ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη μηχανισμών χημικής κινητικής για ψυχρό πλάσμα ατμοσφαιρικής πίεσης

ΑΓΓΕΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

1059731

ΕΠΟΠΤΕΙΑ: ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ ΠΟΛΥΚΑΡΠΟΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών του

Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ/2024

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
Αγγελής Γεώργιος
© 2024 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε

από τον

ΑΓΓΕΛΗ ΓΕΩΡΓΙΟ

1059731

την Δευτέρα 08/07/2024

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Αεροναυτικής

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Αεροναυτικής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελέτη μηχανισμών χημικής κινητικής για ψυχρό πλάσμα ατμοσφαιρικής πίεσης

Αγγελής Γεώργιος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στην μελέτη της χημικής κινητικής ψυχρού πλάσματος και βασίζεται σε δύο προσεγγιστικές προσομοιώσεις μοντέλων ψυχρού πλάσματος σε ατμοσφαιρική πίεση. Αρχικά, αναλύονται ορισμένα θεωρητικά στοιχεία με κύριους πυλώνες τους εξής, τι είναι πλάσμα, σε ποιες κατηγορίες ανάγεται, ποιες μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του και ποιες είναι οι τεχνολογικές εφαρμογές του. Εν συνεχεία, εξηγείται το μοντέλο προσομοίωσης του πλάσματος, που στην δική μας περίπτωση είναι μονοδιάστατο και αφορά σφαίρες φορτίου. Έπειτα υλοποιείται το προαναφερθέν μοντέλο μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Matlab βασισμένο σε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις. Τέλος, παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα (διαγράμματα) που προέκυψαν από την υλοποίηση των δύο μοντέλων, εστιάζοντας στο πού συγκλίνουν και πού αποκλίνουν.

Λέξεις κλειδιά

Ψυχρό πλάσμα, ατμοσφαιρική πίεση, προσομοίωση, μοντέλο, χημική κινητική

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Αεροναυτικής

ABSTRACT

Plasma kinetics models for cold atmospheric pressure plasma

Angelis Georgios

This thesis focuses on the study of cold plasma kinetics, based on two approximate simulations of cold plasma models at atmospheric pressure. Initially, some theoretical elements are analyzed with the main pillars being the following, what exactly plasma is, what categories it is reduced to, what methods are used for its production and what are its technological applications. Next, the simulation model of the plasma is explained, which in our case is one-dimensional and concerns spheres of charge. Then the model is implemented through the Matlab programming language based on two different approaches. Finally, the results (diagrams) resulting from the implementation of the two models are listed and commented on, focusing on where they converge and where they diverge.

Key words
Cold plasma, atmospheric pressure, simulation, model, kinetics

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Αεροναυτικής

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών κατηγοριών του πλάσματος (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008)..... 19

Πίνακας 2 Χημικά είδη που χρησιμοποιεί το μοντέλο των Bourdon et al. 37

Πίνακας 3 Χημικά είδη που χρησιμοποιεί το μοντέλο των Jiang et al..... 38

Πίνακας 4 Αντιδράσεις που περιλαμβάνονται στο μοντέλο των Bourdon et al. 39

Πίνακας 5 Αντιδράσεις που περιλαμβάνονται στο μοντέλο των Jiang et al 40

Πίνακας 6 Ενδεικτική διάταξη του πίνακα που επιστρέφει η function «fileReader.m». 42

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1 Ολικό Ηλεκτρικό Πεδίο συναρτήσει της διάδοσης του μίγματος Bourdon et al ... 46

Διάγραμμα 2 Ολικό Ηλεκτρικό Πεδίο συναρτήσει της διάδοσης του μίγματος Jiang et al 47

Διάγραμμα 3 Συγκέντρωση Ηλεκτρονίων συναρτήσει της διάδοσης του μίγματος Bourdon et al 48

Διάγραμμα 4 Συγκέντρωση Ηλεκτρονίων συναρτήσει της διάδοσης του μίγματος Jiang et al ... 49

Διάγραμμα 5 Ταχύτητα διάδοσης συναρτήσει διάδοσης του μίγματος βάσει του μοντέλου Bourdon et al 51

Διάγραμμα 6 Ταχύτητα διάδοσης συναρτήσει διάδοσης του μίγματος βάσει του μοντέλου Jiang et al 52

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Στοιχεία από τα οποία αποτελείται το πλάσμα (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008) 16

Εικόνα 2 Δενδρόγραμμα διάκρισης κατηγοριών πλάσματος (Moszczynska J., Roszek K., Wisniewski M., Non-Thermal Plasma Application in Medicine- Focus on Reactive Species Involvement, International Journal of Molecular Sciences, 2023) 19

Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση μεθόδου εκκένωσης κορώνας (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008) 21

Εικόνα 4 Σχηματική απεικόνιση διάταξης πίδακα πλάσματος ατμοσφαιρικής πίεσης (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008) 23

Εικόνα 5 Σχηματική απεικόνιση μεθόδου απαλλαγής διηλεκτρικού φραγμού (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008)..... 24

Εικόνα 6 Σχηματική απεικόνιση μεθόδου απαλλαγής μικροκοίλων καθόδων (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008)**Error! Bookmark not defined.**

Εικόνα 7 Απεικόνιση σφαιρών φορτίου [A simple fluid model based on charged spheres for the simulation of atmospheric pressure plasma jets, 2023] 30

Εικόνα 8 Σχηματική απεικόνιση επικαλυπτόμενων σφαιρών συναρτήσει του λ [A simple fluid model based on charged spheres for the simulation of atmospheric pressure plasma jets,2023]. 32

Εικόνα 9 Εκτέλεση προγράμματος Bolsig+ 55

Εικόνα 10 Επιλογή βάσης δεδομένων IST Lisbon Cross 56

Εικόνα 11 Επιλογή αντιδράσεων από το IST Lisbon Cross 56

Εικόνα 12 Διαλογή αντιδράσεων του κάθε μοντέλου 57

Εικόνα 13 Επιλογή παραμέτρων αντιδράσεων 57

Εικόνα 14 Επιλογή αποτελεσμάτων 58

Εικόνα 15 Πίνακας αποτελεσμάτων αντιδράσεων 59

Contents

ΠΕΡΙΛΗΨΗ **5**

ABSTRACT **6**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ **7**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ **8**

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ **9**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ **14**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΛΑΣΜΑ **15**

1.1 ΟΡΙΣΜΌΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΆ ΣΤΟΙΧΕΊΑ **15**

1.2 ΒΑΣΙΚΈΣ ΙΔΙΌΤΗΤΕΣ ΠΛΆΣΜΑΤΟΣ **16**

1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΉ ΑΝΑΔΡΟΜΉ **16**

1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΊΕΣ ΔΙΆΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΆΣΜΑΤΟΣ **18**

1.4.1 Πλάσμα Υψηλής Θερμοκρασίας ή Θερμικό Πλάσμα **20**

1.4.2 Πλάσμα χαμηλής θερμοκρασίας ή Ψυχρό πλάσμα **20**

1.5 ΨΥΧΡΟ ΠΛΑΣΜΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (CAP) **21**

1.5.1 Μέθοδοι και Συνθήκες Δημιουργίας CAP **21**

1.5.2 Τεχνολογικές εφαρμογές για ψυχρό πλάσμα σε ατμοσφαιρική πίεση **25**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΕΥΣΤΟΥ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΕΣ ΣΦΑΙΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΙΔΑΚΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ 29

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ: 29

2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΌ ΜΟΝΤΈΛΟ 29

2.3 ΒΑΣΙΚΈΣ ΠΑΡΆΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΈΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΊΩΣΗΣ 34

ΚΕΦΆΛΑΙΟ 3: ΥΛΟΠΟΊΗΣΗ ΜΟΝΤΈΛΩΝ ΣΤΟ MATLAB 37

3.1 ΧΗΜΙΚΆ ΕΊΔΗ 37

3.1.1 Μοντέλο Bourdon et al. 37

3.1.2 Μοντέλο Jiang et al 38

3.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ 39

3.2.1 Function «readTheData» 40

3.2.2 Function «reactionRates.m» 42

3.2.3 Function «reactionRatesCumul.m» 43

3.2.4 Function «transEqsTrunc.m» 44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ MATLAB 45

4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ BOURDON ET AL & JIANG ET AL 45

4.2 ΔΙΑΓΡΆΜΜΑΤΑ ΟΛΙΚΟΎ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΎ ΠΕΔΊΟΥ 45

4.2.1 Διάγραμμα Ολικού Ηλεκτρικού Πεδίου βάσει μοντέλου Bourdon et al 45

4.2.2 Διάγραμμα Ολικού Ηλεκτρικού Πεδίου βάσει μοντέλου Jiang et al 46

4.2.3 Σύγκριση Διαγραμμάτων Ολικού Ηλεκτρικού Δυναμικού των δύο μοντέλων 47

4.3 ΔΙΑΓΡΆΜΜΑΤΑ ΣΥΓΚΈΝΤΡΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΊΩΝ 48

4.3.1 Διάγραμμα Συγκέντρωσης Ηλεκτρονίων βάσει μοντέλου Bourdon et al 48

4.3.2 Διάγραμμα Ολικού Συγκέντρωσης Ηλεκτρονίων βάσει μοντέλου Jiang et al 49

4.3.3 Σύγκριση Διαγραμμάτων Συγκέντρωσης Ηλεκτρονίων των δύο μοντέλων 49

4.4 ΔΙΆΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΎΤΗΤΑΣ ΔΙΆΔΟΣΗΣ 50

4.4.1 Διάγραμμα Ταχύτητας διάδοσης βάσει μοντέλου Bourdon et al..... 50

4.4.2 Διάγραμμα Ταχύτητας διάδοσης βάσει μοντέλου Jiang et al..... 51

4.4.3 Σύγκριση Διαγραμμάτων Ταχύτητας Διάδοσης των δύο μοντέλων..... 52

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΊΑ 53

ΠΑΡΆΡΤΗΜΑ 55

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών υπό την επίβλεψη και καθοδήγηση του Επίκουρου Καθηγητή του τμήματος κύριου Παπαδόπουλου Πολύκαρπου.

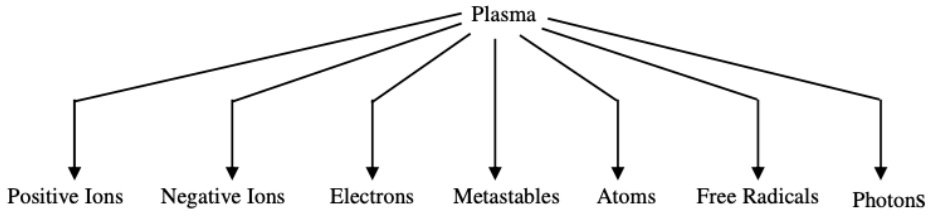
Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή, κύριο Πολύκαρπο Παπαδόπουλο, για όλη το χρόνο, την υπομονή, την καθοδήγηση και στήριξη κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της οικογένειάς μου και τους φίλους μου που σε όλο το διάστημα φοίτησής μου στο τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, με στήριξαν και με βοήθησαν να ολοκληρώσω και αυτό το κεφάλαιο της ζωής μου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΛΑΣΜΑ

1.1 ΟΡΙΣΜΌΣ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΆ ΣΤΟΙΧΕΊΑ

Το πλάσμα από πολλούς χαρακτηρίζεται ως η τέταρτη κατάσταση της ύλης. Αφορά μια κατάσταση κατά την οποία τα άτομα έχουν αποσυντεθεί σε αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια και θετικά φορτισμένα ιόντα τα οποία, αν και δεν είναι πλέον δεσμευμένα, συνεχίζουν και επηρεάζονται από τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία του άλλου. Αυτό το φαινόμενο πραγματοποιείται κατά βάση σε συνθήκες όπου η περιβάλλουσα θερμική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από τις δεσμευτικές ενέργειες ενός δομημένου συστήματος, δηλαδή σε συνθήκες όπου οι θερμοκρασίες είναι κοντά ή και μεγαλύτερες των ενεργειών ατομικού ιονισμού. Η νέα αυτή δομή, μετά την αποδέσμευση των ατόμων, που χαρακτηρίζεται από κινήσεις εξαιρετικά ισχυρές και πολύπλοκες, ονομάζεται πλάσμα.

Οποιοδήποτε ιονισμένο αέριο δεν μπορεί να ονομαστεί πλάσμα, φυσικά. υπάρχει πάντα κάποιος μικρός βαθμός ιονισμού σε οποιοδήποτε αέριο. Ένα πλάσμα είναι ένα σχεδόν ουδέτερο αέριο φορτισμένων και ουδέτερων σωματιδίων που παρουσιάζει συλλογική συμπεριφορά. Προέρχεται από τα ελληνικά πλάσμα, που σημαίνει κάτι χυτευμένο ή κατασκευασμένο.. Λόγω της συλλογικής συμπεριφοράς, ένα πλάσμα δεν τείνει να συμμορφώνεται με εξωτερικές επιρροές. Είναι περισσότερο ή λιγότερο ένα ηλεκτρισμένο αέριο με χημικά αντιδραστικά μέσα που αποτελείται από μεγάλο αριθμό διαφορετικών ειδών όπως ηλεκτρόνια, θετικά και αρνητικά ιόντα, ελεύθερες ρίζες, άτομα αερίου και μόρια στο έδαφος ή οποιαδήποτε υψηλότερη κατάσταση οποιασδήποτε μορφής διεγερμένων ειδών, όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 1 Στοιχεία από τα οποία αποτελείται το πλάσμα (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008)

1.2 ΒΑΣΙΚΈΣ ΙΔΙΌΤΗΤΕΣ ΠΛΆΣΜΑΤΟΣ

Το πλάσμα είναι η υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση της ύλης. Αποτελείται από μια συλλογή ηλεκτρονίων ελεύθερης κίνησης, θετικών ιόντων και ουδέτερων σωματιδίων. Αν και σχετίζεται στενά με την αέρια φάση στο ότι δεν έχει καθορισμένο σχήμα ή όγκο, διαφέρει με διάφορους τρόπους:

1. Το πλάσμα παρουσιάζει εξαιρετικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.
2. Το πλάσμα επηρεάζεται ευκολότερα από ηλεκτρομαγνητικά πεδία παρά από βαρυτικά.
3. Λόγω της κίνησης τόσο των ηλεκτρονίων όσο και των ιόντων στο πλάσμα, προκύπτει παραγωγή των δικών του ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.
4. Λόγω της εντελώς χαοτικής και εξαιρετικά ενεργητικής κατάστασης των συστατικών σωματιδίων του πλάσματος, το πλάσμα παράγει τη δική του ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
5. Για να παραχθεί και να διατηρηθεί η εξαιρετικά ενεργητική κατάσταση που υπάρχει μέσα στο πλάσμα, πρέπει να υπάρχει συνεχής παροχή ενέργειας.

