

ΧΡΟΝΟΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΣΥΝΤΗΞΗΣ ITER

N. Βασιλειάδης¹, Δ. Βαλουγεώργης²

¹Υποψήφιος Διδάκτωρ, ²Καθηγητής

Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών διεργασιών,

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,

Πεδίον Άρεως, 38334, Βόλος

E-mail: ¹nikovasi@mie.uth.gr, ²diva@mie.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πρόσφατα, ο κώδικας που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την μοντελοποίηση συστημάτων διανομής αερίων που λειτουργούν υπό σταθερές συνθήκες κενού χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του συστήματος άντλησης του αντιδραστήρα ITER (Vasileiadis 2016). Με βάση τις παραπάνω προσομοιώσεις ήταν δυνατόν να εξαχθούν τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά αποτελέσματα για το σύστημα άντλησης κατά τις φάσεις καύσης και εκκένωσης του αντιδραστήρα. Στην παρούσα εργασία οι προσομοιώσεις επεκτείνονται σε χρονικά μεταβαλλόμενα σενάρια λειτουργίας του συστήματος άντλησης. Σε κάθε χρονικό βήμα επιλύεται η ροή στο σύστημα άντλησης ως ένα πρόβλημα σταθερών συνθηκών για την εύρεση του ποσού αερίου που απομακρύνεται από τον τόρο του αντιδραστήρα και στην συνέχεια η πίεση του τόρου ανανεώνεται χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης μάζας. Καθώς η πίεση του τόρου μειώνεται, το αέριο που απομακρύνεται επίσης μειώνεται επηρεάζοντας την επίδοση των αντλιών και του απαιτούμενου χρόνου εκκένωσης. Η πίεση του τόρου στο τέλος της φάσης εκκένωσης υπολογίζεται για ένα μεγάλο εύρος των συνθηκών του τόρου καθώς και για διάφορα σενάρια άντλησης.

Λέξεις Κλειδιά: Δίκτυα διανομής αερίου, φάση εκκένωσης, κινητική θεωρία

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση σύνθετων συστημάτων διανομής αερίων, που λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα χαμηλών πιέσεων από 0.01 Pa μέχρι και την ατμοσφαιρική πίεση (100 kPa) έχει προσελκύσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς τα εν λόγω συστήματα παίζουν σημαντικό ρόλο σε ποικίλες εφαρμογές, όπως τα μικροηλεκτρομηχανολογικά συστήματα αλλά και τα συστήματα κενού που συναντώνται σε αντιδραστήρες σύντηξης και επιταχυντές σωματιδίων. Η μοντελοποίηση αυτών των συστημάτων απαιτεί την χρήση κινητικής θεωρίας, καθώς βρίσκεται εκτός του πεδίου εφαρμογής της κλασσικής θερμορευστοδυναμικής προσέγγισης που βασίζεται στις εξισώσεις Navier-Stokes-Fourier. Ωστόσο, στην περίπτωση συστημάτων διανομής αερίου με εκατοντάδες ή χιλιάδες αγωγούς, η απευθείας μοντελοποίηση τους με κινητική θεωρία απαιτεί τεράστιους υπολογιστικούς πόρους. Για την παράκαμψη αυτού του εμποδίου δημιουργήθηκε μια εκτενής βάση δεδομένων, η οποία αποτελείται από τις αδιάστατες παροχές αερίου διαμέσου αγωγών διαφορετικών ακτινών και μηκών υπό οποιεσδήποτε συνθήκες κενού, υπολογισμένες μέσω κινητικής θεωρίας. Στην συνέχεια η εν λόγω βάση δεδομένων ενσωματώθηκε σε έναν επιλύτη δικτύων διανομής αερίου με πιέσεις λειτουργίας από την ατμοσφαιρική πίεση μέχρι πολύ χαμηλές υποπίεσεις (Misdanitis 2011 & 2013). Ο

κώδικας έχει αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των φάσεων καύσης και εκκένωσης του αντιδραστήρα ITER (Vasileiadis 2016), παρέχοντας πολύ καλή σύγκριση με άλλες εφαρμοζόμενες προσεγγίσεις (Gleason-González 2014, Hauer 2015).

