

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΥΡΒΩΔΟΥΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΠΛΑΣΜΑ ΤΥΠΟΥ ΤΖΕΤ ΣΕ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ

Δ. Πασσαράς^{1,2}, Ε. Αμανατίδης², Γ. Κόκκορης^{1,*}

¹Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης & Νανοτεχνολογίας, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», Αθήνα

²Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα

(*g.kokkoris@inn.demokritos.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η λεπτομερής προσομοίωση αντιδραστήρα πλάσματος τύπου τζετ έχει τεράστιο υπολογιστικό κόστος. Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου τυρβώδους ροής αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα με άμεσο αντίκτυπο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τρία διαφορετικά μοντέλα τύρβης [standard k - ϵ , realizable k - ϵ , Large Eddy Simulation (LES)] για την περιγραφή της ροής συγκρίνονται σε αντιδραστήρα πλάσματος τύπου τζετ. Το αέριο τροφοδοσίας είναι το Ar, το οποίο εξερχόμενο από τη συσκευή αναμιγνύεται με τα συστατικά του αέρα. Το μοντέλο LES προβλέπει αυξημένη συγκέντρωση N₂ και O₂ στον άξονα συμμετρίας σε σχέση με τα μοντέλα k - ϵ λόγω μεγαλύτερης τυρβώδους διάχυσης στο μοντέλο LES. Το μοντέλο LES επίσης υπερεκτιμά τις συγκεντρώσεις των N₂ και O₂ στον άξονα συμμετρίας σε σχέση με πειραματικές μετρήσεις. Οι αποκλίσεις από τις μετρήσεις μπορεί να οφείλονται: α) Στην επίδραση της ηλεκτρο-υδροδυναμικής δύναμης που δημιουργεί το πλάσμα στη ροή, β) στην ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων, γ) σε αβεβαιότητες σχετικές με τη γεωμετρία της συσκευής και δ) σε μη λεπτομερής επίλυση της ροής κοντά στα τοιχώματα με το μοντέλο LES.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

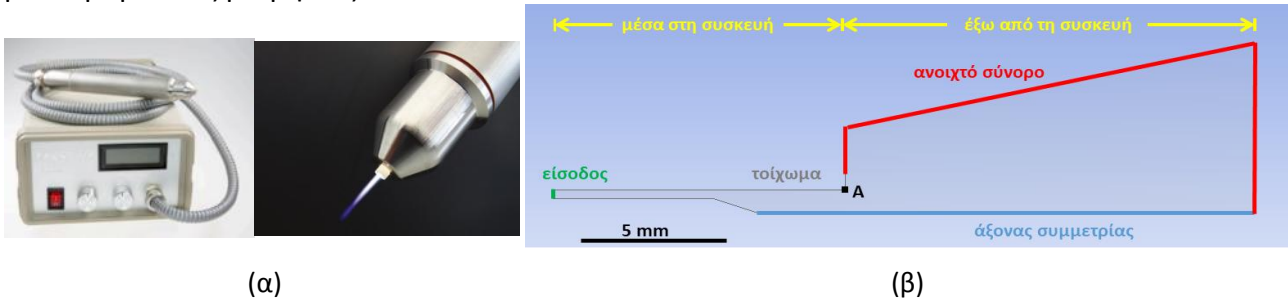
Πλάσμα τύπου τζετ παράγεται όταν αέριο (π.χ. Ar) εισέρχεται με υψηλή ταχύτητα σε αντιδραστήρα πλάσματος που συνήθως είναι ένας κυλινδρικός σωλήνας εφοδιασμένος με κατάλληλα ηλεκτρόδια. Η εφαρμογή τάσης στα ηλεκτρόδια ionίζει το αέριο παράγοντας ηλεκτρόνια. Αν η έξοδος του αντιδραστήρα είναι στο περιβάλλον, τότε τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια προκαλούν τη διάσπαση των συστατικών του αέρα (N₂, O₂, H₂O) οδηγώντας τελικά στη παραγωγή δραστικών συστατικών, κρίσιμων σε σειρά εφαρμογών όπως η αποστείρωση επιφανειών και η χημική ενεργοποίηση επιφανειών στερεών και υγρών^[1]. Ένας από τους αντιδραστήρες που παράγουν πλάσμα τύπου τζετ, ο kiNPen^[2] (Σχήμα 1α), έχει πάρει άδεια χρήσης για θεραπείες επούλωσης πληγών.

