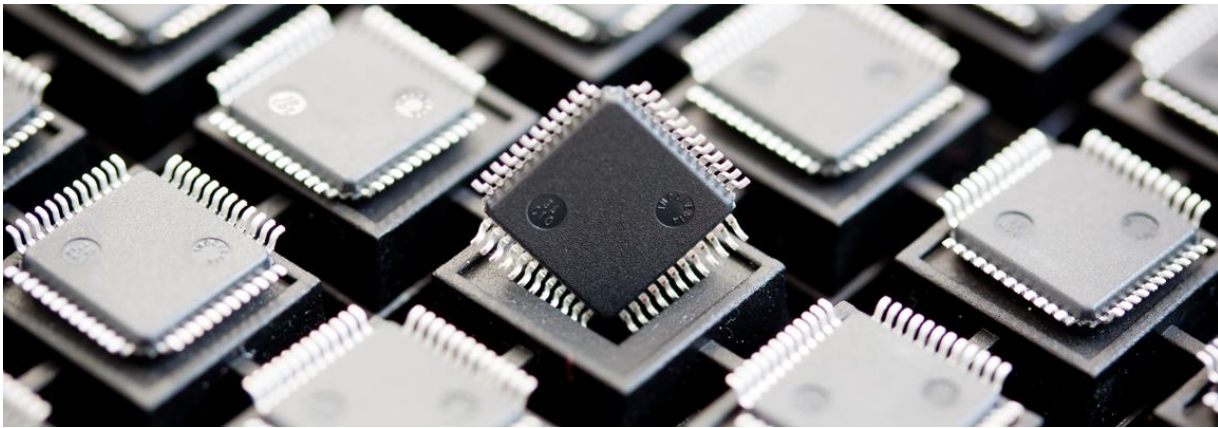


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ



«ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΓΙΑ
ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ»

ΚΡΗΤΙΚΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ
ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΦΥΣΙΚΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ

ΠΑΤΡΑ 2019

Η εργασία στηρίχθηκε οικονομικά από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών μέσα από το «Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών για μεταπτυχιακές σπουδές δεύτερου κύκλου σπουδών» του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού για την Εκπαίδευση και τη Δια Βίου Μάθηση», το οποίο συγχρηματοδοτείται από το ΕΣΠΑ 2014 – 2020 και το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ).



«ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΕΙΡΙΣΜΟΥ ΜΙΚΡΟΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΓΙΑ
ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ»

ΚΡΗΤΙΚΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΦΥΣΙΚΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΠΑΤΡΩΝ

*Στην Άννα, το Χαρίλαο,
το Θανάση και το Χάρη*

Πίνακας Περιχομένων

Πρόλογος.....	9
Περίληψη.....	11
ABSTRACT	13
Εργασίες που Δημοσιεύθηκαν σε Διεθνή Περιοδικά με Δείκτη Απήχησης και σε Διεθνή Συνέδρια με Κριτές	15
Κεφάλαιο 1 ^ο Ανασκόπηση της Βιβλιογραφίας – Συνεισφορά της Διατριβής.....	17
1.1 Εισαγωγή	17
1.2 Διαχωρισμός και Μικροσυναρμολόγηση των MEMS	18
1.3 Μέθοδοι Χειρισμού Μικροαντικειμένων Χωρίς τη Χρήση Μικροεργαλείων	20
1.4 Ερευνητικό Κενό – Σκοπός της Διατριβής.....	28
Κεφάλαιο 2 ^ο Η «Εξυπνη Πλατφόρμα» Αγώγιμων Επενεργητών Εφαρμογής Ηλεκτροστατικών Δυνάμεων	31
2.1. Σκοπός	31
2.2 Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για το χειρισμό μικροαντικειμένων με Ηλεκτροστατικά Πεδία Δυνάμεων – Ανοιχτά Ζητήματα.....	31
2.3 Η «Εξυπνη Πλατφόρμα» ο Τρόπος Λειτουργίας της και η Κίνηση των Μικροαντικειμένων.....	33
2.4 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων στα Μικροαντικείμενα.....	40
2.5 Προσαρμοσμένη Συνάρτηση για την Οριζόντια Δύναμη μεταξύ των Ηλεκτροδίων	51
2.6 Συμπεράσματα – Συμβολή	56
Κεφάλαιο 3 ^ο Μέθοδοι Ενεργοποίησης των Ηλεκτροδίων της «Εξυπνης Πλατφόρμας» για την Κίνηση ενός Μικροαντικειμένου Μεταξύ 2 Θέσεων Ισορροπίας.....	59
3.1 Σκοπός	59
3.2 Η περιοχή της Έξυπνης Πλατφόρμας.....	60
3.3 Ανάλυση Δυνάμεων των Μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα»	61
3.4 Μέθοδοι Ενεργοποίησης των Ηλεκτροδίων για την Κίνηση των Μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα»	69
3.5 Ενεργοποιήσεις για την Μετατόπιση ενός Μικροαντικειμένου μεταξύ δύο Ηλεκτροδίων της ΕΠ.....	83
3.6. Ενεργοποιήσεις των ηλεκτροδίων της ΕΠ για την Κίνηση Κεντραρισμένων/Ευθυγραμμισμένων Μικροαντικειμένων μεταξύ δύο Θέσεων Ισορροπίας.....	88
3.7 Συμπεράσματα – Συμβολή 3 ^{ου} Κεφαλαίου	95
Κεφάλαιο 4 ^ο Παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων στην Έξυπνη Πλατφόρμα.....	97
4.1 Περίληψη 4 ^{ου} Κεφαλαίου	97
4.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας – Περιγραφή και Συνεισφορά του 4 ^{ου} Κεφαλαίου	97
4.3 Μέθοδος για το παράλληλο κεντράρισμα/ευθυγράμμιση πολλαπλών μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα»	100

4.4 Σχεδιασμός της Παράλληλης Κίνηση Πολλαπλών Κεντραρισμένων και Ευθυγραμμισμένων Μικροαντικειμένων	115
4.6 Σύνοψη – Συμβολή	150
Κεφάλαιο 5 ^ο Μέθοδοι Παράλληλου Διαχωρισμού και Συναρμολόγησης Τετραγωνικών και Εξαγωνικών Μικροαντικειμένων	153
5.1 Σκοπός – Περίληψη.....	153
5.2. Μέθοδος για τον παράλληλο διαχωρισμό των μικροαντικειμένων.....	154
5.3. Μέθοδοι Μικροσυναρμολόγησης.....	166
5.4 Σύνοψη 5 ^{ου} Κεφαλαίου – Συμβολή	192
Κεφάλαιο 6	193
6.1 Συμπεράσματα – Συμβολή της διατριβής.....	193
6.2. Ανοικτά ζητήματα και μελλοντική έρευνα.....	196
Παράρτημα	197
Π.1. Υπολογισμός της 1 ^{ης} παραγώγου της επιφάνειας αλληλεπικάλυψης δύο κυκλικών δίσκων διαφορετικών ακτινών ως προς την απόσταση των κέντρων τους.....	197
Αναφορές.....	199
Σύντομο Βιογραφικό Σημείωμα	205

Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών από τον Μάρτιο του 2014 μέχρι τον Δεκέμβριο του 2019. Από το Μάιο του 2017 μέχρι το Σεπτέμβριο του 2018 η εργασία στηρίχθηκε οικονομικά από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών μέσα από το «Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών για μεταπτυχιακές σπουδές δεύτερου κύκλου σπουδών» του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού για την Εκπαίδευση και τη Δια Βίου Μάθηση», το οποίο συγχρηματοδοτείται από το ΕΣΠΑ 2014 – 2020 και το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ).

Επιβλέπων της διδακτορικής διατριβής ήταν ο κ. Νικόλαος Ασπράγκαθος, Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, τον οποίο ευχαριστώ για την υπόδειξη του θέματος, την επίβλεψη της εργασίας και την επιστημονική καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το 1^ο Μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής επιτροπής κ. Τζε Αντώνιο Καθηγητή στο New York University, Abu Dhabi Engineering Division and Electrical and Computer Engineering, για τη συμμετοχή του και τη συνεπιβλεπή της διατριβής παρ' όλες τις χιλιομετρικές δυσκολίες που παρουσιάσθηκαν τα τελευταία τρία χρόνια. Ευχαριστώ επίσης το 2^ο Μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής επιτροπής κ. Κροντηρά Χριστόφορο Καθηγητή στο Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών, ο οποίος έχει υπάρξει για μένα δάσκαλος από τα χρόνια των προπτυχιακών μου σπουδών μέχρι και σήμερα. Ακόμα ευχαριστώ τον κ. Μουλιανίτη Βασίλειο Επίκουρο Καθηγητή στο Τμήμα Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Αιγαίου για τις πολύτιμες συμβουλές του και την συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των διδακτορικών μου σπουδών. Τέλος, ευχαριστώ τον κ. Τσάμη Χρήστο Διευθυντή Ερευνών στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος ο οποίος με βοήθησε στα πρώτα μου βήματα ως ερευνήτρια στο πεδίο της Μικροηλεκτρονικής κάνοντας πρακτική στο εργαστήριο του.

Τα τελευταία χρόνια πέρασαν αρμονικά εξαιτίας της καλής συνεργασίας με όλα τα μέλη της Ομάδας Ρομποτικής του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών Π.Π. ξεκινώντας από τον Δρ. Κουστουμπάρδη Παναγιώτη και τους συναδέλφους Δρ. Δημέα Φώτη, Δρ. Βάλσαμο Χαράλαμπο, Συνοδινό Άρη, Λαμπριανίδη Νίκο, Sharkawy Abdel – Nasser, Θανέλλα Γιώργο και Φεύγα Γιώργο. Ακόμα, θερμά ευχαριστώ σε όλους τους συγγενείς, τους φίλους και τους συναδέλφους εντός και εκτός Πανεπιστημίου για την έμμεση και άμεση βοήθεια τους.

Κλείνοντας, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου Χαρίλαο και Άννα Κρητικού, τον αδερφό μου Θανάση Κρητικό και το σύντροφο μου Χαράλαμπο Οπάζο – Σπαθή για την συναισθηματική στήριξη, την αγάπη, την κατανόηση και τη συμπαράσταση σε όλα τα επίπεδα. Η διατριβή είναι αφιερωμένη σε αυτούς.

Κρητικού Γεωργία
Πάτρα 2019

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη μεθόδων για τη μαζική σύνθεση και παραγωγή Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων (MEMS) είναι ένα ερευνητικό πεδίο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Κατά τη διαδικασία της παραγωγής των MEMS χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένα μικρο - εργαλεία όπως ρομποτικές μικρο - αρπάγες και μικρο - λαβίδες με τα οποία πραγματοποιείται χειρισμός σειριακά για το διαχωρισμό τους και την συναρμολόγηση τους. Από τη σχετική βιβλιογραφία προκύπτει ότι κατά το σειριακό χειρισμό με ρομποτικά μικρο - εργαλεία έχουμε μεγάλους χρόνους και υψηλά κόστη παραγωγής καθώς και την πρόκληση μικροφθορών στα επιμέρους στοιχεία των MEMS. Εφαρμογές μικρο - χειρισμού με πεδία δυνάμεων τα οποία αναπτύσσονται σε ειδικά διαμορφωμένες συσκευές έχουν προταθεί με στόχο τον περιορισμό αυτών των προβλημάτων. Προς το παρόν οι μέθοδοι αποκλειστικά με πεδία δυνάμεων δεν έχουν ενταχθεί στη γραμμή παραγωγής των μικρο - εργοστασίων εξαιτίας της περιορισμένης αυτονομίας και ευελιξίας των περισσότερων συσκευών και των διατάξεων με τα οποία αναπτύσσονται.

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής προτείνεται μια αυτόνομη συσκευή χειρισμού μικροαντικειμένων κατασκευασμένων από πλαστικά/μονωτικά υλικά και αγωγίμα ηλεκτροδία στην κάτω επιφάνεια τους. Πρόκειται για την «Εξυπνη Πλατφόρμα» αγωγίμων ηλεκτροδίων, η κατάλληλη ενεργοποίηση των οποίων προκαλεί την κίνηση των μικροαντικειμένων εξαιτίας των πεδίων ηλεκτροστατικών δυνάμεων που εφαρμόζονται στα μικροαντικείμενα. Η θέση και ο προσανατολισμός των μικροαντικειμένων στην πλατφόρμα ανιχνεύεται με τη βοήθεια αισθητήρων όρασης οι οποίοι είναι κατάλληλα τοποθετημένοι στη συσκευή.

Αρχικά παρουσιάζεται η βιβλιογραφία, που σχετίζεται με το ερευνητικό πεδίο του χειρισμού μικροαντικειμένων, ώστε να αναδείχνει το ερευνητικό κενό και η συμβολή της διατριβής. Εν συνεχεία περιγράφεται η «Εξυπνη Πλατφόρμα», η δομή της διάταξης τα τεχνικά και ηλεκτρικά της χαρακτηριστικά. Περιγράφονται οι φυσικές διεργασίες στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία της πλατφόρμας και υπολογίζονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ της πλατφόρμας και των μικροαντικειμένων. Προτείνονται μέθοδοι διάταξης των ηλεκτροδίων στα μικροαντικείμενα. Ορίζονται οι συνθήκες φόρτισης των ηλεκτροδίων της πλατφόρμας για την επιτυχή κίνηση των μικροαντικειμένων και διατυπώνονται ημι - εμπειρικές προσαρμοσμένες συναρτήσεις για τις δυνάμεις αλληλεπίδρασης.

Ένα σημαντικό ζήτημα που τίθεται για τις μεθόδους χειρισμού των μικροαντικειμένων με πεδία δυνάμεων είναι η περιορισμένη ευελιξία και αυτονομία, που χαρακτηρίζει τις συσκευές που τις υποστηρίζουν. Τα μικροαντικείμενα μεταφέρονται στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» μέσω γραμμών μεταφοράς και τοποθετούνται σε τυχαίες διαμορφώσεις - μη κεντραρισμένα σε ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας/ μη ευθυγραμμισμένα με τον προσανατολισμό του Κεντρικού Συστήματος Αναφοράς - . Η εύρεση όλων των δυνατών ενεργοποιήσεων των ηλεκτροδίων της πλατφόρμας για την κίνηση ενός μικροαντικειμένου προς μια νέα Θέση Ισορροπίας οποιαδήποτε

κι αν είναι η αρχική του διαμόρφωση υλοποιείται με δυο νέους αλγόριθμους. Η αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων επιβεβαιώνεται προσομοιώνοντας τις ενεργοποιήσεις, που προκύπτουν από τους αντίστοιχους υπολογισμούς τους. Εν συνεχεία προτείνονται αλγόριθμοι ενεργοποίησης για τη διακριτή κίνηση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο ηλεκτροδίων της «Εξυπνης Πλατφόρμας» (τα οποία αποτελούν ταυτόχρονα θέσης ισορροπίας των μικροαντικειμένων), αφότου κεντραριστούν κι ευθυγραμμισθούν στην «Εξυπνη Πλατφόρμα».

Ένα στοίχημα για τη Βιομηχανία των MEMS είναι ο παράλληλος χειρισμός πολλαπλών μικροαντικειμένων με στόχο το διαχωρισμό και τη μικροσυναρμολόγηση τους. Τα μικροαντικείμενα μεταφέρονται σε συστάδες στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» με γραμμές μεταφοράς και ως είναι λογικό τα περισσότερα τοποθετούνται σε τυχαίες διαμορφώσεις. Προτείνεται μια νέα μέθοδος για το αυτόνομο παράλληλο κεντράρισμα κι ευθυγράμμιση πολλαπλών μικροαντικειμένων προετοιμάζοντας τα για την εφαρμογή των ενεργοποιήσεων αντίστοιχων ενεργοποιήσεων. Εν συνεχεία, προσδιορίζεται ο χώρος στατικών εμποδίων και ο ελεύθερος χώρος διαμορφώσεων των μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα». Ο προσδιορισμός των ελεύθερων μονοπατιών για την ταυτόχρονη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» πραγματοποιείται με έναν προσαρμοσμένο A* αλγόριθμο. Πρόκειται για ένα συνεργατικό A* (cooperative A*) αλγόριθμο ο οποίος ψάχνει στον ελεύθερο χώρο καταστάσεων εντοπίζοντας μοναδικά μονοπάτια στο χωροχρόνο για κάθε μικροαντικείμενο λαμβάνοντας υπόψη την προτεραιότητα του. Μια σημαντική συνεισφορά αποτελεί μια νέα συνάρτηση κόστους στους υπολογισμούς της οποίας λαμβάνεται υπόψη η απόσταση μεταξύ γειτονικών μικροαντικειμένων. Η ευρεστική συνάρτηση της συνάρτησης κόστους συνεισφέρει στον εντοπισμό μονοπατιών για την παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων σε προβλήματα μεγαλύτερης πολυπλοκότητας για το κομμάτι της μικρορομποτικής καθώς και στη βελτιστοποίηση του χρόνου κίνησης καθενός εξ αυτών.

Τέλος, οι μέθοδοι ενεργοποιήσεων και οι αλγόριθμοι που προτείνονται για το χειρισμό των μικροαντικειμένων εφαρμόζονται για τον παράλληλο διαχωρισμό και τη συναρμολόγηση τους. Καταρχάς προτείνεται μια νέα μέθοδος για τη συστηματικό διαχωρισμό των μικροαντικειμένων σε περιοχές της «Εξυπνης Πλατφόρμας» με κριτήριο τη γεωμετρία τους. Εν συνεχεία προτείνονται μέθοδοι για τη συναρμολόγηση μεταξύ αντικειμένων ίδιας γεωμετρίας με στόχο η διαδικασία να υλοποιηθεί με τον ελάχιστο αριθμό ενεργοποιήσεων αποφεύγοντας τις συγκρούσεις μεταξύ των μικροαντικειμένων. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι εφαρμόζονται και επαληθεύονται σε μια προσομοιωμένη πλατφόρμα.

ABSTRACT

The mass production of the Microelectromechanical Systems (MEMS) is an ongoing research field. The micro – handling of the microparts that compose the MEMS is an important process in the micro – factories. Nowadays, in the MEMS industry micro – grippers and micro – tweezers are used for manipulating serially the individual micro – components implementing applications as the microparts’ sorting and assembly. But such methods conclude in the long cycle – time production and sometimes in causing damages on the MEMS. Methods for the contactless micromanipulation with force fields have been proposed in bibliography promising to optimize the MEMS manufacturing. Although, the most contactless micromanipulation systems that have been presented until now are not autonomous in order to accomplish individually the handling process.

In this PhD thesis an autonomous device for the handling of multiple plastic microparts with conductive pads underneath is proposed. The “Smart Platform” is a PCB with conductive electrodes and dielectric layers where the microparts are moved due to the successive charging of the platform’s electrodes. The position and the orientation of the components of on the “Smart Platform” are detected with the aid of the visual sensors system.

Firstly, the bibliography related to the micromanipulation is presented better clarifying the contribution of the thesis. Then, the design of the “Smart Platform” is described in detail focusing on the electric properties of the device. The physics of the system are specified and the interactions between the platform’s and the microparts’ electrodes are determined with Finite Elements Method analysis. The design of the electrodes’ layout underneath the microparts is proposed and semi – empirical fitting force functions are described for the electrostatic forces.

The microparts are massively transmitted on the “Smart Platform” with transfer lines and as a result they are usually positioned on the device with random configurations (non – centralized/ non – aligned). Two new algorithms are introduced in order to be detected all the possible activations that can be applied simultaneously to the platform’s electrodes for a micropart’s motion between two equilibrium positions. The flexibility of the platform to handle components in random configurations shows that it is an autonomous system. Activation algorithms for the systematic motion of the microparts between two platform’s electrodes are proposed. The efficiency of the computed activation algorithms is certified on a simulated “Smart Platform”.

The parallel motion of multiple microparts on the “Smart Platform” is studied. A new method for the parallel centralization and aligning of multiple micro – components is proposed proving that the platform is an autonomous device. Then, the simultaneous motion of the microparts on the platform is studied. Considering that the microparts are centralized and aligned the Static Obstacles Space and the Free Configuration Space of the microparts is computed. For the parallel motion of the microparts the Free State Space on the platform is specified considering the Action Space and the Priority of each micropart. A modified A* algorithm is proposed for the path computation of multiple simultaneously moving microparts. The computations of the algorithm are implemented in the Free State Space considering the priority of each micropart during their parallel motion in the time – space. The

algorithm finds for each micropart the shortest path in time – space due to a new distance cost function that is proposed. The novelty of the function is the heuristic function that is introduced where the distance between the neighbor microparts is also taken into account.

The activation algorithms for the motion of the microparts, the centralization/aligning method and the path computation algorithm are applied in the parallel sorting and assembly of the microparts. A new method for the parallel sorting of multiple components with respect to their geometry is proposed. Then, techniques for the parallel assembly of multiple microparts with the same geometry are studied. In order to be avoided undesired collisions between the microparts that are assembled the minimum distances between them are determined. Finally, assembly rules are described considering the minimum activations that can be applied simultaneously to the SP electrodes.

Εργασίες που Δημοσιεύθηκαν σε Διεθνή Περιοδικά με Δείκτη Απήχησης και σε Διεθνή Συνέδρια με Κριτές

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής δημοσιεύθηκαν επτά (7) εργασίες:

1. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Περιοδικά με Δείκτη Απήχησης

[Π.1] Kritikou, G.; Lamprianidis, N.; Aspragathos, N. A Modified Cooperative A* Algorithm for the Simultaneous Motion of Multiple Microparts on a “Smart Platform” with Electrostatic Fields. Micromachines 2018, 9, 548.

[Π.2] Kritikou Georgia, Aspragathos Nikos “Micro-Manipulation Methods and Assembly of Hexagonal Microparts on a Programmable Platform with Electrostatic Forces”, International Journal of Mechanics and Control , Vol. 20, No. 01, pp. 71-80 (2019)

[Π.3] Kritikou, G.; Aspragathos, N.; Moulitanitis, V. Algorithms for the Motion of Randomly Positioned Hexagonal and Square Microparts on a “Smart Platform” with Electrostatic Forces and a New Method for Their Simultaneous Centralization and Alignment. Micromachines 2019, 10, 874.

2. Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια με Κριτές

[Σ.1] Kritikou G., Lazarou P. and Aspragathos N. “Electrostatic Force for Self – alignment of Microparts and its Dependence on Geometrical and Electrical Parameters”, proceeding of 4M/ICOMM p.p. 545-548, (2015)

[Σ.2] Kritikou, G., Aspragathos, N.,: Programmable Platform Design and its Electrodes Activation Algorithm for Microparts Motion, in Proc. 4M/IWMF, p.p. 181-184 (2016)

[Σ.3] Kritikou Georgia and Aspragathos Nikos « Activation Algorithms for the Micro-Manipulation & Assembly of Hexagonal Microparts on a Programmable Platform», Proceedings of RAAD2018

[Σ.4] Sarantoglou G., Kritikou G. Aspragathos N. and Tzes A. . “Algorithm for parallel microparts manipulation with electrostatic fields”, proceedings of 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), p.p. 2473-3504, (2017).

Κεφάλαιο 1^ο Ανασκόπηση της Βιβλιογραφίας – Συνεισφορά της Διατριβής

1.1 Εισαγωγή

Τα Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα (Microelectromechanical Systems – MEMS) αποτελούν ολοκληρωμένα συστήματα με διαστάσεις που κυμαίνονται μεταξύ $>20\mu\text{m}$ και $<1\text{mm}$. Πρόκειται για συνθέσεις από επιμέρους μικροαντικείμενα φτιαγμένα από διάφορα υλικά των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται μεταξύ $1\mu\text{m}$ και $100\mu\text{m}$. Τις τελευταίες δεκαετίες η συνεχής εξέλιξη και παραγωγή νέων προϊόντων τεχνολογίας οφείλεται στη συστηματική σμίκρυνση (miniaturization) των στοιχείων/μικροαντικειμένων που συνθέτουν τα MEMS. Μια από τις πιο σημαντικές συμβολές της σμίκρυνσης είναι ο αριθμός των μικροαντικειμένων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σύνθεση των MEMS, η κατανάλωση μικρότερων ποσών ενέργειας και ο περιορισμός του κόστους πρώτων υλών.

Ένα από τα σημαντικότερα βήματα κατά την παραγωγή των MEMS συστημάτων είναι η μαζική και αυτοματοποιημένη παραγωγή τους σε μεγάλους αριθμούς κι εν συνεχεία η ενσωμάτωσή τους ως επιμέρους στοιχεία μεγαλύτερων κατασκευών. Τα MEMS βρίσκουν εφαρμογή σε διάφορους τομείς όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροναυπηγική, η ηλεκτρονική, το βιομηχανικό έλεγχο κ.α. Στον πίνακα Π.1.1 παρουσιάζονται οι περιοχές εφαρμογής των MEMS.

Π.1.1 Εφαρμογές των MEMS

<u>Εξοπλισμός Γραφείου:</u> Ηλεκτρονικοί Υπολογιστές, Περιφερειακά Πολυμηχανήματα/Εκτυπωτές
<u>Αυτοκινητοβιομηχανία:</u> Συστήματα Πέδησης, Αναρτήσεις, Ηλεκτρονικοί Εγκέφαλοι
<u>Προϊόντα Τεχνολογίας:</u> Κινητά Τηλέφωνα, Φωτογραφικές Μηχανές, Βίντεο, Tablet, Κονσόλες Παιχνιδιών
<u>Αεροναυπηγική:</u> Μηχανές, Συστήματα Ασφαλείας
<u>Ρομποτική και Τηλεχειρισμός:</u> Παραγωγή, Πυρηνικά και Υποθαλάσσια Συστήματα, Ψυχαγωγία
<u>Ιατρικά Συστήματα:</u> Μίκρο – κάμερες, Μίκρο – Χειρουργικά Συστήματα, Συστήματα Διάγνωσης και Ανάλυσης

Ο Π.1.1. καθιστά σαφές ότι τα MEMS χρησιμοποιούνται ευρέως με αποτέλεσμα η μαζική τους παραγωγή με το ελάχιστο δυνατό κόστος να αποτελεί ένα μεγάλο στοίχημα για τη βιομηχανία.

1.2 Διαχωρισμός και Μικροσυναρμολόγηση των MEMS

Τα MEMS συνθέτονται από μικροαντικείμενα ποικίλων γεωμετριών φτιαγμένα από διάφορα υλικά είτε αγωγίμα είτε μονωτικά. Η απομάκρυνση μικροαντικειμένων εξαιτίας φθορών καθώς κι η συναρμολόγηση τους αποτελούν σημαντικές διαδικασίες που αυξάνουν τη διαδικασία χειρισμού και παραγωγής των MEMS. Ειδικά η συναρμολόγηση έχει χαρακτηριστεί ως ένα μέρος της παραγωγής με αρκετούς περιορισμούς και τεχνικά εμπόδια εξαιτίας του οποίου αυξάνεται ο χρόνος της μαζικής παραγωγής [1]. Το πεδίο της μικροσυναρμολόγησης έχει αρχίσει κι απασχολεί τους ερευνητές συστηματικά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες μιας και μέχρι τότε μεγάλο ζήτημα αποτελούσε η κατασκευή πιο απλών ολοκληρωμένων συσκευών. Ξεκινώντας συνεπώς τη διερεύνηση είναι σημαντικό να οριστεί η έννοια του μικροχειρισμού, του διαχωρισμού και της μικροσυναρμολόγησης.

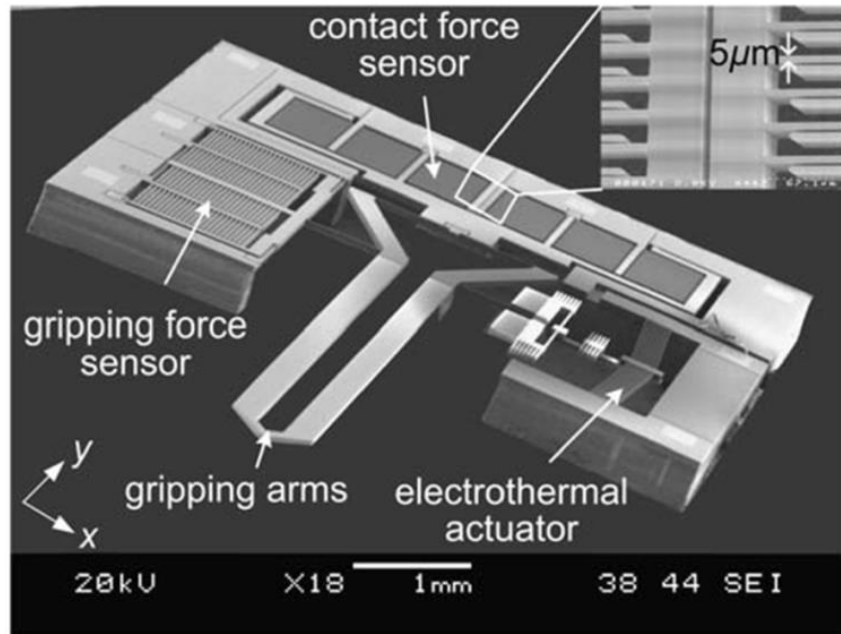
I. **Μικροχειρισμός**: Διαδικασία της τοποθέτησης και του προσανατολισμού των μικροαντικειμένων σε συγκεκριμένες θέσεις και διευθύνσεις

a. **Διαχωρισμός**: Συστηματική κατηγοριοποίηση των μικροαντικειμένων με βάση τις μηχανικές, ηλεκτρικές κ.τ.λ. ιδιότητες τους

b. **Μικροσυναρμολόγηση**: Σύνθεση ομάδων, συστάδων και δομών από μικροαντικείμενα ή ομάδες μικροαντικειμένων.

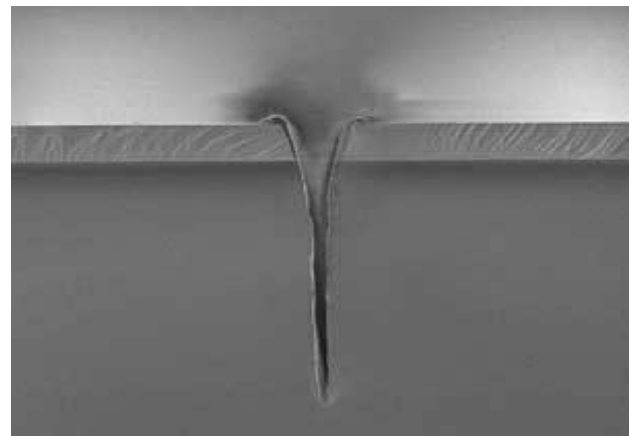
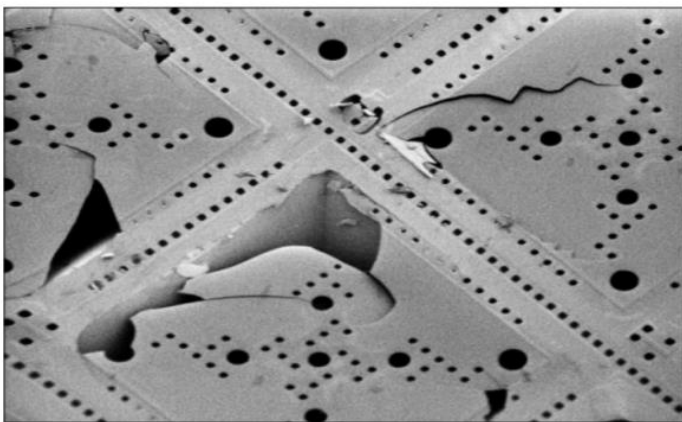
1.1 Μέθοδοι Μίκρο – Χειρισμού με Επαφή

Στη βιομηχανία η διαδικασία του μικροχειρισμού των μικροαντικειμένων υλοποιείται σειριακά και η ορθή λειτουργία του επιβεβαιώνεται με οπτικό σερβοέλεγχο (visual servoing) [2]. Για τις σειριακές μεθόδους χρησιμοποιούνται μίκρο – εργαλεία τα οποία χειρίζονται ένα προς ένα τα μικροαντικείμενα τοποθετώντας τα και προσανατολίζοντας τα στις επιθυμητές θέσεις. Οι μίκρο – αρπάγες [3, 4, 5] έχουν δομή παρόμοια με αυτή μιας ρομποτικής αρπάγης στον μακρόκοσμο με τη διαφορά να έγγυται στις διαστάσεις τους (εικόνα Ε.1.1). Η λειτουργία της στηρίζεται στην συγκράτηση, μεταφορά και τοποθέτηση μικροαντικειμένων σε επιθυμητές θέσεις. Παρόμοιο τρόπο λειτουργίας έχουν και οι μίκρο – λαβίδες οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως αντί των μίκρο- αρπαγών για το χειρισμό μικροαντικειμένων μικρότερων διαστάσεων [6, 7]. Τα ρομπότ που χρησιμοποιούνται για MEMS εφαρμογές αποτελούν το ανάλογο των βιομηχανικών ρομπότ [8,9] σε ένα μίκρο– εργοστάσιο [10] με διαστάσεις που δεν ξεπερνούν τις τάξεις του -μίλι στα άκρα των οποίων τοποθετούνται οι μίκρο-αρπάγες αποδίδοντας διαδικασίες λογικής «συλλέγω και τοποθετώ» (pick and place) .



E.1.1: Μικροαρπάγη – Εικόνα από Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο [2]

Στη βιομηχανία προς το παρόν εφαρμόζονται αποκλειστικά σειριακές μέθοδοι μικροχειρισμού οι οποίες παρόλο τους αυτοματισμούς και τα συστήματα ελέγχου που έχουν αναπτυχθεί [11, 12, 13] δεν έχουν καταφέρει να ολοκληρώσουν διαδικασίες όπως η μικροσυναρμολόγηση στο βέλτιστο χρονικό διάστημα. Επίσης, οι κινήσεις για την τοποθέτηση των μικροαντικειμένων σε συγκεκριμένες θέσεις με μεγάλη ακρίβεια οδηγούν στην αύξηση του χρόνου κατασκευής των Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων. Τέλος, ένα σύννηθες πρόβλημα είναι η πρόκληση φθορών στα αντικείμενα εξαιτίας του χειρισμού των μικρο-εργαλείων από ρομποτικούς βραχίονες και από τον άνθρωπο [14, 15](εικόνα E.1.2).



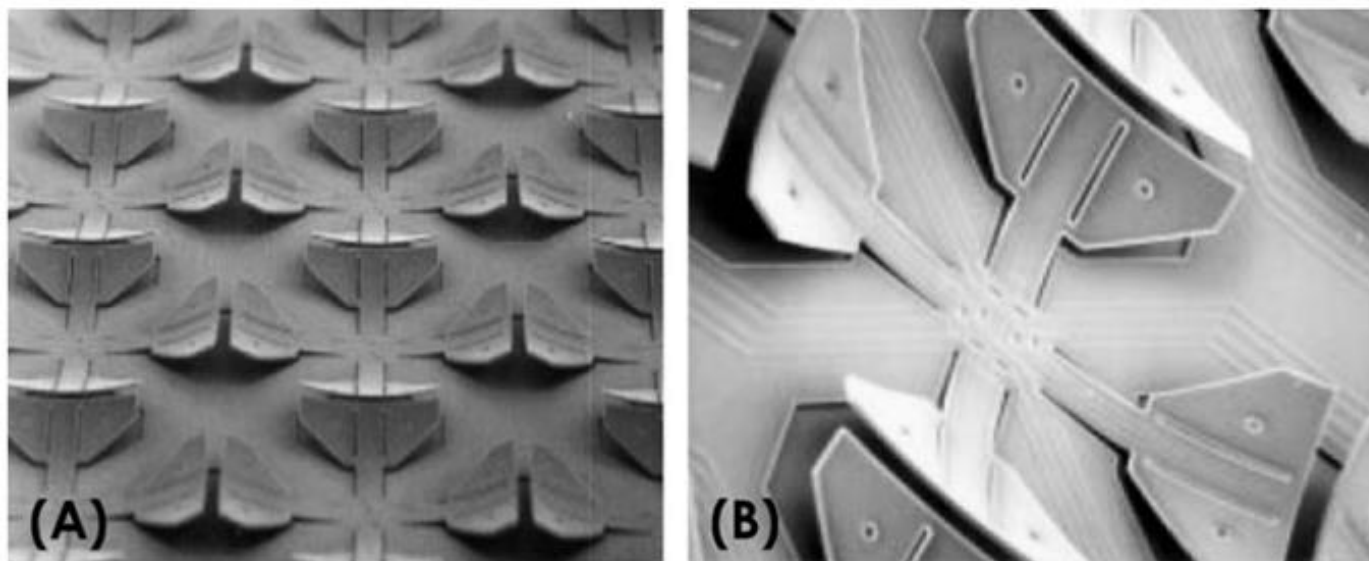
E.1.2: Φθορές σε Μικροαντικείμενα μετά από επαφή με μικρο – αρπάγη/ μικρο-λαβίδα [15]

1.3 Μέθοδοι Χειρισμού Μικροαντικειμένων Χωρίς τη Χρήση Μικροεργαλείων

Μια αρκετά υποσχόμενη κατηγορία μεθόδων μικροχειρισμού η οποία καλείται να αναβαθμίσει και να βελτιστοποιήσει τη μαζική παραγωγή των MEMS είναι οι μέθοδοι και οι τεχνικές αποκλειστικά με πεδία δυνάμεων χωρίς τη χρήση εργαλείων που έρχονται σε επαφή με τα μικροαντικείμενα.[15]. Πρόκειται για μεθόδους οι οποίες στοχεύουν στη μείωση του χρόνου παραγωγής προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία κατά το μικροχειρισμό περιορίζοντας ταυτόχρονα τις μικροφθορές [16]. Στο μικρόκοσμο η δύναμη του βάρους είναι ασθενής σε σύγκριση με την ηλεκτροστατική, την επιφανειακή τάση και τις δυνάμεις Van der Waals [17]. Αυτή η ιδιότητα αποτέλεσε το έναυσμα για την ανάπτυξη εφαρμογών για το χειρισμό των μικροαντικειμένων αποκλειστικά με δυνάμεις που υπερβαίνουν σε μέγεθος το βάρος τους.

1.3.1 Χειρισμός μικροαντικειμένων με προγραμματιζόμενα πεδία δυνάμεων

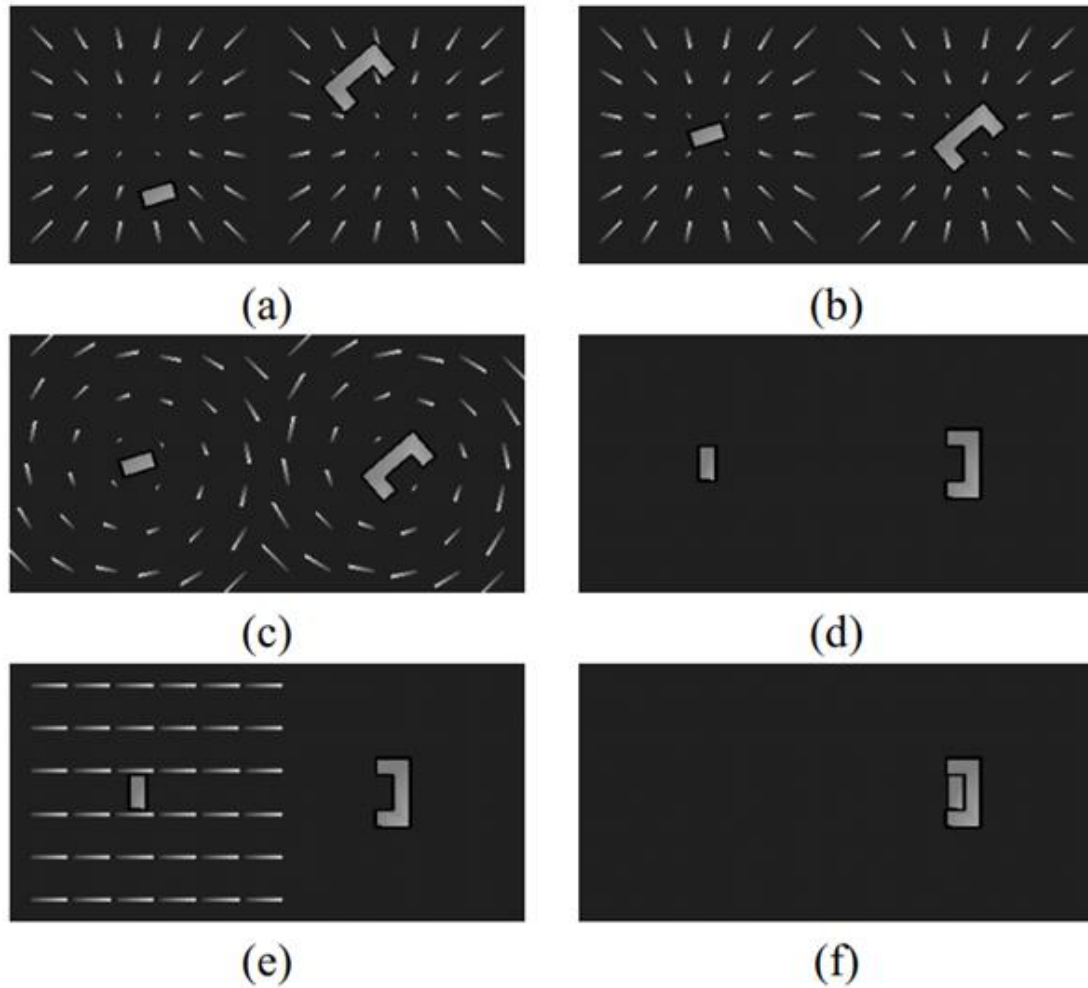
Ο K.-F. Boehringer et al. [18] διατύπωσε μαθηματικά το φορμαλισμό προγραμματιζόμενων πεδίων δυνάμεων για τη μετακίνηση και την περιστροφή μη κυρτών μικροαντικειμένων για εφαρμογές μικροχειρισμού σε ειδικές συσκευές με μηχανικούς επενεργητές (εικόνα E.1.3). Το κάθε μικροαντικείμενο τοποθετείται στην περιοχή των επενεργητών οι οποίοι διαμορφώνονται με βάση τη διεύθυνση που πρόκειται να ακολουθήσει το μικροαντικείμενο. Οι διαμορφώσεις των επενεργητών ορίζονται από τη μαθηματική συνάρτηση των πεδίων δυνάμεων και τις θέσεις ισορροπίας του μικροαντικειμένου όπου τα προγραμματιζόμενα πεδία παρουσιάζουν τοπικό ελάχιστο.



