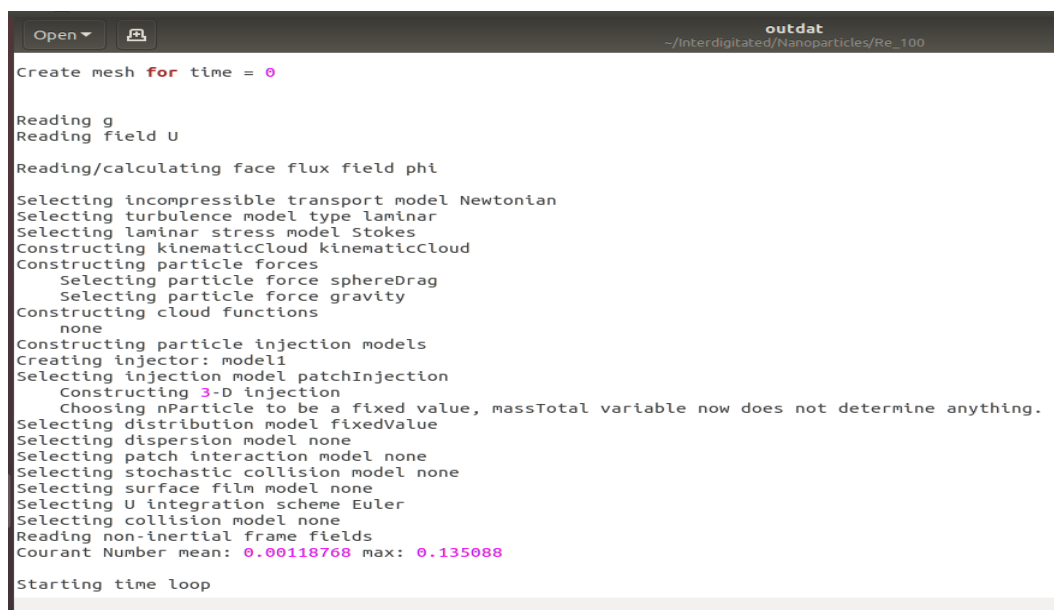
Για την εκκίνηση της προσομοίωσης χρησιμοποιήσαμε την εντολή “icoUncoupledKinematicParcelFoam” ξεκινώντας έτσι με την εισαγωγή των πρώτων σωματιδίων.



```
giller18@giller18: ~/Interdigitated/Nanoparticles/Re_500
giller18@giller18:~/Interdigitated/Nanoparticles/Re_500$ icoUncoupledKinematicParcelFoam
```

Εικόνα 1.1 4: Εντολή εκκίνησης της προσομοίωσης

Παρακάτω με την εκκίνηση της προηγούμενης εντολής ξεκινάει η δημιουργία του πλέγματος και η επιλογή της χρήσης των αριθμητικών μοντέλων για την επίλυση της ροής και της κίνησης των νανοσωματιδίων.



```
Open [icon] outdat
~/Interdigitated/Nanoparticles/Re_100

Create mesh for time = 0

Reading g
Reading field U

Reading/calculating face flux field phi

Selecting incompressible transport model Newtonian
Selecting turbulence model type laminar
Selecting laminar stress model Stokes
Constructing kinematicCloud kinematicCloud
Constructing particle forces
  Selecting particle force sphereDrag
  Selecting particle force gravity
Constructing cloud functions
  none
Constructing particle injection models
Creating injector: model1
Selecting injection model patchInjection
  Constructing 3-D injection
  Choosing nParticle to be a fixed value, massTotal variable now does not determine anything.
Selecting distribution model fixedValue
Selecting dispersion model none
Selecting patch interaction model none
Selecting stochastic collision model none
Selecting surface film model none
Selecting U integration scheme Euler
Selecting collision model none
Reading non-inertial frame fields
Courant Number mean: 0.00118768 max: 0.135088

Starting time loop
```

Εικόνα 1.1 5: Δημιουργία πλέγματος και επιλογή μοντέλων για την επίλυση.

