

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

Πτυχιακή Εργασία:

«ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΜΕ ΑΚΟΥΣΤΙΚΑ ΜΕΣΑ»

Φοιτήτρια: **ΓΚΟΥΜΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ, Α.Μ. ΤΑ1612**

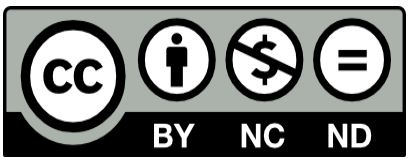
Επιβλέπων καθηγητής: **ΠΟΛΥΧΡΟΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

Ρέθυμνο, Απρίλιος, 2025

Copyright ©, Γκούμα Αλεξάνδρα

Με επιφύλαξη παντός δικαιωμάτων. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου, παράρτημα Ρεθύμνου, δεν υποδηλώνει απαραιτήτως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.



Ευχαριστίες

Η υλοποίηση της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε με την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του επιβλέπων καθηγητή Σπυρίδων Πολυχρονόπουλου, στον οποίο οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για την πίστη του σε εμένα, τον προσωπικό χρόνο που διάθεσε και την υπομονή του. Η συγκεκριμένη πτυχιακή είναι αφιερωμένη στην μητέρα μου.

Abstract

The *"Historical Review of Acoustic Levitation of Objects"* explores the evolution of acoustic levitation — a technique that uses sound waves to suspend matter in mid-air. This phenomenon relies on the principle that sound waves, when focused and amplified correctly, can generate sufficient acoustic pressure to counteract the force of gravity, enabling the levitation of small objects without any physical contact. Over time, what began as a theoretical curiosity has matured into a practical technology with growing applications in science and industry.

Interest in the effects of sound on matter dates back to antiquity, when early thinkers sought to understand the nature of sound and vibration. However, it was not until the 20th century that the emergence of advanced acoustic technologies made it possible to manipulate matter using sound waves. This period saw the first successful experiments in lifting small particles using acoustic pressure, which creates stable "nodes" within a sound field where objects can remain suspended.

During the 1960s, researchers began using ultrasound in acoustic levitation systems to levitate microscopic particles such as droplets, powders, and tiny spheres. These pioneering experiments provided the groundwork for modern applications, allowing scientists to control materials without mechanical interference. In the decades that followed, acoustic levitation found increasing use in handling delicate substances in controlled environments, especially in cases where contamination must be minimized.

Today, the technology continues to develop, with applications expanding into fields such as microgravity research, pharmaceuticals, biomedical engineering, electronics, materials processing, and analytical chemistry. For example, in the pharmaceutical industry, acoustic levitation enables the handling of substances without affecting their composition. In space-related studies, it simulates weightlessness to test material behavior. In medicine, it offers potential in cell manipulation and targeted drug delivery. These applications illustrate its versatility, particularly in managing sensitive or reactive materials.

Although still in the developmental phase for many uses, with varying Technology Readiness Levels (TRLs), acoustic levitation shows immense promise. Its ability to manipulate matter contactlessly makes it ideal for tasks that demand precision, sterility, or the absence of mechanical stress.

This historical review highlights the significant transformation of acoustic levitation from a conceptual phenomenon to a multidisciplinary tool. Its current and potential uses span pharmaceutical manufacturing, aerospace engineering, nanotechnology, and life sciences, reflecting its growing impact on both experimental research and real-world industrial processes.

Σύνοψη

Η «Ιστορική Αναδρομή Ανύψωσης Αντικειμένων με Ακουστικά Μέσα» επικεντρώνεται στην εξέλιξη της χρήσης ηχητικών κυμάτων για την ανύψωση αντικειμένων, γνωστή και ως ακουστική αιώρηση. Η ακουστική αιώρηση βασίζεται στην αρχή ότι τα ηχητικά κύματα, όταν κατευθύνονται κατάλληλα, μπορούν να δημιουργήσουν πίεση που υπερνικά τη βαρύτητα, επιτρέποντας σε μικρά αντικείμενα να αιωρούνται. Αυτή η τεχνολογία έχει εξελιχθεί από απλές θεωρητικές ιδέες σε πρακτικές εφαρμογές και χρήσεις στη βιομηχανία και την επιστημονική έρευνα.

Από τα αρχαία χρόνια, η μελέτη της επίδρασης των ηχητικών κυμάτων στην ύλη αποτέλεσε αντικείμενο περιέργειας. Αρχικά, οι πρώιμες μελέτες αφορούσαν την κατανόηση του ήχου και των ιδιοτήτων του. Κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, η ανάπτυξη της ακουστικής τεχνολογίας επέτρεψε τη χρήση ηχητικών κυμάτων για τον έλεγχο της ύλης, οδηγώντας σε πειράματα ανύψωσης μικρών σωματιδίων. Σημαντικές πρόοδοι σημειώθηκαν με την ανακάλυψη της ακουστικής πίεσης, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία σταθερών θέσεων μέσα σε ηχητικά πεδία, στις οποίες μπορούν να αιωρούνται αντικείμενα.

Στη δεκαετία του 1960, ερευνητές άρχισαν να πειραματίζονται με συστήματα ακουστικής αιώρησης που χρησιμοποίησαν υπερήχους για να αιωρήσουν μικροσκοπικά σωματίδια, όπως σταγόνες υγρών ή μικρές σφαίρες. Η έρευνα αυτή έθεσε τα θεμέλια για τις σημερινές τεχνολογικές εφαρμογές, όπως η μετακίνηση υλικών χωρίς μηχανική επαφή σε ευαίσθητα περιβάλλοντα. Σήμερα, οι επιστήμονες συνεχίζουν να εξερευνούν τα όρια της ακουστικής αιώρησης, με εφαρμογές που περιλαμβάνουν τον έλεγχο υλικών σε συνθήκες μικροβαρύτητας, την ιατρική και την κατασκευή μικροηλεκτρονικών συστημάτων.

Σήμερα, η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, καθώς έχει βρει εφαρμογές σε τομείς όπως η μικροβαρύτητα, η φαρμακολογία, η βιοϊατρική μηχανική, η ηλεκτρονική, η επεξεργασία υλικών και η αναλυτική χημεία. Για παράδειγμα, στη φαρμακευτική βιομηχανία, η ακουστική αιώρηση επιτρέπει τον χειρισμό ουσιών χωρίς να επηρεάζεται η σύστασή τους. Στις διαστημικές μελέτες, χρησιμοποιείται για την προσομοίωση συνθηκών έλλειψης βαρύτητας. Στην ιατρική, παρουσιάζει δυνατότητες για τον χειρισμό κυττάρων και την στοχευμένη χορήγηση φαρμάκων. Οι εφαρμογές αυτές αποδεικνύουν την ευελιξία της τεχνολογίας, ιδίως στην επεξεργασία ευαίσθητων ή αντιδραστικών υλικών.

Η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε στάδια ανάπτυξης, με το TRL της να ποικίλλει ανάλογα με την εφαρμογή, αλλά οι προοπτικές της είναι εντυπωσιακές, ιδίως για τη διαχείριση ευαίσθητων υλικών και βιολογικών δειγμάτων. Η παρούσα ιστορική αναδρομή αναδεικνύει τη σημαντική μετάβαση της ακουστικής αιώρησης από ένα θεωρητικό φαινόμενο σε ένα πολυδιάστατο τεχνολογικό εργαλείο. Οι τρέχουσες και δυνητικές εφαρμογές της καλύπτουν τη φαρμακευτική παραγωγή, την διαστημική τεχνολογία, τη νανοτεχνολογία και τις βιοεπιστήμες, επιβεβαιώνοντας τη διαρκώς αυξανόμενη σημασία της τόσο στην επιστημονική έρευνα όσο και σε βιομηχανικές διεργασίες.

Περιεχόμενα

Abstract....iv
Σύνοψη....v
Λίστα εικόνων....ix
Εισαγωγή....1
Κεφάλαιο 1ο : Θεωρητικό υπόβαθρο....3
1.1 Εισαγωγή....3
1.2 Ακουστική και Θεμελιώδεις Αρχές....3
1.2.1 Εισαγωγή 3
1.2.2 Ηχητικό κύμα....3
1.2.3 Ηχητική πίεση....3
1.2.4 Υπέρηχος....4
1.2.5 Στάσιμο κύμα....4
1.2.6 Δυνάμεις ακτινοβολίας (Radiation force)....4
1.2.7 Αντίσταση στην βαρύτητα....4
1.2.8 Θεμελιώδεις Εξισώσεις που Διέπουν το Φαινόμενο....5
1.3 Φαινόμενο της Ακουστικής Αιώρησης....6
1.3.1 Εισαγωγή....6
1.3.2 Ακουστική Αιώρηση με χρήση Στάσιμων Κυμάτων 6
1.3.3 Ακουστική Αιώρηση Κοντινού Πεδίου....7
1.3.4 Ανεστραμμένη Ακουστική Αιώρηση Κοντινού Πεδίου....8
1.3.5 Ακουστική Αιώρηση Μακρινού Πεδίου....8
1.3.6 Ακουστική Αιώρηση Μονής Δέσμης....8
1.4 Ιστορική Αναδρομή....9
Κεφάλαιο 2ο : Τεχνολογίες και Εφαρμογές....13
2.1 Εισαγωγή....13
2.2 Συστήματα ακουστικής αιώρησης....13
2.2.1 Εισαγωγή....13
2.2.2 TinyLev....14
2.2.3 LeviPrint....15
2.2.3.1 Κατασκευή με Σωματίδια....16
2.2.3.2 Κατασκευή με UV Ρητίνη....16
2.2.3.3 Σύνθετα Αντικείμενα....16
2.2.3.4 Κατασκευή μέσα σε Δοχείο....17

2.2.3.5 Προσθήκη πάνω από Άλλα Αντικείμενα.....17
2.2.4 GauntLev.....17
2.3 Εφαρμογές.....19
2.3.1 Φασματοσκοπία 19
2.3.2 Mid-Air Chemistry.....19
2.3.3 Βλαστοκύτταρα και Δομές Ιστών.....20
2.3.4 Παρουσιάσεις Δεδομένων.....20
Κεφάλαιο 3ο : Ανάλυση και Προκλήσεις.....21
3.1 Εισαγωγή.....21
3.2 Τεχνικοί Περιορισμοί.....21
3.3 Προβλήματα Σταθερότητας.....22
Κεφάλαιο 4ο : Σύγχρονες Εξελίξεις και Έρευνα.....24
4.1 Εισαγωγή.....24
4.2 Τελευταίες Εξελίξεις στη Βασική Έρευνα.....24
4.2.1 Εισαγωγή.....24
4.2.2 Μη Γραμμικές Αλληλεπιδράσεις και Νέα Μαθηματικά Μοντέλα.....24
4.2.3 Εξέλιξη της Εξίσωσης Gor'kov.....25
4.2.4 Η Σημασία των Αριθμητικών Μεθόδων και των Αισθητήρων.....25
4.2.5 Ανάπτυξη Προηγμένων Μεθόδων Ελέγχου και Παρακολούθησης.....26
4.2.6 Επέκταση Εφαρμογών σε Πολυάριθμα και Βαριά Σωματίδια.....26
4.3 Προηγμένες Εφαρμογές.....26
4.3.1 Χρήση στην Ενθυλάκωση Κύτταρων και Χορήγηση Φαρμάκων.....26
4.3.2 Εφαρμογές στη Βιοϊατρική και στη Φαρμακευτική Βιομηχανία.....27
4.3.3 Εφαρμογές στη Νανοτεχνολογία και στην Επεξεργασία Υλικών.....27
4.3.4 Εφαρμογές στην Κατασκευή και την Παραγωγή Μηχανημάτων.....28
4.3.5 Εφαρμογές στη Ρομποτική.....28
4.4 Καινοτομίες στη Σχεδίαση Συσκευών.....29
4.4.1 Holographic Acoustic Levitation.....29
4.4.2 MultiLev.....30
4.4.3 LeviCursor.....30
4.4.4 SoundBender.....31
Κεφάλαιο 5ο : Συμπεράσματα.....33
5.1 Εισαγωγή.....33
5.2 Αποτίμηση της Τρέχουσας Κατάστασης.....33

5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα.....34
5.4 Συμπεράσματα.....35
Βιβλιογραφία.....36

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1 : Γραφική αναπαράσταση ημιτονοειδούς ακουστικού σήματος.....6
Εικόνα 1.2 : Τύποι ακουστικής αιώρησης.....9
Εικόνα 2.1 : Ακουστικός ανυψωτής που χρησιμοποιείται στο διαστημικό σταθμό για την τοποθέτηση υλικών 12
Εικόνα 2.2 : Ακουστική αιώρηση μικρών ζώων.....12
Εικόνα 2.3 : Ακουστικός Ανυψωτής TinyLev.....14
Εικόνα 2.4 : Ακουστικός Ανυψωτής LeviPrint.....15
Εικόνα 2.5 : Αντικείμενα που έχουν κατασκευαστεί.....16
Εικόνα 2.6 : Συσκευή GauntLev.....17
Εικόνα 4.1 : Ακουστικός Ανυψωτής MultiLev.....30
Εικόνα 4.2 : Ακουστικός Ανυψωτής LeviCursor.....30
Εικόνα 4.3: Το SoundBender εφαρμόζεται σε τρεις τύπους διαδραστικών λειτουργιών.....31

Εισαγωγή

Η ακουστική αιώρηση χρησιμοποιεί δυνάμεις ακουστικής ακτινοβολίας που ασκούνται από ηχητικά κύματα για να αιωρεί αντικείμενα στον αέρα. Δεν είναι απλώς ένα ενδιαφέρον φυσικό φαινόμενο, αλλά και ένα μελλοντικά υποσχόμενο εργαλείο για πολλαπλούς επιστημονικούς τομείς, όπως η βιολογία, η χημεία, η φαρμακευτική και η βιομηχανία. Συγκεκριμένα, η ακουστική αιώρηση, παρά το γεγονός ότι είναι μια σχετικά πρόσφατη τεχνική, προσφέρει ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων, και μια ποικιλία πειραματικών συνθηκών και δειγμάτων. Τα μοναδικά χαρακτηριστικά της ακουστικής αιώρησης έχουν επίσης μεγάλο ρόλο για την εκτέλεση εργασιών σε βιομηχανικό επίπεδο, όπως ο χειρισμός εύθραυστων αντικειμένων χωρίς επαφή ή η επεξεργασία μικρών ποσοτήτων υγρών. Η φυσική που διέπει την ακουστική αιώρηση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παγίδευση, την ταξινόμηση και τον χειρισμό μικροσωματιδίων και κυττάρων μέσα σε υγρό. [1,2]

Η ιδέα της ακουστικής αιώρησης έχει τις ρίζες της στις πρώτες μελέτες της της ηχητικής πίεσης. Αρχικά, οι θεωρητικές προσεγγίσεις επικεντρώνονταν στην κατανόηση των βασικών αρχών της ηχητικής πίεσης και της διάδοσης των ηχητικών κυμάτων. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και την ανάπτυξη υπερηχητικών συστημάτων, οι ερευνητές κατάφεραν να εφαρμόσουν αυτές τις θεωρίες σε πρακτικές εφαρμογές, επιτυγχάνοντας την ανύψωση μικρών αντικειμένων σε εργαστηριακό περιβάλλον. [3,4,5]

Παρά τις εντυπωσιακές δυνατότητές της, η ακουστική αιώρηση αντιμετωπίζει ορισμένους περιορισμούς που επηρεάζουν την εφαρμογή της. Για παράδειγμα, η τεχνική είναι πιο αποτελεσματική για μικρά και ελαφριά αντικείμενα, καθώς η ανύψωση μεγαλύτερων ή βαρύτερων αντικειμένων απαιτεί υψηλότερες εντάσεις ηχητικών κυμάτων, κάτι που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σταθερότητας και ελέγχου. Επιπλέον, η ακριβής τοποθέτηση και ο έλεγχος των αιωρούμενων αντικειμένων αποτελούν προκλήσεις, καθώς απαιτούν εξαιρετικά ακριβείς ρυθμίσεις και συστήματα παρακολούθησης. [6,7]

Το αντικείμενο της εργασίας περιλαμβάνει την ιστορική εξέλιξη της ακουστικής αιώρησης, τις αρχές λειτουργίας, τις εφαρμογές και τις σύγχρονες προκλήσεις που σχετίζονται με την τεχνολογία.

Στόχος αυτής της πτυχιακής, είναι η καταγραφή της ιστορικής πορείας της ακουστικής αιώρησης, η ανάλυση των εξελίξεων που οδήγησαν στη σύγχρονη κατανόηση και εφαρμογή της τεχνολογίας, καθώς επίσης και η εκτίμηση στη σημασία της και στις δυνατότητές της για καινοτομία και βελτίωση σε πολλούς τομείς.

Η δομή της συγκεκριμένης πτυχιακής χωρίζεται σε πέντε κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο πραγματεύεται το θεωρητικό υπόβαθρο. Γίνεται μια εξήγηση στις θεμελιώδεις αρχές που σχετίζονται με τον ήχο, προκειμένου να κατανοηθούν ποιοι παράγοντες καθιστούν την ακουστική αιώρηση εφικτή. Επίσης, αναλύεται το φαινόμενο της ακουστικής αιώρησης, ο τρόπος δηλαδή λειτουργίας της με τη χρήση στάσιμων κυμάτων. Τέλος, περιλαμβάνεται η ιστορική αναδρομή με σκοπό την κατανόηση της εξέλιξης της ακουστικής αιώρησης στο σήμερα και των παραγόντων που τη διαμόρφωσαν.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τα συστήματα και οι εφαρμογές, αναλύοντας πώς η ακουστική αιώρηση έχει εξελιχθεί και πώς μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορους τομείς της επιστήμης και της βιομηχανίας.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται οι τεχνικοί περιορισμοί που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν, διότι επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα και την απόδοσή της και χωρίς αυτούς η τεχνολογία αυτή θα ήταν αδύνατον να ολοκληρωθεί.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται οι εξελίξεις στις τεχνολογίες οι οποίες έχουν επιτρέψει τη δημιουργία πιο ακριβών και ισχυρών συστημάτων που μπορούν να μετακινήσουν μεγαλύτερα αντικείμενα με μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εν' λόγω ανάλυση και δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 1ο : Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1 Εισαγωγή

Το παρακάτω κεφάλαιο πραγματεύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της συγκεκριμένης εργασίας. Αρχικά, αναφέρεται από τι αποτελείται ένα ηχητικό κύμα, μετέπειτα γίνεται περιγραφή του τι είναι η ακουστική αιώρηση με τους τύπους που χωρίζεται και τέλος θα γίνει η ιστορική αναδρομή. Σκοπός αυτού του κεφαλαίο είναι η κατανόηση των ακουστικών παραμέτρων, καθώς και το που βασίζεται η υλοποίηση της ακουστικής αιώρησης.

1.2 Ακουστική και Θεμελιώδεις Αρχές

1.2.1 Εισαγωγή

Αυτές οι αρχές δημιουργούν τη βάση για την κατανόηση της ακουστικής αιώρησης πώς οι ηχητικές δυνάμεις δηλαδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανύψωση και τη διαχείριση αντικειμένων μέσω ηχητικών κυμάτων, χωρίς την ανάγκη φυσικής επαφής. [8]

1.2.2 Ηχητικό κύμα

Ήχος μπορεί να οριστεί ως μια κυματοειδής κίνηση στον αέρα ή σε κάποιο ελαστικό μέσο, που έχει ως αποτέλεσμα τη διέγερση του ακουστικού μηχανισμού και κατά συνέπεια την αντίληψη του ήχου. Τα μόρια κινούνται περιοδικά γύρω από τη θέση ισορροπίας, μεταδίδοντας την κίνηση τους στα διπλανά μόρια. Η μέγιστη απόκλιση από τη θέση ισορροπίας ονομάζεται πλάτος ταλάντωσης.

Τα χαρακτηριστικά του ήχου είναι i) η συχνότητα f(Hz), η οποία είναι ο αριθμός των περιοδικών μεταβολών ανά μονάδα χρόνου, ii) η περίοδος T(sec), που δείχνει πόσος χρόνος χρειάζεται για να γίνει ένας πλήρης κύκλος του ακουστικού κύματος και iii) το μήκος κύματος λ(m), που είναι η φυσική απόσταση που καλύπτεται από έναν πλήρη κύκλο.