E.1.3: Μίκρο – Μηχανοτρονικό Σύστημα για το χειρισμό των μικροαντικειμένων με δυναμικά πεδία [18]

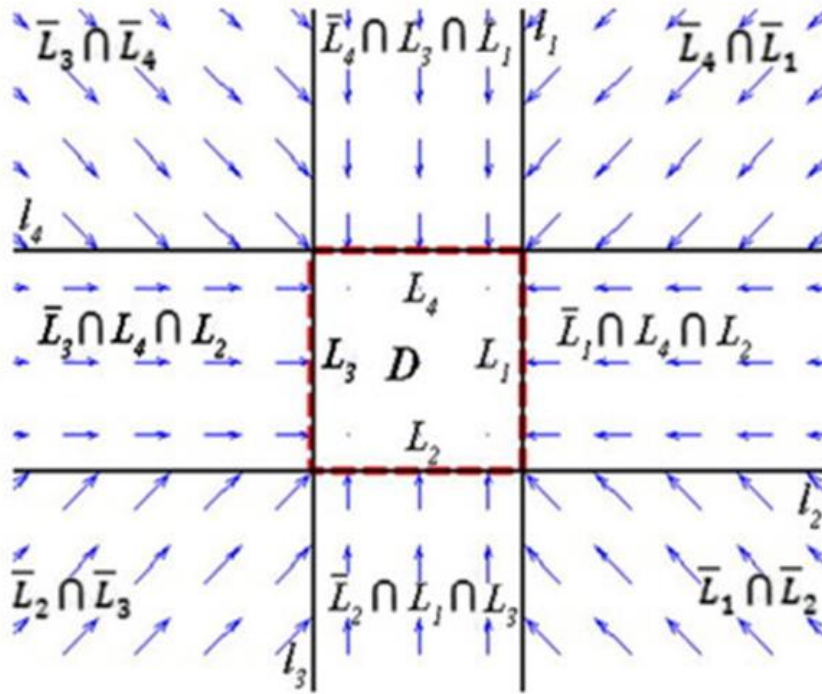
Μια εφαρμογή μικροσυναρμολόγησης με σειριακή εφαρμογή προγραμματιζόμενων πεδίων δυνάμεων παρουσιάζεται στην εικόνα E.14. όπου τα πεδία στις (α), (β) κεντράρουν τα μικροαντικείμενα, εν συνεχεία τα

περιστρέφουν (c) (d) μέχρι να λάβουν τις επιθυμητές διαμορφώσεις ούτως ώστε να μεταφερθούν και να συναρμολογηθούν (e) (f) [19].



E.1.4: Διαδοχική εφαρμογή προγραμματιζόμενων πεδίων δυνάμεων για τη συναρμολόγηση δύο μικροαντικειμένων (α) αρχικές θέσεις (β) κεντράρισμα (γ) περιστροφή (δ) λήψη θέσης για μετατόπιση (ε) μεταφορική κίνηση (f) συναρμολόγηση [19]

Ο ταυτόχρονος συνδυασμός και εφαρμογή πεδίων δυνάμεων για την οδήγηση των μικροαντικειμένων σε περιοχές τοπικού ελαχίστου προτάθηκε στην εργασία [20]. Όπως φαίνεται στην εικόνα E.1.5. το τετραγωνικό μικροαντικείμενο παγιδεύεται στην αντίστοιχη περιοχή εξαιτίας των πεδίων που εφαρμόζονται ταυτόχρονα σε αυτό. Μια κοινή παρατήρηση που προκύπτει για τα προγραμματιζόμενα πεδία δυνάμεων είναι ότι η μορφή τους ορίζεται με βάση τα μικροαντικείμενα που πρόκειται να χειρισθούν.



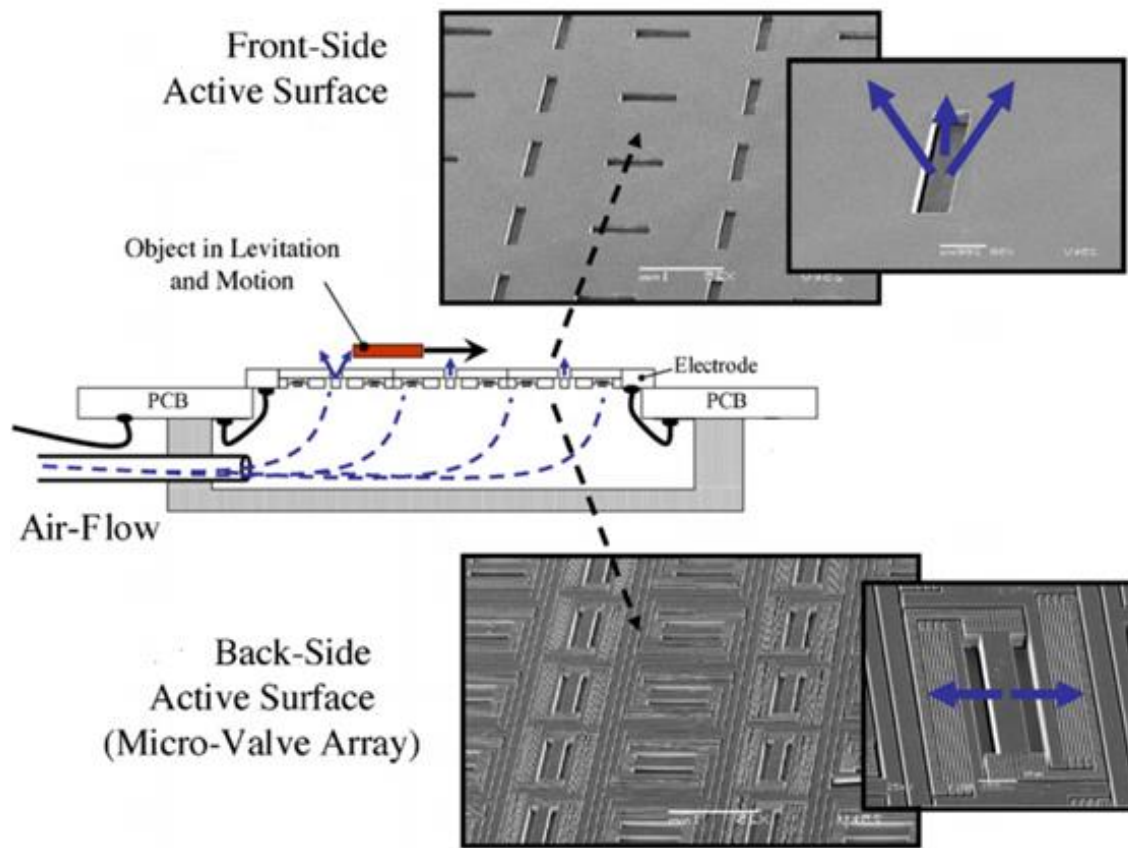
Ε.1.5.: Παγίδευση του μικροαντικειμένου σε περιοχή τοπικού ελάχιστου [20]

1.3.2 Εφαρμογές χειρισμού μικροαντικειμένων με φυσικά πεδία δυνάμεων

Πέραν των προγραμματιζόμενων πεδίων δυνάμεων έχουν παρουσιασθεί στη βιβλιογραφία εφαρμογές για το χειρισμό των μικροαντικειμένων με φυσικά πεδία δυνάμεων. Στην περίπτωση των προγραμματιζόμενων πεδίων ορίζεται αρχικά η μαθηματική συνάρτηση με βάση την κίνηση που ζητείται να υλοποιήσει το μικροαντικείμενο και το μηχανικό σύστημα που πρόκειται να υποστηρίξει την εφαρμογή έχει σχεδιασθεί ειδικά ώστε να ανταποκριθεί και να αποδώσει τον ζητούμενο φορμαλισμό του πεδίου. Στην περίπτωση των φυσικών πεδίων δυνάμεων ως είναι λογικό η συνάρτηση του πεδίου είναι προκαθορισμένη. Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιασθεί διατάξεις για την ανάπτυξη φυσικών πεδίων δυνάμεων για το χειρισμό μικροαντικειμένων.

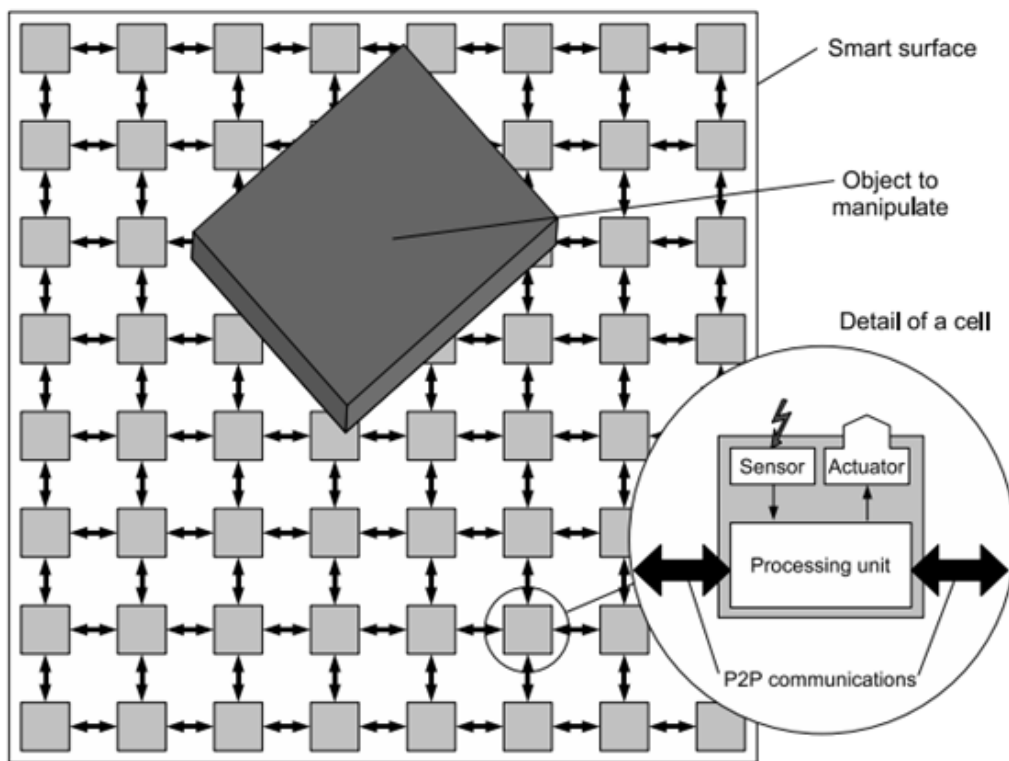
1.3.2.α Πεδία δυνάμεων – Δυνάμεις αέρα/μαγνητικές

Όπως συζητήθηκε στην αρχή της ενότητας η λογική του χειρισμού των μικροαντικειμένων με πεδία δυνάμεων στηρίζεται στην εφαρμογή δυνάμεων οι οποίες είναι ισχυρότερες του βάρους στο μικρόκοσμο. Παρ' όλα αυτά στη διεθνή βιβλιογραφία έχει παρουσιασθεί πληθώρα εφαρμογών για το χειρισμό των μικροαντικειμένων με ρεύματα αέρα και μαγνητικές δυνάμεις οι οποίες είναι ισχυρές και στο μακρόκοσμο. Στην εικόνα Ε.1.6 παρουσιάζεται μια συσκευή για την κίνηση των αντικειμένων με ρεύματα αέρα, όπου η εμφάνιση τους στην ανώτερη επιφάνεια της συσκευής γίνεται μέσω των ειδικών πτυχών της πλατφόρμας [21]. Τα ρεύματα αέρα παρασύρουν τα μικροαντικείμενα έως ότου ισορροπήσουν σε περιοχές όπου τα πεδία δυνάμεων που διαμορφώνονται εξαιτίας των ρευμάτων αέρα παρουσιάζουν τοπικό ελάχιστο.



E.1.6: Επιφάνεια χειρισμού μικροαντικειμένων με συνεχή παροχή αέρα [21]

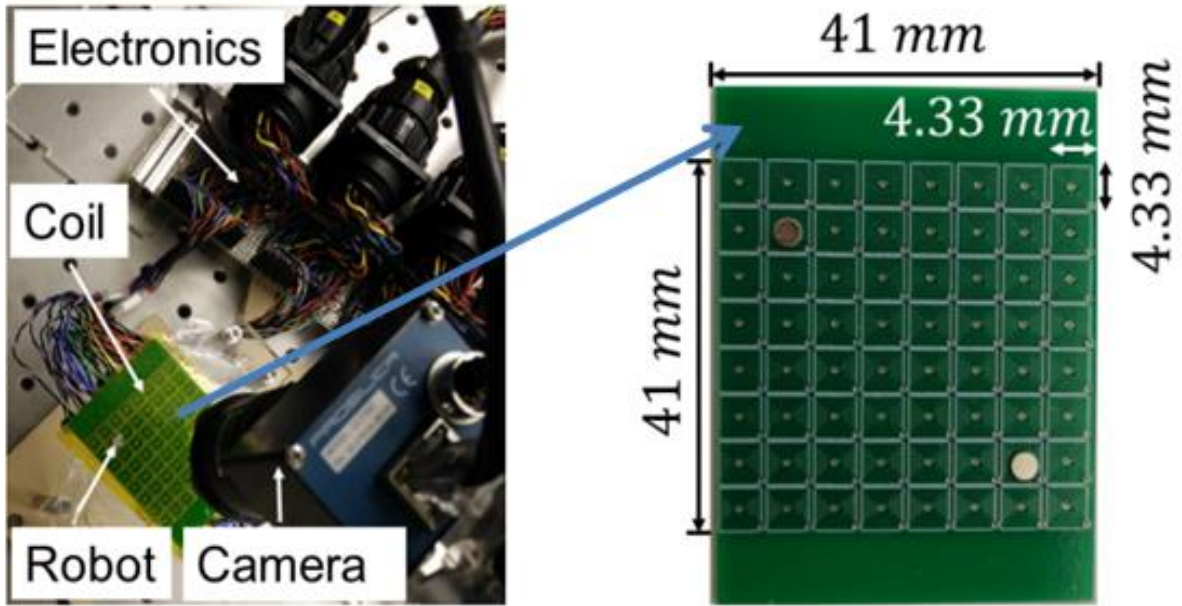
Η διακριτή κίνηση μίλι-αντικειμένων μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας έχει υλοποιηθεί με τη χρήση μιας ειδικά σχεδιασμένης συσκευής [22]. Όπως φαίνεται στην E.1.7 κάτω από την επιφάνεια χειρισμού της συσκευής υπάρχουν κελιά όπου τοποθετούνται οι αισθητήρες οι οποίοι υποδεικνύουν ότι βρίσκεται το αντικείμενο πάνω από το αντίστοιχο κελί. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ενεργοποίηση των φυσητήρων που βρίσκονται στο ίδιο κελί με τους αντίστοιχους αισθητήρες και η μετατόπιση των μικροαντικειμένων σε νέες θέσεις ισορροπίας εξαιτίας των ρευμάτων αέρα που δημιουργούνται.



Ε.1.7: Χειρισμός των μικροαντικειμένων σε πλατφόρμα με αισθητήρες αέρα [22]

Μια κοινή παρατήρηση για τις μεθόδους χειρισμού με ρεύματα αέρα είναι η έλλειψη ακρίβειας κατά την τοποθέτηση των μικροαντικειμένων στην τελική θέση ισορροπίας. Επίσης οι διαστάσεις των αντικειμένων που χειρίζονται μέσω ρευμάτων αέρα είναι μεγαλύτερες από τις διαστάσεις των μικροαντικειμένων που χρησιμοποιούνται πλέον στη βιομηχανία των Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων.

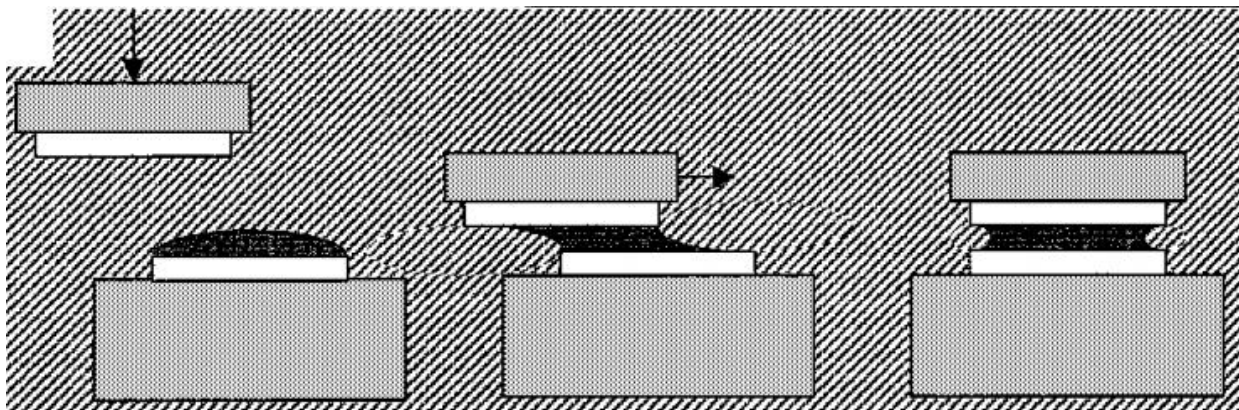
Ο χειρισμός μικροαντικειμένων κατασκευασμένα από μαγνητικά υλικά έχει υλοποιηθεί με την εφαρμογή πεδίων μαγνητικών δυνάμεων. Η κίνηση και η περιστροφή μαγνητικών μικροαντικειμένων σε διεπιφάνειες αέρα/υγρού υλοποιήθηκε στην [23]. Η ανύψωση και ο χειρισμός παραμαγνητικών μίλι-αντικειμένων στο χώρο με τη χρήση μαγνητικών πεδίων έχει επαληθευτεί πειραματικά [24, 25]. Επίσης έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία η κίνηση μικρο – ρομπότ κατασκευασμένο από μαγνητικά υλικά σε ειδική επιφάνεια με ενσωματωμένα μικρο – πηνία (Εικόνα Ε.1.8) [26]. Οι μαγνητικές δυνάμεις είναι αρκετά ισχυρές σε μέγεθος τόσο στο μικρόκοσμο όσο και στο μακρόκοσμο. Το χαρακτηριστικό τους αυτό δημιουργεί προβλήματα προσκόλλησης των μικροαντικειμένων κατά το χειρισμό τους στις αντίστοιχες συσκευές. Οι διαστάσεις των αντικειμένων που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των μαγνητικών πεδίων προσεγγίζουν τις τάξεις των μίλι, και σε συνδυασμό με τα φαινόμενα προσκόλλησης επαληθεύεται ότι δεν ενδείκνυνται για εφαρμογές μικρο-χειρισμού.



Ε.1.8: Περιοχή χειρισμού ρομπότ με μικρο – πηνία [26]

1.3.2.β Χειρισμός μικροαντικειμένων με πεδία δυνάμεων ισχυρότερων των βαρυτικών

Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιασθεί εργασίες για το χειρισμό μικροαντικειμένων με επιφανειακές τάσεις και ηλεκτροστατικές δυνάμεις αξιοποιώντας τη φυσική ροπή διεπιφανειών και αντίθετα φορτισμένων σωμάτων αντίστοιχα να αυτοσυναρμολογηθούν (self - assembly) [27]. Στην εικόνα E.1.9 παρουσιάζεται μια εφαρμογή αυτοσυναρμολόγησης δύο μικροαντικειμένων με επιφανειακές τάσεις εξαιτίας της σταγόνας ανάμεσα στις επιφάνειες των μικροαντικειμένων [28]. Ο Bohringer [29] πρότεινε μεθόδους για την παράλληλη κίνηση σταγόνων με φυσικές διεργασίες όπως αυτή της διηλεκτροφόρησης σε ειδικά σχεδιασμένες επιφάνειες.



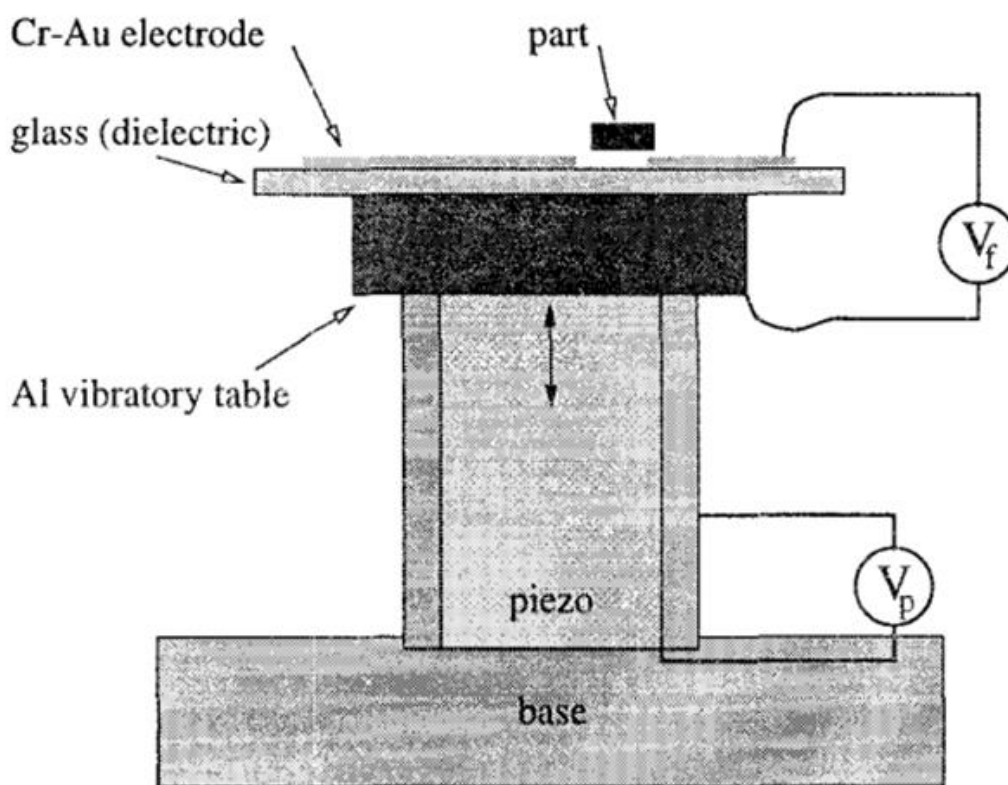
E.1.9: Αυτοσυναρμολόγηση με δυνάμεις προσκόλλησης [28]

Οι ελκτικές ηλεκτροστατικές δυνάμεις ανάμεσα σε αντίθετα φορτισμένα σώματα έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί σε μεθόδους και τεχνικές χειρισμού μικροαντικειμένων. Η παράλληλη τοποθέτηση αγωγικών τετραγωνικών μίλι-πλακιδίων σε ταλαντευόμενες παλέτες όπου παγιδεύονται τα πλακίδια εξαιτίας των ελκτικών ηλεκτροστατικών δυνάμεων παρουσιάζεται στην εικόνα E.1.9. [30]. Η μέθοδος αυτή αποτελεί έως τώρα τη μοναδική επιτυχή διαδικασία παράλληλης κατανομής και συναρμολόγησης αγωγικών τετραγωνικών πλακιδίων μίλι τάξεων μεγέθους σε παλέτες η οποία έχει επαληθευτεί πειραματικά [31] (Εικόνα E.1.11).

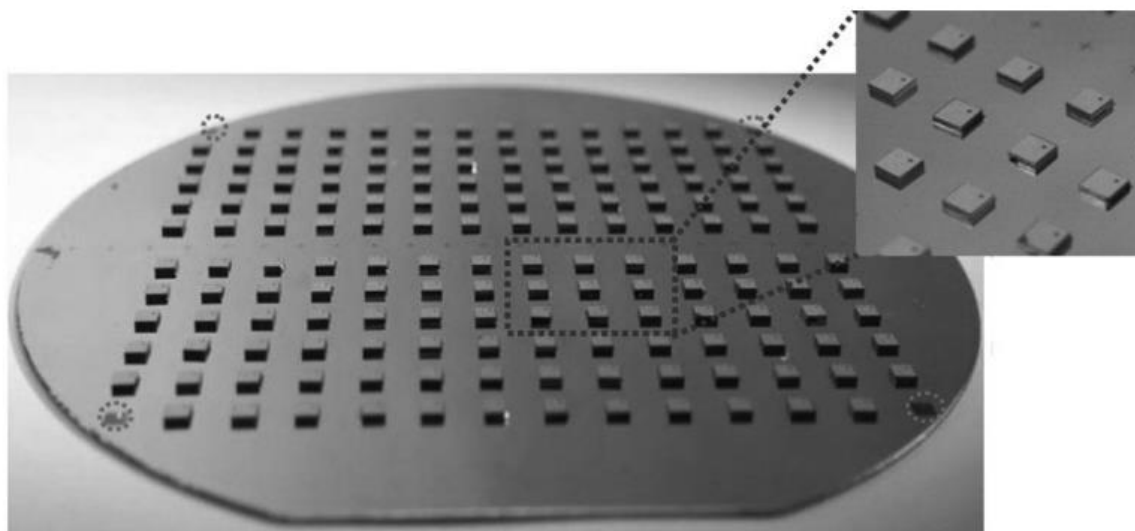
Παρόμοια μέθοδος με της εικόνα E.1.9 για την τοποθέτηση μίλι- αντικειμένων φτιαγμένα από πολυμερή υλικά παρουσιάστηκε στην [32]. Οι J. Dalin et al [33] προσομοίωσαν τον χειρισμό μικροαντικειμένων κατασκευασμένα από μονωτικά υλικά με τη χρήση επιφανειακών τάσεων καθώς και με ηλεκτροστατικές δυνάμεις.

Μια κοινή παρατήρηση τόσο στις μεθόδους χειρισμού με επιφανειακές τάσεις όσο και με ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι η αρχική τοποθέτηση των μικροαντικειμένων στις συσκευές και στα συστήματα όπου γίνεται ο χειρισμός τους. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά για χρήση μικρο – λαβίδων ή πιπετών με τις οποίες μεταφέρονται, προσανατολίζονται και τοποθετούνται στην αρχική τους διαμόρφωση πριν την εκκίνηση κι εφαρμογή των μεθόδων μικρο-χειρισμού . Η χρήση μικρο – εργαλείων περιορίζει την αυτονομία των μεθόδων για χειρισμό αποκλειστικά με πεδία δυνάμεων. Επίσης, ως προς το κομμάτι των ηλεκτροστατικών δυνάμεων ένα σημαντικό ζήτημα αποτελούν οι έντονες δυνάμεις προσκόλλησης που εμφανίζονται μεταξύ του υπο- χειρισμού μικροαντικειμένου και της

συσκευής [34]. Μια κοινή παραδοχή είναι ότι τα φαινόμενα προσκόλλησης εντείνονται όταν αυξάνεται το μέγεθος των μικροαντικειμένων και της ηλεκτρικής τάσης που εφαρμόζεται για την υλοποίηση των εφαρμογών [35].



E.1.10.: Ταλαντευόμενη παλέτα όπου έλκονται αγωγή μικροαντικείμενα εξαιτίας της εμφάνισης ηλεκτροστατικών δυνάμεων [30]



E.1.11: Παλέτες με αγωγή μικροαντικείμενα τα οποία έχουν λάβει τις τελικές τους διαμορφώσεις με μεθόδους αυτοσυναρμολόγησης με ηλεκτροστατικές δυνάμεις [31]

1.4 Ερευνητικό Κενό – Σκοπός της Διατριβής

Συνοψίζοντας τις μεθόδους και τις τεχνικές που περιεγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους του Κεφαλαίου προκύπτει ότι ο ταυτόχρονος χειρισμός πολλαπλών μικροαντικειμένων για εφαρμογές παράλληλου διαχωρισμού και συναρμολόγησης είναι ένα πολύ σημαντικό σκέλος για τη βελτιστοποίηση της μαζικής παραγωγής Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων (MEMS). Η βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι τα συστήματα σειριακού χειρισμού με μικρο- εργαλεία αυξάνει το χρόνο παραγωγής, προκαλώντας ορισμένες φορές φθορές στα μικροαντικείμενα.

Οι μέθοδοι χειρισμού με πεδία δυνάμεων που εφαρμόζονται σε ειδικές συσκευές με τέτοιο τρόπο ώστε να περιορίζεται στο μέγιστο δυνατό η επαφή με τα μικροαντικείμενα αποτελούν το μέλλον στη βιομηχανία των MEMS. Έχουν προταθεί αρκετές εφαρμογές για το χειρισμό μικροαντικειμένων με μαγνητικά πεδία και ρεύματα αέρα, μια κοινή παραδοχή όμως είναι η μεγάλη ένταση των δυνάμεων που αναπτύσσονται με αποτέλεσμα να περιορίζουν τις δυνατότητες χειρισμού στις μικρο- τάξεις μεγέθους. Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις κι οι επιφανειακή τάση είναι δυνάμεις αρκετά ισχυρές στο μικρόκοσμο έναντι των βαρυτικών και πολύ ασθενείς στο μακρόκοσμο.

Συνεπώς, η MEMS βιομηχανία έχει ανάγκη από αυτόνομες συσκευές για παράλληλο χειρισμό πολλαπλών μικροαντικειμένων με δυνάμεις ισχυρές αποκλειστικά στο μικρόκοσμο, υπερπηδώντας σημαντικά εμπόδια όπως οι δυνάμεις προσκόλλησης. Εδώ έρχεται να δώσει λύσεις η παρούσα διατριβή μέσω της «Εξυπνης Πλατφόρμας» αγωγίμων επενεργητών για τον παράλληλο χειρισμό πολλαπλών μικροαντικειμένων με τη χρήση ηλεκτροστατικών πεδίων δυνάμεων χωρίς την παρέμβαση μικρο- εργαλείων καθ' όλη τη διάρκεια του μικροχειρισμού. Η παραγωγική διαδικασία των μικρο- εργοστασίων (micro factories) είναι χωρισμένη σε στάδια, με ένα από αυτά να αποτελεί το κομμάτι του μικρο- χειρισμού [10]. Η «Εξυπνη Πλατφόρμα» είναι μια συσκευή, μέρος της παραγωγής ενός μικρο- εργοστασίου όπου τα μικροαντικείμενα μπορούν να χειρίζονται αυτόνομα (χωρίς τη χρήση μικρο- εργαλείων). Μικρο- αντικείμενα όπως μικρο-ελεγκτές [36] ή μικρο-γεννήτριες [37] - ολοκληρωμένα κυκλώματα τοποθετημένα σε μονωτικά μικρο-κουτιά με αγωγή ηλεκτρόδια στη βάση τους - προορίζονται για τις εφαρμογές της «Εξυπνης Πλατφόρμας». Κάθε κεφάλαιο της διατριβής αποτελεί ένα πακέτο μεθόδων και αλγορίθμων ειδικά προσαρμοσμένων για την πλατφόρμα με στόχο το βέλτιστο μικροχειρισμό των μικροαντικειμένων στην προτεινόμενη διάταξη. Συνοψίζοντας στα επόμενα κεφάλαια:

- Περιγράφονται οι φυσικές διεργασίες στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία της «Εξυπνης Πλατφόρμας»
- Προσδιορίζεται ο τρόπος αλληλεπίδρασης της πλατφόρμας με τα μικροαντικείμενα
- Γίνεται η στατική ανάλυση των μικροαντικειμένων εξαιτίας μιας και μόνο ενεργοποίησης ενός επενεργητή της πλατφόρμας και υπολογίζονται οι δυνάμεις και οι ροπές δυνάμεις που ασκούνται στο μικροαντικείμενο εξαιτίας αυτής
- Προτείνονται νέοι αλγόριθμοι για τον εντοπισμό των δυνατών ενεργοποιήσεων των επενεργητών και προσδιορίζοντας ταυτόχρονα τις κινήσεις που μπορούν να κάνουν τα μικροαντικείμενα εξαιτίας αυτών

Ένα κοινό ζήτημα το οποίο καθιστά τις συσκευές για χειρισμό μικροαντικειμένων με επιφανειακές τάσεις και ηλεκτροστατικές δυνάμεις μη αυτόνομες αποτελεί η ανάγκη για χρήση μικρο-εργαλείων κατά την αρχική τοποθέτηση των μικροαντικειμένων στη συσκευή χειρισμού. Η «Έξυπνη Πλατφόρμα» αποτελεί μέρος της παραγωγής ενός μικρο-εργοστασίου όπου τα μικροαντικείμενα μεταφέρονται σε αυτή με γραμμές μεταφοράς άρα τοποθετούνται αρχικά σε τυχαίες διαμορφώσεις. Για να αποτελέσει η νέα συσκευή μια αυτόνομη μονάδα στη γραμμή παραγωγής του μικρο-εργοστασίου στα κεφάλαια που ακολουθούν:

- Εισάγεται μια νέα μέθοδος για τον παράλληλο κεντράρισμα κι ευθυγράμμιση πολλαπλών μικροαντικειμένων αποφεύγοντας τις μεταξύ τους συγκρούσεις χωρίς την ανάγκη για παρεμβολή μικρο-εργαλείων

Όπως συζητήθηκε στη βιβλιογραφία προτείνεται ένας πολύ μικρός αριθμός εργασιών για την παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων σε διατάξεις και συσκευές για χειρισμό αποκλειστικά με πεδία δυνάμεων. Στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής:

- Υπολογίζονται τα ελεύθερα μονοπάτια για την ταυτόχρονη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων στον ελεύθερο χώρο καταστάσεων με ένα αλγόριθμο της κατηγορίας A^* ο οποίος έχει προσαρμοσθεί ειδικά με βάση τον τρόπο κίνησης των μικροαντικειμένων στην «Έξυπνη Πλατφόρμα».

- Για τη βελτιστοποίηση των υπολογισμών του προσαρμοσμένου A^* προτείνεται μια νέα ευρεστική συνάρτηση κόστους στους υπολογισμούς της οποίας λαμβάνονται υπόψη και οι αποστάσεις μεταξύ γειτονικών μικροαντικειμένων

Οι τρόποι ενεργοποίησης των επενεργητών της Έξυπνης Πλατφόρμας καθώς και οι μέθοδοι και οι αλγόριθμοι για την παράλληλη κίνηση τους αναπτύχθηκαν ώστε να χρησιμοποιηθούν στις εφαρμογές διαχωρισμού και μικροσυναρμολόγησης. Σε αυτό το πλαίσιο:

- Διατυπώνονται νέοι κανόνες για το παράλληλο διαχωρισμό των μικροαντικειμένων
- Προτείνονται μέθοδοι για την παράλληλη συναρμολόγηση των μικροαντικειμένων

Κεφάλαιο 2^ο Η «Έξυπνη Πλατφόρμα» Αγώγιμων Επενεργητών Εφαρμογής Ηλεκτροστατικών

Δυνάμειων

2.1. Σκοπός

Στην παρούσα διατριβή προτείνεται μια μέθοδος χειρισμού μικροαντικειμένων με ηλεκτροστατικές δυνάμεις σε μια ειδική διάταξη. Ο σκοπός είναι η εφαρμογή ηλεκτροστατικών πεδίων δυνάμεων αρκετά ισχυρών ώστε να μετακινήσουν και να περιστρέψουν κάθε μικροαντικείμενο. Στο κεφάλαιο αυτό διερευνώνται οι φυσικές και οι γεωμετρικές παράμετροι που θα χαρακτηρίζουν τα υπό χειρισμό μικροαντικείμενα. Κατόπιν, λαμβάνοντας υπόψη όλες αυτές τις παραμέτρους, προσδιορίζονται οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των μικροαντικειμένων και της πλατφόρμας ως συνέπεια της εφαρμογής ηλεκτρικής τάσεως στα κατάλληλα ηλεκτρόδια. Με τον τρόπο αυτό, αναλύονται οι φυσικές διεργασίες και ο τρόπος λειτουργίας της «Έξυπνης Πλατφόρμας». Τέλος, προτείνονται ημι – εμπειρικά μοντέλα προσαρμοσμένων συναρτήσεων για τη διατύπωση των ηλεκτροστατικών δυνάμεων.

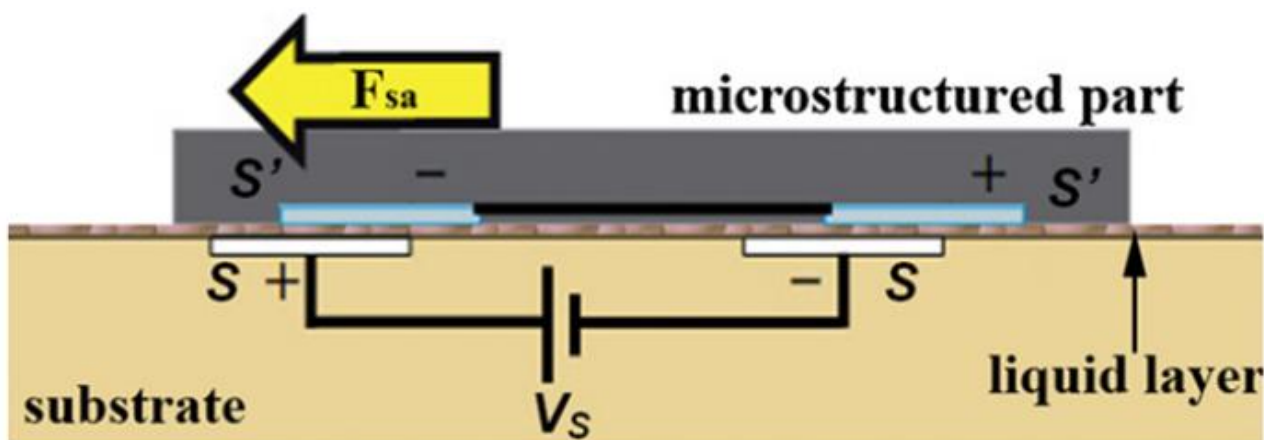
2.2 Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για το χειρισμό μικροαντικειμένων με Ηλεκτροστατικά

Πεδία Δυνάμεων – Ανοιχτά Ζητήματα

Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι αρκετά ισχυρές στον μικρόκοσμο υπερβαίνοντας το μέγεθος των βαρυτικών. Στην βιομηχανία έχουν χρησιμοποιηθεί συστήματα pick – and – place [15] με ειδικά σχεδιασμένες αρπάγες οι οποίες χειρίζονται τα μικροαντικείμενα με την εφαρμογή δυνάμεων Coulomb [38, 39]. Οι Nakao et al [38] πρότειναν ένα ειδικό εργαλείο σε σχήμα βελόνας το οποίο συλλέγει και χειρίζεται μικροαντικείμενα από πολυμίδιο με τη βοήθεια των ηλεκτροστατικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ του μικρο – εργαλείου και των μικροαντικειμένων. Έχει επίσης χρησιμοποιηθεί μικρο- αρπάγη για το χειρισμό μικροαντικειμένων με δυνάμεις οι οποίες είναι απόρροια των κροσσωτών πεδίων που εμφανίζονται στα όρια των κυλινδρικών πυκνωτών [39]. Μια κοινή παραδοχή και στις δυο εφαρμογές είναι τα έντονα προβλήματα εξαιτίας των δυνάμεων προσκόλλησης που οφείλονται στις υψηλές τάσεις που εφαρμόζονται και στο μεγάλο μέγεθος των μικροαντικειμένων [38, 39].

