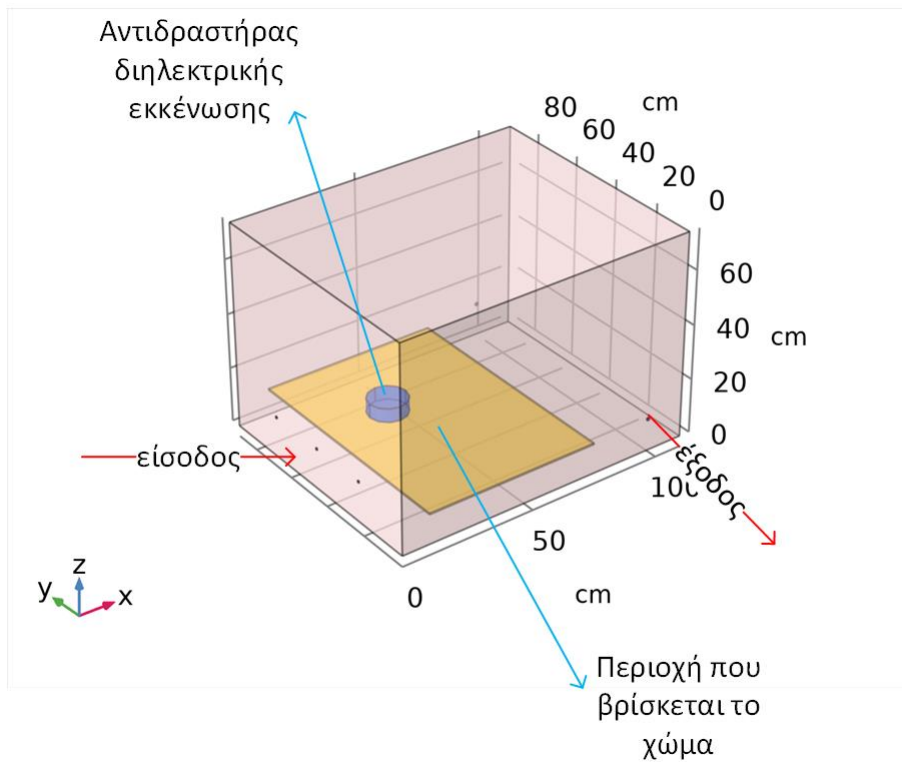


Ανάπτυξη πεδίου ροής σε πιλοτική μονάδα αντιδραστήρα πλάσματος ημι-διαλείποντος έργου για την απορρύπανση ρυπασμένου εδάφους

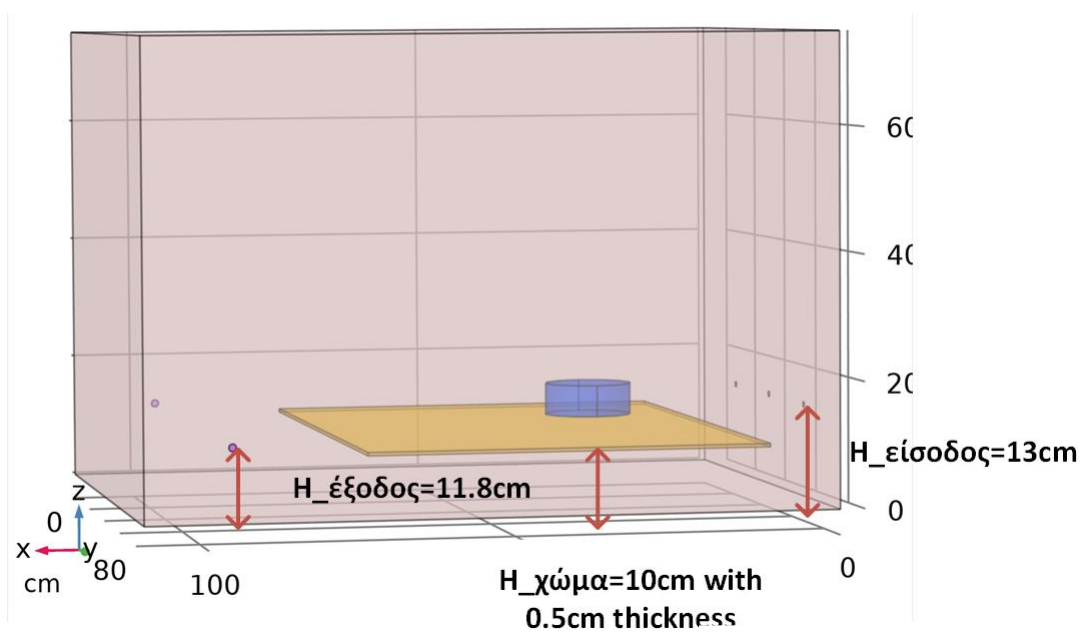
1.Εισαγωγή:

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας με τίτλο "Ανάπτυξη πεδίου ροής σε πιλοτική μονάδα αντιδραστήρα πλάσματος", διερευνήθηκαν οι συνθήκες που οδηγούν στη δημιουργία του ιδανικότερου πεδίου ροής κατά τη διαδικασία απορρύπανσης στο αντιδραστήρα ψυχρού πλάσματος ημι-συνεχούς λειτουργίας που περιγράφηκε προηγουμένως. Όταν αναφερόμαστε σε "ιδανικότερο" πεδίο ροής, εννοούμε μια στρωτή ροή με χαμηλή ταχύτητα ($u \sim 10^{-5} \text{m/s}$) πάνω από την επιφάνεια του χώματος, η οποία επιτρέπει την τροφοδότηση του κενού πάνω από το χώμα με αέρα (O_2 , N_2 κ.λπ.) για τη δημιουργία οξειδωτικών. Αυτό διευκολύνει την απομάκρυνση των παραγωγών των οξειδωτικών αντιδράσεων μετά την ενεργοποίηση του πλάσματος. Επιπρόσθετα, η ύπαρξη μιας πίεσης με στόχο τη μετακίνηση των οξειδωτικών προς το εσωτερικό του ρυπασμένου εδάφους βοηθά στην αύξηση του ρυθμού αντίδρασης τους με τους υπάρχοντες ρύπους. Το **Σχήμα Π1** παρουσιάζει την πιλοτική μονάδα, με την τοποθέτηση των εισόδων και των εξόδων, όπως καθορίστηκαν από την παρούσα μελέτη για την επίτευξη του βέλτιστου πεδίου ροής στη διαδικασία απορρύπανσης με πλάσμα. Αντίστοιχες επιστημονικές εργασίες είχαν πραγματοποιηθεί σε αντιδραστήρα μικρότερης κλίμακας από την ομάδα μας [1], αλλά και άλλες ομάδες πιο πρόσφατα [2]. Σε μεγαλύτερης κλίμακας αντιδραστήρα διαφορετικών συνθηκών ανάπτυξης πλάσματος παρουσιάζονται επίσης στη βιβλιογραφία [3], ωστόσο διαφέρουν σημαντικά από την παρούσα μελέτη.



Σχήμα Π1. Πιλοτική μονάδα και χώρος επίλυσης των εξισώσεων του πεδίου ροής

Στο **Σχήμα Π2** παρουσιάζονται με λεπτομέρεια οι τοποθετήσεις των εισόδων/εξόδων, ενώ στον **Πίνακα Π1** αναγράφονται οι διαστάσεις τους.



Σχήμα Π2. Αναλυτική απεικόνιση των εισόδων και εξόδων του αερίου στην πιλοτική μονάδα

Οι διαστάσεις αναφέρονται αναλυτικότερα στον ακόλουθο Πίνακα Π1:

Πίνακας Π1. Διαστάσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών της πιλοτικής μονάδας

Διαστάσεις πιλοτικής μονάδας	(110(x)*90(y)*75(z)) cm
Πάχος χώματος (αναπαράσταση με κίτρινο χρώμα)	0.5cm
Αντιδραστήρας πλάσματος (κυλινδρική κεφαλή)	10cm
Απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίων (μπλε κύλινδρος και κίτρινο-έδαφος)	0.3cm
Διάμετρος οπών εισόδου (#3)	1cm
Διάμετρος οπών εξόδου (#2)	1.23cm

2. Περιγραφή Μοντέλου και Μεθοδολογία

Μοντέλο 1:

Στην παρούσα εργασία, ο κύριος στόχος ήταν η εξεύρεση των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας και συγκεκριμένα των εισόδων και εξόδων της πιλοτικής μονάδας που θα οδηγούσαν σε βέλτιστες συνθήκες ροής, τόσο για τη μεταφορά του αερίου και δημιουργίας πλάσματος, όσο και για τη μεταφορά αερίων (πρωτογενών και δευτερογενών) προς τις εξόδους. Ο υπολογισμός του πεδίου ροής έγινε με τη χρήση της πλατφόρμας λογισμικού COMSOL MULTIPHYSICS, και συγκεκριμένα του πακέτου Laminar Flow. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν, εξ. (Π1), (Π2), (Π4), περιγράφουν ροή μέσα σε πορώδες έδαφος, και περιλαμβάνουν την εξίσωση συνέχειας και την εξίσωση Navier-Stokes, με τη ροή του αέρα να θεωρείται στρωτή, δηλαδή με χαμηλό αριθμό Reynolds, $Re \sim 1-10$ (εξ. Π3).

$$\frac{\partial \rho_{air}}{\partial t} + \nabla (\rho_{air} \underline{u}) = 0 \quad (\text{Π1})$$

$$\rho_{air} \frac{\partial \underline{u}}{\partial t} + \rho_{air} (\underline{u} \nabla) \underline{u} = \nabla \left[-p \underline{I} + \mu (\nabla \underline{u} + (\nabla \underline{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \underline{u}) \underline{I} \right] \quad (\text{Π2})$$

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (\text{Π3})$$

όπου, ρ_{air} και μ_{air} είναι η πυκνότητα και το ιξώδες, u είναι το πεδίο ταχυτήτων, L είναι η διάμετρος του πόρου (1cm) και είναι υπολογισμένο για αέρα πυκνότητας $\rho = 1.1845 \text{ kg/m}^3$ και ιξώδους $\mu = 1.8444 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m s}$ στους 25°C . Ταχύτητα εισόδου θεωρείται $u_{in} = 1.26 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ που αντιστοιχεί σε $Re = 0.81$. Για να διατηρηθεί η ροή στρωτή πρέπει η ειδική παροχή να είναι μικρότερη ή ίση με $FR = 10 \text{ L/min}$.

Τα τοιχώματα του χώρου θεωρούνται αδιαπέραστα και οι συνοριακές είναι μη ολίσθησης. Όσον αφορά το έδαφος εκεί επιλύεται η εξ. (Π4), όπου η διαπερατότητα δίνεται από την εξ. (Π5) Kozeny-Carman, με παραμέτρους τη διάσταση του κόκκου στα 0.5 mm και πορώδες ίσο με 0.45 .

$$\rho_{air} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho_{air} (\bar{u} \nabla) \bar{u} = \nabla \left[-p\bar{I} + \mu_{air} (\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T) - \frac{2}{3} \mu_{air} (\nabla \bar{u}) \bar{I} \right] - \frac{\mu}{K_s} \varepsilon_p \bar{u} + \frac{Q_{br}}{\varepsilon_p^2} \bar{u} \quad (\text{Π4})$$

$$K_s = \frac{2R_{grain}^2}{9e_p} \quad (\text{Π5})$$

ε_p είναι το πορώδες του εδάφους, R_{grain} είναι ο μέσος όρος ακτίνας του κόκκου, K_s είναι η διαπερατότητα κατά Kozeny-Carman.

Η ροή καθώς εισέρχεται θεωρείται πλήρως ανεπτυγμένη. Κατόπιν βελτιστοποίησης η ειδική παροχή πρέπει να είναι ίση με $FR = 1 \text{ L/min}$, σαν τάξη μεγέθους.

Για τη δημιουργία πλέγματος στο χώρο προσομοίωσης δημιουργήθηκαν περίπου 6 εκατομμύρια τετραεδρικά στοιχεία ακολουθώντας κανονική κατανομή όπως φαίνεται στο ιστόγραμμα ανάλυσης της ποιότητας των πλεγματικών στοιχείων.