1.3 ΙΣΤΟΡΙΚΉ ΑΝΑΔΡΟΜΉ

Η πρώτη αναφορά του όρου « ιονισμένο αέριο» πραγματοποιήθηκε το έτος 1927 από τον βραβευμένο με Νόμπελ Αμερικανό χημικό Irving Langmuir. Ουσιαστικά παρομοίασε τον τρόπο με τον οποίο το πλάσμα του αίματος μεταφέρει κόκκινα και λευκά αιμοσφαίρια με αυτόν τον οποίο ένα ηλεκτρικό υγρό μεταφέρει ηλεκτρόνια και ιόντα. Θεωρείται από πολλούς πως ο

Langmuir είναι υπεύθυνος για τη γένεση της φυσικής του πλάσματος. Μέσω της έρευνας του Langmuir τέθηκαν τα θεμέλια για τη θεωρητική βάση των περισσότερων τεχνικών επεξεργασίας πλάσματος για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.
Ως επακόλουθο της έρευνας του Langmuir η έρευνα που αφορούσε το πλάσμα εξελίχθηκε προς 5 άξονες:

1) Η ανακάλυψη της ιονόσφαιρας της Γης μέσω της ανάπτυξης της ραδιοφωνικής μετάδοσης. Η ιονόσφαιρα της Γης αποτελείται από ένα στρώμα μερικώς ιονισμένου αερίου στην ανώτερη ατμόσφαιρα που αντανακλά τα ραδιοκύματα και είναι υπεύθυνη για το γεγονός ότι τα ραδιοσήματα μπορούν να επανεισαχθούν όταν ο πομπός είναι πάνω από τον ορίζοντα. Για να κατανοήσουν και ενδεχομένως να διορθώσουν ορισμένες από τις ελλείψεις στη ραδιοεπικοινωνία, διάφοροι επιστήμονες, όπως ο E.V. Appleton και ο K. G. Budden, ανέπτυξαν συστηματικά τη θεωρία της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω ενός μη ομοιόμορφου μαγνητισμένου πλάσματος.
2) Η αναγνώριση από πληθώρα αστροφυσικών πως το μεγλύτερο μέρος του σύμπαντος είτε αποτελείται είτε συνυπάρχει με το πλάσμα και ως εκ τούτου αποτελεί αδήριτη ανάγκη η καλύτερη κατανόηση της φυσικής του πλάσματος για την καλύτερη κατανόηση αστροφυσικών φαινομένων. Πρωτοπόρο σε αυτόν τον τομέα αποτέλεσε ο ηλεκτρολόγος μηχανικός και φυσικός Hannes Alfven. Ο Hannes Alfven ανέπτυξε τη δεκαετία του 1940 τη θεωρία της μαγνητοϋδροδυναμικής, ή MHD, στην οποία το πλάσμα αντιμετωπίζεται ουσιαστικά ως αγώγιμο υγρό. Η συγκεκριμένη θεωρία χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση και επεξήγηση ποικίλων φαινομένων αστροφυσικής (πχ. Ηλιακές κηλίδες, ηλιακός άνεμος κ.α.)
3) Η δημιουργία βόμβας Υδρογόνου το έτος 1952 ήταν η αφετηρία για τη δημιουργία ενδιαφέροντος για την ελεγχόμενη θερμοπυρηνική σύντηξη ως μια πιθανή πηγή καθαρής ενέργειας για το μέλλον. Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 και στις αρχές της δεκαετίας του 1960 δημοσιεύθηκαν εξαιρετικά σημαντικά άρθρα για τη θερμοπυρηνική σύντηξη, τα οποία ασχολούνταν με την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ένα θερμοπυρηνικό πλάσμα μπορεί να παγιδευτεί, στις περισσότερες περιπτώσεις από ένα μαγνητικό πεδίο,

και τη διερεύνηση των πολλών ασταθειών πλάσματος που μπορεί να του επιτρέψουν να διαφύγει.

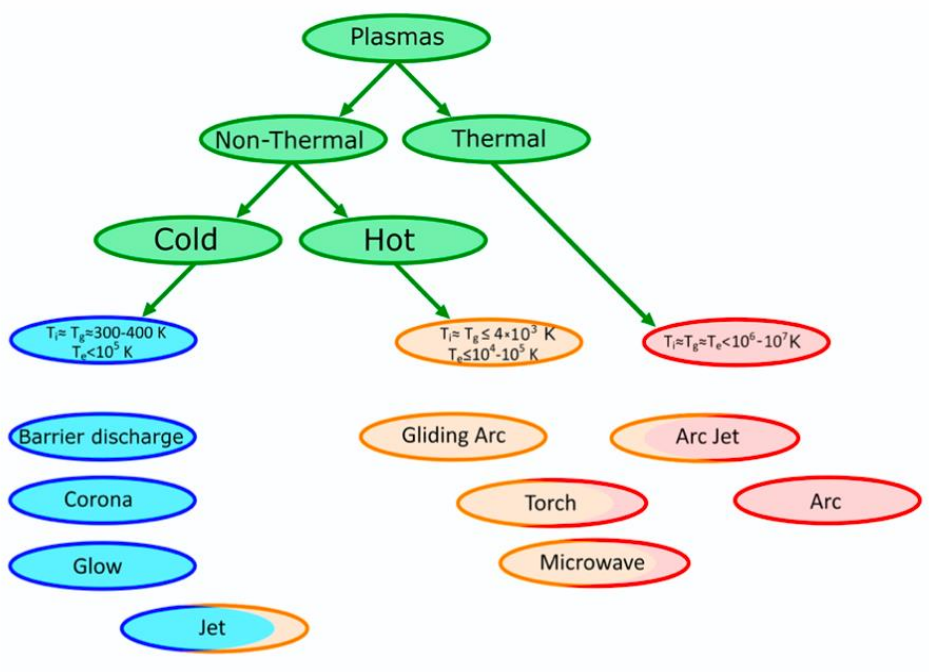
4) Η ανακάλυψη των ζωνών ακτινοβολίας Βαν Άλεν που περιβάλλουν τη γη από τον Τζέιμς Βαν Άλεν σηματοδότησε την έναρξη της συστηματικής εξερεύνησης της μαγνητόσφαιρας της Γης μέσω δορυφόρου και άνοιξε το πεδίο της φυσικής του διαστημικού πλάσματος.
5) Η ανάπτυξη λέιζερ υψηλής ισχύος στη δεκαετία του 1960 άνοιξε το πεδίο της φυσικής πλάσματος λέιζερ. Όταν μια δέσμη λέιζερ υψηλής ισχύος χτυπά έναν στερεό στόχο, το υλικό αφαιρείται αμέσως και σχηματίζεται πλάσμα στο όριο μεταξύ της δέσμης και του στόχου. Τα πλάσμα λέιζερ τείνουν να έχουν αρκετά ακραίες ιδιότητες (π.χ. πυκνότητες χαρακτηριστικές των στερεών) που δεν βρίσκονται σε πιο συμβατικά πλάσμα.

1.4 ΚΑΤΗΓΟΡΊΕΣ ΔΙΆΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΛΆΣΜΑΤΟΣ

Η πιο συνήθης κατηγοριοποίηση όπου μπορεί να διακριθεί το πλάσμα είναι σε δύο κύριες ομάδες. Το πλάσμα υψηλής θερμοκρασίας ή σύντηξης και το πλάσμα χαμηλής θερμοκρασίας ή εκκένωσης αερίων. Μια τυπική ταξινόμηση και παράμετροι διαφορετικών ειδών πλάσματος δίνεται στον πίνακα 1. Το πλάσμα υψηλής θερμοκρασίας υποδηλώνει ότι όλα τα είδη (ηλεκτρόνια, ιόντα και ουδέτερα είδη) βρίσκονται σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Το πλάσμα χαμηλής θερμοκρασίας υποδιαιρείται περαιτέρω σε θερμικό πλάσμα, το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση τοπικής θερμικής ισορροπίας (LTE), και μη θερμικό πλάσμα (NTP), που ονομάζεται επίσης πλάσμα μη ισορροπίας ή ψυχρό πλάσμα. Στον πίνακα διαφαίνονται τα εύρη θερμοκρασιών στα οποία επιτυγχάνεται η κάθε μορφή πλάσματος καθώς και επιγραμματικά βασικές εφαρμογές αυτών.

Plasma	State	Example
High temperature plasma (Equilibrium plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_g, T_p = 10^6 - 10^8 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Laser fusion plasma
Low temperature plasma		
Thermal plasma (Quasi-equilibrium plasma)	$T_e \approx T_i \approx T_g \leq 2\times10^4 K$ $n_e \geq 10^{20} m^{-3}$	Arc plasma, plasma torches, RF inductively coupled discharges
Non thermal plasma (Non-equilibrium plasma)	$T_e >> T_i \approx T_g = 300.....10^3 K$ $n_e \approx 10^{10} m^{-3}$	Glow, corona, APPJ, DBD, MHCD, OAUGDP, plasma needle etc

Πίνακας 1 Συγκεντρωτικός πίνακας βασικών κατηγοριών του πλάσματος (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008)



Εικόνα 2 Δενδρόγραμμα διάκρισης κατηγοριών πλάσματος (Moszczynska J., Roszek K., Wisniewski M., Non-Thermal Plasma Application in Medicine- Focus on Reactive Species Involvement, International Journal of Molecular Sciences, 2023)

1.4.1 Πλάσμα Υψηλής Θερμοκρασίας ή Θερμικό Πλάσμα

Το βασικό στοιχείο όπου χαρακτηρίζει ένα θερμικό πλάσμα (ΤΡ) χαρακτηρίζονται από ισορροπία ή σχεδόν ισότητα μεταξύ ηλεκτρονίων, ιόντων και ουδέτερων. Οι πιο συνήθεις χρησιμοποιούμενες συσκευές παραγωγής θερμικού πλάσματος είναι αυτές που παράγουν πυρσούς πλάσματος και συσκευές μικροκυμάτων. Οι πηγές αυτές παράγουν υψηλή ροή θερμότητας και χρησιμοποιούνται κυρίως σε τομείς όπως η επεξεργασία υλικών πλάσματος και επεξεργασία αποβλήτων με πλάσμα. Η υψηλή θερμοκρασία του TPs μπορεί να επεξεργαστεί ακόμη και τα πιο ανυπόμονα απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των αστικών στερεών, τοξικών, ιατρικών, βιολογικών κινδύνων, βιομηχανικών και πυρηνικών αποβλήτων σε στοιχειώδη μορφή, μειώνοντας τελικά τη ρύπανση του περιβάλλοντος που προκαλείται λόγω αυτών. Αλλά για αρκετές τεχνολογικές εφαρμογές, Το χαρακτηριστικό υψηλής θερμοκρασίας του TPs δεν απαιτείται ούτε είναι επιθυμητό, και σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται ακόμη και απαγορευτικό. Σε τέτοιες περιοχές εφαρμογής, τα κρύα πλάσματα γίνονται πιο κατάλληλα.

1.4.2 Πλάσμα χαμηλής θερμοκρασίας ή Ψυχρό πλάσμα

Ως ψυχρό πλάσμα αναφέρεται το πλάσμα όπου το μεγαλύτερο μέρος της συζευγμένης ηλεκτρικής ενέργειας διοχετεύεται κυρίως στο συστατικό ηλεκτρονίων του πλάσματος, παράγοντας έτσι ενεργητικά ηλεκτρόνια αντί να θερμαίνει ολόκληρο το ρεύμα αερίου, ενώ τα ιόντα πλάσματος και τα ουδέτερα συστατικά παραμένουν σε ή κοντά σε θερμοκρασία δωματίου. Τα βασικά χαρακτηριστικά του ψυχρού πλάσματος συμπεριλαμβάνουν την ισχυρή θερμοδυναμική φύση μη ισορροπίας και χαμηλή θερμοκρασία αερίου.

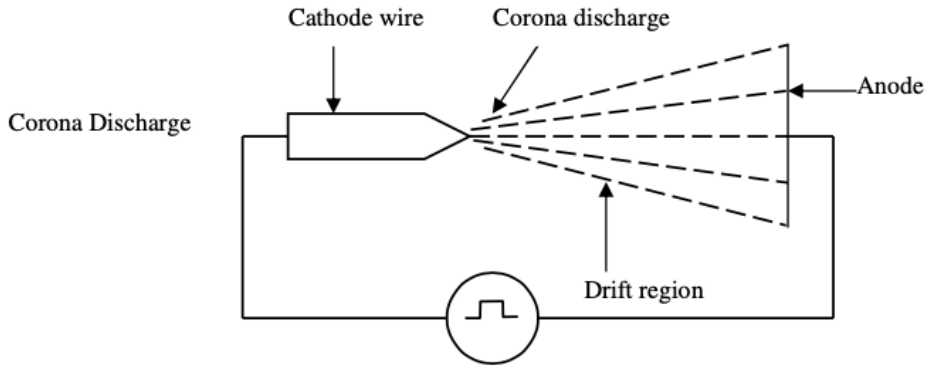
1.5 ΨΥΧΡΟ ΠΛΑΣΜΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (CAP)

1.5.1 Μέθοδοι και Συνθήκες Δημιουργίας CAP

Για την παραγωγή ΨΑΠ (Ψυχρό Ατμοσφαιρικό Πλάσμα) υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι. Παρακάτω θα αναλυθούν συνοπτικά οι τρεις αυτές εργαστηριακές μέθοδοι, που πραγματοποιούνται σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης. Διαφόρων τύπου αέρια μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή του πλάσματος με κύρια το He και το N_2.

1) Εκκένωση κορώνας (corona discharge)

   Η πρώτη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ΨΑΠ ήταν η εκκένωση κορώνας. Υπάρχουν διάφορες μορφές αυτές τις μεθόδου που εξαρτώνται από την πολικότητα του πεδίου και τη γεωμετρική διαμόρφωση του ηλεκτροδίου. Αυτός ο τύπος εκκένωσης χαρακτηρίζεται από ένα ασύμμετρο ζεύγος ηλεκτροδίων και προκύπτει από το ηλεκτρικό πεδίο που περιβάλλει ανομοιογενείς διατάξεις ηλεκτροδίων που τροφοδοτούνται με συνεχή ή παλμική τάση συνεχούς ρεύματος. Οι κορώνες είναι επομένως μη ομοιόμορφες εκκενώσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή υψηλού πεδίου κοντά στο αιχμηρό ηλεκτρόδιο που απλώνεται προς το επίπεδο ηλεκτρόδιο. Αυτό το φαινόμενο τοπικής διάσπασης ονομάζεται εκκένωση κορώνας.

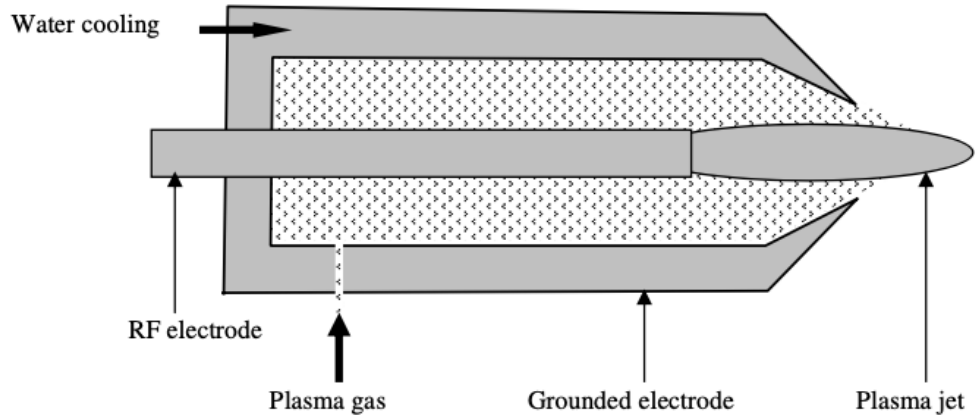


Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση μεθόδου εκκένωσης κορώνας (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008)

Η πιο σημαντική μεγάλης κλίμακας εφαρμογή της εκκένωσης κορώνας είναι σε ηλεκτροστατικούς κατακρημνιστές (ESP), οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη συλλογή σκόνης σε πολλά βιομηχανικά αέρια. Εκτός από το ESP, οι εκκενώσεις κορώνας χρησιμοποιούνται επίσης στον καθαρισμό του νερού, στην ηλεκτροφωτογραφία, στη μηχανή αντιγραφής, στους εκτυπωτές και στο πιστόλι ψεκασμού υγρού και στην επίστρωση σκόνης. Ωστόσο, η περιορισμένη περιοχή και η εγγενής μη ομοιομορφία έχουν περιορίσει την εφαρμογή τους στην επεξεργασία υλικών.