Οι Gengenbach & Boole [40] πρότειναν μια ειδική συσκευή τροφοδότησης (part feeder) μίλι – πλακιδίων από πολυμερή υλικά με ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο διαθέτει ένα υπόστρωμα αλουμινίου και ένα μονωτικό γυαλί στην άνω επιφάνεια του, το οποίο τοποθετείται πάνω σε έναν πιεζοηλεκτρικό επενεργητή ο οποίος ωθεί τη συσκευή να ταλαντώνεται με συχνότητα υπερήχων. Τα μίλι – πλακίδια κινούνται στην επιφάνεια της συσκευής έως ότου παγιδευτούν σε περιοχές όπου το ηλεκτρικό πεδίο παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο. Ο χειρισμός μίλι – πλακιδίων αλουμινίου με ηλεκτροστατικές δυνάμεις τα οποία παγιδεύονται σε υποδοχές από ταλαντευόμενες παλέτες περιεγράφηκε στις [30, 31]. Μια κοινή παραδοχή αποτελεί το γεγονός ότι πρόκειται για αντικείμενα στις τάξεις των μίλι –με αποτέλεσμα να εντείνονται τα φαινόμενα προσκόλλησης που εμφανίζονται κυρίως εξαιτίας του βάρους τους [17]. Συνεπώς οι παλέτες ταλαντώνονται ώστε να περιορισθούν τα φαινόμενα προσκόλλησης πάνω σε αυτές.

Η κίνηση των μικροαντικειμένων αποκλειστικά με ηλεκτροστατικά πεδία δυνάμεων για πλαστικά μικροαντικείμενα τοποθετημένα σε αντίθετα φορτισμένες μετατοπισμένες πλάκες έχει προσομοιωθεί σε ειδικά σχεδιασμένη συσκευή [41]. Η κάθετη τομή της τρισδιάστατης αναπαράστασης της συσκευής παρουσιάζεται στην εικόνα E.2.1. Όπως φαίνεται στην E.2.1, σε ένα μονωτικό υπόστρωμα τοποθετούνται αγωγίμα ηλεκτρόδια (S) τα οποία συνδέονται στα άκρα μιας πηγής με τέτοιο τρόπο ώστε το ένα να φορτίζεται με θετικό και το άλλο με αρνητικό φορτίο. Στην άνω επιφάνεια της συσκευής τοποθετείται ένα μικροαντικείμενο φτιαγμένο από μονωτικό υλικό στην κάτω επιφάνεια του οποίου τοποθετούνται αγωγίμα ηλεκτρόδια (S') τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με τον τρόπο που φαίνεται στην E.2.1. Με την παροχή τάσης στα ηλεκτρόδια της συσκευής φορτίζονται αντίστοιχα και τα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου εξαιτίας της πόλωσης του υγρού διηλεκτρικού, δημιουργώντας ένα κλειστό κύκλωμα δύο πυκνωτών σε σειρά. Τα αντίθετα φορτισμένα ηλεκτρόδια τείνουν να αυτοσυναρμολογηθούν και το μικροαντικείμενο κινείται έως ότου να επέλθει η ισορροπία του συστήματος [42]



E.2.1: Αυτοσυναρμολόγηση με μικροαντικείμενο τοποθετημένο σε πυκνωτικό σύστημα με μετατοπισμένες πλάκες [38]

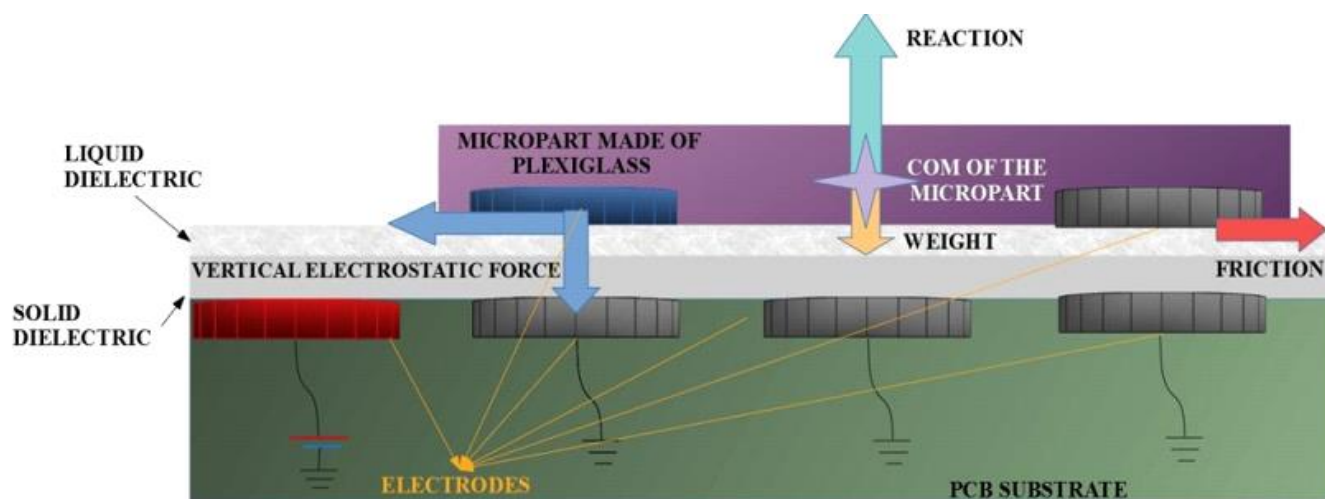
Η μέθοδος χειρισμού εξαιτίας της έλξης μεταξύ αντίθετα φορτισμένων επιφανειών αποτελεί μια ενδιαφέρουσα μέθοδο. Όμως, αξιολογώντας τη διάταξη της εικόνας E.2.1 προκύπτει ότι για την ορθή λειτουργία του συστήματος απαιτείται ένας συγκεκριμένος αριθμός ηλεκτροδίων στο μικροαντικείμενο ώστε να δημιουργείται ένα κλειστό κύκλωμα πυκνωτών σε σειρά. Επίσης οι συγγραφείς εφαρμόζουν τάση ίση και μεγαλύτερη των 100V σε τετραγωνικά μικροαντικείμενα με μήκος $>1\text{mm}$ αυξάνοντας τις πιθανότητες εμφάνισης φαινομένων προσκόλλησης μεταξύ της φορτισμένης πλατφόρμας και των μικροαντικειμένων [17].

2.3 Η «Έξυπνη Πλατφόρμα» ο Τρόπος Λειτουργίας της και η Κίνηση των Μικροαντικειμένων

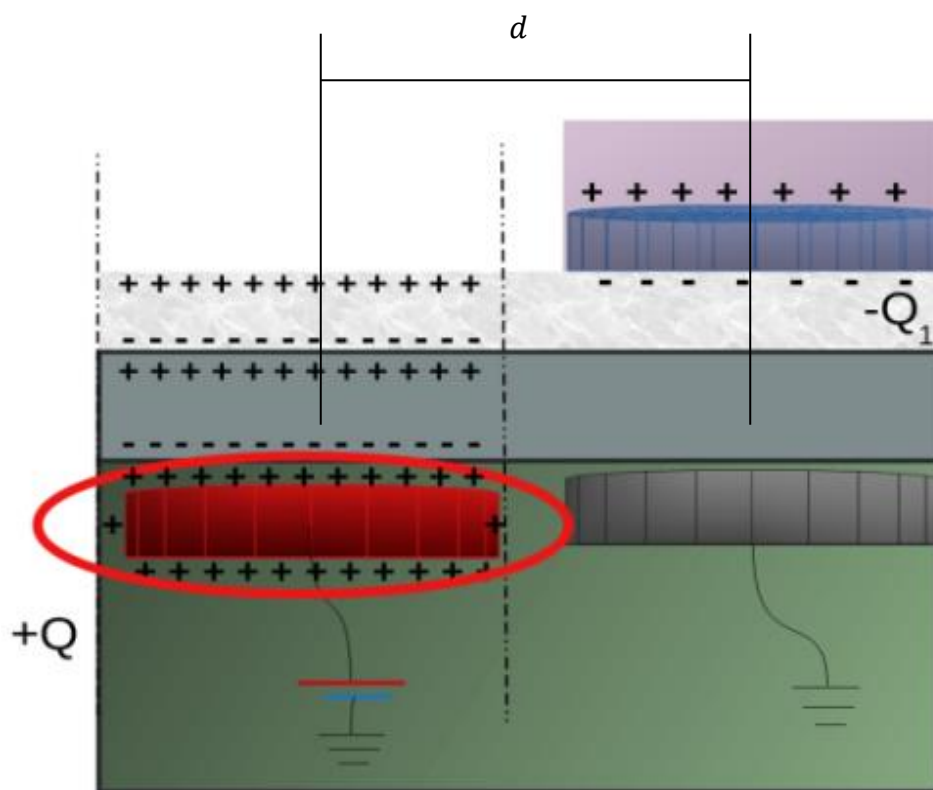
Η συσκευή επονομαζόμενη ως η «Έξυπνη Πλατφόρμα» (ΕΠ) αγωγίων επενεργητών αποτελεί ένα Μικροηλεκτρομηχανικό Σύστημα του οποίου η κάθετη τομή παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.2.2. Το κύριο υπόστρωμα της ΕΠ είναι κατασκευασμένο από ένα μονωτικό υλικό τύπου πλεξιγκλάς πάχους H_{sub} όπου ενσωματώνονται $N \times N$ αγωγή κυκλικά ηλεκτρόδια ακτίνας r . Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται υπερφόρτιση της πλατφόρμας και η εμφάνιση φαινομένων τόξου [41]. Συγκεκριμένα, η απόσταση μεταξύ των κέντρων των γειτονικών ηλεκτροδίων θα πρέπει να είναι ίση με $d_e = 2 \cdot r + d_1 r$ όπου $d_1 \in [0,5 \ 0,896]$ είναι μια σταθερά, η τελική τιμή της οποίας εξαρτάται από την ακτίνα και τα διηλεκτρικά που χρησιμοποιούνται. Τα ηλεκτρόδια μονώνονται με τη βοήθεια ενός λεπτού διηλεκτρικού υμενίου, διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{rs} και πάχους h_{rs} , τιμές οι οποίες εξαρτώνται από το διηλεκτρικό υλικό. Τέλος, στην ανώτερη επιφάνεια της «Έξυπνης Πλατφόρμας» επιστρώνεται ένα παχύρευστο διηλεκτρικό υλικό διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{rl} και πάχους h_{rl} ούτως ώστε να περιορισθούν οι δυνάμεις τριβής κατά την κίνηση των μικροαντικειμένων.

Σε πρώτο επίπεδο η «Έξυπνη Πλατφόρμα» (ΕΠ) και τα μικροαντικείμενα που κινούνται σε αυτή προσομοιάζονται εφαρμόζοντας τις γεωμετρικές και φυσικές παραμέτρους που προτείνονται από τους συγγραφείς στην εργασία [41]. Τα τετραγωνικά μικροαντικείμενα πλευράς μήκους $L_m = 6 \cdot r + 3 \cdot d_1 \cdot r$ δύνανται να είναι κατασκευασμένα από οποιαδήποτε κατηγορία μονωτικού υλικού, στην κάτω επιφάνεια των οποίων τοποθετούνται 3×3 ηλεκτρόδια ίδιας γεωμετρίας και με ίδιο τρόπο τοποθέτησης με αυτά της ΕΠ. Η ακτίνα r των ηλεκτροδίων υπολογίζεται ως συνάρτηση του μεγέθους των μικροαντικειμένων. Σε πειραματικές διατάξεις που έχουν παρουσιασθεί στη βιβλιογραφία έχουν εντοπισθεί έντονα φαινόμενα προσκόλλησης σε περιπτώσεις χειρισμού τετραγωνικών μικροαντικειμένων μήκους $< 1\text{mm}$ [17, 38, 39]. Συνεπώς, ορίζεται ότι $2,5\mu\text{m} \leq r \leq 60\mu\text{m}$ ούτως ώστε $L_m < 500\mu\text{m}$ με αποτέλεσμα οι διαστάσεις των μικροαντικειμένων να είναι αυστηρά ορισμένες εντός της τάξεως των μικρών [34]. Μια σημαντική διαφοροποίηση της «Έξυπνης Πλατφόρμας» σε σχέση με τη προταθείσα διάταξη στην εργασία [41] είναι ο τρόπος σύνδεσης των ηλεκτροδίων με την πηγή. Συγκρίνοντας τις εικόνες Ε.2.1 και Ε.2.2 φαίνεται ότι όλα τα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας είναι γειωμένα και φορτίζεται ένα και μόνο ηλεκτρόδιο έπειτα από την εφαρμογή σταθερής ηλεκτρικής τάσης σε αυτό.

Ο τρόπος ηλεκτρικής φόρτισης των ηλεκτροδίων της ΕΠ παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.2.3 όπου το ηλεκτρόδιο της ΕΠ φορτίζεται επιφανειακά με θετικό ηλεκτρικό φορτίο $+Q$ εξαιτίας της εφαρμογής σταθερού θετικού δυναμικού $+V$. Απόρροια της φόρτισης αυτής είναι η πόλωση των διηλεκτρικών της ΕΠ και ακολούθως η εξ επαγωγής επιφανειακή ηλεκτρική φόρτιση των ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο $-Q_1$.



Ε.2.2 Πλάγια – Κάθετη Τομή της «Έξυπνης Πλατφόρμας»



Ε.2.3 Μέθοδος φόρτισης των ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου

Στην εργασία [41] οι συγγραφείς προσομοίωσαν τα πεδία ηλεκτροστατικών δυνάμεων που εμφανίζονται μεταξύ της πλατφόρμας και του μικροαντικειμένου εφαρμόζοντας ηλεκτρικό δυναμικό στα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου και της πλατφόρμας ώστε $|+Q| = |-Q_1|$. Αυτή η αρχική συνθήκη βοηθάει στον ορισμό πεδίων υψηλότερης έντασης από την αρχική και κατ' επέκταση στον υπολογισμό υψηλότερων ηλεκτροστατικών δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτροδίων. (Γιατί αυτό;; Δεν το καταλαβαίνω). Συνεπώς, τα κύρια ζητήματα που τίθενται είναι:

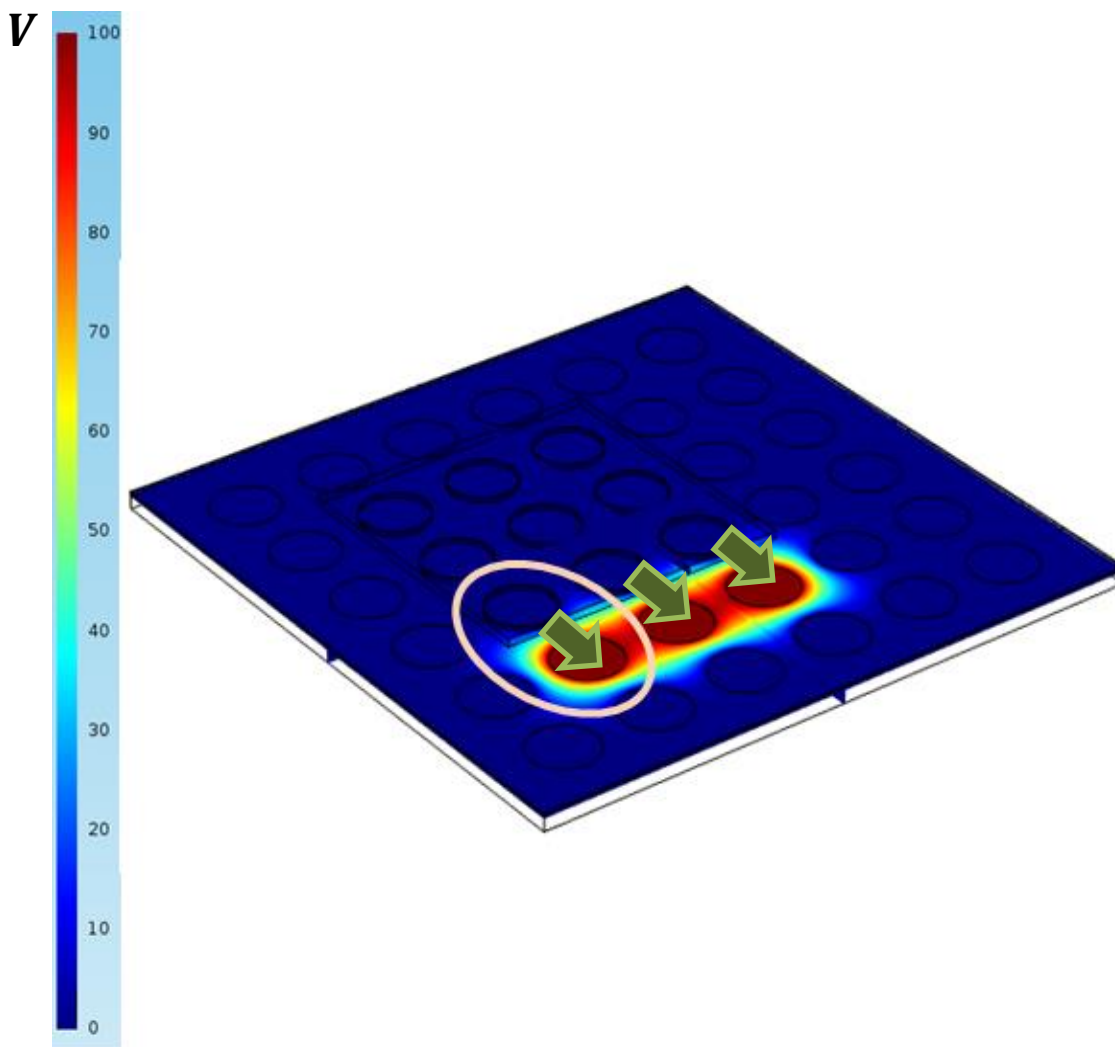
a. Η προσομοίωση των πεδίων δυνάμεων στην περίπτωση όπου εφαρμόζεται ηλεκτρικό δυναμικό αποκλειστικά στο ηλεκτρόδιο της ΕΠ και η μέτρηση του εξ επαγωγής ηλεκτρικού φορτίου $-Q_1$ στο ηλεκτρόδιο του μικροαντικειμένου.

b. Ο υπολογισμός των ηλεκτροστατικών δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ του ζεύγους των ηλεκτροδίων και η επάρκεια τους να ωθήσουν το μικροαντικείμενο πέραν της αρχικά στατικής του κατάστασης.

c. Ο υπολογισμός της μέγιστης απόστασης που μπορούν να έχουν τα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου σε σχέση με αυτά της πλατφόρμας ώστε να επιτυγχάνεται η μετακίνηση του μικροαντικειμένου από την αρχικά στατική του κατάσταση.

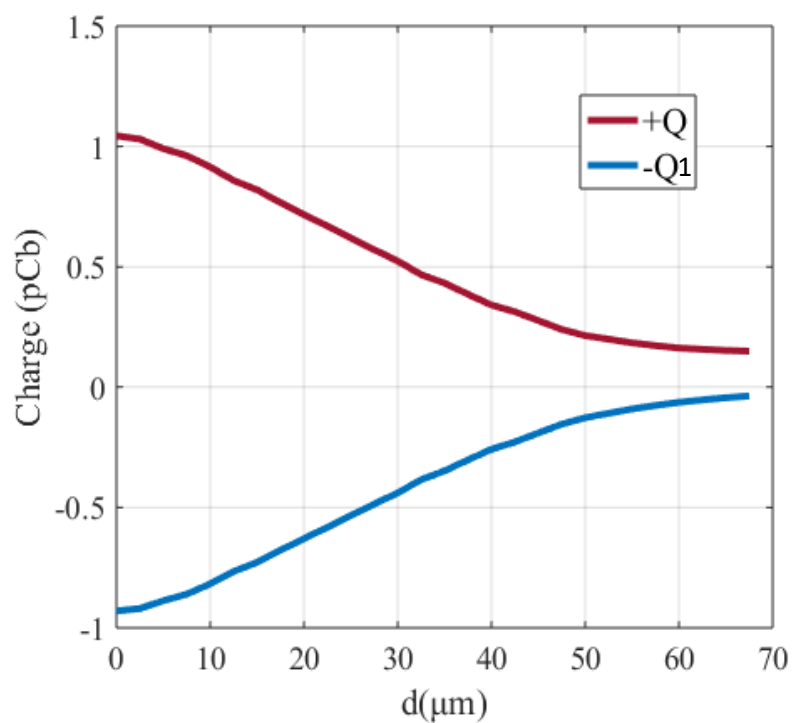
Για τη διερεύνηση του τρόπου λειτουργίας της πλατφόρμας και του εξ επαγωγής ηλεκτρικού φορτίου των ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου, μέρος της πλατφόρμας προσομοιώνεται με λογισμικό όπου εφαρμόζεται η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Π.Σ). Συγκεκριμένα, στο υπόστρωμα το οποίο είναι φτιαγμένο από πλεξιγκλάς τοποθετούνται δισκοειδή ηλεκτρόδια με ακτίνα $r = 25\mu m$ και πάχος $500 nm$ με $d_1 = 0,7$ τιμές οι οποίες καθορίζουν την απόσταση μεταξύ των κέντρων τους ώστε $d_e = 2 \cdot r + d_1 r = 67,5\mu m$. Στην άνω επιφάνεια τοποθετείται ένα τετραγωνικό μικροαντικείμενο με 3×3 ηλεκτρόδια. Από την εργαλειοθήκη των υλικών που διαθέτει το λογισμικό, χρησιμοποιείται ως στερεό διηλεκτρικό το νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4) με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_{rs} = 9,3$ και πάχος $h_{rs} = 2\mu m$ και το οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3) με διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_{rl} = 6$ και πάχος $h_{rl} = 1\mu m$. Στην αρχική προσομοίωση της ΕΠ χρησιμοποιούνται οι φυσικές και γεωμετρικές παράμετροι που προτάθηκαν στην εργασία [41] ώστε να είναι συγκρίσιμες οι δύο διατάξεις-.

Το τετραγωνικό μικροαντικείμενο για το οποίο το μήκος κάθε πλευράς ισούται με $L_m = 6r + 3d_1 r$ και 3×3 ηλεκτρόδια ίδιων διαστάσεων με αυτά της πλατφόρμας τοποθετείται όπως φαίνεται στην εικόνα Ε.2.4. Ως θέση ισορροπίας ορίζεται η θέση στην οποία το Κέντρο Μάζας (ΚΜ) του μικροαντικειμένου συμπίπτει με το κέντρο ενός ηλεκτροδίου της πλατφόρμας και είναι προσανατολισμένο ώστε όλα τα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου να συμπίπτουν με ένα ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας αντίστοιχα. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.2.4 σε τρία ηλεκτρόδια εφαρμόζεται δυναμικό $+100V$ [41] και το ηλεκτρικό φορτίο καθώς και οι δυνάμεις μεταξύ των ηλεκτροδίων στην έλλειψη, προσδιορίζονται συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης μεταξύ των κέντρων τους.

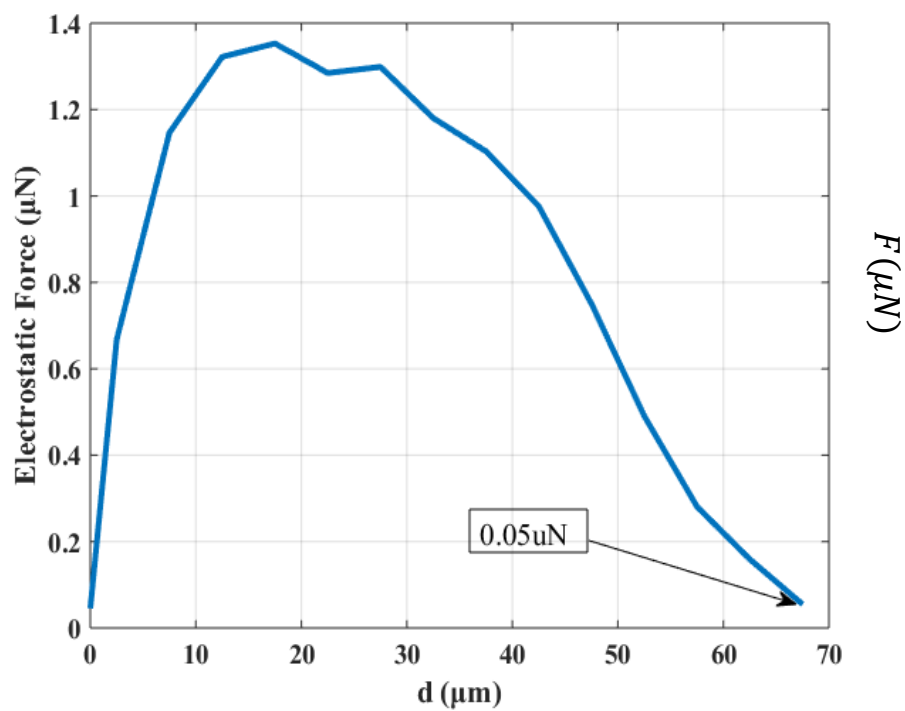


E.2.4 Προσομοίωση της κίνησης του μικροαντικειμένου με 3x3 ηλεκτρόδια σε περιοχή της «Έξυπνης Πλατφόρμα» με εφαρμογή 100V

Στο γράφημα της Εικόνα E.2.5 παρουσιάζεται το ηλεκτρικό φορτίο των ηλεκτροδίων συναρτήσει της απόστασης των κέντρων τους όπου η κόκκινη γραμμή αντιστοιχεί στο ηλεκτρόδιο της ΕΠ και η μπλε στον μικροαντικειμένου. Το γράφημα επιβεβαιώνει την ύπαρξη του ηλεκτρικού φορτίου $-Q_1$ στο ηλεκτρόδιο του μικροαντικειμένου, τέτοιο ώστε $|+Q| \neq |-Q_1|$. Επίσης, το φορτίο και των δύο ηλεκτροδίων αυξάνεται όσο μειώνεται η μεταξύ τους απόσταση διαδικασία η οποία οφείλεται στην αύξηση της συνεισφοράς του ομογενούς πεδίου και τον περιορισμό των περατωτικών (κροσσωτών) πεδίων [42]. Με την εφαρμογή της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων υπολογίζεται η οριζόντια ηλεκτροστατική ελκτική δύναμη (F) μεταξύ των μικροαντικειμένων συναρτήσει της απόστασης (d) των κέντρων τους η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα E.2.6.



Εικόνα E.2.5: Γραφική αναπαράσταση της μεταβολής του φορτίου ζεύγους ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου συναρτήσει της απόστασης των κέντρων τους



E.2.6. Οριζόντια Ελκτική Ηλεκτροστατική δύναμη μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων στην έλλειψη της Εικόνας E.2.4

Με βάση την τάξη μεγέθους του ηλεκτρικού φορτίου και της δύναμης προκύπτει ότι η τάξη μεγέθους του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται τοπικά γύρω από το ηλεκτρόδιο ισούται με $\frac{Electrostatic\ Force}{Charge} = \frac{10^{-6}N}{10^{-12}Cb} = \frac{10^6V}{m}$. Το όριο κατάρρευσης των διηλεκτρικών Si_3N_4 και Al_2O_3 ισούται με $\frac{10^8V}{m}$ [43], άρα το μικροαντικείμενο μπορεί να κινηθεί με ασφάλεια χωρίς την εμφάνιση τέτοιων ανεπιθύμητων φαινομένων.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που τέθηκε ήδη ανωτέρω, είναι το μέγεθος των δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός ζεύγους ηλεκτροδίων και η μέγιστη κι ελάχιστη απόσταση που μπορεί να έχουν μεταξύ τους τα ηλεκτρόδια ώστε να μπορέσει το μικροαντικείμενο να κινηθεί. Για να μπορέσει να κινηθεί το μικροαντικείμενο θα πρέπει οι συνολικές δυνάμεις που ασκούνται, παράλληλα με το επίπεδο της ΕΠ, στο κέντρο μάζας του να επαληθεύουν την Εξίσωση:

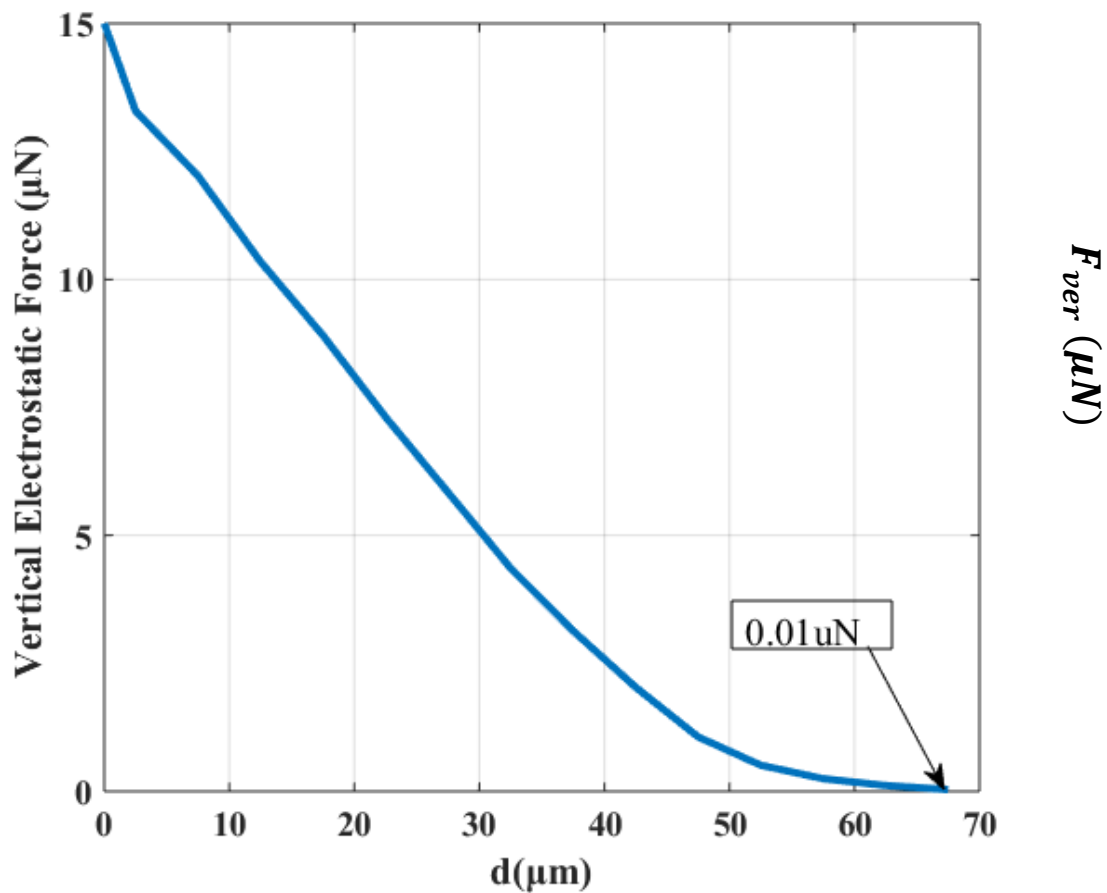
$$\lambda \cdot F > F_s \quad (2.1)$$

όπου, F η δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός ζεύγους ηλεκτροδίων, F_s η στατική τριβή μεταξύ της επιφάνειας και του μικροαντικειμένου και λ ο αριθμός των ηλεκτροδίων που ενεργοποιούνται ταυτόχρονα. Για τον υπολογισμό της στατικής τριβής λαμβάνεται υπόψη η δύναμη F_{ver} η οποία είναι κατακόρυφη στο επίπεδο της ΕΠ καθώς και το βάρος του μικροαντικειμένου. Στην Εικόνα Ε.2.7 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για την F_{ver} συναρτήσει της απόστασης d με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων για το ζεύγος ηλεκτροδίων στην έλλειψη της εικόνας Ε.2.4.

Ο συντελεστής στατικής τριβής μ_s για την περίπτωση του παχύρευστου διηλεκτρικού με νανοσωματίδια Al_2O_3 που χρησιμοποιείται σε αυτή την προσομοίωση ισούται με 0,3 [44], ο όγκος του μικροαντικειμένου είναι ίσως με $L_m \times L_m \times \frac{r}{2}$ και η πυκνότητα του πλεξιγκλάς είναι ίση με $\rho_{plexiglass} = 1.18 \cdot 10^6 \text{ mg}/\mu\text{m}^3$). Το βάρος του μικροαντικειμένου για τις συγκεκριμένες διαστάσεις προκύπτει ότι είναι ίσο με 0,05μN. Η κατακόρυφη δύναμη μεταξύ ενός ζεύγους ηλεκτροδίων όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι μέγιστη, ισούται με 0,01μN. Η στατική τριβή δίνεται από :

$$T_s = \mu_s \cdot (\lambda \cdot F_{ver} + W) \quad (2.2)$$

Όπου F_{ver} η κατακόρυφη δύναμη και W το βάρος. Επομένως για το παράδειγμα που διερευνάται στην Εικόνα Ε.2.7 η συνολική στατική τριβή του μικροαντικειμένου ισούται με: $0,3 \cdot (3 \cdot 0,01 + 0,05) \mu N = 0,018 \mu N$ όταν με βάση τη γραφική στην Εικόνα 2.6, $F = 0,05 \mu N$. Συνεπώς επαληθεύεται επαρκέστατα η συνθήκη $3 \cdot F > F_s$ μιας και $3 \cdot 0,05 \mu N > 0,021 \mu N$. Συγκρίνοντας τα γραφήματα στις εικόνες Ε.2.6 και Ε.2.7 παρατηρείται ότι όταν $d = 0$, $F_{ver} \gg F$ αυξάνοντας αντίστοιχα το μέγεθος της στατικής τριβής.



E.2.7. Κατακόρυφη Ελκτική Ηλεκτροστατική δύναμη μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων στην έλλειψη της Εικόνας E.2.4

Ολοκληρώνοντας αυτή τη διερεύνηση προκύπτουν τα εξής θετικά συμπεράσματα:

1. Με την υλοποίηση των νέων προσομοιώσεων - χωρίς να απαιτείται το ηλεκτρικό φορτίο ηλεκτροδίων πλατφόρμας και μικροαντικειμένων να είναι το ίδιο -, επιβεβαιώνεται ότι:

a. το ηλεκτρικό φορτίο στα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου έπεται από την εξ επαγωγής φόρτιση τους συμβάλλει στην αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτροδίων, με ηλεκτροστατικές ελκτικές δυνάμεις επαρκούς μεγέθους ώστε να αφήσει το μικροαντικείμενο τη στατική κατάσταση.

2. Από την καμπύλη της δύναμης συναρτήσει της απόστασης παρατηρείται ότι:

a. Το μέγεθος της οριζόντιας δύναμης για την ηλεκτρική τάση των 100V είναι κατά πολύ ισχυρότερη της στατικής τριβής συνεπώς τίθενται τα ακόλουθα ερωτήματα:

- i. Μπορεί να εφαρμοσθεί μικρότερο ηλεκτρικό δυναμικό στο ηλεκτρόδιο της ΕΠ;
- ii. Μπορούν να τοποθετηθούν λιγότερα ηλεκτρόδια στην κάτω επιφάνεια των μικροαντικειμένων;

3. Επίσης παρατηρείται ότι η οριζόντια δύναμη τείνει στο μηδέν όταν τα κέντρα των ηλεκτροδίων ταυτίζονται, συνεπώς το μικροαντικείμενο δεν μπορεί να αρχίσει να κινείται όταν το ηλεκτρόδιο κάτω από το Κέντρο Μάζας του είναι ενεργοποιημένο.

Στις επόμενες ενότητες αυτού του κεφαλαίου προτείνονται νέοι τρόποι διάταξης ηλεκτροδίων στα μικροαντικείμενα και διερευνάται η δυνατότητα μείωσης του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού δυναμικού και αντίστοιχα η ικανότητα του μικροαντικειμένου να κινείται.

2.4 Τρόποι Διάταξης των Ηλεκτροδίων στα Μικροαντικείμενα

Στη διάταξη που παρουσιάζεται στην εικόνα E.2.1, είναι φανερό ότι για να λειτουργήσει ορθώς η διάταξη που προτείνεται από τους συγγραφείς [38], πρέπει ο αριθμός των ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου να είναι ίσος με αυτών της πλατφόρμας ώστε το κύκλωμα των πυκνωτών σε σειρά με την πηγή συνεχούς τάσης να λειτουργήσει ορθά. Ο νέος τρόπος λειτουργίας ο οποίος προτάθηκε για πρώτη φορά στην [45] και εφαρμόζεται και διερευνάται εκτενώς στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, δεν περιορίζει τόσο τον αριθμό όσο και τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων. Συγκεκριμένα, για να ενεργοποιηθεί το κύκλωμα του πυκνωτή σε σειρά με την πηγή τάσης (εικόνα E.2.2) απαιτείται η τοποθέτηση ενός ηλεκτροδίου σε ικανή απόσταση ώστε να φορτισθεί εξ επαγωγής εξαιτίας της πόλωσης των διηλεκτρικών. Σε περίπτωση που δεν εφαρμοσθεί δυναμικό ώστε να φορτισθεί το ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας δεν δημιουργείται κύκλωμα μιας και τα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας παραμένουν γειωμένα.

Η νέα διάταξη και η διαδικασία με βάση την οποία λειτουργεί, οδηγεί στην ιδέα ότι, ίσως θα αρκούσε για το χειρισμό του μικροαντικειμένου η τοποθέτηση ενός και μόνο ηλεκτροδίου στην κάτω επιφάνεια του σε σημείο τέτοιο ώστε το κέντρο του ηλεκτροδίου να συμπίπτει με το Κέντρο Μάζας του. Όμως:

1. Η ύπαρξη ενός ηλεκτροδίου οδηγεί στην ανάγκη για αύξηση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού δυναμικού, ενώ ο στόχος είναι η εφαρμογή του ελάχιστου δυνατού

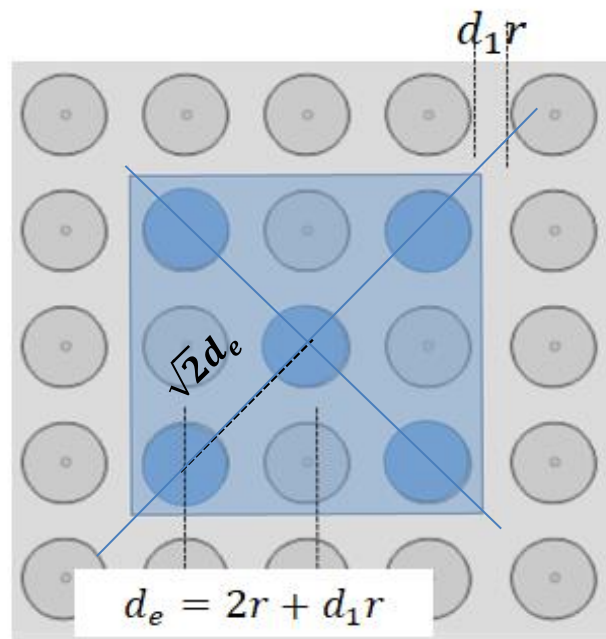
2. Είναι επίσης ανέφικτο να εκτελέσει περιστροφή το μικροαντικείμενο, ως προς το Κέντρο Μάζας του, για να αλλάξει προσανατολισμό σε περίπτωση που αυτό επιβάλλεται, καθώς η μηχανική ροπή της δύναμης ως προς το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου, είναι μηδέν όταν η δύναμη ασκείται στο Κέντρο Μάζας.

Συνεπώς, χρειάζεται να τοποθετηθούν επιπλέον ηλεκτρόδια στο μικροαντικείμενο ώστε να υλοποιηθεί ομαλά η διαδικασία του μικροχειρισμού. Στα πλαίσια του 2ου Κεφαλαίου προτείνονται δύο νέοι τρόποι διάταξης με βάση τους οποίους τοποθετείται στο μικροαντικείμενο ο ελάχιστος δυνατός αριθμός ηλεκτροδίων ώστε να μπορεί να κινείται μεταξύ δύο Θέσεων Ισορροπίας. Με βάση τις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου, προκύπτει ότι για ένα μικροαντικείμενο που ισορροπεί με τέτοιο τρόπο ώστε το Κέντρο Μάζας του να ταυτίζεται με το κέντρο ενός ηλεκτροδίου της πλατφόρμας, η συνολική οριζόντια ηλεκτροστατική ελκτική δύναμη μεταξύ των γειτονικών φορτισμένων ηλεκτροδίων είναι επαρκής ώστε το μικροαντικείμενο να εγκαταλήψει την στατική του κατάσταση. Επίσης, όταν ένα ηλεκτρόδιο του μικροαντικειμένου βρίσκεται πάνω από ένα φορτισμένο ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας το μικροαντικείμενο εγκλωβίζεται στη θέση αυτή εξαιτίας των κατακόρυφων ελκτικών δυνάμεων οι

οποίες αντίστοιχα αυξάνουν το μέγεθος της στατικής τριβής. Συνεπώς, υπό κατάλληλες συνθήκες, δύο γειτονικά ηλεκτρόδια της πλατφόρμας μπορούν να αποτελέσουν αντίστοιχα θέση ισορροπίας για ένα μικροαντικείμενο. Το ζήτημα που τίθεται είναι εάν το μικροαντικείμενο μπορεί να ισορροπήσει ανάμεσα σε δύο γειτονικά ηλεκτρόδια της πλατφόρμας.