1.2.3 Ηχητική πίεση

Η ηχητική πίεση (ή ακουστική πίεση) είναι μια μεταβολή στην ατμοσφαιρική πίεση, η οποία διαδίδεται μέσω του αέρα ως κύμα. Ο αέρας του περιβάλλοντος χώρου έχει μια δεδομένη πίεση γνωστή ως ατμοσφαιρική πίεση. Όταν ο ήχος διαδίδεται μέσω του αέρα, δημιουργεί στον αέρα περιοχές υψηλής και χαμηλής πυκνότητας. Αυτό σημαίνει ότι σε χώρους όπου η πυκνότητα του αέρα είναι υψηλή, η πίεση του αέρα του περιβάλλοντος χώρου είναι ελαφρώς υψηλότερη από την ατμοσφαιρική πίεση. Αντιθέτως, σε χώρους όπου η πυκνότητα του αέρα είναι χαμηλή, η πίεσή του είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική πίεση. Ως εκ τούτου, κατά τη διάδοση του ήχου μέσω του αέρα προκαλούνται μικρές μεταβολές στην πίεσή του. Κάθε μικρή

μεταβολή στην πίεση του αέρα, η οποία προκαλείται από τη διάδοση του ήχου ονομάζεται ηχητική πίεση και υποδηλώνεται με το σύμβολο "p". Η μονάδα μέτρησης της ακουστικής πίεσης είναι το Pascal [Pa].

1.2.4 Υπέρηχος

Ο υπέρηχος είναι ηχητικά κύματα με συχνότητες υψηλότερες από το ανώτερο ακουστικό όριο της ανθρώπινης ακοής. Ο υπέρηχος δεν διαφέρει από τον «κανονικό» (ακουστό) ήχο στις φυσικές του ιδιότητες, εκτός από το γεγονός ότι οι άνθρωποι δεν μπορούν να το ακούσουν. Αυτό το όριο ποικίλει από άτομο σε άτομο και είναι περίπου 20kHz σε υγιείς, νέους ενήλικες. Οι συσκευές υπερήχων λειτουργούν με συχνότητες από 20 kHz έως αρκετά gigahertz. Ο υπέρηχος ορίζεται από το Αμερικανικό Εθνικό Ινστιτούτο Προτύπων ως «ήχος σε συχνότητες μεγαλύτερες από 20kHz." Στον αέρα σε ατμοσφαιρική πίεση, τα υπερηχητικά κύματα έχουν μήκη κύματος 1,9cm ή λιγότερο. Οι μετατροπείς υπερήχων χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: πομπούς, δέκτες και πομποδέκτες. Οι πομποί μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα σε υπερήχους, οι δέκτες μετατρέπουν τους υπερήχους σε ηλεκτρικά σήματα και οι πομποδέκτες μπορούν να εκπέμπουν και να λάβουν υπερήχους. [9]

1.2.5 Στάσιμο κύμα

Όταν μία ενεργή ηχητική πηγή βρίσκεται σε ένα κλειστό χώρο τα προσπίπτον και ανακλώμενα ηχητικά κύματα συμβάλλουν μεταξύ τους προκαλώντας είτε την ενίσχυση είτε την ακύρωση αυτών, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στάσιμα κύματα. Τα στάσιμα κύματα πραγματοποιούνται σε συχνότητες μοναδικές για κάθε χώρο, εξαρτώμενες από το σχήμα και τις διαστάσεις του χώρου, είναι ακίνητα και χαρακτηρίζονται από μεγάλες διακυμάνσεις της ηχητικής στάθμης πίεσης από σημείο σε σημείο. Με λίγα λόγια είναι το αποτέλεσμα της συμβολής δύο κυμάτων της ίδιας συχνότητας και του ίδιου πλάτους, που διαδίδονται στο ίδιο μέσο με αντίθετες κατευθύνσεις. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών, ή κοιλιών είναι ίση με το μισό του μήκους κύματος (λ) από τη συμβολή των οποίων προήλθε το στάσιμο κύμα.

1.2.6 Δυνάμεις ακτινοβολίας (Radiation forces)

Όταν τα ηχητικά κύματα εκπέμπονται από μια πηγή και αλληλεπιδρούν με τα αντικείμενα, δημιουργούν δυνάμεις που μπορούν να τα μετακινήσουν ή να τα κρατήσουν σε μια σταθερή θέση. Αυτές οι δυνάμεις χρησιμοποιούνται για να αιωρούν ή να μετακινούν τα αντικείμενα χωρίς φυσική επαφή.

1.2.7 Αντίσταση στην βαρύτητα

Η ακουστική αιώρηση βασίζεται στην ιδέα ότι τα ηχητικά κύματα, μέσω της ακουστικής πίεσης και των δυνάμεων ακτινοβολίας, μπορούν να δημιουργήσουν μια ισχυρή δύναμη που υπερνικά

τη δύναμη της βαρύτητας και κρατά τα αντικείμενα στον αέρα.

1.2.8 Θεμελιώδεις Εξισώσεις που Διέπουν το Φαινόμενο

Άλλοι όροι που εμφανίζονται συχνά στα μοντέλα αυτά είναι τα συνολικά, τα προσπίπτοντα και τα σκεδαζόμενα πεδία. Το προσπίπτον πεδίο είναι το ακουστικό πεδίο που δημιουργείται από τους πομπούς σε ελεύθερο χώρο, δηλαδή χωρίς ανακλαστήρες ή εμπόδια που να επηρεάζουν τα εκπεμπόμενα κύματα. Το συνολικό πεδίο είναι η κατανομή της πίεσης που υπάρχει στον χώρο όταν λαμβάνονται υπόψιν όλα τα στοιχεία που επηρεάζουν το κύμα, ιδανικά, το συνολικό πεδίο είναι αυτό που μετριέται στα πειράματα. Τα συνολικά, τα προσπίπτοντα και τα σκεδαζόμενα πεδία είναι γραμμικά τόσο για την πίεση όσο και για την ταχύτητα, υπό τις προϋποθέσεις που χρησιμοποιούν τα περισσότερα μοντέλα. Συνεπώς, ισχύει η σχέση:

Προσπίπτον πεδίο + Σκεδαζόμενο πεδίο = Συνολικό πεδίο

Αυτό σημαίνει ότι αν είναι γνωστά δύο από τα πεδία, το τρίτο μπορεί να υπολογιστεί.

Κάποια μοντέλα υπολογίζουν μόνο το προσπίπτον πεδίο, ενώ άλλα προσδιορίζουν το σκεδασμένο πεδίο ή υπολογίζουν απευθείας το συνολικό πεδίο. [12]

Η εξίσωση για τις δυνάμεις ακτινοβολίας (F) που ασκούνται σε ένα μικρό σφαιρικό σωματίδιο μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση του Gor'kov (U):

$$F = -\nabla U \qquad (1)$$

Δίνεται ένα σημείο αιώρησης ως το μέγιστο του τελεστή Laplace που εφαρμόζεται στο δυναμικό του Gor'kov, δηλαδή ως το σημείο στο οποίο συγκλίνουν όλες οι δυνάμεις.

$$\nabla^2 U = U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} \qquad (2)$$

όπου $U_a = \frac{\partial U}{\partial a}, U_{aa} = \frac{\partial^2 U}{\partial a^2}$ και οι μεταβλητές a = x, y, z αντιστοιχούν στους καρτεσιανούς άξονες.

Το δυναμικό του Gor'kov (U), σε όρους της μιγαδικής ακουστικής πίεσης (p) και των χωρικών παραγώγων της, δίνεται από:

$$U = K_1 (|p|^2) - K_2 (|p_x|^2 + |p_y|^2 + |p_z|^2) \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{1}{4} V \left(\frac{1}{c_0^2 \rho_0} - \frac{1}{c_p^2 \rho_p} \right) \qquad (1)$$

$$K^2 = \frac{3}{4} V \left(\frac{\rho_0 - \rho_p}{\omega^2 \rho_0 (\rho_0 + 2\rho_p)} \right) \qquad (2)$$

όπου V είναι ο όγκος του σφαιρικού σωματιδίου,
ω είναι η συχνότητα των εκπεμπόμενων κυμάτων,
ρ η πυκνότητα και
c η ταχύτητα του ήχου (με τους δείκτες 0 και p να αναφέρονται στο περιβάλλον-μέσο και στο υλικό του σωματιδίου, αντίστοιχα).

Στην εξίσωση (3), ο πρώτος όρος σχετίζεται με τη μεταβολή του πλάτους και καθορίζει ότι τα

σωματίδια μετακινούνται από περιοχές με υψηλή πίεση (πλάτος) προς περιοχές με χαμηλή πίεση (πλάτος). Ο δεύτερος όρος σχετίζεται με την μεταβολή της ταχύτητας, όπου αναγκάζεται το σωματίδιο να κινηθεί ως προς το σημείο που οι δυνάμεις συγκλίνουν περισσότερο. [6]



Εικόνα 1.1 : Γραφική αναπαράσταση ημιτονοειδούς ακουστικού σήματος

1.3 Φαινόμενο της Ακουστικής Αιώρησης

1.3.1 Εισαγωγή

Η ακουστική αιώρηση είναι η ανύψωση ενός ή περισσότερων αντικειμένων, στερεών ή υγρών, χωρίς να έρχονται σε επαφή με κάποια επιφάνεια και η σταθεροποίηση αυτών μέσα στο στάσιμο κύμα. Δημιουργείται, δηλαδή, ένα ελεγχόμενο πεδίο ηχητικής πίεσης που τα συγκρατεί στον αέρα. Η ακουστική αιώρηση ταξινομείται σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες. Η συγκεκριμένη εργασία πραγματεύεται στην ακουστική αιώρηση με τη χρήση στάσιμων κυμάτων, παρ' όλα αυτά είναι σημαντική η αναφορά και των υπόλοιπων όπου δίνονται παρακάτω.

1.3.2 Ακουστική Αιώρηση με χρήση Στάσιμων Κυμάτων (Standing Wave Acoustic Levitation)

Ο ήχος είναι ένα μηχανικό κύμα ικανό να ασκήσει δυνάμεις σε αντικείμενα, ως συνέπεια των δυνάμεων ακτινοβολίας [10]. Εάν οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα αντικείμενο συγκλίνουν και είναι αρκετά ισχυρές, τα αντικείμενα μπορούν να αιωρούνται και να παγιδεύονται στον αέρα ή σε άλλα μέσα διάδοσης [11]. Για να αιωρηθεί ένα αντικείμενο, πρέπει να εξαλειφθούν οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό λόγω της βαρύτητας. Η ακουστική αιώρηση προκύπτει από τη

δημιουργία περιοχών υψηλής και χαμηλής πίεσης μέσω στάσιμων κυμάτων με τα αντικείμενα να παραμένουν παγιδευμένα στα σημεία ισορροπίας. Το κλασικό πείραμα για να επιτευχθεί αυτό, είναι η χρήση μιας συσκευής για τη μετατροπή υψηλής ισχύος και μίας ανακλαστικής επιφάνειας για τη δημιουργία στάσιμου κύματος. Η παγίδευση σωματιδίων μέσω ηχητικών κυμάτων αναφέρεται ως ακουστική αιώρηση (acoustic levitation), ακουστική παγίδευση (acoustic trapping), ακουστικές λαβίδες (acoustic tweezers) ή ακουστοφόρηση (acoustophoresis) [12] [Εικόνα 1.2 (a)].

Στην πραγματικότητα, ο ήχος αντιμετωπίζεται περισσότερο με τον τρόπο που γίνεται αντιληπτό το φως, αξιοποιώντας τις ιδιότητες των κυμάτων. Ένα κύμα απαρτίζεται από το πλάτος, τη συχνότητα και τη φάση, η οποία αποτελεί και την πιο σημαντική ιδιότητα που υπάρχει στο ηχητικό κύμα, ώστε να πραγματοποιηθεί η ακουστική αιώρηση. Όσο μετατοπίζεται η φάση, δημιουργούνται διαφορετικές παρεμβολές και διαφορετικά ηχητικά πεδία [74]. Για παράδειγμα, αν υπάρχει ένας εκπομπός, με ίδιο πλάτος και ίδια συχνότητα, αλλά αλλάζει η φάση, τότε δημιουργείται ένα τρισδιάστατο ακουστικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό εξαρτάται από τη συχνότητα και το μήκος κύματος του ήχου, την ένταση των κυμάτων και τις φυσικές ιδιότητες του αιωρούμενου αντικειμένου [13,14].

1.3.3 Ακουστική Αιώρηση Κοντινού Πεδίου (Near-Field Acoustic Levitation)

Μια άλλη προσέγγιση της ακουστικής αιώρησης, η οποία είναι ικανή να αιωρεί επίπεδα αντικείμενα, είναι η ακουστική αιώρηση κοντινού πεδίου [82] [Εικόνα 1.2 (b)].
Η ακουστική αιώρηση κοντινού πεδίου (γνωστή και ως squeeze film levitation), παρατηρείται όταν τοποθετούνται μεγάλα αντικείμενα με επίπεδη επιφάνεια ακριβώς πάνω από ένα πομπό ήχου (ή μορφοτροπέα-μετατροπέας ηλεκτρικής ενέργειας σε ηχητικές δονήσεις). Η απόσταση μεταξύ του πομπού και του αντικειμένου είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με το μήκος κύματος του ήχου, έχοντας ως συνέπεια, να μην μπορούν να δημιουργηθούν στάσιμα κύματα [9]. Σε αντίθεση με μια συσκευή μονού άξονα, όπου σχηματίζεται ένα στάσιμο κύμα μεταξύ του ηχείου και της ανακλαστικής επιφάνειας, στη μέθοδο κοντινού πεδίου το ίδιο το αντικείμενο λειτουργεί ως ανακλαστήρας. Στην πραγματικότητα, η δύναμη της ακουστικής ακτινοβολίας που δρα πάνω στον ανακλαστήρα, παρουσιάζει σημαντική αύξηση όταν ο ανακλαστήρας πλησιάζει την επιφάνεια του μετατροπέα. Έχει ήδη αποδειχθεί ότι αυτή η μέθοδος είναι ικανή να αιωρήσει αντικείμενα αρκετών κιλών σε απόσταση δεκάδων έως εκατοντάδων μικρομέτρων πάνω από την επιφάνεια του μετατροπέα [83]. Η ακουστική αιώρηση κοντινού πεδίου που συνήθως χρησιμοποιείται για την αιώρηση αντικειμένων που είναι επίπεδα πάνω από μια επιφάνεια που δονείται [82], μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για την αιώρηση μη επίπεδων αντικειμένων, όπως σφαίρες[85], κυλινδρικά αντικείμενα [86] και δοκούς σε σχήμα L [87]. Έχει επίσης αποδειχθεί ότι η αρχή πίσω από την τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο της τριβής μεταξύ μιας επιφάνειας που δονείται και των δακτύλων του ανθρώπου [88, 89]. Πολλοί ερευνητές [89] αναμένουν ότι αυτή η αρχή μπορεί να εφαρμοστεί σε οθόνες αφής για να δώσει την εντύπωση της επαφής με διαφορετικούς τύπους επιφανειών.

1.3.4 Ανεστραμμένη Ακουστική Αιώρηση Κοντινού Πεδίου (Inverted Near-Field Acoustic Levitation)

Με αυτή την τεχνική ο πομπός (transducer) παράγει μια απωθητική ακουστική δύναμη ακτινοβολίας πάνω στο επίπεδο αντικείμενο, επιτρέποντας την αιώρησή του λίγο πάνω από την επιφάνεια του πομπού. Υπ' ορισμένες συνθήκες, η απωθητική δύναμη που προκαλεί την ακουστική αιώρηση κοντινού πεδίου αντιστρέφεται και μετατρέπεται σε ελκτική δύναμη [90,91]. Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι σε αυτή τη μέθοδο, το αντικείμενο δεν έρχεται σε επαφή με τον πομπό. Αυτό σημαίνει ότι όταν το αντικείμενο είναι πολύ κοντά στην επιφάνεια του πομπού, η δύναμη από απωθητική θα αλλάξει σε ελκτική όταν φτάσει σε μια συγκεκριμένη απόσταση από την επιφάνεια του πομπού. Σε αυτή την περίπτωση, ο πομπός μπορεί να στραφεί προς τα κάτω, επιτρέποντας την αιώρηση του αντικειμένου κάτω από αυτόν [92,93], όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2 (c). Παρομοίως με την αιώρηση κοντινού πεδίου, ένα λεπτό στρώμα αέρα χωρίζει το αντικείμενο από τον πομπό. Για την συγκεκριμένη μέθοδο δεν υπάρχει καθιερωμένο όνομα, έτσι αναφέρεται ως "ανεστραμμένη ακουστική αιώρηση κοντινού πεδίου" (Inverted Near-Field Acoustic Levitation).

1.3.5 Ακουστική Αιώρηση Μακρινού Πεδίου (Far-Field Acoustic Levitation)

Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αιώρηση αντικειμένων μεγαλύτερων από το μήκος κύματος και βασίζεται στη δημιουργία ενός ακουστικού στάσιμου κύματος μεταξύ της επιφάνειας του αντικειμένου και ενός ή περισσότερων πομπών. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2 (d), όταν η απόσταση μεταξύ του πομπού και του αντικειμένου ρυθμίζεται ώστε να βρίσκεται σε συντονισμό, η ακουστική ακτινοβολούμενη δύναμη στο αντικείμενο μπορεί να αυξηθεί σημαντικά.

Το 1975, περιγράφοντας μια διάταξη μονού άξονα που αποτελείται από έναν πομπό 20kHz και έναν επίπεδο ανακλαστήρα, ο Whymark [35] ανέφερε την αιώρηση ενός ορειχάλκινου δίσκου με διάμετρο 50mm και πάχους 0.5mm. Σε ένα από τα πειράματά του, ο ανακλαστήρας αντικαταστάθηκε από τον ορειχάλκινο δίσκο, ο οποίος αιωρήθηκε με επιτυχία σε απόσταση περίπου μισού μήκους κύματος από την επιφάνεια του πομπού. Αυτή φαίνεται να είναι η πρώτη φορά που αιωρήθηκε ένα αντικείμενο μεγαλύτερο από το μήκος κύματος, χρησιμοποιώντας PATs τοποθετημένα πάνω και κάτω από το αντικείμενο [94].

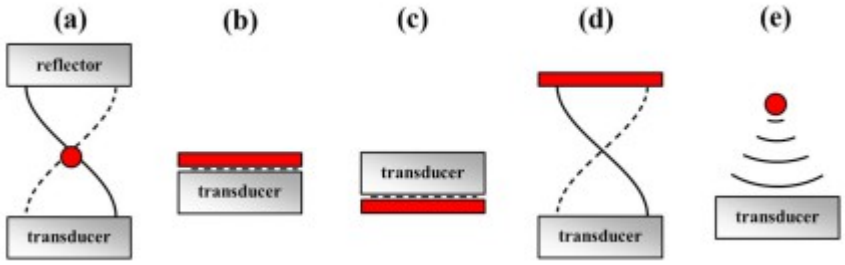
1.3.6 Ακουστική Αιώρηση Μονής Δέσμης (Single-Beam Levitation)

Σε αυτή τη μέθοδο, η παγίδα πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένη και συνήθως έχει τη μορφή δίδυμης παγίδας (twin trap) [6], ή παγίδας δίνης (vortex trap) [95], ή παγίδας μπουκαλιού (bottle trap) όπου αιωρούνται μικρά αντικείμενα χρησιμοποιώντας έναν μόνο πομπό, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.2 (e).

Η πρώτη εφαρμογή της αιώρησης με μονή δέσμη σε υγρό μέσο πραγματοποιήθηκε, όταν ο Lee και οι συνεργάτες του [96] χρησιμοποίησαν έναν μετατροπέα 30MHz για να παγιδεύσουν μια σταγόνα λιπιδίου. Ωστόσο, η παγίδευση επιτεύχθηκε μόνο στην εγκάρσια διεύθυνση, ενώ η

αξονική κίνηση του σωματιδίου περιορίστηκε από ένα λεπτό φιλμ.