Η λεπτομερής προσομοίωση ενός αντιδραστήρα πλάσματος τύπου τζετ έχει τεράστιο υπολογιστικό κόστος. Χρειάζεται να επιλυθούν ταυτόχρονα οι εξισώσεις συνέχειας, διατήρησης ορμής, διατήρησης μάζας των συστατικών καθώς και οι εξισώσεις Maxwell περιγράφοντας φυσικά ή/και χημικά φαινόμενα σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται περαιτέρω λόγω του μεγάλου αριθμού αντιδράσεων και χημικών συστατικών που επιβάλλει η παρουσία του ατμοσφαιρικού αέρα.

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου τυρβώδους ροής αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα με άμεσο αντίκτυπο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Κάθε περίπτωση είναι ξεχωριστή και έτσι, η επιλογή του μοντέλου τύρβης απαιτεί μεγάλη προσοχή. Στην βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως μοντέλα στρωτής ροής^[3,4] ή απλά μοντέλα τυρβώδους ροής (μοντέλο standard k - ϵ)^[5,6]. Το μοντέλο Large Eddy Simulation (LES) έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για πλάσμα τύπου τζετ μόνο εξωτερικά της συσκευής και υποθέτοντας ασυμπιεστή ροή^[7,8].

Στην παρούσα εργασία εστιάζουμε στην επίλυση του προβλήματος ροής στον αντιδραστήρα kiNPen^[2] (Σχήμα 1α) με αέριο τροφοδοσίας Ar. Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να εξετάσουμε την καταλληλότητα διαφορετικών μοντέλων τύρβης για την πρόβλεψη της ροής στον αντιδραστήρα kiNPen, συγκρίνουμε τρία μοντέλα τυρβώδους ροής: μοντέλο standard k - ϵ ,

μοντέλο realizable k - ϵ και μοντέλο LES. Στα δύο πρώτα οι υπολογισμοί γίνονται σε 2 διαστάσεις (2δ) και σε μόνιμη κατάσταση, ενώ στο μοντέλο LES οι υπολογισμοί είναι σε 3δ και σε μεταβατική κατάσταση. Το μοντέλο LES, αν και ακριβέστερο, έχει πολύ μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Τα μεγέθη τα οποία συγκρίνονται είναι οι συγκεντρώσεις των N_2 και O_2 οι οποίες συγκρίνονται και με πειραματικές μετρήσεις.



(α)

(β)

Σχήμα 1. α) Ολόκληρη η συσκευή kINPen^[9] που περιλαμβάνει και το σύστημα ηλεκτρικής τροφοδοσίας καθώς και κεφαλή του τζετ μέσα στην οποία δημιουργείται το πλάσμα. Στο εσωτερικά της κεφαλής υπάρχει κυλινδρικό μεταλλικό ηλεκτρόδιο σε σχήμα βελόνας το οποίο περιβάλλεται από έναν γυάλινο κυλινδρικό σωλήνα. Στο ηλεκτρόδιο με σχήμα βελόνας εφαρμόζεται υψηλή τάση ενώ υπάρχει και ένα γειωμένο ηλεκτρόδιο σε σχήμα δαχτυλιδιού έξω από τον κυλινδρικό γυάλινο σωλήνα. Αρ εισέρχεται μέσα στον γυάλινο σωλήνα από την είσοδο της συσκευής. β) Το 2δ αξονο-συμμετρικό υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιείται για την επίλυση των μοντέλων k - ϵ .