Η προαναφερόμενη εργασία επικεντρώθηκε στην μοντελοποίηση σεναρίων άντλησης σταθερών συνθηκών. Ωστόσο σε διάφορα σενάρια άντλησης του αντιδραστήρα ITER (και DEMO), τα δεδομένα του δικτύου άντλησης, όπως η κατανομή πίεσης του τόρου του αντιδραστήρα μεταβάλλονται με τον χρόνο (Battes 2015). Μια σημαντική λειτουργία άντλησης η οποία καθορίζει και την απόδοση του αντιδραστήρα είναι η φάση εκκένωσης, κατά την οποία ο τόρος εκκενώνεται μεταξύ διαδοχικών φάσεων (παλμών) καύσης. Στην παρούσα εργασία η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε παραπάνω για την επίλυση συστημάτων διανομής αερίου υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας γενικεύεται σε συστήματα διανομής αερίου με χρονομεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες. Η επέκταση του κώδικα για την επίλυση χρονικά μεταβαλλόμενων προβλημάτων γίνεται μέσω μιας υβριδικής μεθοδολογίας (Vargas 2014). Σε κάθε χρονικό βήμα το χρονομεταβαλλόμενο δίκτυο άντλησης επιλύεται ως ένα πρόβλημα σταθερών συνθηκών για την εύρεση του ποσού αερίου που απομακρύνεται από τον τόρο και στην συνέχεια η τιμή της πίεσης του τόρου ανανεώνεται μέσω της αρχής διατήρησης μάζας. Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται τόσο αποτελέσματα σταθερών όσο και χρονομεταβαλλόμενων συνθηκών.

2. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΧΡΟΝΟΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Η απευθείας προσομοίωση ενός πολύπλοκου συστήματος διανομής αερίων υπό χρονομεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας όπως η φάση εκκένωσης του αντιδραστήρα ITER απαιτεί τεράστιους υπολογιστικούς πόρους. Για την μείωση του υπολογιστικού κόστους το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με μια υβριδική μεθοδολογία συνδυάζοντας ένα μακροσκοπικό μοντέλο για την εξέλιξη της πίεσης του τόρου και ένα μικροσκοπικό μοντέλο για την επίλυση του συστήματος άντλησης.

Ο χρόνος που χαρακτηρίζει την ροή στο σύστημα άντλησης του αντιδραστήρα ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται το αέριο για να διασχίσει ένα χαρακτηριστικό μήκος του δικτύου με την πιο πιθανή μοριακή ταχύτητα u_0 και δίνεται ως

$$t_m = R / u_0 \quad (1)$$

όπου R είναι η μεγαλύτερη ακτίνα αγωγού του δικτύου. Ο αντίστοιχος χαρακτηριστικός χρόνος για τον τόρο ο οποίος έχει όγκο V είναι

$$t_M = V / (u_0 R^2) \quad (2)$$

Βάση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του συστήματος άντλησης του ITER αποδεικνύεται ότι $t_m \ll t_M$ και άρα το χρονομεταβαλλόμενο σενάριο εκκένωσης του αντιδραστήρα μπορεί να επιλυθεί ως ένα πρόβλημα ψευδομόνιμων συνθηκών.

Το μακροσκοπικό μοντέλο που περιγράφει την εξέλιξη της πίεσης μέσα στον τόρο εξάγεται από την αρχή διατήρησης μάζας ως

$$V \frac{dP}{dt} = q_{outgas} - \dot{m} R_g T \quad (3)$$

όπου με V , T και P συμβολίζονται ο όγκος, η θερμοκρασία και η πίεση του τόρου αντίστοιχα, t είναι ο χρόνος από την έναρξη της φάσης εκκένωσης, R_g είναι η σταθερά του μεταφερόμενου αερίου, q_{outgas} είναι ο ρυθμός με τον οποίο εισέρχεται αέριο στον τόρο λόγω εκρόφησης από τα τοιχώματα του, ενώ \dot{m} είναι η μαζική παροχή του αερίου που απομακρύνεται από τον τόρο μέσω των αντλιών του δικτύου. Η Εξ. (3) έχει δοθεί στην βιβλιογραφία (Battes 2015) χρησιμοποιώντας την ισοδύναμη μορφή