Η πρώτη πειραματική επίδειξη της αιώρησης με μονή δέσμη στον αέρα αναφέρθηκε, από τον Marzo και τους συνεργάτες του[6], όπου χρησιμοποίησαν μια διάταξη 8 × 8 μετατροπέων 40 kHz με διάμετρο 10 mm. Με τη βοήθεια μιας προσαρμοσμένης ηλεκτρονικής πλακέτας, κατάφεραν να ελέγξουν ανεξάρτητα τη φάση κάθε μετατροπέα.



Εικόνα 1.2 : Τύποι ακουστικής αιώρησης. (a) Αιώρηση με στάσιμα κύματα, (b) Αιώρηση κοντινού πεδίου. (c) Ανεστραμμένη αιώρηση κοντινού πεδίου. (d) Αιώρηση μακρινού πεδίου. (e) Αιώρηση μονής δέσμης

1.4 Ιστορική Αναδρομή

Η ιδέα της εφαρμογής ακουστικών πεδίων για την αιώρηση αντικειμένων χρονολογείται από το αρκετά μακρινό παρελθόν. Υπάρχουν αναφορές σε αυτό το είδος πρακτικής σε ένα γεωγραφικό εύρος που καλύπτει την Ευρώπη, την Ασία, την Αφρική και την Λατινική Αμερική. Παρά το γεγονός ότι δεν είναι επιστημονικά έγκυρες και αξιόπιστες ως προς την απόδοσή τους, αξίζει να σημειώσουμε ότι αποτελούν μια ιστορική βάση ως προς το φαινόμενο αυτό της ακουστικής αιώρησης, υπονοώντας έτσι, ότι ο χειρισμός αντικειμένων με τη χρήση του ήχου έχει αποτελέσει ενδιαφέρον σε ένα μεγάλο αριθμό πολιτισμών. Πέρα από τις γραπτές αναφορές που έχουν βρεθεί, υπάρχουν και πολυάριθμοι θρύλοι, που κυμαίνονται από τον πολιτισμό των Μάγια μέχρι την Αιγυπτιακή και ακόμη και τη Θιβετιανή παράδοση.

Το φαινόμενο της ακουστικής αιώρησης μέσω στάσιμων κυμάτων χρονολογείται από το έτος 1886, όταν ο Γερμανός φυσικός Augustus Kundt εφηύρε τον “σωλήνα του Kundt” (Kundt's Tube), όπου παρατήρησε πως συγκεντρώθηκαν μικρά σωματίδια σκόνης στους κόμβους ακουστικής πίεσης των στάσιμων κυμάτων. Το πείραμα αυτό αποτελούνταν από έναν γυάλινο σωλήνα, κλειστό στα δύο άκρα, που επέτρεπε τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου σε αέρια και στερεά. Ωστόσο, επειδή τα σωματίδια παρέμεναν σε επαφή με τα τοιχώματα του σωλήνα, δεν μπορούμε να πούμε ότι αυτό ήταν το πρώτο πείραμα ακουστικής αιώρησης. Παρ' όλα αυτά, το πείραμα έδειξε τη δύναμη ακτινοβολίας του ήχου σε μικρά σωματίδια λόγω του πεδίου στάσιμου κύματος. Σήμερα, το έργο του χρησιμοποιείται στον τομέα της ακουστικής αιώρησης, όπου τα ηχητικά κύματα καταφέρνουν να αιωρούν σταγονίδια ή μικρά στερεά αντικείμενα.

Στις αρχές του 20ου αιώνα, σε μια περαιτέρω θεωρητική εργασία διαπιστώθηκε ότι τα αντικείμενα κατάφεραν και σταθεροποιήθηκαν σε κόμβους πίεσης, οδηγώντας στο πρώτο σύστημα ακουστικής αιώρησης που δημιουργήθηκε από τους Bucks και Muller το 1933. Οι δυο τους, παρουσίασαν την πρώτη πειραματική διάταξη για την τοποθέτηση μικρών δειγμάτων σε ακουστικά στάσιμα κύματα, στην οποία ένα μικρό σωματίδιο παγιδεύτηκε σε μια θέση λίγο κάτω από τους κόμβους πίεσης του στάσιμου κύματος μεταξύ ενός πομπού και ενός ανακλαστήρα. [17]

Η ακουστική αιώρηση έχει δει από τότε πολλές εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές, με τις τεχνολογικές προόδους να επιτρέπουν ακόμη και σε μικρά ζώα να ανυψωθούν με τη χρήση υπερηχητικών κυμάτων. [15,16]

Ο L.V. King το 1934, υπολόγισε τη δύναμη σε μη συμπιεστά σωματίδια σε ένα ακουστικό πεδίο. Αυτό επεκτάθηκε από τους Yosioka και Kawasima για να συμπεριλάβει τις επιδράσεις της συμπιεστότητας. [18,19]

Ο Westervelt το 1950, ανέπτυξε μια γενική έκφραση για τη δύναμη λόγω της πίεσης ακτινοβολίας που δρα σε ένα αντικείμενο αυθαιρέτου σχήματος και κανονικής οριακής αντίστασης, δείχνοντας επίσης ότι ένα οριακό στρώμα με υψηλή εσωτερική απώλεια μπορεί να οδηγήσει σε δυνάμεις που είναι αρκετές τάξεις μεγαλύτερου μεγέθους από αυτές που προβλέπονται από την κλασική θεωρία της πίεσης ακτινοβολίας. [20,21]

Ο Embleton το 1954, υιοθέτησε την προσέγγιση του King για να ταιριάζει στην περίπτωση μιας άκαμπτης σφαίρας σε ένα προοδευτικό σφαιρικό ή κυλινδρικό ακουστικό πεδίο. [22,23]

Ο Gor'kov το 1962, παρουσίασε μια πολύ διαφορετική προσέγγιση από τον King, χρησιμοποιώντας μια απλή μέθοδο για τον προσδιορισμό των δυνάμεων που δρουν σε ένα σωματίδιο σε ένα αυθαίρετο ακουστικό πεδίο, στην οποία το δυναμικό ταχύτητας εκπροσωπήθηκε ως άθροισμα ενός προσπίπτοντος και ενός σκεδαζόμενου όρου. [24]

Στη δεκαετία του 1970 και του 1980, η ανάπτυξη νέων συσκευών στάσιμων κυμάτων κινητοποιήθηκε από τη δυνατότητα εφαρμογής των δυνάμεων ακτινοβολίας για την τοποθέτηση υλικών χωρίς επαφή σε συνθήκες μικροβαρύτητας, με πολλές μελέτες να χρηματοδοτούνται από τη NASA. [25-27]

Παράλληλα με τις μελέτες που χρηματοδοτούσε η NASA, η Ευρωπαϊκή Διαστημική Υπηρεσία (ESA) χρηματοδότησε και εκείνη την ανάπτυξη συστημάτων ακουστικής τοποθέτησης για διαστημικές εφαρμογές. Αυτές οι συσκευές τοποθέτησης, που αρχικά αναπτύχθηκαν για διαστημικές εφαρμογές, στη συνέχεια τροποποιήθηκαν για να επιτρέπουν την αιώρηση αντικειμένων στη Γη. Ο Γερμανός ερευνητής Ernst-Güenter Lierke έπαιξε σημαντικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία, αναπτύσσοντας μια ποικιλία συσκευών ακουστικής αιώρησης για την αιώρηση στερεών αντικειμένων και σταγόνων. Οι μελέτες του στην ακουστική αιώρηση οδήγησαν στην κατασκευή εμπορικών ακουστικών αιωρητών, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί σε ευρύ φάσμα πειραμάτων. [28-33]

Ο Taylor Wang και οι συνεργάτες του, το 1974 περιέγραψαν την ανάπτυξη ενός ορθογώνιου ακουστικού θαλάμου για τη θέση λιωμένων υλικών στο διάστημα. Ο θάλαμος, με διαστάσεις 4 × 4.5 × 5 ίντσες, διεγείρονταν από τρία ορθογώνια ηχεία που λειτουργούσαν σε συχνότητες ακουστές από το ανθρώπινο αυτί. Σε εργαστηριακές δοκιμές στη Γη, η συσκευή κατάφερε να αιωρήσει και να περιστρέψει μια μπάλα διογκωμένου πολυστυρενίου, σαπουνόφουσκες και σταγόνες νερού. [34]

Ο Whymark το 1975, πρότεινε έναν ακουστικό ανυψωτή για την τοποθέτηση υλικών στο διάστημα, χρησιμοποιώντας μια μοναδική πηγή ήχου ώστε να πετύχει τον ακριβή έλεγχο της θέσης ρυθμίζοντας τον ανακλαστήρα. [35] [Εικόνα 2.1]

Ο Ernst-Güente Lierke το 1983, παρουσίασε έναν ακουστικό ανυψωτή για την τοποθέτηση δειγμάτων υλικών σε κατόπτρους κλιβάνους κατά την επεξεργασία στο διάστημα.[36]

Ο Eugene Trinh το 1985, παρουσίασε μια συμπαγή συσκευή ακουστικής αιώρησης για μελέτες της μικροβαρύτητας στη δυναμική των ρευστών και την επιστήμη των υλικών. Ο ίδιος το 1992, πέταξε

με το διαστημικό λεωφορείο Columbia (αποστολή STS-50) και διεξήγαγε πειράματα που περιλάμβαναν την περιστροφή και την ταλάντωση σταγόνων. Τα πειράματα αυτά πραγματοποιήθηκαν στη Drop Physics Module, DPM, η οποία αποτελείται από έναν ορθογώνιο θάλαμο διαστάσεων 127mm × 127mm × 152.4mm, που διεγείρεται από τέσσερα ηχεία. Όπως και τα πειράματα του Wang και των συνεργατών του, έτσι και ο Trinh χρησιμοποίησε στάσιμα κύματα με κύριο στόχο την τοποθέτηση της σταγόνας στο κέντρο του θαλάμου. [37-40]

Ο Barmatz το 1985, εφάρμοσε τη μέθοδο του Gor'kov για να προσαγάγει τις γενικευμένες εκφράσεις του δυναμικού και της δύναμης για αυθαίρετους τρόπους στάσιμων κυμάτων σε ορθογώνιες, κυλινδρικές και σφαιρικές γεωμετρίες. [41]

Ο Otsuka και οι συνεργάτες του, το 1989 χρησιμοποίησαν μια κλιμακωτή κυκλική δονητική πλάκα ως πομπό για την παραγωγή υπερήχων υψηλής έντασης, η οποία διέφερε από τις συμβατικές πηγές δόνησης τύπου εμβόλου, χρησιμοποιώντας τη μορφή κάμψης της πλάκας με δύο δακτυλίους δεσμών για να επιτύχουν υψηλότερο πλάτος δόνησης. Η κλιμακωτή πλάκα έχει ένα κοίλο κανάλι με σταθερό βάθος, ίσο με το μισό μήκος κύματος του ήχου στον αέρα. [42]

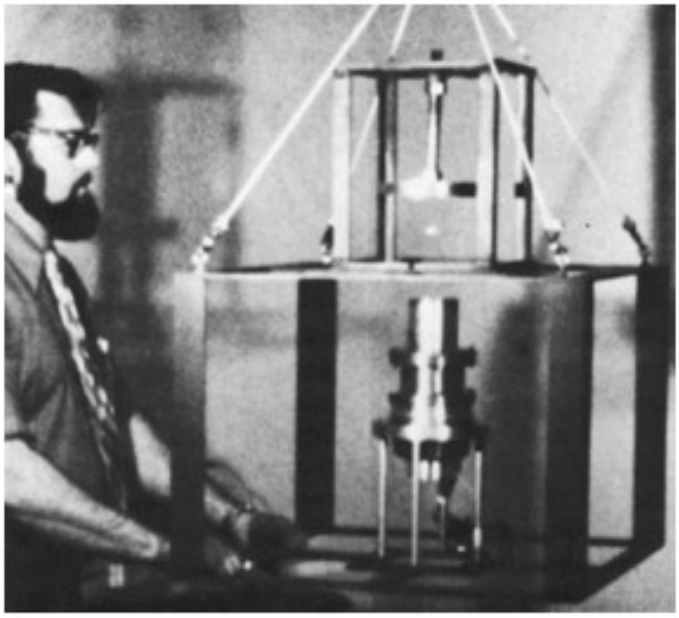
Ο Ernst-Güente Lierke ξανά το 1996, έδωσε μια γενική εικόνα της ακουστικής αιώρησης στάσιμων κυμάτων με βάση τις ερευνητικές και αναπτυξιακές δραστηριότητες των ευρωπαϊκών και αμερικανικών διαστημικών υπηρεσιών. [43]

Οι Xie και Wei, το 2001 ενίσχυσαν τη δύναμη της ακουστικής αιώρησης του στάσιμου κύματος καμπυλώνοντας κατάλληλα την επιφάνεια και μεγεθύνοντας τον ανακλαστήρα. Με αυτό τον τρόπο, πέτυχαν για πρώτη φορά την αιώρηση υλικών υψηλής πυκνότητας, όπως το βολφράμιο, χρησιμοποιώντας υπερηχητική ακουστική αιώρηση στάσιμου κύματος. Επίσης, λίγο αργότερα πραγματοποιήθηκε από τους ίδιους η αιώρηση μικρών ζωντανών ζώων, όπως είναι τα μυρμήγκια, οι πασχαλίτσες και τα μικρά ψάρια. Τα πειράματα αυτά, έδειξαν πως η ζωτικότητα των μικρών ζώων δεν επηρεάστηκε κατά τη διάρκεια της αιώρησης [Εικόνα 2.2]. Οι ίδιοι το 2004, μελέτησαν τη δύναμη ακουστικής αιώρησης σε δείγματα δίσκων και τη δυναμική μεγάλων σταγόνων νερού σε ένα επίπεδο στάσιμο κύμα, επιλύοντας το πρόβλημα της ακουστικής σκέδασης μέσω της ενσωμάτωσης της μεθόδου οριακών στοιχείων. [44-46]

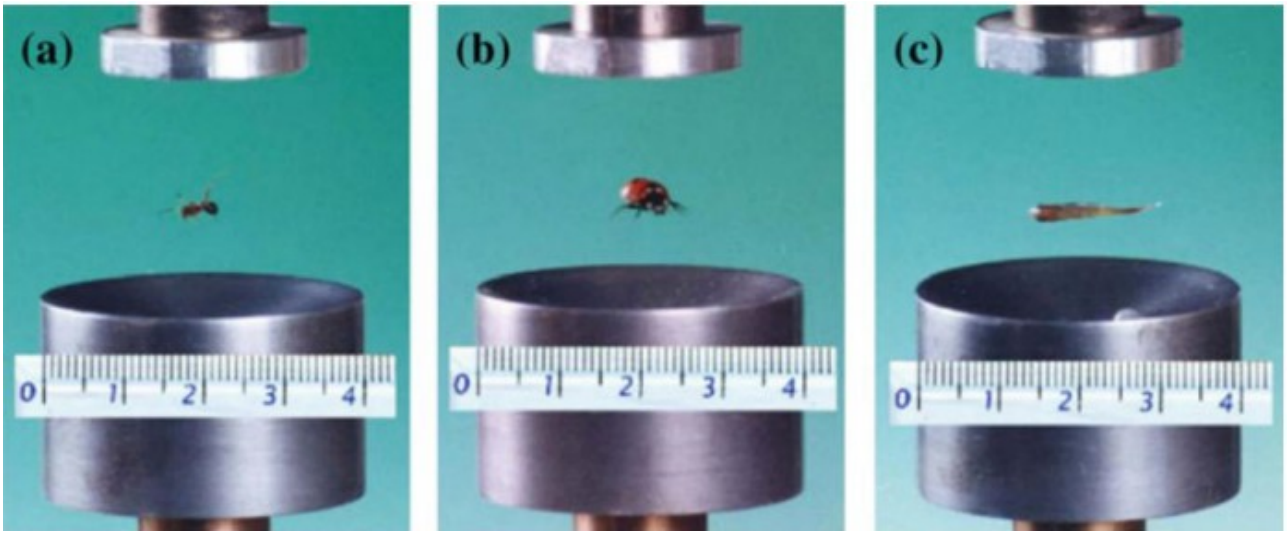
Ο Marzo και οι συνεργάτες του, το 2017 παρουσίασαν έναν μη συντονισμένο αιωρητή μονού άξονα, ο οποίος αποτελείται από δύο κοίλες συστοιχίες μικρών μορφοτροπέων 40kHz. Ο αιωρητής τους είναι χαμηλού κόστους και εύκολος στην κατασκευή. Χρησιμοποιεί φθηνούς μορφοτροπείς 40kHz, ενώ τα μηχανικά μέρη του μπορούν να κατασκευαστούν σε έναν εκτυπωτή 3D. Οι μορφοτροπείς λειτουργούν μέσω ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος που αποτελείται από μια πλακέτα Arduino και έναν οδηγό H-Bridge. Οι συγγραφείς πιστεύουν ότι αυτός ο νέος αιωρητής θα επιτρέψει την ευρεία πρόσβαση στην ακουστική αιώρηση. [47]

Τέλος , ο Σ. Πολυχρονόπουλος και οι συνεργάτες του, παρουσίασαν ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει συστοιχίες υπερηχητικών μετατροπέων (Phased Array Transducers - PATs) με μεταϋλικά για τη δημιουργία αυτο-καμπυλούμενων ηχητικών δεσμών. Αυτοί οι δεσμοί επιτρέπουν την παράκαμψη εμποδίων, καθιστώντας δυνατή την ακουστική αιώρηση και την απτική ανάδραση πίσω από αντικείμενα. Η καινοτομία αυτή ξεπερνά περιορισμούς προηγούμενων τεχνικών, επιτρέποντας τη δημιουργία πολύπλοκων ηχητικών πεδίων σε περιοχές που προηγουμένως ήταν απρόσιτες λόγω εμποδίων. Οι ερευνητές συνέβαλαν στην ακουστική αιώρηση εισάγοντας τη δυνατότητα ελέγχου και χειρισμού αντικειμένων σε περιοχές που δεν ήταν δυνατές με προηγούμενες μεθόδους. Αυτή η προσέγγιση ανοίγει νέες προοπτικές για εφαρμογές σε τομείς όπως η ιατρική, όπου η μη επεμβατική μετακίνηση αντικειμένων μέσω ηχητικών κυμάτων μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. [97]

Όλα τα συστήματα ακουστικής αιώρησης που βασίζονται στα στάσιμα κύματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω, είχαν την κλασική διαμόρφωση πομπού-ανακλαστήρα. Συνεπώς οι εφαρμογές αυτής της διαμόρφωσης περιορίζονται στην αιώρηση μικρών σωματιδίων των οποίων η διάσταση δεν υπερβαίνει το μήκος κύματος του επιβαλλόμενου ηχητικού κύματος. [48]



Εικόνα 2.1 : Ακουστικός ανυψωτής που χρησιμοποιείται στο διαστημικό σταθμό για την τοποθέτηση υλικών (1975) [35].



Εικόνα 2.2 : Ακουστική αιώρηση μικρών ζώων. a) Μυρμήγκι, b) Πασχαλίτσα, c) Μικρό ψάρι. [5]

Κεφάλαιο 2ο : Τεχνολογίες και Εφαρμογές

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούν τα συστήματα και οι εφαρμογές της ακουστικής αιώρησης. Πιο συγκεκριμένα θα γίνει μια περιγραφή στους τύπους συστημάτων που χρησιμοποιούν υπέρηχους, καθώς και οι χρήσεις της μεθόδους αυτής σε διάφορους επιστημονικούς και βιομηχανικούς τομείς.

2.2 Συστήματα ακουστικής αιώρησης

2.2.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα ακουστικής ανύψωσης χρησιμοποιούν την ακουστική πίεση και τις δυνάμεις ακτινοβολίας για να δημιουργήσουν ισχυρές δυνάμεις που υπερνικούν τη βαρύτητα, επιτρέποντας την αιώρηση αντικειμένων στον αέρα. Όταν οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα αντικείμενο είναι αρκετά ισχυρές και συγκλίνουν από όλες τις κατευθύνσεις, τα σωματίδια μπορούν να ανυψωθούν και να παγιδευτούν σε ένα σταθερό σημείο.