2) Πίδακας πλάσματος ατμοσφαιρικής πίεσης (Atmospheric Pressure Plasma Jet)

Ένα άλλο είδος εκκένωσης ικανό να παράγει μη θερμικό πλάσμα σε ατμοσφαιρική πίεση είναι ο πίδακας πλάσματος ατμοσφαιρικής πίεσης, που αναπτύχθηκε από τους Jeong και Park αποτελείται από δύο ομόκεντρα ηλεκτρόδια μέσω των οποίων ρέει ένα μείγμα ηλίου, οξυγόνου ή άλλων αερίων. Σε αυτή τη διάταξη, το εσωτερικό ηλεκτρόδιο συνδέεται με ισχύ ραδιοσυχνοτήτων 13,56 MHz σε τάση μεταξύ 100-250V και το εξωτερικό ηλεκτρόδιο γειωμένο. Εφαρμόζοντας μια δύναμη RF, η εκκένωση αναφλέγεται και λειτουργεί σε ένα απόθεμα τροφοδοτούμενου αερίου, το οποίο ρέει μεταξύ ενός εξωτερικού γειωμένου, κυλινδρικού ηλεκτροδίου και ενός κεντρικού ηλεκτροδίου και παράγει ένα ρεύμα αποβλήτων αποχέτευσης υψηλής ταχύτητας των ιδιαίτερα αντιδραστικών χημικών ειδών. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται μέσω της κίνησης των κεντρικών ηλεκτροδίων, τα οποία υφίστανται ανελαστικές συγκρούσεις με το αέριο τροφοδοσίας, παράγοντας μόρια διεγερμένης κατάστασης, άτομα, ελεύθερες ρίζες και πρόσθετα ζεύγη ιόντων-ηλεκτρονίων. Μόλις το αέριο βγει από τον όγκο εκκένωσης, τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια χάνονται γρήγορα με επανένωση, αλλά τα γρήγορα ρέοντα απόβλητα εξακολουθούν να περιέχουν ουδέτερα μετασταθή είδη και ρίζες. Η θερμοκρασία αερίου της εκκένωσης είναι τόσο χαμηλή όσο 50°C, επιτρέποντάς του να επεξεργάζεται ευαίσθητες επιφάνειες χωρίς ζημιά, ή τόσο υψηλή όσο 300°C, επιτρέποντας αυτό για να μεταχειριστεί τις γερές επιφάνειες πολύ πιο επιθετικά.

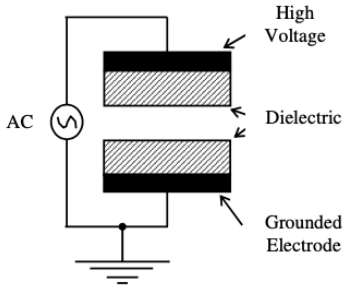


Εικόνα 4 Σχηματική απεικόνιση διάταξης πίδακα πλάσματος ατμοσφαιρικής πίεσης (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008)

Αυτή η τεχνολογία δείχνει υποσχέσεις για χρήση σε εφαρμογές υλικών που τώρα περιορίζονται στο κενό. Αυτά τα χαρακτηριστικά δίνουν στο APPJ τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών. Έχει σημαντική χρήση στην επεξεργασία υλικών, για παράδειγμα, εφαρμογές που κυμαίνονται από την χαρακτική πολυαμιδίου, βολφραμίου, Ταντάλου και διοξειδίου του πυριτίου καθώς και για την κατάθεση φιλμ διοξειδίου του πυριτίου με υποβοηθούμενη από πλάσμα χημική εναπόθεση ατμών. Η ταχεία ροή των αντιδραστικών ειδών στην τεχνολογία APPJ χρησιμοποιείται επίσης σε εφαρμογές όπως η απολύμανση υλικών που έχουν χημικούς και βιολογικούς παράγοντες πολέμου και στην αφαίρεση ραδιονουκλεϊδίων από επιφάνειες και εξοπλισμό. Επιπλέον, χρησιμοποιείται επίσης για να καθαρίσει τα μεγάλα βιομηχανικά μέρη αποτελεσματικότερα από τους διαλύτες αποστείρωση των χειρουργικών και οδοντικών εξοπλισμών και των επιφανειών νοσοκομείων και αφαίρεση του χρώματος από το τούβλο, που καθιστά το αποτελεσματικό για την αφαίρεση γκράφιτι και στη βιομηχανία κλωστοϋφαντουργίας.

3) Απαλλαγή διηλεκτρικού φραγμού (Dielectric barrier discharge)

Η εκκένωση διηλεκτρικού φραγμού, που αναφέρεται επίσης ως εκκένωση φραγμού ή αθόρυβη εκκένωση, είναι ένας συγκεκριμένος τύπος εκκένωσης εναλλασσόμενου ρεύματος, ο οποίος παρέχει ένα ισχυρό θερμοδυναμικό πλάσμα μη ισορροπίας σε Ατμοσφαιρική πίεση και σε μέτρια θερμοκρασία αερίου. Παράγεται σε μια διάταξη που αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, τουλάχιστον ένα από τα οποία καλύπτεται με ένα διηλεκτρικό στρώμα τοποθετημένο στην τρέχουσα διαδρομή τους μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων. Η παρουσία ενός ή περισσοτέρων μονωτικών στρωμάτων πάνω/ή μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων που τροφοδοτούνται είναι ένας από τους ευκολότερους τρόπους για να σχηματιστεί εκκένωση ατμοσφαιρικής πίεσης χωρίς ισορροπία. Στα DBDs το ηλεκτρόδιο και η εκκένωση διαχωρίζονται από ένα διηλεκτρικό φράγμα, το οποίο εξαλείφει τη χάραξη και τη διάβρωση των ηλεκτροδίων. δεν μπορεί να λειτουργήσει με τάση DC επειδή η χωρητική σύζευξη του διηλεκτρικού απαιτεί εναλλασσόμενη τάση για την κίνηση ενός ρεύματος μετατόπισης. Μια τάση εναλλασσόμενου ρεύματος με πλάτος 1-100 kV και μια συχνότητα από τη συχνότητα γραμμής σε αρκετά MHz εφαρμόζεται σε διαμορφώσεις DBD. Το ψυχρό πλάσμα DBD μπορεί να παραχθεί σε διάφορα μέσω ιονισμού με ηλεκτρική εκκένωση υψηλής συχνότητας και υψηλής τάσης.



Εικόνα 5 Σχηματική απεικόνιση μεθόδου απαλλαγής διηλεκτρικού φραγμού (Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K. Atmospheric Non Thermal Plasma Sources, 2008)

Οι τεχνολογίες DBD έχουν απίστευτο δυναμικό και χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεγάλο αριθμό τεχνικών εφαρμογών. Το πλεονέκτημα της DBD έναντι άλλων εκκενώσεων έγκειται στην επιλογή να λειτουργεί με μη θερμικό πλάσμα σε Ατμοσφαιρική πίεση και σε

συγκριτικά απλή κλίμακα-μέχρι μεγάλες διαστάσεις. Αρχικά, αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή όζοντος για την επεξεργασία πόσιμου νερού. Από τότε ο αριθμός των βιομηχανικών εφαρμογών αυτού του τύπου απαλλαγής έχει δείξει τεράστια ανάπτυξη. Εκτός από τη σύνθεση όζοντος, σήμερα το φαινόμενο DBD στα αέρια χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή της ακτινοβολίας excimer στις φασματικές περιοχές UV / VUV, επεξεργασία επιφάνειας, στον τομέα της προστασίας του περιβάλλοντος, για την άντληση των λέιζερ του CO2, τον έλεγχο της ρύπανσης, τις διάφορες διαδικασίες απόθεσης λεπτών ταινιών, στη βιομηχανία κλωστοϋφαντουργίας, στην επιτροπή επίδειξης πλάσματος και σε διάφορες άλλες τεχνολογικές διαδικασίες στην επιστήμη και τη βιομηχανία.

1.5.2 Τεχνολογικές εφαρμογές για ψυχρό πλάσμα σε ατμοσφαιρική πίεση

Το ψυχρό ατμοσφαιρικό πλάσμα καταλαμβάνει συνεχώς περισσότερο έδαφος κυρίως σε περιοχές της βιοιατρικής, δερματολογίας και ογκολογίας. Τα τελευταία χρόνια, πληθώρα μελετών έχουν διεξαχθεί, με τα αποτελέσματά τους να είναι αρκετά ενθαρρυντικά. Ακολουθούν οι πιο βασικές εφαρμογές του ΨΑΠ.

1) Εφαρμογές στη δερματολογία

Ο τομέας κλινικής εφαρμογής στην ιατρική πλάσματος που έχει μελετηθεί από το μεγαλύτερο μέρος της επιστημονικής κοινότητας είναι οι θεραπείες που σχετίζονται με την δερματολογία. Έχει παρατηρηθεί πως μέσω της χρήσης ΨΑΠ προκύπτουν πολλαπλά οφέλη με κύρια από αυτά την επιταχυνόμενη επούλωση πληγών, την απολύμανση, την εξάλειψη της ατοπικής δερματίτιδα, την εξομάλυνση ρυτίδων, την επεξεργασία σημαδιών κ.α. Υπάρχουν διάφοροι πιθανοί μηχανισμοί δράσης για κάθε μία από αυτές τις εφαρμογές.

Η υπόθεση που έχει επικρατήσει είναι ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που υπάρχουν σε συσκευές ψυχρού πλάσματος μπορεί να διεγείρουν την αγγειογένεση στην στοχευόμενη περιοχή, η οποία θα μπορούσε να αποδειχθεί σημαντική για μια σειρά από εφαρμογές που σχετίζονται με την

δερματολογία. Μηχανιστικές in vitro μελέτες έχουν δείξει ότι η έκθεση στο ΨΑΠ έχει ως αποτέλεσμα αυξημένη κινητικότητα τόσο στα κερατινοκύτταρα όσο και στα ινώδη κύτταρα λόγω της μεταβλημένης ρύθμισης του Cx43, μιας πρωτεΐνης διακένου που αναστέλλει τη μετανάστευση των κυττάρων. Τα στοιχεία αυξημένου κυτταρικού πολλαπλασιασμού και αντιβακτηριακών επιδράσεων των θεραπειών μετανάστευσης ΨΑΠ είναι επίσης πιθανό να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα αυτών των θεραπειών.

2) Εφαρμογές στην ογκολογία

Η θεραπεία του καρκίνου είναι ένας άλλος σημαντικός τομέας έρευνας στον τομέα της ιατρικής πλάσματος. Η πλειοψηφία αυτών των μελετών έχει διεξαχθεί χρησιμοποιώντας κυτταρικές σειρές ή μεθόδους θεραπείας in vitro. κυτταρικές σειρές για ηπατώματα , λευχαιμία, όγκοι του εγκεφάλου, και αρκετοί άλλου τύπου καρκίνοι, επηρεάζονται έντονα από θεραπείες ψυχρού πλάσματος. Η πλειοψηφία αυτών των καρκινικών κυτταρικών σειρών παράγει συστατικά χαμηλά επίπεδα υπεροξειδίου του υδρογόνου στο νανομοριακό εύρος. Ωστόσο, τα υπερφυσιολογικά επίπεδα υπεροξειδίου του υδρογόνου που εισάγονται από τις θεραπείες ΨΑΠ είναι ικανά να μειώσουν τον πολλαπλασιασμό και ακόμη και να προκαλέσουν απόπτωση στις καρκινικές κυτταρικές σειρές. Επιπλέον, έχει υποτεθεί ότι τα υψηλότερα επίπεδα βασικού H2O2 εντός των καρκινικών κυττάρων είναι υπεύθυνα για την ικανότητα του ψυχρού πλάσματος να προκαλεί επιλεκτικά απόπτωση σε καρκινικά κύτταρα έναντι υγιών κυττάρων ξενιστών. Μια εναλλακτική υπόθεση για την ευαισθησία των καρκινικών κυττάρων στο ΨΑΠ πάνω από τα υγιή κύτταρα δείχνει το μειωμένο επίπεδο χοληστερόλης στις μεμβράνες των καρκινικών κυττάρων, γεγονός που διευκολύνει τον σχηματισμό πόρων στην κυτταρική μεμβράνη. Έτσι, είναι ευκολότερο να εισαχθούν οι χημικές επιδράσεις των επεξεργασιών ΨΑΠ.

Αν και οι θεραπείες με ΨΑΠ που στοχεύουν σε αντικαρκινικές θεραπείες έχουν σε μεγάλο βαθμό χρησιμοποιηθεί για επιφανειακούς ή δερματικούς όγκους, ορισμένα μοντέλα έχουν δείξει ότι οι χημικές επιδράσεις που δημιουργούνται από τις θεραπείες πλάσματος έχουν την ικανότητα να εξαπλώνονται και να διασκορπίζονται σε βαθιές μάζες ιστών, διεισδύοντας στις μεμβράνες φωσφολιπιδίων. Επιπλέον, οι θεραπείες ΨΑΠ που στοχεύουν σε εσωτερικούς όγκους που μπορεί να είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν με τοπικές προσεγγίσεις βρίσκονται υπό διερεύνηση. Η ιδέα

της χρήσης του πλάσματος έναντι των άμεσων θεραπειών έχει αποκτήσει περαιτέρω έλξη λόγω του γεγονότος ότι το ΨΑΠ είναι λιγότερο επιβλαβές για τα υγιή κύτταρα, με αποτέλεσμα λιγότερες μορφολογικές αλλαγές εντός των επεξεργασμένων κυττάρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΡΕΥΣΤΟΥ ΒΑΣΙΣΜΕΝΟ ΣΕ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΕΣ ΣΦΑΙΡΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΙΔΑΚΩΝ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ:

Αν και για πολλές εφαρμογές πίδακα πλάσματος, το δισδιάστατο (2D) αξονικά συμμετρικό μοντέλο υγρού που περιλαμβάνει τις εξισώσεις μεταφοράς επαρκούν για να περιγράψουν τα κύρια χαρακτηριστικά μιας μόνο ροής, η προσέγγιση 2D οδηγεί σε σημαντικό υπολογιστικό κόστος. Ειδικά σε περιπτώσεις που η προσομοίωση υπερβαίνει το όριο ενός μόνο κύματος ιονισμού και περιλαμβάνει περισσότερους από έναν κύκλους. Για αυτό το λόγο προτάθηκε η μοντελοποίηση του προβλήματος σε μία μόνο διάσταση εκμεταλλευόμενη την τοπική παραλλαγή ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της διαδρομής του καθοδηγούμενου streamer. Λόγω της απότομης μείωσης του ηλεκτρικού πεδίου πίσω από τη θέση της κεφαλής εκκένωσης, η διακύμανση των παραμέτρων πλάσματος μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι μονοδιάστατη, ωστόσο, η επέκταση αυτής της έννοιας στο ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι απλή, καθώς είναι εγγενώς 3-διαστάσεων. Ουσιαστικά η παραδοχή που λαμβάνουν προσομοιάζει την καθοδηγούμενη ροή με μια γραμμή φορτισμένων σφαιρών που βρίσκονται στη διαδρομή διάδοσης. Κατά αυτόν τον τρόπο το τοπικό ηλεκτρικό πεδίο αποτελείται από την υπέρθεση των πεδίων των μεμονωμένων σφαιρών που καθορίζονται από τη χωρική κατανομή της καθαρής πυκνότητας φορτίου. Έτσι επιτυγχάνεται η διατήρηση της τρισδιάστατης φύσης του ηλεκτρικού πεδίου, αξιοποιώντας όμως την παραδοχή της μονοδιάστατης διάχυσης.