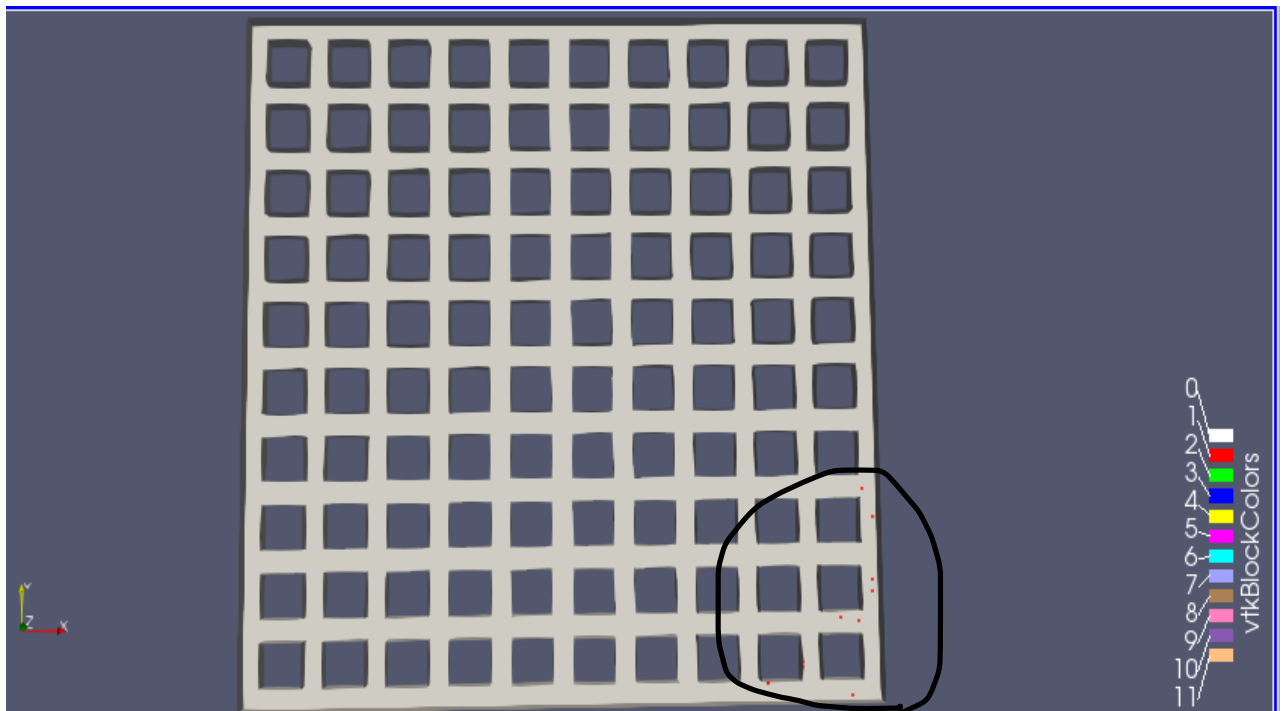
```

Open  [icon]  outdat
~/Interdigitated/Nanopart
Linear momentum      = (0 0 0)
|Linear momentum|    = 0
Linear kinetic energy = 0
model1:
  number of parcels added = 10
  mass introduced        = 0
  Rotational kinetic energy = 0
ExecutionTime = 275.38 s  ClockTime = 288 s
Time = 24.129
Evolving kinematicCloud
Solving 3-D cloud kinematicCloud
Cloud: kinematicCloud
  Current number of parcels = 10
  Current mass in system   = 0
  Linear momentum          = (0 0 0)
  |Linear momentum|        = 0
  Linear kinetic energy    = 0
  model1:
    number of parcels added = 10
    mass introduced        = 0
    Rotational kinetic energy = 0
ExecutionTime = 275.39 s  ClockTime = 288 s
Time = 24.13
Evolving kinematicCloud
Solving 3-D cloud kinematicCloud
Cloud: kinematicCloud
  Current number of parcels = 10