$$V \frac{dP}{dt} = q_{outgas} - PS_{eff} \quad (4)$$

όπου με S_{eff} ορίζεται η ενεργός αντλητική ταχύτητα του δικτύου άντλησης του αντιδραστήρα η οποία θεωρείται σταθερή σε όλη την διάρκεια της φάσης εκκένωσης. Ο ρυθμός εκρόφησης από τα τοιχώματα του τόρου έχει δειχθεί (Philipps 1993) ότι ακολουθεί μια σχέση της μορφής

$$q_{outgas} = K_1 t^{-n} \quad (5)$$

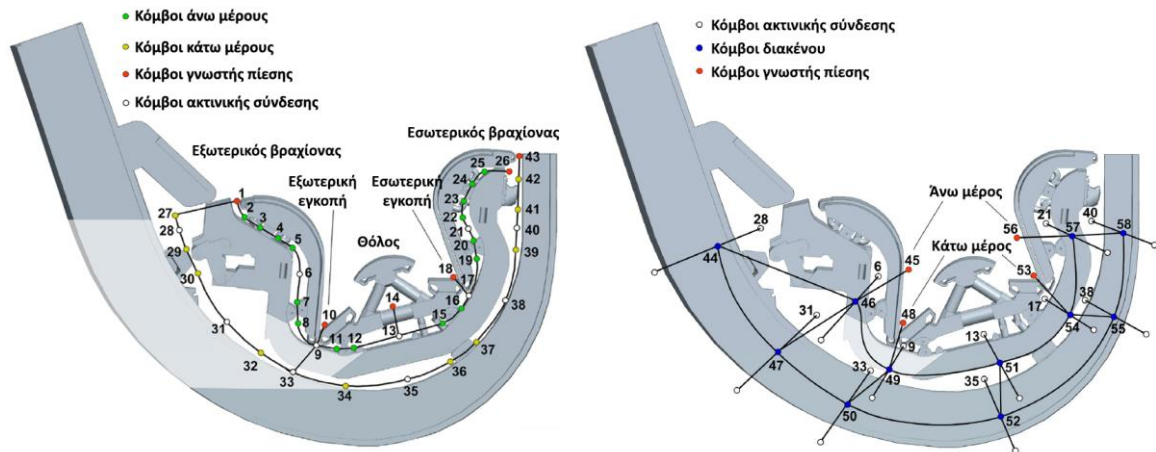
όπου με K_1 συμβολίζεται ο αρχικός ρυθμός εκρόφησης ενώ με n συμβολίζεται ο εκθέτης απόσβεσης της εκρόφησης. Για την ρεαλιστική εκτίμηση του αρχικού ρυθμού εκρόφησης χρησιμοποιείται η Εξ. (4). Θεωρώντας ότι για $t=1$ s ισχύει $dP/dt=0$ γίνεται φανερό πως ο αρχικός ρυθμός εκρόφησης μπορεί να εκτιμηθεί ως $K_1 = P(1)S_{eff}$. Με βάση πειραματικά δεδομένα της αρχικής πίεσης του τόρου για έξι διαδοχικούς παλμούς καύσης του πειραματικού αντιδραστήρα JET (Santucci 2016), ο αρχικός ρυθμός εκρόφησης $K_{1,JET}$ εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ $1.2 \text{ Pam}^3/\text{s}$ και $1.5 \text{ Pam}^3/\text{s}$. Άρα ο αρχικός ρυθμός εκρόφησης του αντιδραστήρα ITER εκτιμάται μεταξύ $5.8 \text{ Pam}^3/\text{s}$ και $7.2 \text{ Pam}^3/\text{s}$ καθώς η επιφάνεια των τοιχωμάτων βηρυλλίου του τόρου του ITER είναι περίπου 3.5 φορές μεγαλύτερη από την επιφάνεια του JET. Ο εκθέτης απόσβεσης έχει αναφερθεί αρκετές φορές στην βιβλιογραφία (Philipps 1993, Philipps 2013, Brezinsek 2013) με τις τιμές του να κυμαίνονται μεταξύ 0.65 και 0.85.

