

ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΠΗΛΑΙΩΣΗΣ ΣΕ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

Μουσμμούλης Γ.¹, Κασσάνος Ι.¹, Αγγίδης Γ.², Παπαντώνης Δ.¹, Αναγνωστόπουλος Ι.¹

1: Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών (ΕΥΜ), Τομέας Ρευστών, Σχολή Μηχανολόγων
Μηχανικών ΕΜΠ, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, 15780, Αθήνα,

2: Lancaster University Renewable Energy Group, Department of Engineering, Lancaster University,
Bailrigg, Lancaster, LA1 4YW, United Kingdom,

E-mail addresses: mousmoulisgeorge@mail.ntua.gr, ikassanos@gmail.com,
g.aggidis@lancaster.ac.uk, anagno@fluid.mech.ntua.gr, papan@fluid.mech.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη μεγιστοποίησης της παραγωγικότητας στη βιομηχανία, καθώς και εξοικονόμησης ενέργειας και μείωσης του σχετικού κόστους, οδηγεί στην ανάπτυξη εξελιγμένων συστημάτων παρακολούθησης της λειτουργίας των φυγοκεντρικών αντλιών, οι οποίες χρησιμοποιούνται για διακίνηση διαφόρων ρευστών σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες. Ένα από τα υδροδυναμικά φαινόμενα που επηρεάζει την ομαλή λειτουργία και την απόδοση των αντλιών, είναι η ανάπτυξη της σπηλαίωσης, η οποία μελετάται από πολλούς ερευνητές, με στόχο την ανάπτυξη αξιόπιστων μεθόδων διάγνωσης και ελέγχου της. Στο πλαίσιο αυτό, στην παρούσα εργασία μελετάται η έναρξη και ανάπτυξη του μηχανισμού σπηλαίωσης σε φυγοκεντρική αντλία με πτερωτή ακτινικής ροής, ανοικτού τύπου, με χρήση πειραματικών και υπολογιστικών εργαλείων. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνονται μετρήσεις ταλαντώσεων και ακουστικών κυμάτων σε διάφορα σημεία λειτουργίας της αντλίας, ταυτόχρονα με την οπτική παρακολούθηση του φαινομένου, ενώ παράλληλα εφαρμόζεται υπολογιστικό μοντέλο κατάλληλο για τη μελέτη των χαρακτηριστικών της ροής που ελέγχουν την εμφάνιση και την ανάπτυξή του. Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, καθίσταται δυνατή η διάγνωση της σπηλαίωσης σε μια αντλία από τις μετρήσεις ταλάντωσης και ακουστικών κυμάτων, και διαπιστώνεται ότι το αριθμητικό μοντέλο έχει τη δυνατότητα να προβλέψει επιτυχώς τόσο τη θέση εμφάνισης όσο και την έκταση της περιοχής της διφασικής ροής νερού-ατμού εντός της πτερωτής.

Λέξεις Κλειδιά: Φυγοκεντρική αντλία, Διάγνωση Σπηλαίωσης, Μέτρηση μηχανικών ταλαντώσεων, Μέτρηση ακουστικών κυμάτων, Οπτικοποίηση ροής, Υπολογιστική προσομοίωση ροής.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο της ατμοποίησης υγρού ρευστού σε ισοθερμοκρασιακές συνθήκες, όπου η στατική πίεση της ροής, p , μειώνεται σε τιμή μικρότερη της πίεσης ατμών, p_{sat} , ονομάζεται σπηλαίωση. Στις φυγοκεντρικές αντλίες η σπηλαίωση εμφανίζεται στην αναρρόφηση της μηχανής, στην περιοχή της ακμής προσβολής του πτερυγίου, όπου η ροή επιταχύνεται σημαντικά κατά την είσοδό της στην περιστρεφόμενη πτερωτή. Μια τέτοια ανεπιθύμητη πτώση της στατικής πίεσης μπορεί να είναι αποτέλεσμα λανθασμένης σχεδίασης της αντλητικής εγκατάστασης ή επιλογής της ίδιας της αντλίας. Μπορεί όμως να οφείλεται και σε λειτουργία της αντλίας μακριά από το κανονικό σημείο λειτουργίας (ΚΣΛ), κατά την οποία προκαλούνται τοπικές ανακυκλοφορίες και υδραυλικές απώλειες, με πρόσθετη πτώση της στατικής πίεσης. Καθώς η διφασική αυτή ροή μεταβαίνει σε περιοχές υψηλότερων πιέσεων εντός της πτερωτής, οι φυσαλίδες ατμού επαναυγροποιούνται απότομα, προκαλώντας στιγμιαία μεγάλη αύξηση της πίεσης τοπικά, που έχει κρουστική μορφή και μπορεί να προκαλέσει διάβρωση

και φθορά των εσωτερικών μεταλλικών επιφανειών, κυρίως της περωτής. Εκτεταμένη σπηλαιώση στο εσωτερικό μιας αντλίας μπορεί να μειώσει σημαντικά την ενεργειακή απόδοσή της, αλλά και να καταστρέψει σύντομα την επιφάνεια των περυγίων της περωτής, υποβαθμίζοντας όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της (Παπαντώνης, 2009, Li, 2000, Brennen, 2011). Γι' αυτό, το φαινόμενο αυτό μελετάται από πλήθος ερευνητών και μηχανικών, κάνοντας χρήση πειραματικών και υπολογιστικών εργαλείων, με στόχο την επιτυχή διάγνωση και έλεγχο του.

Από πλευράς πειραματικών μελετών το ενδιαφέρον μονοπωλεί η επιλογή των κατάλληλων αισθητήρων, καθώς και η μετέπειτα επεξεργασία των σημάτων τους, που στόχο έχει τη μέτρηση των κυμάτων πίεσης που δημιουργεί η ενδόρρηξη των φυσαλίδων ατμού κατά την επαναυγροποίησή τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες πειραμάτων, εκείνα στα οποία μετρώνται α) τα σήματα στατικής πίεσης (Friedrichs, 2002, Watanabe, 2009, Kobayashi, 2010), β) τα ηχητικά σήματα, διαδιδόμενα είτε σε υγρό μέσω υδροφώνων (Mc Nulty, 1982), είτε σε στερεό μέσω αισθητήρων Acoustic Emission (Gopalakrishnan, 1985, Neill, 1997, Alfayez, 2004), είτε σε αέριο μέσω μικροφώνων (Chudina, 2003 & 2009, Cernetic, 2012) και γ) τα σήματα μηχανικών ταλαντώσεων (Fukaya, 2009, Sato, 2011, Zhang, 2015). Η αριθμητική μελέτη του φαινομένου επιτυγχάνεται με την ενσωμάτωση μεθόδων μοντελοποίησης της διαφασικής ροής σε υπάρχοντα λογισμικά υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Πιο συγκεκριμένα, οι εξισώσεις Reynolds-averaged Navier-Stokes [RANS] συνδέονται με το μοντέλο σπηλαιώσης δύο εξισώσεων το οποίο περιγράφει τη διαδικασία εξάτμισης-συμπύκνωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση των εξισώσεων μεταφοράς, οι οποίες τις περισσότερες φορές βασίζονται σε κάποια απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης Reyleigh-Plesset. Ειδικότερα για τη μελέτη της διαφασικής ροής σε φυγοκεντρικές αντλίες επικράτησαν τέσσερα ομογενή μοντέλα σπηλαιώσης, α) το μοντέλο των Kunz et al. (2000), β) το μοντέλο των Schnerr & Sauer (2001), γ) το μοντέλο των Singhal et al. (2002) και δ) το μοντέλο των Zwart et al. (2004). Τα παραπάνω μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς σε διάφορες μελέτες (Medvitz, 2002, Sato, 2009, Mostafa, 2006, Mousmoulis, 2015) και η επιλογή τους γίνεται με γνώμονα τον επιλυτή και τη μεθοδολογία κατασκευής πλέγματος που χρησιμοποιείται.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η έναρξη και η ανάπτυξη της σπηλαιώσης σε μία φυγοκεντρική αντλία με περωτή ακτινικής ροής, ανοικτού τύπου, κάνοντας χρήση υπολογιστικών και πειραματικών εργαλείων. Το κέλυφος της μηχανής είναι κατασκευασμένο από Plexiglas υλικό και δίνει τη δυνατότητα οπτικής παρακολούθησης του φαινομένου, ενώ εγκαθίσταται σύστημα μέτρησης κραδασμών και ακουστικών κυμάτων, με στόχο τη συσχέτιση των σημάτων τους, που παράγονται με την έναρξη και κατά την εξάπλωση του της περιοχής διαφασικής ροής. Παράλληλα, για την ίδια μηχανή αναπτύσσεται υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής, με στόχο την πληρέστερη κατανόηση των εσωτερικών χαρακτηριστικών της ροής, που ελέγχουν τον μηχανισμό της σπηλαιώσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εργασίας, καθίσταται δυνατή η έγκαιρη διάγνωση του φαινομένου, αιτιολογείται η επιλογή του εύρους συχνοτήτων που χρησιμοποιείται στις μετρήσεις μηχανικών ταλαντώσεων και συγκρίνεται η αποτελεσματικότητα των διαφόρων τύπων αισθητήρων. Επιπλέον, επικυρώνεται η αξιοπιστία του του αριθμητικού μοντέλου σε πλήθος σημείων λειτουργίας, με βάση τις αντίστοιχες εικόνες της ροής που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