```

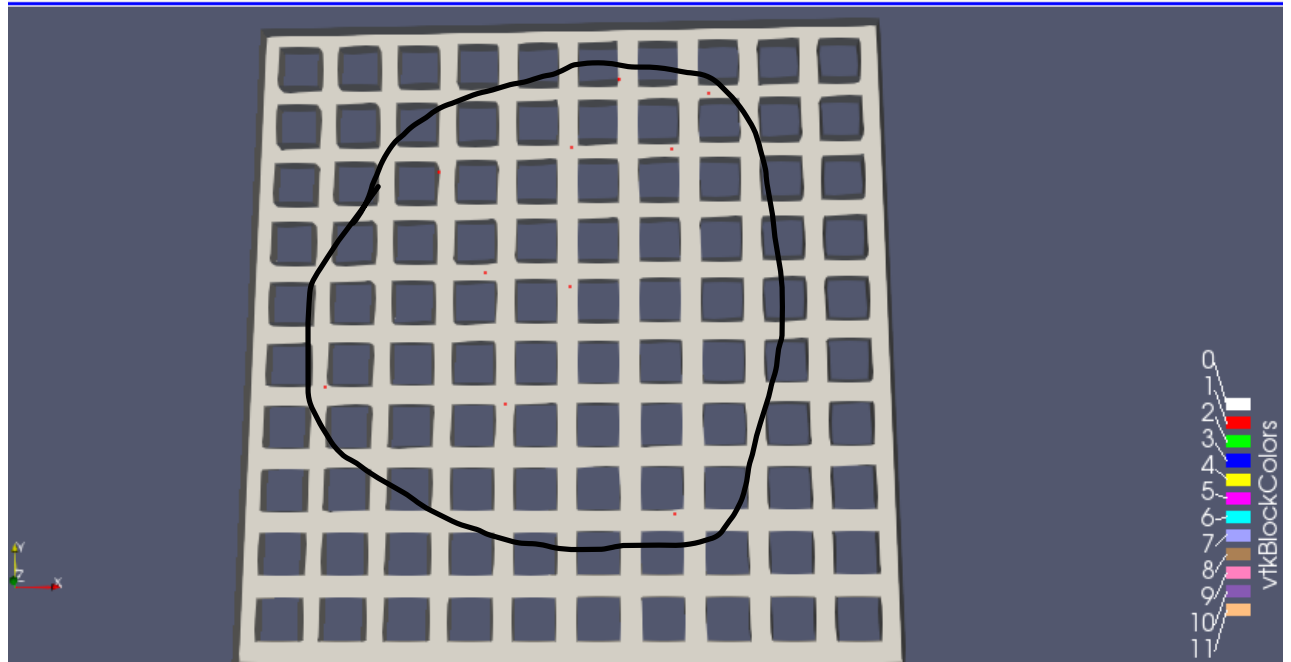
Εικόνα 1.1 6: Παράδειγμα τρέχουσας προσομοίωσης (Time=24,13.., Re100)

Στην συνέχεια με την εντολή paraFoam για την είσοδο στο Paraview μπορούμε να δούμε για κάθε χρονικό βήμα το που βρίσκονται τα σωματίδια στους αγωγούς του πλέγματος. Ενδεικτικές εικόνες είναι οι παρακάτω:



Εικόνα 1.1 7: Interdigitated Geometry (Time=20, Re=500)