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Οι εξισώσεις οι οποίες επιλύονται για τα μοντέλα k - ϵ είναι^[10] η εξίσωση συνέχειας, η εξίσωση ορμής (η ροή είναι συμπιεστή) και δύο ακόμα εξισώσεις μεταφοράς, για την κινητική ενέργεια τύρβης, k , και για το ρυθμό διάχυσης τύρβης, ϵ ^[11], οι οποίες υπολογίζουν τις μέσες τιμές των μεγεθών (Favre averaged). Για το μοντέλο LES^[10] επιλύονται οι φιλτραρισμένες εξισώσεις συνέχειας και ορμής. Οι δίνες με μέγεθος μεγαλύτερο από το μέγεθος των κελιών επιλύονται λεπτομερώς, ενώ για τις δίνες με μικρότερο μέγεθος από τα κελιά χρησιμοποιείται το μοντέλο WALE^[11]. Για τον υπολογισμό των δυαδικών συντελεστών διάχυσης χρησιμοποιείται τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης Charman-Enskog^[11]. Επιπροσθέτως, για όλα τα μοντέλα επιλύεται η εξίσωση διατήρησης μάζας για τα χημικά συστατικά. Οι συνοριακές συνθήκες των εξισώσεων των μοντέλων περιγράφονται στον Πίνακα 1.

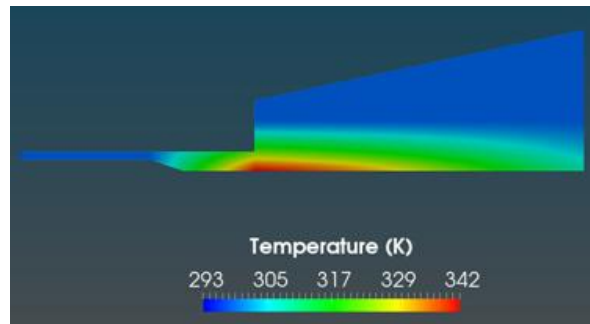
Το 2δ αξονοσυμμετρικό υπολογιστικό χωρίο που χρησιμοποιείται για την επίλυση των μοντέλων k - ϵ φαίνεται στο Σχήμα 1β. Το 3δ υπολογιστικό χωρίο για το μοντέλο LES προκύπτει περιστρέφοντας το Σχήμα 1β κατά 360 μοίρες. Το υπολογιστικό πλέγμα για τα 2δ μοντέλα k - ϵ αποτελείται από ένα υβριδικό πλέγμα με τριγωνικά και τετραγωνικά κελιά. Χρησιμοποιήθηκαν ~200000 κελιά ενώ έγινε και μελέτη της εξάρτησης της λύσης από το πλέγμα για την οποία προέκυψε ότι περαιτέρω αύξηση του αριθμού των κελιών δεν επηρεάζει τη λύση. Μελέτη για την ανεξαρτησία της λύσης από το πλέγμα αλλά και για το χρονικό βήμα έγινε και για το 3δ μοντέλο LES για το οποίο χρησιμοποιήθηκαν 1300000 μεικτά τετραεδρικά-εξαεδρικά κελιά με χρονικό βήμα 40 ns και η λύση ήταν ανεξάρτητη τόσο από το χρονικό βήμα όσο και από τον αριθμό των κελιών. Τέλος, για τα μοντέλα k - ϵ επιλύθηκε λεπτομερώς η ροή κοντά στα τοιχώματα ενώ για το LES μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσεις τοιχωμάτων (Menter-Lechner wall functions)^[11] προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος.

Το μαθηματικό μοντέλο εστιάζει στη ροή λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της θερμοκρασίας που δημιουργεί το πλάσμα^[2]. Δεν λαμβάνονται όμως υπόψη άλλες επιδράσεις του πλάσματος, όπως η μικρή κατανάλωση των Ar, N_2 , O_2 και H_2O και η ηλεκτρο-υδροδυναμική δύναμη (electro-hydrodynamic force). Η κατανομή της θερμοκρασίας η οποία χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς φαίνεται στο Σχήμα 2 και προέρχεται από πειραματικές μετρήσεις^[2].