2.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Οι εξισώσεις μεταφοράς που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στις προσομοιώσεις μοντέλων ψυχρού ατμοσφαιρικού πλάσματος είναι οι ακόλουθες 1)+ 2):

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Αεροναυτικής

Εξισώσεις 1+2

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\Gamma_j} = S_j \quad \text{where} \quad \boldsymbol{\Gamma_j} = sgn(Q_j)\mu_j n_j \boldsymbol{E} - D_j \boldsymbol{\nabla} n_j$$

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\nabla} \phi = \frac{\rho_q}{\epsilon_0}$$

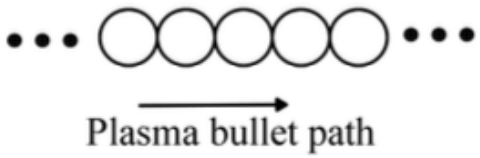
Με την παραδοχή της μονοδιάστατης ροής της γραμμής φορτισμένων σφαιρών η εξίσωση 1) μετατρέπεται στην ακόλουθη εξίσωση:

Εξίσωση 3

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} + \frac{\partial \Gamma_j}{\partial x} = S_j \quad \text{where} \quad \Gamma_j = sgn(Q_j)\mu_j n_j E - D_j \frac{\partial n_j}{\partial x}$$

Λόγω της φύσης του ηλεκτρικού πεδίου αντίστοιχη απλοποίηση στην εξίσωση 2) δεν μπορεί να επιτευχθεί, πρέπει δηλαδή να λυθεί και στις 3 διαστάσεις της.

Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο σχήμα (το σχήμα της σφαίρας) δεν ήταν καθόλου τυχαίος καθώς το ηλεκτρικό πεδίο και το ηλεκτρικό δυναμικό μιας σφαίρας με ομοιόμορφο φορτίο είναι εύκολα επιλύσιμο με μία απλή εξίσωση. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί σε πειράματα και προσομοιώσεις ότι όταν η πολικότητα είναι θετική, το μέτωπο εκκένωσης στο λοφίο πλάσματος έχει σφαιρική μορφή.



Εικόνα 6 Απεικόνιση σφαιρών φορτίου [A simple fluid model based on charged spheres for the simulation of atmospheric pressure plasma jets, 2023]

Το μέγεθος του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από κάθε σφαίρα εξαρτάται από το καθαρό φορτίο Q της σφαίρας και μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους τύπους ανάλογα με τα μεγέθη των r και Rs:

Εξισώσεις 5+ 6

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{R_s^3}r \quad , \quad r \leq R_s$$
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r^2} \quad , \quad r > R_s$$

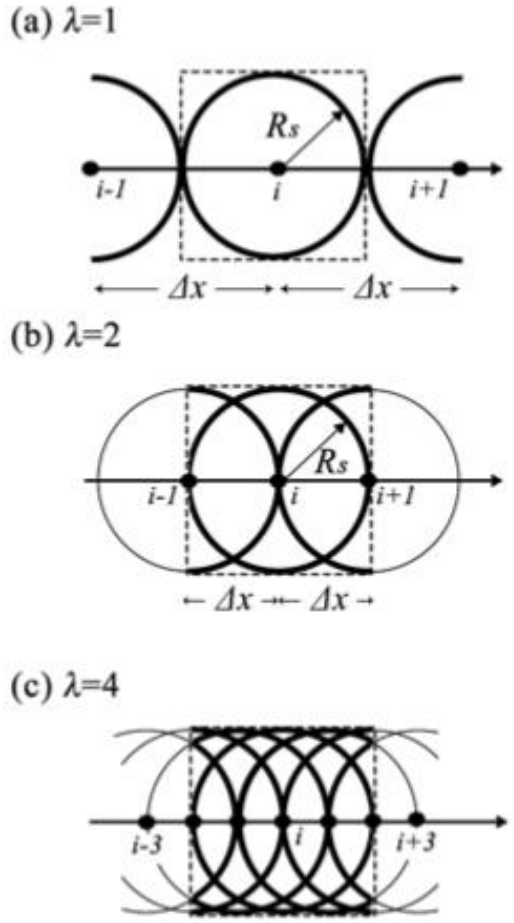
Ωστόσο, είναι προφανές ότι στο φυσικό πρόβλημα, το φορτίο έχει συνεχή κατανομή κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης της σφαίρας πλάσματος και δεν βρίσκεται σε διακριτές, ξεχωριστές σφαίρες. Θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ένας μακρύς κύλινδρος με μεταβλητή πυκνότητα φορτίου. Για να συνδεθεί το φορτίο κάθε σφαίρας, το οποίο εξαρτάται από τον όγκο σφαίρας Vs, με το φορτίο του κυλινδρικού τμήματος (Εικ. 2), η οποία εξαρτάται από τον όγκο κάθε στοιχειώδους κυλίνδρου, χρησιμοποιείται στο μοντέλο ισοδύναμο φορτίο Qeq.

Εξίσωση 7

$$Q_{eq} = \rho_q V_s \frac{V_c}{V_s} = \frac{3}{2}\rho_q V_s$$

Το ηλεκτρικό πεδίο με βάση τη σφαίρα πρέπει να συνδέεται με την αριθμητική λύση των εξισώσεων μεταφοράς. Η απλούστερη προσέγγιση είναι να ρυθμιστούν οι κόμβοι του αριθμητικού πλέγματος κατά τέτοιον τρόπο ώστε να συμπίπτουν με τα κέντρα σφαίρας. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση δημιουργεί ένα σημαντικό μειονέκτημα. Κλειδώνει το μέγεθος του πλέγματος στη διάμετρο των σφαιρών. Ένας τέτοιος περιορισμός είναι ανεπιθύμητος, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά χοντρό πλέγμα.

Ένα εκ των σημαντικότερων μεγεθών που καθορίζουν τον τρόπο επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος είναι το μέγεθος των σφαιρών. Ο λόγος που διαδραματίζει τόσο σημαντικό ρόλο το συγκεκριμένο μέγεθος είναι διότι ορίζει το καθαρό φορτίο και την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου. Όπως προαναφέρθηκε η απλούστερη προσέγγιση είναι να οριστεί η ακτίνα της σφαίρας ίση με την ακτίνα του καναλιού πλάσματος, η οποία είναι συνήθως ίση με την ακτίνα του στομίου του διηλεκτρικού σωλήνα. Για απλότητα, μπορούμε να υποθέσουμε μια σταθερή ακτίνα, η οποία είναι μια δίκαιη προσέγγιση εάν ο ρυθμός ροής δεν είναι πολύ χαμηλός και η περιοχή ενδιαφέροντος δεν εκτείνεται μακριά από την προέλευση της σφαίρας πλάσματος.



Εικόνα 7 Σχηματική απεικόνιση επικαλυπτόμενων σφαιρών συναρτήσει του λ [A simple fluid model based on charged spheres for the simulation of atmospheric pressure plasma jets,2023]

Το καθαρό φορτίο και τη διανομή ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγέθη άρρηκτα συνδεδεμένα με το μέγεθος των σφαιρών. Μια απλή και φυσικά σημαντική επιλογή για την ακτίνα σφαίρας είναι θεωρηθεί ίση στην ακτίνα του καναλιού πλάσματος, η οποία είναι συνήθως ίση με την ακτίνα του στομίου του διηλεκτρικού σωλήνα. Χάριν απλότητας, μπορεί να θεωρηθεί μια σταθερή ακτίνα, με δεδομένο ο ρυθμός ροής να μην είναι πολύ χαμηλός και η περιοχή ενδιαφέροντος να μην εκτείνεται μακριά από την προέλευση της σφαίρας πλάσματος. Έτσι, το μέγεθος της σφαίρας είναι

μια παράμετρος που υπαγορεύεται από το φυσικό πρόβλημα, ενώ το μέγεθος του πλέγματος είναι μια αριθμητική παράμετρος. Για να αποσυνδεθούν οι δύο αυτές παράμετροι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλές επικαλυπτόμενες σφαίρες κατά μήκος της διαδρομής της σφαίρας πλάσματος. Η παράμετρος που ποσοτικοποιεί την επικάλυψη είναι ο λόγος λ της διαμέτρου της σφαίρας προς το μέγεθος του βήματος του πλέγματος.

Εξίσωση 8

$$\lambda = \frac{2R_s}{\Delta x}$$

Οι επικαλυπτόμενες φορτισμένες σφαίρες απαιτούν την προσαρμογή της πυκνότητας φορτίου σε κάθε σημείο του πλέγματος, για να ληφθεί υπόψη το επιπλέον φορτίο. Ο απλούστερος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να διαιρέσετε την πυκνότητα φορτίου pq σε κάθε κόμβο i με τον παράγοντα λ που αντικατοπτρίζει τον επικαλυπτόμενο όγκο για λ<2.

Εξίσωση 9

$$Q_{eq} = \frac{3}{2}\frac{\rho_{q,i}}{\lambda}V_s$$

Αντίστοιχα για λ>2:

Εξίσωση 10

$$Q_{eq,i} = \frac{3}{2}\overline{\rho_{q,i}}V_s$$

με

Εξίσωση 11

$$\overline{\rho_{q,i}} = \frac{\sum_{j=-n}^{n}\rho_{q,i+j}\ V_{cap}\left(\delta_j\right)}{\lambda V_s} \quad where\ \delta_j = 1 - \frac{|j|}{\lambda}$$

Η ολοκληρωμένη κατανομή ηλεκτρικού πεδίου Ε που δημιουργείται από τις πολλαπλές επικαλυπτόμενες φορτισμένες σφαίρες είναι η υπέρθεση των κατανομών ηλεκτρικού πεδίου των μεμονωμένων φορτισμένων σφαιρών, που δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Αεροναυτικής

Εξισώσεις 12+ 13

$$E = sgn(x - x_i)\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q_{eq,i}}{\lambda R_s^3}r \quad , \quad r \leq R_s$$

$$E = sgn(x - x_i)\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q_{eq,i}}{\lambda r^2} \quad , \quad r > R_s$$

2.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Βάσει της μελέτης αναφοράς, ο αντιδραστήρας αποτελείται από έναν τριχοειδή σωλήνα αλουμίνας (Øout = 2,5 mm, Øin = 1,14 mm), ένα νηματώδες εσωτερικό ηλεκτρόδιο βολφραμίου και ένα κυλινδρικό κοίλο εξωτερικό ηλεκτρόδιο ορείχαλκου, σφιχτά στερεωμένο γύρω από το σωλήνα. Το αέριο είναι He υψηλής καθαρότητας (He, 99,999%) και η παλμική υψηλή τάση έχει πλάτος +5KV , συχνότητα επανάληψης 2kHz και πλάτος παλμού περίπου 420ns.

Αναφορικά με το ηλεκτρικό πεδίο μέσα στον πίδακα πλάσματος, αποτελείται από έναν συνδυασμός του εφαρμοζόμενου πεδίου, των επιφανειακών φορτίων που παράγονται από την εκκένωση φραγμού που συμβαίνει μέσα στον σωλήνα και του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται από τα φορτία όγκου των σφαιρών πλάσματος. Υποθέτουμε ένα εξωτερικό πεδίο, το οποίο είναι σταθερό με την πάροδο του χρόνου και παράγεται από μια θετικά φορτισμένη σφαίρα με δυναμικό Vext = +5KV . Η ακτίνα της σφαίρας είναι Rext = 0,004 m που βρίσκεται σε απόσταση Rext αντίθετα του πρώτου σημείου πλέγματος. Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο είναι η υπέρθεση του εξωτερικού πεδίου και του πεδίου που παράγεται από τις πληρώσεις όγκου από τη ροή, η οποία αξιολογείται σε κάθε χρονικό βήμα.

Οι συνθήκες που πραγματοποιείται η προσομοίωση είναι σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία αερίου ίση με 300K. Το μείγμα των αερίων απαρτίζεται από ήλιο και άζωτο. Η ακριβής σύστασή του μέσα στο κανάλι πλάσματος είναι σχεδόν αδύνατο να υπολογιστεί επακριβώς, λόγω των

πολλαπλών φυσικών μηχανισμών που εμπλέκονται. Επιπλέον, η μονοδιάστατη φύση του μοντέλου θα απαιτούσε κάποιο είδος μέσου όρου στην διατομή του καναλιού πλάσματος. Για να απλοποιήσουμε αυτό το μέρος της προσομοίωσης και να μειώσουμε τις εμπλεκόμενες παραμέτρους, επιλέγουμε την απλούστερη προσέγγιση μεταξύ των διαθέσιμων μοντέλων ανάμιξης ροής και χρησιμοποιούμε ένα προκαθορισμένο μείγμα αερίων.

Η πυκνότητα αριθμού του ηλίου nHe ποικίλει μεταξύ n στο στόμιο και 0,93 n στο τέλος του τομέα διαλύματος. Το πρώτο μοντέλο χημείας που έχουμε χρησιμοποιήσει για τις προσομοιώσεις έχει προσαρμοστεί από τους Bourdon et al. και περιλαμβάνει 16 είδη(e−, He, N2, He+, He+2 , N2+, N2+(B), N4+, He(23s), He(33s), N2(C3pu), O2, O2 (a) και O2−) και 71 αντιδράσεις, εκ των οποίων οι πρώτες 31 παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Παράμετροι μεταφοράς ηλεκτρονίων, ρυθμοί αντίδρασης των αντιδράσεων διέγερσης και ιονισμού με κρούση ηλεκτρονίων (R1 έως R5, R32 και R33 έως R37) υποτίθεται ότι είναι λειτουργίες του τοπικού μειωμένου ηλεκτρικού πεδίου E / N. αυτοί οι συντελεστές λαμβάνονται από το BOLSIG + (Hagelaar και Pitchford).
Αντιστοίχως το δεύτερο μοντέλο που έχουμε χρησιμοποιήσει για τις προσομοιώσεις είναι των Jiang et al όπου περιλαμβάνει είδη που φαίνονται στον Πίνακα 3. Επιπλέον περιλαμβάνει 32 αντιδράσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.
Στην παρούσα μελέτη, δε λήφθηκε υπόψη ο φωτοϊονισμός. Χρησιμοποιήθηκε έτσι, μια ομοιόμορφη πυκνότητα υποβάθρου ηλεκτρονίων και θετικών/αρνητικών ιόντων. Η αρχική πυκνότητα αριθμού είναι 1013m−3 για τα ηλεκτρόνια και 1012m-3 για όλα τα άλλα είδη, εκτός από το He+, το οποίο έχει οριστεί σε μια τιμή που ικανοποιεί την ηλεκτρονευτικότητα στο μείγμα. Όσον αφορά την αριθμητική λύση, οι εξισώσεις μεταφοράς για τα διάφορα είδη διακριτοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το κεντρικό σχήμα Kurganov-Tadmor [14] και επιλύθηκαν με μια μέθοδο 4ης τάξης Runge-Kutta. Ο τομέας 1D είχε μήκος L = 0, 03 m και η ακτίνα σφαίρας για την αξιολόγηση του ηλεκτρικού πεδίου ορίστηκε σε Rs = 5, 7 × 10−4m, η οποία είναι ίση με την εσωτερική ακτίνα του διηλεκτρικού σωλήνα στα πειράματα του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟ MATLAB

3.1 ΧΗΜΙΚΆ ΕΊΔΗ

3.1.1 Μοντέλο Bourdon et al.

Το μοντέλο των Bourdon et al. [1] χρησιμοποιεί 10 χημικά είδη, τα οποία παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα , μαζί με το συμβολισμό της συγκέντρωσής τους στον κώδικα, που ορίζεται στο αρχείο «readTheData», και χρησιμοποιείται με το όνομα αυτό στα υπόλοιπα αρχεία του κώδικα (εξαιρούνται τα ηλεκτρόνια και το ήλιο που ορίζονται στο κεντρικό αρχείο ελέγχου «controlMulti»).