2.4.1 Τετραγωνική Διάταξη Ηλεκτροδίων

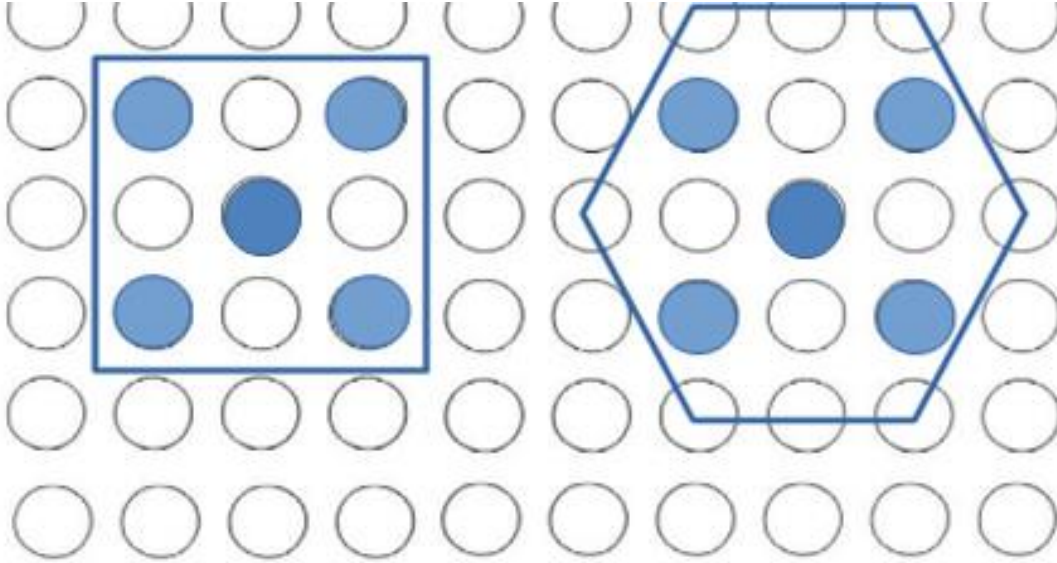
Ο πρώτος τρόπος επονομαζόμενος ως “τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων” έχει σχεδιασθεί με τέτοιο τρόπο ώστε υπό κατάλληλες συνθήκες φόρτισης της πλατφόρμας δύο γειτονικά ηλεκτρόδια να αποτελέσουν θέσεις ισορροπίας για το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου. Η τετραγωνική διάταξη αναπαρίσταται στην Εικόνα E.2.8 όπου τέσσερα ηλεκτρόδια ίδιων διαστάσεων με αυτά της πλατφόρμας (μπλε δίσκοι εικόνας E.2.8) τοποθετούνται γύρω από το ηλεκτρόδιο στο Κέντρο Μάζας (ΚΜ) του μικροαντικειμένου. Όπως φαίνεται στην εικόνα E.2.8 στο Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου τοποθετείται επίσης ένα ηλεκτρόδιο. Τα τέσσερα ηλεκτρόδια τοποθετούνται στα άκρα του τετραγώνου με τέτοιο τρόπο ώστε τα κέντρα τους να ταυτίζονται με το κέντρο ενός ηλεκτροδίου της ΕΠ. Η οριζόντια και κάθετη απόσταση μεταξύ των 4 ηλεκτροδίων στα άκρα του μικροαντικειμένου ισούται με $2d_e$ με αποτέλεσμα η απόσταση του καθενός εξ αυτών με το ΚΜ του μικροαντικειμένου ισούται με $\sqrt{2}d_e$.



E.2.8 Η τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων

Όπως φαίνεται στην εικόνα E.2.9, η τετραγωνική διάταξη των ηλεκτροδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μικροαντικείμενα εξαγωνικής γεωμετρίας. Συγκρίνοντας την τετραγωνική διάταξη των πέντε ηλεκτροδίων με αυτή

των 3x3 παρατηρείται ότι παρόλο που έχει μειωθεί ο αριθμός των ηλεκτροδίων που τοποθετούνται στο μικροαντικείμενο μπορεί να εφαρμοσθούν για το χειρισμό του ενεργοποιήσεις αντίστοιχες της εικόνας E.2.5.



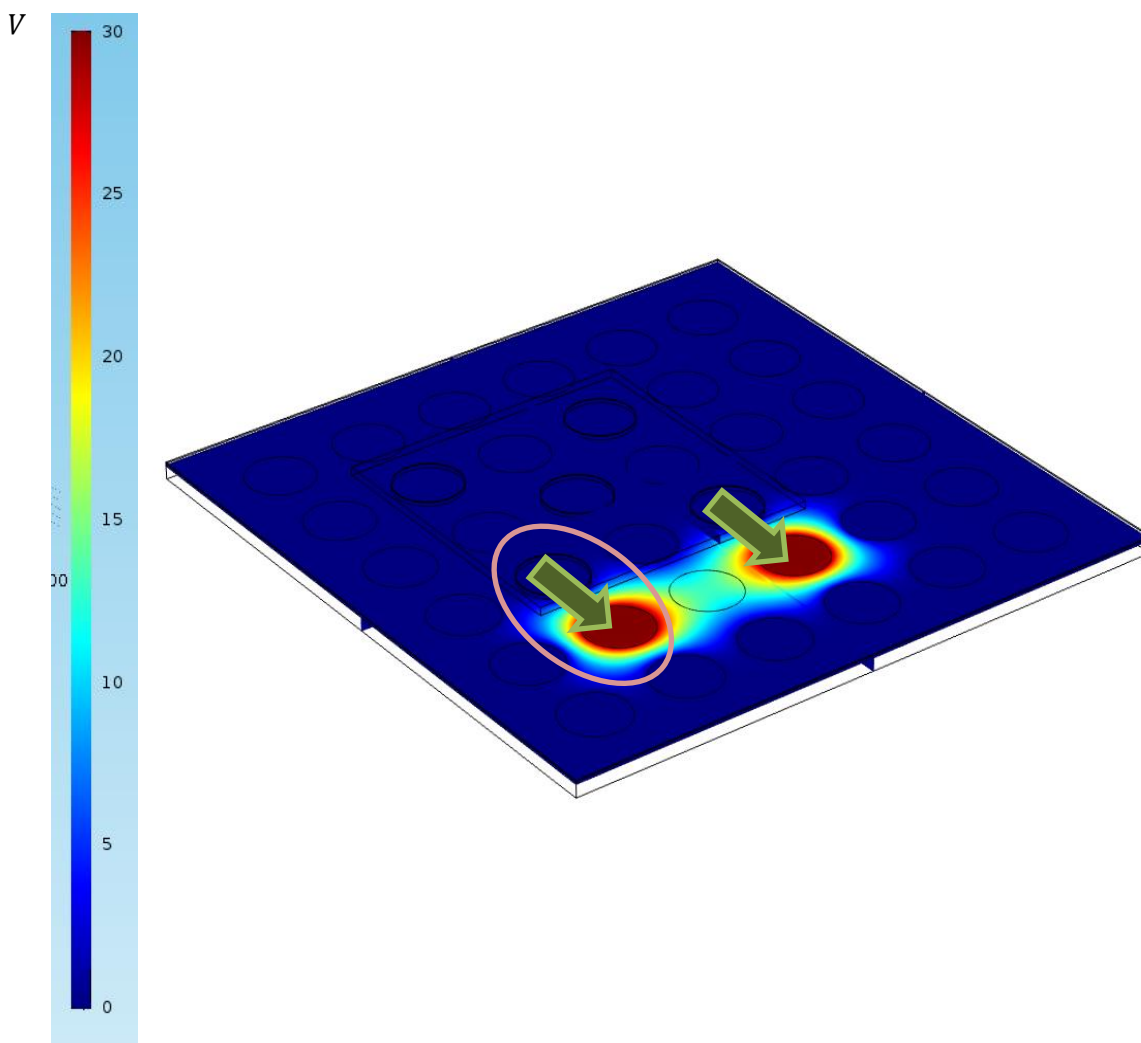
E.2.9 Τετραγωνική Διάταξη Ηλεκτροδίων σε Τετραγωνικό κι Εξαγωνικό Μικροαντικείμενο

Στην εικόνα E.2.10 αναπαρίσταται η προσομοιωμένη πλατφόρμα με ένα στατικό τετραγωνικό μικροαντικείμενο με τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων. Για τη βελτιστοποίηση της συσκευής με στόχο την λειτουργία της ΕΠ με χαμηλότερο εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό δυναμικό στα ηλεκτρόδια της, επιλέγεται η χάφνια (HfO_2) ως στερεό διηλεκτρικό με $\epsilon_{rs} = 26$ και πάχος $h_{rs} = 500\text{nm}$ [43]. Στην εικόνα E.2.10 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο της ΕΠ για την περίπτωση όπου $r = 25\ \mu\text{m}$.

Από τους υπολογισμούς της δύναμης με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου παρατηρήθηκε ότι δυναμικό άνω των 100V είναι αρκετά υψηλό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Εμπειρικά επιλέχθηκαν διάφορες τιμές δυναμικού μικρότερες των 100V για όλες τις δυνατές ακτίνες των ηλεκτροδίων έως ότου προκύψουν τιμές για την οριζόντια δύναμη για απόσταση $d = d_e$ μεγαλύτερη της στατικής τριβής. Όπως φαίνεται στην εικόνα E.2.10 στην περίπτωση όπου $r = 25\ \mu\text{m}$ το δυναμικό των 30V είναι το ελάχιστο που εφαρμόστηκε στον ηλεκτρόδιο της ΕΠ ώστε στο μικροαντικείμενο να ασκηθούν οριζόντιες δυνάμεις συνολικά μεγαλύτερες σε μέγεθος της στατικής τριβής.

Όπως φαίνεται στην εικόνα E.2.9 εξαιτίας των διανυσμάτων της δύναμης, όταν το ηλεκτρόδιο του μικροαντικειμένου πλησιάσει αυτό της πλατφόρμας έως ότου ταυτισθούν τα κέντρα τους, το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου θα μετατοπισθεί αντίστοιχα στο γειτονικό ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας. Στις επόμενες παραγράφους διερευνάται η περίπτωση που το Κέντρο Μάζας του βρίσκεται σε θέση τέτοια ώστε να μην ταυτίζεται

με το κέντρο του ηλεκτροδίου ώστε να απέχει από το γειτονικό ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας λιγότερο από d_e . Οι τιμές της οριζόντιας δύναμης συναρτήσει της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων όταν $r = 15 \mu m$, $r = 25 \mu m$ και $r = 60 \mu m$ όπως προκύπτουν από τους υπολογισμούς με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων παρουσιάζονται στη γραφική της εικόνας E.2.11.



E.2.10 Διερεύνηση των φυσικών ιδιοτήτων τετραγωνικού μικροαντικειμένου με τετραγωνική διάταξη με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων – 30V

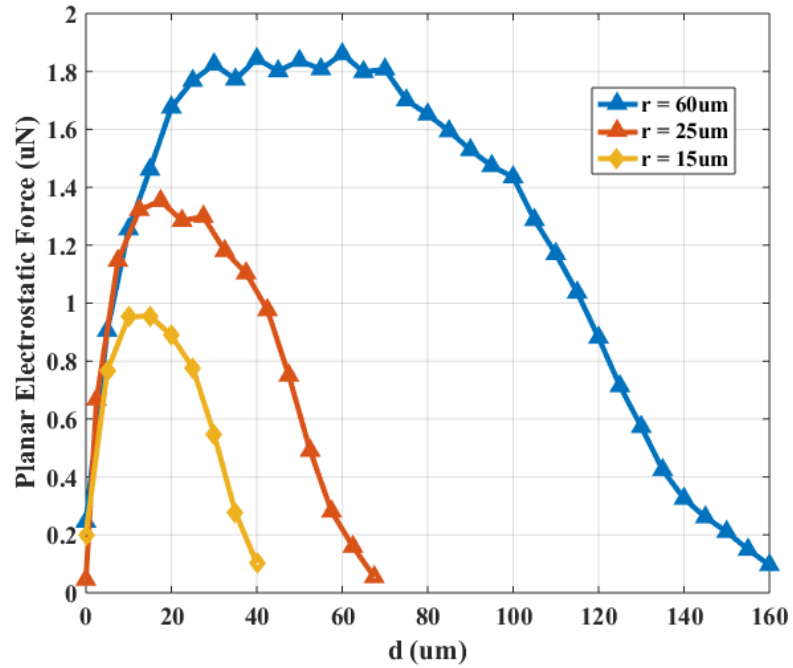
Όπως συζητήθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, για να μπορέσει να εγκαταλήψει το μικροαντικείμενο τη στατική κατάσταση θα πρέπει η συνολική οριζόντια δύναμη που ασκείται στο μικροαντικείμενο να είναι μεγαλύτερη της στατικής τριβής. Για την καλύτερη ανάλυση των υπολογισμών στην εικόνα E.2.12 αναπαρίσται

η κάθετη δύναμη μεταξύ των ηλεκτροδίων επί το συντελεστή στατικής τριβής μ_s . Συγκρίνοντας τα γραφήματα στις εικόνες E.2.11, E.2.12 όταν $d \leq 2r$ η οριζόντια δύναμη είναι αισθητά μεγαλύτερη του γινομένου της κάθετης ηλεκτροστατικής δύναμης επί το συντελεστή. Όταν όμως για την επικαλυπτόμενη επιφάνεια μεταξύ του ηλεκτροδίου της ΕΠ και του μικροαντικειμένου ισχύει ότι $\frac{(2r-0.1r)}{2r} \cdot 100\% = \frac{120-6\mu m}{120\mu m} \cong \frac{(50-2.5)\mu m}{50\mu m} \cong \frac{(30-1.5)\mu m}{30\mu m} > 95\%$ το μέγεθος της κάθετης δύναμης είναι πολύ μεγαλύτερο της οριζόντιας. Οι κάθετες δυνάμεις μεταξύ του ζεύγους των ηλεκτροδίων συνεισφέρουν στην αύξηση της στατικής τριβής καθιστώντας ανέφικτη η κίνηση του μικροαντικειμένου.

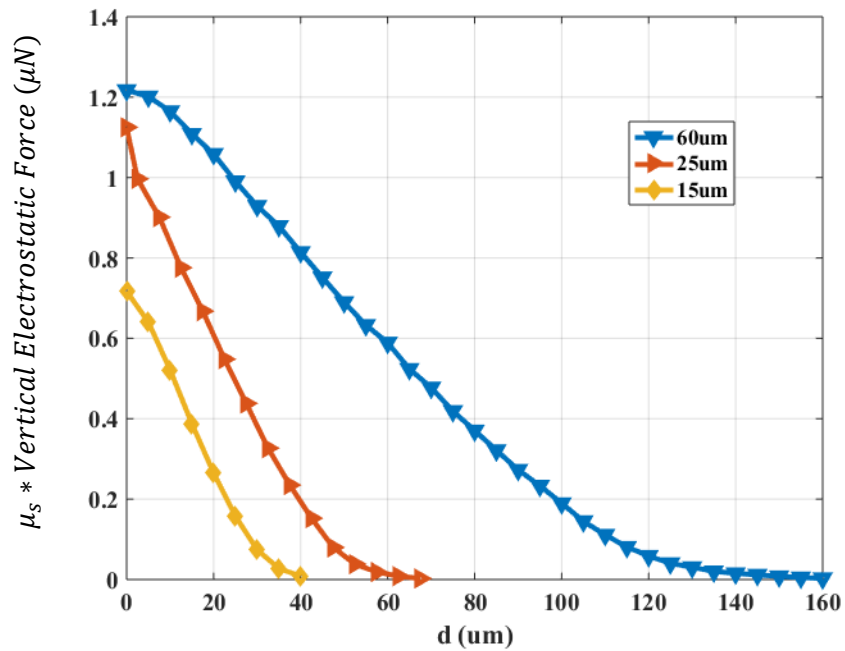
Δύο επιφάνειες με θετικό κι αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο με διηλεκτρικά υλικά ανάμεσα τους τείνουν να αυτοσυναρμολογηθούν και να κεντραριστούν (να ταυτισθούν τα κέντρα τους) όταν το ποσοστό αλληλοεπικάλυψης μεταξύ των πλακών τους είναι $>0\%$ [39]. Συνεπώς, αξιολογώντας τις γραφικές στις εικόνες E.2.11 και E.2.12 ένα ηλεκτρόδιο του αρχικά στατικού μικροαντικειμένου μπορεί να κεντραριστεί σε ένα ηλεκτρόδιο της ΕΠ εφόσον $0.1r < d \leq 2r$. Εάν αρχικά, η αλληλοεπικάλυψη του ηλεκτροδίου του στατικού μικροαντικειμένου και του ηλεκτροδίου της πλατφόρμας είναι μεγαλύτερη του 95% τότε το ηλεκτρόδιο του μικροαντικειμένου θα θεωρείται ως κεντραρισμένο στο ηλεκτρόδιο της ΕΠ.

Έχει απομείνει η διερεύνηση για την περίπτωση όπου $d > 2r$. Συγκεκριμένα, με βάση τις εικόνες E.2.11 και E.2.12 στην περίπτωση που η απόσταση μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων είναι τέτοια ώστε $d = d_e$ η οριζόντια δύναμη μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι οριακά μεγαλύτερη της κάθετης. Με βάση τη σχέση (2.1) εύκολα επαληθεύεται ότι η συνολική οριζόντια δύναμη που ασκείται στο μικροαντικείμενο είναι μεγαλύτερη της στατικής τριβής. Στον πίνακα Π.2.1 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της συνολικής οριζόντιας δύναμης και το ελάχιστο δυναμικό που μπορεί να εφαρμοσθεί στα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας ώστε να αφήσει το μικροαντικείμενο τη στατική κατάσταση, για διάφορες τιμές της ακτίνας των ηλεκτροδίων.

Από τους υπολογισμούς του Π.2.1 προκύπτει ότι όσο μεγαλώνουν οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων μεγαλώνουν κατά πολύ οι διαστάσεις των μικροαντικειμένων αυξάνοντας αρκετά και το βάρος τους. Όπως φαίνεται και από τις τιμές του V με την αύξηση του βάρους αυξάνεται και το ηλεκτρικό δυναμικό που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια της ΕΠ ώστε τα μικροαντικείμενα να εγκαταλήψουν την στατική τους κατάσταση. Αυτές οι δύο παρατηρήσεις επιβεβαιώνουν υποθέσεις που έχουν ήδη διατυπωθεί στη βιβλιογραφία όπου σημειώνεται ότι οι εφαρμογές μικροχειρισμού με ηλεκτροστατικά πεδία δυνάμεων πρέπει να περιορίζονται σε διαστάσεις και δυναμικό ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα προσκόλλησης [17].



E.2.11 Οριζόντια Ελκτική Ηλεκτροστατική δύναμη μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων στην έλλειψη της Εικόνας E.2.10



E.2.12 Κατακόρυφη Ελκτική Ηλεκτροστατική δύναμη μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων στην έλλειψη της Εικόνας E.2.10

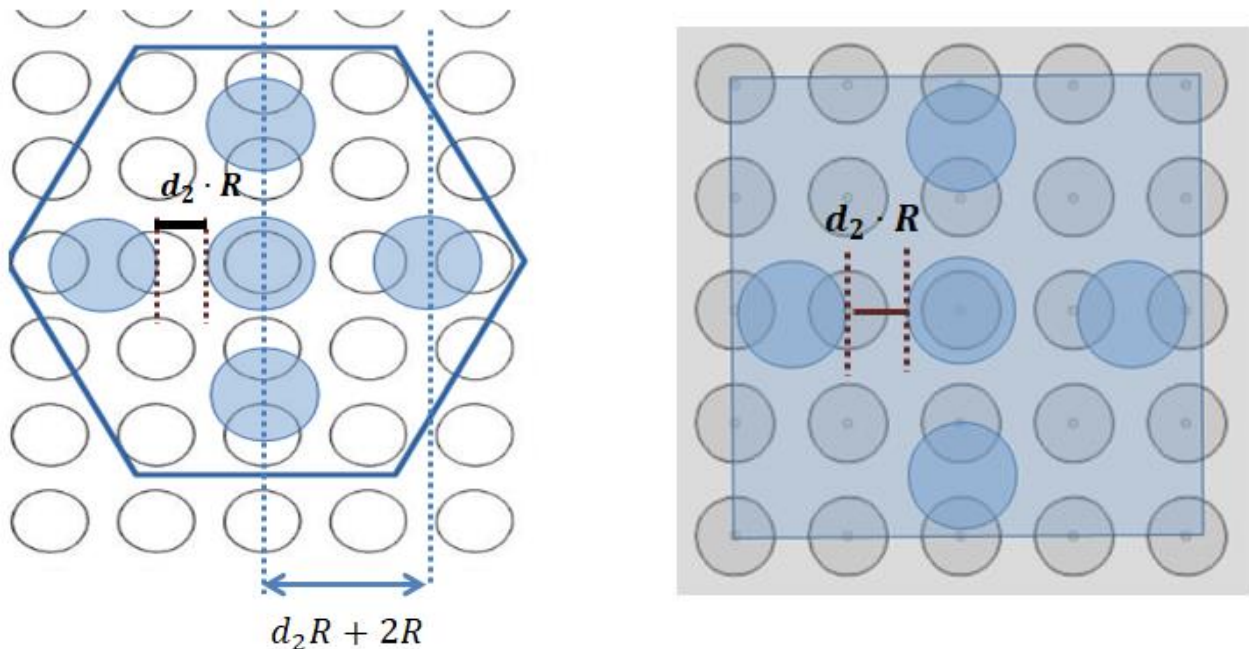
Π 2.1: Υπολογισμοί μέγιστου δυναμικού που μπορεί να εφαρμοσθεί σε 2 ηλεκτρόδια της ΕΠ ούτως ώστε να μετατοπισθεί το μικροαντικείμενο μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας

r (μm)	Δυναμικό V (Volts)	$2 \cdot F_z$ (μN)	W (μN)	F_s (μN)	$2 \cdot F$ (μN)
2,5	10	0,00085	0,005	0,001755	0,0035
5	15	0,001	0,008	0,0027	0,0058
10	20	0,0015	0,013	0,00435	0,0088
15	20	0,003	0,02	0,0069	0,01
20	30	0,006	0,03	0,0108	0,03
25	30	0,008	0,05	0,0174	0,04
30	35	0,0309	0,0699	0,03024	0,065
35	35	0,0406	0,111	0,04548	0,0747
40	40	0,0414	0,166	0,06222	0,0887
45	40	0,0428	0,236	0,08364	0,0943
50	40	0,0694	0,324	0,11802	0,1472
55	50	0,0882	0,431	0,15576	0,1865
60	60	0,093	0,559	0,1956	0,228

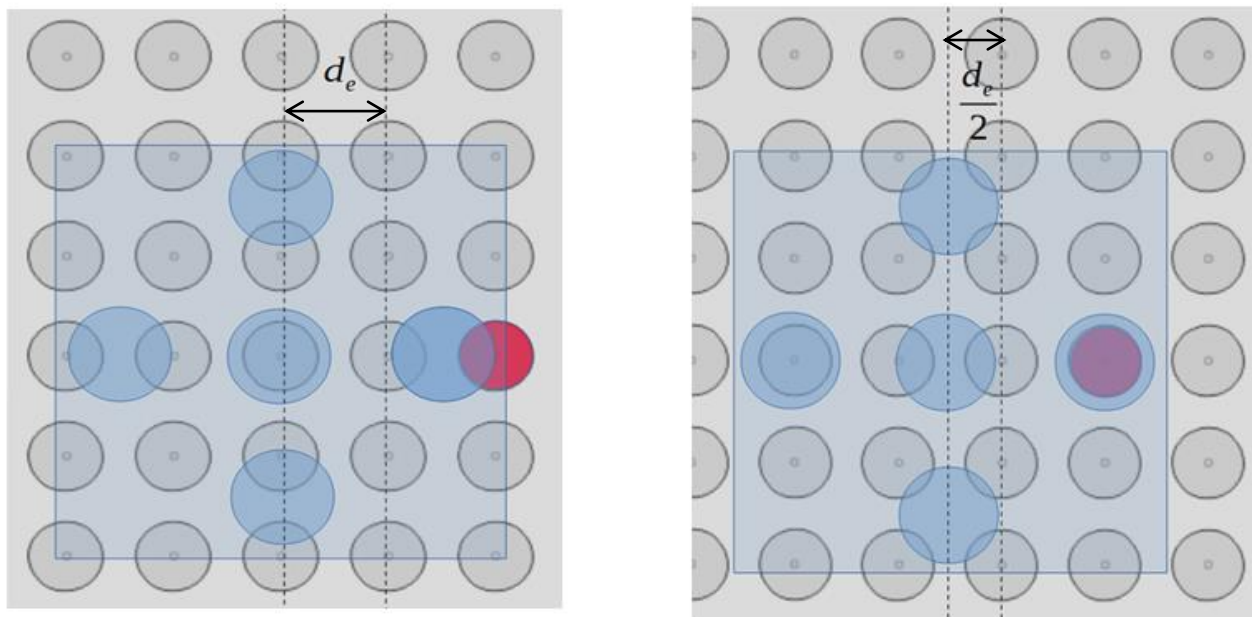
2.4.2 Σταυροειδής Διάταξη

Η τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων αποσκοπεί στην κίνηση του Κέντρου Μάζας του μικροαντικειμένου μεταξύ δύο ηλεκτροδίων της πλατφόρμας ορίζοντας το φορτισμένο ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας ως την τελική θέση ισορροπίας. Ο δεύτερος τρόπος ο οποίος καλείται ως σταυροειδής διάταξη ηλεκτροδίων σχεδιάστηκε με σκοπό τον καθορισμό μιας 2^{ης} θέσης ισορροπίας μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας για το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου. Ένα σημαντικό δεδομένο είναι ότι η οριζόντια ηλεκτρική δύναμη μηδενίζεται όταν τα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου και της «Εξυπνης Πλατφόρμας» τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτουν τα κέντρα τους ενώ μεγιστοποιείται η κάθετη εφαρμοζόμενη δύναμη.

Ο σταυροειδής τρόπος διάταξης παρουσιάζεται στην εικόνα E.2.13 όπου τα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου έχουν ακτίνα R μεγαλύτερη από αυτή των μικροαντικειμένων τέτοια ώστε να επαληθεύεται ο λόγος $\frac{r}{R} = 0.714$. Τα ηλεκτρόδια τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε η απόσταση μεταξύ των κέντρων των γειτονικών ηλεκτροδίων να είναι ίση με $d_2 R + 2R$ όπου $\frac{d_1}{d_2} = 0.7812$.



E.2.13 Σταυροειδής Διάταξη σε εξαγωνικό και τετραγωνικό μικροαντικείμενο

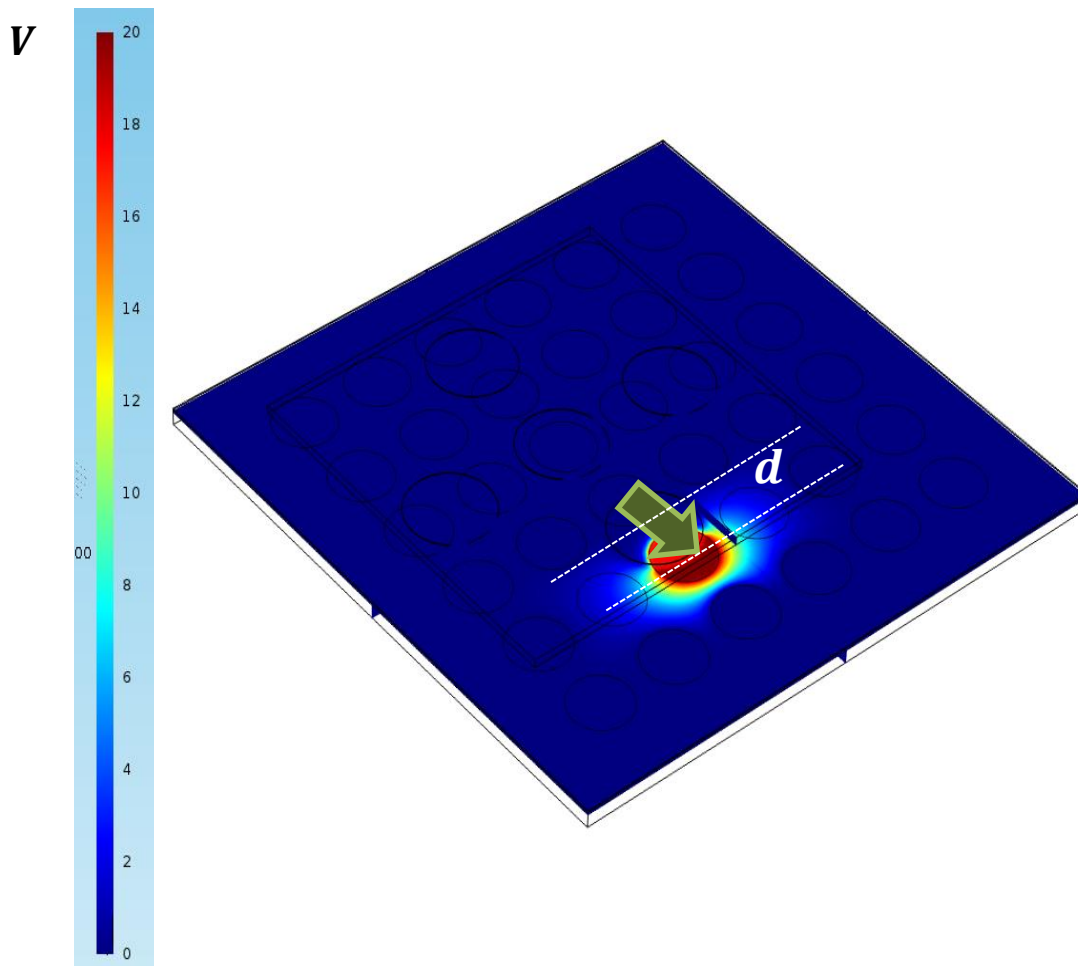


Ε.2.14: Μετατόπιση κατά $\frac{d_e}{2}$ με το μικροαντικείμενο σταυρωτής τοποθέτησης

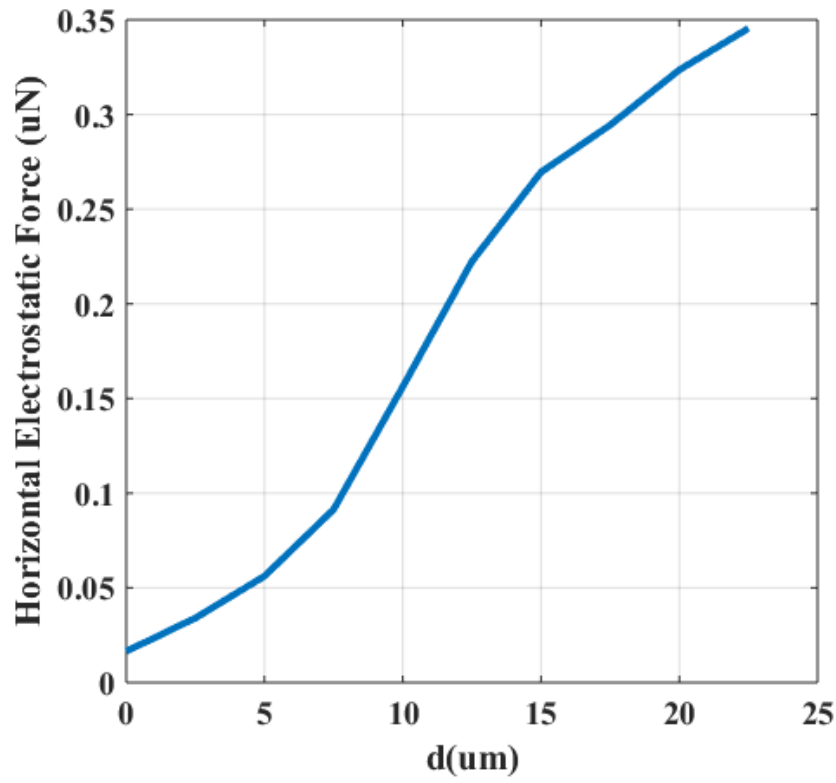
Όπως στην τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων και στη σταυροειδή διάταξη τοποθετείται ένα ηλεκτρόδιο με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτει το κέντρο του με το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου. Όπως φαίνεται στην Ε.2.14 η αρχική τοποθέτηση του μικροαντικειμένου είναι τέτοια ώστε όλα τα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου να καλύπτουν εν μέρει τέσσερα ηλεκτρόδια της ΕΠ. Με βάση την ανάλυση για την αλληλεπίδραση μεταξύ των φορτισμένων ηλεκτροδίων της πλατφόρμας και των μικροαντικειμένων στις προηγούμενες παραγράφους, προκύπτει ότι στην περίπτωση της εικόνας Ε.2.14 (β) το μικροαντικείμενο παραμένει ακίνητο. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στις ισχυρές κάθετες δυνάμεις μέσω των οποίων αλληλοεπιδρούν το φορτισμένο ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας και του μικροαντικειμένου το οποίο υπερκαλύπτει με τέτοιο τρόπο ώστε να ταυτίζονται τα κέντρα τους. Συνεπώς το μικροαντικείμενο μπορεί να ισορροπήσει στη θέση που παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.2.14 (β)

Τμήμα της «Εξυπνης Πλατφόρμας» (ΕΠ) με ένα τετραγωνικό μικροαντικείμενο με σταυροειδή διάταξη και η αλληλεπίδραση του με ένα ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο της ΕΠ προσομοιώνεται με κατάλληλο λογισμικό. Η επίδραση της ελκτικής ηλεκτροστατικής δύναμης στο στατικό μικροαντικείμενο της εικόνας Ε.2.14 διερευνάται στο προσομοιωμένο μοντέλο και οι δυνάμεις που ασκούνται στο ηλεκτρόδιο του μικροαντικειμένου συναρτήσει της απόστασης του από το ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο της ΕΠ υπολογίζονται με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Η προσομοιωμένη πλατφόρμα της Ε.2.15 έχει γεωμετρικά χαρακτηριστικά τέτοια ώστε $r = 15\mu m$, $d_1 = 0.7$ και $\frac{r}{R} = 0.714 \rightarrow R = 21\mu m$ και $d_e = 2 \cdot 15\mu m + 0,7 \cdot 15\mu m = 40,5\mu m$. Με βάση τους υπολογισμούς του Πίνακα 2.1, επιλέγεται το δυναμικό 20V και εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας. Οι υπολογισμοί της δύναμης συναρτήσει της απόστασης αναπαρίστανται στα γραφήματα της εικόνας Ε.2.16.

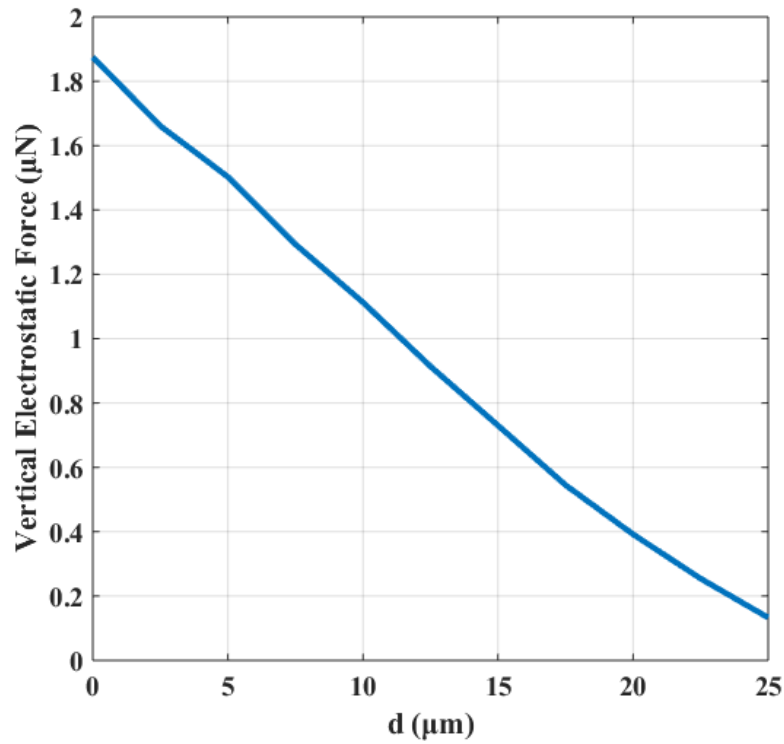
Από τα γραφήματα στις εικόνες E.2.16 και E.2.17 επιβεβαιώνεται ότι οριζόντια δύναμη που παρουσιάζεται είναι επαρκής για να μετατοπισθεί το μικροαντικείμενο εγκαταλείποντας τη στατική του κατάσταση μιας κι είναι μεγαλύτερη της κάθετης δύναμης ($0,35\mu N > 0,3 * 0,18\mu N = 0,054\mu N$). Επίσης αποδεικνύεται ότι η δύναμη τείνει στο μηδέν όταν το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου απέχει $\frac{d_e}{2}$ από το γειτονικό ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας όπου ήταν αρχικά κεντραρισμένο



E.2.15: Διερεύνηση των φυσικών ιδιοτήτων τετραγωνικού μικροαντικειμένου με τοποθέτηση σταυρού με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων – 20V



E.2.16: Οριζόντια δύναμη μεταξύ ζεύγους ηλεκτροδίων για μετατόπιση του μικροαντικειμένου κατά $\frac{d_e}{2}$



E.2.17: Κάθετη δύναμη μεταξύ ζεύγους ηλεκτροδίων για μετατόπιση του μικροαντικειμένου κατά $\frac{d_e}{2}$

2.5 Προσαρμοσμένη Συνάρτηση για την Οριζόντια Δύναμη μεταξύ των Ηλεκτροδίων

Η οριζόντια ελκτική δύναμη αποτελεί μια πολλή σημαντική παράμετρο η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της κίνησης του μικροαντικειμένου και στα επόμενα κεφάλαια της διδακτορικής διατριβής. Το ζεύγος των ηλεκτροδίων μικροαντικειμένου και ΕΠ προσεγγίζει τη συμπεριφορά ενός πυκνωτή με μετατοπισμένες πλάκες. Η ενέργεια ενός πυκνωτή ισούται με:

$$W = \frac{1}{2} C(d) V^2 \quad (2.3)$$

Όπου $C(d)$ η χωρητικότητα του πυκνωτή η οποία για την περίπτωση δύο διηλεκτρικών ανάμεσα στις πλάκες δίνεται από τη σχέση:

$$C(d) = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{rl} \cdot \epsilon_{rs}}{(\epsilon_{rs} \cdot h_{rl} + \epsilon_{rl} \cdot h_{rs})} \cdot A(d) \quad (2.4)$$

Όπου $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m η διηλεκτρική σταθερά στο κενό και $A(d)$ η επιφάνεια αλληλοεπικάλυψης μεταξύ των πλακών. Το μέτρο της ομογενούς δύναμης στην επιφάνεια της πλατφόρμας $F^{hom}(d)$ προκύπτει από την μερική πρώτη παράγωγο της ενέργειας ως προς την απόσταση d και η οποία δίνεται από την Εξίσωση (2.5). Ως $F^{hom}(d)$ ορίζεται η δύναμη που αναπτύσσεται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου όταν $0 \leq d < 2r$ δηλαδή όταν τα ηλεκτρόδια αλληλεπικαλύπτονται

$$|F^{hom}(d)| = \frac{\partial W}{\partial d} = \frac{1}{2} \frac{\partial C(d)}{\partial d} V^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{rl} \cdot \epsilon_{rs}}{(\epsilon_{rs} \cdot h_{rl} + \epsilon_{rl} \cdot h_{rs})} \frac{\partial A(d)}{\partial d} V^2 \quad (2.5)$$

Όμως, από τους υπολογισμούς με τα Πεπερασμένα Στοιχεία που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες δεικνύεται ότι υπάρχουν ηλεκτροστατικές δυνάμεις ακόμα κι όταν $d > 2r$. Οι δυνάμεις αυτές οφείλονται αποκλειστικά στα κροσσωτά πεδία γύρω από τα ηλεκτρόδια [44]. Από την εξίσωση (2.5) προκύπτει ότι η μεταβολή της $F^{hom}(d)$ εξαρτάται από τη μεταβολή της $A(d)$ συναρτήσει της απόστασης. Γεωμετρικά η $A(d)$ διαφέρει όταν ο λόγος των ακτινών των ηλεκτροδίων της πλατφόρμας και του μικροαντικειμένου ισούται με: 1) $= 1$ και 2) $\neq 1$. Στις επόμενες ενότητες η προσαρμοσμένη συνάρτηση της δύναμης υπολογίζεται για τις δύο περιπτώσεις.