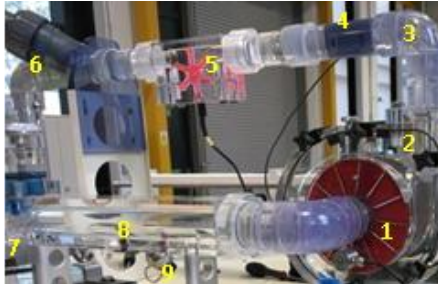
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η πειραματική διάταξη της υπο μελέτη φυγοκεντρικής αντλίας βρίσκεται στο Lancaster University και παρουσιάζεται στην Εικόνα 1α. Εδώ απεικονίζεται όλο το υδραυλικό κύκλωμα μαζί με τους αισθητήρες μέτρησης ρευστομηχανικών μεγεθών (αισθητήρες στατικής πίεσης και παροχής). Το ολικό ύψος της αντλίας υπολογίζεται από την Εξίσωση 1, η ροπή από την Εξίσωση 2, ενώ οι αδιάστατοι αριθμοί ύψους και παροχής από τις Εξισώσεις 2 και 3 αντίστοιχα :

$$H=H_{εξ}-H_{ασ}=(p_{εξ}-p_{ασ})/\rho g+(v_{εξ}^2-v_{ασ}^2)/2g+z \quad (1), \quad P=T\omega \quad (2) \quad \Psi=2gH/u_2^2 \quad (3), \quad \Phi=c_{2n}/u_2 \quad (4)$$

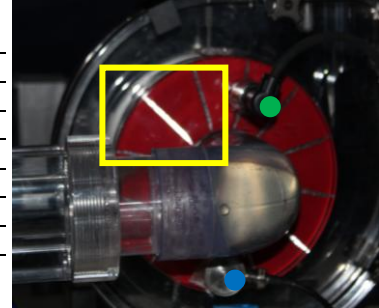
όπου p οι στατικές πιέσεις, v οι ταχύτητες εντός των αγωγών, z η απόσταση μεταξύ των θέσεων μέτρησης της στατικής πίεσης σε αναρρόφηση και κατάθλιψη, P η μηχανική ισχύς, T η ροπή, ω η ταχύτητα περιστροφής, u η περιφεριακή ταχύτητα και c_n η ορθή συνιστώσα της απόλυτης ταχύτητας. Στην Εικόνα 1β απεικονίζονται οι αισθητήρες μέτρησης ταλαντώσεων (πράσινο) και ηχητικών

κυμάτων (μπλε) καθώς και η περιοχή που επιλέγεται για την οπτική παρακολούθηση του φαινομένου (κίτρινο). Η επιλογή των παραπάνω θέσεων γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν το σημείο εμφάνισης των πρώτων φυσαλίδων της διαφασικής περιοχής ανεξαρτήτων σημείου λειτουργίας. Το σημείο αυτό περικλείεται στην περιοχή οπτικής παρακολούθησης και εμφανίζεται εκεί διότι τα συμμετρικά χαρακτηριστικά της ροής διαταράσσονται κυρίως από τη γεωμετρική διαμόρφωση του κελύφους καθώς και από την στροφή 90^οτου αγωγού στην αναρρόφηση της μηχανής.



(α)

1	Πτερωτή Ανοικτού Τύπου
2	Κέλυφος Αντλίας
3	Αγωγός Κατάθλιψης
4	Μετρητής Πίεσης Κατάθλιψης
5	Μετρητής Παροχής
6	Βάνα Κατάθλιψης
7	Βάνα Αναρρόφησης
8	Αγωγός Αναρρόφησης
9	Μετρητής Πίεσης Αναρρόφησης



(β)

Εικόνα 1 α) Η πειραματική διάταξη, **β)** τα σημεία τοποθέτησης αισθητήρα μέτρησης μηχανικών κραδασμών (πράσινο), Acoustic Emission (μπλε) και η περιοχή οπτικής παρακολούθησης (κίτρινο)

Στην παρούσα διάταξη η εφαρμογή συνθηκών σπηλαιώσης γίνεται, υπό σταθερή θερμοκρασία, με κατάλληλη ρύθμιση της βάνας αναρρόφησης που στόχο έχει την αύξηση των υδραυλικών απωλειών. Το Καθαρό Θετικό Ύψος Αναρρόφησης, NPSH, εκφράζεται από την Εξίσωση 5, ενώ ο αδιάστατος αριθμός σπηλαιώσης, σ , από την Εξίσωση 6:

$$NPSH = H_{εισ} - H_{ατμ} = p_{εισ} / \rho g + v_{εισ}^2 / 2g - H_{ατμ} \quad (5), \quad \sigma = NPSH / H \quad (6)$$

όπου $H_{ατμ}$ συμβολίζεται η πίεση ατμοποίησης εκφρασμένη σε mΣΥ. Για τη μέτρηση των μηχανικών κραδασμών χρησιμοποιήθηκε πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο στο οποίο προσαρμόστηκε χαμηλοπερατό αναλογικό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής τα 10 kHz ενώ επιλέχθηκε συχνότητα δειγματοληψίας 20 kHz. Αντίστοιχα, στον αισθητήρα μέτρησης ηχητικών κυμάτων (AE sensor) προσαρμόζεται αναλογικό φίλτρο εύρους ζώνης 100-150 kHz και ορίζεται συχνότητα δειγματοληψίας τα 306 kHz. Η κάμερα που χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση της ροής είναι τύπου DSLR, ενώ πρέπει να τονιστεί ότι στην παρούσα εργασία η οπτικοποίηση τη ροής δε χρησιμοποιείται ως μέθοδος διάγνωσης του φαινομένου, αλλά ως εργαλείο επιβεβαίωσης της ύπαρξης φυσαλίδων καθώς επίσης της θέσης και του μεγέθους τους. Όλες οι μετρήσεις επαναλήφθησαν τρεις φορές και έτσι επιτυγχάνεται ποιοτική και ποσοτική επαναληψιμότητα από τη μία στις μετρήσεις κραδασμών και ακουστικών κυμάτων και από την άλλη στις μετρήσεις των ρευστομηχανικών μεγεθών. Τέλος, η ολική σχετική αβεβαιότητα των μετρούμενων και υπολογισμένων ρευστομηχανικών μεγεθών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Συνολική σχετική αβεβαιότητα για τις μετρούμενες και υπολογισμένες μεταβλητές