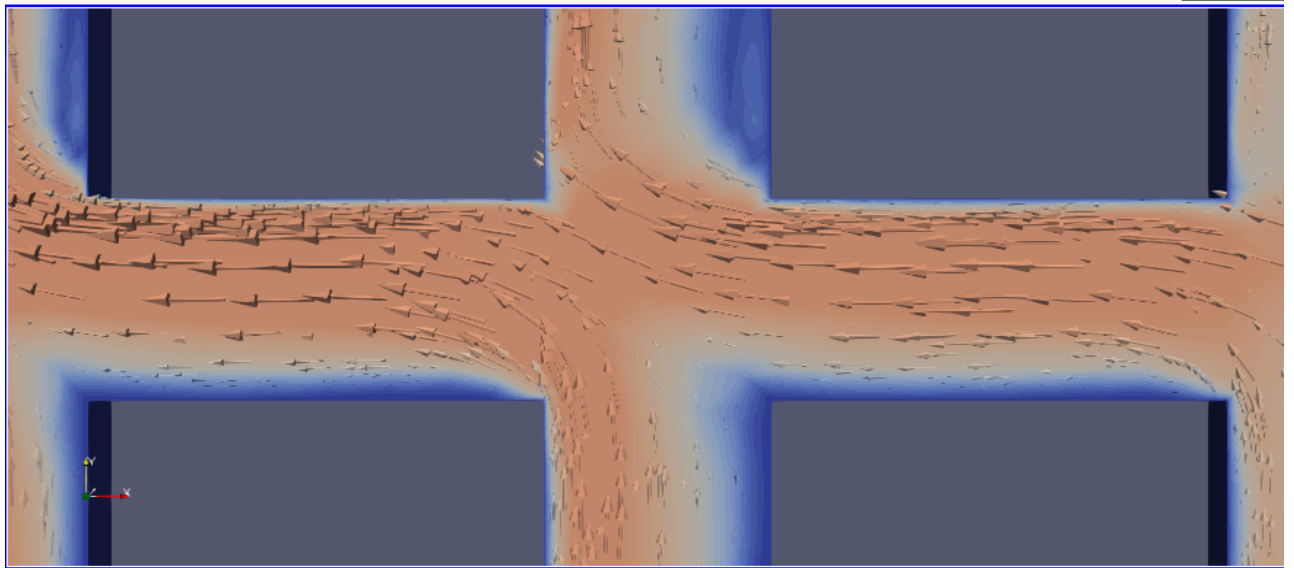
Στην παραπάνω εικόνα παρατηρούμε την θέση των σωματιδίων λίγο μετά την είσοδό τους στο πλέγμα σε χρόνο $T=20s$ για την προσομοίωση των $Re=500$.



Εικόνα 1.1 8: Interdigitated Geometry (Time=350, Re=500)

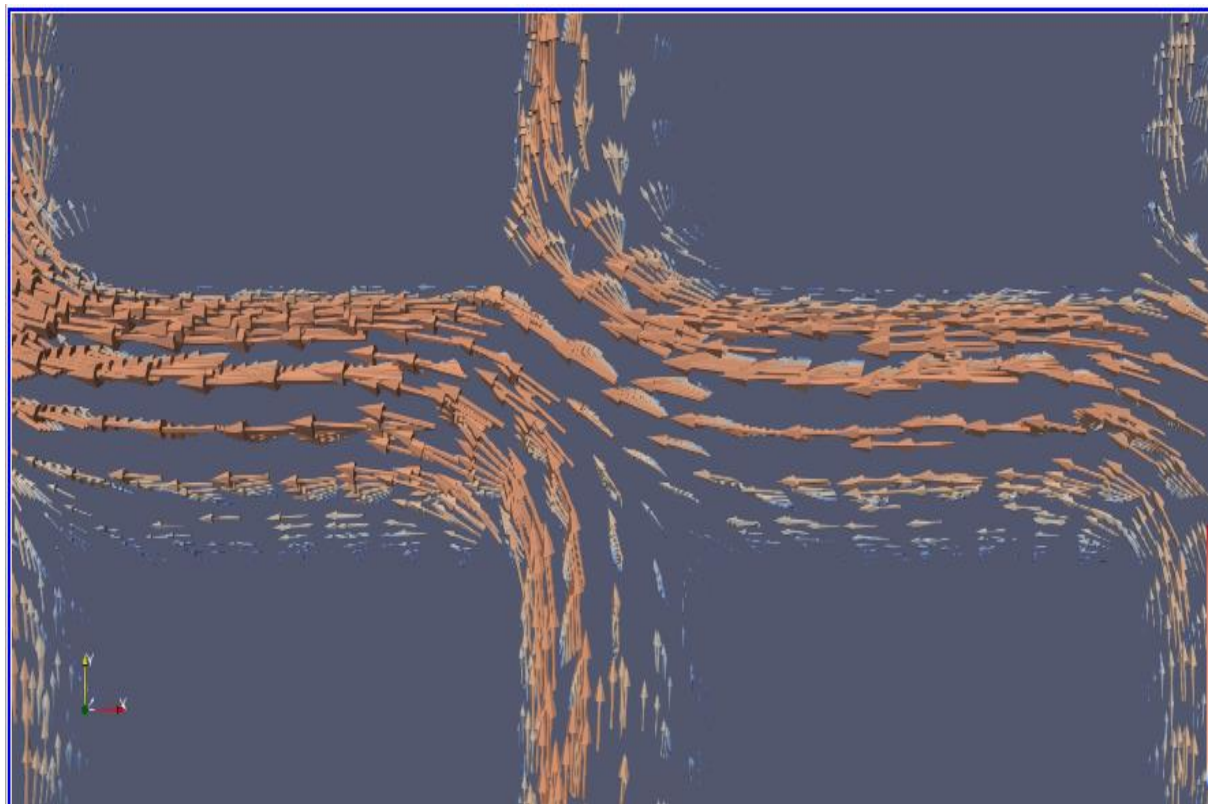
Όπως αναμέναμε στην παραπάνω εικόνα μετά από χρόνο $T=350s$ τα σωματίδια κινούνται εσωτερικά του πλέγματος της κυψέλης καυσίμου και κατευθύνονται προς την έξοδο (Vout).