Η αρχή λειτουργίας εδώ, βασίζεται στη δημιουργία στάσιμων κυμάτων μέσω πολλαπλών ανακλάσεων μεταξύ ενός υπερηχητικού πομπού και ενός σταθερού, επίπεδου ή κοίλου ανακλαστήρα. Αυτά τα κύματα μπορούν να παγιδεύσουν σωματίδια διαφόρων υλικών και μεγεθών της τάξης του χιλιοστού. Επίσης, αντικείμενα με διάμετρο μικρότερη από το μήκος κύματος του ήχου μπορούν να αιωρηθούν σε αυτές τις περιοχές, καθώς οι δυνάμεις ακτινοβολίας τα συγκρατούν στη θέση τους [35].

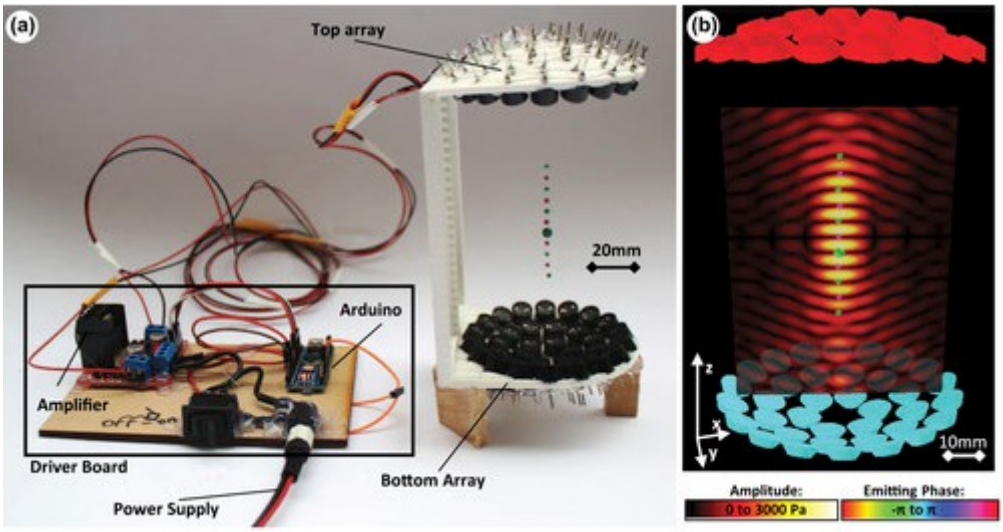
Η πιο κοινή διάταξη για τους ακουστικούς ανυψωτές είναι η μονοδιάστατη διάταξη, η οποία χωρίζεται σε δύο κύριους τύπους. Ο πρώτος βασίζεται σε έναν πομπό και έναν ανακλαστήρα, των οποίων η απόσταση και η γεωμετρία σχεδιάζονται συνήθως για να λειτουργούν ως αντηχείο. Από την άλλη πλευρά, οι μη-αντηχητικοί ανυψωτές μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας δύο ξεχωριστούς εκπομπούς. Οι αντηχητικές συσκευές είναι πιο αποδοτικές αλλά, είναι ευαίσθητες στις αλλαγές της θερμοκρασίας και της διάταξης των στοιχείων. Και οι δύο τύποι ανυψωτών τροφοδοτούνται με ημιτονοειδή σήματα για να δημιουργήσουν ένα στατικό κύμα μεταξύ των στοιχείων τους, το οποίο παγιδεύει τα σωματίδια στους κόμβους του.

Οι ερευνητές χρησιμοποιούν μη αντηχητικά συστήματα για πιο ευέλικτους και σταθερούς ανυψωτές. Χρησιμοποιώντας αυτήν την προσέγγιση, αναπτύχθηκε ένας ανυψωτής με εύρος λειτουργίας θερμοκρασίας από -40 έως +40 °C, ο οποίος δεν απαιτεί καλιμπράρισμα για την απόσταση μεταξύ των αντίθετων εκπομπών.

Επιπλέον, οι τρέχοντες ανυψωτές κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας Langevin horns που πρέπει να κατασκευαστούν με υψηλή ακρίβεια και με προσεκτικά συγχρονισμένες συντονισμένες συχνότητες. Όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα του ήχου, τόσο μικρότερη είναι η διάμετρος των αντικειμένων που μπορούν να αιωρηθούν. Επιπλέον, τα Langevin horns απαιτούν λειτουργία σε υψηλές τάσεις (>100 V), γεγονός που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα σε απαιτητικά πειραματικά περιβάλλοντα. [49]

Οι αιωρητές μονού άξονα είναι η πιο συνηθισμένη διάταξη για τη δημιουργία ακουστικών παγίδων [50]. Αποτελούνται από έναν ακουστικό πομπό και μία ανακλαστική επιφάνεια απέναντί του. Ένα στάσιμο κύμα δημιουργείται μεταξύ του πομπού και του ανακλαστήρα. Οι δεσμοί του στάσιμου κύματος λειτουργούν ως ακουστικές παγίδες για σφαιρικά σωματίδια μικρότερα από το μισό του μήκους κύματος και με θετική ακουστική αντίθεση (δηλαδή η ακουστική εμπέδηση του σωματιδίου είναι μεγαλύτερη από εκείνη του μέσου διάδοσης). Τα συστήματα LeviPrint και TinyLev αποτελούν δύο διαφορετικές εφαρμογές της ακουστικής αιώρησης στην ανύψωση αντικειμένων χωρίς επαφή, διαφέροντας ως προς τον σχεδιασμό και τον τομέα χρήσης τους.

2.2.2 TinyLev



Εικόνα 2.3 : Ακουστικός Ανυψωτής TinyLev

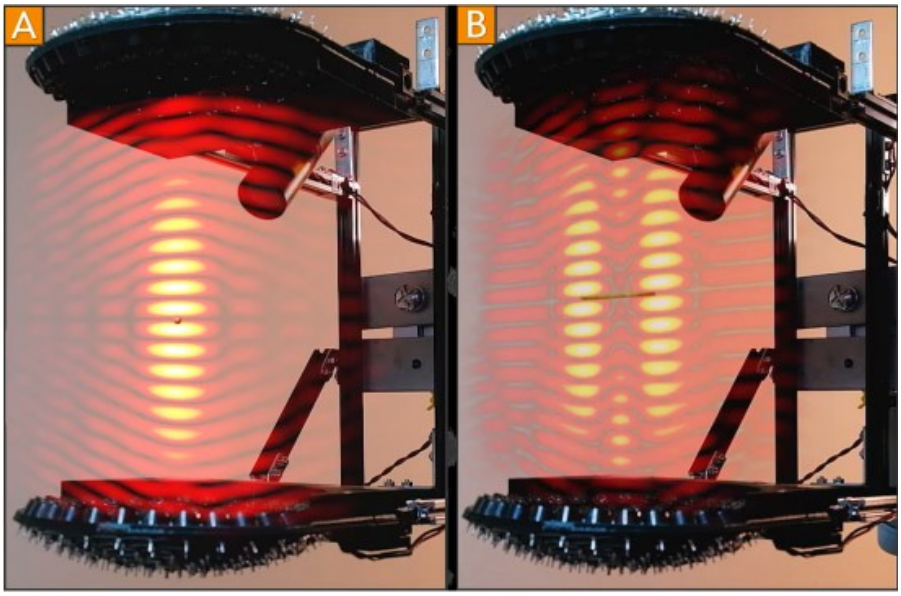
Ο TinyLev είναι μια συσκευή μονού άξονα και χρησιμοποιεί 72 υπερηχητικούς πομπούς (ηχεία), διατεταγμένους σε δύο επιφάνειες, με 36 μετατροπείς η κάθε μια. Έτσι, επιτρέπει στα σωματίδια από διογκωμένο πολυστυρένιο (EPS) να αιωρούνται στους κόμβους του στάσιμου κύματος που δημιουργείται. Η προσομοιωμένη κατανομή πίεσης του ακουστικού πεδίου απεικονίζει κάθε μετατροπέα ως κύκλο διαμέτρου 10mm, με το χρώμα να αντιπροσωπεύει τη φάση εκπομπής του μετατροπέα. Για την παραγωγή κατακόρυφης κίνησης των παγίδων, απαιτούνται δύο σήματα οδήγησης.

Αποτελείται από την πλακέτα οδήγησης (driver board) και ένα μονοδιάστατο, μη συντονισμένο ανυψωτή που λειτουργεί στα 40kHz και μπορεί να παγιδεύσει αντικείμενα με πυκνότητα άνω των 2,2 g/cm³ και διάμετρο 4mm, καταναλώνοντας 10 W ισχύος εισόδου. Συχνά, τα 2 ηχεία, ή το ηχείο και η ανακλαστική επιφάνεια έχουν κυρτές επιφάνειες για να βοηθήσουν στην εστίαση του ήχου. Η συσκευή κατασκευάζεται από χαμηλού κόστους έτοιμα εξαρτήματα, όπως υπερηχητικούς εκπομπούς χαμηλής τάσης και συναρμολογείται εύκολα χρησιμοποιώντας τμήματα εκτυπωμένα σε 3D.

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (b), οι σκοτεινές περιοχές έχουν χαμηλή πίεση, ενώ οι φωτεινές περιοχές έχουν πολύ δυνατή και υψηλή πίεση. Αυτές οι περιοχές είναι ικανές να παγιδεύσουν στους κόμβους σωματίδια, τα όποια επηρεάζονται από δύο δυνάμεις. Η μια είναι η μεταβολή του πλάτους και η άλλη η μεταβολή της ταχύτητας. Όλα τα σωματίδια που βρίσκονται

ανάμεσα στους δύο εκπομπούς θέλουν να μετακινηθούν από την υψηλή ένταση προς την χαμηλή. Με άλλα λόγια, ωθούνται από τις φωτεινές περιοχές προς τις σκοτεινές, φαινόμενο που ονομάζεται μεταβολή πλάτους. Ο λόγος που τα σωματίδια δεν πέφτουν από τα πλάγια έξω από τον ανυψωτή, οφείλεται στη μεταβολή της ταχύτητας. [47, 52]

2.2.3 LeviPrint



Εικόνα 2.4 : Ακουστικός Ανυψωτής LeviPrint

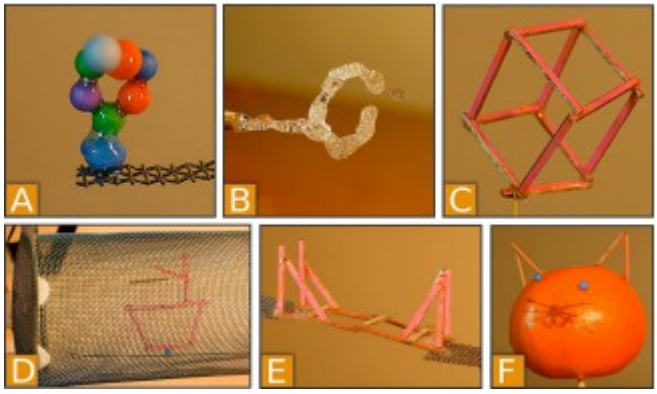
Η συσκευή LeviPrint λειτουργεί στα 40kHz, με μήκος κύματος 8,6 mm και είναι ένα σύστημα συναρμολόγησης αντικειμένων χωρίς επαφή, καθώς δεν απαιτεί χειροκίνητη παρέμβαση και μπορεί να αυτοματοποιηθεί [73]. Στην ουσία, η συσκευή αυτή μπορεί να παγιδεύει και να προσανατολίσει μια ποικιλία υλικών όπως μικρά και εύθραυστα αντικείμενα, ραβδιά, χάντρες, σταγόνες και να δημιουργήσει με αυτά πολύπλοκες γεωμετρίες με πολύ υψηλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα [76,77] [Εικόνα 2.5]. Πρόκειται για ένα σύστημα που αποτελείται από έναν ανυψωτή και έναν ρομποτικό βραχίονα ο οποίος έχει προγραμματιστεί να εκτελεί τις απαιτούμενες κινήσεις σε διαφορετικές θέσεις και γωνίες και είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν συναρμολόγηση και κατασκευή σύνθετων αντικειμένων. Σε ορισμένες περιπτώσεις για πρακτικούς λόγους υπάρχει ανθρώπινη παρέμβαση [52].

Επιπλέον, η κατασκευή συνδυάζεται με τη συναρμολόγηση, η οποία αφορά τη διαδικασία τοποθέτησης των μεμονωμένων στοιχείων που συνθέτουν το τελικό αντικείμενο, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη συναρμολόγηση ηλεκτρονικών εξαρτημάτων σε μια εκτυπωμένη πλακέτα κυκλώματος (PCB)[70]. Η τεχνική αυτή αναμένεται να εμπνεύσει νέες μεθόδους κατασκευής και να εφαρμοστεί σε τομείς όπως, η χρήση γερανογεφυρών για την τοποθέτηση δοκών σε κτίρια [71], η κατασκευή μικρών εξαρτημάτων, η ενδοσωματική προσθετική, η αεροναυπηγική και η αυτοκινητοβιομηχανία [72].

Αξίζει να σημειωθεί πως με αυτή τη μέθοδο μειώνεται η πιθανή μόλυνση των αντικειμένων καθώς ο χειριστής δεν έρχεται σε επαφή με τα μέρη ή το υλικό και δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας δομών από διαφορετικές γωνίες, καθώς και η εφαρμογή της τεχνικής αυτής σε κλειστούς χώρους

Εν κατακλείδι, ενώ και τα δύο συστήματα χρησιμοποιούν την ακουστική αιώρηση, το TinyLev ειδικεύεται στη σταθερή ανύψωση μικρών αντικειμένων σε μία διάσταση, ενώ το LeviPrint εστιάζει στην κατασκευή και την συναρμολόγηση σύνθετων αντικειμένων.

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι δυνατότητες της συσκευής LeviPrint, συνδυάζοντας διάφορα δομικά στοιχεία, όπως χάντρες, σταγονίδια και ράβδους από ξύλο, για την κατασκευή ανθεκτικών και σύνθετων δομών.



Εικόνα 2.5 : Αντικείμενα που έχουν κατασκευαστεί. A) Ενωμένα σωματίδια για τη δημιουργία ενός βρόχου, B) Σταγόνες από κόλλα που αιρωρήθηκαν και σταθεροποιήθηκαν δημιουργώντας έναν βρόχο, C) Δώδεκα ράβδοι τοποθετημένοι ορθογώνια μέσω γωνιακών συνδέσμων (L-joints) για τη δημιουργία ενός κύβου, D)Μία ράβδος που αιωρείται μέσα σε ένα δοχείο προς την τελική της θέση, E) Δεκαπέντε ράβδοι ενωμένες μέσω επίπεδων συνδέσμων (butt joints), γωνιακών συνδέσμων (L joints) και λοξών επίπεδων συνδέσμων (miter butt joints) για τη δημιουργία μιας γέφυρας, F)Προσθήκη πολλαπλών στοιχείων υπό διαφορετικές γωνίες για τη δημιουργία ενός συμπαγούς σφαιρικού αντικειμένου. [52]

2.2.3.1 Κατασκευή με Σωματίδια

Χρησιμοποιούνται σωματίδια (στη συγκεκριμένη χάντρες), τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με κόλλα. Η χρήση υπέρλεπτων σφαιρικών σωματιδίων ως δομικά μέρη επιτρέπει πιο ευέλικτους σχεδιασμούς όσον αφορά τα σχήματα, καθώς μπορούν να συνδεθούν από οποιοδήποτε σημείο. Ωστόσο, η διαδικασία είναι πιο χρονοβόρα, καθώς απαιτούνται περισσότερα μέρη για την κατασκευή του ίδιου μήκους σε σχέση με τα ξυλάκια, ενώ το τελικό αποτέλεσμα είναι πιο πυκνό. αλλά όχι απαραίτητα πιο ισχυρό [Εικόνα 2.4. A)].

2.2.3.2 Κατασκευή με UV Ρητίνη

Τα σταγονίδια UV-ρητίνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή αντικειμένων σε ελεύθερα σχήματα, αφού μετακινούνται στη θέση “στόχο” και στερεοποιούνται μέχρι να σχηματιστεί το τελικό αντικείμενο. Λόγω της πίεσης του στάσιμου κύματος, παίρνουν σχήμα πιάτου και μπορούν να προσανατολιστούν έτσι ώστε να ευθυγραμμιστούν με την κατεύθυνση κατασκευής. Δημιουργήθηκε ένας βρόχος με διάμετρο 1 εκ. [Εικόνα 2.4. B)].

2.2.3.3 Σύνθετα Αντικείμενα

Δημιουργήθηκε ένας κύβος χρησιμοποιώντας κάθετα τοποθετημένα ξυλάκια μέσω γωνιακών συνδέσμων, καθώς και μία γέφυρα που συνδέει δύο ξεχωριστά μεταλλικά πλέγματα, χρησιμοποιώντας διάφορους συνδέσμους για την ενίσχυση της δομικής αντοχής [Εικόνα 2.4. C) και 2.4. E)].

2.2.3.4 Κατασκευή μέσα σε Δοχείο

Υλικά όπως το ύφασμα, τα πλέγματα και τα σφουγγάρια είναι ακουστικά διαφανή στο υπερηχητικό πεδίο. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την κατασκευή σε δοχεία φτιαγμένα από αυτά τα υλικά, επιτρέποντας την κατασκευή μικρών αντικειμένων μέσα σε κλειστά περιβάλλοντα. Στην Εικόνα 2.4. D, παρουσιάζεται η κατασκευή ενός σκάφους μέσα σε ένα μπουκάλι από μεταλλικό πλέγμα, όπου τα ξυλάκια και η κόλλα εισάγονται μέσα στο μπουκάλι μέσω μιας μικρής σχισμής στο πλάι. Το LeviPrint θα μπορούσε να συναρμολογεί με αυτή τη διαδικασία μικροσκοπικά αντικείμενα σε καλλιέργειες κυττάρων ή ακόμη και σε ζωντανούς οργανισμούς.

2.2.3.5 Προσθήκη πάνω από Άλλα Αντικείμενα

Σωματίδια, ξυλάκια και σταγονίδια μπορούν να αιωρούνται πάνω από υπάρχοντα στερεά αντικείμενα, εφόσον προσεγγίζονται από συγκεκριμένες γωνίες και δεν μπλοκάρουν σημαντικά το ακουστικό πεδίο. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, αποτελεί σημαντικό βήμα η σειρά με την οποία προστίθενται τα μέρη, πρέπει δηλαδή να είναι προγραμματισμένη έτσι ώστε να προσεγγίζουν το αντικείμενο από μια λειτουργική γωνία που δεν μπλοκάρει σημαντικά το υπερηχητικό πεδίο που εκπέμπεται. [52] [Εικόνα 2.4. F)]

2.2.4 GauntLev



Εικόνα 2.6 : Συσκευή GauntLev, a) Στάσιμο κύμα μεταξύ δακτύλων, b) δίδυμη παγίδα στην παλάμη [69]

Πρόκειται να μια φορητή συσκευή ακουστικής ανύψωσης αντικειμένων που χωρίζεται σε δύο συσκεύες. Η μια είναι δημιουργώντας ένα στάσιμο κύμα μεταξύ των δακτύλων και η άλλη είναι μια “δίδυμη” παγίδα (twin trap), φορώντας την στην παλάμη του χεριού. Η συσκευή που χρησιμοποιεί το στάσιμο κύμα (standing wave) αποτελείται από δύο αντίστοιχες συστοιχίες πομπών που δημιουργούν περιοχές με εναλλασσόμενη χαμηλή και υψηλή ένταση, όπου μπορούν να παγιδευτούν σωματίδια. Από την άλλη, η “δίδυμη” παγίδα (twin trap) είναι ένα μόνο

ακουστικό κύμα που δημιουργεί μια δομή, η οποία μοιάζει με «δύο δάχτυλα» που παγιδεύουν το σωματίδιο.

Το GauntLev χρησιμοποιεί πομπούς υπερήχων 40kWh, με τάση 16V pk-pk, ηχητική ένταση 120dB σε απόσταση 30cm. Οι κινήσεις που μπορεί να πραγματοποιήσει χωρίζονται σε κινήσεις σύλληψης (capture), μετακίνησης (movement), μεταφοράς (transfer), συνδυασμού (combine) και απελευθέρωσης (release).