Α/Α	**Είδος**	**Σύμβολο**	**Συμβολισμός στον κώδικα**
1	Ηλεκτρόνιο	e	N_e
2	Ήλιο	He	N_He
3	Άζωτο	N2	N_N2
4	Ιόν ηλίου	He+	N_HeP
5	Ιόν ηλίου	He2+	N_He2P
6	Ιόν αζώτου	N2+	N_N2P
7	Ιόν αζώτου	N2+(B)	N_N2PB
8	Ιόν αζώτου	N4+	N_N4P
9	Μετασταθές ηλίου	He* ή He(23S)	N_He2S3
10	Μετασταθές αζώτου	N2(C3u)	N_N2C

Πίνακας 2 Χημικά είδη που χρησιμοποιεί το μοντέλο των Bourdon et al.

3.1.2 Μοντέλο Jiang et al

Το μοντέλο των Jiang et al χρησιμοποιεί 13 χημικά είδη, τα οποία παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα , μαζί με το συμβολισμό της συγκέντρωσής τους στον κώδικα, που ορίζεται στο αρχείο «readTheData», και χρησιμοποιείται με το όνομα αυτό στα υπόλοιπα αρχεία του κώδικα (εξαιρούνται τα ηλεκτρόνια και το ήλιο που ορίζονται στο κεντρικό αρχείο ελέγχου «controlMulti»).

Α/Α	**Είδος**	**Σύμβολο**	**Συμβολισμός στον κώδικα**
1	Ηλεκτρόνιο	e	N_e
2	Ήλιο	He	N_He
3	Άζωτο	N2	N_N2
4	Ιόν ηλίου	He+	N_HeP
5	Ιόν ηλίου	He2+	N_He2P
6	Ιόν αζώτου	N2+	N_N2P
7	Ιόν αζώτου	N2(A3∑u+)	N_N2A3
8	Ιόν αζώτου	N4+	N_N4P
9	Μετασταθές ηλίου	He* ή He(23S)	N_He2S3
10	Μετασταθές αζώτου	N2(C3π)	N_N2C
11	Οξυγόνο	O2	N_O2
12	Ιόν Οξυγόνου	O2+	N_O2P
13	Ιόν Οξυγόνου	O2-	N_O2M

Πίνακας 3 Χημικά είδη που χρησιμοποιεί το μοντέλο των Jiang et al

3.2 ΧΗΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΗΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ

Το μοντέλο των Bourdon et al. χρησιμοποιεί 31 αντιδράσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Οι ρυθμοί αντίδρασης για τις 5 πρώτες αντιδράσεις υπολογίζονται με χρήση του αλγόριθμου Bolsig+, ενώ για τις υπόλοιπες χρησιμοποιούνται οι τιμές από τη βιβλιογραφία. Ο αλγόριθμος Bolsig+ δίνει το ρυθμό αντίδρασης συναρτήσει του ανηγμένου ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή του λόγου του ηλεκτρικού πεδίου E προς την πυκνότητα του αριθμού των ουδετέρων σωματιδίων N = 2.45×1025 m-3 (neutral gas density).

Table 1. List of chemical reactions.

Nos	Reaction	Rate coefficient
R1	$He + e^- \rightarrow He^+ + 2e^-$	$f(E/N)$
R2	$N_2 + e^- \rightarrow N_2^+ + 2e^-$	$f(E/N)$
R3	$He + e^- \rightarrow He^* + e^-$	$f(E/N)$
R4	$N_2 + e^- \rightarrow N_2(C^3\Pi_u) + e^-$	$f(E/N)$
R5	$N_2 + e^- \rightarrow N_2^+(B) + 2e^-$	$f(E/N)$
R6	$He^* + e^- \rightarrow He + e^-$	2.9×10^{-9} cm^3 s^{-1}
R7	$He^* + He^* \rightarrow He^+ + He + e^-$	4.35×10^{-10} cm^3 s^{-1}
R8	$He^* + He^* \rightarrow He_2^+ + e^-$	1.015×10^{-9} cm^3 s^{-1}
R9	$He^* + N_2 \rightarrow He + N_2^+ + e^-$	3.8×10^{-11} cm^3 s^{-1}
R10	$He^* + N_2 + He \rightarrow 2He + N_2^+ + e^-$	1.65×10^{-30} cm^6 s^{-1}
R11	$He_2^+ + e^- \rightarrow He + He$	4.0×10^{-9} cm^3 s^{-1}
R12	$N_2^+ + e^- \rightarrow N + N$	1.0×10^{-7} cm^3 s^{-1}
R13	$He^+ + 2He \rightarrow He_2^+ + He$	1.5×10^{-31} cm^6 s^{-1}
R14	$He_2^+ + N_2 \rightarrow N_2^+ + 2He$	0.275×10^{-9} cm^3 s^{-1}
R15	$He_2^+ + N_2 + He \rightarrow N_2^+ + 3He$	0.34×10^{-29} cm^6 s^{-1}
R16	$He_2^+ + e^- \rightarrow He^* + He$	5.0×10^{-9} cm^3 s^{-1}
R17	$He^* + 2He \rightarrow He_2^* + He$	1.9×10^{-34} cm^6 s^{-1}
R18	$He^+ + N_2 \rightarrow He + N_2^+$	1.2×10^{-9} cm^3 s^{-1}
R19	$He^+ + N_2 + He \rightarrow 2He + N_2^+$	2.2×10^{-29} cm^6 s^{-1}
R20	$He^* + N_2 \rightarrow He + N_2^+(B) + e^-$	3.8×10^{-11} cm^3 s^{-1}
R21	$He^* + N_2 + He \rightarrow 2He + N_2^+(B) + e^-$	1.65×10^{-30} cm^6 s^{-1}
R22	$N_2^+(B) + e^- \rightarrow N + N$	1.0×10^{-7} cm^3 s^{-1}
R23	$He_2^+ + N_2 \rightarrow N_2^+(B) + 2He$	0.825×10^{-9} cm^3 s^{-1}
R24	$He_2^+ + N_2 + He \rightarrow N_2^+(B) + 3He$	1.02×10^{-29} cm^6 s^{-1}
R25	$N_2^+(B) \rightarrow N_2^+ + h\nu$	1.5×10^7 s^{-1}
R26	$N_2(C^3\Pi_u) + N_2 \rightarrow$ products	8.0×10^{-11} cm^3 s^{-1}
R27	$N_2(C^3\Pi_u) + He \rightarrow$ products	1.0×10^{-12} cm^3 s^{-1}
R28	$N_2(C^3\Pi_u) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g) + h\nu$	2.4×10^7 s^{-1}
R29	$N_2^+ + 2N_2 \rightarrow N_4^+ + N_2$	5×10^{-29} cm^6 s^{-1}
R30	$N_4^+ + e^- \rightarrow N_2 + N_2$	2×10^{-6} cm^3 s^{-1}
R31	$N_4^+ + N_2 \rightarrow N_2^+ + 2N_2$	2.5×10^{-15} cm^3 s^{-1}

Note: For simplicity, $He(2^3S)$ is noted He^*.

Πίνακας 4 Αντιδράσεις που περιλαμβάνονται στο μοντέλο των Bourdon et al.

Αντίστοιχα το μοντέλο Jiang et al χρησιμοποιεί 32 αντιδράσεις, τις οποίες εντοπίζουμε στον Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Αεροναυτικής

ακόλουθο πίνακα. Για τις πρώτες 11 αντιδράσεις, οι ρυθμοί αντίδρασης υπολογίζονται με χρήση του αλγόριθμου Bolsig+, ενώ για τις υπόλοιπες χρησιμοποιούνται οι τιμές από τη βιβλιογραφία. Για τον αλγόριθμο Bolsig ισχύουν όλα όσα ισχύουν και στο πρώτο μοντέλο.

Index	Reaction	Rate coefficients
R1	$e + He \rightarrow e + He^*$	BOLSIG+
R2	$e + He \rightarrow 2e + He^+$	BOLSIG+
R3	$e + N_2 \rightarrow e + N_2(C^3\pi)$	BOLSIG+
R4	$e + N_2 \rightarrow e + N_2(A^3\sum_u^+)$	BOLSIG+
R5	$e + N_2 \rightarrow 2e + N_2^+$	BOLSIG+
R6	$e + O_2 \rightarrow O_2(a^1\triangle)$	BOLSIG+
R7	$e + O_2 \rightarrow e + 2O$	BOLSIG+
R8	$e + O_2 \rightarrow e + O + O(1D)$	BOLSIG+
R9	$e + O_2 \rightarrow O_2^-$	BOLSIG+
R10	$e + O_2 \rightarrow 2e + O_2^+$	BOLSIG+
R11	$e + He^* \rightarrow 2e + He^+$	$4.661 \times 10^{-16} Te^{0.6} \exp(-4.78/T_e)$
R12	$e + He^+ \rightarrow He^*$	$6.76 \times 10^{-19} T_e^{-0.5}$
R13	$e + He_2^+ \rightarrow He^* + He$	$5.386 \times 10^{-13} T_e^{-0.5}$
R14	$e + He^+ + He \rightarrow He^* + He$	6.66×10^{-42}
R15	$e + He_2^+ + He \rightarrow He^* + 2He$	3.5×10^{-39}
R16	$e + N_2 + N_2^+ \rightarrow 2N_2$	$4.184 \times 10^{-44} T_e^{-2.5}$
R17	$2e + N_2^+ \rightarrow e + N_2$	$3.165 \times 10^{-30} T_e^{-0.8}$
R18	$e + O_2^+ \rightarrow 2O$	$1.2 \times 10^{-14} T_e^{-0.7}$
R19	$2He^* \rightarrow He + e + He^+$	4.5×10^{-16}
R20	$He^* + 2He \rightarrow He_2^* + He$	1.3×10^{-45}
R21	$He^+ + 2He \rightarrow He + He_2^+$	1.0×10^{-43}
R22	$O_2^- + O_2^+ \rightarrow 2O_2$	2.0×10^{-13}
R23	$O_2^- + O_2^+ + He \rightarrow 2O_2 + He$	2.0×10^{-37}
R24	$O_2^- + O_2^+ + N_2 \rightarrow 2O_2 + N_2$	2.0×10^{-37}
R25	$O_2^- + O_2^+ + O_2 \rightarrow 2O_2 + O_2$	2.0×10^{-37}
R26	$He^+ + N_2 \rightarrow He + N_2^+$	5.0×10^{-16}
R27	$He_2^+ + N_2 \rightarrow 2He + N_2^+$	5.0×10^{-16}
R28	$He^* + N_2 \rightarrow He + e + N_2^+$	7.0×10^{-17}
R29	$He^* + O_2 \rightarrow He + e + O_2^+$	2.4×10^{-16}
R30	$He_2^* + N_2 \rightarrow 2He + e + N_2^+$	7.0×10^{-17}
R31	$He_2^* + O_2 \rightarrow 2He + e + O_2^+$	3.6×10^{-16}
R32	$N_2(C^3\pi) \rightarrow N_2 + h\nu$	$2.45 \times 10^7\ s^{-1}$

Πίνακας 5 Αντιδράσεις που περιλαμβάνονται στο μοντέλο των Jiang et al

3.2.1 Function «readTheData»

Σε σχέση με τη δομή του κώδικα, στο αρχείο «readTheData» μετά τον ορισμό των χημικών ειδών, ορίζονται οι κινητικότητες και οι συντελεστές διάχυσης για τα ιόντα και τα μετασταθή ηλίου και αζώτου. Οι τιμές αυτές είναι σταθερές κι έχουν ληφθεί από τη βιβλιογραφία.

Στη συνέχεια, δημιουργούνται οι πίνακες στους οποίους αποθηκεύονται τα αποτελέσματα του αλγόριθμου Bolsig+ [2]. Οι πίνακες είναι δισδιάστατοι και περιέχουν την τιμή του μεγέθους συναρτήσει του ηλεκτρικού πεδίου και της σύστασης του αερίου, δηλαδή του ποσοστού ηλίου-αέρα. Ένα παράδειγμα της διαδικασίας κατασκευής ενός τέτοιου πίνακα περιγράφεται παρακάτω: Αρχικά, εκτελείται ο αλγόριθμος Bolsig+ [2] για συγκεκριμένο ποσοστό ηλίου-αέρα (100% - 0%, 90% - 10%, 80% - 20%, κλπ.). Από την εκτέλεση του αλγορίθμου προκύπτουν 10 αρχεία (1_He.txt, 2_He.txt, 3_He.txt, κλπ.) που αντιστοιχούν στις προαναφερθείσες συγκεντρώσεις. Τα αρχεία αυτά είναι αποθηκευμένα στο φάκελο «data_ICT_Lisbon», καθώς τα δεδομένα για τον αλγόριθμος Bolsig+ [2] έχουν ληφθεί από τη βάση δεδομένων ICT_Lisbon. Η εισαγωγή των τιμών των 10 αρχείων *_He.txt γίνεται από τη function «fileReader.m», η οποία προσπελαύνει κάθε αρχείο, εντοπίζει την κατάλληλη λίστα (π.χ. «E/N (Td) Mobility *N (1/m/V/s)» για την κινητικότητα, «C44 He Ionization 24.59 eV» για την αντίδραση ιονισμού του ηλίου με κατώφλι 24.59 eV, κλπ.) και επιστρέφει τα δεδομένα σε ένα δισδιάστατο πίνακα με τις γραμμές να αντιστοιχούν στις διάφορες τιμές του ανηγμένου ηλεκτρικού πεδίου και τις στήλες στις συγκεντρώσεις ηλίου-αέρα, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Πίνακα 5.

Οι πίνακες που επιστρέφει η function «fileReader.m» αποθηκεύονται με κατάλληλο όνομα που περιλαμβάνει το στοιχείο και το κατώφλι της αντίδρασης, π.χ. He_24_59 για τον ιονισμό του ηλίου (αντίδραση R1), He_19_80 για την αντίδραση R3, κλπ.

ανηγμένο ηλεκτρικό πεδίο E/N (Td)	100% ήλιο	90% ήλιο – 10% αέρας	80% ήλιο – 20% αέρας	…	10% ήλιο – 90% αέρας
0.1000	0.2304E-24	0.2378E-24	…		
0.1123	0.2455E-24	…			
0.1262	…				
0.1417					

0.1592					
…					

Πίνακας 6 Ενδεικτική διάταξη του πίνακα που επιστρέφει η function «fileReader.m».

3.2.2 Function «reactionRates.m»

Η function reactionRates.m υπολογίζει τις τιμές του ρυθμού αντίδρασης για τις 31 αντιδράσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 για το πρώτο μοντέλο και αντίστοιχα τις 32 αντιδράσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5 για το δεύτερο.

Για τους ρυθμούς που λαμβάνονται από τον αλγόριθμος Bolsig+ χρησιμοποιείται η εντολή «interp2» του MATLAB, ή οποία εκτελεί παρεμβολή σε δισδιάστατο πίνακα, σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

Vq = interp2(X,Y,V,Xq,Yq) interpolates to find Vq, the values of the underlying 2-D function V at the query points in matrices Xq and Yq. Matrices X and Y specify the points at which the data V is given.

Για παράδειγμα, στην εντολή

k01 = interp2(Xk01, YHe, He_24_59(:,2:end)',abs(EolTd),HeFr);

ορίζεται ως *Xk01* το διάνυσμα με τις τιμές του ανηγμένου ηλεκτρικού πεδίου E/N (Td) (δηλαδή η στήλη με σκούρο γκρι του Πίνακα ΙΙ), ως *YHe* οι δέκα τιμές της συγκέντρωσης του ηλίου-αέρα (δηλαδή η στήλη με ανοιχτό γκρι του Πίνακα ΙΙ), ως *He_24_59(:,2:end)'* οι ρυθμοί αντίδρασης συναρτήσει του E/N και του YHe (δηλαδή το κεντρικό τμήμα του Πίνακα ΙΙ), ενώ, τα διανύσματα *abs(EolTd)* και *HeFr* περιέχουν τις τιμές του E/N και του YHe στις οποίες θα γίνει η παρεμβολή.