Σχήμα Π3. Ιστόγραμμα ποιότητας πλεγματικών στοιχείων

Τέλος, ο χρόνος προσομοίωσης αντιστοιχεί σε 40λεπτά για την υψηλή ανάλυση (δηλαδή 6εκατομμύρια στοιχεία), σε υπολογιστή με τις εξής προδιαγραφές: επεξεργαστής INTEL Core i9-10980XE 3.GHz και RAM 256GB.

Μοντέλο 2:

Για λόγους ταχύτερης απομάκρυνσης των χημικών στοιχείων και ανανέωσης του χώρου με καθαρό αέρα ικανό να δημιουργήσει πληθώρα οξειδωτικών προσομοιώθηκε και η περίπτωση των 100L/min εισερχόμενου αέρα. Σε αυτή την περίπτωση ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται: $Re=1180$, υπολογισμένος με τη μέση διάμετρο οπής εισόδου και είναι οριακά αφορά στο πεδίο της τυρβώδους ροής, τοπικά θα είναι αυξημένος. Επιλέγοντας για την προσομοίωση το k-ε μοντέλο οι εξισώσεις που επιλύονται τροποποιούνται ως ακολούθως [4]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (\text{Π6})$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{Π7})$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{Π8})$$

Η εξίσωση (Π6) αφορά στην τυρβώδη κινητική ενέργεια k και η εξίσωση (Π7) το ρυθμό διάλυσης/διάχυσης [5], u_i είναι η συνιστώσα της ταχύτητας στην κατεύθυνση i, E_{ij} αντιπροσωπεύει τον ρυθμό παραμόρφωσης, μ_t είναι το ιξώδες κατά Eddy εξ. (Π8). Τέλος, οι εξισώσεις περιλαμβάνουν παραμέτρους που προσδιορίζονται πειραματικά σε κάποιες περιπτώσεις και έπειτα από επαναλαμβανόμενες προσπάθειες προσαρμογής σε δεδομένα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.00$, $\sigma_\varepsilon=1.30$, $C_{1\varepsilon}=1.44$ και $C_{2\varepsilon}=1.92$ [5].

Μεθοδολογία:

Η μεθοδολογία της δοκιμής-σφάλματος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα αποτελεί μία κοινά χρησιμοποιούμενη προσέγγιση. Ο βασικός στόχος της είναι η εξέταση διαφορετικών τοποθετήσεων των εισόδων και εξόδων της πιλοτικής μονάδας, μέχρι να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η προσέγγιση αυτή βοήθησε στον καθορισμό των ιδανικών συνθηκών για τη δημιουργία ενός στρωτού πεδίου ροής, ικανού να εξασφαλίζει την αποτελεσματική απομάκρυνση των δευτερογενών αερίων και τον εξαναγκασμό αυτών να περάσουν μέσα από το ρυπασμένο έδαφος.

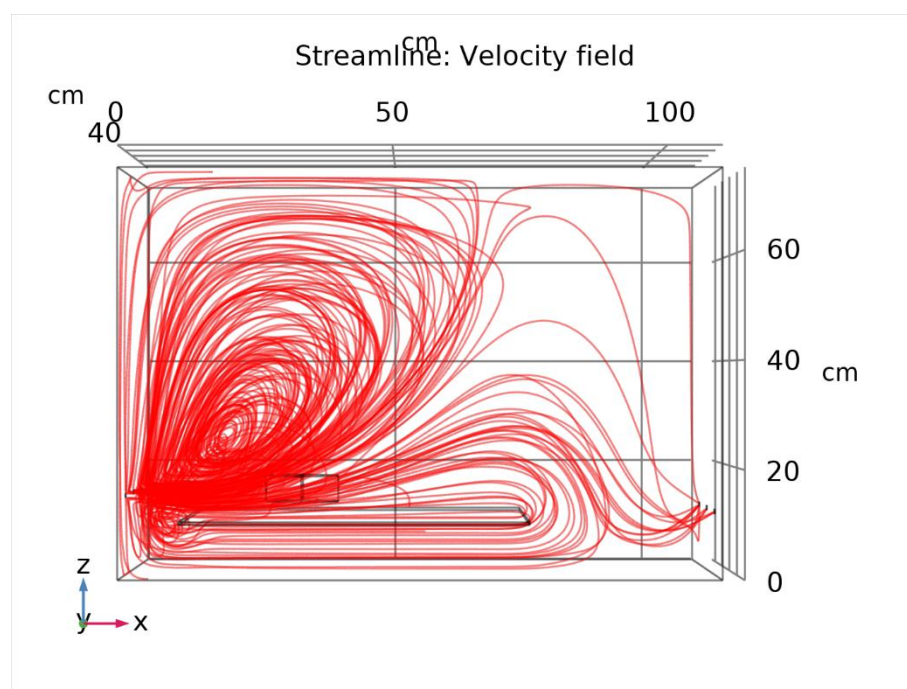
Αντιλαμβανόμενοι τη σημασία της σταθερότητας της ροής και της αποτελεσματικότητας της απομάκρυνσης, εστίασαμε στη συνεχή βελτίωση και προσαρμογή των παραμέτρων