Η σύλληψη αναφέρεται στην αποκόλληση ενός σωματιδίου από μια επίπεδη επιφάνεια. Μία από τις βασικές μεθόδους για τη σύλληψη είναι η χρήση μιας παγίδας διδύμου (twin trap), η οποία τοποθετείται πάνω από το σωματίδιο και καθώς η δύναμη της παγίδας αυξάνεται, έχει ως αποτέλεσμα την αποκόλληση και την ανύψωσή του από την επιφάνεια. Εναλλακτικά, η χρήση ενός στατικού κύματος, με μεταβολή του πλάτους του, μπορεί να προκαλέσει την εκτίναξη του σωματιδίου από την επιφάνεια και στη συνέχεια να παγιδευτεί στον αέρα.

Η μετακίνηση συνεπάγεται τη μεταφορά του σωματιδίου από ένα σημείο σε άλλο. Αυτή η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω της αλλαγής της φάσης του ηχητικού πεδίου, έτσι ώστε η παγίδα να κινείται ομαλά στον τρισδιάστατο χώρο. Ένας άλλος τρόπος, είναι η αναδιαμόρφωσή της δομής του πεδίου, έτσι ώστε το σωματίδιο να κινείται προς μία νέα θέση με έναν πιο ελεγχόμενο τρόπο.

Η μεταφορά, σε αντίθεση με τη μετακίνηση, περιλαμβάνει τη μετακίνηση ολόκληρης της παγίδας και του σωματιδίου ταυτόχρονα, αντί απλώς της μετακίνησης του σωματιδίου εντός της παγίδας. Αυτή η διαδικασία είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της σταθερότητας του συστήματος και την αποφυγή της απώλειας του σωματιδίου κατά τη διάρκεια της μετακίνησης.

Έπειτα, ο συνδυασμός αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία δύο ή περισσότερα σωματίδια φέρνονται κοντά το ένα με το άλλο με σκοπό να συγχωνευτούν είτε μέσω φυσικής επαφής είτε μέσω δυνάμεων που προκαλούνται από το πεδίο. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε τομείς όπως η βιολογία ή η χημεία, όπου απαιτείται η ακριβής συνένωση μικρών δειγμάτων.

Τέλος, η απελευθέρωση αφορά την απελευθέρωση ενός σωματιδίου και την τοποθέτησή του σε μια επιθυμητή θέση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε μέσω της απενεργοποίησης του ηχητικού πεδίου, επιτρέποντας στο σωματίδιο να πέσει φυσικά, είτε με την ελαφρά εκτόξευσή του για πιο ακριβή τοποθέτηση.

Όλες αυτές οι διαδικασίες μπορούν να συνδυαστούν για να δημιουργήσουν μια ευέλικτη, χωρίς επαφή, διαδικασία χειρισμού σωματιδίων. Ένα παράδειγμα αυτής της εφαρμογής θα ήταν η σύλληψη ενός μικρού σωματιδίου, η μεταφορά του εντός του πεδίου, ο συνδυασμός του με άλλο σωματίδιο και η τελική του απελευθέρωση στην επιθυμητή θέση. Αυτές οι δυνατότητες ανοίγουν τον δρόμο για νέες εφαρμογές σε διάφορους τομείς, παρέχοντας ευχέρεια και ακρίβεια στον χειρισμό σωματιδίων. Επιπλέον, οι παραπάνω χειρισμοί μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε χειροκίνητα (με μετακίνηση του χεριού), είτε αυτόματα μέσω υπολογιστή (με προσαρμογή των φάσεων των πομπών). Αυτό δημιουργεί μια νέα κατηγορία χειρισμών, γνωστή ως υποβοηθούμενοι από υπολογιστή χειρισμοί (computer - assisted maneuvers), όπου το σύστημα μπορεί να συνδυάζει ανθρώπινες κινήσεις και αυτοματοποιημένες διορθώσεις για ακριβή έλεγχο. [69]

2.3 Εφαρμογές

2.3.1 Φασματοσκοπία

Η ακουστική αιώρηση έχει σημαντικές εφαρμογές με κυριότερη τη φασματοσκοπία, η οποία επιτρέπει τη μελέτη των δειγμάτων χωρίς να έρχονται σε επαφή με επιφάνειες, γεγονός που μειώνει τον κίνδυνο μόλυνσης. Ο τρόπος που λειτουργεί η φασματοσκοπία είναι ότι, ένα δείγμα εκτίθεται σε υπέρυθρη ακτινοβολία, ακτίνες Χ, νετρόνια ή πρωτόνια. Στη συνέχεια, αναλύεται η ακτινοβολία που ανακλάται ή διαπερνά το δείγμα, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο να ερμηνευτούν τα χαρακτηριστικά του. Ένα πρόβλημα με αυτές τις τεχνικές είναι ότι το δείγμα τοποθετείται συνήθως σε κάποια επιφάνεια, η οποία ανεξάρτητα από το πόσο διαφανές ή ουδέτερη είναι, μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις, αλλοιώνοντας τις. Με την ακουστική αιώρηση, το δείγμα αιωρείται, επιτρέποντας στη φασματοσκοπική ανάλυση να γίνει χωρίς επαφή, αποτρέποντας έτσι πιθανές επιδράσεις από την επιφάνεια.

Σύμφωνα με τους Santesson και Nilsson, η ακουστική αιώρηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση μικρού όγκου δειγμάτων, αποφεύγοντας την επαφή με στερεά τοιχώματα και τα προβλήματα που σχετίζονται με τον δυσμενή λόγο επιφάνειας προς όγκο σε μικροκλίμακα.[53]

Επιπλέον, οι Schweiger και Leipertz, ανέπτυξαν ένα πειραματικό σύστημα που συνδυάζει τη φασματοσκοπία Raman με την ακουστική αιώρηση, επιτρέποντας την ανάλυση μικροσκοπικών δειγμάτων χωρίς επαφή και χωρίς περίπλοκη προετοιμασία. [54]

Συνολικά, η ακουστική αιώρηση σε συνδυασμό με τις φασματοσκοπικές τεχνικές, όπως η φασματοσκοπία Raman, προσφέρουν μια μη επεμβατική μέθοδο για την ανάλυση δειγμάτων, επιτρέποντας έτσι τη μελέτη φυσικών και χημικών ιδιοτήτων χωρίς την παρεμβολή επιφανειών. [55-57]

2.3.2 Mid-Air Chemistry

Μια άλλη χρήση είναι η λεγόμενη mid-air chemistry, όπου στα ελληνικά θα μπορούσε να αποδοθεί ως “χημεία στον αέρα”. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή αντί να πραγματοποιείται η χημική αντίδραση σε μια πιπέτα, γίνεται σε μια σταγόνα που αιωρείται, παρόμοια μέθοδος με την φασματοσκοπία. Η συγκεκριμένη τεχνική απέδειξε πως κάποια συστατικά, συμπεριφέρονται διαφορετικά όταν αιωρούνται. Για παράδειγμα, έχουν δείξει μελέτες ότι ορισμένα βακτήρια ή ιοί γίνονται τρεις φορές πιο επιθετικοί όταν βρίσκονται στον αέρα. Οι λόγοι για αυτό το φαινόμενο εξακολουθούν να ερευνώνται, με πιθανές εξηγήσεις να περιλαμβάνουν τη διέγερση της μεμβράνης τους από δονήσεις ή την μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής. Επιπλέον, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό, είναι πως τα πειράματα που γίνονται στην Γη δίνουν τα ίδια αποτελέσματα με τα πειράματα μικροβαρύτητας που διεξάγονται στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό (ISS), έτσι γίνεται κατανόηση της συμπεριφοράς των χημικών ενώσεων σε περιβάλλοντα χωρίς βαρύτητα. Ένα παράδειγμα είναι η βλάστηση σπόρων, όπου τα φυτά αντιδρούν στην μικροβαρύτητα, έχοντας ως αποτέλεσμα μερικά γονίδια να επηρεάζονται και τα φύλλα να μην αναπτύσσονται σωστά. Η εφαρμογή αυτή προσφέρει εξοικονόμηση χρημάτων, διότι δεν χρειάζεται να σταλούν τα δείγματα στο διάστημα. Τέλος, αυτή η τεχνική είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές μικρορευστομηχανικής, όπου απαιτείται ο χειρισμός μικρών ποσοτήτων υγρών με

υψηλή ακρίβεια. [58-61]

2.3.3 Βλαστοκύτταρα και Δομές Ιστών

Μία επίσης πολύ σημαντική εφαρμογή της ακουστικής αιώρησης βρίσκεται στον τομέα της αναγεννητικής ιατρικής, ειδικότερα στη διαχείριση των βλαστοκυττάρων και στη δημιουργία ιστών. Αυτό που κάνει είναι να χρησιμοποιεί τις ακτινοβολούμενες δυνάμεις για τη διαμόρφωση των κυττάρων σε ένα ομοιόμορφο πλέγμα μέσα στο νερό.

Όπως έχει παρατηρηθεί, όταν τα βλαστοκύτταρα τοποθετούνται ως μια συμπαγή μάζα, δεν ενεργοποιούνται για να πραγματοποιήσουν συγκεκριμένες λειτουργίες ή να διαφοροποιηθούν σε εξειδικευμένα κύτταρα. Η αντίδρασή τους και σε τι θα μετατραπούν εξαρτάται από το περιβάλλον τους και από την ακριβή διάταξή που θα πάρουν. Για να επιτευχθεί η σωστή διαφοροποίηση σε όργανα ή ιστούς, όπως το ήπαρ, η καρδιά ή το δέρμα, απαιτείται η διαμόρφωσή τους σε μία οργανωμένη δομή. Η ακουστική αιώρηση επιτυγχάνει τη δημιουργία αυτής της διάταξης μέσω της τοποθέτησης μιας μάζας βλαστοκυττάρων σε νερό και με την εκπομπή υπερήχων από όλες τις κατευθύνσεις, οι οποίοι θα κατευθύνουν τα κύτταρα ώστε να διαταχθούν σε ένα ομοιόμορφο πλέγμα.

Η διαδικασία αυτή, χάρη στην ακουστική ενέργεια, είναι πολύ γρήγορη και αποτελεσματική. Χωρίς την αξιοποίηση αυτής της τεχνικής, η δημιουργία ενός ομοιόμορφου πλέγματος μικρών κυττάρων ή άλλων μικροαντικειμένων θα ήταν εξαιρετικά δύσκολη, έως και αδύνατη. Έτσι, η ακουστική αιώρηση αποδεικνύεται καθοριστική για την επίτευξη αυτών των αναγκαίων βιολογικών διαρθρώσεων. [62-64]

2.3.4 Παρουσιάσεις Δεδομένων

Μία άλλη ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εφαρμογή της ακουστικής αιώρησης αφορά τη χρήση αιωρούμενων σωματιδίων για την αναπαράσταση δεδομένων σε τρισδιάστατους χώρους. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται ένας συνδυασμός ακουστικής και ηλεκτρικής αιώρησης. Τα σωματίδια αυτά, λειτουργούν ως φυσικά voxels (τρισδιάστατα εικονοστοιχεία), επιτρέποντας τη αναπαράσταση πληροφορίας στον χώρο.

Για παράδειγμα, η δημιουργία μιας «αιωρούμενης οθόνης» βασισμένης σε αυτή την τεχνολογία θα μπορούσε να επιτρέψει την προβολή γραφημάτων και διαγραμμάτων με φυσικό τρόπο, παρόμοιο με τις οπτικοποιήσεις δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε λογισμικά όπως το Excel. Επιπλέον, η προσαρμογή της διάταξης των σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο θα καθιστούσε εφικτή την άμεση ενημέρωση της απεικόνισης σύμφωνα με τις μεταβολές των δεδομένων, προσφέροντας έναν καινοτόμο και διαδραστικό τρόπο παρουσίασης πληροφορίας.

Κεφάλαιο 3ο : Ανάλυση και Προκλήσεις

3.1 Εισαγωγή

Τα στάσιμα κύματα είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος για την παγίδευση σωματιδίων λόγω της ικανότητας να παγιδεύουν αντικείμενα, παρουσιάζουν όμως ορισμένους περιορισμούς. Οι βασικοί αυτοί περιορισμοί αφορούν το μέγεθος των αντικειμένων που πρόκειται να αιωρηθούν, την ακρίβεια της τοποθέτησης και τις απαιτήσεις για ενσωμάτωση με άλλες τεχνολογίες.

3.2. Τεχνικοί Περιορισμοί

Παρά τις πρόσφατες εξελίξεις στην ακουστική αιώρηση, υπάρχουν ακόμη πολλές τεχνικές προκλήσεις που χρειάζεται να ξεπεραστούν, όπως για παράδειγμα υπάρχουν περιορισμοί στο μέγεθος και στην πυκνότητα των σωματιδίων που μπορούν να αιωρηθούν, όπως και ότι δεν μπορούν να υπάρχουν εμπόδια ανάμεσα στους μετατροπείς και στο σημείο ελέγχου. Το μέγεθος των σωματιδίων δεν εξαρτάται από την ισχύ του αιωρητή, όσο κι αν αυξηθεί η τάση, το μέγιστο μέγεθος των σωματιδίων καθορίζεται μόνο από τη συχνότητα ή το μήκος κύματος. Με λίγες εξαιρέσεις, τα περισσότερα μοντέλα χρησιμοποιούν την εξίσωση του Gor’kov για να προσομοιώσουν τις δυνάμεις ακτινοβολίας (acoustic radiation force) που ασκούνται στα αντικείμενα, η οποία είναι έγκυρη μόνο για σφαιρικά αντικείμενα πολύ μικρότερα από το μήκος κύματος του ήχου [75,79]. Παραδείγματος χάριν, αν η συσκευή ανύψωσης λειτουργεί στα 40 kHz, το μήκος κύματος θα είναι 8,6 mm, επομένως, σωματίδια μεγαλύτερα από 4 mm δεν μπορούν να παγιδευτούν. Κάτω από τα 20kHz, τα πειράματα γίνονται μη βιώσιμα επειδή θα έβλαπταν την ανθρώπινη ακοή.

Επίσης, έχουν καταγραφεί ταχύτητες έως 8,75 m/s για αιωρούμενα ελαφριά σωματίδια, γεγονός που αποδεικνύει ότι η δυναμική κίνηση των ίδιων των αντικειμένων που αιωρούνται είναι εφικτή υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Αντιθέτως, η ταχεία μεταφορά βαρύτερων σωματιδίων παραμένει δύσκολη [78]. Παράλληλα, η απόσβεση των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων που παρατηρείται σε στερεά αντικείμενα μέσα σε μια συσκευή ανύψωσης δεν είναι απλό πρόβλημα και γίνεται πιο έντονο όταν αιωρούνται υγρά, όπως σταγόνες. Για την ανάπτυξη πιο αξιόπιστου εξοπλισμού που να είναι λειτουργικός για την ευρύτερη επιστημονική κοινότητα, οι συσκευές αυτές θα απαιτούσαν αυτόματες ρυθμίσεις των παραμέτρων τους (π.χ. συχνότητα λειτουργίας ή φάση εκπομπής). Για την ταχεία κίνηση των σωματιδίων, απαιτείται καλύτερη κατανόηση της δυναμικής τους.

Ακόμη, η μετάδοση γωνιακής ταχύτητας σε αιωρούμενα σφαιρικά αντικείμενα μπορεί να έχει καταστεί εφικτή, όμως, ο έλεγχος του στατικού προσανατολισμού τους εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο έρευνας. Η αιώρηση πολλαπλών αντικειμένων υψηλής πυκνότητας θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, η δύναμη της παγίδευσης μειώνεται γραμμικά με τον αριθμό των παγίδων, γεγονός που περιορίζει την ικανότητα των υπαρχόντων συστημάτων να αιωρήσουν ταυτόχρονα πολλαπλά αντικείμενα υψηλής πυκνότητας.

Ένα ερώτημα που γεννιέται είναι πόσο βαριά μπορούν να είναι τα σωματίδια. Το αν θα καταφέρει

να αιωρηθεί ένα αντικείμενο δεν σχετίζεται με το βάρος, αλλά μόνο με την πυκνότητα. Οι δυνάμεις που ασκούνται είναι ανάλογες με τον όγκο των σωματιδίων, όπως το ίδιο ισχύει και για το βάρος. Ως εκ τούτου, ο όγκος «ακυρώνεται» και το μόνο κριτήριο που παραμένει είναι η πυκνότητα.

Κάποιες συσκευές αιώρησης, μπορούν να παγιδεύσουν μόνο πολύ μικρά σωματίδια με πυκνότητα έως 2,7 γραμμάρια ανά κυβικό εκατοστό όπως υγρά, για παράδειγμα το νερό, ή τα περισσότερα βιολογικά υλικά, που έχουν πυκνότητα 1 γραμμάριο ανά κυβικό εκατοστό.

Επιπλέον, προτιμώνται οι αριθμητικές μέθοδοι για τον υπολογισμό του ακουστικού πεδίου όταν η γεωμετρία του χώρου είναι περίπλοκη, όπως συμβαίνει με κοίλους σωλήνες διαφορετικών μεγεθών [65], αιωρούμενα σωματίδια με σύνθετο σχήμα [66] ή καμπύλους ανακλαστήρες[67]. Σε σύγκριση με τις αναλυτικές μεθόδους, οι αριθμητικές απαιτούν περισσότερο χρόνο εκτέλεσης και έχουν μικρότερη ακρίβεια, αλλά αποτελούν τη μόνη εφικτή επιλογή όταν η γεωμετρία του συστήματος είναι πολύπλοκη.

Σε υγρά μέσα, οι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν απλοί, καθώς αρκεί να εξεταστεί η πίεση και η ταχύτητα του ρευστού. Αντίθετα, στα στερεά απαιτείται πιο πολύπλοκη ανάλυση, που περιλαμβάνει και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του υλικού.

Τα τελευταία χρόνια, η ακουστική ανύψωση έχει εφαρμοστεί σε πολλές περιπτώσεις, αν και προς το παρόν περιορίζεται στην ακαδημαϊκή έρευνα.

3.3 Προβλήματα Σταθερότητας

Η σταθερότητα των αιωρούμενων αντικειμένων είναι ένα κοινό πρόβλημα στην ακουστική αιώρηση. Η ακριβής τοποθέτηση και ο έλεγχος των αντικειμένων που πρόκειται να αιωρηθούν αποτελούν ακόμα πρόκληση, καθώς απαιτεί εξαιρετικά ακριβείς ρυθμίσεις και συστήματα παρακολούθησης, διότι μικρές διακυμάνσεις στην ένταση ή τη συχνότητα των υπερηχητικών κυμάτων μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητες κινήσεις ή ακόμα και αποτυχία της αιώρησης.

Ένα από τα κύρια προβλήματα σταθερότητας σχετίζεται με τις αλληλεπιδράσεις των αντικειμένων με το ακουστικό πεδίο. Αν και η τεχνολογία βασίζεται στην εκπομπή υπερηχητικών κυμάτων για την ανύψωση των αντικειμένων, η ένταση και η κατεύθυνση των κυμάτων μπορούν να επηρεαστούν από τη γεωμετρία και το μέγεθος του αντικειμένου. Ειδικά όταν τα αντικείμενα είναι μεγαλύτερα ή πιο περίπλοκα, η σωστή κατανομή της ακουστικής ενέργειας απαιτεί ακριβείς ρυθμίσεις και συνεχείς προσαρμογές των εκπομπών για να διασφαλιστεί ότι το αντικείμενο παραμένει σταθερό στη θέση του [79].

Επιπλέον, οι εξωτερικοί παράγοντες, όπως οι μεταβολές του περιβάλλοντος, μπορεί να οδηγήσουν σε διαφοροποιήσεις στην απόδοση των συστημάτων. Για παράδειγμα, η παρουσία αέρα, ή άλλων υλικών στο περιβάλλον μπορεί να επηρεάσει την κατεύθυνση των υπερηχητικών κυμάτων, προκαλώντας αστάθεια στην αιώρηση. Οι αλλαγές στην υγρασία, στη θερμοκρασία και οι διακυμάνσεις του αέρα μπορεί να επηρεάσουν το ακουστικό πεδίο και να δημιουργήσουν αστάθεια στα αντικείμενα [80].