Για παράδειγμα, αν έχουμε

Xk01 τη στήλη με σκούρο γκρι του Πίνακα 5

YHe τ η στήλη με ανοιχτό γκρι του Πίνακα 5

He_24_59(:,2:end)' το κεντρικό τμήμα του Πίνακα 5

abs(EolTd) =0.105

HeFr = 0.95

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Αεροναυτικής

η εντολή *interp2* θα κάνει γραμμική παρεμβολή στις γειτονικές τιμές

ανηγμένο ηλεκτρικό πεδίο E/N (Td)	100% ήλιο	90% ήλιο – 10% αέρας
0.1000	0.2304E-24	0.2378E-24
0.1123	0.2455E-24	…

και θα επιστρέψει την τιμή του ρυθμού αντίδρασης *k01 = 0.237E-24*.

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται για όλες τις αντιδράσεις που βασίζονται στον αλγόριθμος Bolsig+ [2], δηλαδή στις αντιδράσεις R1-R5 του μοντέλου Bourdon και αντίστοιχα στις αντιδράσεις R1-R11 του μοντέλου Jiang.

Για τις υπόλοιπες αντιδράσεις, οι ρυθμοί αντίδρασης θεωρούνται σταθεροί και δίνονται στους πίνακες 3-4.

Στη συνέχεια του κώδικα, υπολογίζονται οι όροι πηγής για κάθε αντίδραση, οι οποίοι είναι το γινόμενο του ρυθμού αντίδρασης επί τις συγκεντρώσεις των αντιδρώντων, π.χ. για το μοντέλο Bourdon et al

*S_R01 = k01.*N_e.*N_He;*

όπου k01 είναι ο ρυθμός αντίδρασης και *N_e*, *N_He* είναι οι συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και ουδετέρων ηλίου.

3.2.3 Function «reactionRatesCumul.m»

Σε αυτό το τμήμα του κώδικα, αθροίζονται όλοι οι όροι παραγωγής και καταστροφής για κάθε στοιχείο, όπως καταγράφονται στις αντιδράσεις του μοντέλου. Για παράδειγμα, η εντολή

% 1. e

S_e = S_R01+S_R02+S_R05+S_R07+S_R08+S_R09+S_R10-S_R11-S_R12-S_R16…

η οποία αφορά τον όρο πηγής των ηλεκτρονίων, δείχνει ότι τα ηλεκτρόνια παράγονται (δηλαδή βρίσκονται στο δεξί μέλος) στις αντιδράσεις R1, R2, R5, R7, R8, R9 και R10, ενώ καταναλώνονται

(δηλαδή βρίσκονται στο αριστερό μέλος) στις αντιδράσεις R11, R12, R16 κλπ. Στις υπόλοιπες αντιδράσεις, είτε δεν συμμετέχουν ηλεκτρόνια είτε συμμετέχουν με ίδιο ρυθμό παραγωγής/κατανάλωσης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο συμμετέχουν 10 χημικά είδη, οπότε υπολογίζονται οι αντίστοιχοι όροι πηγής για κάθε είδος.

3.2.4 Function «transEqsTrunc.m»

Το τμήμα αυτό του κώδικα περιέχει τις λύσεις των προβλημάτων μεταφοράς για να διάφορα χημικά είδη. Στο συγκεκριμένο μοντέλο συμμετέχουν 10 και 13 χημικά είδη, οπότε λύνονται οι αντίστοιχες εξισώσεις μεταφοράς για κάθε είδος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ MATLAB

4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ BOURDON ET AL & JIANG ET AL

Θέτοντας σε εφαρμογή τα δύο μοντέλα και «τρέχοντας» τις προσομοιώσεις προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα. Τα διαγράμματα αυτά έχουν όλα κοινό άξονα x, ο οποίος είναι η απόσταση διάδοσης στο κανάλι ηλίου, επομένως εκτείνεται από x= 0cm έως x= 0,03cm. Αναλύοντας τα ακόλουθα διαγράμματα και συγκρίνοντάς τα μεταξύ τους, είναι εφικτό να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα για μεγέθη όπως το Ολικό Ηλεκτρικό Πεδίο, η συγκέντρωση ηλεκτρονίων του μίγματος και η ταχύτητα του μετώπου της εκκένωσης που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

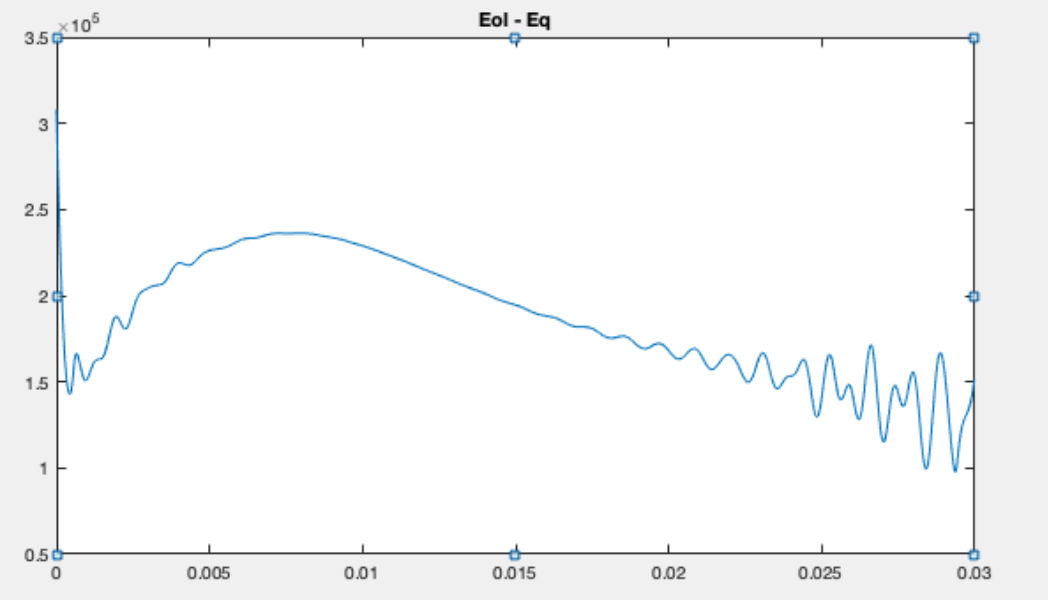
4.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΟΛΙΚΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Τα πρώτα διαγράμματα που θα συγκριθούν βάσει της μορφής τους είναι τα διαγράμματα Ολικού Ηλεκτρικού πεδίου συναρτήσει της απόστασης διάδοσης x. Όπως θα παρατηρήσουμε τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις.

4.2.1 Διάγραμμα Ολικού Ηλεκτρικού Πεδίου βάσει μοντέλου Bourdon et al

Έχοντας ορίσει ως άξονα x την απόσταση που διανύει το πλάσμα καθώς διαδίδεται και ως άξονα y το ηλεκτρικό δυναμικό παρατηρούμε πως ανάλογα με το σημείο κατά το οποίο έχει διαδοθεί η εκκένωση, το ηλεκτρικό δυναμικό παρουσιάζει αρκετές μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε πως με την έναρξη της διάδοσης του πλάσματος, ξεκινώντας από ένα ολικό μέγιστο πραγματοποιείται μια απότομη πτώση του ηλεκτρικού πεδίου που πολύ σύντομα ανατρέπεται.

Μέχρι τη χρονική στιγμή που έχει φθάσει περίπου στην απόσταση των 0,0075cm, όπου παρουσιάζει και τοπικό μέγιστο παρατηρείται μια αυξητική τάση του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου. Στη συνέχεια παρουσιάζει μια φθίνουσα πορεία έως το σημείο των 0.02cm, στο οποίο παρατηρείται μια πορεία που συνεχώς παρουσιάζει αυξομειώσεις.

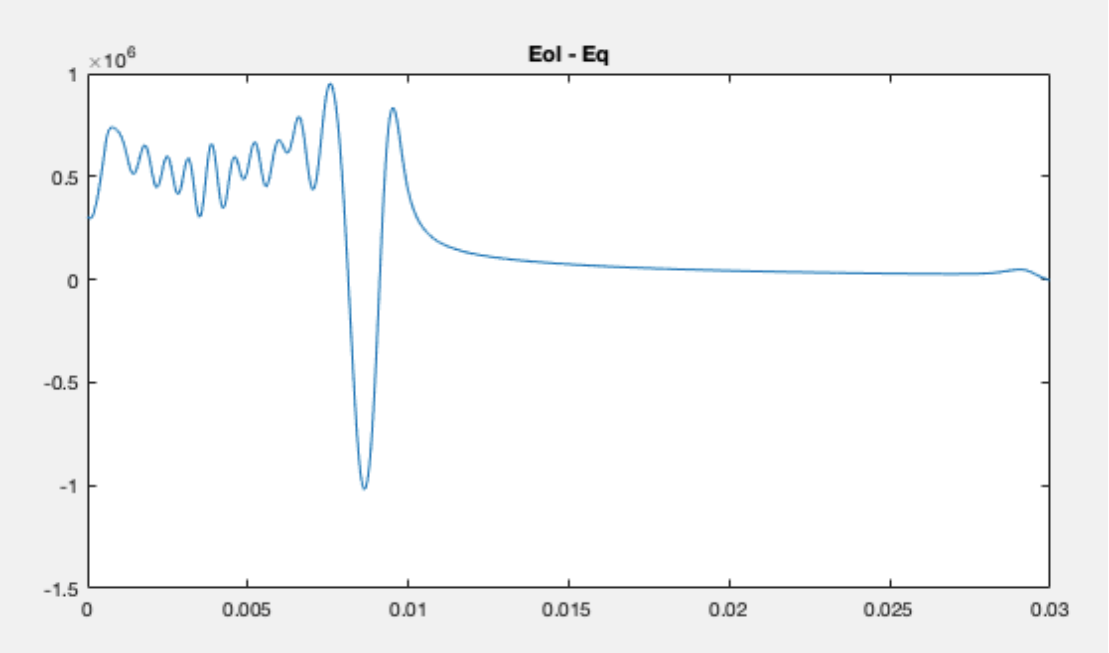


Διάγραμμα 1 Ολικό Ηλεκτρικό Πεδίο συναρτήσει της διάδοσης του μίγματος Bourdon et al

4.2.2 Διάγραμμα Ολικού Ηλεκτρικού Πεδίου βάσει μοντέλου Jiang et al

Έχοντας ορίσει με αντίστοιχο τρόπο τους άξονες παρατηρούμε πως ανάλογα με το σημείο στο οποίο βρίσκεται το μέτωπο της εκκένωσης, το ηλεκτρικό δυναμικό παρουσιάζει αρκετές μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε πως με την έναρξη της διάδοσης του πλάσματος πραγματοποιείται μια ταλάντωση του ολικού ηλεκτρικού πεδίου, φθάνοντας μέγιστη τιμή τη χρονική στιγμή που διέρχεται από το x= 0,007547cm . Έπειτα παρουσιάζει, απότομη πτωτική τάση, έως τη χρονική στιγμή όπου x= 0,008618cm , όπου συναντάμε ολικό ελάχιστο. Στη συνέχεια παρουσιάζει μια αύξουσα πορεία έως το σημείο των 0.02cm, έπειτα από το οποίο παρατηρείται μια πορεία που δεν παρουσιάζει σημαντικές αυξομειώσεις, έως τη χρονική στιγμή όπου x= 0,03cm

όπου μηδενίζεται.



Διάγραμμα 2 Ολικό Ηλεκτρικό Πεδίο συναρτήσει της διάδοσης του μίγματος Jiang et al

4.2.3 Σύγκριση Διαγραμμάτων Ολικού Ηλεκτρικού Δυναμικού των δύο μοντέλων

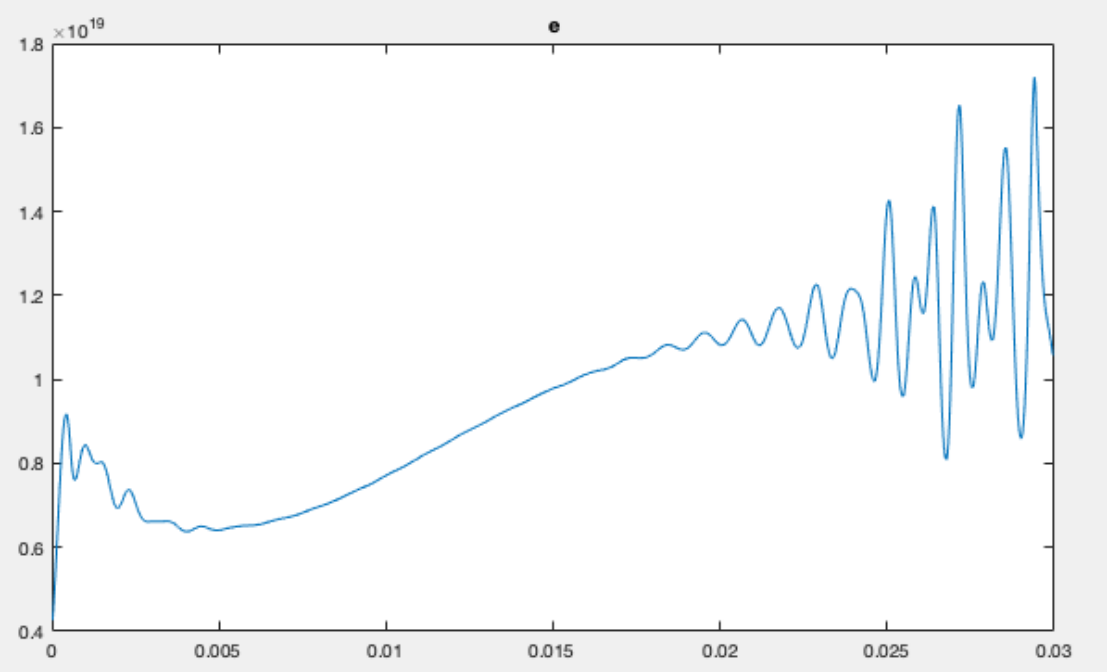
Παρατηρώντας τη μορφή των δύο μοντέλων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα. Ενώ στην περίπτωση του μοντέλου του Bourdon ξεκινάει το διάγραμμα από ολικό μέγιστο ενώ στο μοντέλο Jiang et al παρουσιάζει ολικό μέγιστο τη χρονική στιγμή που διέρχεται το μίγμα από το x= 0,0075cm. Στο ίδιο σημείο παρουσιάζει τοπικό μέγιστο και το διάγραμμα από το μοντέλο Bourdon. Επιπλέον παρατηρούμε πως ενώ στο μοντέλο Bourdon το Ολικό Ηλεκτρικό Πεδίο λαμβάνει μόνο θετικές τιμές, στο μοντέλο Jiang παρουσιάζει αφύσικες ταλαντώσεις, με το μοντέλο Jiang για x= 0,03cm να καταλήγει σε μηδενική τιμή.

4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ

Στη συνέχεια τα διαγράμματα που πρόκειται να συγκριθούν βάσει της μορφής τους είναι τα διαγράμματα Συγκέντρωσης Ηλεκτρονίων συναρτήσει της απόστασης διάδοσης x. Όπως, θα παρατηρήσουμε τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις.