2.5.1 Μικροαντικείμενα με Τετραγωνική Διάταξη Ηλεκτροδίων

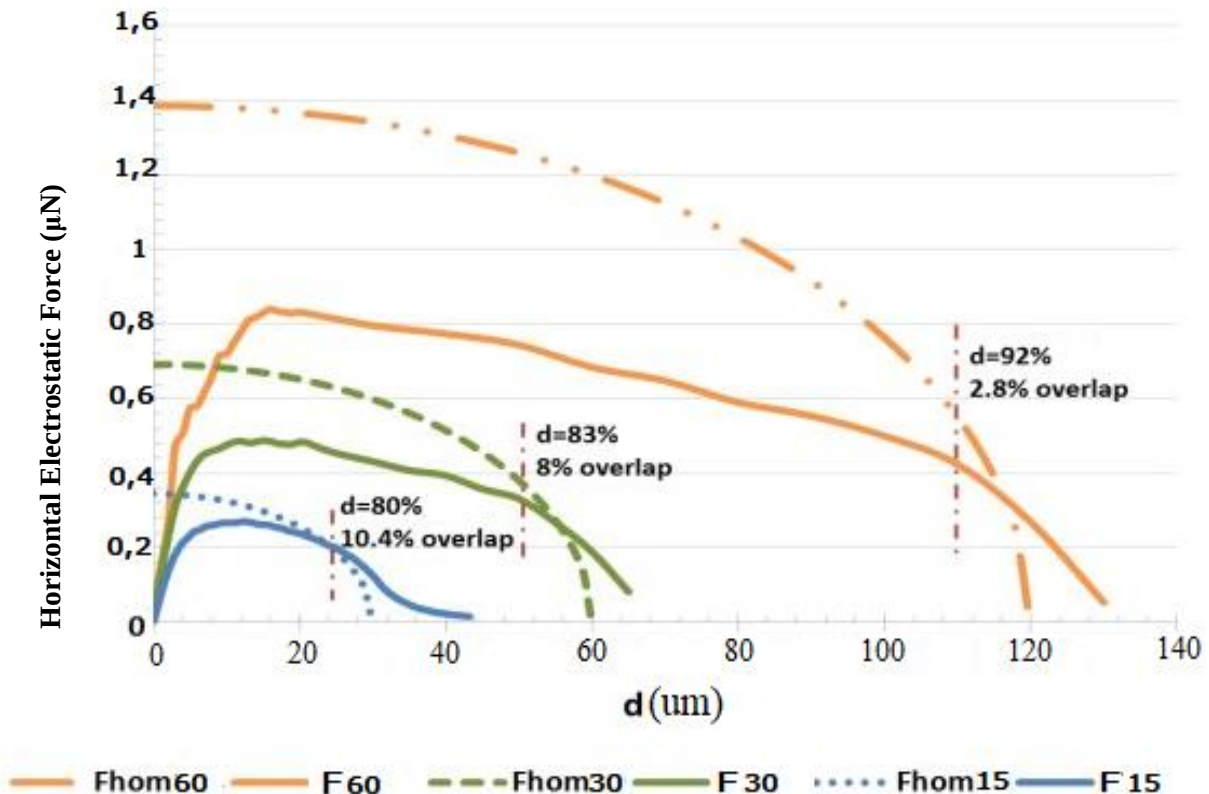
Στην περίπτωση της τετραγωνικής διάταξης, τα ηλεκτρόδια των μικροαντικειμένων έχουν ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις με αυτά της πλατφόρμας. Η επιφάνεια $A(d)$ σε αυτή την περίπτωση δίνεται από :

$$A(d) = 2r^2 \arccos\left(\frac{d}{2r}\right) - \frac{d\sqrt{4r^2 - d^2}}{2} \quad (2.6)$$

Με αποτέλεσμα η ομογενής δύναμη να δίνεται από:

$$(2.5) \rightarrow |F^{hom}(d)| = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rl} \cdot \varepsilon_{rs}}{(\varepsilon_{rs} \cdot h_{rl} + \varepsilon_{rl} \cdot h_{rs})} \sqrt{4r^2 - d^2} V^2 \quad (2.7)$$

Στην Εικόνα Ε.2.18 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση με τους υπολογισμούς των ομογενών δυνάμεων και τις τιμές της δύναμης που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων για την περίπτωση των ηλεκτροδίων με ακτίνα $r = 15\mu m$, $r = 30\mu m$ και $r = 60\mu m$ συναρτήσει της απόστασης

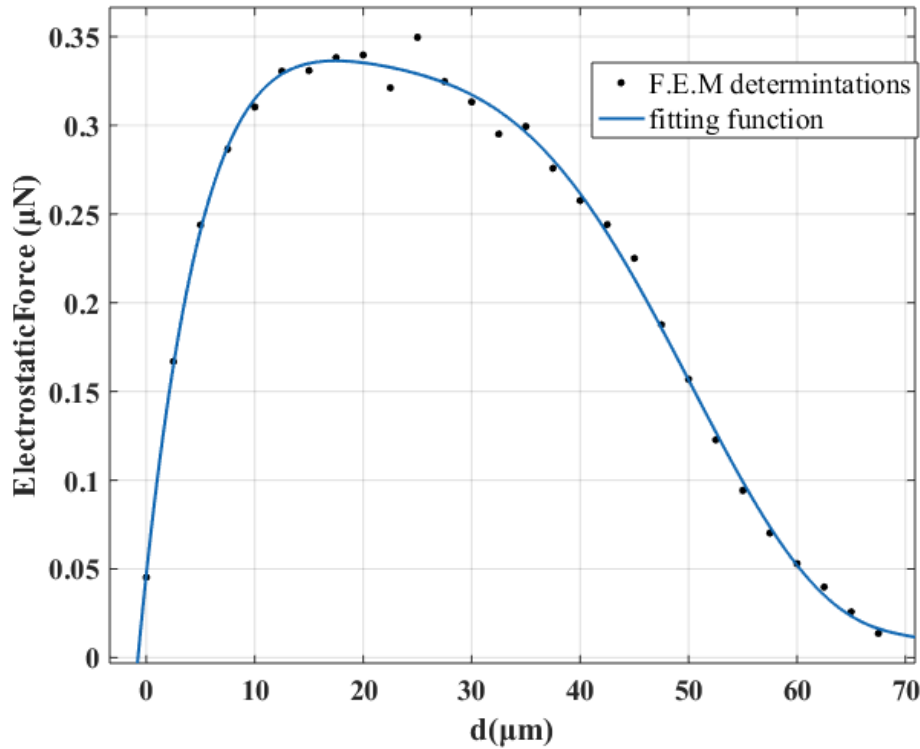


Ε.2.18 Σύγκριση της Ομογενούς δύναμης με τους υπολογισμούς από τα Πεπερασμένα Στοιχεία

Από τις καμπύλες της δύναμης συναρτήσει της απόστασης προκύπτει ότι η δύναμη του ομογενούς πεδίου αποκλίνει από αυτή των πεπερασμένων όσο αυξάνεται η ακτίνα. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται η ύπαρξη κροσσωτών πεδίων ακόμα κι όταν υπάρχει επικάλυψη ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Η προσαρμοσμένη συνάρτηση για την οριζόντια δύναμη μεταξύ των ηλεκτροδίων υπολογίζεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων η οποία δίνεται από την κλαδωτή συνάρτηση:

$$F(d) = \begin{cases} |F^{hom}(d)|_{p_1} = |F^{hom}(d)| \left(\beta_2 \left(\frac{d}{2r} \right)^2 + \beta_1 \frac{d}{2r} + \beta_0 \right) & 0 \leq d < 2r \\ p_2 = \sum_{s=0}^6 a_s \left(\frac{d}{2r} \right)^s, & d \geq 2r \end{cases} \quad (2.8)$$

Όπου $\beta_s, s' \in [0, 2]$ και $a_s, s \in [0, 6]$ είναι οι συντελεστές των πολυνόμων οι οποίοι προσαρμόζονται για τις διάφορες ακτίνες των ηλεκτροδίων. Στο γράφημα της Εικόνα E.2.18 παρουσιάζονται οι τιμές της οριζόντιας δύναμης συναρτήσει της απόστασης για ένα ζεύγος ηλεκτροδίων με $r = 25\mu m$. Οι διακριτές τιμές αντιστοιχούν στους υπολογισμούς που προέκυψαν με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων ενώ η συνεχής καμπύλη αναπαριστά την προσαρμοσμένη συνάρτηση. Η γραφική στην E.2.19 επαληθεύει τη μέθοδο υπολογισμού της προσαρμοσμένης συνάρτησης η οποία χρησιμοποιείται στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής.



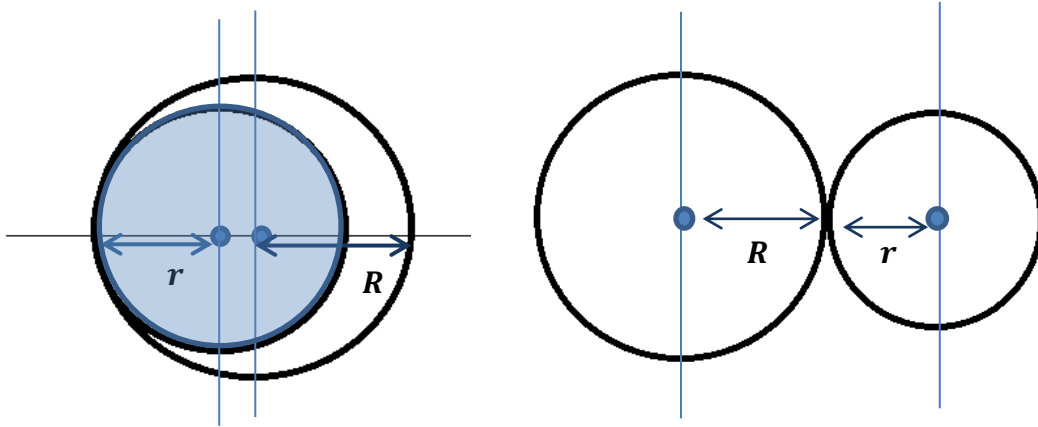
E.2.19 Εφαρμογή της Προσαρμοσμένης Συνάρτησης στους Υπολογισμούς με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων στοιχείων

2.5.2 Μικροαντικείμενα με Σταυροειδή Διάταξη Ηλεκτροδίων

Όταν τα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου έχουν ακτίνα R τέτοια ώστε $\frac{r}{R} = 0.714$ η αλληλεπικαλυπτόμενη επιφάνεια $A(d)$ δίνεται από την εξίσωση:

$$A(d) = r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + r^2 - R^2}{2dr} \right) + r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + r^2 - R^2}{2dR} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{-d+r+R} \cdot \sqrt{d+r+R} \cdot \sqrt{d-r+R} \cdot \sqrt{d+r-R} \quad (2.9)$$

Η πρώτη παράγωγος της $A(d)$ ως προς d εμπεριέχεται στο παράρτημα Π1. Από τις αλληλεπικαλυπτόμενες περιοχές των ηλεκτροδίων στην εικόνα Ε.2.19 παρατηρείται ότι τα ηλεκτρόδια έχουν κοινή επιφάνεια όταν ισχύει για την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων: $R - r < d < R + r$.



Ε.2.19 Αλληλεπικαλυπτόμενη επιφάνεια μεταξύ ηλεκτροδίων με διαφορετικές ακτίνες

Η προσαρμοσμένη συνάρτηση όταν για την περιοχή $R - r < d < R + r$ δίνεται από:

$$F(d) = 2,653 \cdot \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{rl} \cdot \varepsilon_{rs}}{(\varepsilon_{rs} \cdot h_{rl} + \varepsilon_{rl} \cdot h_{rs})} \cdot \frac{\partial A(d)}{\partial d} \cdot \mathbf{V}^2 \cdot e^{-1,625k^{0,24}}, \quad (2.10)$$

$$R - r < d < R + r$$

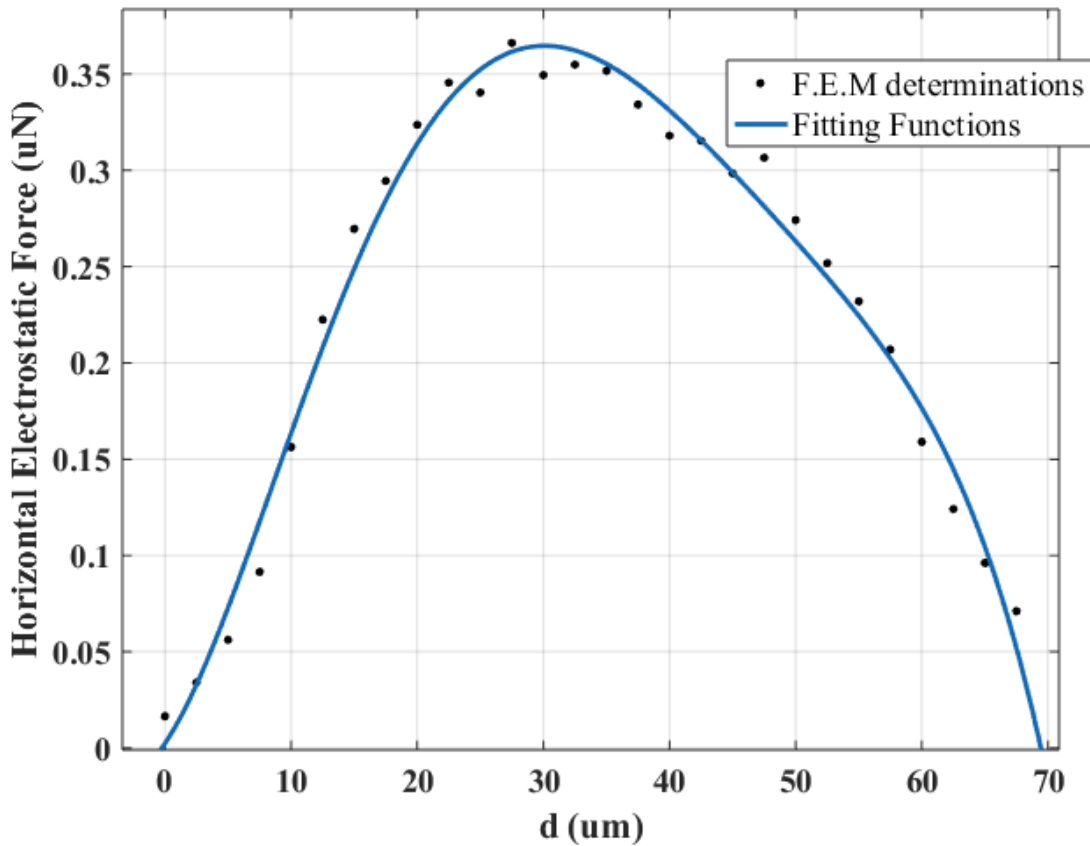
Όπου k ο λόγος αλληλοεπικάλυψης των ηλεκτροδίων που ισούται με:

$$k = \frac{r + R - d}{2r} \quad (2.11)$$

Για την περίπτωση όπου $d \geq R + r$ η προσαρμοσμένη συνάρτηση δίνεται αντίστοιχα από ένα πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού:

$$p_3 = \sum_{s=0}^5 \gamma_s \left(\frac{d}{2r} \right)^{s''}, \quad d \geq R + r \quad (2.12)$$

Όπου $\gamma_{s''}$, $s'' \in [0, 5]$ οι συντελεστές των πολυωνύμων οι οποίοι διαφοροποιούνται όταν αλλάζουν και οι διαστάσεις των ηλεκτροδίων. Στην εικόνα E.2.20 παρουσιάζεται η οριζόντια δύναμη μεταξύ δύο ηλεκτροδίων συναρτήσει της απόστασης για την περίπτωση όπου $r = 25\mu m$, $R = 35$ και $d_e = 67,5\mu m$ για τη μετατόπιση του ηλεκτροδίου ακτίνας R μεταξύ δύο ηλεκτροδίων της πλατφόρμας.



E.2.20: Υπολογισμοί της οριζόντιας ηλεκτροστατικής δύναμης συναρτήσει της απόστασης με της μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων για την περίπτωση όπου $\frac{r}{R} \neq 1$ και η προσαρμοσμένη συνάρτηση

Το γράφημα της E.2.20 επιβεβαιώνει ότι η προσαρμοσμένη συνάρτηση ως προς την απόσταση προσεγγίζει την συμπεριφορά των δυνάμεων που προκύπτουν από τους υπολογισμούς με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Στην περίπτωση των κάθετων δυνάμεων η συνεισφορά του ομογενούς πεδίου είναι σταθερή μιας και δεν μεταβάλλεται το πλάτος και κατ' επέκταση η κάθετη απόσταση μεταξύ των διηλεκτρικών. Για όλους τους υπολογισμούς η συνεισφορά της κάθετης δύναμης υπολογίζεται με μια προσαρμοσμένη πολυωνυμική συνάρτηση 3^{ου} βαθμού.

2.6 Συμπεράσματα – Συμβολή

Στα πλαίσια του 2^{ου} Κεφαλαίου περιεγράφηκε η δομή και η λειτουργία της «Εξυπνης Πλατφόρμας» (ΕΠ), ενός Μικροηλεκτρομηχανικού Συστήματος πάνω στο οποίο μπορούν να μετατοπίζονται μικροαντικείμενα φτιαγμένα από μονωτικά υλικά εξαιτίας των ενεργοποιήσεων των αγωγικών ηλεκτροδίων της ΕΠ. Κάνοντας ανασκόπηση στη βιβλιογραφία προκύπτει ότι μέχρι στιγμής, έχει προταθεί περιορισμένος αριθμός εφαρμογών για τον ευέλικτο χειρισμό μικροαντικειμένων αποκλειστικά με ηλεκτροστατικά πεδία δυνάμεων. Στοχεύοντας στον αυτόνομο χειρισμό των μικροαντικειμένων και περιορίζοντας τις πιθανότητες για εμφάνιση φαινομένων προσκόλλησης προτείνεται ο σχεδιασμός της ΕΠ. Με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων υπολογίστηκε το φορτίο που εμφανίζεται στα ηλεκτρόδια της ΕΠ και του μικροαντικειμένου καθώς και οι δυνάμεις που παρουσιάζονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Συγκεκριμένα:

- Επιβεβαιώθηκε η εμφάνιση επαρκών ηλεκτροστατικών δυνάμεων για την οριζόντια κίνηση του μικροαντικειμένου.

- ✓ Υπολογίστηκε η Στατική Τριβή μεταξύ της πλατφόρμας και του μικροαντικειμένου λαμβάνοντας υπόψη το Βάρος του Μικροαντικειμένου και τις Κατακόρυφες Ηλεκτροστατικές Δυνάμεις.
- ✓ Παρατηρήθηκε ότι σε ένα μικροαντικείμενο ασκούνται ισχυρές κάθετες ελκτικές δυνάμεις όταν το κέντρο ενός εκ των ηλεκτροδίων του ταυτίζεται με το κέντρο ενός ενεργοποιημένου ηλεκτροδίου της πλατφόρμας. Συνεπώς ένα μικροαντικείμενο αδυνατεί να εγκαταλήψει τη στατική κατάσταση η οποία μπορεί να το χαρακτηρίζει αρχικά.
- ✓ Οι υπολογισμοί της δύναμης δείχνουν ότι ένα μικροαντικείμενο μπορεί να κινηθεί εξαιτίας τουλάχιστον δύο επιμέρους αλληλεπιδράσεων μεταξύ ηλεκτροδίων πλατφόρμας/μικροαντικειμένων και υπό προϋποθέσεις αρκεί μια.

Λαμβάνοντας υπόψη τους υπολογισμούς της δύναμης ανά ζεύγος ηλεκτροδίων πλατφόρμας/μικροαντικειμένου συναρτήσει της απόστασης των κέντρων τους, προτάθηκαν δύο νέοι τρόποι διάταξης των ηλεκτροδίων στο μικροαντικείμενο:

- i. Η Τετραγωνική Διάταξη: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων ίδια με αυτά της πλατφόρμας ώστε να είναι εφικτή η μετάβαση ενός κεντραρισμένου/ευθυγραμμισμένου Μικροαντικειμένου μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας

- ii. Η Σταυροειδής Διάταξη: Τοποθέτηση ηλεκτροδίων μεγαλύτερων διαστάσεων από αυτά της πλατφόρμας ώστε να είναι εφικτή η μεταβαση ενός κεντραρισμένου/ευθυγραμμισμένου Μικροαντικειμένου μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας καθώς και στο μέσο αυτής της διαδρομής
- Διατυπώθηκαν οι προσαρμοσμένες συναρτήσεις για τη δύναμη μεταξύ του ζεύγους των ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου και της ΕΠ συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης μεταξύ των κέντρων τους.

Κεφάλαιο 3^ο Μέθοδοι Ενεργοποίησης των Ηλεκτροδίων της «Εξυπνης Πλατφόρμας» για την Κίνηση ενός Μικροαντικειμένου Μεταξύ 2 Θέσεων Ισορροπίας

3.1 Σκοπός

Η «Εξυπνη Πλατφόρμα» (ΕΠ) αποτελεί ένα Μικροηλεκτρομηχανικό Σύστημα όπου τα μικροαντικείμενα μετατοπίζονται μεταξύ δύο Θέσεων Ισορροπίας εξαιτίας των ενεργοποιήσεων των ηλεκτροδίων της. Ο σκοπός της διατριβής είναι να παρουσιάσει μεθόδους για την παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων στην ΕΠ για εφαρμογές παράλληλου διαχωρισμού και μικροσυναρμολόγησης. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει πρώτα να ορισθούν οι τρόποι ενεργοποίησης των ηλεκτροδίων της ΕΠ για την κίνηση των μικροαντικειμένων.

Τα μικροαντικείμενα μεταφέρονται στην ΕΠ με γραμμές μεταφοράς [10], συνεπώς τοποθετούνται αρχικά σε τυχαίες διαμορφώσεις – μη κεντραρισμένα και ευθυγραμμισμένα με την ΕΠ - . Για να θεωρηθεί η ΕΠ μια συσκευή αυτόνομη και ευέλικτη στο χειρισμό των μικροαντικειμένων χρειάζεται η διατύπωση τρόπων ενεργοποίησης των ηλεκτροδίων της για την κίνηση ενός μικροαντικειμένου μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας στην ΕΠ οποιαδήποτε κι αν είναι η αρχική του διαμόρφωση. Στο 2^ο Κεφάλαιο διερευνήθηκαν και υπολογίσθηκαν οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός ενεργοποιημένου ηλεκτροδίου της ΕΠ με ένα κοντινό ηλεκτρόδιο του μικροαντικειμένου. Στα πλαίσια του 3ου Κεφαλαίου αναλύονται οι δυνάμεις που ασκούνται στο Κέντρο Μάζας ενός μικροαντικειμένου εξαιτίας της ενεργοποίησης ενός κοντινού ηλεκτροδίου της πλατφόρμας.

Σε εργασίες οι οποίες πρότειναν χειρισμό μικροαντικειμένων σε πλατφόρμες μέσω κατάλληλων ενεργοποιήσεων οι σταγόνες [29] και τα μαγνητικά μικρο- ρομπότ [26] καταλαμβάνουν ένα ολόκληρο κελί εντός του οποίου τοποθετούνται οι επενεργητές. Αποτέλεσμα αυτού είναι το κάθε μικροαντικείμενο να μετατοπίζεται από κελί σε κελί εξαιτίας της ενεργοποίησης ενός γειτονικού επενεργητή. Η λειτουργία της “Εξυπνης Πλατφόρμας” διαφοροποιείται εξαιτίας των τρόπων διάταξης των ηλεκτροδίων στο μικροαντικείμενο. Κατά το χειρισμό ενός μικροαντικειμένου πρέπει να είναι γνωστές οι δυνατές ενεργοποιήσεις που μπορούν να εφαρμοσθούν στην πλατφόρμα ώστε να το μετακινήσουν. Για την κίνηση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας στην πλατφόρμα αγωγίμων επενεργητών έχουν προταθεί ημι- εμπειρικοί κανόνες οι οποίοι προσομοιώθηκαν με κατάλληλο λογισμικό [45]. Ωστόσο, για να αποτελέσει η “Εξυπνη Πλατφόρμα” μια διάταξη με άμεση εφαρμογή στη βιομηχανία χρειάζονται αλγόριθμοι οι οποίοι να προσδιορίζουν τις ενεργοποιήσεις που μπορούν να εφαρμοσθούν σε ένα μικροαντικείμενο όταν αυτό έχει τυχαία ή μη - τυχαία διαμόρφωση στην πλατφόρμα.

Στις παραγράφους του 3^{ου} Κεφαλαίου προτείνονται δύο νέοι αλγόριθμοι ο Μοναδικής Ενεργοποίησης (ΜΕ) και ο Πολλαπλών Ενεργοποιήσεων (ΠΕ) μέσω των οποίων εντοπίζονται οι ενεργοποιήσεις που μπορούν να εφαρμοσθούν σε ηλεκτρόδια της πλατφόρμας που περικυκλώνουν το μικροαντικείμενο ώστε να μεταφερθεί ακολουθώντας μια συγκεκριμένη ή να περιστραφεί. Ο ΜΕ έχει ως σκοπό τον εντοπισμό των ηλεκτροδίων της ΕΠ που περικυκλώνουν ένα μικροαντικείμενο και τις δυνάμεις που εφαρμόζονται στο Κέντρο Μάζας (ΚΜ) του εξαιτίας της ενεργοποίησης καθενός από αυτά. Οι ενεργοποιήσεις που προκύπτουν από το ΜΕ φιλτράρονται με

κριτήριο τη διεύθυνση που ζητείται να ακολουθήσει το μικροαντικείμενο και τι κίνηση πρέπει να κάνει (μεταφορική ή περιστροφική). Σε περίπτωση που οι ενεργοποιήσεις που προκύπτουν από τον ΜΕ δεν συμβάλλουν στο να πραγματοποιηθεί η επιθυμητή κίνηση του μικροαντικειμένου, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Πολλαπλών Ενεργοποιήσεων (ΠΕ). Ο αλγόριθμος ΠΕ συνδυάζει όλες τις δυνατές ενεργοποιήσεις που έχουν προκύψει από τον ΜΕ και τα αποτελέσματα του φιλτράρονται με τα αντίστοιχα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν και για το ΜΕ. Η αποδοτικότητα των αλγορίθμων πιστοποιείται με την εφαρμογή των προτεινόμενων ενεργοποιήσεων στην προσομοιωμένη «Έξυπνη Πλατφόρμα» επενεργητών.

Οι προσομοιώσεις της κίνησης των μικροαντικειμένων στην πλατφόρμα δεικνύουν ότι ένα μικροαντικείμενο κινείται βέλτιστα μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας όταν αυτό είναι κεντραρισμένο κι ευθυγραμμισμένο. Με βάση αυτή την παρατήρηση διατυπώνονται κανόνες και ενεργοποιήσεις για το κεντράρισμα και την ευθυγράμμιση ενός μικροαντικειμένου. Εν συνεχεία, με βάση τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων σε ένα κεντραρισμένο/ευθυγραμμισμένο μικροαντικείμενο ορίζονται κανόνες ενεργοποίησης στην πλατφόρμα για την κίνηση του μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας. Οι ενεργοποιήσεις προσομοιώνονται και η κίνηση του μικροαντικειμένου διερευνάται με βάση τις τιμές της θέσης και του προσανατολισμού του μικροαντικειμένου συναρτήσει του χρόνου.

3.2 Η περιοχή της Έξυπνης Πλατφόρμας

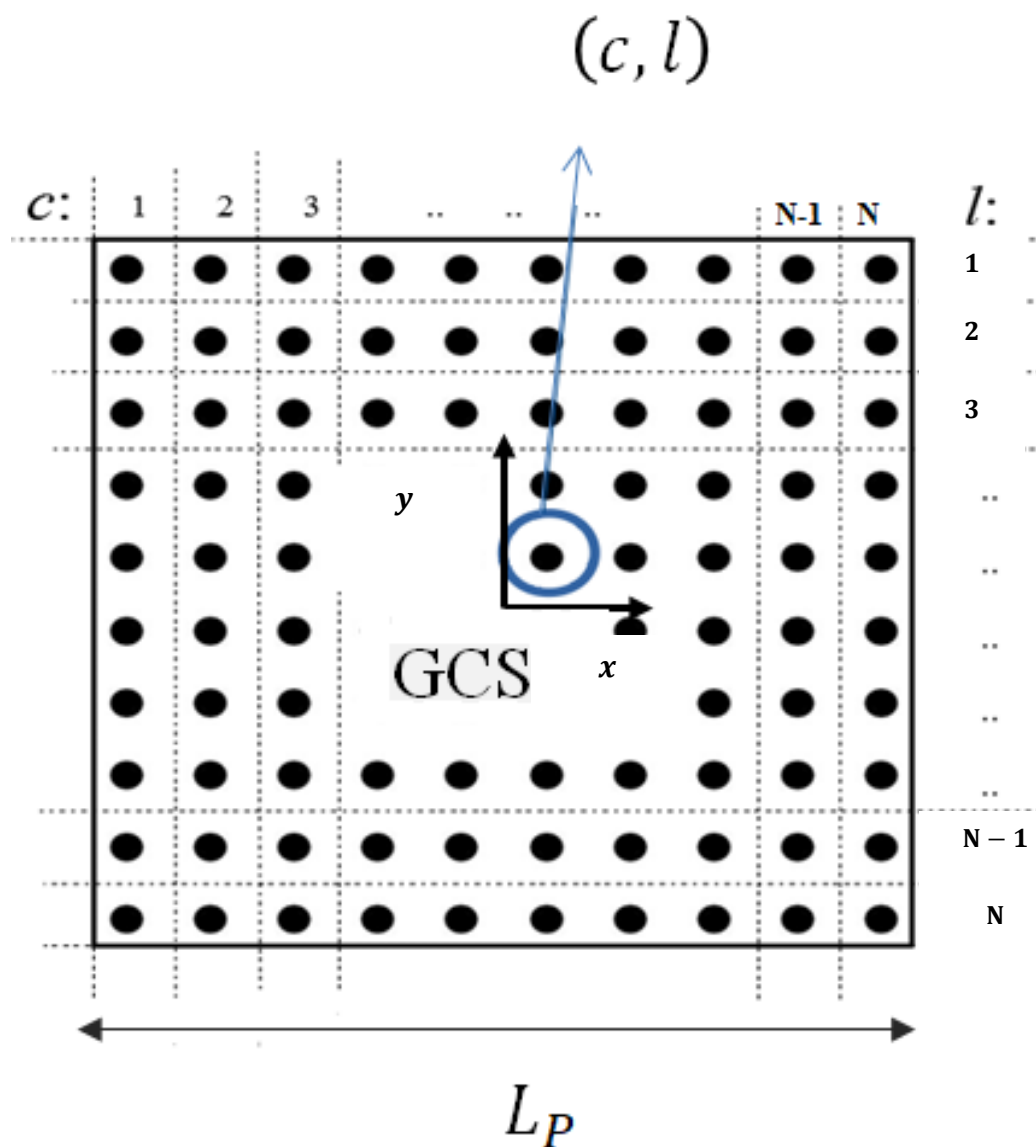
Η Έξυπνη Πλατφόρμα είναι μια τετραγωνική επιφάνεια μήκους και πλάτους L_P και ο χώρος εντός του οποίου εκτείνεται δίνεται από:

$$\mathcal{W} = \left[\frac{-L_P}{2}, \frac{L_P}{2} \right]^2 \quad (3.1)$$

Η πλατφόρμα διαθέτει κυκλικά ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετούνται με τα κέντρα τους να απέχουν ίση απόσταση d_e δημιουργώντας ένα πλέγμα $N \times N$ ηλεκτροδίων. Το κέντρο κάθε ηλεκτροδίου της ΕΠ προσδιορίζεται από έναν αριθμό n :

$$n = c + (l - 1)N, \quad \forall c, l \in [1 N] \quad (3.2)$$

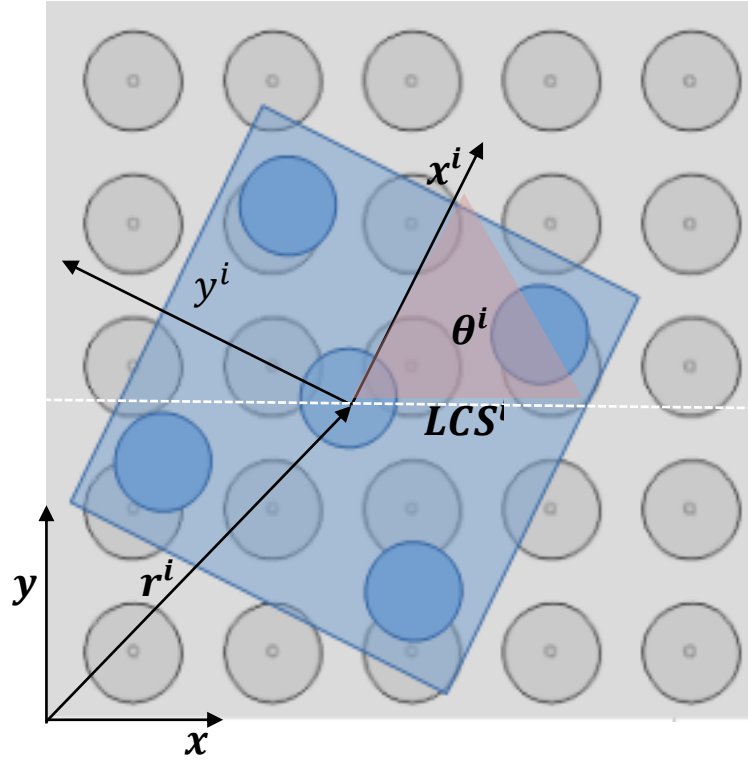
Όπου με βάση τη μέθοδο γραμμών – στηλών [46] c ο αριθμός της στήλης και l ο αριθμός της γραμμής στην οποία βρίσκεται το κέντρο του αντίστοιχου ηλεκτροδίου. Στην εικόνα Ε.3.1 παρουσιάζεται η επιφάνεια της πλατφόρμας και η κατανομή των ηλεκτροδίων της ΕΠ, όπου φαίνεται η αρχή του Συστήματος Αναφοράς (GCS) συμπίπτει με το Κέντρο Συμμετρίας της πλατφόρμας και οι άξονες του x, y έχουν διεύθυνση τέτοια ώστε να είναι παράλληλοι με το πλάτος και το μήκος της πλατφόρμας αντίστοιχα.



Ε.3.1: Επιφάνεια της «Εξυπνης Πλατφόρμας» - ο Χώρος Εργασίας

3.3 Ανάλυση Δυνάμεων των Μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα»

Κάθε μικροαντικείμενο μεταφέρεται στην Έξυπνη Πλατφόρμα (ΕΠ) με τη βοήθεια γραμμών μεταφοράς [10]. Συνεπώς, είναι πολύ πιθανό η αρχική του τοποθέτηση στην ΕΠ να είναι τέτοια ώστε το κέντρο μάζας του να μην συμπίπτει με ένα ηλεκτρόδιο της ΕΠ (να μην είναι κεντραρισμένο) καθώς και ο προσανατολισμός του να είναι τέτοιος ώστε να μην είναι ευθυγραμμισμένος με το GCS της ΕΠ. Στις εικόνες Ε.3.2.(α) και Ε.3.2.(β) παρουσιάζονται δύο μικροαντικείμενα τετραγωνικής και σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων αντίστοιχα.



Ε.3.2.: Αρχική τοποθέτηση των μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» σε τυχαία διαμόρφωση

Τα μικροαντικείμενα εντοπίζονται στην ΕΠ με τη βοήθεια αισθητήρων όρασης η θέση και ο προσανατολισμός τους ορίζεται με τη μέθοδο αναγνώρισης προτύπων [47]. Όπως φαίνεται στην εικόνα Ε.3.2 στο Κέντρο Μάζας (Κ.Μ) κάθε μικροαντικειμένου m_i ορίζεται ένα τοπικό σύστημα αναφοράς (LCS^i). Ο προσανατολισμός των αξόνων του LCS^i ορίζεται με βάση τη διαμόρφωση του μικροαντικειμένου η οποία ισούται με:

$$q^i = (r^i, \theta^i) \quad (3.3)$$

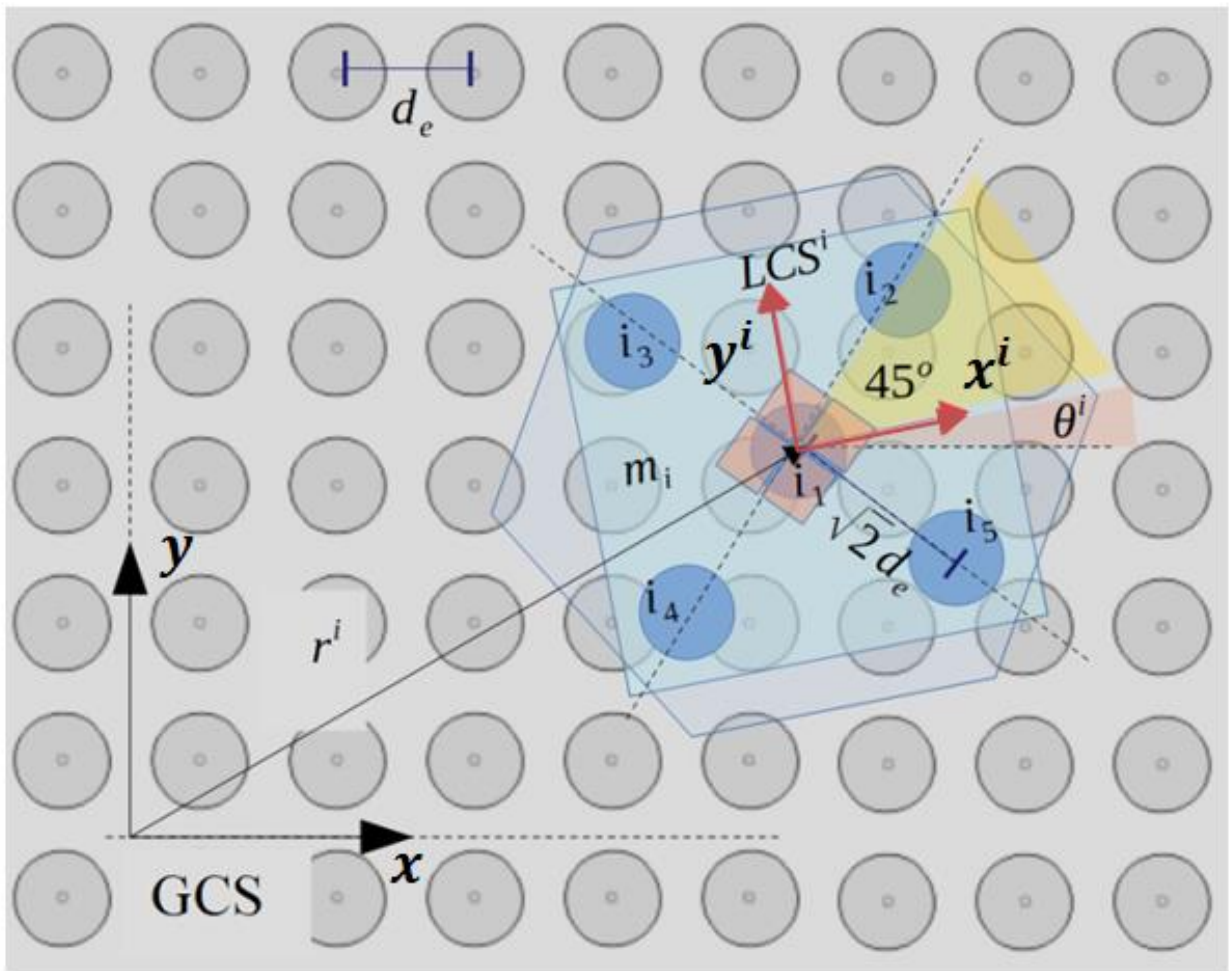
όπου r^i το διάνυσμα θέσης του Κέντρου Μάζας (ΚΜ) του μικροαντικειμένου και θ^i η γωνία που προσδιορίζει τον προσανατολισμό του μικροαντικειμένου ως προς το GCS της ΕΠ. Συγκεκριμένα, η μέθοδος αναγνώρισης προτύπων [47] εφαρμόζεται στην περίπτωση του προσδιορισμού της θ^i , όπου με βάση τη γεωμετρία του μικροαντικειμένου όταν αυτό είναι ευθυγραμμισμένο υπολογίζεται η απόκλιση του κατά θ^i ως προς το GCS της πλατφόρμας. Στην εικόνα Ε.3.4 παρουσιάζεται ένα μέρος της ΕΠ με ένα μικροαντικείμενο τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων όπου $r^i = (x^i, y^i)$ το διάνυσμα με το οποίο προσδιορίζεται η ακριβής θέση του Κέντρου Μάζας του μικροαντικειμένου. Για τις συντεταγμένες του διανύσματος θέσης r^i ισχύει:

$$-\frac{L_P}{2} + d_e \leq x^i \leq \frac{L_P}{2} - d_e \text{ and } -\frac{L_P}{2} + d_e \leq y^i \leq \frac{L_P}{2} - d_e \quad (3.4)$$

Με βάση τη θέση και τον προσανατολισμό των μικροαντικειμένων ορίζεται και η θέση των ηλεκτροδίων τους συναρτήσει των συντεταγμένων του i_1 . Στην περίπτωση της τετραγωνικής διάταξης που παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.3.3 τα ηλεκτρόδια βρίσκονται στις θέσεις με συντεταγμένες:

$$x_{i_1} = x^i, y_{i_1} = y^i, v = 1, x_{i_v} = x^i + \sqrt{2}d_e \sin(\theta_{i_v}), y_{i_v} = y^i + \sqrt{2}d_e \cos(\theta_{i_v}) \forall v \in [2 \ 5] \quad (3.5)$$

Όπου οι δυνατές τιμές της γωνίας θ_{i_v} φαίνονται στον πίνακα Π.3.1.