Για την επίλυση της Εξ. (3) και την εύρεση της πίεσης του τόρου χρησιμοποιείται η μέθοδος Runge-Kutta τέταρτης τάξης. Σε κάθε χρονικό βήμα ο όρος της εκρόφησης υπολογίζεται από την Εξ. (5), ενώ ο υπολογισμός της αντλούμενης παροχής \dot{m} γίνεται μέσω μιας βάσης δεδομένων η οποία δημιουργήθηκε επιλύοντας το σύστημα άντλησης για διάφορες τιμές της πίεσης του τόρου χρησιμοποιώντας τον κώδικα προσομοίωσης δικτύων σταθερών συνθηκών. Η περιγραφή του συστήματος άντλησης και της προσομοίωσης του υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας έχει δοθεί λεπτομερώς στην βιβλιογραφία (Vasileiadis 2016).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

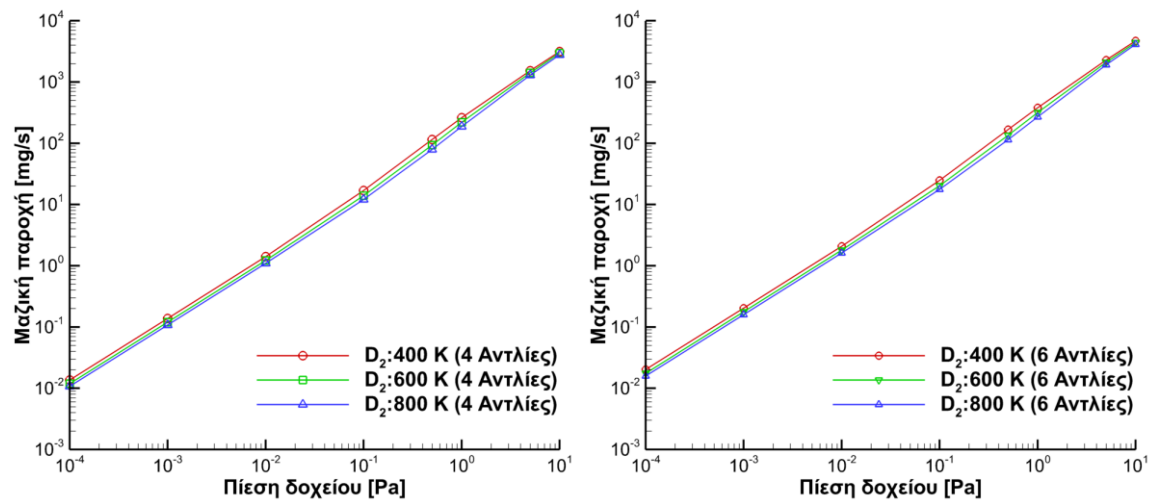
Στον πιο πρόσφατο σχεδιασμό του, το σύστημα άντλησης του αντιδραστήρα ITER αποτελείται από 54 ίδια στοιχεία τύπου κασέτας (cassettes) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ακτινικά με διάκενο 20 mm. Επίσης στις κασέτες 11, 17, 29, 35, 47 και 53 είναι συνδεδεμένες οι 6 κρυογενικές αντλίες του συστήματος. Ο παραπάνω σχεδιασμός οπτικοποιείται στα σχέδια CATIA 2012, από τα οποία εξάγονται οι ακριβείς διαστάσεις για την μοντελοποίηση του συστήματος άντλησης ως ενός δικτύου κόμβων και αγωγών.