Στο εσωτερικό των αγωγών του πλέγματος θα αντικρίσουμε καλύτερα το πεδίο ροής και την κατεύθυνση των διανυσμάτων ταχυτήτων στην διασταυρούμενη γεωμετρία. Όπως προαναφέραμε οι συνθήκες ροής είναι αποκλειστικά στρωτής (Laminar flow) και στα τοιχώματα και στην έξοδο της ροής η ταχύτητα είναι 0.



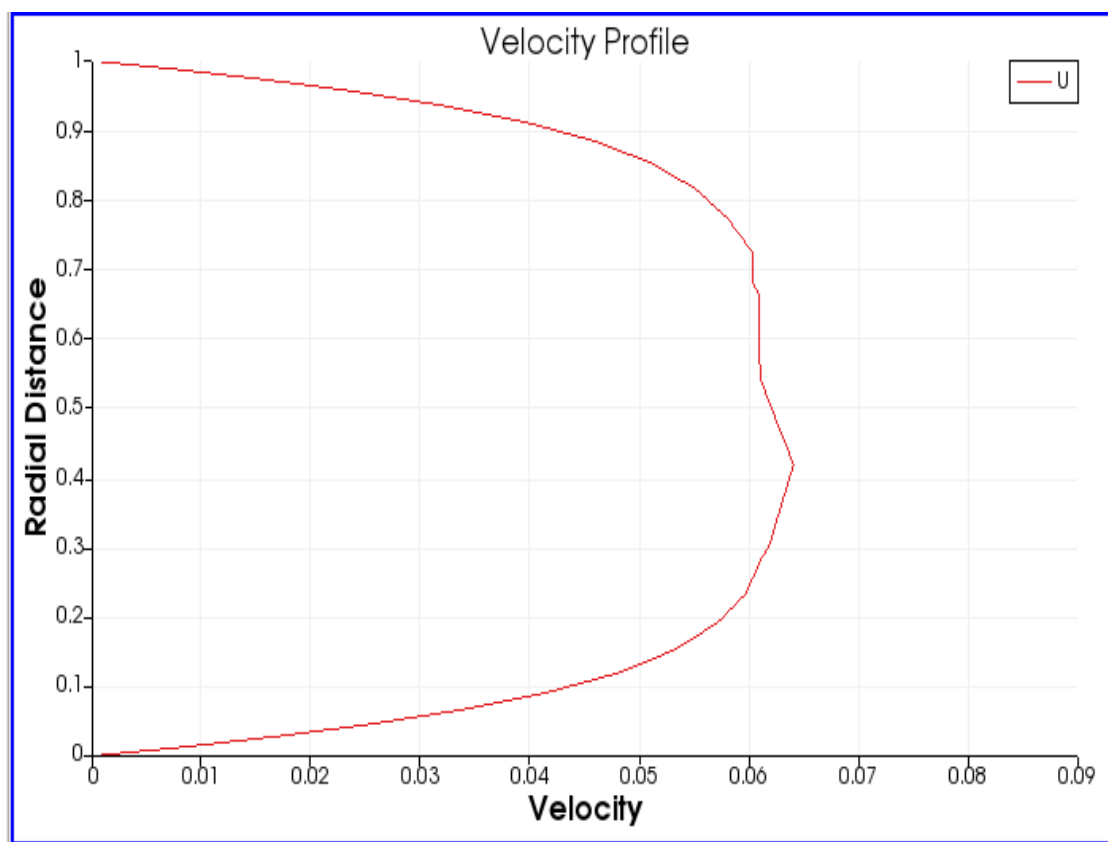
Εικόνα 1.1 9: Εστιασμένη όψη του προφίλ ταχύτητας στους αγωγούς (glyph vectors).