Τα αποτελέσματα για το μοντέλο LES που παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία προέκυψαν ως μέση τιμή τριών «περασμάτων», όπου με κάθε «πέρασμα» (0.4 ms για τις συνθήκες επίλυσης) εννοούμε το μέσο χρόνο που χρειάζεται για να μεταφερθεί ένας στοιχειώδης όγκος ρευστού από την είσοδο της συσκευής στο ανοιχτό σύνορο (Σχήμα 1β).

Πίνακας 1. Συνοριακές συνθήκες για τις εξισώσεις των μοντέλων. Τα σύνορα φαίνονται στο Σχήμα 1β.

	Εξισώσεις συνέχειας και ορμής (για k - ϵ και LES)	Κινητική ενέργεια και ρυθμός διάχυσης τύρβης (για k - ϵ)	Κλάσμα μάζας
Είσοδος	5 slm	$k=0, \epsilon=0$	1 for Ar 0.0125 for Ar, 0.7531 for N ₂ 0.2275 for O ₂ 0.0069 for H ₂ O
Ανοιχτό σύνορο	πίεση =0 Pa	$k=0, \epsilon=0$	μηδενική ροή διάχυσης
Τοιχώματα	συνθήκη μη ολίσθησης	$k = 0, \frac{dk}{dn} = 0$	

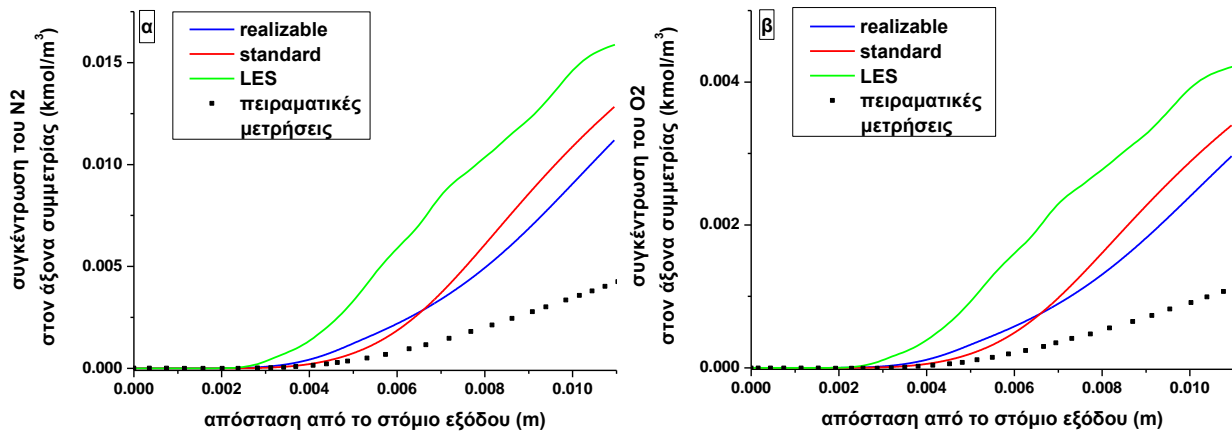


Σχήμα 2. Η κατανομή της θερμοκρασίας στο *kINPeN* όπως προκύπτει από μετρήσεις των Weltmann et al.^[2]