Η σταθερότητα είναι επίσης συνδεδεμένη με την επίδραση που έχει η τοποθέτηση των αντικειμένων στο πεδίο. Η ελαφριά μετακίνηση του αντικειμένου ή η αποτυχία ευθυγράμμισης των υπερηχητικών εκπομπών μπορεί να οδηγήσει σε μικρές διακυμάνσεις του αντικειμένου,

καθιστώντας τη διαδικασία αιώρησης λιγότερο αξιόπιστη. Για να διασφαλιστεί η σταθερότητα, απαιτούνται προηγμένα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου για να διατηρηθούν ιδανικές οι συνθήκες και τα αντικείμενα να διατηρούνται σταθερά κατά τη διάρκεια της αιώρησης.

Τέλος, η σταθερότητα των συστημάτων μπορεί να επηρεαστεί από την ευαισθησία της τεχνολογίας στις αλληλεπιδράσεις του ακουστικού πεδίου με τα υλικά των αντικειμένων. Ορισμένα υλικά μπορεί να απορροφούν ή να ανακλούν την ακουστική ενέργεια με διαφορετικούς τρόπους, επηρεάζοντας τη συνολική απόδοση του συστήματος. Επομένως, ο σχεδιασμός και η επιλογή υλικών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη διατήρηση της σταθερότητας στην ανύψωση [81].

Αυτές οι προκλήσεις για τη σταθερότητα υπογραμμίζουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών που να επιτρέπουν την καλύτερη ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιόπιστη και αποτελεσματική χρήση της ακουστικής αιώρησης σε ευρύτερες εφαρμογές.

Κεφάλαιο 4ο : Σύγχρονες Εξελίξεις και Έρευνα

4.1 Εισαγωγή

Η συνεχής πρόοδος στις τεχνολογίες και στην επιστημονική έρευνα οδηγεί σε νέες εξελίξεις στον τομέα του δυναμικού ελέγχου του ήχου και των εφαρμογών του. Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται οι τελευταίες εξελίξεις στη βασική έρευνα, οι οποίες συμβάλλουν στην κατανόηση και στις σύγχρονες θεωρητικές αρχές που σχετίζονται με την ηχητική τεχνολογία. Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη νέων θεωρητικών μοντέλων και αριθμητικών προσεγγίσεων για να εξηγήσουν τις δυνάμεις που ασκούνται στα σωματίδια και τις αλληλεπιδράσεις τους με τα υπερηχητικά πεδία. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι προηγμένες εφαρμογές αυτής της τεχνολογίας, που ανοίγουν τον δρόμο για τη διαμόρφωση νέων και βελτιωμένων λύσεων, όπως και οι καινοτομίες στη σχεδίαση συσκευών.

4.2 Τελευταίες Εξελίξεις στη Βασική Έρευνα

4.2.1 Εισαγωγή

Το μέλλον της ακουστικής αιώρησης φαίνεται εντυπωσιακό. Αν και η πρόοδος τα τελευταία χρόνια είναι αξιοσημείωτη, το μεγαλύτερο μέρος της αναμένεται στο μέλλον. Η ικανότητα χειρισμού πολλών αντικειμένων ταυτόχρονα χωρίς επαφή μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στις εφαρμογές της. Στο μέλλον, ενδέχεται να αντικατασταθούν ρομπότ από διατάξεις ηχείων που θα χειρίζονται αντικείμενα με τη χρήση της ακουστικής αιώρησης. Επιπλέον, η ακουστική αιώρηση θα μπορεί να συνδυαστεί με το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα, επιτρέποντας στους ανθρώπους να χειρίζονται αντικείμενα με τη σκέψη τους [3].

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην ακουστική αιώρηση είναι ενθαρρυντικές. Η περαιτέρω εξέλιξη των συσκευών αιώρησης θα επιτρέψει το χειρισμό αντικειμένων σε χιλιοστομετρικές κλίμακες χωρίς φυσική επαφή, όπου μελλοντικά θα είναι ικανή να ανταγωνίζεται τα ρομπότ [99].

4.2.2 Μη Γραμμικές Αλληλεπιδράσεις και Νέα Μαθηματικά Μοντέλα

Η πιο πρόσφατη έρευνα στον τομέα της ακουστικής αιώρησης επικεντρώνεται στη βελτίωση των θεωρητικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ακουστικών κυμάτων και των σωματιδίων. Οι υπερηχητικοί αιωρητές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ακουστική δύναμη που ασκείται στα σωματίδια από τα κύματα, όπου η κατανόηση αυτών των δυνάμεων αποτελεί το βασικό πυλώνα για τη βελτίωση της απόδοσης αυτών των συστημάτων. Οι προηγούμενες μελέτες είχαν περιοριστεί στην εκτίμηση των δυνάμεων με γραμμικούς υπολογισμούς, οι οποίοι δεν μπορούσαν να εξηγήσουν τα φαινόμενα που παρατηρούνταν με μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, ένα σημαντικό βήμα που έγινε, ήταν η ανάπτυξη νέων μαθηματικών μοντέλων, που περιλαμβάνουν μη γραμμικές εξισώσεις και παραμέτρους που σχετίζονται με τις γεωμετρικές ιδιότητες των σωματιδίων, όπως και τις μη

γραμμικές αλληλεπιδράσεις, κάτι που επιτρέπει την καλύτερη προσομοίωση της δυναμικής τους. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι κρίσιμες για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι διάφοροι παράγοντες, όπως η συχνότητα και η ένταση των υπερηχητικών κυμάτων, επηρεάζουν την κίνηση των σωματιδίων. Συγκεκριμένα, οι νέες έρευνες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη μοντέλων τα οποία είναι ικανά να αναλύσουν και να προσομοιώσουν τις κινήσεις σωματιδίων που έχουν μεγαλύτερο μέγεθος ή πιο σύνθετη μορφή. [10,84]

4.2.3 Εξέλιξη της Εξίσωσης Gor'kov

Η εξίσωση του Gor'kov (1962) αποτέλεσε το θεμέλιο της ανάλυσης των δυνάμεων ακουστικής ακτινοβολίας σε συστήματα ακουστικής αιώρησης. Ωστόσο, αυτή η εξίσωση παρουσίαζε περιορισμούς όταν εφαρμόζονταν σε σωματίδια μεγαλύτερου μεγέθους ή πιο περίπλοκης γεωμετρίας. Παρά την αρχική της επιτυχία, η εξίσωση δεν ήταν πλήρως ικανή να εξηγήσει την αλληλεπίδραση των σωματιδίων σε πιο σύνθετα περιβάλλοντα και με υψηλότερες εντάσεις και συχνότητες. Στις τελευταίες εξελίξεις, η εξίσωση του Gor'kov έχει εξελιχθεί ώστε να περιλαμβάνει νέες παραμέτρους που επηρεάζουν τη δυναμική των συστημάτων, επιτρέποντας την αιώρηση μεγαλύτερων και πυκνότερων αντικειμένων [98]. Αυτές οι τροποποιήσεις επιτρέπουν στους ερευνητές να εξετάσουν την επίδραση των παραμέτρων του υπερηχητικού πεδίου, όπως η συχνότητα, η φάση και η ένταση των κυμάτων, στη δυναμική των σωματιδίων, επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των σωματιδίων σε πιο σύνθετα συστήματα [99].

4.2.4 Η Σημασία των Αριθμητικών Μεθόδων και των Αισθητήρων

Η κατανόηση και αξιοποίηση της ακουστικής αιώρησης έχει γνωρίσει σημαντική πρόοδο χάρη στην ενσωμάτωση προηγμένων αριθμητικών μεθόδων. Συγκεκριμένα, οι τεχνικές όπως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) επιτρέπουν τη λεπτομερή ανάλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ ακουστικών κυμάτων και σωματιδίων μέσα σε τρισδιάστατα πεδία. Μέσω αυτών των τεχνικών, καθίσταται δυνατή η ρεαλιστική προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των σωματιδίων, γεγονός που ενισχύει την ακρίβεια των μοντέλων και των προβλέψεων. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για την εξέλιξη της τεχνολογίας, καθώς επιτρέπει τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων αιώρησης με υψηλότερη ακρίβεια και απόδοση. [100, 101]

Επιπλέον, εξίσου κρίσιμος είναι ο ρόλος των συστημάτων αισθητήρων, τα οποία επιτρέπουν την παρακολούθηση της θέσης και της κίνησης των σωματιδίων σε πραγματικό χρόνο. Οι υπερηχητικοί και οπτικοί αισθητήρες παρέχουν δεδομένα υψηλής ακρίβειας, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για τη συνεχή προσαρμογή των παραμέτρων του υπερηχητικού πεδίου. Με τον τρόπο αυτό, διασφαλίζεται η σταθερότητα της αιώρησης και αποτρέπονται φαινόμενα αστάθειας που προκαλούνται από εξωτερικές μεταβολές, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, ή αλληλεπιδράσεις. Η ενσωμάτωση των αισθητήρων στο σύστημα αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία προηγμένων εφαρμογών ακουστικής αιώρησης. [101]

4.2.5 Ανάπτυξη Προηγμένων Μεθόδων Ελέγχου και Παρακολούθησης

Στο πλαίσιο της σύγχρονης τεχνολογικής εξέλιξης, η αξιοποίηση της μηχανικής μάθησης προσφέρει περαιτέρω δυνατότητες, επιτρέποντας την αυτοματοποιημένη παρακολούθηση και προσαρμογή των υπερηχητικών πεδίων. Μέσω της εκμάθησης αλγορίθμων, το σύστημα μπορεί να ανταποκρίνεται δυναμικά σε μεταβολές, εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια και ευελιξία κατά τη διαδικασία αιώρησης. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να προσαρμόζουν σε πραγματικό χρόνο τις κρίσιμες παραμέτρους του συστήματος, όπως τη συχνότητα, τη φάση και την ένταση των υπερηχητικών κυμάτων. Οι εξελίξεις αυτές έχουν επεκτείνει τη χρήση της ακουστικής αιώρησης σε πιο σύνθετα και απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως η νανοτεχνολογία, η ιατρική διάγνωση και η φαρμακευτική παραγωγή, όπου απαιτείται χειρισμός ευαίσθητων ή πολλών σωματιδίων ταυτόχρονα. [99, 101, 102]

4.2.6 Επέκταση Εφαρμογών σε Πολυάριθμα και Βαριά Σωματίδια

Η πρόοδος στον τομέα της ακουστικής αιώρησης δεν περιορίστηκε μόνο στην αιώρηση μικρών σωματιδίων, αλλά επεκτάθηκε και στην αιώρηση πολλαπλών και βαρέων σωματιδίων ταυτόχρονα. Ενώ παλαιότερα οι περιορισμοί ισχύος των υπερηχητικών κυμάτων και η αλληλεπίδραση μεταξύ των αιωρούμενων σωμάτων καθιστούσαν δύσκολη τη σταθερή αιώρηση τέτοιων αντικειμένων, οι σύγχρονες εξελίξεις κατέστησαν δυνατή την υπέρβαση αυτών των τεχνικών εμποδίων. [6]

Ακόμη, η αύξηση της ισχύος των υπερηχητικών πομπών, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη πιο σύνθετων πεδίων αιώρησης και την προσεκτική διαχείριση των φαινομένων παρεμβολής, επέτρεψε τη σταθερή αιώρηση αντικειμένων με μεγαλύτερη πυκνότητα και μάζα. Παράλληλα, τεχνολογίες όπως η ακουστική πολλαπλών περιοχών (multi-trap acoustic levitation) επιτρέπουν την αιώρηση πολλαπλών σωματιδίων ταυτόχρονα, χωρίς ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. [51]

Τέλος, αυτή η τεχνολογική εξέλιξη προσφέρει νέες δυνατότητες για πρακτικές εφαρμογές, όπως στον ιατρικό τομέα, όπου η ακουστική αιώρηση αξιοποιείται πλέον για τον χειρισμό βιολογικών δειγμάτων, τη μεταφορά κυττάρων ή ακόμη και την εκτέλεση πολύπλοκων διαδικασιών χωρίς μηχανική επαφή, πράγμα που μειώνει τον κίνδυνο επιμόλυνσης [57]. Αντίστοιχα, στη βιομηχανική ρομποτική και στις εργαστηριακές εφαρμογές, η ακουστική αιώρηση χρησιμοποιείται για τη μεταφορά και κατεργασία υγρών ή στερεών υλικών υψηλής ακρίβειας, ενισχύοντας την αποδοτικότητα των διαδικασιών παραγωγής και τον ποιοτικό έλεγχο [51].

4.3 Προηγμένες Εφαρμογές

4.3.1 Χρήση στην Ενθυλάκωση Κύτταρων και Χορήγηση Φαρμάκων

Μία από τις πιο υποσχόμενες εφαρμογές της ακουστικής αιώρησης είναι η ενθυλάκωση μεμονωμένων κυττάρων, η οποία επιτρέπει την ακριβή τοποθέτηση κυττάρων ή άλλων βιολογικών παραμέτρων σε υγρά διαλύματα. Η ενθυλάκωση αυτή, σε συνδυασμό με υπερήχους,

έχει προοπτική για νέες θεραπείες και τεχνικές χορήγησης φαρμάκων. Μέσω αυτής της μεθόδου, επιτυγχάνεται η τοποθέτηση και ο έλεγχος μικρών δόσεων φαρμάκων ακριβώς εκεί όπου είναι απαραίτητο, με ελάχιστη παρενέργεια. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε θεραπείες που απαιτούν αυξημένο επίπεδο ακριβείας, όπως η χημειοθεραπεία ή η ανοσοθεραπεία. [68]

4.3.2 Εφαρμογές στη Βιοϊατρική και στη Φαρμακευτική Βιομηχανία

Η ικανότητα των ολογραφικών ακουστικών στοιχείων (Holographic Acoustic Elements) να χειρίζονται ευαίσθητα υλικά χωρίς φυσική επαφή έχει ανοίξει νέες προοπτικές στον τομέα της βιοϊατρικής και της φαρμακευτικής βιομηχανίας. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη μελέτη κυττάρων, την κατηγοριοποίηση των βιολογικών συστατικών και την ακριβή στόχευση φαρμάκων, ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη καινοτόμων θεραπειών. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν τη χρήση της ακουστικής αιώρησης για τη μεταφορά και τον χειρισμό βιολογικών υλικών χωρίς επαφή, κάτι που είναι κρίσιμο για τη μελέτη των κυττάρων και την ανάπτυξη νέων φαρμακευτικών θεραπειών [6, 47].

Τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η μείωση των βλαβερών επιπτώσεων από τις παραδοσιακές μεθόδους επεξεργασίας. Ειδικότερα, η δυνατότητα χειρισμού βιολογικών δειγμάτων χωρίς φυσική επαφή περιορίζει τις κινδύνους μόλυνσης ή άλλες αρνητικές συνέπειες. Στην ιατρική, η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ευαίσθητη διαχείριση κυττάρων, σωματιδίων ή άλλων βιολογικών ουσιών, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στις εργαστηριακές εφαρμογές [3].

Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία της ακουστικής αιώρησης έχει τη δυνατότητα να επαναστατήσει στις υπάρχουσες μεθόδους χειρουργικής και διαγνωστικής, καθώς επιτρέπει την ακριβή και μη επεμβατική μετακίνηση μικροαντικειμένων ή ιστών. Στην οφθαλμολογία, για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή τοποθέτηση βιοϊατρικών εμφυτευμάτων ή την αφαίρεση μικρών όγκων χωρίς την ανάγκη χειρουργικής τομής. Οι εφαρμογές αυτές ενισχύουν τη δυνατότητα για διαδικασίες με λιγότερο τραυματισμό για τον ασθενή και με ταχύτερη ανάρρωση [4].

Συνολικά, η τεχνολογία της ακουστικής αιώρησης συνιστά επαναστατική προσέγγιση στις βιοϊατρικές και βιολογικές επιστήμες, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως ακρίβεια, ελάχιστη παρεμβολή και αποφυγή κινδύνων μόλυνσης, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Αναμένεται να έχει αυξανόμενη σημασία για τις μελλοντικές έρευνες και εφαρμογές στον τομέα της βιολογίας και της ιατρικής [53, 62].

4.3.3 Εφαρμογές στη Νανοτεχνολογία και στην Επεξεργασία Υλικών

Η ακουστική αιώρηση, ελέγχει με ακρίβεια τα ακουστικά κύματα και προσφέρει τη δυνατότητα για την ακριβή τοποθέτηση και τον χειρισμό μικροσκοπικών αντικειμένων χωρίς φυσική επαφή. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε πεδία όπως η νανοτεχνολογία, όπου οι μικρές κλίμακες και οι ευαίσθητοι παράγοντες αλληλεπίδρασης καθιστούν δύσκολη την εφαρμογή παραδοσιακών μεθόδων χειρισμού. Μέσω της ακουστικής αιώρησης, οι ερευνητές έχουν τη

δυνατότητα να μεταφέρουν νανοσωματίδια ή να τα διατηρούν αιωρούμενα στο χώρο με ελεγχόμενη δυναμική, εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια και αποφεύγοντας τις δυσκολίες και τους κινδύνους από τη φυσική επαφή.

Επίσης, η ακουστική αιώρηση έχει σημαντικές εφαρμογές στην παραγωγή νανοϋλικών και στην κατασκευή μικρών εξαρτημάτων. Η δυνατότητα ακριβούς τοποθέτησης και μετακίνησης μικροσκοπικών εξαρτημάτων είναι χρήσιμη για την κατασκευή πολύ μικρών μηχανών και νανορομποτικών συσκευών, οι οποίες απαιτούν υψηλή ακρίβεια και ευαισθησία στη διαχείριση τους. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τον έλεγχο σε επίπεδο νανοκλίμακας, καθιστώντας την ιδανική για την ανάπτυξη τεχνολογιών με εξαιρετικά μικρές διαστάσεις.[2]

Επιπλέον, η δυνατότητα επεξεργασίας υλικών μέσω αέρα, χωρίς φυσική επαφή, είναι χρήσιμη σε βιομηχανικούς τομείς, όπως η ηλεκτρονική βιομηχανία, όπου η ακριβής τοποθέτηση και η ευαισθησία στις παραμέτρους των υλικών είναι κρίσιμες. Ειδικότερα, η ακουστική αιώρηση μπορεί να εφαρμοστεί στην κατασκευή και συναρμολόγηση μικροσκοπικών ή ευαίσθητων εξαρτημάτων, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στην παραγωγή εργαλείων με υψηλή ακρίβεια και ελαχιστοποίηση των κινδύνων. Όπως αναφέρεται σε ανασκοπήσεις, η δυνατότητα μεταφοράς αυτών των αντικειμένων χωρίς φυσική επαφή επιτρέπει την παρατήρηση και την πειραματική έρευνα σε μικροκλίμακες, που θα ήταν αδύνατες ή πολύ πιο δύσκολες με τις παραδοσιακές μεθόδους χειρισμού. Αυτό είναι ιδιαιτέρως χρήσιμο για τη μελέτη μικροσωματιδίων, νανοσωματιδίων, κυττάρων και άλλων μικροσκοπικών οντοτήτων, χωρίς να προκαλούνται επιδράσεις ή αλλοιώσεις στα πειραματικά αποτελέσματα λόγω φυσικής αλληλεπίδρασης. [3, 4, 6, 61]

4.3.4 Εφαρμογές στην Κατασκευή και την Παραγωγή Μηχανημάτων

Μια ακόμη εφαρμογή είναι η κατασκευή μηχανημάτων που μπορεί να έχει τεράστιες επιπτώσεις σε βιομηχανικούς τομείς που απαιτούν εξαιρετική ακρίβεια και ευαισθησία. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή τοποθέτηση μικροσκοπικών εξαρτημάτων, την κατασκευή συστημάτων υψηλής ακρίβειας, και την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων κατασκευής σε πολύπλοκες διαδικασίες παραγωγής. Τα πλεονεκτήματα της ακουστικής αιώρησης στην παραγωγή μηχανημάτων περιλαμβάνουν την αύξηση της απόδοσης και την μείωση του κόστους παραγωγής μέσω της εξάλειψης της ανάγκης για φυσική επαφή, η οποία μπορεί να προκαλέσει ζημιές στα υλικά ή στα εξαρτήματα.[3]

4.3.5 Εφαρμογές στη Ρομποτική

Η ενσωμάτωση των ακουστικών αιωρητών σε διαδικασίες χημικής και βιολογικής παραγωγής, όπως και σε φυσικά συστήματα συναρμολόγησης, αναδεικνύεται ως μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογική προοπτική. Εκεί, οι αιωρητές μπορούν να λειτουργούν όπως μια γραμμή παραγωγής, εκτελώντας συλλογικά μια εργασία, όπως είναι η ευαίσθητη συναρμολόγηση ηλεκτρονικών ειδών ή η κατασκευή μιας νέας γενιάς φαρμακευτικών προϊόντων. Καθώς οι ακουστικοί αιωρητές μπορούν να τοποθετούν, να μετακινούν, να περιστρέφουν και να παραμορφώνουν σταγόνες υγρού με ελεγχόμενο τρόπο, πληρούν τον ορισμό του "ρομπότ", αποτελούν δηλαδή ένα ακουστικό ρομπότ. Σε αντίθεση με τα φυσικά ρομπότ, το ακουστικό ρομπότ δεν έχει κινούμενα μέρη, λειτουργεί χωρίς επαφή και μπορεί να διαχειριστεί εξίσου καλά υγρά και στερεά. Από αυτή

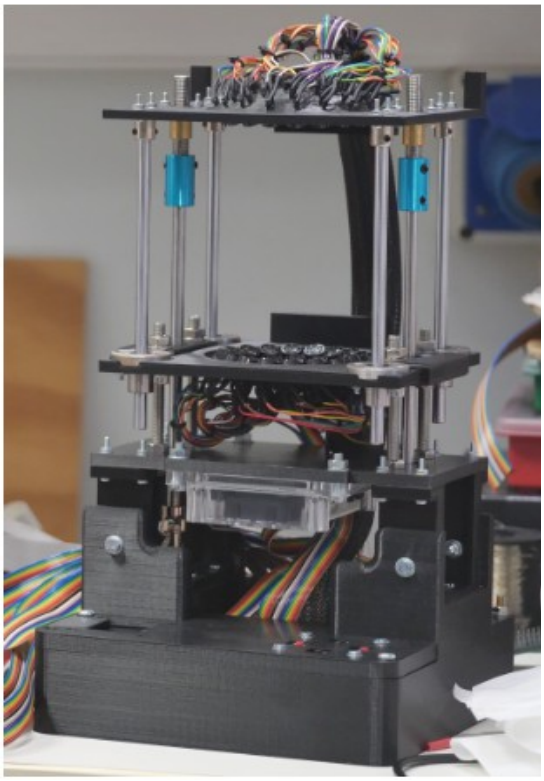
την οπτική, όσο μεγαλύτερη είναι η λειτουργικότητα του ακουστικού ρομπότ, τόσο πιο ευέλικτο είναι και τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των εφαρμογών του [12].