[%]	Μετρούμενες Μεταβλητές				Υπολογισμένες Μεταβλητές				
	Q	p	T	ω	Φ	Ψ	σ	H_{tot}	NPSH
	±0.6	±0.3	±1	±0.1	±0.6	±0.6	±0.8	±0.6	±0.6

3. ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το ομογενές μοντέλο των Zwart et al. το οποίο ενσωματώνεται στο λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Fluent (ANSYS).

$$\frac{\partial}{\partial t} (a_{ατμ} \rho_{ατμ}) + \nabla \cdot (a_{ατμ} \rho_{ατμ} \vec{u}_{ατμ}) = \dot{m}^- - \dot{m}^+ \quad (7)$$

$$\dot{m}^- = C_{vap} \frac{3 \alpha_{ατμ} (1 - a_{ατμ}) \rho_{ατμ}}{R_{nuc}} \sqrt{\frac{2(p_{ατμ} - p)}{3 \rho_{υγρ}}} \quad (8),$$

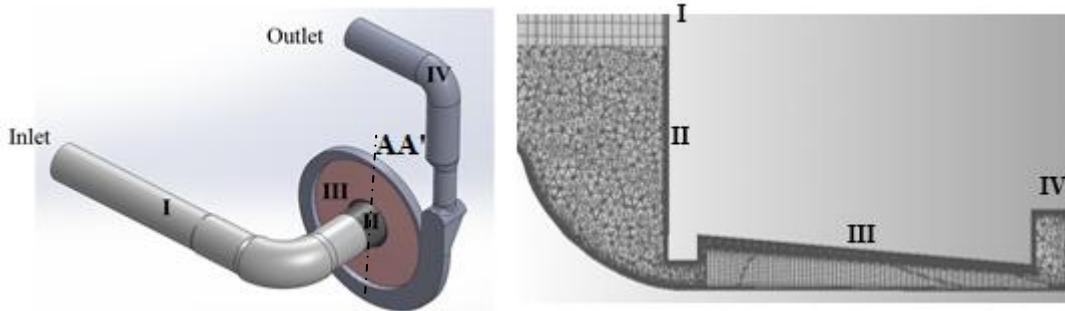
$$\dot{m}^+ = C_{cond} \frac{3 \alpha_{ατμ} \rho_{ατμ}}{R_B} \sqrt{\frac{2(p - p_{ατμ})}{3 \rho_{υγρ}}} \quad (9)$$

Σε αυτό το μοντέλο, η υγρή και αέρια φάση θεωρείται ότι συμπεριφέρονται ως μείγμα και η επιπλέον εξίσωση μεταφοράς για το κλάσμα ατμού (a) δίνεται στην Εξίσωση 7, ενώ στις Εξισώσεις 8 και 9 δίνονται οι εξισώσεις που περιγράφουν τη μεταφορά μάζας από κατά την ατμοποίηση και συμπύκνωση. Γίνεται χρήση του μοντέλου τύρβης k- ω SST, ενώ οι εξισώσεις διατήρησης για το μείγμα δίνονται στις Εξισώσεις 10 και 11, ενώ η πυκνότητα και το ιζώδες του μείγματος από τις Εξισώσεις 12 και 13:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\mu} \vec{u}_{\mu}) + \nabla(\rho_{\mu} \vec{u}_{\mu} \vec{u}_{\mu}) = -\nabla p + \nabla \left[\mu_{\mu} (\nabla \vec{u}_{\mu} + \nabla \vec{u}_{\mu}^T) \right] + \rho_{\mu} \vec{g} + \vec{F} \quad (10)$$

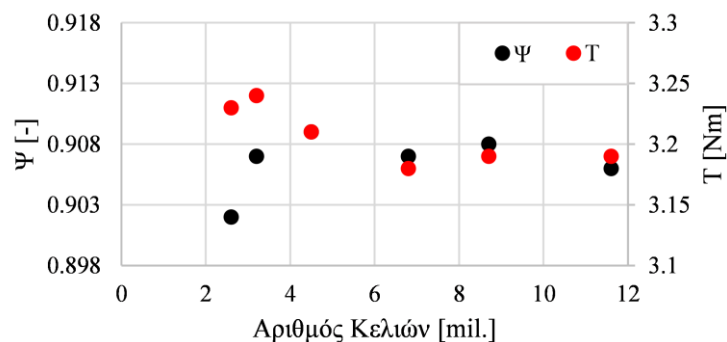
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\mu}) + \nabla(\rho_{\mu} \vec{u}_{\mu}) = 0 \quad (11), \quad \rho_{\mu} = \rho_{\text{ατμ}} \alpha_{\text{ατμ}} + \rho_{\text{υγρ}} \alpha_{\text{υγρ}} \quad (12), \quad \mu_{\mu} = \mu_{\text{ατμ}} \alpha_{\text{ατμ}} + \mu_{\text{υγρ}} \alpha_{\text{υγρ}} \quad (13)$$

Το υπολογιστικό χωρίο χωρίζεται σε τέσσερα μέρη, τον αγωγό αναρρόφησης (I), την είσοδο στην περωτή (II), την περωτή (III) και το κέλυφος με τον αγωγό εξόδου (IV), τα οποία απεικονίζονται στην Εικόνα 2 μαζί με το πλέγμα τους στην τομή AA'. Για την περωτή, η οποία περιλαμβάνει και το διάκενο μεταξύ κινούμενου περυγίου και ακίνητου κελύφους (tip clearance) κατασκευάζεται δομημένο πλέγμα από εξάεδρα κελιά ενώ για την είσοδο στην περωτή και το κέλυφος κατασκευάζεται μη δομημένο πλέγμα από τετράεδρα κελιά τα οποία συναρμολογούνται στο λογισμικό tmerge17.0 της ANSYS.



Εικόνα 2 Τα μέρη που αποτελούν το υπολογιστικό χωρίο και το πλέγμα τους στην τομή AA'

Η ανεξαρτησία πλέγματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 3 όπου φαίνεται ότι επιτυγχάνεται στα 6.8 εκατομμύρια κελιά. Οι οριακές συνθήκες δίνονται απευθείας από τις τιμές της στατικής πίεσης και παροχής που μετρούνται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Στην είσοδο ορίζεται η παροχή μάζας, στην έξοδο η στατική πίεση, στους τοίχους εφαρμόζεται συνθήκη μη ολίσθησης ενώ όλες οι προσομοιώσεις διενεργούνται σε μη μεταβατικές συνθήκες με χρήση του μοντέλου MRF. Τέλος, η σύγκλιση ελέγχεται παρακολουθώντας την πίεση και την ταχύτητα σε διάφορες θέσεις ενώ τα residuals των εξισώσεων πήραν τιμές χαμηλότερες του 10^{-4} .