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

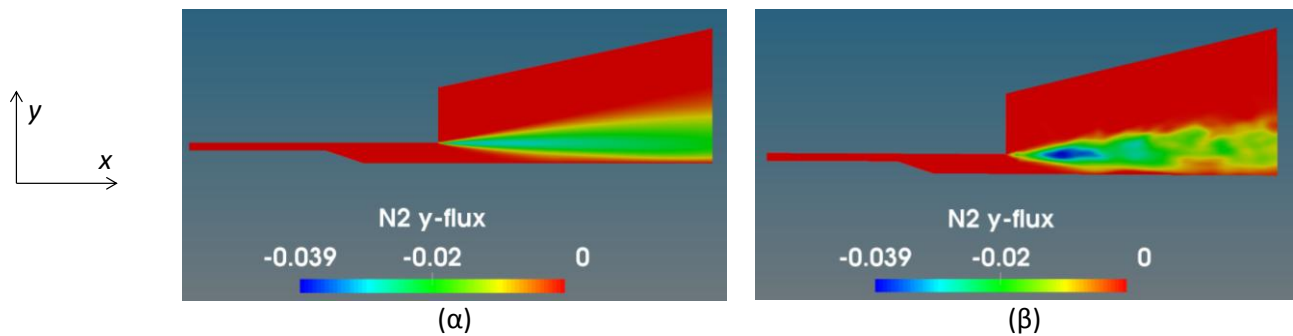
Στο Σχήμα 3 φαίνονται οι συγκεντρώσεις των N₂ και O₂ συναρτήσει της απόστασης από το στόμιο εξόδου της συσκευής (σημείο A στο Σχήμα 1β) πάνω στον άξονα συμμετρίας. Τόσο για το N₂ όσο και για το O₂ οι συγκεντρώσεις που προβλέπει το μοντέλο LES είναι μεγαλύτερες από τα μοντέλα k - ϵ . Το μοντέλο *realizable k*- ϵ προβλέπει χαμηλότερες συγκεντρώσεις για αποστάσεις μεγαλύτερες από τα 6.5 mm από το στόμιο του τζετ.

Μια σημαντική παρατήρηση σχετικά με το Σχήμα 3 είναι ότι οι σχετικές συγκεντρώσεις των N₂ και O₂ (οι συγκεντρώσεις ανηγμένες στις συγκεντρώσεις τους στον αέρα) είναι ίδιες κατά μήκος της απόστασης από το στόμιο της συσκευής. Αυτό δεν ισχύει μόνο για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αλλά και για τις πειραματικές μετρήσεις που φαίνονται στο Σχήμα 3. Αυτό σημαίνει ότι ο κυρίαρχος μηχανισμός διάχυσης οφείλεται στην παρουσία τύρβης και ότι η μοριακή διάχυση έχει αμελητέα επίδραση για όλα τα μοντέλα και για το πείραμα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι αλλάζοντας την τιμή του τυρβώδους αριθμού Schmidt (η προκαθορισμένη τιμή είναι 0.7) μπορεί κανείς να αλλάξει τα αποτελέσματα των συγκεντρώσεων για τα μοντέλα k - ϵ . Όμως, αφού ο αριθμός αυτός έχει καθοριστεί εμπειρικά από έναν πολύ μεγάλο αριθμό διαφορετικών πειραμάτων, δεν μπορεί να γνωρίζει κανείς εκ των προτέρων την τιμή αυτού του αριθμού χωρίς να έχει στη διάθεσή του πειραματικά δεδομένα για κάθε συγκεκριμένη περίπτωση. Από την άλλη μεριά, το μοντέλο LES δεν επηρεάζεται σημαντικά από την τιμή αυτής της παραμέτρου όταν το ποσοστό της μοντελοποιημένης κινητικής ενέργειας τύρβης είναι μικρό (όπως στην δική μας περίπτωση που είναι περίπου 2%).