Στην Εικ. 1 παρουσιάζεται η τομή μιας εκ των 54 κασετών μαζί με τα δίκτυα για την προσέγγιση της ροής διαμέσου της κασέτας και του διακένου. Στην παρούσα εργασία κάθε κασέτα προσεγγίστηκε με ένα δίκτυο 43 κόμβων και 43 αγωγών. Οι κόμβοι 1 έως 26 και 27 έως 43 αντιστοιχούν στο λεγόμενο άνω και κάτω μέρος της κασέτας, ενώ τα δύο μέρη κάθε κασέτας ενώνονται με τους δύο αγωγούς 1-27 και 9-33. Η ροή στο διάκενο μεταξύ δύο κασετών προσεγγίστηκε με ένα δίκτυο 15 κόμβων και 41 αγωγών. Όπως φαίνεται στην Εικ. 1 το δίκτυο του διακένου ενώνει τις δύο γειτονικές κασέτες μέσω των κόμβων ακτινικής σύνδεσης 6, 9, 13, 17, 21, 28, 31, 33, 35, 38 και 40. Πέρα όμως από την μεταφορά του αερίου στην ακτινική διεύθυνση το δίκτυο του διακένου επιτρέπει και την κίνηση αερίου από το άνω στο κάτω μέρος καθώς και την ανακυκλοφορία του αερίου μέσα στο διάκενο. Επιπλέον οι κόμβοι 1, 10, 14, 18, 26, 43, 45, 48, 53 και 56 που βρίσκονται στα ανοίγματα της κασέτας και στο διάκενο αποτελούν τους κόμβους γνωστής πίεσης του δικτύου και επιτρέπουν την είσοδο/έξοδο αερίου από τον τόρο στο σύστημα άντλησης. Τέλος κάθε σύνδεση κασέτας με αντλία προσεγγίστηκε με ένα δίκτυο 6 κόμβων και 8 αγωγών. Το συνολικό δίκτυο που προκύπτει για την προσομοίωση της ροής διαμέσου του συστήματος άντλησης του αντιδραστήρα ITER αποτελείται από $54 \times (43+15)+6 \times 6=3168$ κόμβους και $54 \times (43+41)+6 \times 8=4584$ αγωγούς.



Εικόνα 1: Διάγραμμα δικτύου για την προσέγγιση της ροής διαμέσου μια κασέτας (αριστερά) και ενός διακένου μεταξύ δύο διαδοχικών κασετών (δεξιά).

Η φάση εκκένωσης του αντιδραστήρα ITER διαρκεί 1400 s και η τελική πίεση του τόρου θα πρέπει να είναι κάτω από 0.5×10^{-3} Pa ώστε να ξεκινήσει η επόμενη φάση καύσης. Για την προσομοίωση της λαμβάνονται υπόψη δύο αντλητικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο των τεσσάρων κρυογενικών αντλιών θεωρείται πως οι αντλίες που λειτουργούν βρίσκονται στις θέσεις 11, 17, 29 και 35, ενώ στο δεύτερο σενάριο των έξι αντλιών θέτονται επίσης σε λειτουργία οι αντλίες στις θέσεις 47 και 53. Επιπλέον θεωρείται ότι ο τόρος έχει όγκο 1400 m^3 και η πίεση του κατά την φάση εκκένωσης είναι ομοιόμορφη, ενώ η μέγιστη ταχύτητα άντλησης των κρυογενικών αντλιών είναι $55 \text{ m}^3/\text{s}$.