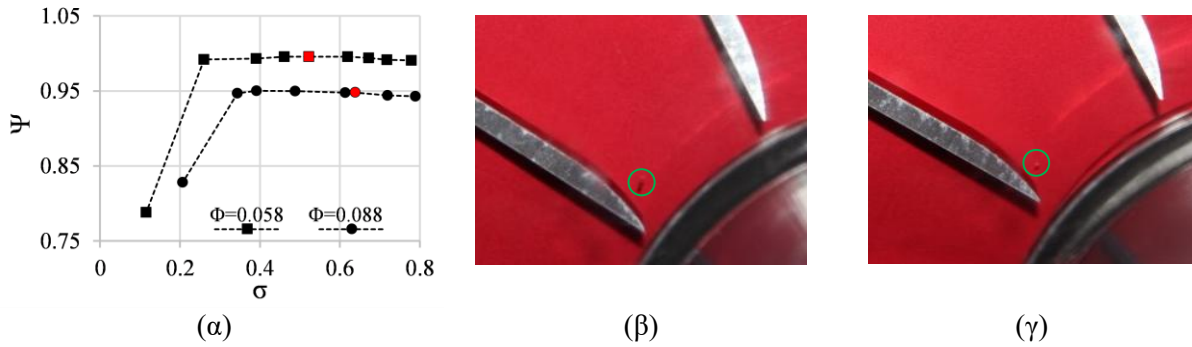
Εικόνα 3 Ανεξαρτησία της λύσης από τη χωρική διακριτοποίηση

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Οπτική απεικόνιση τη εξέλιξης του φαινομένου σε διαφορετικά σημεία λειτουργίας

Δύο παροχές χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των χαρακτηριστικών της σπηλαιώσης για την παρούσα μηχανή, οι οποίες παρουσιάζονται στην Εικόνα 4α. Με κόκκινο χρώμα σημειώνεται το σημείο λειτουργίας για το οποίο παρατηρείται οπτικά η έναρξη του φαινομένου με το σχηματισμό των

πρώτων φυσαλίδων ατμού, ενώ και στις δύο παροχές παρατηρείται η πτώση του ύψους με την πτώση του αριθμού σπηλαιώσης. Ο σχηματισμός των πρώτων φυσαλίδων λαμβάνει χώρα στην είσοδο της ροής στην περύγωση της μηχανής, στην πλευρά υποπίεσης και παρουσιάζεται και για τις δύο παροχές στις Εικόνες 4β και 4γ. Το γεγονός ότι η αύξηση της παροχής οδήγησε στην παρατήρηση της εμφάνισης της πρώτης φυσαλίδας αλλά και της πτώσης του ύψους σε μεγαλύτερες τιμές σ , αιτιολογείται από το γεγονός της αύξησης του πεδίου ταχυτήτων και άρα την εντονότερη πτώση στις τιμές της στατικής πίεσης.



Εικόνα 4 α) Οι χαρακτηριστικές σπηλαιώσης της αντλίας για δύο παροχές, **β, γ)** η εμφάνιση της πρώτης φυσαλίδας ατμού για $\Phi=0.058$ και $\Phi=0.088$ αντίστοιχα

Η μείωση του αριθμού σπηλαιώσης οδηγεί στην επέκταση του φαινομένου, όπως παρουσιάζεται στις Εικόνες 5 και 6. Για $\sigma > 0.39$, παρατηρείται η αύξηση του αριθμού των φυσαλίδων σε σχέση με τις Εικόνες 4β και 4γ. Για τιμές σ μεταξύ 0.26 και 0.34, η σπηλαιώση αρχίζει να καλύπτει την επιφάνεια εισόδου της ροής στη μηχανή, ωστόσο ακόμα δεν παρατηρείται κάποια πτώση στο Ψ . Η περαιτέρω μείωση της στατικής πίεσης στην είσοδο της αντίας (σ μεταξύ 0.11 και 0.21) προκαλεί την έντονη αύξηση του φαινομένου το οποίο καταλαμβάνει πλέον το μεγαλύτερο κομμάτι του χώρου μεταξύ των περρυγίων γεγονός που προκαλεί και την πτώση του συνολικού ύψους.



Εικόνα 5 Απεικόνιση της ανάπτυξης του φαινομένου σε διαφορετικούς αριθμούς σ για $\Phi=0.058$

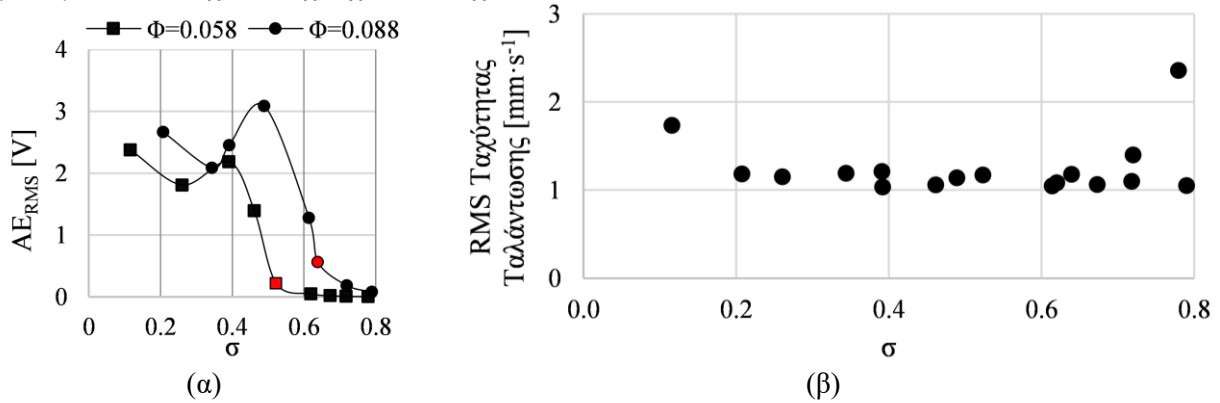


Εικόνα 6 Απεικόνιση της ανάπτυξης του φαινομένου σε διαφορετικούς αριθμούς σ για $\Phi=0.088$

4.2 Μετρήσεις ακουστικών κυμάτων και μηχανικών ταλαντώσεων

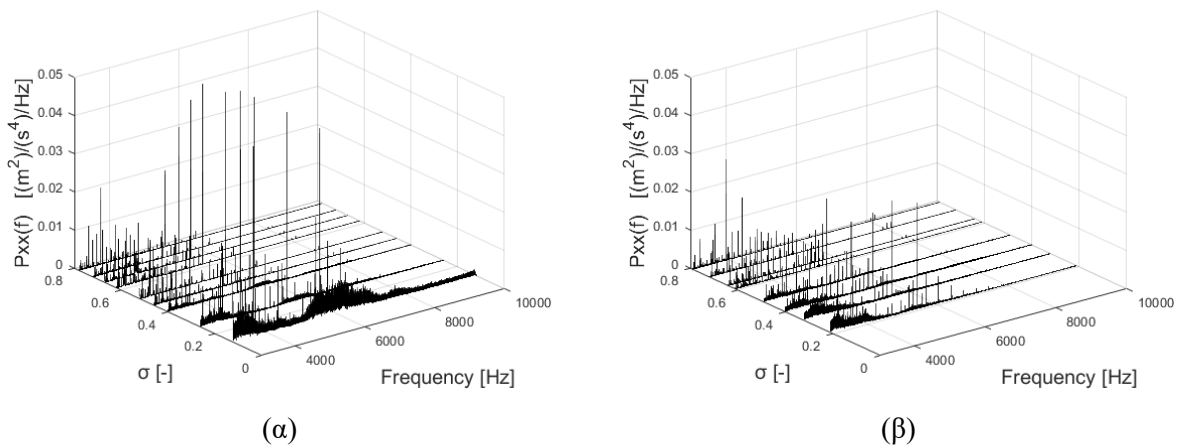
Για κάθε σημείο που απεικονίζεται στην Εικόνα 4α, λαμβάνονται μετρήσεις κραδασμών από δύο επιταχυνσιόμετρα καθώς και μετρήσεις ακουστικών κυμάτων από αισθητήρα ΑΕ. Στις μετρήσεις των τελευταίων, υπολογίζεται και παρακολουθείται η RMS τιμή του σήματος, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 7α, ενώ με κόκκινα χρώμα παρουσιάζονται ξανά τα σημεία εκκίνησης της οπτικής παρατήρησης της σπηλαιώσης. Στο παρόν γράφημα, η RMS τιμή μοιάζει να αυξάνει τη στιγμή εκκίνησης του φαινομένου, γεγονός που αποδεικνύει την ικανότητα του αισθητηρίου ΑΕ να διαγνώσει τις πρώτες φυσαλίδες από την πρώτη στιγμή εμφάνισης τους. Επιπλέον, η ένταση των κυμάτων δείχνει να είναι συστηματικά ανώτερη στις μεγαλύτερες παροχές, γεγονός που δικαιολογείται από το