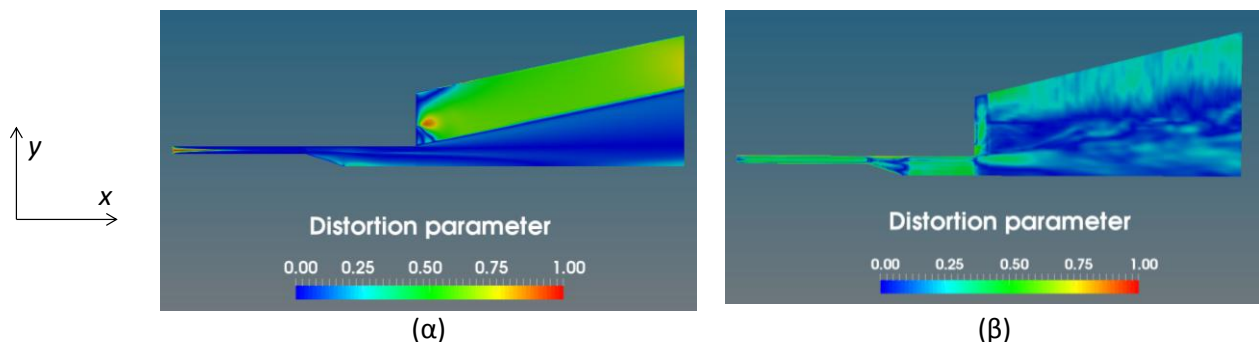


Σχήμα 3. Σύγκριση των μοντέλων για τις συγκεντρώσεις των (α) N_2 και (β) O_2 .

Το μοντέλο LES προβλέπει μεγαλύτερη τυρβώδη διάχυση σε σχέση με το realizable $k-\epsilon$, και αυτό εξηγεί την αυξημένη συγκέντρωση N_2 (και O_2) στον άξονα συμμετρίας σε σχέση με το realizable $k-\epsilon$ στο Σχήμα 3α (Σχήμα 3β). Στο Σχήμα 4 φαίνεται η ροή του N_2 κάθετα στη ροή του τζετ (άξονας y) για το μοντέλο realizable $k-\epsilon$ (Σχήμα 4α) και για το μοντέλο LES (Σχήμα 4β). Τα μόρια N_2 καταφθάνουν στον άξονα της δέσμης σε μικρότερη απόσταση από το στόμιο εξόδου για το μοντέλο LES (εντονότερη τυρβώδης διάχυση) σε σχέση με το μοντέλο $k-\epsilon$ (μοντελοποιημένη διάχυση).



Σχήμα 4. Ροή N_2 κατά τον άξονα y (κάθετο στη ροή) (α) για το μοντέλο realizable $k-\epsilon$ και (β) για το μοντέλο LES.



Σχήμα 5. Παράμετρος ανισοτροπίας (α) για το μοντέλο realizable $k-\epsilon$ και (β) για το μοντέλο LES.

Ένα μειονέκτημα των μοντέλων $k-\epsilon$, τα οποία βασίζονται στην υπόθεση Boussinesq, είναι η αδυναμία τους να προβλέψουν σωστά την ανισοτροπία στην τύρβη, όπως π.χ. στις περιπτώσεις ξαφνικής αλλαγής στο μέσο ρυθμό παραμόρφωσης^[12]. Στις περιπτώσεις αυτές η προσέγγιση Boussinesq καταρρέει και προβλέπει ακαριαία αλλαγή από ανισοτροπία στην ισοτροπία σε αντίθεση με μια μετάβαση πεπερασμένου ρυθμού^[12]. Στο Σχήμα 5 φαίνεται η παράμετρος ανισοτροπίας (distortion parameter) για το realizable $k-\epsilon$ μοντέλο και για το μοντέλο LES. Όταν η παράμετρος ανισοτροπίας είναι 1 τότε έχουμε τη μέγιστη ανισοτροπία, όταν η παράμετρος είναι

Ο, τότε έχουμε ισοτροπία. Για το μοντέλο LES, παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου ανισοτροπίας μέσα και γύρω από τη συσκευή καθώς και μέσα στο οριακό στρώμα του τζετ, κοντά στο στόμιο εξόδου. Αντίθετα, το μοντέλο *realizable k-ε* προβλέπει μία σχεδόν ισοτροπική τύρβη.

Το επίμαχο ερώτημα σχετικά με τα αποτελέσματα του Σχήματος 3 είναι το γιατί μοντέλο LES, το οποίο μοντελοποιεί την τύρβη μόνο σε έναν πολύ μικρό βαθμό (~2%), δεν αναπαράγει τις πειραματικές μετρήσεις. Οι πιθανές απαντήσεις συνοψίζονται στη συνέχεια.