Ε.3.3: Τυχαία διαμόρφωση μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης

Π.3.1: Γωνίες των ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου συναρτήσει του θ_{i_v}

v	θ_{i_v}
2	$45^\circ + \theta^i$
3	$135^\circ + \theta^i$
4	$225^\circ + \theta^i$
5	$315^\circ + \theta^i$

Αντίστοιχα για το μικροαντικείμενο σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων που παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.3.4 ισχύει για τις συντεταγμένες των ηλεκτροδίων συναρτήσει του θ^i ότι:

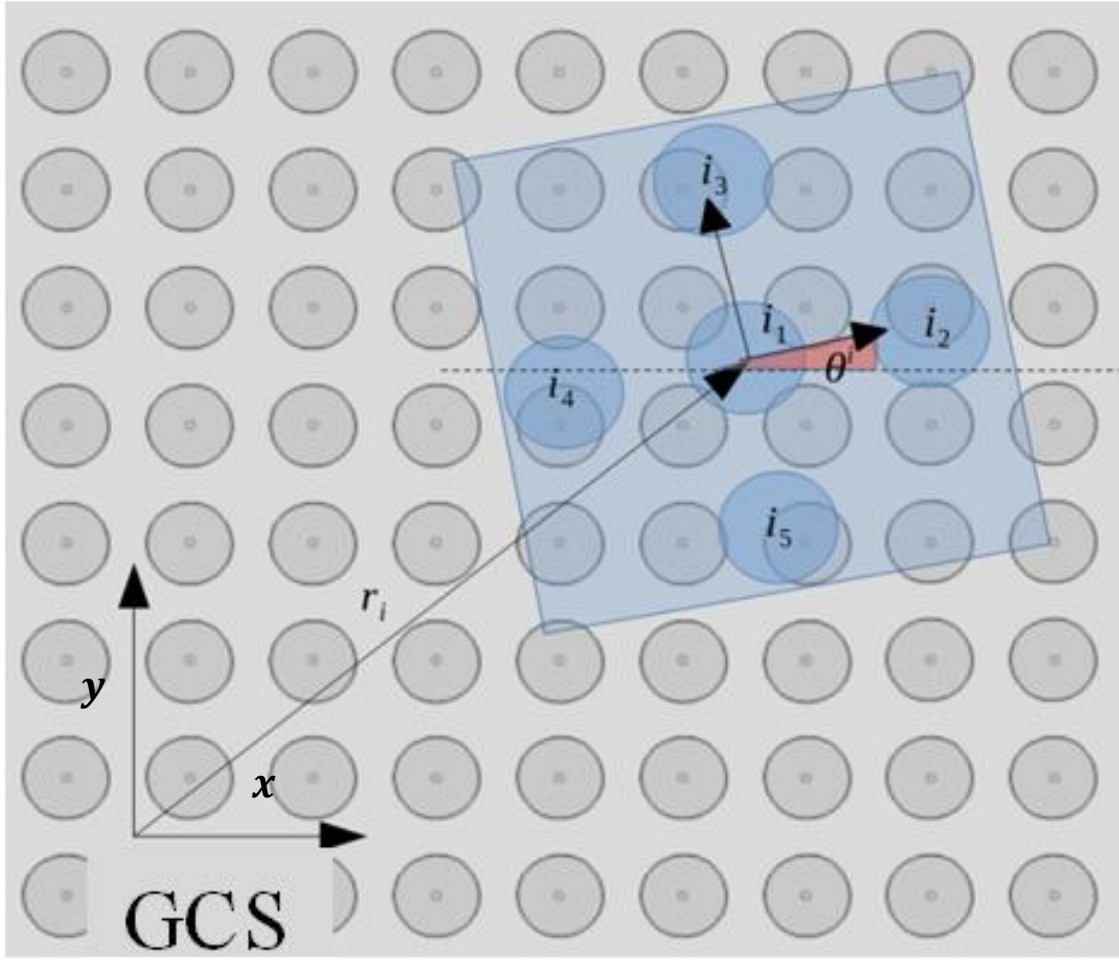
$$x_{i_1} = x^i, y_{i_1} = y^i \quad (3.6)$$

$$x_{i_v} = x^i + (d_2 R + 2R) \sin(\theta_{i_v}), y_{i_v} = y^i + (d_2 R + 2R) \cos(\theta_{i_v}) \forall v \in [2 \ 5]$$

Στον πίνακα Π.3.2 παρουσιάζονται οι τιμές της γωνιάς θ_{i_v} για τη σταυρωτή διάταξη.

Π.3.2: Γωνίες των ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου συναρτήσει του θ_{i_v}

v	θ_{i_v}
2	θ^i
3	$90^\circ + \theta^i$
4	$180^\circ + \theta^i$
5	$270^\circ + \theta^i$



Ε.3.4: : Τυχαία διαμόρφωση μικροαντικειμένου σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων

Στην εικόνα Ε.3.5 παρουσιάζεται η αλληλεπίδραση ενός ηλεκτροδίου i_v του μικροαντικειμένου m_i με ένα ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο της ΕΠ n με δύναμη $F_v^i(d(n, i_v))$. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 3.5 το πορτοκαλί αστέρι αντιστοιχεί στο κέντρο του ενεργοποιημένου n ηλεκτροδίου της ΕΠ ενώ το μοβ αστέρι αναπαριστά το κέντρο του i_v ηλεκτροδίου. Το μπλε διάνυσμα της Εικόνας 3.5 αντιστοιχεί στη δύναμη αλληλεπίδρασης $F_v^i(d(n, i_v))$ όπου θ^{elec} η διεύθυνση του διανύσματος της δύναμης $F_v^i(d(n, i_v))$ ως προς το GCS.

Στην εικόνα Ε.3.6 παρουσιάζεται η ανάλυση των δυνάμεων σε ένα στατικό μικροαντικείμενο (τετραγωνικής και σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων) όπου η F_v^i αναλύεται στις F_v^{ix} και F_v^{iy} συνιστώσες οι οποίες είναι παράλληλες με τους άξονες x^i , y^i αντίστοιχα του τοπικού συστήματος συντεταγμένων LCS^i . Το μέτρο των συνιστωσών F_v^{ix} και F_v^{iy} ισούται με:

$$F_v^{ix}(d(n, i_v)) = |F_v^i(d(n, i_v))| \cdot \cos(\theta^{elec} - \theta^i) \quad (3.7)$$

$$F^{iy}_v(d(n, i_v)) = |F^i_v(d(n, i_v))| \cdot \sin(\theta^{elec} - \theta^i) \quad (3.8)$$

Η ανάλυση της $F^i_v(d(n, i_v))$ για τον υπολογισμό της ροπής δύναμης $\tau^i_v(d(n, i_v))$ για την περιστροφή του μικροαντικειμένου ως προς τον άξονα που τέμνει κάθετα το επίπεδο της πλατφόρμας διαπερνώντας την αρχή του τοπικού συστήματος LCS^i γίνεται ξεχωριστά ανά τρόπο διάταξης ηλεκτροδίων. Η ανάλυση της δύναμης για την περιστροφή του μικροαντικειμένου με τετραγωνική διάταξη παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.3.7. Η F^i_v αναλύεται στην $F^{i//}_v$ παράλληλη στη μια εκ των δύο διαγώνιων που σχηματίζουν τα τέσσερα ηλεκτρόδια της τετραγωνικής διάταξης $\forall v \in [2 \ 5]$ και στην $F^{i\perp}_v$ συνιστώσα κάθετη αντίστοιχα στη διαγώνιο η οποία συνεισφέρει στην περιστροφή του μικροαντικειμένου. Το διάνυσμα της ροπής της $F^{i\perp}_v$ για το μικροαντικείμενο τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων ισούται με:

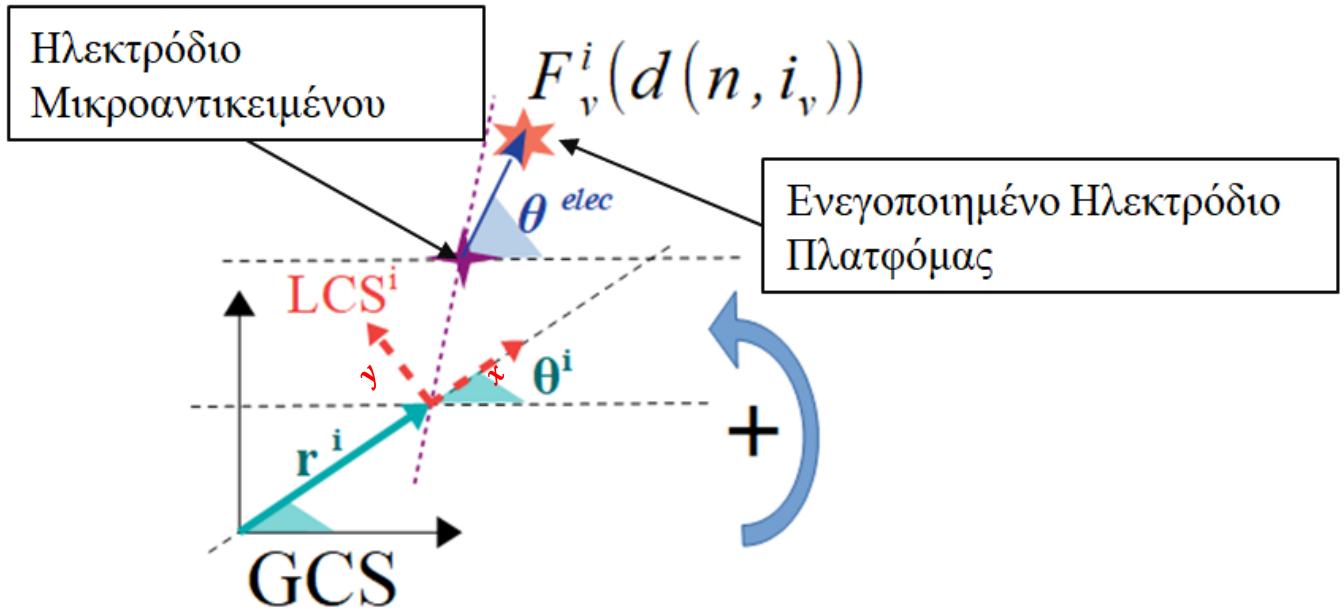
$$\vec{\tau}^i_v = \vec{a} \times \vec{F}^i_v = (\sqrt{2}d_e) \cdot |F^i_v(d(n, i_v))| \cdot \cos(45^\circ + (\theta^{elec} - \theta^i)) \quad (3.9)$$

Όπου $\vec{a}$ το διάνυσμα με μέτρο $\sqrt{2}d_e$ και διεύθυνση παράλληλη με αυτή της διαγώνιου και φορά από το ΚΜ προς το ηλεκτρόδιο στη διαγώνιο. Η τιμή $45^\circ + |\theta^{elec} - \theta^i|$ προκύπτει γεωμετρικά όπως δεικνύεται στην Εικόνα 3.7 όπου η διαγώνιος χωρίζει το τοπικό σύστημα αναφοράς σε δύο ίσες γωνίες 45° και ο άξονας που τέμνει κάθετα τη διαγώνιο, τέμνει επίσης τις δύο ευθείες πάνω στις οποίες κινείται το x^i στο LCS^i και κέντρο του ηλεκτροδίου της ΕΠ (δ_1 και δ_2 αντίστοιχα) οι οποίες είναι παράλληλες μεταξύ τους. Το τρίγωνο BCD είναι απόρροια της τομής των ευθειών που εκτείνονται κατά μήκος και κάθετα στη διαγώνιο και της ευθείας που εκτείνεται παράλληλα στο r^i . Η γωνία $\widehat{BDC}$ είναι κάθετη ως προς τη διαγώνιο και η γωνία $\widehat{DBC}$ είναι ίση με 45° . Άρα από το άθροισμα γωνιών τριγώνου προκύπτει εύκολα ότι η $\widehat{DCB}$ είναι επίσης ίση με 45° . Η γωνία $\widehat{EDC}$ είναι ίση με την $\widehat{DCB}$ ως εντός εν αλλάζ και βέβαια απομένει η γωνία μεταξύ δ_1 και του διανύσματος της $F^i_v(d(n, i_v))$ που είναι η $\theta^{elec} - \theta^i$.

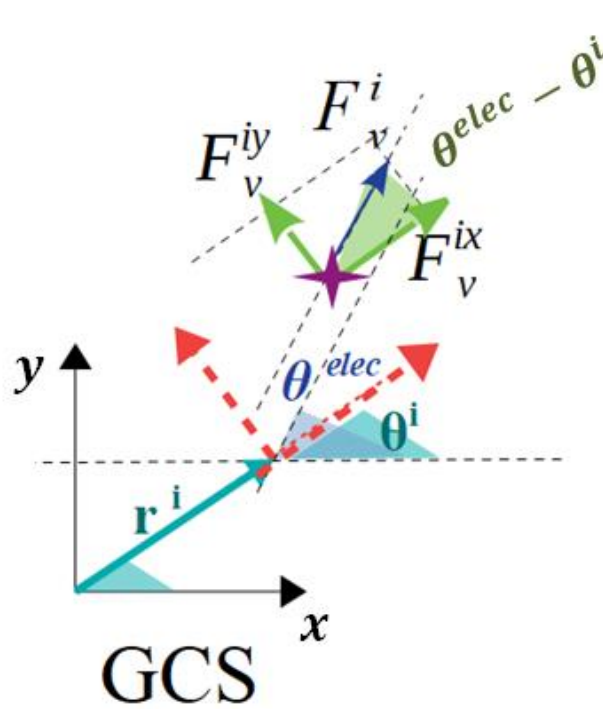
Η συνεισφορά της $F^i_v(d(n, i_v))$ στην περιστροφή ενός μικροαντικειμένου με σταυρωτή διάταξη ηλεκτροδίων διαφοροποιείται από την περίπτωση της τετραγωνικής. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην εικόνα Ε.3.8 η $F^i_v(d(n, i_v))$ αναλύεται σε δύο συνιστώσες την $F^{i//}_v$ που είναι παράλληλη με τον άξονα x του τοπικού συστήματος αναφοράς (LCS^i) και την $F^{i\perp}_v$ παράλληλη με τον άξονα y του LCS^i αντίστοιχα. Η $F^{i\perp}_v$ είναι η συνιστώσα που συνεισφέρει στη περιστροφή του μικροαντικειμένου και η ροπή ισούται με:

$$\vec{\tau}^i_v = \vec{\beta} \times \vec{F}^i_v = (d_2R + 2R) \cdot |F^i_v(d(n, i_v))| \cdot \cos(90^\circ - (\theta^{elec} - \theta^i)) \quad (3.10)$$

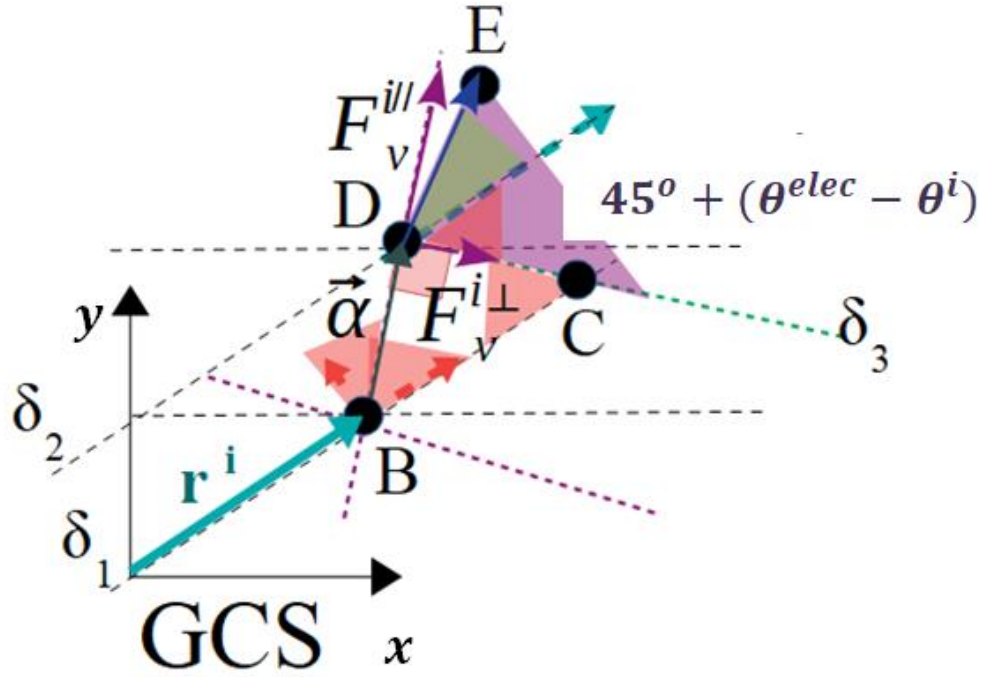
Όπου $\vec{\beta}$ το διάνυσμα με μέτρο $(d_2R + 2R)$ και διεύθυνση παράλληλη με την $F^{i//}_v$ συνιστώσα.



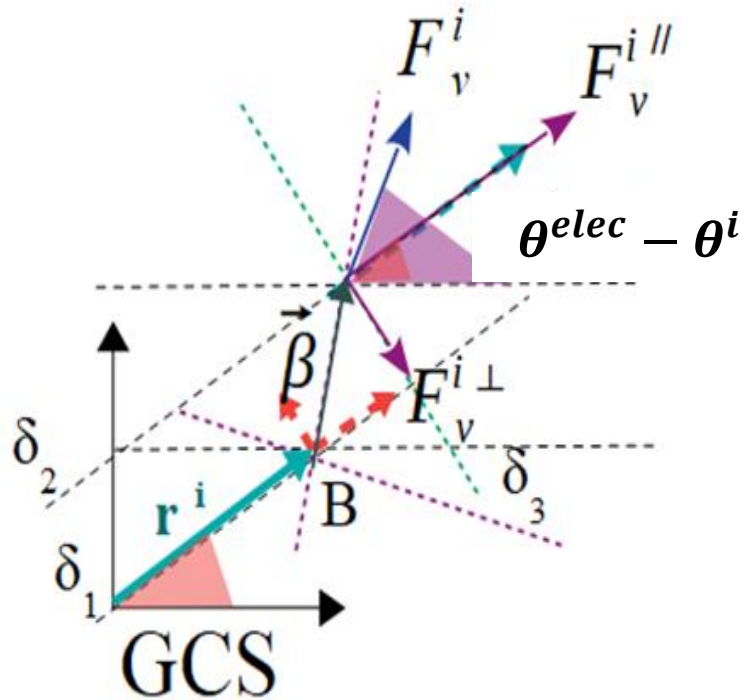
Ε.3.5: Αλληλεπίδραση ενός ηλεκτροδίου του μικροαντικειμένου με ένα ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο της «Έξυπνης Πλατφόρμας»



Ε.3.6: Ανάλυση των συνιστωσών δύναμης για τη μεταφορική κίνηση του μικροαντικειμένου



E.3.7: Ανάλυση της ροπής δύναμης για την Περιστροφική Κίνηση μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων



E.3.8: Ανάλυση της ροπής δύναμης για την Περιστροφή του Μικροαντικειμένου Σταυρωτής Διάταξης

3.4 Μέθοδοι Ενεργοποίησης των Ηλεκτροδίων για την Κίνηση των Μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα»

Η κίνηση των μικροαντικειμένων εξαρτάται από τις ενεργοποιήσεις των ηλεκτροδίων της «Εξυπνης Πλατφόρμας» και των δυνάμεων που ασκούνται στο κέντρο μάζας εξαιτίας αυτών. Ένα μικροαντικείμενο μπορεί να αφήσει τη στατική κατάσταση και να κινηθεί ως προς μια νέα θέση ισορροπίας πραγματοποιώντας είτε 1) Μεταφορικής Κίνησης εφόσον $|\sum F^i| > F_s$ και $|\sum \tau^i| < T_s$, 2) Στροφική Κίνηση γύρω από ένα άξονα που τέμνει κάθετα το επίπεδο της πλατφόρμας διαπερνώντας το Κέντρο Μάζας του (ΚΜ) όταν $|\sum F^i| < F_s$ και $|\sum \tau^i| > T_s$ και 3) σύνθετη κίνηση όταν $|\sum F^i| > F_s$ και $|\sum \tau^i| > T_s$, όπου $|\sum F^i|, |\sum \tau^i|$ η συνολική δύναμη και ροπή που ασκείται στο ΚΜ του μικροαντικειμένου και F_s και T_s η στατική τριβή και ροπή μεταξύ μικροαντικειμένων και ΕΠ. Στις δύο παραγράφους διερευνώνται οι ενεργοποιήσεις που μπορούν να εφαρμοσθούν στα ηλεκτρόδια γύρω από ένα μικροαντικείμενο και τις κινήσεις που μπορούν να πραγματοποιήσουν εξαιτίας αυτών των ενεργοποιήσεων.

3.4.1. Κίνηση Μικροαντικειμένου Εξαιτίας της Ενεργοποίησης Ενός Ηλεκτροδίου της «Εξυπνης Πλατφόρμας» - Ο αλγόριθμος Μονής Ενεργοποίησης (ME)

Σε αυτή την παράγραφο εισάγεται ο αλγόριθμος Μονής Ενεργοποίησης (ME) το διάγραμμα ροής του οποίου παρουσιάζεται στην εικόνα E.3.11. Τα στοιχεία που εισάγονται στον αλγόριθμο είναι η διαμόρφωση q^i του μικροαντικειμένου και οι θέσεις των ηλεκτροδίων που ορίζονται από την (3.5) και (3.6) για τα μικροαντικείμενα τετραγωνικής και σταυρωτής διάταξης αντίστοιχα και το σύνολο ηλεκτροδίων της ΕΠ D_{1n} . Όπως φαίνεται στην εικόνα E.3.9 το σύνολο D_{1n} εμπεριέχει όλα τα ηλεκτρόδια της κυκλικής περιοχής D_1 γύρω από το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου όπου $(x_n, y_n) \in D_1 \rightarrow [n, \sigma_1] \in D_{1n}$, $\sigma_1 \in [1, \sigma]$, όπου σ είναι το σύνολο το ηλεκτροδίων στο D_{1n} σύνολο. Ο κυκλικός δίσκος D_1 αναλόγως το αντίστοιχο πρόβλημα ορίζεται με βάση την περιοχή όπου ζητείται να υλοποιηθεί η διερεύνηση των ενεργοποιήσεων. Για παράδειγμα σε ένα πρόβλημα διερεύνησης όπου ζητούνται να εντοπισθούν όλα τα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας που μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου η ακτίνα r_1 του δίσκου D_1 ισούται με $2\sqrt{2}d_e$ (εικόνα E.3.10). Η απόσταση $2\sqrt{2}d_e$ προσκύπτει με βάση τις ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των κέντρων ενός ζεύγους ηλεκτροδίων για εμφάνιση δύναμης όπως ορίσθηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο της διατριβής.

Για κάθε σ_1 ηλεκτρόδιο του D_{1n} συνόλου και για κάθε ηλεκτρόδιο i_v του μικροαντικειμένου υπολογίζεται η απόσταση $d(n, i_v)$. Εάν $0.1 < d(n, i_v) \leq d_e$ υπολογίζεται η δύναμη $F_{i_v}^i(d(n, i_v))$ και οι συνιστώσες της (3.7) – (3.10) και η κάθετη δύναμη $F_{i_v}^i(d(n, i_v))$. Οι συνιστώσες προστίθενται στις $\sum F^i, \sum F_{i_v}^i$ και $\sum \tau^i$, μιας κι όπως φαίνεται στην εικόνα E.3.9 ένα ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο της ΕΠ μπορεί να αλληλεπιδράσει με περισσότερα από ένα ηλεκτρόδια του μικροαντικειμένου. Τέλος ελέγχεται εάν η δύναμη ή η ροπή δύναμης που ασκείται στο μικροαντικείμενο είναι μεγαλύτερη από τη στατική τριβή και ροπή αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τον αλγόριθμο μονής ενεργοποίησης είναι το σύνολο από λίστες S_{m_i} οι οποίες φιλτράρονται στο

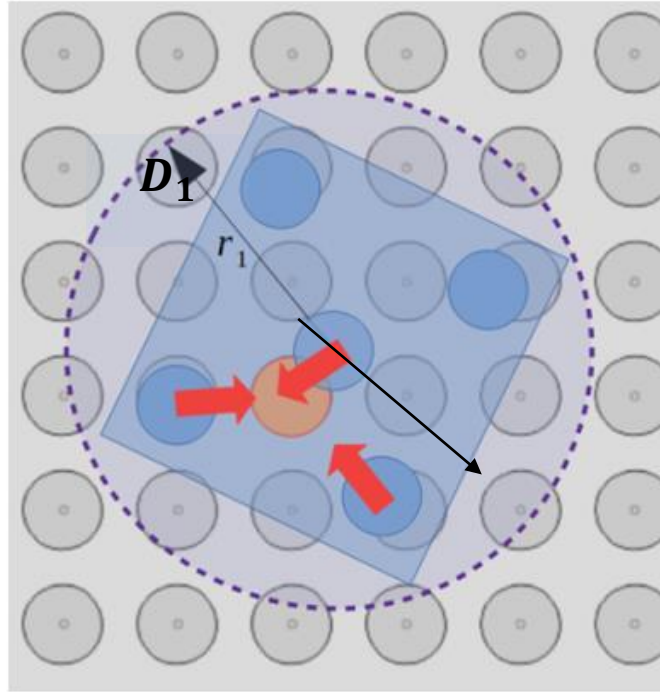
τέλος της διαδικασίας με βάση την κίνηση που ζητείται να κάνει το μικροαντικείμενο. Κάθε στοιχείο της λίστας S_{m_i} ισούται με:

$$[\sum F^{ix}, \sum F^{iy}, \sum \tau^i, \theta_{\Sigma F^i}^i, n, \sigma_1, u] \in S_{m_i}(\sigma_1), \forall n \in D_{1n}, u \in \{0,1,2,3\} \quad (3.11)$$

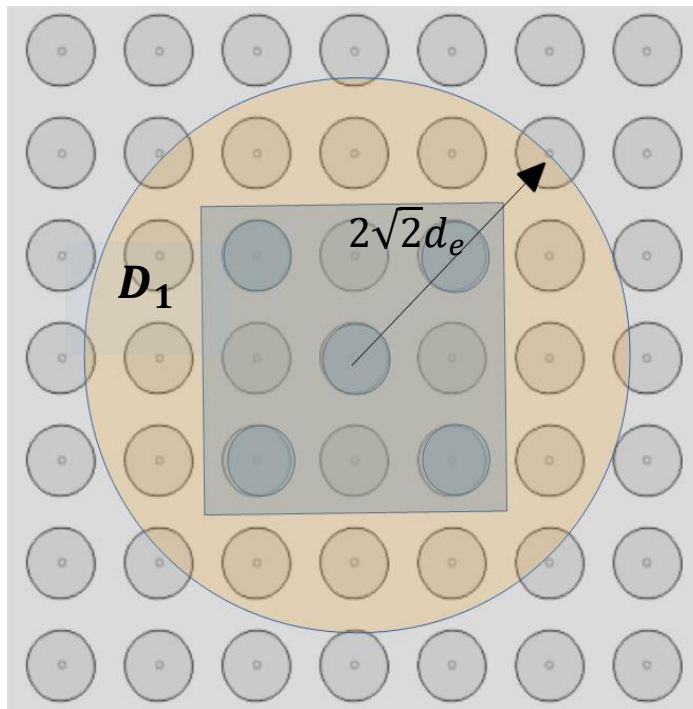
Όπου $\theta_{\Sigma F^i}^i$ η γωνία που προσδιορίζει τον προσανατολισμό της συνολικής δύναμης που ασκείται στο Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου ως προς το GCS η οποία ισούται με $\theta_{\Sigma F^i}^i = \tan^{-1} \left(\frac{\sum F^{iy}}{\sum F^{ix}} \right) + \theta^i$. Επίσης το u αποτελεί ένα δείκτη ο οποίος αντίστοιχα υποδεικνύει την κίνηση που μπορεί να κάνει ένα μικροαντικείμενο με την ενεργοποίηση του n ηλεκτροδίου της ΕΠ. Οι τιμές του δείκτη u ορίζονται με βάση τους κανόνες του πίνακα Π.3.3.

Π.3.3. Κανόνες για τον ορισμό του δείκτη u

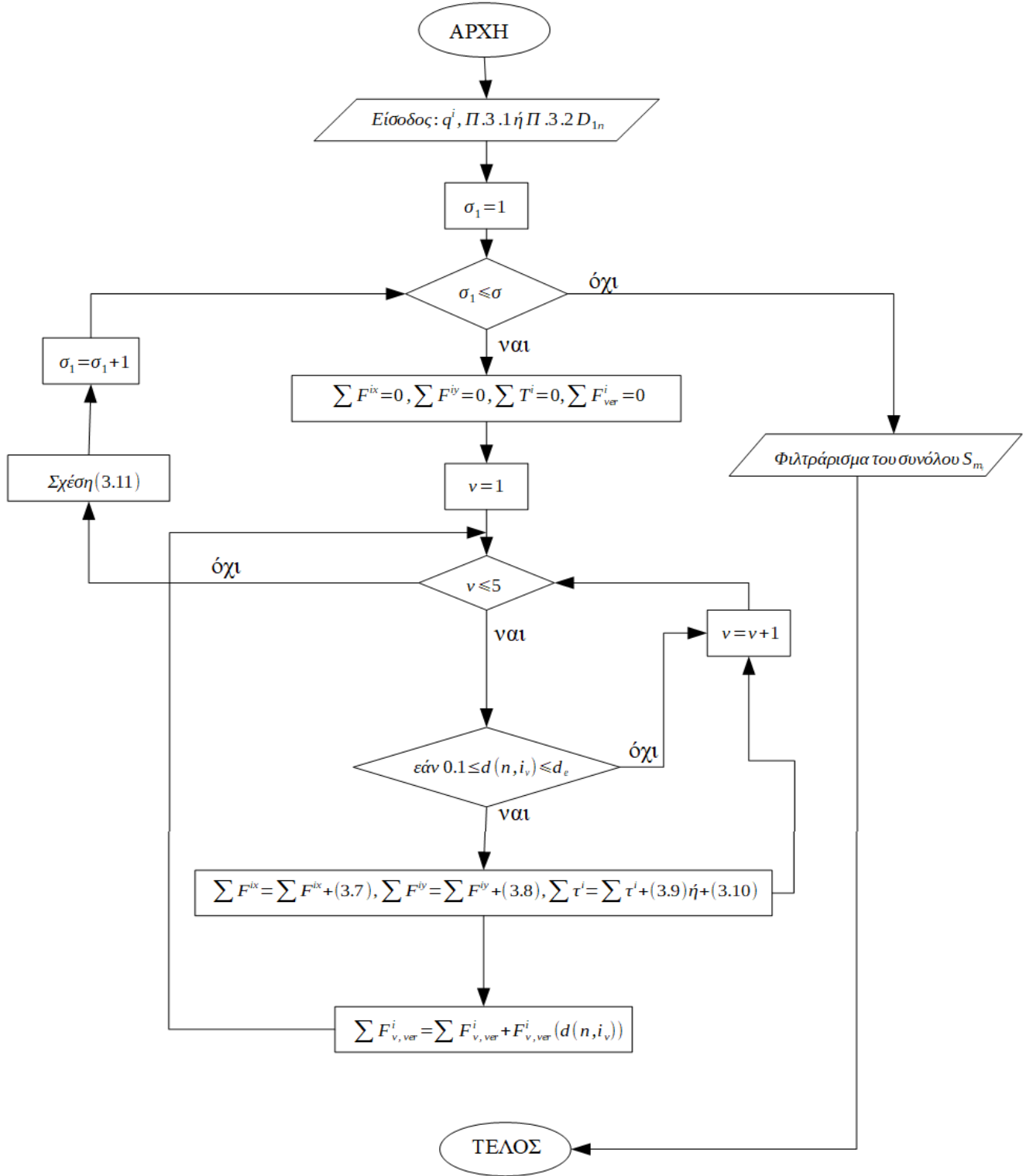
u	Συνθήκες για την Δύναμη και τη Ροπή
0	$\sum F_v^i(d(n, i_v)) < F_s$ και $\sum \tau^i < T_s$,
1	$\sum F_v^i(d(n, i_v)) > F_s$ και $\sum \tau^i < T_s$
2	$\sum F_v^i(d(n, i_v)) > F_s$ και $\sum \tau^i > T_s$
3	$\sum F_v^i(d(n, i_v)) > F_s$ και $\sum \tau^i > T_s$



E.3.9: A: Ταυτόχρονη αλληλεπίδραση πολλαπλών ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου εξαιτίας της ενεργοποίησης ενός ηλεκτροδίου της «Εξυπνης Πλατφόρμας»



E.3.10: Υπολογισμός περιοχής D_1 για την γενική περίπτωση όπου διερευνούνται όλες οι πιθανές ενεργοποιήσεις των ηλεκτροδίων που περικυκλώνουν το μικροαντικείμενο



Ε.3.11: Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου Μονής Ενεργοποίησης (ME)

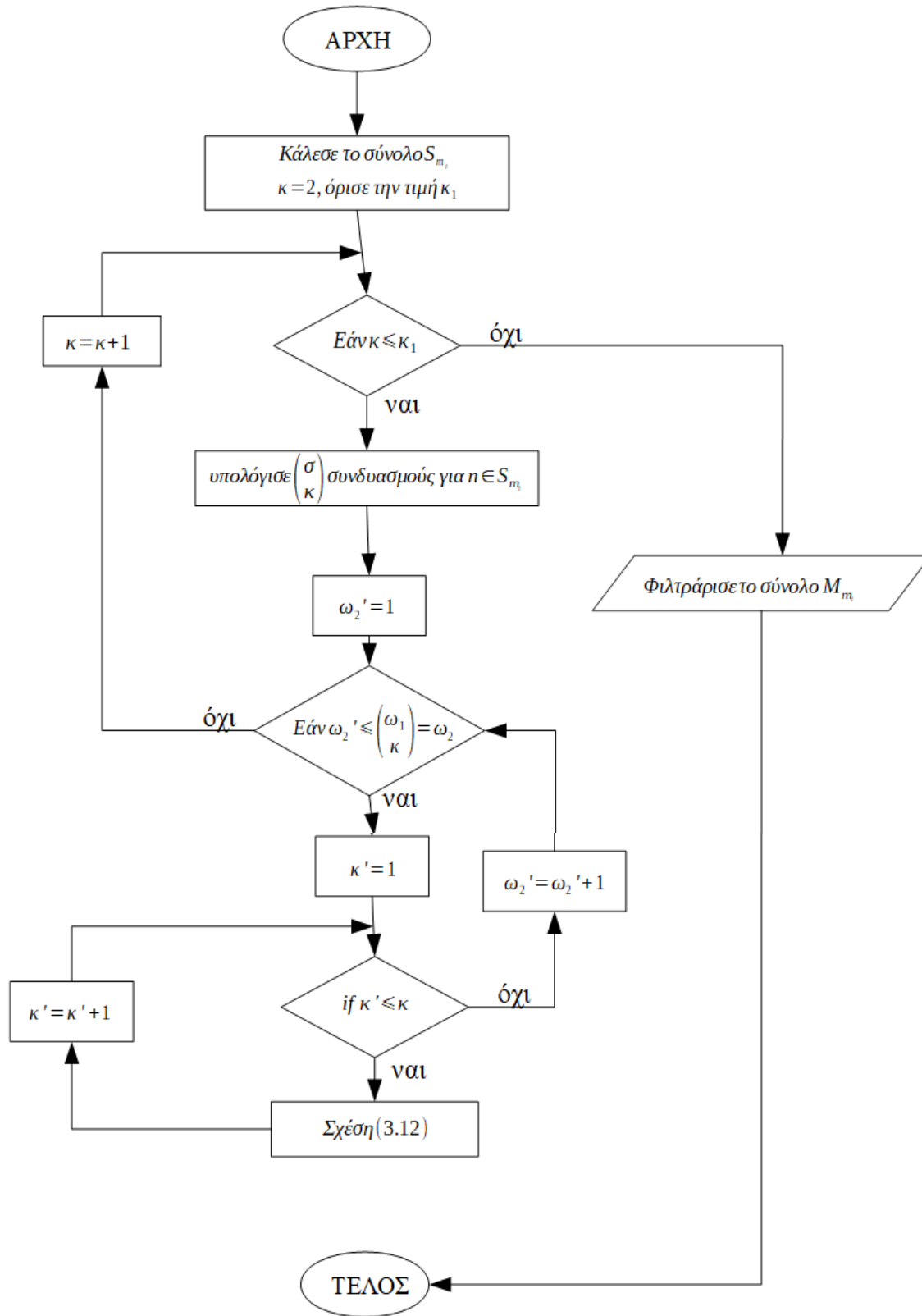
3.4.2 Αλγόριθμος Πολλαπλών Παράλληλων Ενεργοποιήσεων

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται ένας νέος αλγόριθμος ο Πολλαπλών Ενεργοποιήσεων (ΠΕ) για τον προσδιορισμό όλων των δυνατών συνδυασμών μεταξύ των ενεργοποιήσεων των ηλεκτροδίων που υπολογίστηκαν με τον ΜΕ αλγόριθμο και τον δυνάμεων και ροπών που ασκούνται στο Κέντρο Μάζας των μικροαντικειμένων εξαιτίας αυτών. Ο αλγόριθμος ΠΕ χρησιμοποιείται όταν ανάμεσα στις λίστες που προέκυψαν από τον ΜΕ αλγόριθμο δεν υπάρχει ηλεκτρόδιο εντός της D_1 περιοχής η ενεργοποίηση του οποίου να κινεί το μικροαντικείμενο με τον επιθυμητό τρόπο προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Τα στοιχεία εισόδου του ΠΕ αλγόριθμου είναι το σύνολο S_{m_i} με σ λίστες το οποίοι έχει ήδη υπολογισθεί για τα ηλεκτρόδια εντός του D_1 γύρω από το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου με τον ΜΕ αλγόριθμο (εικόνα Ε.3.9). Οι συνδυασμοί των ηλεκτροδίων $n \in S_{m_i}$ χρησιμοποιώντας κ ηλεκτρόδια ανά βήμα όπου $\kappa \in [2 \kappa_1]$, $3 \leq \kappa_1 \leq \sigma$. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου στην εικόνα Ε.3.12 ορίζεται ο δείκτης κ_1 ώστε $\forall \kappa \in [2 \kappa_1]$ να υπολογίζονται οι $\omega_2 = \binom{\sigma}{\kappa}$ συνδυασμοί των σ λιστών και $\forall \omega'_2 \in [1 \omega_2]$ ο αλγόριθμος υπολογίζει λίστες οι οποίες περιγράφονται από τη δομή:

$$\left[\sum_{\kappa'=1}^{\kappa} \left(\sum F^{ix} n^{\kappa'}(\omega'_2) \right), \sum_{\kappa'=1}^{\kappa} \left(\sum F^{iy} n^{\kappa'}(\omega'_2) \right), \sum_{\kappa'=1}^{\kappa} \left(\sum \tau^i n^{\kappa'}(\omega'_2) \right), \theta_{\Sigma F^i}^i, \right. \\ \left. [n^1(\omega'_2) \dots n^{\kappa'}(\omega'_2) \dots n^{\kappa}(\omega'_2)], u, \right] \quad (3.12)$$

$$\in M_{m_i}, \forall n^{\kappa'}(\omega'_2) \in D_{1n}, u \in \{0,1,2,3\}$$

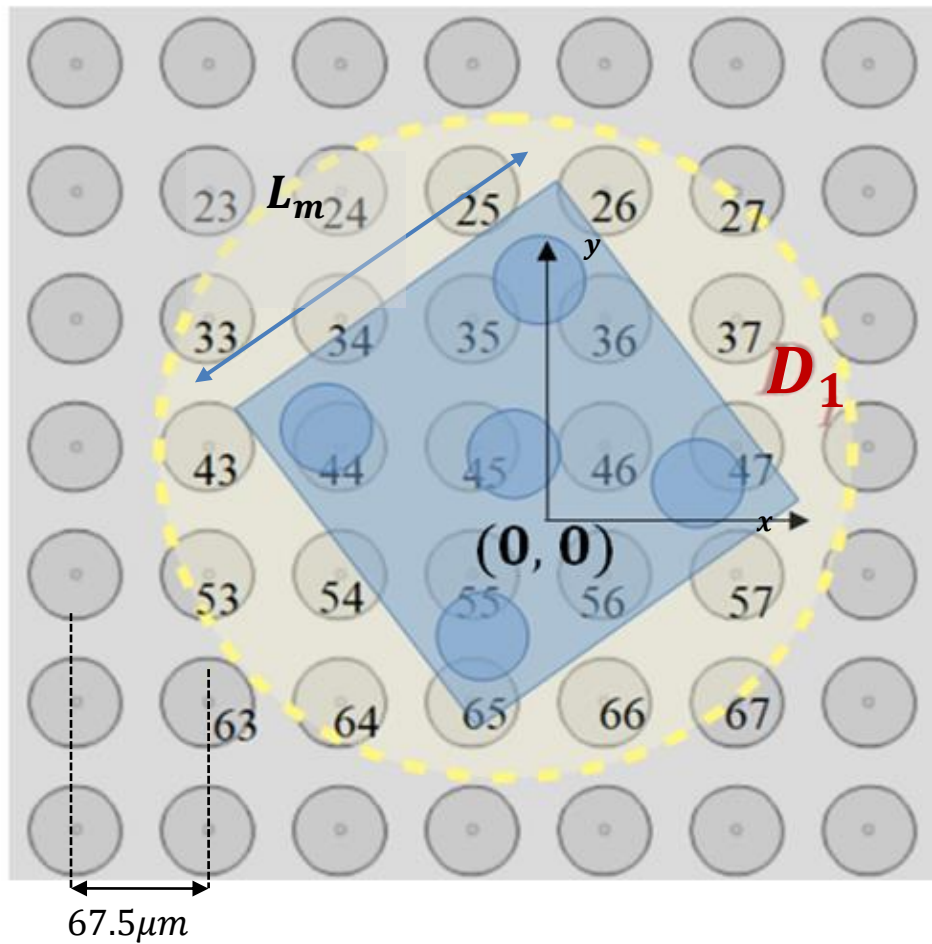
Όπου $\sum_{\kappa'=1}^{\kappa} (\sum F^i (n^{\kappa'}(\omega'_2)))$, $\sum_{\kappa'=1}^{\kappa} (\sum \tau^i (n^{\kappa'}(\omega'_2)))$ η συνολική δύναμη και ροπή που ασκείται στο Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου εξαιτίας των ταυτόχρονων ενεργοποιήσεων των $[n^1(\omega'_2) \dots n^{\kappa'}(\omega'_2) \dots n^{\kappa}(\omega'_2)]$ ηλεκτροδίων της ΕΠ, όπου $n^{\kappa'}(\omega'_2)$ το κ' ηλεκτρόδιο του ω'_2 ου συνδυασμού. Αυτό που προκύπτει από τον αλγόριθμο είναι το σύνολο από λίστες M_{m_i} το οποίο στο τέλος των υπολογισμών του ΠΕ αλγορίθμου φιλτράρονται με βάση την επιθυμητή κίνηση που ζητείται να υλοποιήσει το μικροαντικείμενο.