Η ταχύτητα όσο πιο κοντά βρίσκεται στα τοιχώματα αρχίζει και τείνει προς το μηδέν ενώ κεντρικά του αγωγού αυξάνεται ο ρυθμός ροής της όπως διακρίνουμε και από την παραπάνω εικόνα της εστιασμένης όψης του προφίλ της ταχύτητας.



Εικόνα 1.1 10: Εστιασμένη όψη του προφίλ ταχύτητας χωρίς τοιχώματα και απεικόνιση των διανυσμάτων των ταχυτήτων.

Γενικά η πλατφόρμα του OpenFoam χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του πεδίου ροής ,για τις διακριτές εξισώσεις για την κίνηση των νανοσωματιδίων οι οποίες βασίζονται στον νόμο του Νεύτωνα και την καταμέτρηση του χρόνου παραμονής των νανοσωματιδίων μέσα στο διασταυρούμενο γεωμετρικό πλέγμα ροής για διάφορες τιμές Reynolds.



Εικόνα 1.1 11: Απεικόνιση σε διάγραμμα του προφίλ ταχύτητας σε διάφορες τιμές αποστάσεων μέσα σε αγωγό.

Μέσω του Paraview έγινε η απεικόνιση του διαγράμματος του προφίλ ταχύτητας και με την βοήθεια του 'PlotOverLine' για τον σχεδιασμό της για κεντρικό αγωγό του πλέγματος, με την ταχύτητα να μειώνεται όσο πλησιάζουμε στα άκρα των τοιχωμάτων ενώ αντίθετα έχουμε αύξηση της ροής όσο απομακρυνόμαστε από αυτά. Η μηδενική ταχύτητα οφείλεται στις οριακές συνθήκες που θέσαμε στα τοιχώματα των αγωγών αλλά και στην έξοδο της ροής (Outlet).

6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η κατανομή της ροής που διερευνήσαμε για διαφορετικούς αριθμούς Reynolds μας έκανε να κατανοήσουμε σύμφωνα με τις προσομοιώσεις ότι με την αύξησή τους, ο χρόνος παραμονής τους στην κυψέλη καυσίμου αυξάνεται σταδιακά στις περισσότερες περιπτώσεις πιθανόν λόγω της μεγάλης ταχύτητας ροής στο εσωτερικό του συστήματος που είχε κυρίως ως αποτέλεσμα να προσκολλώνται στα τοιχώματα και την καθυστέρηση εξαγωγής τους, καθώς είχαμε και αποκλίσεις οι οποίες ίσως να οφείλονται στα μέσα και στον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε για την καταπόνηση της εργασίας.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο που παρατηρούμε είναι ότι η πτώση πίεσης είναι υψηλότερη για μεγάλους αριθμούς Reynolds εφόσον τα μεγέθη εξαρτώνται μεταξύ τους επειδή η δυναμική πίεση αυξάνεται ως τετράγωνο της ταχύτητας.

Η αύξηση της ταχύτητας του ρευστού μέσω της χρήσης νανοσωματιδίων αφήνει αρκετές υποσχέσεις θετικές για την τεχνολογία των κυψελών καυσίμου μπορεί να συμβάλει στην απόδοση, στην βελτιωμένη διανομή θερμότητας μέσα σ αυτούς αποτρέποντας την υπερθέρμανση ή υποθέρμανση και τέλος στην ελάττωση εκπομπών ρύπων.