4.4 Καινοτομίες στη Σχεδίαση Συσκευών

4.4.1 Holographic Acoustic Levitation

Η σύγχρονη εξέλιξη των συσκευών ακουστικής αιώρησης αντικειμένων βασίζεται σε μία σειρά καινοτομιών που ενσωματώνουν προηγμένες τεχνικές και νέες προσεγγίσεις για την αύξηση της ακρίβειας και των εφαρμογών τους. Μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες είναι η Ολογραφική Ακουστική Αιώρηση (Holographic Acoustic Levitation), η οποία επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων και ακριβών ακουστικών πεδίων, προσφέροντας τη δυνατότητα χειρισμού πολλαπλών αντικειμένων ταυτόχρονα σε τρεις διαστάσεις. Χρησιμοποιώντας τεχνικές ολογραφίας, τα συστήματα μπορούν να ελέγχουν την κίνηση και τη θέση των αντικειμένων με εξαιρετική ακρίβεια, γεγονός που διευκολύνει την εφαρμογή τους σε τομείς όπως η νανοτεχνολογία, η βιοϊατρική και η επιστημονική έρευνα. Επιπλέον, η χρήση υπερηχητικών κυμάτων σε υψηλές συχνότητες αποτελεί μια άλλη σημαντική καινοτομία, επιτρέποντας την ακουστική αιώρηση μικροσκοπικών αντικειμένων με μεγάλη ακρίβεια. Αυτές οι τεχνολογίες ενισχύουν την απόδοση των συσκευών και διευρύνουν τις εφαρμογές τους, ιδίως στη βιοϊατρική, όπου απαιτείται χειρισμός μικρών και ευαίσθητων αντικειμένων, όπως τα κύτταρα και τα νανοσωματίδια. Εντυπωσιακή είναι επίσης η ανάπτυξη ευέλικτων και φορητών συσκευών, που χάρη στην πρόοδο των υλικών και της μικροτεχνολογίας καθίστανται πιο πρακτικές και εύχρηστες, χωρίς να χάνεται η αποτελεσματικότητα του χειρισμού. Η ενσωμάτωση της ακουστικής αιώρησης με άλλες τεχνολογίες, όπως η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση, επιτρέπει τη δημιουργία πιο δυναμικών και αυτορυθμιζόμενων συστημάτων, τα οποία προσαρμόζονται στις αλλαγές του περιβάλλοντος και στις ανάγκες των χρηστών, βελτιώνοντας περαιτέρω την ακρίβεια και την αποδοτικότητα του χειρισμού των αντικειμένων. [6]

4.4.2 MultiLev



Εικόνα 4.1 : Ακουστικός Ανυψωτής MultiLev

Το MultiLev είναι ένα πολύ πρόσφατο και προηγμένο σύστημα ακουστικής αιώρησης που αναπτύχθηκε από ερευνητές του Πανεπιστημίου του Μπρίστολ το 2024. Αποτελείται από εννέα διασυνδεδεμένους μικροελεγκτές Pi Pico και προσαρμοσμένους οδηγούς MOSFET, επιτρέποντας την τροποποίηση των φάσεων των υπερηχητικών κυμάτων από μεμονωμένους μετατροπείς. Αυτό δημιουργεί ελεγχόμενους κόμβους όπου δείγματα μπορούν να αιωρούνται, να μετακινούνται και ακόμη και να συγχωνεύονται στον αέρα χωρίς επαφή. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να επιδεικνύει τις μοναδικές λειτουργικές δυνατότητες της ακουστικής αιώρησης για ανάμιξη και ανάλυση αντιδραστηρίων χωρίς επαφή. [103]

4.4.3 LeviCursor



Εικόνα 4.2 : Ακουστικός Ανυψωτής LeviCursor

Το σύστημα LeviCursor συνδυάζει την τεχνολογία της ακουστικής αιώρησης και του

προσαρμοστικού ελέγχου για την ακριβή χειραγώγηση αιωρούμενων αντικειμένων σε έξι βαθμούς ελευθερίας (6-DOF), χωρίς φυσική επαφή. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στον χρήστη να καθοδηγεί και να τοποθετεί αντικείμενα με μεγάλη ακρίβεια, χρησιμοποιώντας μια διεπαφή ελέγχου. Η καινοτομία έγκειται στη χρήση προσαρμοστικών αλγορίθμων ελέγχου, που επιτρέπουν την άμεση προσαρμογή του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με τη θέση και την κίνηση των αντικειμένων. Αυτοί οι αλγόριθμοι επεξεργάζονται τις πληροφορίες από τους αισθητήρες και προσαρμόζουν τις παραμέτρους του ακουστικού πεδίου, όπως η συχνότητα και η φάση, για να επιτευχθεί η σταθερότητα και η ακρίβεια στην ανύψωση και την κίνηση των αντικειμένων.

Η εφαρμογή του LeviCursor συνδυάζει την επεξεργασία σήματος για την ανίχνευση και την παρακολούθηση των αντικειμένων με τη χρήση ψηφιακών συστημάτων που επιτρέπουν την αυτόματη ρύθμιση των παραμέτρων του ακουστικού πεδίου ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτή η διαδικασία, επιτρέπει τη δημιουργία δυναμικών και ακριβών κινήσεων σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως στη ρομποτική και τις βιοϊατρικές εφαρμογές, όπου απαιτείται ακριβής και χωρίς επαφή χειρισμός. Το σύστημα αυτό αξιοποιεί μια επαναστατική προσέγγιση, διευρύνοντας τις δυνατότητες των τεχνολογιών χειρισμού και αιώρησης αντικειμένων σε περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις.

Εν κατακλείδι, ο LeviCursor επιτρέπει την ακριβή παρακολούθηση των αιωρούμενων αντικειμένων με την ενσωμάτωση αλγορίθμων που διασφαλίζουν τη σταθερότητα ακόμα και σε εξωτερικές παρεμβάσεις ή θορύβους του περιβάλλοντος. Ταυτόχρονα, η τεχνολογία της ακουστικής αιώρησης με ελεγχόμενα ακουστικά πεδία προσφέρει μια διαδραστική διεπαφή χρήστη, η οποία επιτρέπει τη χειραγώγηση των αντικειμένων με ευχέρεια, χωρίς να απαιτείται φυσική επαφή με το υπόστρωμα. [104]

4.4.4 SoundBender



Εικόνα 4.3: Το SoundBender εφαρμόζεται σε τρεις τύπους διαδραστικών λειτουργιών. (a) Απτική ανάδραση πίσω από ένα εμπόδιο, (b) Αιώρηση γύρω από το εμπόδιο, (c) Χειρισμός μη στερεών αντικειμένων, αλλάζοντας τη γωνία της φωτιάς. [97]

Μια από τις πιο εντυπωσιακές καινοτομίες στην ακουστική αιώρηση είναι το SoundBender, το οποίο παρουσιάστηκε το 2018 από τους Adili, Martinez Plasencia, Πολυχρονόπουλος, Memoli, Tokuda και Subramanian. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η πραγματοποίηση της ακουστικής αιώρησης έχει πολλούς περιορισμούς που χρειάζονται να αντιμετωπιστούν. Το SoundBender είναι ένα υβριδικό σύστημα που συνδυάζει μεταϋλικά και συστοιχίες φασικών μετατροπέων (Phased Array Transducers - PATs) για να ξεπεράσει αυτούς τους περιορισμούς που σχετίζονται με το μέγεθος των μετατροπέων και την παρουσία εμποδίων. Συγκεκριμένα, επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων ηχητικών πεδίων που μπορούν να παρακάμπτουν εμπόδια,

επιτρέποντας την αιώρηση και την απτική ανάδραση σε περιοχές που προηγουμένως ήταν απρόσιτες. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ηχητικών δεσμών που καμπυλώνονται μόνες τους, οι οποίοι μπορούν να κατευθυνθούν γύρω από αντικείμενα, προσφέροντας νέες δυνατότητες στην αλληλεπίδραση ανθρώπου-υπολογιστή (HCI) και επεκτείνοντας τα όρια της ακουστικής αιώρησης πέρα από τα φυσικά εμπόδια.[97]

Κεφάλαιο 5ο : Συμπεράσματα

5.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στη συνολική αποτίμηση των μέχρι σήμερα εξελίξεων, στις προτάσεις για μελλοντική έρευνα, όπως και στη διατύπωση των τελικών συμπερασμάτων που προκύπτουν από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Καθώς οι έρευνες για την ακουστική αιώρηση εξελίσσονται, ενδέχεται να οδηγήσουν σε επαναστατικές εφαρμογές σε τομείς όπως οι προσομοιώσεις μικροβαρύτητας, η προηγμένη παραγωγή και η βιοϊατρική έρευνα. Παρά τις προκλήσεις που παραμένουν στην κλίμακα της τεχνολογίας και τη βελτίωση της ευχρηστίας της, η ακουστική αιώρηση αντιπροσωπεύει ένα καινοτόμο εργαλείο που θα μπορούσε να έχει σημαντική επίδραση σε διάφορες επιστημονικές και βιομηχανικές διαδικασίες στο μέλλον [98].

5.2 Αποτίμηση της Τρέχουσας Κατάστασης

Η σημερινή κατάσταση αυτής της τεχνολογίας χαρακτηρίζεται από ένα εντυπωσιακό συνδυασμό θεωρίας και πειραματικής προόδου. Παρόλο που η βασική αρχή του φαινομένου είναι γνωστή εδώ και δεκαετίες, δηλαδή η χρήση ηχητικών κυμάτων για τη δημιουργία περιοχών πίεσης που μπορούν να εξουδετερώσουν τη βαρύτητα, η τεχνολογία έχει φτάσει τα τελευταία χρόνια σε ένα επίπεδο που επιτρέπει πρακτικές εφαρμογές στη διαχείριση υλικών σε μικροκλίμακα και στον έλεγχο πολλαπλών αντικειμένων που βρίσκονται στον αέρα ταυτόχρονα. Πέρα από τα εργαστηριακά πειράματα, η ακουστική αιώρηση αρχίζει να ενσωματώνεται σε τομείς όπως είναι η φαρμακευτική, η βιολογία, η βιοτεχνολογία και η ρομποτική. Για παράδειγμα, η ικανότητα επεξεργασίας μικρών ποσοτήτων υγρών χωρίς επαφή επιτρέπει την αποφυγή μολύνσεων ή απωλειών σε υλικά, καθιστώντας την τεχνολογία χρήσιμη για αναλύσεις υψηλής ακρίβειας ή για επεξεργασία ευαίσθητων βιολογικών δειγμάτων. [57]

Παραμένουν ωστόσο αρκετές τεχνικές προκλήσεις. Η σταθερότητα της αιώρησης εξαρτάται απόλυτα από το συντονισμό των ηχητικών κυμάτων και από την ακρίβεια της διάταξης. Επίσης, η απόδοση μειώνεται αισθητά όταν τα αντικείμενα είναι μεγαλύτερου μεγέθους ή παρουσιάζουν πολύπλοκη γεωμετρία. Επιπλέον, η ενεργειακή απόδοση των συστημάτων αυτών εξακολουθεί να είναι χαμηλή, γεγονός που περιορίζει τη χρήση τους σε βιομηχανικές κλίμακες.

Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί πολλαπλές εφαρμογές στην ακουστική αιώρηση, οι οποίες προς το παρόν περιορίζονται στην ακαδημαϊκή έρευνα, που εξετάζουν εφαρμογές όπως είναι ο χειρισμός και η ανάμειξη δειγμάτων ζωντανών κυττάρων και DNA, και η αιώρηση πρωτεϊνικών κρυστάλλων προκειμένου να αναλυθούν μέσω ακτινών Χ. Ακόμη, έχει χρησιμοποιηθεί για τον χειρισμό ηλεκτρονικών εξαρτημάτων χωρίς επαφή μέσω της ανεστραμμένης ακουστικής αιώρησης εγγύς πεδίου. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχει ακόμη βιομηχανική εφαρμογή με μαζική παραγωγή που να βασίζεται στην ακουστική αιώρηση. Αναμένεται ότι η ακουστική αιώρηση θα αποτελέσει τη βάση για τεχνολογίες χωρίς επαφή για την επεξεργασία υγρών, επιτρέποντας την ανάμειξη και τον διαχωρισμό σταγονιδίων. Ενώ η ανάμειξη έχει επιτευχθεί, ο διαχωρισμός υγρών και κοκκωδών μέσων παραμένει πρόκληση. Τα συστήματα ακουστικής αιώρησης στον αέρα είναι πλέον ευρέως διαθέσιμα, αλλά τα συστήματα που λειτουργούν με νερό δεν είναι ακόμα τόσο διαδεδομένα. Επιπλέον, υπάρχουν εφαρμογές

που περιλαμβάνουν την παραγωγή φαρμάκων με αυξημένη διαλυτότητα και την τοποθέτηση εύθραυστων εξαρτημάτων χωρίς επαφή. Επίσης, η χρήση αιωρούμενων σωματιδίων για απεικόνιση και η δυνατότητα παγίδευσης σε μη ομοιογενή μέσα αποτελούν ένα από τα ερευνητικά πεδία [99].

Άρα, η τρέχουσα κατάσταση βρίσκεται σε μια περίοδο που η επιστημονική έρευνα είναι έντονη, με πολλά σημάδια προόδου όμως και σημαντικά εμπόδια που περιορίζουν την πλήρη αξιοποίησή της. Οι ερευνητές έχουν εστιάσει προς την επίλυση των περιορισμών αυτών και στη μετατροπή της ακουστικής αιώρησης από ένα εργαλείο που απευθύνεται μόνο σε εργαστήρια σε μια τεχνολογική λύση με ευρεία εφαρμογή.

5.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας της ακουστικής αιώρησης δημιουργεί ευκαιρίες για νέες ερευνητικές κατευθύνσεις, που μπορούν να εμβαθύνουν τόσο στη θεωρητική κατανόηση του φαινομένου όσο και στη βελτίωση των πρακτικών του εφαρμογών. Ένας βασικός τομέας για μελλοντική έρευνα είναι η βελτιστοποίηση της σταθερότητας των αιωρούμενων αντικειμένων, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα με παρεμβολές ή μεταβαλλόμενες συνθήκες. Η ενσωμάτωση πιο ευφυών και αυτόνομων συστημάτων ελέγχου, βασισμένων στην τεχνητή νοημοσύνη και στην μηχανική μάθηση, για την αυτόματη ρύθμιση των παραμέτρων, θα μπορούσε να προσφέρει νέες λύσεις στον τομέα αυτό.

Ένα άλλο ζήτημα που απασχολεί τους ερευνητές είναι η ενεργειακή απόδοση των ακουστικών διατάξεων. Η έρευνα μπορεί να στραφεί προς σχεδιασμούς που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας ή αξιοποιούν ηχητικά κύματα με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, είτε μέσω νέων υλικών για τους πομπούς, είτε μέσω καλύτερης διαμόρφωσης των πεδίων. Παράλληλα, η διεύρυνση του μεγέθους και της μάζας των αντικειμένων που μπορούν να αιωρηθούν με ακρίβεια, παραμένει μια από τις πιο σύνθετες προκλήσεις. Η χρήση πιο ισχυρών ή εστιασμένων ηχητικών διατάξεων, καθώς και ο συνδυασμός της ακουστικής αιώρησης με άλλες τεχνολογίες, όπως η μαγνητική αιώρηση, μπορεί να διευρύνει σημαντικά τις εφαρμογές της.

Ακόμη, η ενοποίηση της ακουστικής αιώρησης με άλλες τεχνολογίες, όπως αυτή της οπτικής παγίδευσης (optical trapping), της μαγνητικής αιώρησης ή της μικρορευστομηχανικής (microfluidics), προσφέρει μια προσέγγιση που μπορεί να φέρει νέα υβριδικά συστήματα με αυξημένη λειτουργικότητα ιδιαίτερα σε βιοϊατρικές εφαρμογές, όπου μπορεί να ανοίξει το δρόμο για την ανάπτυξη μη επεμβατικών συστημάτων για τη διαχείριση κυττάρων, ιστών ή ακόμα και νανοσωματιδίων [105].

Τέλος, σημαντική θα μπορούσε να είναι και η εστίαση σε κοινωνικά και ηθικά ζητήματα. Καθώς η ακουστική αιώρηση αποκτά με τον καιρό όλο και μεγαλύτερη πρακτική εφαρμογή, θα είναι αναγκαίο να εξεταστούν οι επιπτώσεις της σε θέματα όπως η ασφάλεια, η ιδιωτικότητα, αλλά και η αποδοχή από το ευρύ κοινό. Η τεχνολογία, όσο προηγμένη κι αν είναι, πρέπει να παραμένει προσβάσιμη, διαφανής και κοινωνικά υπεύθυνη.

Συνολικά, οι παραπάνω προτάσεις ενισχύουν την ανάγκη για μια προσέγγιση στη μελλοντική έρευνα από πολλές πλευρές, που δεν θα περιορίζεται μόνο στη βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών, αλλά θα αγκαλιάζει και το ευρύτερο επιστημονικό και κοινωνικό πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η ακουστική αιώρηση.

5.4 Συμπεράσματα

Η μελέτη της ακουστικής αιώρησης, από τις πρώτες της θεωρητικές ρίζες έως τις σημερινές προηγμένες εφαρμογές, αποδεικνύει πως ένα φαινομενικά αφηρημένο φυσικό φαινόμενο μπορεί να εξελιχθεί σε ένα τεχνολογικό εργαλείο υψηλής ακρίβειας και χρηστικότητας. Η παρούσα εργασία ανέδειξε τον ιστορικό και επιστημονικό πλούτο που περιβάλλει το πεδίο της ακουστικής ανύψωσης, προσφέροντας μια αναδρομή από τις πρώτες πειραματικές εφαρμογές του 20ού αιώνα έως τις καινοτομίες του 21ου αιώνα, που περιλαμβάνουν έξυπνα συστήματα ελέγχου, πολυδιάστατα πεδία και διεπιστημονικές εφαρμογές.