Ε.3.12: Διάγραμμα Ροής του Αλγορίθμου Πολλαπλών Ενεργοποιήσεων (ΠΕ)

3.4.3. Εφαρμογή των ΜΕ και ΠΕ αλγορίθμων – Εύρεση ενεργοποιήσεων για τη μεταφορική κίνηση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας στην ΕΠ

Για να επαληθευτούν οι υπολογισμοί των ΜΕ και ΠΕ αλγορίθμων μια πλατφόρμα 10×10 ηλεκτροδίων προσομοιώνεται στο Matlab/Simulink όπου $r = 25 \mu m$, $d_1 = 0.7$ έτσι ώστε $d_e = 67.5 \mu m$ και $L_p = 692.5 \mu m$. Το Κέντρο Συμμετρίας της ΕΠ είναι το $(0,0) \mu m$ και ένα τετραγωνικό μικροαντικείμενο μήκους $L_m = 6r + 3d_1r = 202.5 \mu m$, πάχους $\frac{L_m}{10} \cong 20 \mu m$ φτιαγμένο από πλεξιγκλάς με πυκνότητα $\rho_{plexiglass} = 1.18 \cdot 10^6 \frac{\mu g}{\mu m^3}$ ώστε το βάρος του να είναι ίσο με $W = 0.08 \mu N$ με τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων. Το μικροαντικείμενο είναι αρχικά τοποθετημένο στην ΕΠ με διαμόρφωση $q^1 = (-25 \mu m, 33.75 \mu m, 40^\circ)$ όπως παρουσιάζεται στην εικόνα .Ε.3.13.



Ε.3.13: Κυκλική Περιοχή D_1 για τον εντοπισμό ηλεκτροδίων γύρω από το ΚΜ του μικροαντικειμένου

Οι εξισώσεις για την κίνηση του μικροαντικειμένου περιγράφονται από:

$$M_1 \ddot{\mathbf{r}}^1 + b \cdot \dot{\mathbf{r}}^1 = \sum F^1 \quad (3.13)$$

$$I_1 \ddot{\theta}^1 + \frac{b}{M_1} \cdot I_1 \cdot \dot{\theta}^1 = \sum \tau^1 \quad (3.14)$$

όπου M_1 η μάζα του, I_1 η ροπή αδράνειας του και b η σταθερά απόσβεσης η οποία είναι ίση με $\left(b = \frac{\eta_l \cdot E}{h_l}\right)$, όπου $\eta_l = 5 \text{ μg μm}^{-1} \text{s}^{-1}$ το δυναμικό ιξώδες του Al_2O_3 , E το εμβαδόν του μικροαντικειμένου και h_l το πάχος του υγρού διηλεκτρικού.

Για να υλοποιηθεί η κίνηση των μικροαντικειμένων με ασφάλεια αποφεύγοντας την κατάρρευση των διηλεκτρικών [48], πρέπει να αποφεύγεται η ανάπτυξη ισχυρών ηλεκτροστατικών πεδίων. Μέσω των αλγορίθμων ME και ΠΕ υπολογίζεται η συνολική δύναμη που ασκείται στο Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου συνεπώς, η ένταση των πεδίων υπολογίζεται μέσω αυτών. Με βάση τους υπολογισμούς του φορτίου που υλοποιήθηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο, προκύπτει ότι το μέγεθος του φορτίου με το οποίο φορτίζονται τα ηλεκτρόδια της ΕΠ είναι της τάξης των pCb . Επίσης η μέγιστη επιτρεπτή τιμή για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση των διηλεκτρικών είναι της τάξης των $10^7 \frac{V}{m}$ [47]. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη τους υπολογισμούς των οριζόντιων και κάθετων δυνάμεων που παρουσιάζονται μεταξύ ενός ζεύγους ηλεκτροδίων προκύπτει ότι $\frac{F_v^i(d(n, i_v))}{\frac{F_{ver}(d(n, i_v))}{\mu_s}} \cong 0.01$. Συνεπώς, η μέγιστη δύναμη που μπορεί να εφαρμοσθεί στο μικροαντικείμενο είναι της τάξης

$$\text{των } 10\mu N \text{ μιας και } \frac{10\mu N}{1pCb} = \frac{10^7 N}{Cb} = \frac{10^7 V}{m}.$$

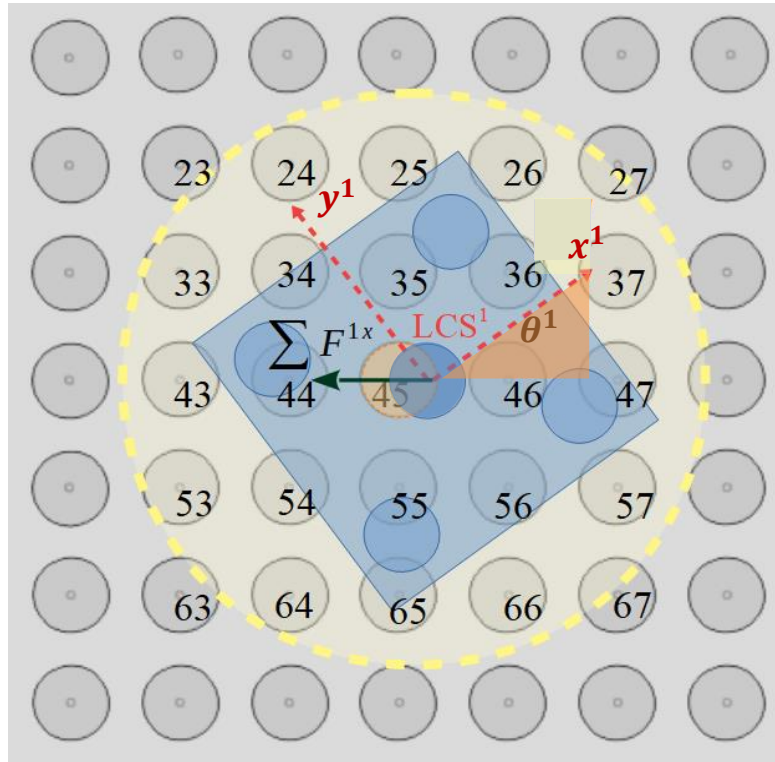
Οι ενεργοποιήσεις που προκύπτουν από τους υπολογισμούς του ME αλγόριθμου αναλύονται πρώτα και το αντίστοιχο σύνολο λιστών S_{m_1} παρουσιάζεται στον Πίνακα Π.3.4.

Π.3.4: Λίστες του ΜΕ αλγόριθμου για το μικροαντικείμενο της Ε.3.12

$\sum F^{1x} (\mu N)$	$\sum F^{1y} (\mu N)$	$\sum \tau^1 (pm \cdot N)$	u	$\theta_{\Sigma F^i}^i(^{\circ})$	n
-0.00226074	0.0047912953	0.1708119	0	-129°	24
-0.57322355	2.4521031	-22.41	3	112°	25
0.41062178	0.324912378	5.785385	3	49°	26
- 0.059713866	0.04909261	0.7169348	0	143°	33
0.21043153	0.69001	-32.371412	3	73°	34
-1.230287	-0.945225	-25.543675	3	-169°	35
1.2234794	0.6597723	28.56835	3	27°	36
0.0125844	0.0306269	0.217871	0	71°	37
-1.740321	-0.63959714	-22.29883	3	-154°	43
0.3660568	-1.170881	-91.26852	3	-17°	44
<u>-1.089</u>	<u>0.300146997</u>	<u>-0.86663</u>	<u>1</u>	179°	<u>45</u>
-0.679241	1.13793	42.56993	3	131°	46
0.91002	0.430258	45.2185	3	16°	47
-0.00492973	-0.0076823	-0.18579563	0	-128°	53
-0.0341758	0.06120393	5.797169	0	-92°	54
<u>-0.399873</u>	<u>0.837</u>	<u>1.87</u>	<u>1</u>	165°	<u>55</u>
0.081896	-0.1542041	-0.12731	0	-13°	56
0.1648031	-0.3131	30.2256	3	67°	57
-0.0472974	-0.02778	1.317177	0	-157°	64
- 0.008132543	-1.5441	30.737	3	-138°	65
0.0523	-0.0315323	-5.7058613	0	-47°	66

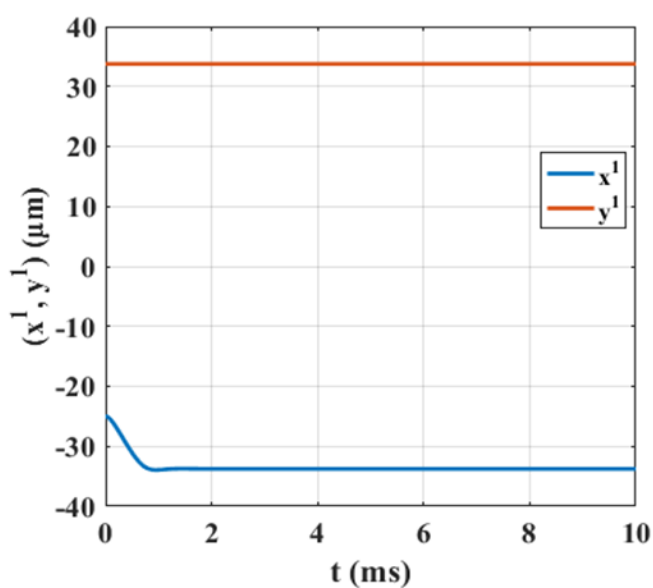
Η δυνατότητα του μικροαντικειμένου να αφήσει τη στατική κατάσταση πραγματοποιώντας είτε μεταφορική κίνηση, είτε περιστροφή γύρω από τον άξονα που περνά κάθετα από το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου ή σύνθετη κίνηση διερευνάται πρώτα με βάση τις τιμές του δείκτη u . Συγκεκριμένα, αναλύοντας τα στοιχεία του πίνακα Π.3.4 προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι περισσότερες ενεργοποιήσεις είτε οδηγούν το μικροαντικείμενο να παραμείνει στατικό στην αρχική του διαμόρφωση ($u = 0$) είτε να πραγματοποιήσει σύνθετη κίνηση ($u = 3$). Δεν υπάρχει δε καμία ενεργοποίηση που να οδηγεί στην περιστροφή του μικροαντικειμένου γύρω από τον άξονα που τέμνει κάθετα την επιφάνεια του μικροαντικειμένου διαπερνώντας το ΚΜ του ($u = 2$) και μόλις δύο ενεργοποιήσεις που αντιστοιχούν στη μεταφορική κίνηση του μικροαντικειμένου ($u = 1$) που είναι και το ζητούμενο αυτής της εφαρμογής.

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των δυνάμεων για τις δύο περιπτώσεις $u = 1$ προκύπτει ότι και το μικροαντικείμενο μπορεί να κινηθεί αριστερά εξαιτίας της ενεργοποίησης του $45^{\text{ου}}$ ηλεκτροδίου και πάνω – αριστερά εξαιτίας της ενεργοποίησης του $55^{\text{ου}}$ ηλεκτροδίου ($135^{\circ} \leq \theta_{\Sigma F^i}^i \leq 180^{\circ} / -180^{\circ} \leq \theta_{\Sigma F^i}^i \leq -135^{\circ}$ και $u = 1$). Ανάμεσα στις δύο επιλέγεται η ενεργοποίηση του $45^{\text{ου}}$ ηλεκτροδίου η οποία αποδίδει το μέγιστο μέτρο της δύναμης ΣF^1 . Η ενεργοποίηση του ηλεκτροδίου για τη μεταφορά του μικροαντικειμένου προς τα αριστερά παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.3.14, η οποία οδηγεί στο κεντράρισμα του μικροαντικειμένου στο 45° ηλεκτρόδιο της ΕΠ.

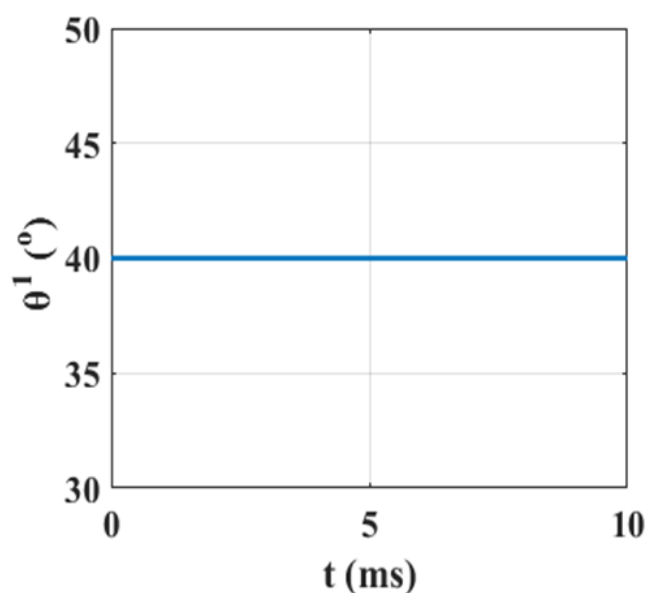


Ε.3.14: Ενεργοποίηση του $45^{\text{ου}}$ ηλεκτροδίου της ΕΠ

Η φόρτιση του $45^{\text{ου}}$ ηλεκτροδίου με εφαρμογή 50V δυναμικό προσομοιώνεται με κατάλληλο λογισμικό και οι γραφικές για τα r^1 και θ^1 ως προς το χρόνο παρουσιάζονται στις γραφικές της εικόνας E.3.15 (α, β) Από τις τιμές της θέσης συναρτήσει του χρόνου επαληθεύεται η κίνηση του μικροαντικειμένου προς τα αριστερά και το κεντράρισμά του στο 45° ηλεκτρόδιο. Επίσης, επιβεβαιώνεται ότι το μικροαντικείμενο πραγματοποιεί μεταφορική κίνηση, μιας και η γωνία του μικροαντικειμένου παραμένει σταθερή καθ' όλη την κίνηση του. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται ότι ο αλγόριθμος υπολογίζει σωστά τις δυνάμεις που ασκούνται στο Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου εξαιτίας της ενεργοποίησης του αντίστοιχου ηλεκτροδίου και προβλέπει σωστά την κίνηση που πρόκειται να πραγματοποιήσει το μικροαντικείμενο εξαιτίας αυτής.



(α)



(β)

E.3.15: Υπολογισμοί Προσομοιώσεων για την ενεργοποίηση του $45^{\text{ου}}$ ηλεκτροδίου

Όπως συζητήθηκε στην Ενότητα 3.4.3 ο αλγόριθμος ΠΕ καλείται εφόσον από τους υπολογισμούς του ΜΕ δεν προκύψει ενεργοποίηση που να ωθεί το μικροαντικείμενο να πραγματοποιήσει μια συγκεκριμένη κίνηση. Από τα αποτελέσματα στον Π.3.4 πίνακα προκύπτει ότι το μικροαντικείμενο μπορεί να μετατοπισθεί μόνο προς τα αριστερά. Η μεταφορά του μικροαντικειμένου προς τη δεξιά περιοχή της ΕΠ διερευνάται με τον αλγόριθμο πολλαπλών ενεργοποιήσεων.

Για να περιορισθεί όσο το δυνατό περισσότερο ο υπολογιστικός χρόνος η διερεύνηση με τον ΠΕ αλγόριθμο υλοποιείται για $\kappa \in [2 \ 5]$. Στην περίπτωση που δεν προκύπτει συνδυασμός ενεργοποιήσεων που να οδηγεί το μικροαντικείμενο στην επιθυμητή κατεύθυνση ο αλγόριθμος ΠΕ καλείται ξανά για $\kappa = 6, 7, 8 \dots$ σ έως ότου προκύψει μια κατάλληλη ενεργοποίηση. Συνεπώς, τα στοιχεία του M_{m_1} συνόλου φιλτράρονται με βάση τα κριτήρια

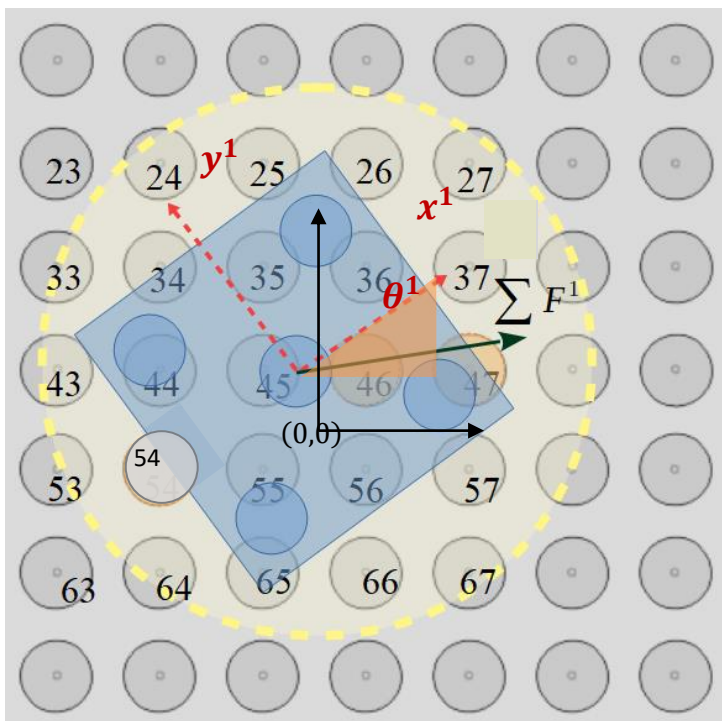
$\sum_{\kappa'=1}^{\kappa} \left(\sum F^{1x} (n^{\kappa'}(\omega_2')) \right) > 0$ και $\left| \sum_{\kappa'=1}^{\kappa} \left(\sum F^1 (n^{\kappa'}(\omega_2')) \right) \right| \leq 10\mu N$ για μεταφορική κίνηση του μικροαντικειμένου προς τα αριστερά ($0^\circ \leq \theta_{\Sigma F^i}^i \leq 45^\circ / -45^\circ \leq \theta_{\Sigma F^i}^i \leq 0^\circ$ και $u = 1$ και $\min(\kappa)$ και $\max(|\sum F^1|)$). Τα αποτελέσματα μετά το φιλτράρισμα του συνόλου λιστών παρουσιάζονται στον πίνακα Π.3.5.

Π.3.5. Φιλτραρισμένες λίστες του ΠΕ αλγόριθμου για μεταφορική κίνηση του μικροαντικειμένου προς τα αριστερά

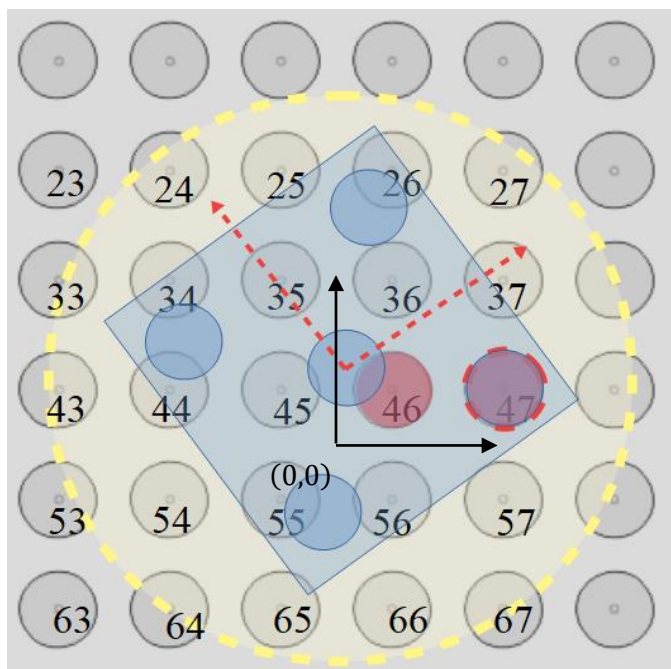
$\sum \left(\sum F^{1x} (n^{\kappa'}(\omega_2')) \right)$ (μN)	$\sum \left(\sum F^{1y} (n^{\kappa'}(\omega_2')) \right)$ (μN)	$\sum \left(\sum \tau^1 (n^{\kappa'}(\omega_2')) \right)$ ($\text{pm} \cdot N$)	n				
0.4641	0.293	0.0795	26	66			
1.63	-4.6	-0.867	36	37	43	44	45
<u>3.74</u>	<u>1.7</u>	<u>-0.186</u>	<u>46</u>	<u>47</u>			
0.154	-0.649	1.32	56	57	66		

Αναλύοντας τα στοιχεία του πίνακα Π.3.5 ανάμεσα στο σύνολο $\sum_{\kappa=2}^5 \binom{\sigma}{\kappa}$ λιστών του M_{m_1} συνόλου μόλις τέσσερα πληρούν τα κριτήρια για μεταφορική κίνηση του μικροαντικειμένου προς τα δεξιά. Όπως και στην περίπτωση του ΜΕ αλγορίθμου επιλέγεται η ταυτόχρονη ενεργοποίηση του $46^{\text{ου}}$ και $47^{\text{ου}}$ ηλεκτροδίου της ΕΠ η οποία αντιστοιχεί στο μέγιστο μέτρο της δύναμης $\sum F^1$. Η ενεργοποίηση του $46^{\text{ου}}$ και $47^{\text{ου}}$ ηλεκτροδίου παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.3.16.

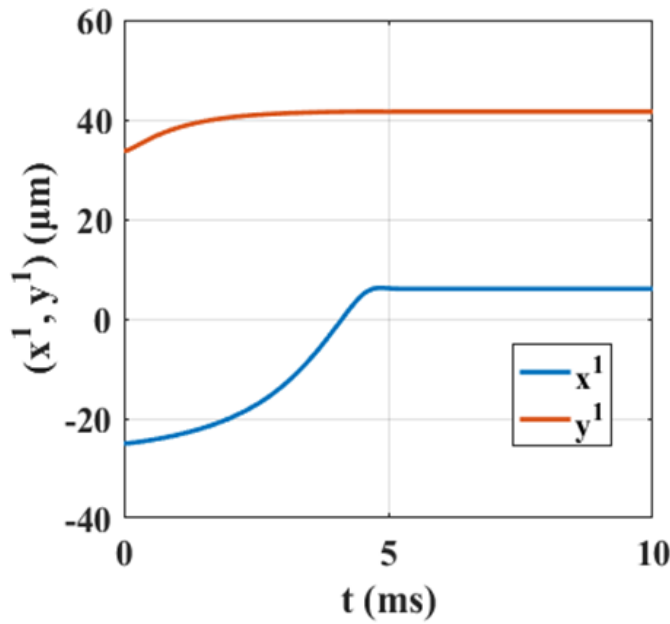
Στην εικόνα Ε.3.17 παρουσιάζεται η θέση ισορροπίας μετά την μεταφορά του μικροαντικειμένου προς τα δεξιά της ΕΠ όπου όπως φαίνεται ισορροπεί αφότου ένα εκ των ηλεκτροδίων του κεντραρισθεί με ένα ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας. Στις εικόνες Ε.3.18 (α) και (β) παρουσιάζονται οι τιμές του r^1 και θ^1 συναρτήσει του χρόνου έπειτα από τις ενεργοποιήσεις που παρουσιάζονται στην εικόνα Ε.3.16. Οι γραφικές παραστάσεις της εικόνας Ε.3.16 δείχνουν ότι το μικροαντικείμενο μεταφέρεται προς τα πάνω/ δεξιά στην ΕΠ. Η γωνία του μικροαντικειμένου αποκλίνει ανεπαίσθητα από τις 40° δεικνύοντας ότι πραγματοποιεί μεταφορική κι όχι σύνθετη κίνηση.



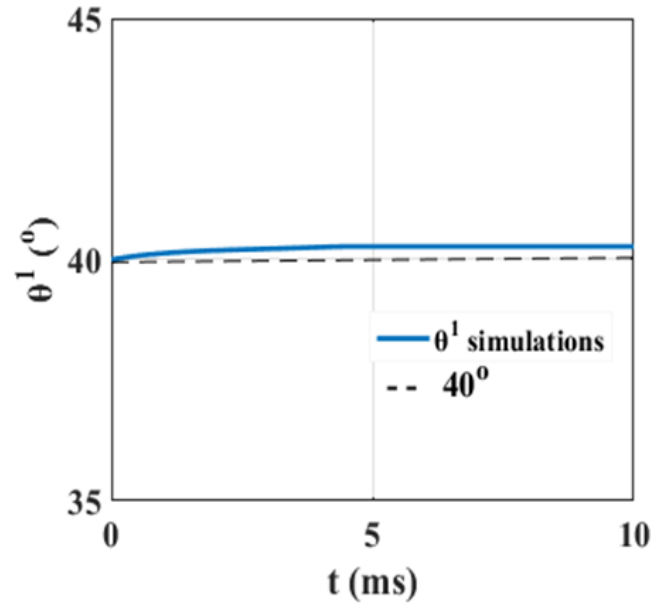
Ε.3.16 Ενεργοποίηση του 46^{ου} και 47^{ου} ηλεκτροδίου



Ε.3.17 Θέση Ισορροπίας μετά την ταύτιση των κέντρων του φορτισμένου ηλεκτροδίου της πλατφόρμας με του μικροαντικειμένου



(α)



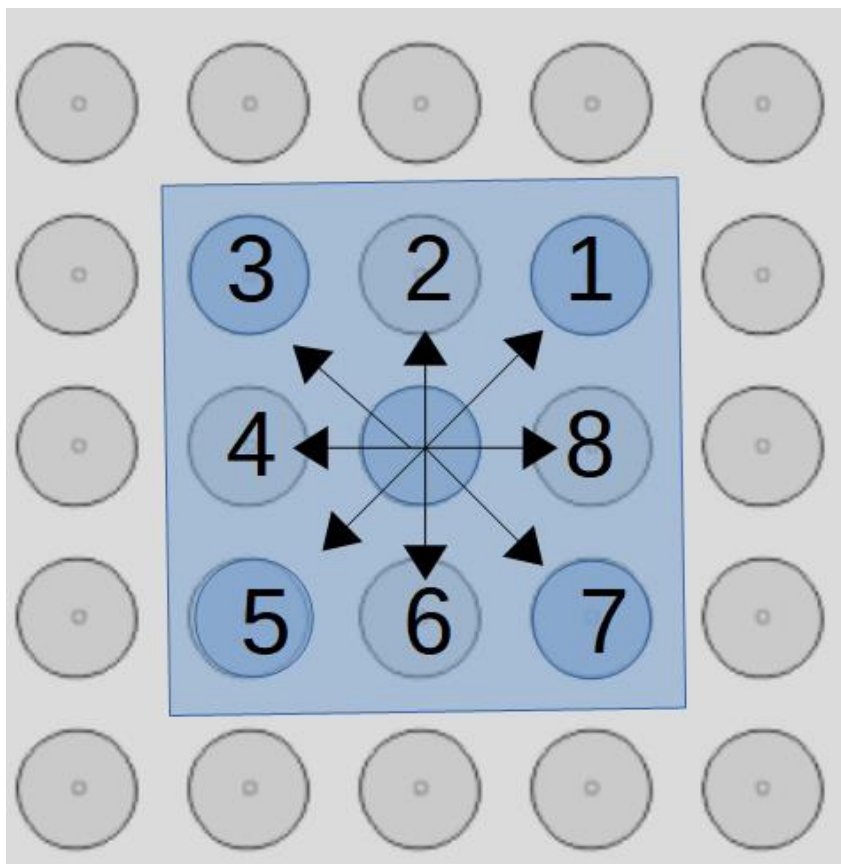
(β)

Ε.3.18: Αποτελέσματα προσομοίωσης έπειτα από την ενεργοποίηση του 46^{00} και 47^{00} ηλεκτροδίου

Συγκεντρωτικά διαπιστώνεται ότι μπορούν να εντοπισθούν ενεργοποιήσεις για την μετακίνηση των μικροαντικειμένων στην ΕΠ. Αποδεικνύεται ότι οι αλγόριθμοι ΜΕ και ΠΕ υπολογίζουν ορθά τις ενεργοποιήσεις που μπορούν να εφαρμοσθούν στα ηλεκτρόδια που περικυκλώνουν ένα μικροαντικείμενο και να υπολογίζουν σωστά τις δυνάμεις που ασκούνται στο Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου εξαιτίας αυτών των ενεργοποιήσεων. Ωστόσο, ένα γενικό συμπέρασμα είναι ότι το μικροαντικείμενο ισορροπεί όταν ένα από τα ηλεκτρόδια του κεντραριστεί σε ένα από τα ενεργοποιημένα ηλεκτρόδια της ΕΠ. Στις παραγράφους που ακολουθούν προτείνονται κανόνες ενεργοποιήσεων των ηλεκτροδίων της πλατφόρμας για κίνηση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας που αντιστοιχούν σε δύο γειτονικά ηλεκτρόδια της πλατφόρμας.

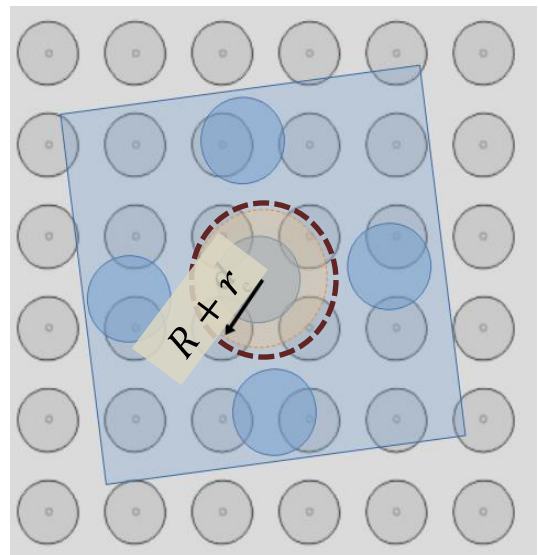
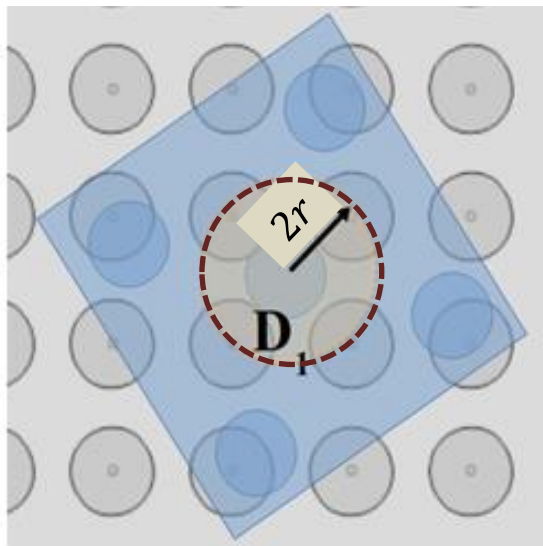
3.5 Ενεργοποιήσεις για την Μετατόπιση ενός Μικροαντικειμένου μεταξύ δύο Ηλεκτροδίων της ΕΠ

Στις προηγούμενες παραγράφους του 3ου Κεφαλαίου επιβεβαιώθηκε ότι ένα μικροαντικείμενο κινείται έως ότου ισορροπήσει σε μια νέα θέση ισορροπίας στην πλατφόρμα όπου ένα εκ των ηλεκτροδίων του κεντράρεται σε ένα ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο της. Συνεπώς, ένα μικροαντικείμενο τυχαίας αρχικής διαμόρφωσης κινείται στην πλατφόρμα έως ότου ισορροπήσει χωρίς να είναι γνωστό κατά την εφαρμογή των ενεργοποιήσεων η συνολική απόσταση που πρόκειται να διανύσει έως ότου ακινητοποιηθεί. Ωστόσο, όπως φαίνεται στην εικόνα Ε.3.19 όταν το μικροαντικείμενο είναι κεντραρισμένο (το Κέντρο Μάζας του ταυτίζεται με αυτό ενός ηλεκτροδίου της ΕΠ) με προσανατολισμό τέτοιο ώστε $\theta^i = 0$ το Κέντρο Μάζας του απέχει ίσες αποστάσεις από τα ηλεκτρόδια 2,4,6,8 και αντίστοιχα ίδια απόσταση από τα ηλεκτρόδια 1,3,5,7 τα οποία είναι τοποθετημένα διαγώνια από αυτό. Η απόδειξη ότι το μικροαντικείμενο έχει την ικανότητα να κινείται προς αυτά τα 8 ηλεκτρόδια της πλατφόρμας πρόκειται να αποτελέσει ένα σημαντικό δεδομένο απλοποιώντας παράλληλα τη διερεύνηση για την υλοποίηση μεγαλύτερων διαδρομών από τα μικροαντικείμενα. Στις επόμενες παραγράφους προτείνονται μέθοδοι ενεργοποιήσεων για τα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας με στόχο την κίνηση του μικροαντικειμένου σε ένα εκ των 8 ηλεκτροδίων που περικυκλώνουν το Κέντρο Μάζας του.

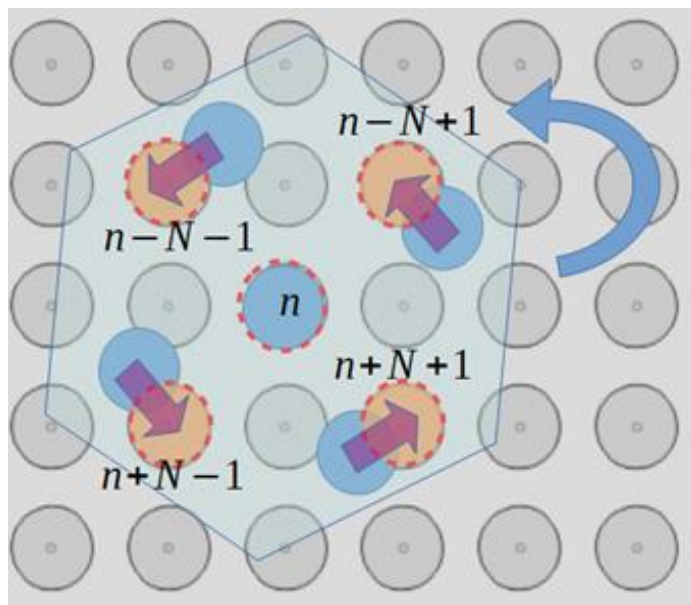
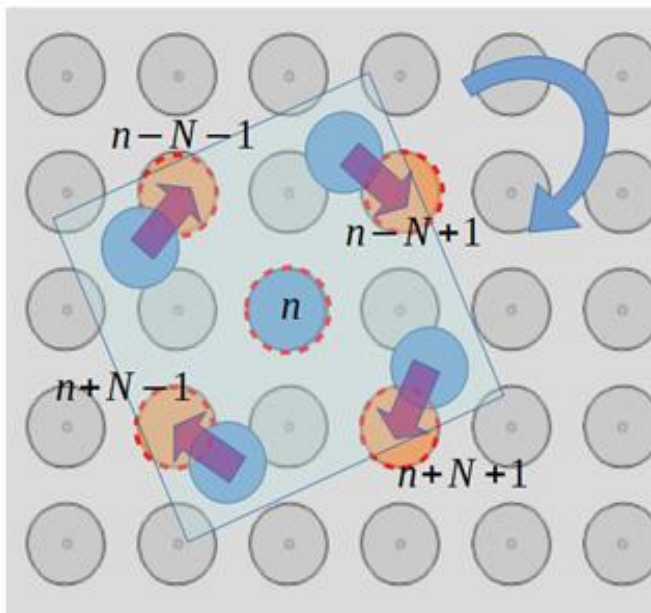


Ε.3.19: Κινήσεις σε γειτονικά ηλεκτρόδια

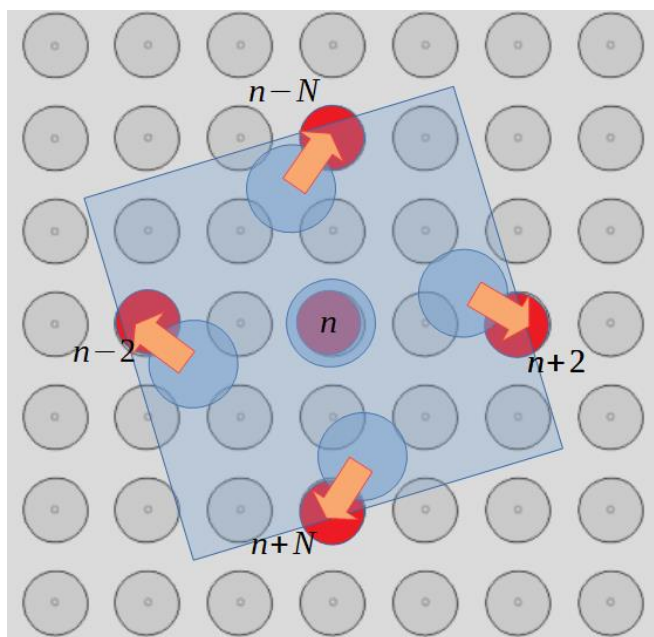
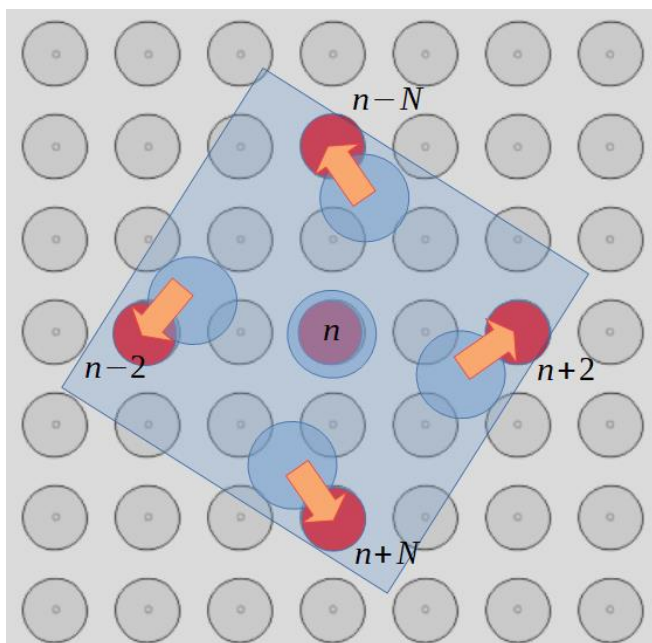
Για τον ορισμό μεθόδων ενεργοποίησης για την κίνηση του μικροαντικειμένου προς τις θέσεις που δεικνύονται στην Ε.3.1.9 θα πρέπει κατ' αρχάς του μικροαντικείμενο να είναι κεντραρισμένο. Όπως παρατηρήθηκε στις προσομοιώσεις της προηγούμενης παραγράφου προκύπτει ότι το μικροαντικείμενο μπορεί να κεντραριστεί σε ένα ηλεκτρόδιο της ΕΠ που περικυκλώνουν το Κέντρο Μάζας του εφόσον αυτό το ηλεκτρόδιο είναι ενεργοποιημένο. Συνεπώς, στην περίπτωση του μικροχειρισμού όπου ζητείται το κεντράρισμα του μικροαντικειμένου αρκεί η εφαρμογή του ΜΕ αλγορίθμου ορίζοντας μια περιοχή D_1 η οποία περιορίζεται γύρω από Κέντρο Μάζας του. Λαμβάνοντας υπόψη τους υπολογισμούς της δύναμης που παρουσιάστηκαν στο 2^ο Κεφάλαιο, ορίζεται ότι ένα ηλεκτρόδιο μπορεί να κεντραριστεί με την ενεργοποίηση ενός ηλεκτροδίου της ΕΠ αφήνοντας τη στατική κατάσταση εφόσον η οριζόντια απόσταση των κέντρων τους είναι μεγαλύτερη του $0,1r$ και μικρότερη ίση του $2r$ και $r + R$ για την τετραγωνική και σταυρωτή διάταξη ηλεκτροδίων αντίστοιχα. Συνεπώς, σε περιπτώσεις διερεύνησης ενεργοποιήσεων για το κεντράρισμα του μικροαντικειμένου η περιοχή D_1 περιορίζεται γύρω από το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου όπως φαίνεται στην εικόνα Ε. 3.20.