Η κατανόηση του αριθμού Reynolds είναι μεγάλης και ζωτικής σημασίας σε τομείς όπως είναι η υδροδυναμική και η μηχανική των ρευστών. Οπότε είναι σημαντικό να ερευνηθεί περαιτέρω μελλοντικά η χρήση των νανοσωματιδίων στις κυψέλες καυσίμου στις διάφορες καταστάσεις ροής των ρευστών.

7.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ -ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

- Schmidt-Rohr, Klaus. “How Batteries Store and Release Energy: Explaining Basic Electrochemistry.” *Journal of Chemical Education* 95, no. 10 (October 9, 2018): 1801–10. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00479>
- “Διατριβή: Σύνθεση Νέων Υλικών - Νανοϋλικών: Εφαρμογές Τους Σαν Καταλύτες και Αντικαρκινικά.” <https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/35136#page/1/mode/2up>.
- “Ιστορικό των νανοϋλικών και της νανοτεχνολογίας - ECHA.” <https://euon.echa.europa.eu/el/url>.
- Καθηγητής, Επιβλέπων, Αθανάσιος Καναπίτσας. “Νανοτεχνολογία και εφαρμογές,” n.d. <http://www.eln.teilam.gr/labs/nanoelectronics/nanoelectronics-1.pdf>
- Καθηγητής, Επιβλέπων, Αθανάσιος Παπασταμούλης. ” Κυψέλες καυσίμου στην ηλεκτροπρόωση-μετατροπείς ισχύος του συστήματος” .pdf (hcg.gr)
- Καθηγητής, Επιβλέπων, Παντελής Μπίσκας. “Κυψέλες καυσίμου: Σύγχρονες τάσεις και προοπτικές” [Ρουμελιώτης Στυλιανός. Διπλωματική Εργασία. 2020.pdf \(auth.gr\)](#)

- Καθηγητής, Επιβλέπων, Κοσμάς Καββαδίας. “Μικροβιακές κυψέλες καυσίμου – Microbial fuel cells”
https://polynoe.lib.uniwa.gr/xmlui/bitstream/handle/11400/2129/Chalkou_51204315.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- A. Abul, J. Zhang, R. Steidl, G. Reguera and X. Tan ,2016, Microbial Fuel Cells: Control oriented Modeling and Experimental Validation
- James Larminie, Andrew Dicks: “Fuel Cell Systems Explained”, Wiley, 2003
- “Fuel Cells Advantages and Disadvantages in 2021 | Linqip,” March 22, 2021.
<https://www.linqip.com/blog/fuel-cells-advantages-and-disadvantages/>.
- “Κυψέλες Καυσίμου.”
http://www.cres.gr/energy_saving/biomixania/paragogi_energeias_kypseles_kaysimou.htm.
- Καθηγητής, Επιβλέπων, Ε.Ρογδάκης. “Αποδοτικότητα κυψέλης καυσίμου τηγμένων καρβιδίων” <https://www.zougla.gr/file.ashx?fid=3272562>
- Ölmez, Mehmet. “FUEL CELL SYSTEMS : THEORY AND APPLICATIONS,” n.d.
<https://acikerisim.deu.edu.tr/xmlui/bitstream/handle/20.500.12397/8518/202494.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Energy.gov. “Types of Fuel Cells.” <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>.
- Krumpelt, M, T. R Krause, J. D Carter, J. P Kopasz, and S Ahmed. “Fuel Processing for Fuel Cell Systems in Transportation and Portable Power

Applications.” *Catalysis Today* 77, no. 1 (December 1, 2002): 3–16.

[https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(02\)00230-4](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(02)00230-4).

- Fuel Cell & Hydrogen Energy Association. “Transportation.”
<https://www.fchea.org/transportation>.
- Karvelas, Evangelos. “A Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Analysis of an Anode Direct Methanol Fuel Cell”, 2012
- Myriallaki, Ioanna. “Development of Analytical Hydraulic models for PEM fuel cell anodes based on CFD simulations”, 2012
- Greenshields, Chris. “OpenFOAM v7 User Guide.” CFD Direct, July 10, 2019.
<https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v7/paraview/>.