εισόδων/εξόδων. Κάθε δοκιμή προσέφερε νέα δεδομένα και πληροφορίες, τα οποία συνέβαλαν στην εκπόνηση της τελικής, βελτιστοποιημένης μεθοδολογίας.

Είναι αξιοσημείωτο ότι, παρά την απλότητα της τεχνικής δοκιμής-σφάλματος, η ορθή της εφαρμογή απαιτεί ανάλυση, και την ικανότητα αναθεώρησης και προσαρμογής βάσει των αποτελεσμάτων που εξάγονται ιδίως ως προς τις τοποθετήσεις των οπών εισόδων/εξόδων.

3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων Μοντέλου 1

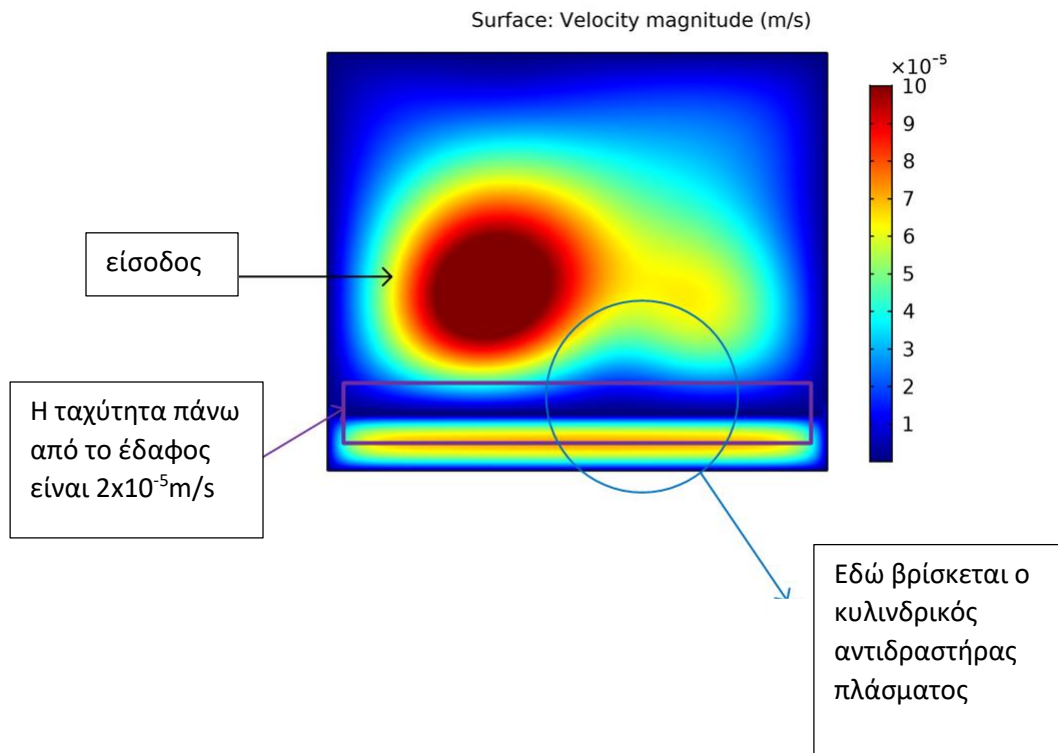
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η απεικόνιση των γραμμών του πεδίου ροής. Η είσοδος βρίσκεται στην αριστερή πλευρά του **Σχήματος Π4**. Παρατηρούμε ότι οι γραμμές του πεδίου ροής είναι παρούσες και στην ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων (0.3cm). Είναι θετικό το γεγονός ότι υπάρχει στρωτή ροή πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Η παρουσία του αέρα σε αυτή τη θέση υποδηλώνει ότι, όταν ο αντιδραστήρας πλάσματος τεθεί σε λειτουργία, θα υπάρχουν στοιχεία που θα διατηρήσουν το πλάσμα και θα αποτελέσουν την πηγή των οξειδωτικών μέσων, τα οποία στη συνέχεια θα μεταφερθούν στο έδαφος για την ολοκλήρωση της απορρύπανσης.