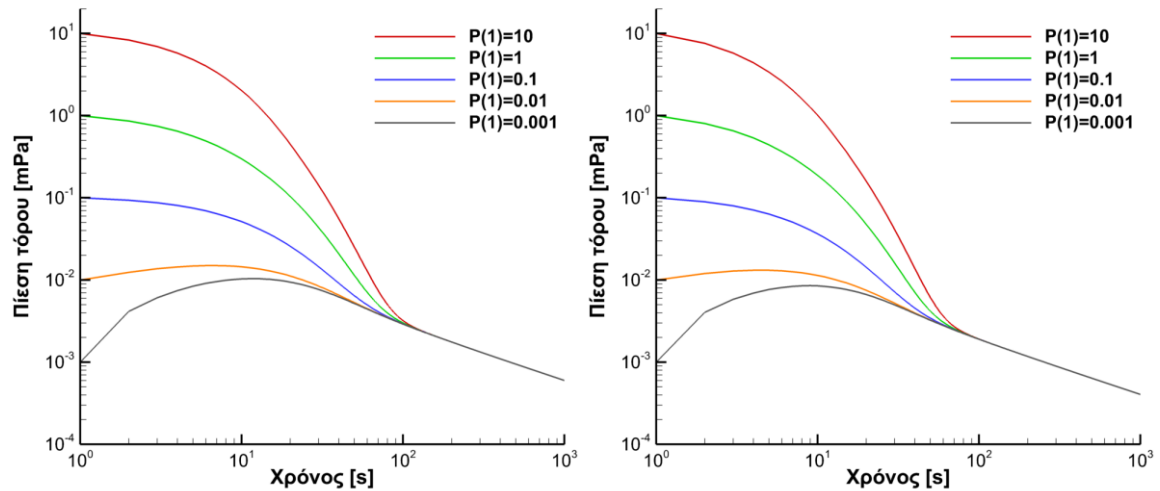


Εικόνα 2: Αντλούμενη μαζική παροχή υπό σταθερές συνθήκες λειτουργίας συναρτημένη της πίεσης του τόρου με τέσσερις αντλίες (αριστερά) και με έξι αντλίες σε λειτουργία (δεξιά).

Στην Εικ. 2 παρουσιάζονται οι αντλούμενες μαζικές παροχές υπολογισμένες με τον κώδικα προσομοίωσης δικτύων σταθερών συνθηκών για διάφορες πιέσεις του τόρου όταν λειτουργούν τέσσερις και έξι κρυογενικές αντλίες. Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν την βάση δεδομένων από την οποία υπολογίζεται η αντλούμενη μαζική παροχή σε κάθε χρονικό βήμα για την επίλυση της Εξ. (3).

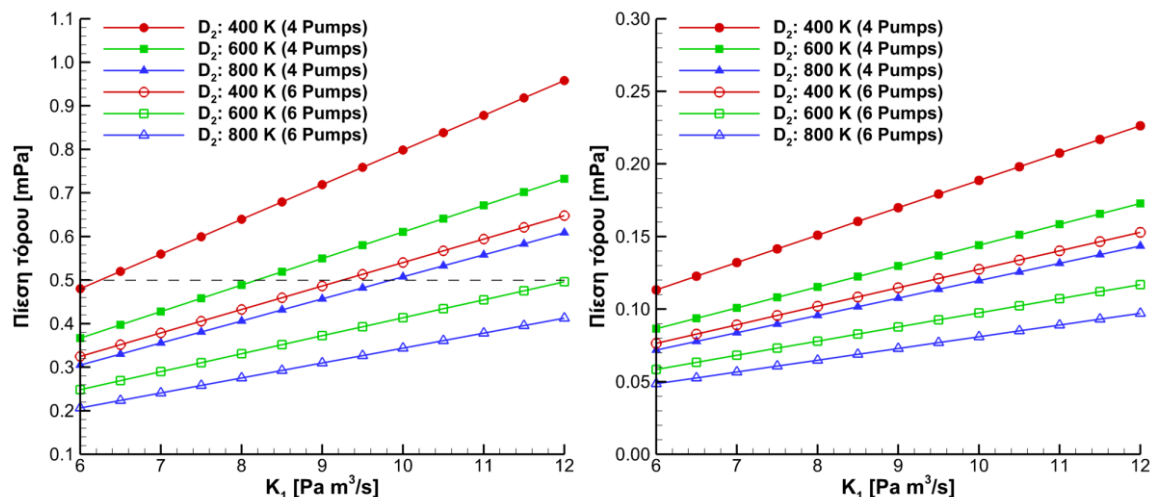
Η εξέλιξη της πίεσης του τόρου με βάση την Εξ. (3) για τα πρώτα 1000 s εκκένωσης με αρχικό ρυθμό εκρόφησης $K_I=6 \text{ Pam}^3/\text{s}$, εκθέτη απόσβεσης $n=0.65$, θερμοκρασία 400 K και με 4 και 6 αντλίες σε λειτουργία παρουσιάζεται στην Εικ. 3. Παρατηρείται ότι μετά τα πρώτα 100 s η εξέλιξη της πίεσης του τόρου δεν εξαρτάται από την αρχική πίεση. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για μεγάλο εύρος των εξεταζόμενων παραμέτρων και άρα συμπεραίνεται πως η

τελική πίεση μετά την φάση εκκένωσης των 1400 s είναι ανεξάρτητη από τις αρχικές συνθήκες πίεσης του τόρου.