Οι πειραματικές μετρήσεις^[5] του Σχήματος 3 έγιναν κατά τη διάρκεια ηλεκτρικής εκκένωσης μέσα στο τζετ. Στους υπολογισμούς έχουμε λάβει υπόψη μόνο την αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλεί το πλάσμα. Το πλάσμα μπορεί να δημιουργήσει μια ηλεκτρο-υδροδυναμική δύναμη η οποία μπορεί να επηρεάσει τη ροή^[8]. Αν και έχει δειχθεί ότι σε πλάσμα Ar η ροή δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ηλεκτρο-υδροδυναμική^[13,14], η πιθανή επίδραση της ηλεκτρο-υδροδυναμικής δύναμης στην ροή δεν μπορεί να αποκλειστεί.

Μία δεύτερη αιτία για τις διαφορές ανάμεσα στα αποτελέσματα του μοντέλου LES και στις πειραματικές μετρήσεις είναι η ακρίβεια των μετρήσεων. Η ακρίβεια των μετρήσεων TALIF (two-photon laser-induced fluorescence) που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση δεν είναι υψηλή^[15]. Οι διαφορές ανάμεσα σε διαφορετικές μεθόδους μέτρησης συγκέντρωσης (π.χ. TALIF με φασματομετρία μάζας^[14]) μπορεί να είναι αρκετά μεγάλες.

Μία τρίτη αιτία είναι η αβεβαιότητα σχετικά με τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας της συσκευής KINPen. Για παράδειγμα, το μήκος του γυάλινου σωλήνα, η γεωμετρία και η ακριβής θέση της βελόνας σε σχέση με το στόμιο έχουν εξαχθεί από δημοσιευμένες πληροφορίες και σχετικά σχήματα^[16,17]. Αν τα αποτελέσματα του μοντέλου LES είναι ευαίσθητα σε αυτές τις πληροφορίες, είναι πολύ πιθανό να είναι αυτός ο λόγος πίσω από τις αποκλίσεις από το πείραμα.