αυξημένο πεδίο ταχυτήτων εντός της περωτής. Ωστόσο, εντύπωση προκαλεί η μείωση της RMS έντασης στο σημείο ($\sigma=0.25$ για $\Phi=0.058$, $\sigma=0.35$ για $\Phi=0.088$) όπου η διφασική περιοχή καλύπτει την είσοδο της μηχανής. Αυτή η τάση μείωσης του θορύβου, παρατηρείται και στα αποτελέσματα των Mc Nulty & Pearsall (1982) και Cernetic & Cudina (2012) και αιτιολογείται από το γεγονός της απορρόφησης και αντανάκλασης των κυμάτων ΑΕ από τη διφασική περιοχή. Τελικά, στην ελάχιστη τιμή του αριθμού σπηλαίωσης, οι τιμές αυτές αυξάνουν και πάλι απεικονίζοντας την ανάπτυξη του φαινομένου και της πτώσης της απόδοσης που το ακολουθεί.



Εικόνα 7 α) Η RMS τιμή των ακουστικών κυμάτων, **β)** Η RMS τιμή των κραδασμών

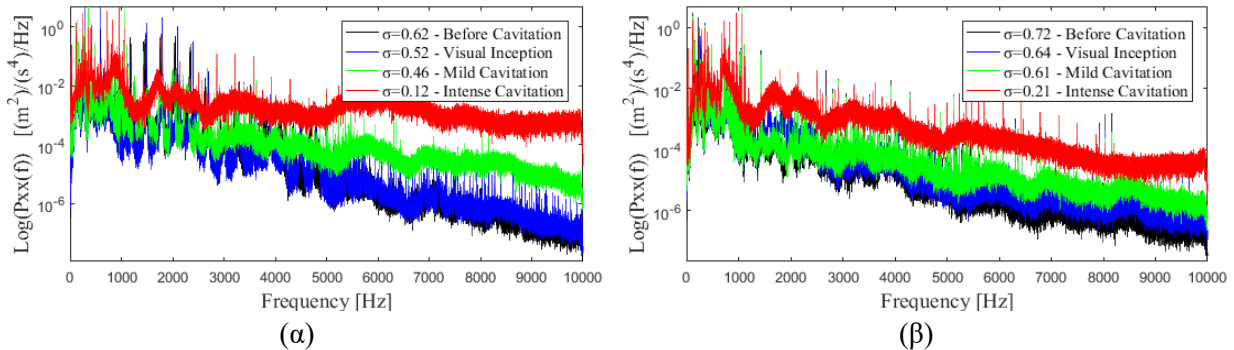
Από μεριάς μηχανικών κραδασμών, τα RMS αποτελέσματα της ταχύτητας ταλάντωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 7β. Η επιλογή της ταχύτητας γίνεται για τον ταυτόχρονο έλεγχο του επιπέδου των κραδασμών, ο οποίος βρίσκεται κάτω από το επίπεδο των 3 mms^{-1} και άρα το συνολικό επίπεδο κραδασμών της μηχανής θεωρείται ικανοποιητικό, ανεξαρτήτως του σημείου λειτουργίας που δοκιμάστηκε. Ωστόσο, από τον παραπάνω υπολογισμό δεν καθίσταται δυνατή η διάγνωση του φαινομένου, από τα επιταχυνσιόμετρα και γι' αυτό διενεργείται περαιτέρω ανάλυση στο σήμα στο πεδίο των συχνοτήτων.



Εικόνα 8 Το πεδίο συχνοτήτων των κραδασμών, για εύρος [3-10] kHz, για **α)** $\Phi=0.058$, **β)** $\Phi=0.088$

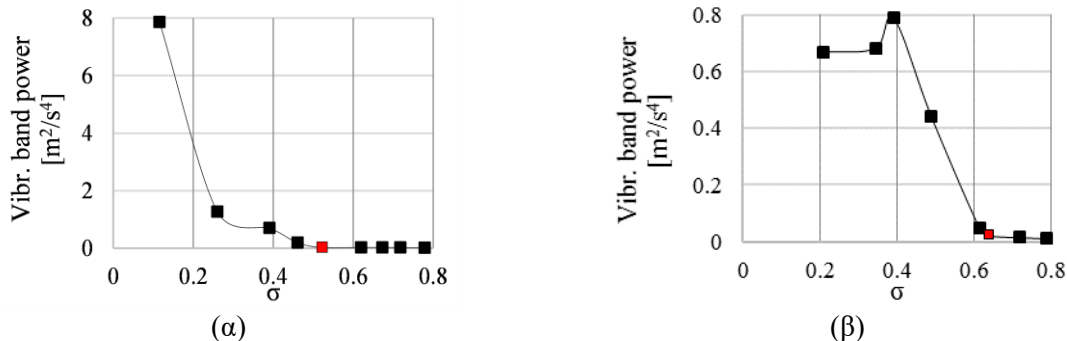
Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται το πεδίο συχνοτήτων των μηχανικών κραδασμών για εύρος [3-10] kHz για τις δύο παροχές σε όλους τους αριθμούς σ . Η επιλογή του εύρους άνω των 3 kHz, έχει ως στόχο το εικονικό φιλτράρισμα των χαμηλόσυχνων μηχανικών σημάτων που προέρχονται από τις εδράσεις, την περωτή, τον άξονα και τον κινητήρα. Και για τις δύο παροχές, η πτώση του σ έχει ως αποτέλεσμα τη μικρή αύξηση-διέγερση ενός εύρους συχνοτήτων στις οποίες εμπλέκονται είτε συχνοτήτες που εμφανίζονταν και σε μεγαλύτερες τιμές του σ (για $f < 6$ kHz) είτε και όχι (για $f > 6$ kHz). Για να απεικονιστεί πιο ξεκάθαρα η εμφάνιση εκείνων των χαρακτηριστικών στο πεδίο των συχνοτήτων επιλέγεται η παρουσίαση τους σε λογαριθμισμένο διάγραμμα, στην Εικόνα 9. Πιο συγκεκριμένα επιλέγονται τέσσερα σημεία λειτουργίας, ένα για σημείο πριν την εμφάνιση των πρώτων φυσαλίδων ατμού (μαύρο χρώμα), ένα ακριβώς τη στιγμή εμφάνισης της πρώτης φυσαλίδας (μπλέ χρώμα), ένα σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο ανάπτυξης του φαινομένου (πράσινη γραμμή) και τέλος ένα στο σημείο πτώσης του ύψους (κόκκινο χρώμα). Σε αυτό το σημείο γίνεται πια σαφές ότι η δημιουργία και

εξέλιξη του φαινομένου επηρεάζει τη μέτρηση των μηχανικών ταλαντώσεων. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι όσο επικεντρώσουμε τη μελέτη στις μεγαλύτερες συχνότητες, τόσο πιο έντονη γίνεται η επιρροή της σπηλαιώσης. Επίσης, οι διαφορές που προκύπτουν από τη σύγκριση του σημείου χωρίς σπηλαιώση με το σημείο έναρξης του φαινομένου είναι αμελητέες, καθιστώντας πρακτικά ανέφικτη τη διάγνωσή του στο σημείο οπτικής έναρξης.