Η ανάλυση έδειξε ότι η ακουστική αιώρηση βρίσκεται σε ένα κρίσιμο σημείο μετάβασης, από το στάδιο της αμιγώς επιστημονικής μελέτης προς την πρακτική εφαρμογή σε βιοϊατρική τεχνολογία, και βιομηχανική παραγωγή. Παράλληλα, έγιναν εμφανείς οι τεχνικές δυσκολίες που ακόμα την περιορίζουν, όπως η σταθερότητα των αιωρούμενων σωμάτων, και η πολυπλοκότητα στη διαχείριση πολλαπλών αντικειμένων. Οι περιορισμοί αυτοί, όμως, δεν αποτελούν αδιέξοδο, αντιθέτως, λειτουργούν ως κίνητρο για περαιτέρω έρευνα.

Επιπλέον, αναδείχθηκαν οι δυνατότητες της ακουστικής αιώρησης σε συνεργασία με άλλες πρωτοποριακές τεχνολογίες, όπως η μικρορευστομηχανική, η ρομποτική και η νανοτεχνολογία. Ο συνδυασμός αυτός δείχνει τον δρόμο που μπορεί να ακολουθήσει η έρευνα στο μέλλον, φέρνοντας σαν αποτέλεσμα όχι μόνο την βελτίωση της αποδοτικότητας των ίδιων των ακουστικών συστημάτων, αλλά και της ένταξής τους σε σύνθετες, πολυλειτουργικές εφαρμογές.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η μελέτη της ακουστικής αιώρησης δεν περιορίζεται πλέον μόνο στο πεδίο της φυσικής, αλλά επεκτείνεται σε ένα ευρύ πλαίσιο γνώσης και εφαρμογής. Η διατήρηση του επιστημονικού διαλόγου γύρω από τις ηθικές, κοινωνικές και τεχνολογικές διαστάσεις της, αποτελεί προϋπόθεση για τη βιώσιμη ενσωμάτωσή της σε μελλοντικά συστήματα. Με βάση τα παραπάνω, η ακουστική αιώρηση αναδεικνύεται όχι μόνο ως ένα επιστημονικό επίτευγμα, αλλά και ως υπόσχεση για ένα μέλλον όπου ο έλεγχος της ύλης χωρίς επαφή θα είναι ουσιαστικό εργαλείο προόδου και καινοτομίας.

Βιβλιογραφία

1. Wu, J. (1991). Acoustical tweezers. *The Journal of the Acoustical Society of America, 89*(5), 2140-2143.
2. Foresti, D., Nabavi, M., Klingauf, M., Ferrari, A., & Poulikakos, D. (2013). Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 110*(31), 12549-12554.
3. Andrade, M. A. B., Pérez, N., & Adamowski, J. C. (2018). Review of Progress in Acoustic Levitation. *Brazilian Journal of Physics*, 48, 190–201.
4. Andrade, M. A. B., Okina, F. T. A., & Bernassau, A. L. (2018). Acoustic levitation: a review. *Physics Reports, 778*, 1-35.
5. W. Xie, C. Cao, Y. Lü, Z. Hong, B. Wei, Acoustic method for levitation of small living animals. Appl. Phys. Lett. 89, 214102 (2006).
6. Marzo, A., Seah, S. A., Drinkwater, B. W., Sahoo, D. R., Long, B., & Subramanian, S. (2015). Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature Communications*, 6, 8661.
7. Brzostowicz, N. (2019). *Acoustic Levitation* (Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid).animals. *Applied Physics Letters, 89*(21), 214102.
8. Rossing, T. D., & Fletcher, N. H. (2004). *Principles of Vibration and Sound*. Springer.
9. Upadhyay, M. (2018). *Ultrasonic Acoustic Levitation*.
10. L.P. Gorkov, Forces acting on a small particle in an acoustic field within an ideal fluid. Dokl. Akad. Nauk SSSR 140(1), 88 (1961).
11. E.H. Brandt, Acoustic physics: Suspended by sound. Nature 413(6855), 474–475 (2001).
12. Zang, Duyang, editor. *Acoustic Levitation: From Physics to Applications*. Springer, 2023.
13. Melde, K., Mark, A.G., Qiu, T., & Fischer, P. (2016). Holograms for acoustics. Nature, 537, 518-522.
14. Barmatz, M., Collas, P. (1985). "Acoustic Radiation Pressure and Levitation". *Journal of the Acoustical Society of America*.
15. A. Kundt, Annu. Phys. 84, 497 (1886).
16. Bücks, H., & Müller, A. (1933). "Ultrasonic Levitation Experiments".
17. K. Bücks, H. Müller, Über einige Beobachtungen an schwingenden Piezoquarzen und ihrem Schallfeld. Zeitschrift für Physik 84, 75–86 (1933).
18. King, L.V., “On the Acoustic Radiation pressure on Spheres,” Proc. R. Soc., London, Series A, 1934, 212-240.
19. Hasegawa, T. and Yoshioka, K., “Acoustic-Radiation Force on a Solid Elastic Sphere,” Acoustical Society of America, 46, 1969, 1139-1143.
20. Westervelt, P. J., “The Mean Pressure and Velocity in a Plane Acoustic Wave in a Gas,” Acoustical Society of America, 22, 1950, 319-327.
21. Westervelt, P. J., “The Theory of Steady Forces Caused by Sound Waves,” Acoustical Society

of America, 23, 1951, 312-315.

22. Embleton, T. F. W., “Mean Force on a Sphere in a S pherical Sound Field. I. (Theoretical),” Acoustical Society of America, 26, 1954, 40-48.

23. Westervelt, P. J., “Acoustic Radiation Pressure,” Acoustical Society of America, 29, 1957, 26-29.

24. Gorokhov, L. P., “On the Forces Acting on a Small Particle in an Acoustical Field in an Ideal Fluid,” Soviet Physics Doklady, 6, 1962, 773-781.

25. T. Wang, E. Trinh, W. Rhim, D. Kerrisk, M. Barmatz, D. Elleman, Acta Astronaut. 11, 233 (1984).

26. T. Wang, BAcoustic levitation and manipulation for space applications,^ in IEEE Ultrason. Symp. (1979), pp. 471–475.

27. M. B. Barmatz, U.S. Patent 4,393,706 (1983).

28. E. Lierke, R. Grossbach, K. Flögel, P. Clancy, BAcoustic positioning for space processing of materials science samples in mirror furnaces,^ in IEEE Ultrason. Symp. (1983), pp. 1129–1139.

29. E.G. Lierke, Acustica 82, 220 (1996).

30. E.G. Lierke, Acta Acust. United with Acust. 88, 206 (2002).

31. E.G. Lierke, L. Holitzner, Acta Acust. United with Acust. 99, 302 (2013).

32. J. Leiterer, F. Delißen, F. Emmerling, A.F. Thünemann, U. Panne, Anal. Bioanal. Chem. 391, 1221 (2008).

33. J. Schenk, L. Tröbs, F. Emmerling, J. Kneipp, U. Panne, M. Albrecht, Anal. Methods 4, 1252 (2012).

34. Wang, T. G. and Saffren, M. M., “Acoustic Chamber for Weightless Positioning,” AIAA, 155, 1974, 213-221.

35. R.R. Whymark, Acoustic field positioning for containerless processing. Ultrasonics 13, 251–261 (1975).

36. Lierke, L. G., Grossbach, R. and Clancy, P., “Acoustic Positioning for Space Processing of Materials Science Samples in Mirror Furnaces,” Proceedings of IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, 1983, 1129-1139.

37. Trinh, E. H., “Compact acoustic Levitation Device for Studies in Fluid Dynamics and Material Science in the Laboratory and Microgravity,” Review of Scientific Instruments, 56, 1985, 2059-2065.

38. T.G. Wang, A.V. Anilkumar, C.P. Lee, K.C. Lin, J. Fluid Mech. 276, 389 (1994).

39. T.G. Wang, A.V. Anilkumar, C.P. Lee, J. Fluid Mech. 308, 1 (1996).

40. T.G. Wang, E.H. Trinh, A.P. Croonquist, D.D. Elleman, Phys. Rev. Lett. 56, 452 (1986).

41. Barmatz, M. and Collas, P., “Acoustic Radiation Potential on a Sphere in Plane, Cylindrical, and Spherical Standing Wave Fields,” Acoustical Society of America, 77, 1985, 928-945.

42. Otsuka, T., Higuchi, K. and Seya, K., “Ultrasonic levitation by stepped circular vibrating plate. In the 10th Symposium on Ultrasonic Electronics,” 170, 1989, Japanese Journal of Applied

Physics / Supplement: 29-1.

43. Lierke, E. G., “Acoustic Levitation - A Comprehensive Survey of Principles and Applications,” Acta Acustica united with Acustica, 82, 1996, 220-237.

44. Xie, W. J. and Wei, B., “Parametric Study of Single-Axis Acoustic Levitation,” Applied Physics Letters, 79, 2001, 881-883.

45. Xie, W. J., Cao, C. D., Lu, Y. J., Hong, Z. Y. and Wei, B., “Acoustic Method for Levitation of Small Living Animals,” Applied Physics Letters, 89, 2006, 214102

46. Xie, W. J. and Wei, B., “Dynamics of Acoustically Levitated Disk Samples,” Physical Review, 70, 2004, 046611.

47. Marzo, A., Barnes, A., & Drinkwater, B. W. (2017). TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator. *Review of Scientific Instruments, 88*(8), 085105

48. Stolarski, T. A. (2014). Acoustic levitation—a novel alternative to traditional lubrication of contacting surfaces. Tribology Online, 9(4), 164–174.

49. Marzo, A., Seah, S. A., Drinkwater, B. W., Sahoo, D. R., Long, B., & Subramanian, S. (2015). Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature Communications, 6*, Article 8661.

51. Marzo, A., Drinkwater, B. W. (2019). Holographic acoustic tweezers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 116*(1), 84–89.

52. Ezcurdia, I. F., Morales González, R., Andrade, M. A., & Marzo, A. (2022). *LeviPrint: Contactless fabrication using full acoustic trapping of elongated parts*. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*.

53. Santesson, S., & Nilsson, S. (2004). Airborne chemistry: Acoustic levitation in chemical analysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378(7), 1704–1709.

54. Schweiger, G., & Leipertz, A. (1988). Chemical analysis of acoustically levitated drops by Raman spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 42(2), 276–281.

55. Radel, S., & Baer, S. (2019). Acoustic Levitation. *31st European Union Contest for Young Scientists*.

56. Santesson, S., Johansson, P., & Nilsson, S. (2007). Airborne chemistry: Real-time monitoring of solid-state phase transformations in acoustically levitated particles using near-infrared and Raman spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 79(6), 2332–2337.

57. Foresti, D., Nabavi, M., Klingauf, M., Ferrari, A., & Poulikakos, D. (2013). Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(31), 12549–12554.

58. Beauchamp, J. (2019). Performing Chemistry in Floating Droplets. Caltech.

59. Watanabe, A., Hasegawa, K., & Abe, Y. (2018). Contactless Fluid Manipulation in Air: Droplet Coalescence and Active Mixing by Acoustic Levitation. *Scientific Reports*, 8, 10221.

60. Hasegawa, K., & Abe, Y. (2016). Microlayered flow structure around an acoustically levitated droplet under a phase-change process. *npj Microgravity*, 2, 16007.

61. Marzo, A., Barnes, A., & Drinkwater, B. W. (2017). Acoustic Manipulation of Particles and Drops. *Journal of the Acoustical Society of America*, 142(4), 2487.

62. Mulvana, H., Cochran, S., & Hill, M. (2021). Ultrasound assisted particle and cell manipulation on-chip. *Lab on a Chip*, 21(4), 560-568.

63. MIT News. (2023, August 24). Laser-based system achieves noncontact medical ultrasound imaging. *MIT News*.

64. Naseer, S. M., Manbachi, A., Samandari, M., Walch, P., Gao, Y., Zhang, Y. S., Davoudi, F., Wang, W., Abrinia, K., Cooper, J. M., Khademhosseini, A., & Shin, S. R. (2017). Surface acoustic waves induced micropatterning of cells in gelatin methacryloyl (GelMA) hydrogels. *Lab on a Chip, 17*(23), 4217-4225.

65. A. Marzo et al., Realization of compact tractor beams using acoustic delay-lines. Appl. Phys. Lett. 110(1), 014102 (2017).

66. L. Cox et al., Acoustic lock: Position and orientation trapping of non-spherical sub-wavelength particles in mid-air using a single-axis acoustic levitator. Appl. Phys. Lett. 113(5), 054101 (2018).

67. W.A. Oran, L.H. Berge, H.W. Parker, Parametric study of an acoustic levitation system. Rev. Sci. Instrum. 51(5), 626–631 (1980).

68. Zhou, Y., He, M., & Duan, X. (2021). 100% Single Cell Encapsulation via Acoustofluidic Printing Based on a Gigahertz Acoustic Resonator. *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 2021, 1172–1175.

69. Marzo, A. (2016). *GauntLev: A wearable to manipulate free-floating objects*. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference*.

70. Ashly Baby, Chinnu Augustine, Chinnu Thampi, Maria George, Abhilash AP, and Philip C Jose. 2017. Pick and place robotic arm implementation using Arduino. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering 12, 2 (2017).

71. Lawrence K Shapiro and Howard I Shapiro. 1988. Construction cranes. Scientific American 258, 3 (1988), 72–79.

72. Jeremy A Marvel, Roger Bostelman, and Joe Falco. 2018. Multi-robot assembly strategies and metrics. ACM Computing Surveys (CSUR) 51, 1 (2018), 1–32.

73. Daniele Foresti, Majid Nabavi, Aldo Klingauf, and Dimos Poulikakos. 2013. Acoustophoretic contactless transport and handling of matter in air. Proceedings of the National Academy of Sciences 110, 31 (2013), 12549–12554.

74. Yoichi Ochiai, Takayuki Hoshi, and Jun Rekimoto. 2014. Pixie Dust: Graphics Generated by Levitated and Animated Objects in Computational Acoustic-Potential Field. ACM Trans. Graph. 33, 4, Article 85 (jul 2014), 13 pages.

75. Duyang Zang, Kejun Lin, Lin Li, Zhen Chen, Xiaoguang Li, and Xingguo Geng. 2017. Acoustic levitation of soap bubbles in air: Beyond the half-wavelength limit of sound. Applied Physics Letters 110, 12 (2017), 121602.

76. Andreas Rene Fender, Diego Martinez Plasencia, and Sriram Subramanian. 2021. ArticuLev: An Integrated Self-Assembly Pipeline for Articulated Multi-Bead Levitation Primitives. In Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 1–12.

77. Rafael Morales, Asier Marzo, Sriram Subramanian, and Diego Martínez. 2019. LeviProps:

Animating levitated optimized fabric structures using holographic acoustic tweezers. In Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. 651–661.

78. Hirayama, R., Martinez Plasencia, D., Masuda, N., & Subramanian, S. (2019). A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping. *Nature, 575*(7782), 320-323.

79. Gor'Kov, L. P. (1962). On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. *Soviet Physics Doklady*, 6, 773.

80. Nakahara, J., Yang, B., & Smith, J.R. (2017). Contact-less manipulation of millimeter-scale objects via ultrasonic levitation. *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 1-7.

81. Zhang, F., & Jin, Z. (2018). The experiment of acoustic levitation and the analysis by simulation. *Open Access Library Journal*, 5(10), 1-10.

82. Hashimoto, Y., Koike, Y., & Ueha, S. (1995). Acoustic levitation of planar objects using a longitudinal vibration mode. *Journal of the Acoustical Society of Japan*, *16*(3), 189-192

83. Ueha, S., Hashimoto, Y., & Koike, Y. (1999). Non-contact transportation using near-field acoustic levitation. *Journal of Sound and Vibration*, *225*(4), 689-700.

84. Andrade, M. A. B., Polychronopoulos, S., Memoli, G., & Marzo, A. (2019). Experimental investigation of the particle oscillation instability in a single-axis acoustic levitator. *AIP Advances, 9*(3), 035020.

85. Chen, C., Wang, J., Jia, B., & Li, F. (2013). Design of a noncontact spherical bearing based on near-field acoustic levitation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *25*(6).

86. Zhao, S., Mojrzisch, S., & Wallaschek, J. (2013). An ultrasonic levitation journal bearing able to control spindle center position. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *36*(1), 168-181.

87. T. Ide, J. Friend, K. Nakamura, S. Ueha, Sensors Actuators A Phys. 135, 740 (2007).

88. Watanabe, T., & Fukui, S. (1995). A method for controlling tactile sensation of surface roughness using ultrasonic vibration. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995, IEEE.

89. Wiertlewski, M., Fenton Friesen, R., & Colgate, J. E. (2016). Partial squeeze film levitation modulates fingertip friction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(33), 9210-9215.

90. T. Hatanaka, Y. Koike, K. Nakamura, S. Ueha, Y. Hashimoto, Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett. 38, L1284 (1999).

91. S. Ueha, Rev. Acústica 33, 21 (2002).

92. S. Chino, Y. Kato, Y. Ishino, M. Takasaki, T. Mizuno, BActuation force characteristics of ultrasonic suspension for minute object,^ in IEEE Int. Ultrason. Symp. IUS (2011), pp. 1218–1221.

93. K. Uchiage, Y. Ishino, M. Takasaki, T. Mizuno, BEnlargement of floator size in ultrasonic suspension by arranging the shape of vibrating surface,^ in IEEE Int. Ultrason. Symp. IUS

(2014), pp. 2510–2513.

94. Inoue, S., Mogami, S., Ichiyama, T., Noda, A., Makino, Y., & Shinoda, H. (2019). *Acoustical boundary hologram for macroscopic rigid-body levitation.* The Journal of the Acoustical Society of America, 145(1), 328–337.

95. Marzo, A., Caleap, M., & Drinkwater, B.W. (2018). *Acoustic virtual vortices with tunable orbital angular momentum for trapping of Mie particles.* Physical Review Letters, 120(4), 044301.

96. Shen, L., Tai, J., Crivoi, A., Li, J., Cummer, S., & Fan, Z. (2023). *Self-stabilizing three-dimensional particle manipulation via a single-transducer acoustic tweezer.* Applied Physics Letters, 122, 094106.

97. Adili, M., Martinez Plasencia, D., Polychronopoulos, S., Memoli, G., Tokuda, Y., & Subramanian, S. (2018, October). *SoundBender: Dynamic acoustic control behind obstacles*. In Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium.

98. Pavan Kishore, M. L., Malladi, A., & Chattoraj, P. (2025). A comprehensive review on acoustic levitation techniques and applications. *Journal of Tianjin University Science and Technology, 58*(03), 160-173.

99. Andrade, M. A. B., Marzo, A., & Adamowski, J. C. (2025). Acoustic levitation in mid-air: Recent advances, challenges and future perspectives. *Journal of Acoustical Science and Technology, 58*(3), 160-173.

100. Kainova, A., Korotin, P. I., Sokov, E. M., & Suvorov, A. S. (2019). Validation method for finite-element modeling of acoustic re-emission of bodies in the turbulent fluid flow. *Fluid Dynamics, 54*(7), 912–918.

101. Fushimi, T., Marzo, A., Hill, T. L., & Drinkwater, B. (2018, October). Trajectory optimization of levitated particles in mid-air ultrasonic standing wave levitators. In *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium* (IUS), Kobe, Japan.

102. Latifi, K., Kopitca, A., & Zhou, Q. (2020). Model-free control for dynamic-field acoustic manipulation using reinforcement learning.

103. University of Bristol. (2024, September 10). *MultiLev Acoustic Levitator*. School of Physics.

104. Bachynskyi, M., Paneva, V., & Müller, J. (2018). LeviCursor: Dexterous interaction with a levitating object. In *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS '18)* (pp. 253-262).

105. Friend, J. (2023). Acoustofluidics. *Frontiers in Acoustics, 1*.