Σχήμα Π4. Παρουσίαση των γραμμών του πεδίου ροής μέσα στο χώρο προσομοίωσης

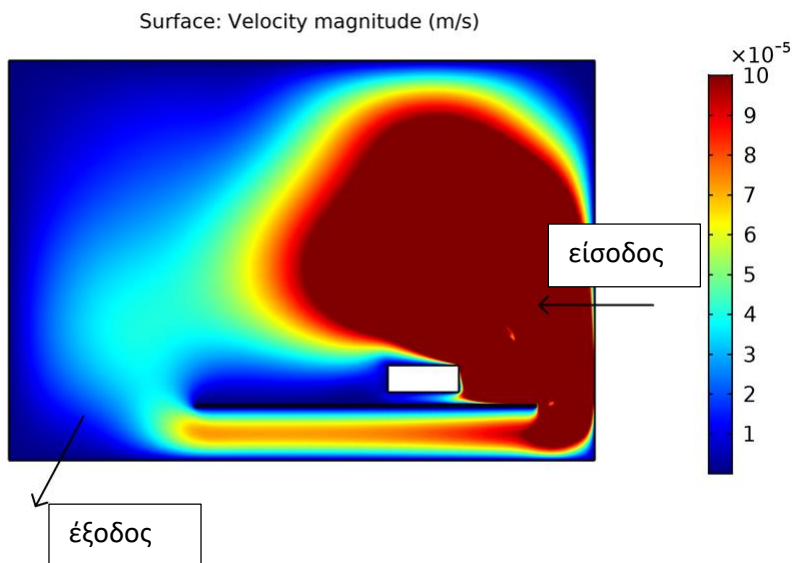
Τα επόμενα **Σχήματα 5 και 6** αναπαριστούν το μέγεθος της ταχύτητας μέσα στο χώρο προσομοίωσης σε διαφορετικές θέσεις πάνω στον άξονα y. Παρατηρείται ότι η ελάχιστη ταχύτητα διαπιστώνεται πάνω από το έδαφος που είναι 2×10^{-5} m/s στο **Σχήμα Π5**. Αυτό

συμβαίνει όταν η κυλινδρική κεφαλή παραγωγής πλάσματος (ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης) βρίσκεται κοντά στις εξόδους. Ωστόσο, η χαμηλή αυτή ροή ευνοεί και τη μεταφορά των οξειδωτικών κατακόρυφα, δηλαδή μέσα στους πόρους του εδάφους. Επομένως όπως προαναφέρθηκε διατηρείται η κατάσταση των χημικών στοιχείων σε κατάσταση πλάσματος (λόγω ανανέωσης), ταυτόχρονα παραμένει υψηλή η παραγωγή οξειδωτικών και ως εκ τούτου η απόδοση του αντιδραστήρα.