Εικόνα 9 Λογαριθμημένο πεδίο συχνοτήτων για **α)** $\Phi=0.058$, **β)** $\Phi=0.088$

Για την ποσοτικοποίηση των παραπάνω συγκρίσεων επιλέγεται ο υπολογισμός της ενέργειας που περιλαμβάνεται μεταξύ του εύρους [5-10] kHz. Τα 5 kHz ορίζονται ως το κάτω όριο του εύρους, λόγω της ξεκάθαρης διέγερσης που η σπηλαιώση προκαλεί στις μεγαλύτερες συχνότητες, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 9. Η ενέργεια του σήματος, στο παραπάνω εύρος, παρουσιάζεται στην Εικόνα 10, μαζί με το σημείο εκκίνησης του φαινομένου (κόκκινο σημείο). Στα δύο αυτά σημεία καθίσταται τελικά δυνατή η διάγνωση της σπηλαιώσης, έστω και με εμφανή καθυστέρηση για τη $\Phi=0.058$. Το γεγονός αυτής της καθυστέρησης δεν προβληματίζει ιδιαίτερα, καθώς η ένταση και η έκταση του φαινομένου στο σημείο έναρξης δε προκαλεί ούτε πτώση του Ψ ούτε ιδιαίτερη καταπόνηση στο υλικό κατασκευής της περωτής. Αντιθέτως σε μικρές τιμές του σ , εκεί που είναι απαραίτητη η αναγνώριση του φαινομένου, η παρούσα μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί.



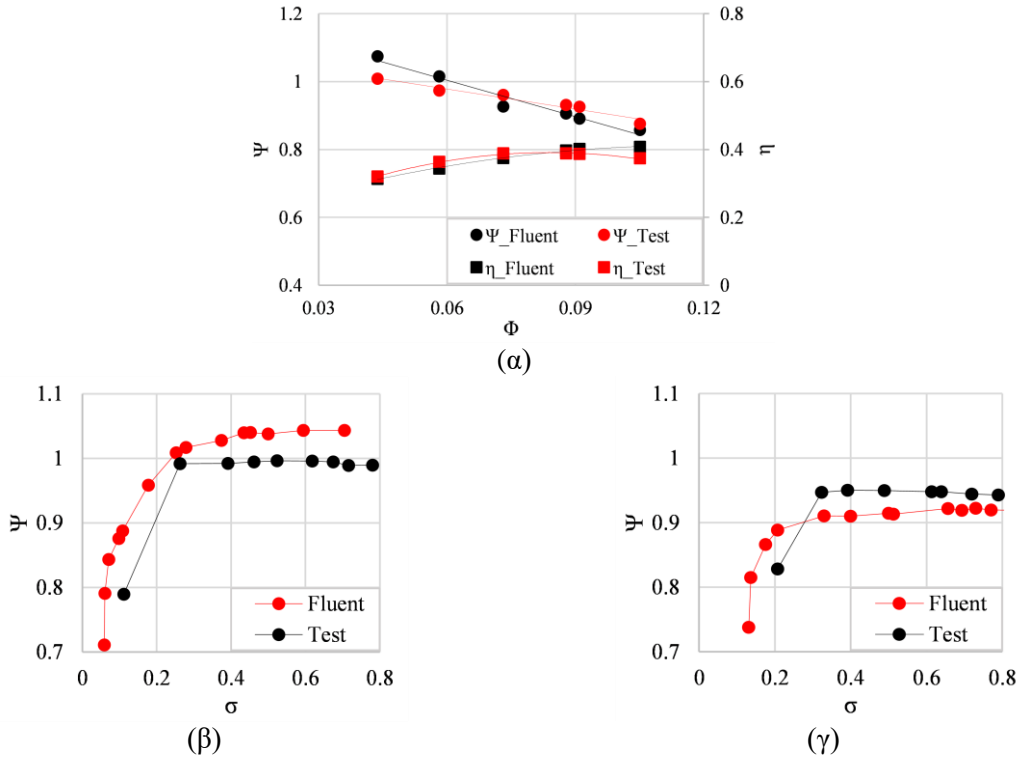
Εικόνα 10 Ενέργεια σήματος στο εύρος [5-10] kHz για **α)** $\Phi=0.058$, **β)** $\Phi=0.088$

4.3 Αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων

Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων των σημάτων κραδασμού και ηχητικών σημάτων καθιστά δυνατή την έγκαιρη διάγνωση της σπηλαιώσης στην υπό μελέτη φυγοκεντρική αντλία. Ωστόσο η ανάγκη για τη βαθύτερη κατανόηση του φαινομένου και της αλληλεπίδρασης της ροής του υγρού ρευστού με τον ατμοποιημένο όγκο σε συνδυασμό με την ανάγκη για πρόληψη και μελέτη του φαινομένου στη φάση της σχεδίασης μιας μηχανής καθιστά απαραίτητη τη δημιουργία ενός αξιόπιστου αριθμητικού μοντέλου.

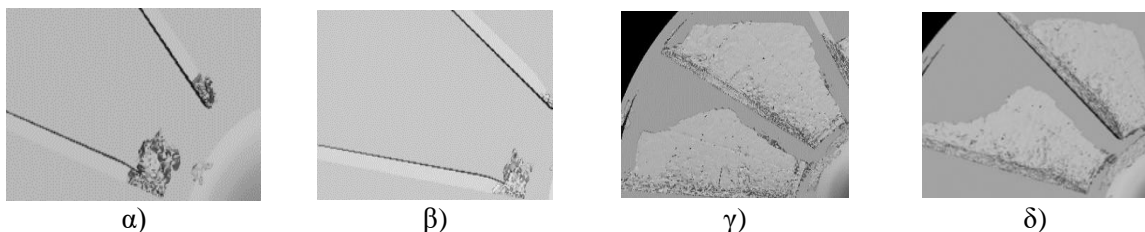
Το μοντέλο που περιγράφηκε στην Ενότητα 3, αξιολογείται συγκρινόμενο με τα πειραματικά αποτελέσματα σε συνθήκες χωρίς (Εικόνα 11α) και με σπηλαιώση (Εικόνα 11β & γ). Για τις συνθήκες χωρίς σπηλαιώση, οι μικρές διαφορές μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και του μοντέλου (στην πλειοψηφία των σημείων λειτουργίας η διαφορά είναι <5%) εντοπίζονται κυρίως στην αδυναμία του τελευταίου να περιγράψει με επιτυχία τα έντονα τρισδιάστατα χαρακτηριστικά της ροής που έχουν ως αιτία: α) τη μη αξονοσυμμετρική ροή στην είσοδο της μηχανής λόγω της στροφής 90° του αγωγού αναρρόφησης, β) τη μη ύπαρξη στεφάνης στην περωτή που έχει ως αποτέλεσμα τη

μεταφορά μέρους της ροής στο διάκενο στο κύριο μονοπάτι της ροής και γ) τη μη προσομοίωση των μεταβατικών φαινομένων κατά την αλληλεπίδραση της κινούμενης πτερωτής με το ακίνητο κέλυφος. Όσον αφορά τις συνθήκες με σπηλαίωση, εκεί οι διαφορές συνδέονται ως επί το πλείστον με το γεγονός ότι το διαφασικό μοντέλο ροής δε συμπεριλαμβάνει την επιρροή των μή συμπικνώσιμων αέριων σωματιδίων (non condensable gases) και έχει ως αποτέλεσμα την υποεκτίμηση της έκτασης και της επιρροής της σπηλαίωσης.