Εικόνα 3: Εξέλιξη πίεσης τόρου για τα πρώτα 1000 s της φάσης εκκένωσης για διάφορες αρχικές συνθήκες πίεσης με 4 αντλίες (αριστερά) και 6 αντλίες (δεξιά) σε λειτουργία.

Η πίεση του τόρου μετά το πέρας των 1400 s της φάσης εκκένωσης παρουσιάζεται για ένα μεγάλο εύρος του αρχικού ρυθμού εκρόφησης, για τρεις θερμοκρασίες και για δύο εκθέτες απόσβεσης στην Εικ. 4. Παρατηρείται πως η τελική πίεση του τόρου εξαρτάται σχεδόν γραμμικά από τον αρχικό ρυθμό εκρόφησης ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας και του ρυθμού απόσβεσης. Επίσης με το σενάριο των έξι κρυογενικών αντλιών επιτυγχάνεται μείωση της τελικής πίεσης κατά 32% σε σχέση με το σενάριο των τεσσάρων αντλιών, ενώ το παραπάνω συμπέρασμα ισχύει σε όλο το εύρος των εξεταζόμενων παραμέτρων. Επιπλέον παρατηρείται πως για εκθέτη απόσβεσης 0.85 ακόμα και για έναν αρχικό ρυθμό απόσβεσης $12 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ η τελική πίεση του τόρου μετά την φάση εκκένωσης είναι πάντα χαμηλότερη από τα απαιτούμενα $0.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$. Αντίθετα για εκθέτη απόσβεσης 0.65 ο οποίος αντιστοιχεί στην χειρότερη περίπτωση δεν είναι σίγουρη η επάρκεια είτε των τεσσάρων είτε των έξι αντλιών για την εκκένωση του τόρου κάτω από τα $0.5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$.