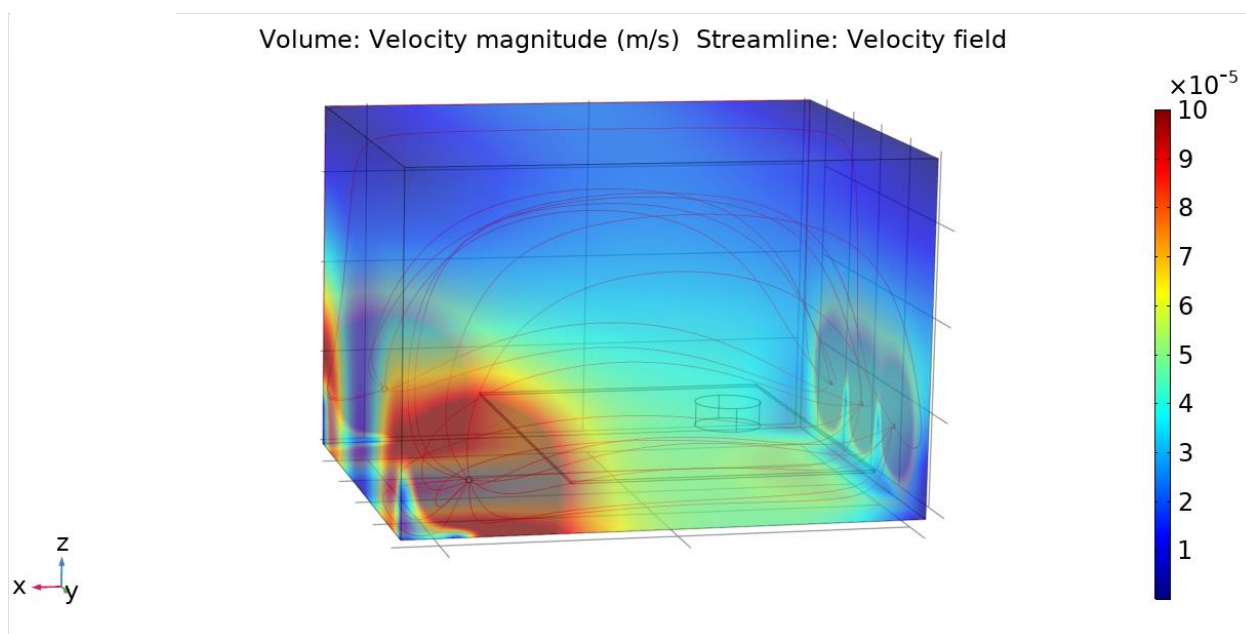


Σχήμα Π5. Χρωματική απεικόνιση του μεγέθους της ταχύτητας για $\gamma=45\text{cm}$

Η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη στον χώρο πάνω από το έδαφος όταν η κυλινδρική κεφαλή πλάσματος βρίσκεται κοντά στην είσοδο όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα Π6**, όπου λόγω της στένωσης που δημιουργείται αυξάνεται τοπικά η ταχύτητα που μπορεί να φτάσει $7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.



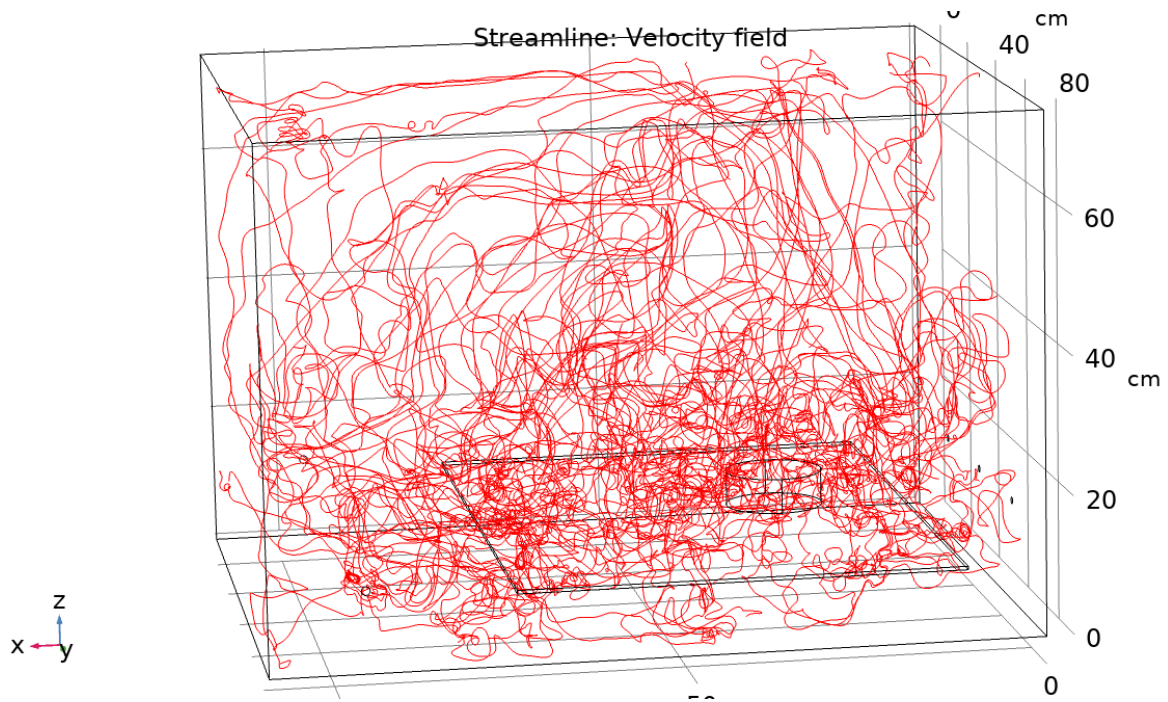
Σχήμα Π5. Αναπαράσταση του μεγέθους της ταχύτητας σε κάθετη τομή του χώρου εργασίας στη θέση $y=10\text{cm}$.