Εικόνα 11 Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών χαρακτηριστικών καμπύλων **α)** ύψους και βαθμού απόδοσης, **β)** σπηλαίωσης για $\Phi=0.058$ και **γ)** σπηλαίωσης για $\Phi=0.088$

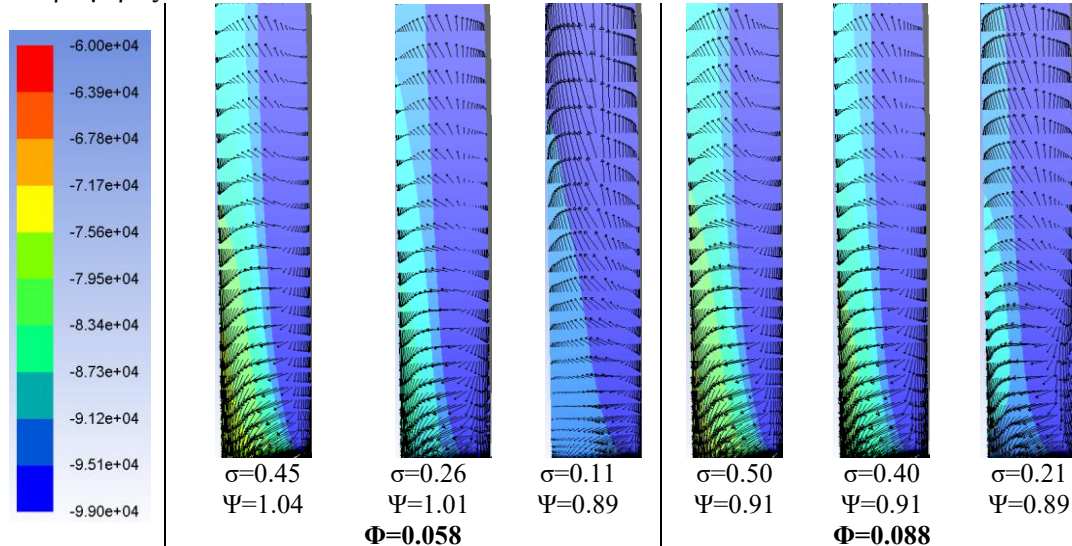
Πιο συγκεκριμένα, στις Εικόνες 12 α,β παρουσιάζεται η ανάπτυξη της σπηλαίωσης όπως αυτή υπολογίστηκε από τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης και η οποία επιβεβαιώνει το παραπάνω συμπέρασμα εάν συγκριθεί με τα αποτελέσματα των Εικόνων 5, 6. Επιπλέον, στις ίδιες εικόνες παρουσιάζεται η μεγέθυνση του χώρου έκτασης της διαφασικής περιοχής με την πτώση του σ . Για την ελάχιστη τιμή του σ , το ύψος μειώνεται καθώς η διαφασική περιοχή εκτείνεται και μπλοκάρει ολόκληρη τη ροή, όπως αυτό απεικονίζεται στις Εικόνες 12 γ,δ. Όπως και στις Εικόνες 5 και 6, η έκταση του φαινομένου στη μικρότερη παροχή είναι μεγαλύτερη λόγω του ότι σε μικρότερες παροχές ήταν δυνατό να φτάσουμε σε μικρότερους αριθμούς σ .



Εικόνα 12 Αριθμητικά αποτελέσματα της έκτασης της διαφασικής περιοχής για **α)** $\sigma=0.26$, $\Phi=0.058$, **β)** $\sigma=0.39$, $\Phi=0.088$, **γ)** $\sigma=0.06$, $\Phi=0.058$ και **δ)** $\sigma=0.13$, $\Phi=0.088$

Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διαφασική ροή επηρεάζεται από την απουσία της στεφάνης και ως εκ τούτου από τη ροή στο διάκενο. Στις ημιανοικτού τύπου πτερωτές, απαντώνται επιπρόσθετες ογκομετρικές απώλειες, οι οποίες δημιουργούνται από τη διαφορά του πεδίου πίεσης μεταξύ της εισόδου και εξόδου της πτερωτής. Στην Εικόνα 13 παρουσιάζονται τα διανύσματα της ταχύτητας μαζί με τις ισοϋψείς καμπύλες στατικής πίεσης στο διάκενο της πτερώγωσης για $\Phi=0.058$ και $\Phi=0.088$, για την περιοχή της ακμής πρόσπτωσης του πτερυγίου. Εδώ παρατηρείται, πως ανεξαρτήτως του αριθμού

σπηλαίωσης η ανακυκλοφορία της ροής λαμβάνει χώρα στο διάκενο. Για λόγους οπτικοποίησης του φαινομένου, επιλέγεται να παρουσιαστεί μονάχα η περιοχή κοντά στην ακμή πρόσπτωσης του του περυγίου καθώς στο υπόλοιπο διάκενο τα διανύσματα της ταχύτητας παραμένουν σταθερά με τη μορφή της τελευταίας σειράς της Εικόνας 13. Στην ίδια εικόνα, οι τιμές της πίεσης μειώνονται σταδιακά με την πτώση του σ , όσο η περιοχή εξάπλωσης της σπηλαίωσης αυξάνει και καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος του διακένου.



Εικόνα 13 Διανύσματα ταχύτητας και ισοϋψείς της στατικής πίεσης για **α)** $\Phi=0.058$ και **β)** $\Phi=0.088$

Το μέτρο της ταχύτητας αλλάζει συναρτήσει των Φ και σ , ωστόσο η τιμή του μοιάζει εδώ να επηρεάζεται περισσότερο από το σ . Η μείωση του σ , οδηγεί στη μείωση της τιμής της στατικής πίεσης καθώς και του Ψ , ενώ ταυτόχρονα το μέτρο των διανυσμάτων ανακυκλοφορίας μικραίνει. Αυτό απεικονίζεται στη μετάβαση από $\sigma=0.45$ σε $\sigma=0.26$, για $\Phi=0.058$ και από $\sigma=0.50$ σε $\sigma=0.40$, για $\Phi=0.088$. Ωστόσο μέχρις εκείνο το σημείο, η παροχή ανακυκλοφορίας του διακένου με την παροχή του διακένου που συνεχίζει προς την έξοδο της περωτής συνυπάρχουν στις διαφορετικές περιοχές του διακένου και το μέγεθος τους δεν αλλάζει σημαντικά. Αυτές οι συνθήκες ωστόσο αλλάζουν κατά το πέρασμα στις μικρότερες τιμές του σ , εκεί που το Ψ έχει αρχίσει να μειώνεται. Εδώ τα διανύσματα ανακυκλοφορίας μειώνονται σημαντικά και πλέον η παροχή που συνεχίζει προς την έξοδο της περωτής κυριαρχεί στην περιοχή του διακένου. Η διαφορετική συμπεριφορά της ροής σε αυτό το σημείο οφείλεται στη σημαντική πτώση του Ψ , που λαμβάνει χώρα με την πλήρη ανάπτυξη της διασπαστικής περιοχής και που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του ροϊκού πεδίου με δύο τρόπους. Από τη μία πλευρά η πτώση στην τιμή του Ψ μειώνει τη διαφορά πίεσης που λειτουργεί ως κινητήριο δύναμη της ανακυκλοφορίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η σπηλαίωση στην περιοχή κοντά στο ακροπερύγιο στη μεριά του διακένου να μειώνεται με τη μείωση του σ και μοιάζει να επηρεάζει περισσότερο τα σημεία λειτουργίας όπου το Ψ δεν επηρεάζεται από τη σπηλαίωση. Ταυτόχρονα, για $\sigma > 0.21$, οι περιοχές του διακένου με υψηλές τιμές της στατικής πίεσης μοιάζουν να λειτουργούν ως εμπόδιο στη ροή, δημιουργώντας και ενισχύοντας την περιοχή της ανακυκλοφορίας. Ωστόσο, όταν η τιμή του Ψ μειώνεται, παρατηρείται ότι τα διανύσματα ταχύτητας ευθυγραμμίζονται με το διάκενο και η περιοχή ανακυκλοφορίας περιορίζεται.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση του μηχανισμού ανάπτυξης σπηλαίωσης σε μία φυγοκεντρική αντλία με ημιανοικτού τύπου περωτή. Κατά τη δοκιμή της αντλίας μετρώνται οι μηχανικές ταλαντώσεις και τα ακουστικά κύματα, ενώ το κέλυφος, το οποίο είναι κατασκευασμένο από Plexiglas, επιτρέπει την οπτικοποίηση της ροής. Παράλληλα, γίνεται αριθμητική μοντελοποίηση της ροής για να αξιολογηθεί η δυνατότητα πρόβλεψης της εμφάνισης και έκτασης του φαινομένου, στη φάση της σχεδίασης μιας αντλίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα στη συγκεκριμένη διάταξη δείχνουν ότι η σπηλαίωση διεγείρει το υψηλό φάσμα συχνοτήτων, γεγονός που καθιστά τις μετρήσεις ταλαντώσεων και ακουστικών κυμάτων ικανές να τη διαγνώσουν, ακόμα και στα πιο πρώιμα στάδια ανάπτυξής της. Επιπλέον, το υπολογιστικό μοντέλο παράγει αξιόπιστα