4.3.1 Διάγραμμα Συγκέντρωσης Ηλεκτρονίων βάσει μοντέλου Bourdon et al

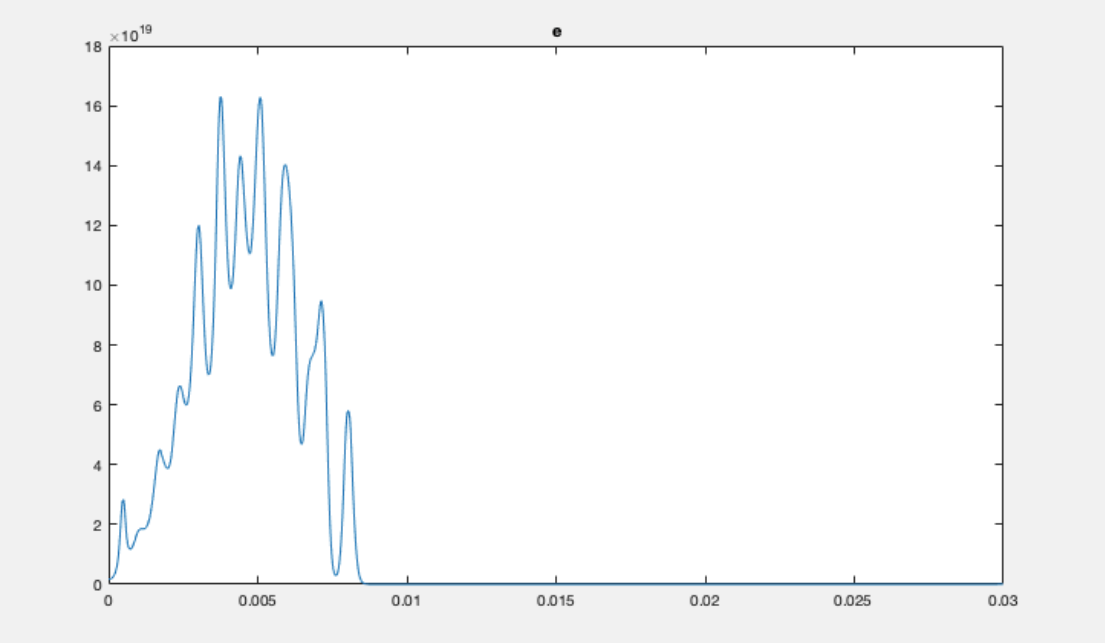
Βάσει του παρακάτω διαγράμματος, όπου απεικονίζεται η συγκέντρωση ηλεκτρονίων ως προς την απόσταση κατά την οποία έχει διαδοθεί το μίγμα, παρατηρούμε πως ξεκινάει από μηδενική τιμή, όπως αναμέναμε, παρουσιάζει μια απότομη αύξηση έως το 0,0004cm. Έπειτα, παρουσιάζει μια πτωτική τάση μέχρι τα 0,005cm. Εκεί, φαίνεται να σταθεροποιείται και στη συνέχεια να αυξάνεται σταδιακά με χαμηλό ρυθμό έως τα 0,02cm, όπου και παρατηρούμε μια αυξομειωτική συμπεριφορά. Ολικό μέγιστο παρουσιάζει για x= 0,029412 και στη συνέχεια φθίνει έως το x= 0,03cm.



Διάγραμμα 3 Συγκέντρωση Ηλεκτρονίων συναρτήσει της διάδοσης του μίγματος Bourdon et al

4.3.2 Διάγραμμα Ολικού Συγκέντρωσης Ηλεκτρονίων βάσει μοντέλου Jiang et al

Όπως αναμέναμε για x= 0,00cm η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι μηδενική. Έπειτα παρατηρείται μια αύξουσα πορεία με ορισμένες διακυμάνσεις έως τη χρονική στιγμή όπου x= 0,0038cm, κατά την οποία παρουσιάζει ολικό μέγιστο. Έπειτα παρουσιάζει μια ταλάντωση, και από τη χρονική στιγμή όπου x= 0,0051cm παρουσιάζει μια πτωτική πορεία. Κατά τη χρονική στιγμή όπου x= 0,0085cm η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων μηδενίζεται και παραμένει μηδενική έως το x= 0,03cm.



Διάγραμμα 4 Συγκέντρωση Ηλεκτρονίων συναρτήσει της διάδοσης του μίγματος Jiang et al

4.3.3 Σύγκριση Διαγραμμάτων Συγκέντρωσης Ηλεκτρονίων των δύο μοντέλων

Συγκρίνοντας τη μορφή των δύο μοντέλων προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα. Ενώ και τα δύο μοντέλα ξεκινούν από μηδενική συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην περίπτωση του μοντέλου του Jiang συναντάμε ολικό μέγιστο πολύ σύντομα (x= 0,00038cm), ενώ στο μοντέλο Bourdon et

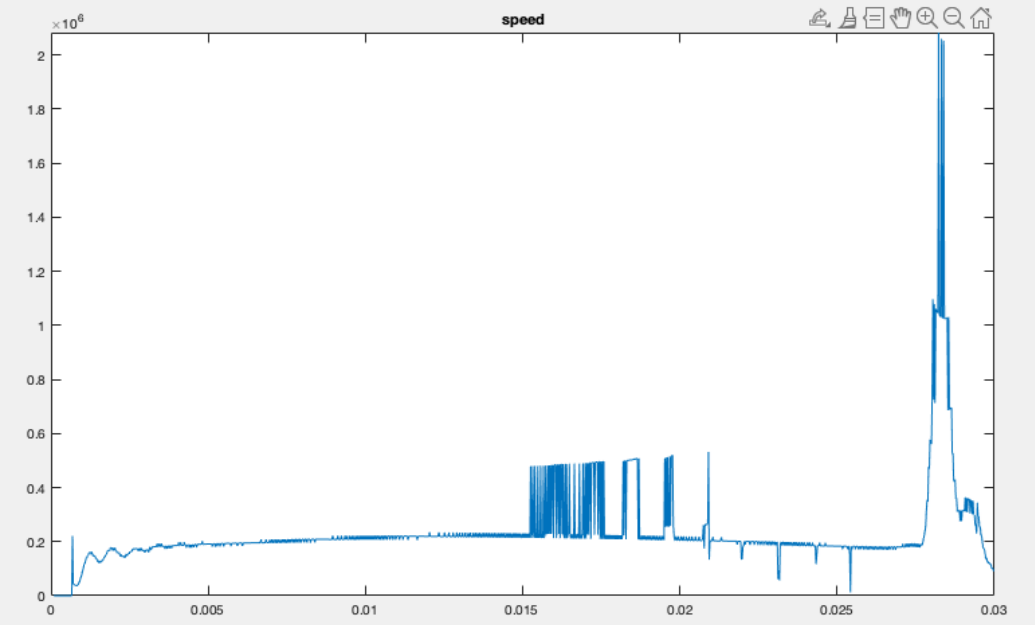
al συναντάμε ολικό μέγιστο τη χρονική στιγμή που διέρχεται το μίγμα από το x= 0,02941cm. Επιπροσθέτως, παρατηρούμε πως ενώ το μοντέλο Jiang καταλήγει σε μηδενική συγκέντρωση ηλεκτρονίων ήδη από τη χρονική στιγμή όπου x= 0,0085cm, στο μοντέλο Bourdon δεν φθάνει ποτέ αυτή την τιμή πλην της αφετηρίας του φαινομένου.

4.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Τέλος, τα διαγράμματα που πρόκειται να αναλυθούν βάσει της μορφής τους είναι τα διαγράμματα Ταχύτητας διάδοσης του κύματος ιονισμού συναρτήσει της απόστασης διάδοσης x. Όπως, θα παρατηρήσουμε τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις.

4.4.1 Διάγραμμα Ταχύτητας διάδοσης βάσει μοντέλου Bourdon et al

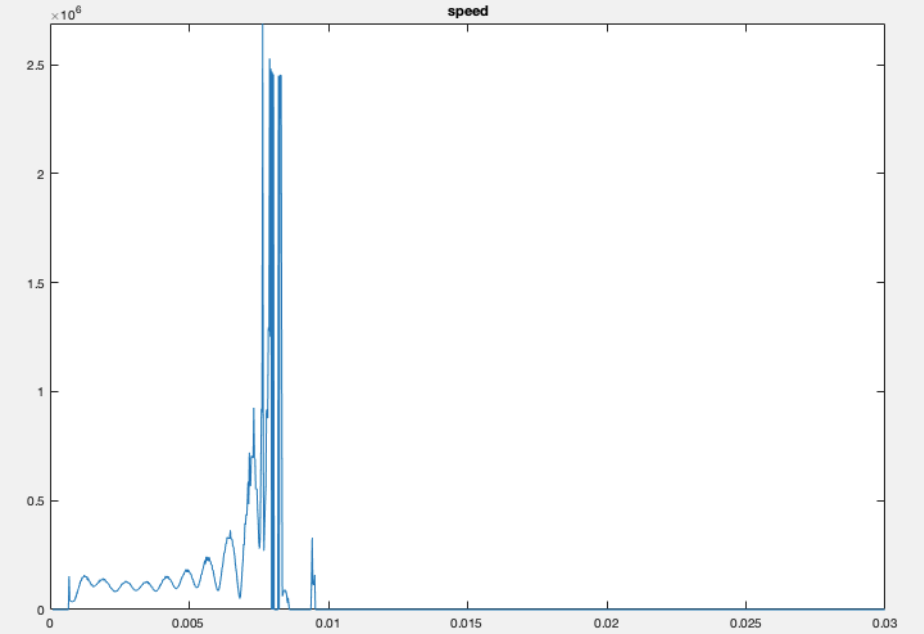
Όπως παρατηρούμε το διάγραμμα της ταχύτητας παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον. Ξεκινώντας από μηδενική ταχύτητα, αναπτύσσει ακαριαία ταχύτητα στο x= 0,00684cm. Έπειτα, χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις παρουσιάζει μια σταθερή κατάσταση έως το x= 0,015253cm, όπου παρατηρούνται κάποιες απότομες αυξομειώσεις της ταχύτητας. Στη συνέχεια, από το x= 0,027611cm η ταχύτητα παρουσιάζει μια κατακόρυφη αύξηση, φθάνοντας ολικό μέγιστο στο x= 0,0282264cm. Τέλος, με τον ίδιο ρυθμό που παρουσιάστηκε η αύξηση φθίνει.



Διάγραμμα 5 Ταχύτητα διάδοσης συναρτήσει διάδοσης του μίγματος βάσει του μοντέλου Bourdon et al

4.4.2 Διάγραμμα Ταχύτητας διάδοσης βάσει μοντέλου Jiang et al

Ξεκινώντας αντίστοιχα από μηδενική ταχύτητα, αναπτύσσει ακαριαία ταχύτητα στο x= 0,00684cm. Έπειτα, παρουσιάζει ορισμένες μικρές διακυμάνσεις έως το x= 0,0067944cm, όπου παρατηρούνται κάποιες απότομες αυξομειώσεις της ταχύτητας. Στη συνέχεια, όταν το μίγμα βρίσκεται στο x= 0,007638cm η ταχύτητα παρουσιάζει ολικό μέγιστο στο x= 0,0282264cm. Έπειτα παρουσιάζει ορισμένες απότομες μεταβολές έως τη χρονική στιγμή όπου x= 0,0088236cm, όπου μηδενίζεται. Εν συνεχεία, παρουσιάζει μια μικρή αύξηση για x= 0,0094164cm και τέλος για x= 0,09576cm μηδενίζεται έως το x= 0,03cm.



Διάγραμμα 6 Ταχύτητα διάδοσης συναρτήσει διάδοσης του μίγματος βάσει του μοντέλου Jiang et al

4.4.3 Σύγκριση Διαγραμμάτων Ταχύτητας Διάδοσης των δύο μοντέλων

Εστιάζοντας στο διάγραμμα της ταχύτητας διάδοσης σύμφωνα με το μοντέλο Jiang et al παρατηρούμε αρκετά κοινά στοιχεία με το διάγραμμα ταχύτητας διάδοσης κατά Bourdon et al. Σε πρώτη ανάγνωση, τα δύο διαγράμματα φαίνεται να έχουν αρκετά όμοια μορφή, καθώς αποκτούν ακαριαία ταχύτητα την ίδια χρονική στιγμή και η συνολική εικόνα των δύο διαγραμμάτων φαίνεται να είναι όμοια, απλώς στην περίπτωση του Bourdon et al εκτείνεται σε όλο το μήκος του σωλήνα. Η ειδοποιός διαφορά εντοπίζεται δηλαδή στο γεγονός πως στο μοντέλο Bourdon et al παρατηρούμε την ταχύτητα διάδοσης να αυξομειώνεται καθ' όλο του μήκος του σωλήνα, ενώ στην περίπτωση του μοντέλου Jiang et al, παρατηρούμε πως τη χρονική στιγμή όπου x= 0,09576cm η ταχύτητα μηδενίζεται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΊΑ

Bourdon, T. Darny, F. Pechereau, J.-M. Pouvesle, P. Viegas, S. Iséni and E. Robert, Numerical and experimental study of the dynamics of a μs helium plasma gun discharge with various amounts of N2 admixture, 2016, Plasma Sources Sci. Technol. 25 035002 DOI 10.1088/0963-0252/25/3/035002

Chen, F.F. (no date) Introduction to plasma physics, SpringerLink. https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4757-0459-4

G. J. M. Hagelaar and L. C. Pitchford, Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models, Plasma Sources Sci. Technol. 14, 722-733 (2005)

Jiang Y., Wang Y., Zhang J., Cong S., Wang D., Comparative study on atmospheric-pressure helium plasma jets driven by pulsed voltage with different polarity, Journal of Applied Physics, (2021), doi: 10.1063/5.0070830

Kazemi, A. et al., Cold Atmospheric Plasma Medicine: Applications, challenges, and opportunities for predictive control, (2024) MDPI.: https://www.mdpi.com/2571-6182/7/1/14.

Moszczynska J., Roszek K., Wisniewski M., Non-Thermal Plasma Application in Medicine- Focus on Reactive Species Involvement, International Journal of Molecular Sciences (2023) doi:https://doi.org/10.3390/ijms241612667.

Nehra, V., Ashok, K. and Dwivedi, H.K., Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources. International Journal of Engineering, Volume (2) : Issue (1) (2008).

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Αεροναυτικής

Papadopoulos P., Svarnas P., A simple fluid model based on charged spheres for the simulation of atmospheric pressure plasma jets, (2023)

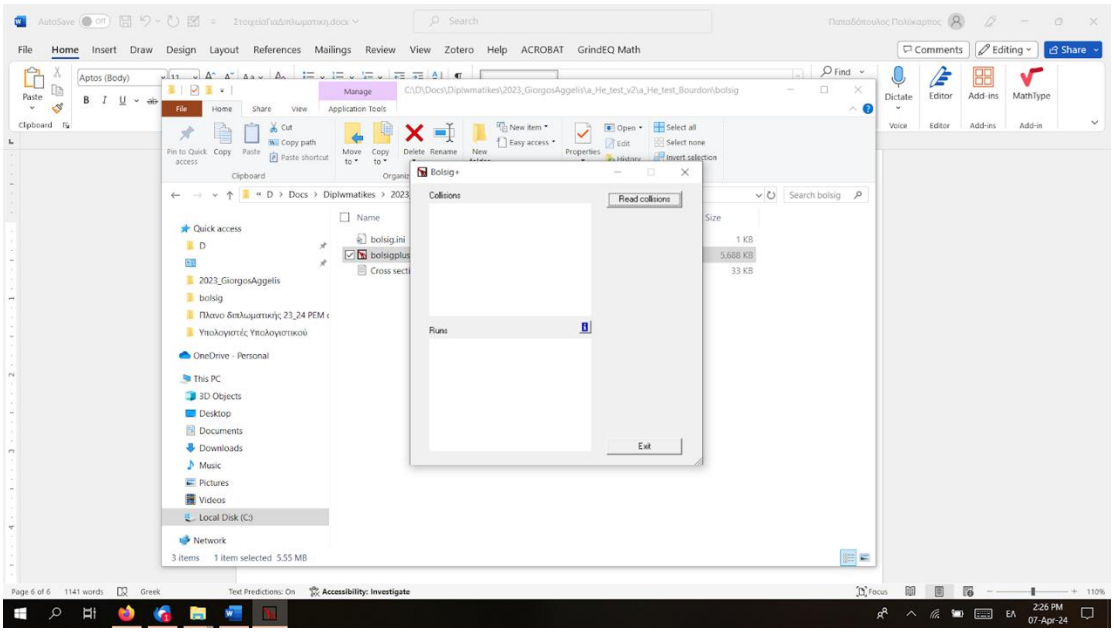
Tanaka, H. and Hori, M. Medical applications of non-thermal atmospheric pressure plasma. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, [online] 60(1), pp.29–32. (2017) doi:https://doi.org/10.3164/jcbn.16-67.