Εικόνα 4: Τελική πίεση τόρου μετά το πέρας των 1400 s της φάσης εκκένωσης συναρτήσει του αρχικού ρυθμού εκρόφησης για $n=0.65$ (αριστερά) και $n=0.85$ (δεξιά).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένας υβριδικός αλγόριθμος βασισμένος στον κώδικα που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την μοντελοποίηση συστημάτων διανομής αερίων που λειτουργούν σε συνθήκες υποπίεσης υπό χρονικά μεταβαλλόμενες συνθήκες. Ο εν λόγω αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της φάσης εκκένωσης του συστήματος άντλησης του αντιδραστήρα ITER, ενός από τα μεγαλύτερα και πλέον πολύπλοκα συστήματα κενού μέχρι και σήμερα. Το παρουσιαζόμενο λογισμικό δίνει την δυνατότητα να εξεταστεί η επάρκεια των αντλιών μόλις ολοκληρωθούν οι λεπτομερείς προδιαγραφές του συστήματος, ενώ θεωρείται ότι έχει πολλές δυνατότητες ως εργαλείο μοντελοποίησης, σχεδιασμού και βελτιστοποίησης πολύπλοκων συστημάτων κενού.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει χρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του Εθνικού Προγράμματος Ελεγχόμενης Θερμοπυρηνικής Σύντηξης: Association EUROfusion – Hellenic Republic 2014-2018 (Grant Agreement No 633053, WP EDU).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Andrew P. and Pick M., "Hydrogen retention in the first wall," *Journal of Nuclear Materials*, 220-222, pp. 601–605, (1995).
- Battes K., Day C. and Rohde V., "Basic considerations on the pump-down time in the dwell phase of a pulsed fusion DEMO", *Fusion Eng. Des.*, 100, 431 (2015).
- Brezinsek S., Loarer T., Philipps V., Esser H. G., Grünhagen S., Smith R., Felton R., Banks J., Belo P. and JET EFDA contributors, "Fuel retention studies with the ITER-Like Wall in JET", *Nuclear Fusion*, 53, 083023, (2013).
- Gleason-González C., Varoutis S., Hauer V. and Day C., "Simulation of neutral gas flow in a tokamak divertor using the Direct Simulation Monte Carlo method", *Fusion Engineering and Design*, 89, 1042–1047, (2014).
- Hauer V. and Day C., "ITER divertor gas flow modelling", *Fusion Engineering and Design*, 98, 1775-1778, (2015).
- Misdanitis S. and Valougeorgis D., "Design of steady-state isothermal gas distribution systems consisting of long tubes in the whole range of the Knudsen number", *Journal of Vacuum Technology and Science A*, 29, 061602.1-7, (2011).
- Misdanitis S. and Valougeorgis D., "Modeling of ITER related vacuum gas pumping distribution systems", *Fusion Engineering and Design*, 88, 2352-2356, (2013).
- Pearce R. J. H., Antipenkov A. et al, Gas species, their evolution and segregation through the ITER vacuum systems, *Vacuum*, 86, 1725 (2012)
- Philipps V. and Ehrenberg J., "Analysis of outgassing after Joint European Torus discharges under beryllium wall conditions", *J. Vac. Sci. Technol. A*. 11(2), pp. 437–445, (1993).
- Philipps V., Loarer T., Esser H. G., Vartanian S., Kruezi U. Brezinsek S., Matthews G. and JET EFDA contributors, "Dynamic fuel retention and release under ITER like wall conditions in JET", *Journal of Nuclear Materials*, 438, 1067-1071, (2013).
- Santucci A., Incelli M., Hollingsworth A., Lefebvre X., Kollo Z. and JET Contributors, "Tritium retention and outgassing from JET first wall materials due to tritiated atmosphere exposure: the Tritium Soaking Facility", 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, (2016).
- Vargas M., Naris S., Valougeorgis D., Pantazis S. and Jousten K., "Hybrid modeling of time-dependent rarefied gas expansion", *Journal of Vacuum Science and Technology*, 32 (2), 021602, (2014).
- Vargas M., Naris S., Valougeorgis D., Pantazis S. and Jousten K., "Time-dependent rarefied gas flow of single gases and binary gas mixtures into vacuum", *Vacuum*, 109, 385-396, (2014).

- Vasileiadis N., Tatsios G., Misdanitis S. and Valougeorgis D., "Modeling of complex gas distribution systems operating under any vacuum conditions: Simulations of the ITER divertor pumping system", *Fusion Eng. Des.*, 103, 125 (2016).
- Wykes M., Andrew P., Day C. and Federici G., "Assessment of the ITER dwell pump-down", 21st IEEE/NPS Symposium on Fusion Engineering, 2005.

MODELING AND SIMULATION OF TIME-DEPENDENT GAS PUMPING SCENARIOS IN ITER

ABSTRACT

Recently, at the Transport Processes & Process Equipment Laboratory of the University of Thessaly, an in-house integrated s/w has been developed for modeling rarefied gas distribution systems operating under steady-state conditions and it has been successfully applied to model the ITER divertor pumping system (Vasileiadis 2016). This work has provided both qualitative and quantitative results in the burn and dwell phases of the reactor. Here, this work is extended to investigate the time-dependent pumping scenarios of the ITER gas distribution system. At each time step, based on kinetic modeling, a steady-state flow configuration is solved to estimate the amount of gas passing through the divertor system and then, the torus pressure is updated by applying mass conservation. As the pressure in the torus is reduced with time, the flow becomes more rarefied and consequently, the gas flow towards the cryopumps is also reduced, affecting significantly the pump performance and the overall evacuation time. The torus pressure at the end of the dwell phase is computed assuming various torus conditions and for several pumping scenarios.