αποτελέσματα, σε συμφωνία με τις μετρήσεις και την οπτική παρατήρηση της ροής, ενώ παράλληλα προσφέρει ενδιαφέρουσες πληροφορίες για την πρόκληση και εξέλιξη του μηχανισμού της σπηλαιώσης. Η έναρξη του φαινομένου λαμβάνει χώρα στην πλευρά υποπίεσης των πτερυγίων, κοντά στην ακμή εισόδου, ενώ μειώνοντας την παράμετρο σπηλαιώσης, η περιοχή διφασικής ροής νερού-φυσσαλλίδων ατμού αρχίζει να επεκτείνεται εντός της περωτής. Τέλος, το διάκενο μεταξύ κελύφους και περωτής επηρεάζει την περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής και την έκταση της σπηλαιώσης εντός της περωτής, και επομένως και την απόδοση της αντλίας σε συνθήκες σπηλαιώσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Παπαντώνης, Δ., Υδροδυναμικές μηχανές, αντλίες – υδροστρόβιλοι, Υδροδυναμικές μεταδόσεις, 1^η Εκδ., Εκδόσεις Συμεών, 2009.
- [2] Li, S. C., Cavitation of hydraulic machinery (Vol. 1), World Scientific, 2000.
- [3] Brennen, C. E., Hydrodynamic of pumps, Cambridge University Press, 2011.
- [4] Friedrichs, J. and Kosyna G. (2002), “Rotating Cavitation in a Centrifugal Pump Impeller of Low Specific Speed”, *Journal of Fluids Engineering* 124.2, p. 356.
- [5] Watanabe, T., Sato, H., Henmi, Y., Horiguchi, H., Kawata, Y. and Tsujimoto, Y. (2009), “Rotating Choke and Choked Surge in an Axial Pump Impeller”, *International Journal of Fluid Machinery and Systems* Vol. 2, No. 3, p. 232.
- [6] Kobayashi, K. and Chiba, Y. (2010), “Computational Fluid Dynamics of Cavitating Flow in Mixed Flow Pump with Closed Type Impeller”, *International Journal of Fluid Machinery and Systems* Vol. 3, No. 2, p. 113.
- [7] McNulty, P.J. and Pearsall I.S., (1982), “Cavitation Inception in Pumps”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 104.1, p. 99.
- [8] Gopalakrishnan, S., “Modern cavitation criteria for centrifugal pumps”, in *Proc. of the Second Int. Pump Symp.*, Texas A&M University, 1985.
- [9] Neill, G. D., Reuben, R. L., Sandford, P. M., Brown, E. R. and Steel, J. A., (1997), “Detection of incipient cavitation in pumps using acoustic emission”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of process mechanical engineering*, Vol. 211.4, p. 267.
- [10] Alfáyez, L., Mba, D., and Dyson, G., (2004), “Detection of incipient cavitation and the best efficiency point of a 2.2 MW centrifugal pump using Acoustic Emission”, *Journal of Acoustic Emission*, Vol. 22, p. 77.
- [11] Chudina, M., (2003), “Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump”, *Acoustical Physics*, Vol. 49.4, p. 463.
- [12] Černetić, J. and Čudina, M., “Cavitation noise phenomena in centrifugal pumps,” in *5th Congress of Alps-Adria Acoustics Association*, Petrcane, Croatia, September 2012.
- [13] Chudina, M. and Prezelj, J., (2009), “Detection of cavitation in operation of kinetic pumps. Use of discrete frequency tone in audible spectra”, *Applied Acoustics*, 70.4, p.540.
- [14] Fukaya, M., Ono, S. & Udo, R., (2009), “Prediction of Cavitation Intensity in Pumps Based on Propagation Analysis of Bubble Collapse Pressure Using Multi-Point Vibration Acceleration Method”, *International Journal of Fluid Machinery and Systems* Vol. 2, No. 2, p. 165.
- [15] Sato, T., Nagahara, T., Tanaka, K., Fuchiwaki, M., Shimizu, F. and Inoue, A., 2011, “Vortex Cavitation from Baffle Plate and Pump Vibration in a Double-Suction Volute Pump”, *International Journal of Fluid Machinery and Systems* Vol. 4, No. 1, p. 76.
- [16] Zhang, N., Yang, M., Gao, B. and Li, Z., (2015), “Vibration characteristics induced by cavitation in a centrifugal pump with slope volute”, *Shock and Vibration*, Volume 2015.
- [17] Kunz, R. F., Boger, D. A., Stinebring, D. R., Chyczewski, T. S., Lindau, J. W., Gibeling, H. J., Venkateswaran, S. and Govindan, T. R., (2000), “A preconditioned Navier–Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction”, *Computers & Fluids*, 29.8, p. 849.
- [18] Schnerr, G. H., and Sauer, J., “Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics”, in *4th International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, 2001.
- [19] Singhal, A. K., Athavale, M. M., Li, H. and Jiang, Y., (2002), “Mathematical basis and validation of the full cavitation model”, *Journal of fluids engineering*, 124.3, p. 617.
- [20] Zwart, P. J., Gerber, A. G. and Belamri, T., “A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics”, in *5th international conference on multiphase flow*, Vol. 152, Yokohama, Japan, May 2004.
- [21] Medvitz, R. B., Kunz, R. F., Boger, D. A., Lindau, J. W., Yocum, A. M. and Pauley, L. L., (2002), “Performance analysis of cavitating flow in centrifugal pumps using multiphase CFD”, *Journal of Fluids Engineering*, 124.2, p. 377.
- [22] Sato, T., Nagahara, T., Suzuki, S., Tanaka, K., Fuchiwaki, M. and Nishi, M., “Cavitation analysis on double-suction volute pump”, in *Proceeding of 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in hydraulic Machinery and Systems*, Brno, Czech Republic, 2009.
- [23] Mostafa, N. H. and Boraey, M. A., “Numerical and experimental investigation of cavitation in axial pumps”, in *8th International Congress of Fluid Dynamics and Propulsion*, December 2006.
- [24] Mousmoulis, G., Kassanos, I., Anagnostopoulos, J. and Papantonis, D., “Experimental and numerical investigation of the cavitating draft tube vortex in a Francis model turbine”, in *6th IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems*, Ljubljana, Slovenia, September 2015.