Viegas, P., Bourdon, A. Numerical Study of Jet–Target Interaction: Influence of Dielectric Permittivity on the Electric Field Experienced by the Target. Plasma Chem Plasma Process 40, 661–683 (2020). https://doi.org/10.1007/s11090-019-10033-6

ΠΑΡΆΡΤΗΜΑ

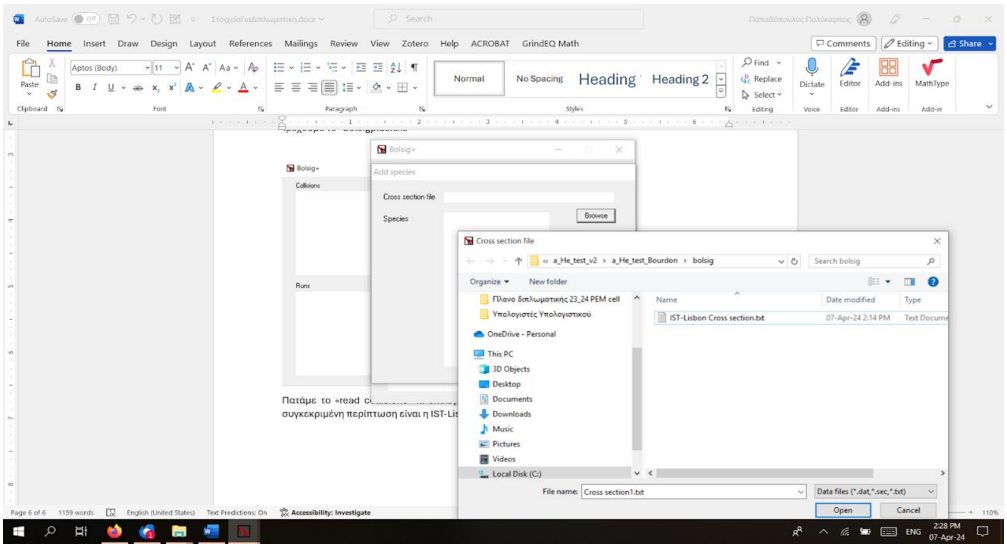
Αλγόριθμος Bolsig+ [2] – Εκτέλεση του προγράμματος

Εκτελούμε το «bolsigplus.exe»



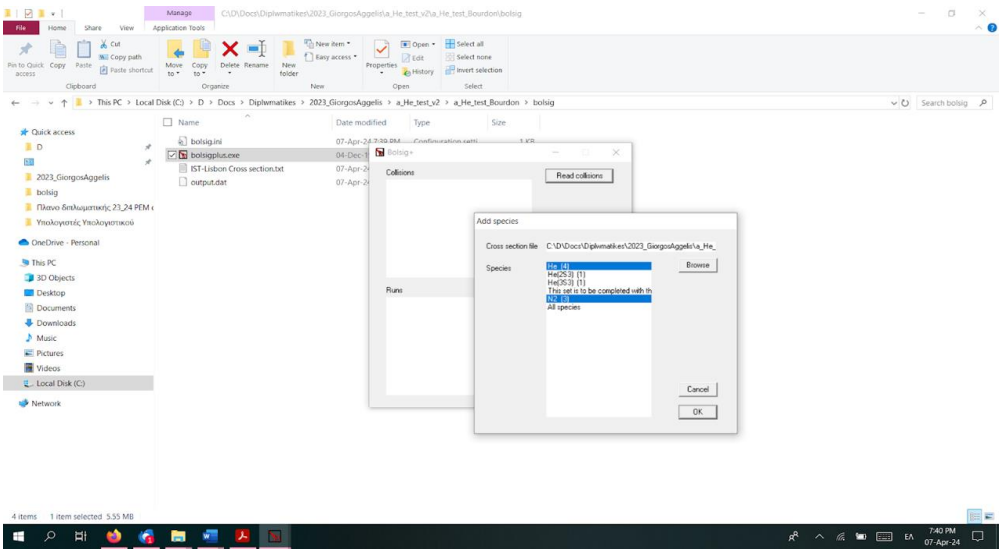
Εικόνα 8 Εκτέλεση προγράμματος Bolsig+

Πατάμε το «Read collisions» κι επιλέγουμε τη βάση δεδομένων που θα χρησιμοποιήσουμε. Στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η IST-Lisbon.



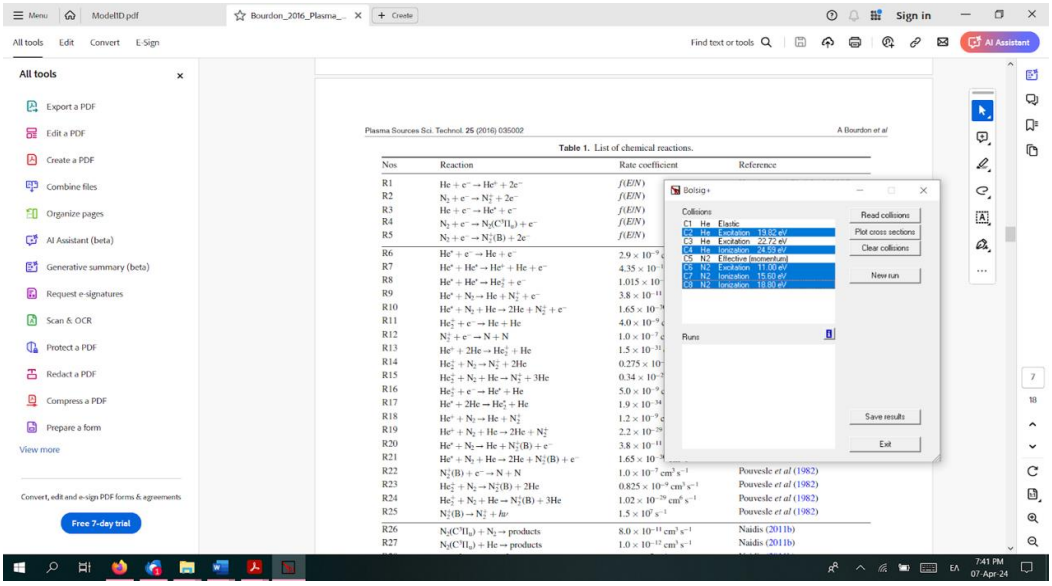
Εικόνα 9 Επιλογή βάσης δεδομένων IST Lisbon Cross

Οι βάσεις δεδομένων έχουν γενικά πολλές αντιδράσεις. Στο εκπαιδευτικό αρχείο «IST-Lisbon Cross section.txt» έχουμε διατηρήσει μόνο μερικές αντιδράσεις που περιλαμβάνονται στο μοντέλο των Bourdon et al.και αντίστοιχα στο μοντέλο των Jiang. Επιλέγουμε τις όλες αντιδράσεις για το ήλιο και για το άζωτο, κρατώντας πατημένο το πλήκτρο Ctrl.



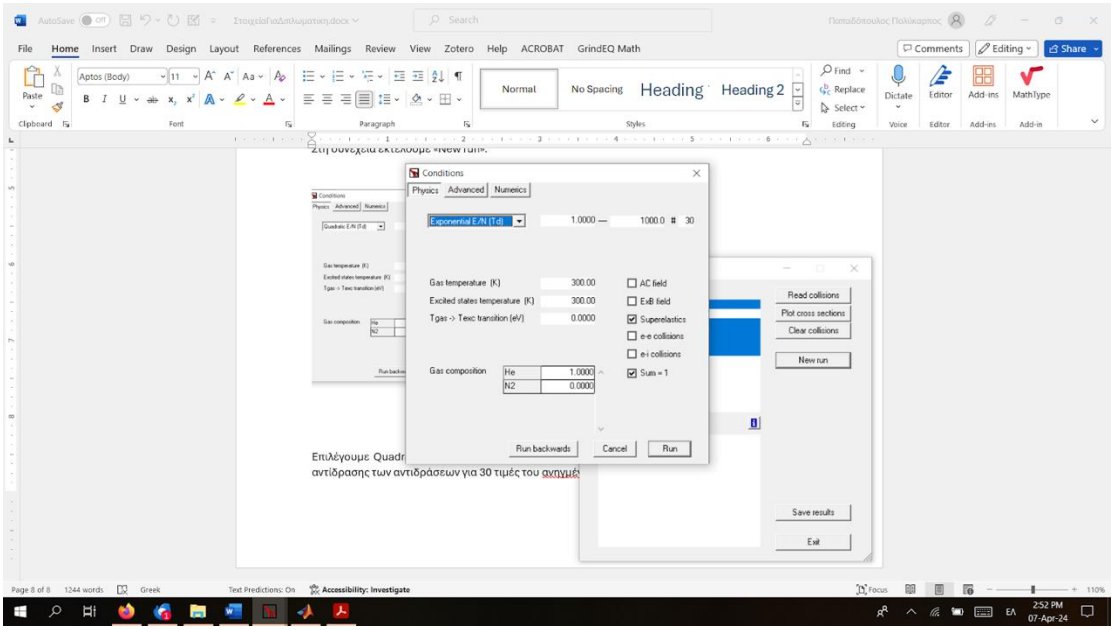
Εικόνα 10 Επιλογή αντιδράσεων από το IST Lisbon Cross

Επιλέγουμε μόνο τις αντιδράσεις που περιέχονται στο μοντέλο.



Εικόνα 11 Διαλογή αντιδράσεων του κάθε μοντέλου

Στη συνέχεια εκτελούμε «New run».



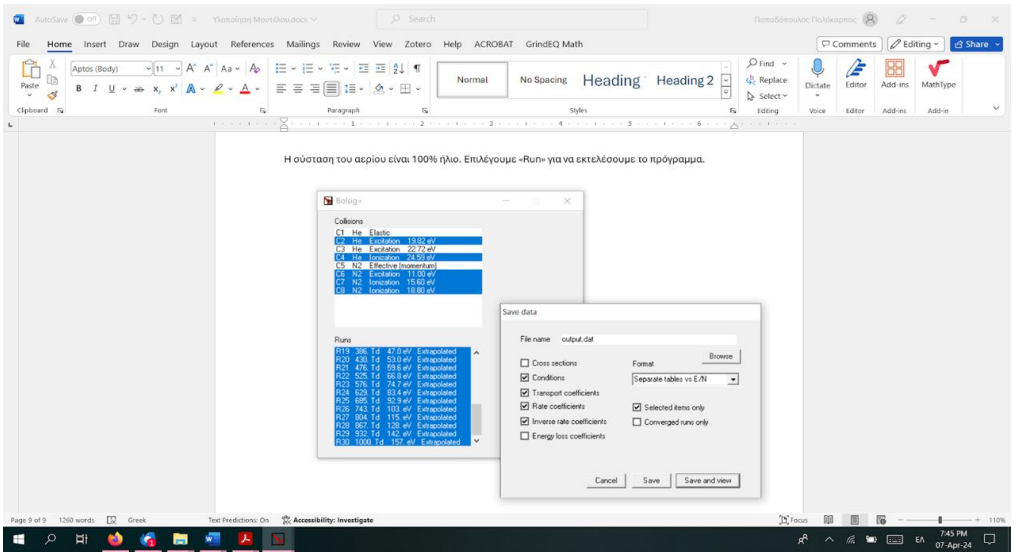
Εικόνα 12 Επιλογή παραμέτρων αντιδράσεων

Επιλέγουμε Quadradic E/N από 1 – 1000 Td και #30 για να λάβουμε τα αποτελέσματα για τους ρυθμούς αντίδρασης των αντιδράσεων για 30 τιμές του ανηγμένου ηλεκτρικού πεδίου E/N με

τετραγωνική αύξηση (ή εναλλακτικά exponential, δεν επιλέγουμε linear γιατί δεν υπάρχει καλή διασπορά των τιμών στο εύρος 1-1000 Td).

Η σύσταση του αερίου είναι 100% ήλιο. Επιλέγουμε «Run» για να εκτελέσουμε το πρόγραμμα και στη συνέχεια «Save results».

Επιλέγουμε τα αποτελέσματα που θέλουμε να καταγραφούν, επιλέγουμε «Separate tables vs E/N» για να εισαχθεί κάθε αντίδραση σε ξεχωριστό πίνακα, και πατάμε «Save and view»

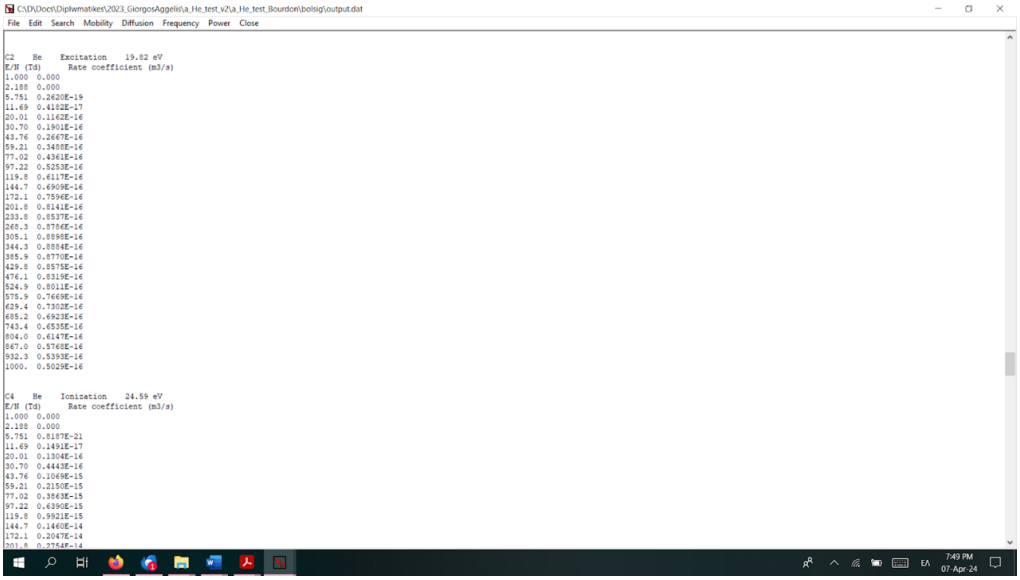


Εικόνα 13 Επιλογή αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα καταγράφονται σε πίνακες για τις διάφορες αντιδράσεις, όπως φαίνεται παρακάτω.

Μετονομάζουμε το αρχείο σε «1_He.txt» και το τοποθετούμε στο φάκελο απ' όπου θα το προσπελάσει ο κώδικας MATLAB.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με «Clear run» και «New run» για τις υπόλοιπες συγκεντρώσεις (90% ήλιο – 10% αέρας και αποθηκεύουμε με το όνομα «2_He.txt», 80% ήλιο – 20% αέρας και αποθηκεύουμε με το όνομα «3_He.txt»)



Εικόνα 14 Πίνακας αποτελεσμάτων αντιδράσεων