Σχήμα Π6. Τρισδιάστατη αναπαράσταση του μεγέθους της ταχύτητας

3. Παρουσίαση αποτελεσμάτων Μοντέλου 2

Στο Σχ. Π7, φαίνονται οι γραμμές του πεδίου ροής όπου σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν ανακυκλοφορία, που είναι ένδειξη μη στρωτής ροής. Σε κάποιες περιπτώσεις κοντά στα τοιχώματα και προς τις εξόδους παρατηρούνται κλειστές ροϊκές γραμμές που αντιστοιχούν σε περιοχές, όπου εκεί ενδεχομένως να παγιδεύονται τα διάφορα χημικά στοιχεία, κυρίως οξειδωτικά και οργανικοί ρύποι που έχουν εκροφηθεί από το έδαφος.



Σχήμα Π7. Αναπαράσταση του ροϊκού πεδίου με κόκκινες γραμμές

Συμπερασματικά:

Για τον καθορισμό της τοποθέτησης των οπών εισόδων και εξόδων μελετήθηκε το πεδίο ροής που έπρεπε να πληροί τα κριτήρια:

1. Στρωτή ομοιόμορφη ροή πάνω από το προς απορρύπανση έδαφος χαμηλής ταχύτητας, ώστε να επιτρέπεται η κατακόρυφη κίνηση των αερίων και μέσα από το πορώδες έδαφος
2. Η είσοδος να έχει υψηλή ροή, αλλά να μην παρασύρει έδαφος και εμποδίζει τη διαδικασία απορρύπανσης
3. Η έξοδος να μην βρίσκεται ψηλά λόγω του ότι είναι στοιχεία σε αέρια φάση έχουν την τάση να ανεβαίνουν, αλλά χαμηλότερα έτσι ώστε τα αέρια να εξαναγκαστούν να ταξιδέψουν και μέσα από το ρυπασμένο έδαφος
4. Η αύξηση της ειδικής παροχής εισόδου σε 100L/min, οδήγησε στην περιγραφή ενός τυρβώδους μοντέλου ροής του οποίου τα αποτελέσματα χρήζουν περαιτέρω μελέτης

Αξιολογώντας τα κριτήρια που έπρεπε να ισχύουν και μετά την ανάλυση του πεδίου ροής προτάθηκε η παρούσα ανάλυση που συνοψίζεται στο **Σχήμα Π2**, όπου επί της ουσίας η είσοδος βρίσκεται 1.2cm υψηλότερα σε σχέση με την έξοδο.

Βιβλιογραφία

1. Bali, N., et al., *Modeling of a DBD plasma reactor for porous soil remediation*. Chemical Engineering Journal, 2019. **373**: p. 393-405.
2. Zhao, J., et al., *Contrastive study on organic contaminated soils remediated using dielectric barrier discharge (DBD) plasma*. Separation and Purification Technology, 2023. **306**: p. 122576.
3. Van Eck, H., et al., *Modeling and experiments on differential pumping in linear plasma generators operating at high gas flows*. Journal of applied physics, 2009. **105**(6).
4. Launder, B.E. and D.B. Spalding, *The numerical computation of turbulent flows*, in *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*. 1983, Elsevier. p. 96-116.
5. Versteeg, H.K. and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. 2007: Pearson education.