Μια τέταρτη αιτία σχετίζεται με την ακρίβεια του μοντέλου LES. Συγκεκριμένα, η ροή κοντά στα τοιχώματα δεν έχει επιλυθεί εξαιτίας του μεγάλου υπολογιστικού κόστους αλλά έχουν χρησιμοποιηθεί συναρτήσεις για τα τοιχώματα (wall functions). Οι λεπτομέρειες της ροής κοντά στα τοιχώματα δεν θεωρούνται κρίσιμες για τα τελικά αποτελέσματα αφού το κύριο ενδιαφέρον εστιάζεται στην κυρίως ροή. Εντούτοις, μια πιο ακριβής επίλυση κοντά στα τοιχώματα θα μπορούσε να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Επίσης, αντί να επιλυθεί η εξίσωση ενέργειας, επιβάλλεται ένα πειραματικό προφίλ θερμοκρασίας (Σχήμα 2) ως είσοδος στους υπολογισμούς. Η επίλυση της εξίσωσης ενέργειας θα μπορούσε να αυξήσει την ακρίβεια του μοντέλου LES. Όμως, κάτι τέτοιο α) απαιτεί γνώση του προφίλ της αποτιθέμενης ενέργειας στο αέριο από το πλάσμα κατά μήκος του τζετ, το οποίο είναι, αν όχι αδύνατο, εξαιρετικά δύσκολο να εξαχθεί είτε από πειράματα ή από προσομοιώσεις (απαιτεί την επίλυση ενός λεπτομερούς μοντέλου πλάσματος) και β) ενέχει ένα ακόμα υψηλότερο υπολογιστικό κόστος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα τριών διαφορετικών μοντέλων τυρβώδους ροής (standard *k-ε*, *realizable k-ε*, LES) συγκρίθηκαν μεταξύ τους και με πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης N₂ και O₂ για τη συσκευή πλάσματος τύπου τζετ KINPen. Το αέριο τροφοδοσίας ήταν το Ar, το οποίο εξερχόμενο από τη συσκευής αναμιγνύεται με τα συστατικά του αέρα. Το μοντέλο LES προβλέπει αυξημένη συγκέντρωση N₂ (και O₂) στον άξονα συμμετρίας σε σχέση με τα μοντέλα *k-ε* λόγω μεγαλύτερης τυρβώδους διάχυσης στο μοντέλο LES. Το μοντέλο LES επίσης υπερεκτιμά τις συγκεντρώσεις των N₂ και O₂ στον άξονα συμμετρίας σε σχέση με πειραματικές μετρήσεις. Οι αποκλίσεις από τις μετρήσεις μπορεί να οφείλονται: α) Στην επίδραση της ηλεκτρο-υδροδυναμικής δύναμης που δημιουργεί το πλάσμα στη ροή, β) στην ακρίβεια των πειραματικών μετρήσεων, γ) σε αβεβαιότητες σχετικές με τη γεωμετρία της συσκευής και δ) σε μη λεπτομερή επίλυση της ροής κοντά στα τοιχώματα με το μοντέλο LES. Τα αποτελέσματα του μοντέλου τυρβώδους ροής μπορούν να τροφοδοτηθούν σε μοντέλα πλάσματος (λεπτομερή ή απλοποιημένα) ώστε να υπολογιστούν τα κρίσιμα για κάθε εφαρμογή δραστικά συστατικά.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διδακτορική διατριβή υλοποιείται με υποτροφία του ΙΚΥ η οποία χρηματοδοτείται από την Πράξη «ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ» από πόρους του ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση», 2014-2020.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] X. Lu, G.V. Naidis, M. Laroussi, S. Reuter, D.B. Graves, K. Ostrikov. *Physics Reports* 630 (2016) 1-84.
- [2] K.D. Weltmann, E. Kindel, R. Brandenburg, C. Meyer, R. Bussiahn, C. Wilke, et al. *Contributions to Plasma Physics* 49 (9) (2009) 631-40.
- [3] T. Hemke, A. Wollny, M. Gebhardt, R.P. Brinkmann, T. Mussenbrock. *Journal of Physics D: Applied Physics* 44(28) (2011) .
- [4] W. Yan, D.J. Economou. *Journal of Physics D: Applied Physics* 50(41) (2017).
- [5] S. Reuter, J. Winter, A. Schmidt-Bleker, D. Schroeder, H. Lange, N. Knake, et al. *Plasma Sources Science and Technology* 21(2) (2012)
- [6] M. Dünbier, A. Schmidt-Bleker, J. Winter, M. Wolfram, R. Hippler, K.D. Weltmann, et al. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46(43) (2013).
- [7] R. Xiong, Q. Xiong, A.Y. Nikiforov, P. Vanraes, C. Leys. *Journal of Applied Physics* 112(3) (2012).
- [8] D.K. Logothetis, P.K. Papadopoulos, P. Svarnas, P. Vafeas. *Computers and Fluids* 140 (2016) 11-8.
- [9] S. Reuter, T. Von Woedtke, K.D. Weltmann. *Journal of Physics D: Applied Physics* 51(23) (2018).
- [10] R. Schiestel. *Modeling and Simulation of Turbulent Flows* (2008).
- [11] Fluent. *Fluent manual theory guide*.
- [12] Wilcox DC. *Turbulence Modeling for CFD* (1993).
- [13] X. Lu, G.V. Naidis, M. Laroussi, S. Reuter, D.B. Graves, K. Ostrikov. *Physics Reports* 630 (2016) 1-84.
- [14] B. Van Gessel, R. Brandenburg, P. Bruggeman. *Applied Physics Letters* 103(6) (2013).
- [15] D. Ellerweg, J. Benedikt, A. Von Keudell, N. Knake, V. Schulz-Von Der Gathen. *New Journal of Physics* 12 (2010).
- [16] S. Reuter, T. VonWoedtke, K.D. Weltmann. *Journal of Physics D: Applied Physics* 51(23) (2018).
- [17] A. Schmidt-Bleker, S. Reuter, K.D. Weltmann. *Journal of Physics D: Applied Physics* 48(17) (2015).