Ε3.20: Κυκλική περιοχή εύρεσης ηλεκτροδίων κεντραρίσματος



Ε. 3.21: Ενεργοποιήσεις ευθυγράμμισης μικροαντικειμένων τετραγωνικής τοποθέτησης



Ε.3.22: Ενεργοποιήσεις ευθυγράμμισης σταυρωτής τοποθέτησης

Το δεύτερο ζήτημα που πρέπει να επιλυθεί είναι αυτό της ευθυγράμμισης των μικροαντικειμένων. Η ενεργοποίηση του ηλεκτροδίου κάτω από το Κέντρο Μάζας ενός κεντραρισμένου μικροαντικειμένου, οδηγεί στην

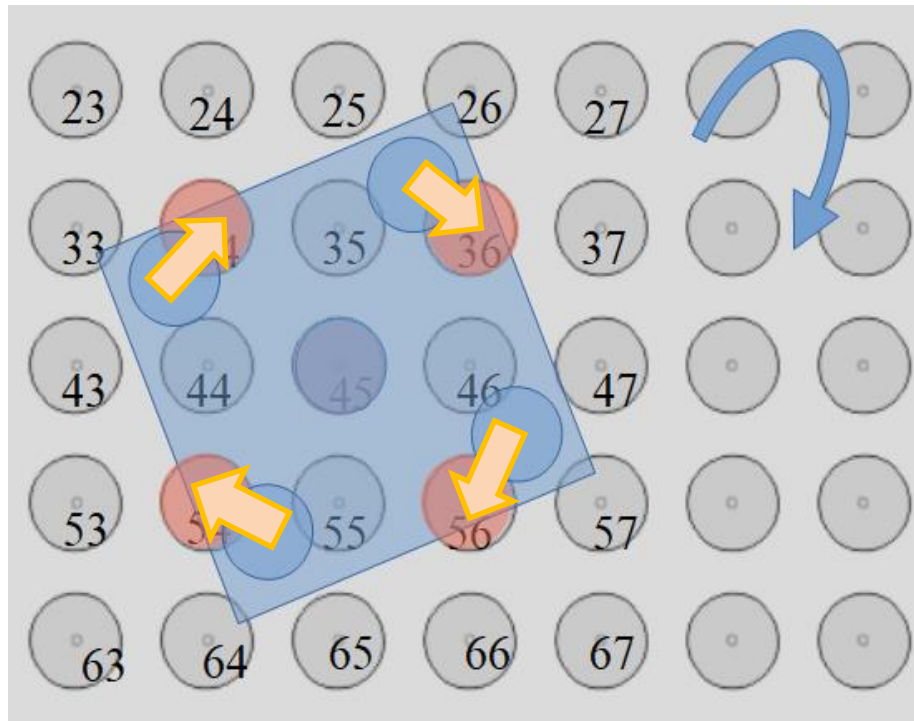
σταθεροποίηση του εξαιτίας της εμφάνισης ισχυρών κατακόρυφων ελκτικών δυνάμεων. Η συνθήκη αυτή συνεισφέρει στον ορισμό ενός κατακόρυφου άξονα ως προς το επίπεδο της πλατφόρμας ο οποίος διαπερνά το Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου. Ο στόχος είναι η ευθυγράμμιση κι όχι η πλήρης περιστροφή του μικροαντικειμένου ως προς τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής γύρω από το Κέντρο Μάζας του. Όπως φαίνεται στις εικόνες E.3.21 και E.3.22 όποιος κι αν είναι ο αρχικός προσανατολισμός του μικροαντικειμένου η ευθυγράμμιση του υλοποιείται πάντα με την ενεργοποίηση των ηλεκτροδίων των εξισώσεων (3.19) και (3.20) για την τετραγωνική και σταυρωτή διάταξη αντίστοιχα.

$$n, n - N + 1, n + N + 1, n + N - 1, n - N - 1 \quad (3.19)$$

$$n, n + 2, n - 2, n - N, n + N \quad (3.20)$$

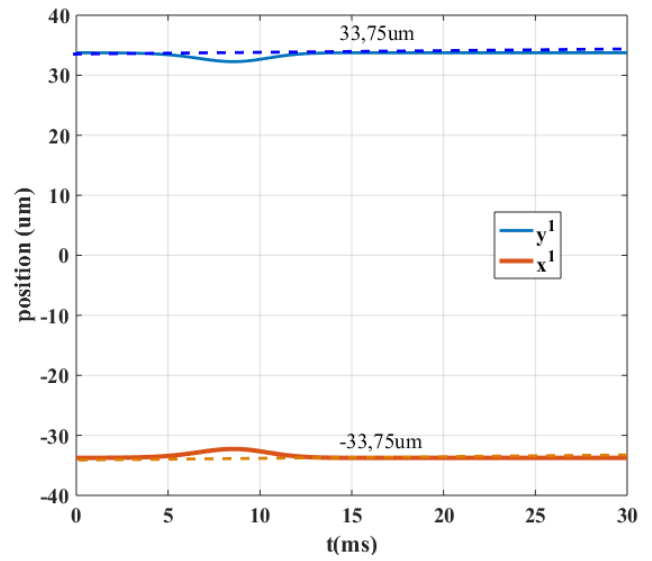
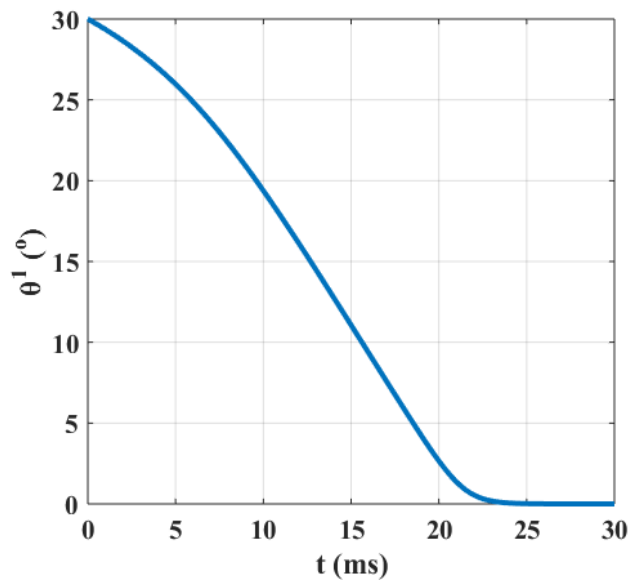
όπου n το ηλεκτρόδιο που συμπίπτει με το ΚΜ του μικροαντικειμένου

Σε συνέχεια της ενότητας 3.4.3 προσομοιώνεται η ευθυγράμμιση του m_1 αφότου κεντραρισθεί στο 45° ηλεκτρόδιο με διαμόρφωση $q^1 = (-33.75\mu t, 33.75\mu t, 30^\circ)$ κι οι αντίστοιχες ενεργοποιήσεις παρουσιάζονται στην εικόνα E.3.23.



E.3.23: Προσομοίωση ενεργοποιήσεων ευθυγράμμισης μικροαντικειμένου τετραγωνικής τοποθέτησης

Η ενεργοποίηση του $34^\circ, 36^\circ, 54^\circ$ και 56° ηλεκτροδίου προσομοιώνεται στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» 10×10 ηλεκτροδίων που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.4.3 και οι τιμές της θέσης και της γωνίας συναρτήσει του χρόνου φαίνονται στα γραφήματα της εικόνας E.3.24.



E.3.24: Αποτελέσματα προσομοίωσης μετά την ενεργοποίηση του του 34^{ov} , 36^{ov} , 54^{ov} και 56^{ov}

Οι τιμές της γωνίας και της θέσης αποδεικνύουν την επιτυχή ευθυγράμμιση του μικροαντικειμένου όπου τέλος της διαδικασίας αποδίδεται $\theta^1 = 0$ χωρίς να έχει αλλάξει η αρχική θέση των μικροαντικειμένων.

3.6. Ενεργοποιήσεις των ηλεκτροδίων της ΕΠ για την Κίνηση

Κεντραρισμένων/Ευθυγραμμισμένων Μικροαντικειμένων μεταξύ δύο Θέσεων Ισορροπίας

Με την ολοκλήρωση των διαδικασιών κεντραρίσματος και ευθυγράμμισης εφαρμόζονται στο μικροαντικείμενο συγκεκριμένες ενεργοποιήσεις για την κίνηση του μεταξύ δύο Θέσεων Ισορροπίας.

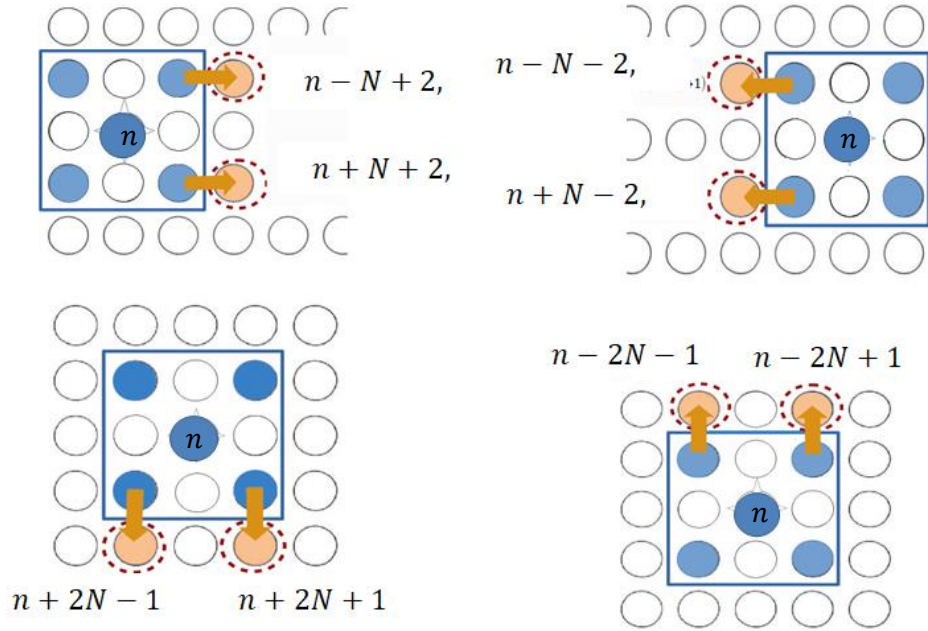
3.6.1 Τετραγωνική Διάταξη Ηλεκτροδίων

Στην περίπτωση της τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων στο μικροαντικείμενο δύο Θέσεις Ισορροπίας αντιστοιχούν σε δύο ηλεκτρόδια της «Εξυπνης Πλατφόρμας». Οι ενεργοποιήσεις την κίνηση των μικροαντικειμένων με την τετραγωνική διάταξη παρουσιάζονται στον πίνακα Π.3.6. Οι κανόνες ενεργοποίησης προκύπτουν με βάση τη στατική ανάλυση του μικροαντικειμένου που παρουσιάστηκε στο 2ο Κεφάλαιο όπου αποδείχθηκε ότι χρειάζονται τουλάχιστον δύο ενεργοποιήσεις ώστε να αφήσει το μικροαντικείμενο τη στατική κατάσταση. Συνεπώς, όπως φαίνεται στις εικόνες Ε.3.25 και Ε.3.26 στην ανάλυση δυνάμεων που υλοποιήθηκε εντοπίστηκε ο ελάχιστος αριθμός ηλεκτροδίων έτσι ώστε οι δυνάμεις που ασκούνται στο Κέντρο Μάζας του μικροαντικειμένου να οδηγούν στη μεταφορική κίνηση του διατηρώντας μηδενική τη ροπή δύναμης.

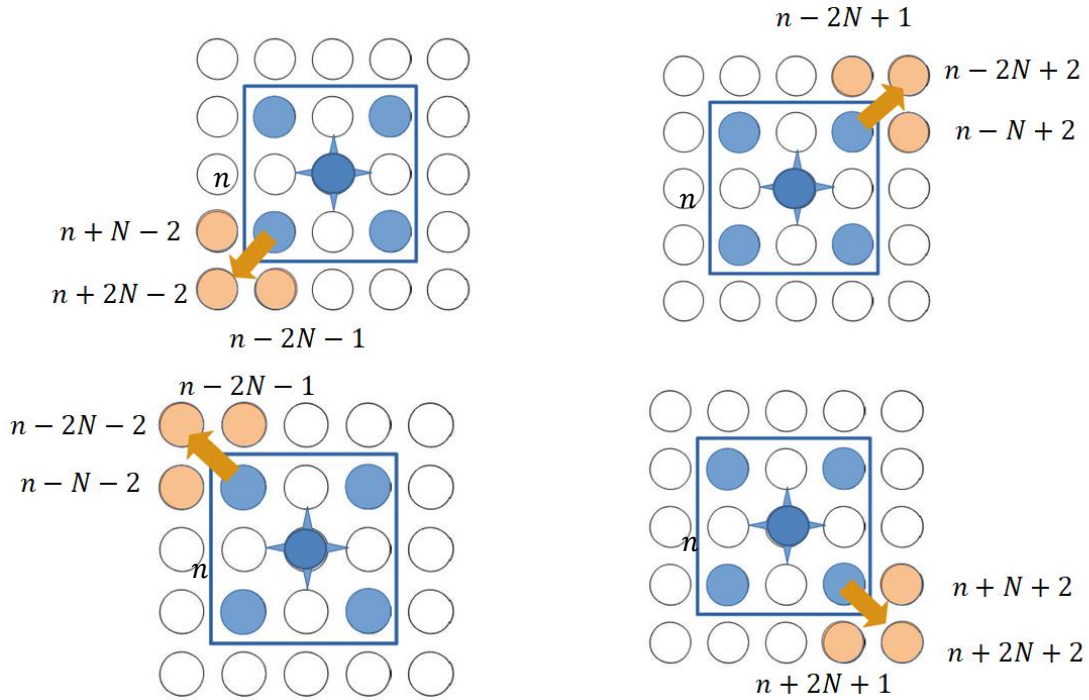
Π.3.6: Ενεργοποιήσεις ηλεκτροδίων για την κίνηση μικροαντικειμένου τετραγωνικής τοποθέτησης

Κινήσεις Με Σημείο Αναφοράς το Κέντρο Συμμετρίας της «Εξυπνης Πλατφόρμας»	Ενεργοποιήσεις των Ηλεκτροδίων της «Εξυπνης Πλατφόρμας» (n το ηλεκτρόδιο που συμπίπτει με το ΚΜ του μικροαντικειμένου)
Δεξιά	$n - N + 2, n + N + 2$
Αριστερά	$n - N - 2, n + N - 2$
Κάτω	$n + 2N - 1, n + 2N + 1$
Πάνω	$n - 2N - 1, n - 2N + 1$
Κάτω Αριστερά	$n + N - 2, n + 2N - 2, n - 2N - 1$
Πάνω Δεξιά	$n - 2N + 1, n - 2N + 2, n - N + 2$
Πάνω Αριστερά	$n - 2N - 2, n - N - 2, n - 2N - 1$
Κάτω Δεξιά	$n + N + 2, n + 2N + 2, n + 2N + 1$

Οι ενεργοποιήσεις του Π.3.6. αναπαρίστανται στις εικόνες E.3.25 και E.3.26.

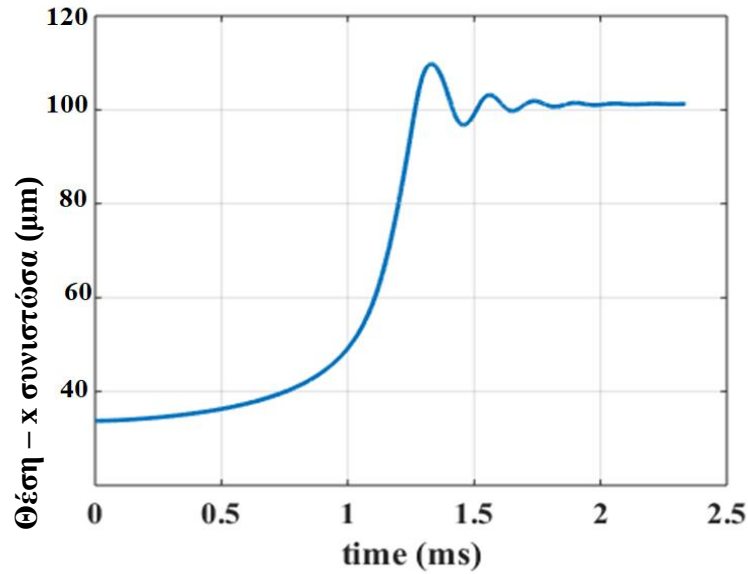


E.3.25: Ενεργοποιήσεις για τη δεξιά/αριστερά/πάνω και κάτω κίνηση για την τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων

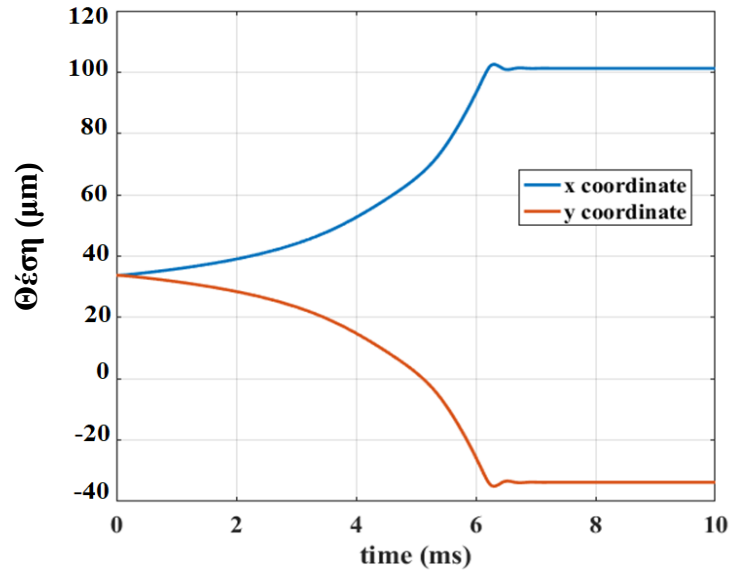


E.3.26: Ενεργοποιήσεις διαγώνιας κίνησης – τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων

Η κίνηση ενός μικροαντικειμένου με τετραγωνική διάταξη προσομοιώνεται στην πλατφόρμα των 10×10 ηλεκτροδίων με χαρακτηριστικά $r = 25 \mu m$, $d_1 = 0,7$ έτσι ώστε $d_e = 67,5 \mu m$ και $L_P = 692,5 \mu m$. Το μικροαντικείμενο είναι κεντραρισμένο στο 46° ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας και η διαμόρφωση του ισούται με και διαμόρφωση $q^1 = (33,75, 33,75 \mu m, 0^\circ)$. Οι τιμές της θέσης του μικροαντικειμένου συναρτήσει του χρόνου για κίνηση προς τα δεξιά και προς τα κάτω δεξιά παρουσιάζονται στις γραφικές παραστάσεις των εικόνων E.3.27 και E.3.28.



E.3.27: Μετάβαση σε νέα $\Theta.I.$ με κίνηση προς τα δεξιά



E.3.28: Μετάβαση σε νέα $\Theta.I.$ με κίνηση κάτω- δεξιά

Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι το μικροαντικείμενο πραγματοποιεί διακριτές κινήσεις μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας. Γύρω από την τελική θέση ισορροπίας κάνει μια μικρή ταλάντωση έως ότου ηρεμήσει στην τελική θέση.

3.6.2 Σταυρωτή Διάταξη Ηλεκτροδίων

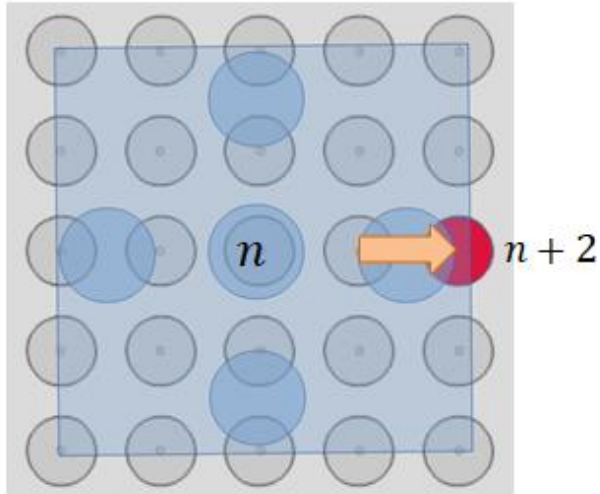
Τα μικροαντικείμενα με σταυρωτή διάταξη μπορούν να ισορροπήσουν αφότου μετατοπισθούν κατά $\frac{d_e}{2}$. Με βάση αυτή την ιδιότητα προτείνονται οι μέθοδοι ενεργοποίησης που φαίνονται στον πίνακα Π.3.7 ορίζοντας ως n το ηλεκτρόδιο που συμπίπτει στην αρχή με το ΚΜ του μικροαντικειμένου.

Π.3.7. Μέθοδοι ενεργοποίησης για την τοποθέτηση σταυρού

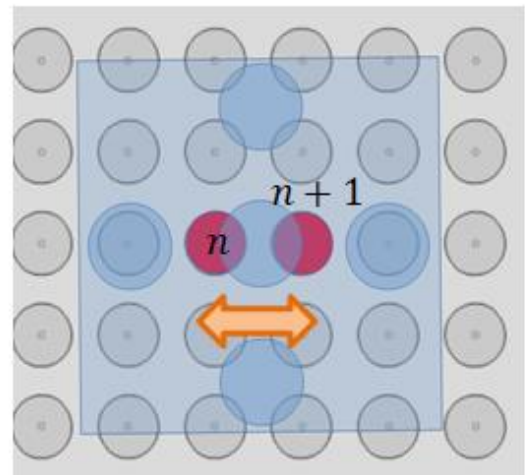
Κινήσεις	Ενεργοποιήσεις των Ηλεκτροδίων της «Έξυπνης Πλατφόρμας» (n το ηλεκτρόδιο που συμπίπτει αρχικά με το ΚΜ του μικροαντικειμένου)		
	1 ^η μετατόπιση	1 ^η σταθεροποίηση	2 ^η μετατόπιση/ 2 ^η σταθεροποίηση
Δεξιά	$n + 2,$	$n, n + 1$	$n + N + 1$ $n + 2N + 1$ $n - N + 1$ $n - 2N + 1$
Αριστερά	$n - 2$	$n, n - 1$	$n + N - 1$ $n + 2N - 1$ $n - N - 1$ $n - 2N - 1$
Κάτω	$n + 2N$	$n + N$	$n + 1 + N$ $n + 2 + N$ $n - 1 + N$ $n - 2 + N$
Πάνω	$n - 2N$	$n - N$	$n + 1 - N$ $n + 2 - N$ $n - 1 - N$ $n - 2 - N$

Όπως φαίνεται στον Π.3.7 και στην εικόνα Ε.3.29 στην περίπτωση της Σταυρωτής διάταξης πέραν των ενεργοποιήσεων για τη μετατόπιση του μικροαντικειμένου εφαρμόζονται και ενεργοποιήσεις για τη σταθεροποίηση

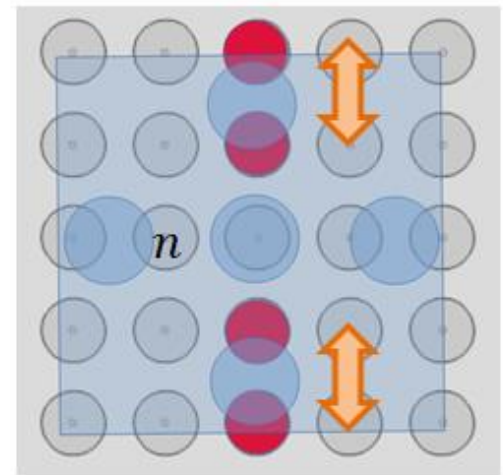
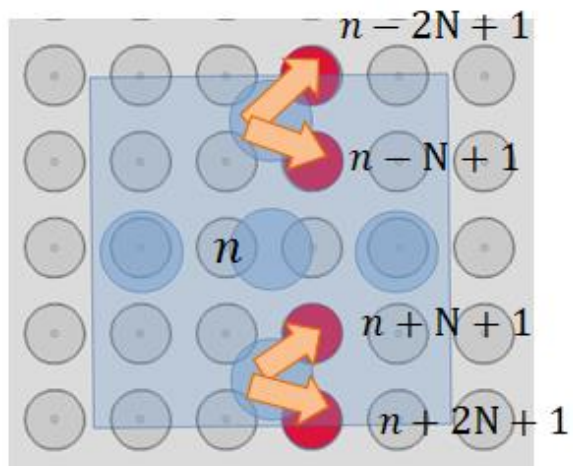
του μικροαντικειμένου. Οι ενεργοποιήσεις σταθεροποίησης έχουν ιδιαίτερη σημασία στην εξασφάλιση της 2^{ης} Θέσης ισορροπίας ακριβώς μετά από μια μετατόπιση ίση με $\frac{d_e}{2}$.



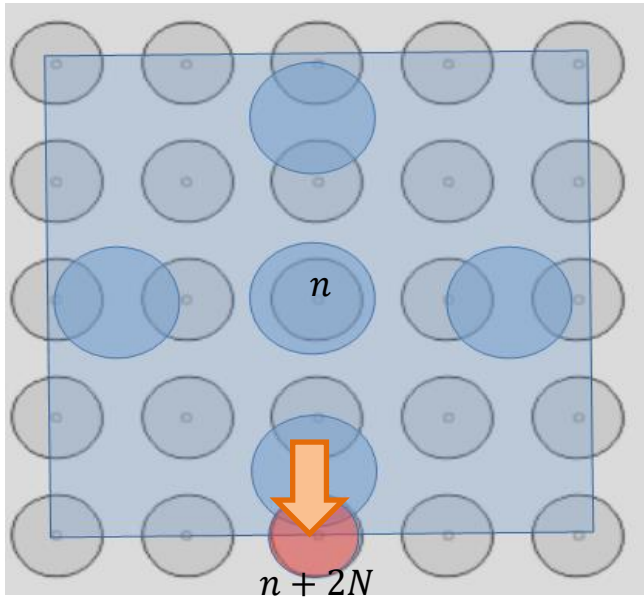
Μετατόπιση



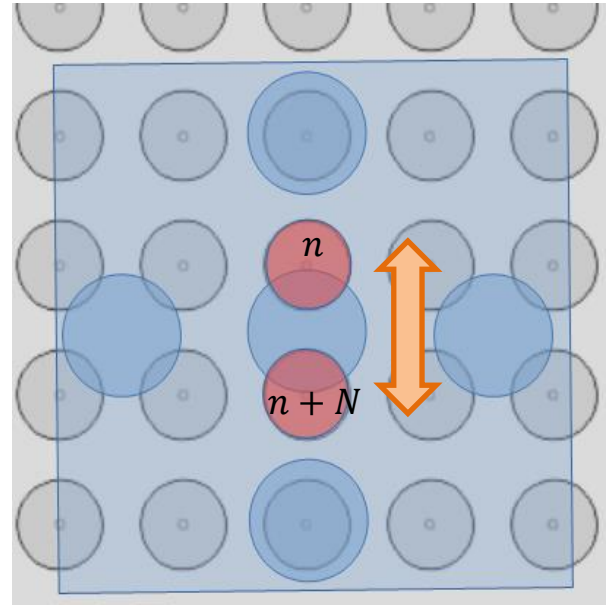
Σταθεροποίηση



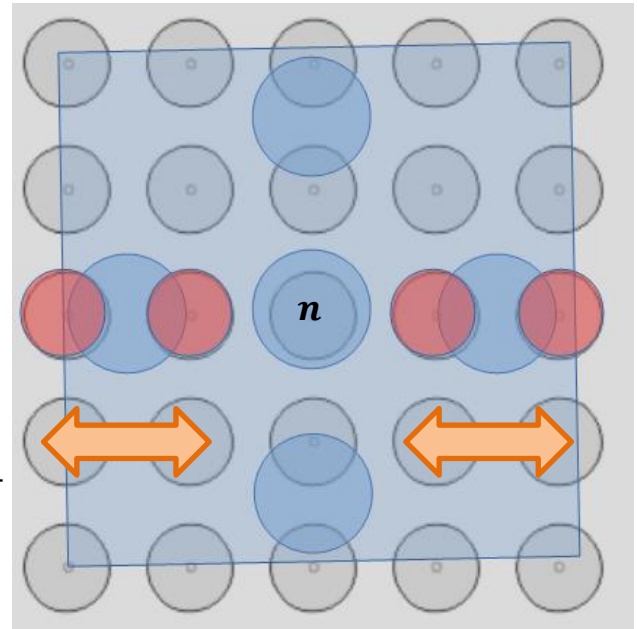
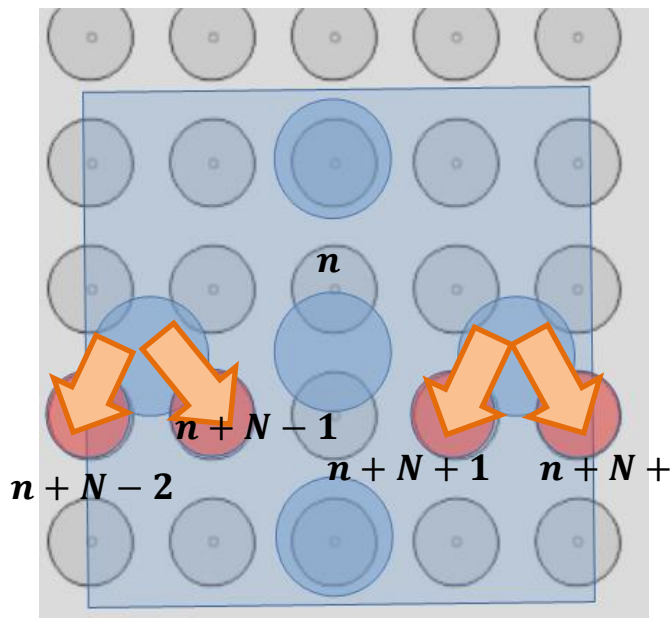
Ε.3.29: Ενεργοποιήσεις μετατόπισης και σταθεροποίησης για κίνησης του μικροαντικειμένου δεξιά



Μετατόπιση



Σταθεροποίηση

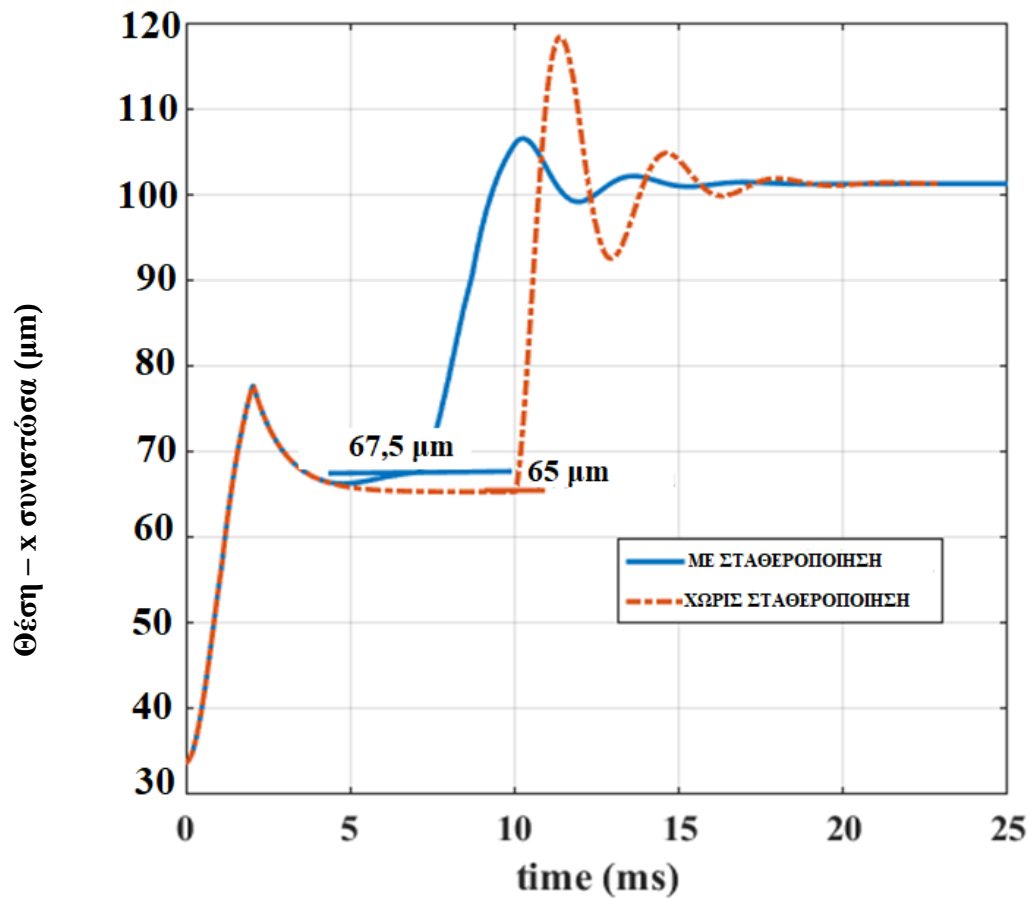


Ε.3.30: Ενεργοποιήσεις για τη μετατόπιση του μικροαντικειμένου σταυρωτής τοποθέτησης προς τα κάτω

Η κίνηση ενός τετραγωνικού μικροαντικειμένου με σταυρωτή διάταξη προσομοιώνεται στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» των 10x10 ηλεκτροδίων με χαρακτηριστικά $r = 25\mu m$, $d_1 = 0,7$ έτσι ώστε $d_e = 67,5\mu m$ και

$L_p = 692,5\mu m$. Η αρχική διαμόρφωση του μικροαντικειμένου ισούται με $q^1 = (33,75, 33,75\mu m, 0^0)$ και στο γράφημα της εικόνας E.3.31 παρουσιάζεται η κίνηση του προς τα δεξιά με και χωρίς χρήση της ενεργοποίησης σταθεροποίησης.

Η γραφική της εικόνας E.3.31 επιβεβαιώνει την επιτυχή μετατόπιση του μικροαντικειμένου μεταξύ δύο ηλεκτροδίων. Επαληθεύεται επίσης, η ύπαρξη μιας ακόμα θέσης ισορροπίας μεταξύ των ηλεκτροδίων και η συμβολή της σταθεροποιητικής ενεργοποίησης. Η αρχική διαμόρφωση είναι η $q^1 = (33,75, 33,75\mu m, 0^0)$ και $d_e = 67,5\mu m \leftrightarrow \frac{d_e}{2} = 33,75$ συνεπώς η θέση έπειτα από μετατόπιση κατά $\frac{d_e}{2}$ αναμένεται να ισούται με $q^{1'} = (67,5\mu m, 33,75\mu m, 0^0)$. Η γραφική της Εικόνας 3.31 επαληθεύει τη συμβολή της σταθεροποίησης ώστε το μικροαντικείμενο να φτάσει στην επιθυμητή διαμόρφωση.



E.3.31: Αποτελέσματα προσομοίωσης γαι την κίνηση του μικροαντικειμένου προς τα δεξιά με ή χωρίς ενεργοποίηση σταθεροποίησης

3.7 Συμπεράσματα – Συμβολή 3^{ου} Κεφαλαίου

Ο σκοπός του 3^{ου} Κεφαλαίου ήταν η περιγραφή των τρόπων ενεργοποίησης των ηλεκτροδίων της «Έξυπνης Πλατφόρμας» για την κίνηση του μικροαντικειμένου μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας. Στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης:

- Περιεγράφηκε η αλληλεπίδραση ενός ηλεκτροδίου του μικροαντικειμένου με ένα ενεργοποιημένο ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας και έγινε η ανάλυση των συνιστωσών της δύναμης και της ροπής κάθε επιμέρους αλληλεπίδρασης ως προς το τοπικό σύστημα αναφοράς του μικροαντικειμένου.

Ένα μεγάλο στοίχημα είναι η πλατφόρμα να μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα ως μέρος της γραμμής παραγωγής ενός μικρο – εργοστασίου χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση ή μηχανική υποστήριξη. Συνεπώς, θα πρέπει να είναι δυνατός ο χειρισμός των μικροαντικειμένων στην ΕΠ οποιαδήποτε κι αν είναι η διαμόρφωση τους σε αυτή. Με βάση αυτή την παράμετρο προτάθηκαν δύο νέοι αλγόριθμοι μέσω των οποίων εντοπίζονται όλα τα Ηλεκτρόδια της Πλατφόρμας που περικυκλώνουν το μικροαντικείμενο υποδεικνύοντας το αντίκτυπο που έχει η ενεργοποίησή τους στην κίνηση του Μικροαντικειμένου. Συγκεκριμένα πρόκειται για του αλγόριθμους:

- ✓ Μονής Ενεργοποίησης (ΜΕ): αλγόριθμος μέσω του οποίου εντοπίζονται όλα τα ηλεκτρόδια που περικυκλώνουν το μικροαντικείμενο και υπολογίζονται δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται στο Κέντρο Μάζας του εξαιτίας της ενεργοποίησης του κάθε ηλεκτροδίου. Εν συνεχεία αναπτύχθηκαν κανόνες οι οποίοι δείχνουν τι κίνηση θα κάνει το μικροαντικείμενο ώστε να επιλεγεί η ενεργοποίηση που οδηγεί το μικροαντικείμενο στη σωστή διεύθυνση με το σωστό τρόπο.
- ✓ Πολλαπλών Ενεργοποιήσεων (ΠΕ): ο αλγόριθμος ΠΕ καλείται στην περίπτωση που οι ενεργοποιήσεις που προκύπτουν από το ΜΕ αλγόριθμο δεν συμβάλλουν στον επιθυμητό χειρισμό των μικροαντικειμένων. Ο αλγόριθμος ΠΕ ορίζει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς ταυτόχρονης ενεργοποίησης των ηλεκτροδίων που προκύπτουν από το ΜΕ και αποδίδει με βάση τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται στο μικροαντικείμενο την κίνηση που πρόκειται να κάνει, επιλέγοντας εν τέλει το συνδυασμό ενεργοποιήσεων που θα βοηθήσουν ώστε να η πλατφόρμα να χειρισθεί σωστά το μικροαντικείμενο.
- ✓ Η υπολογισμοί των αλγορίθμων εφαρμόστηκαν σε μια προσομοιωμένη πλατφόρμα ηλεκτροδίων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν ότι οι αλγόριθμοι υπολογίζουν ορθά εάν μπορούν να κινηθούν τα μικροαντικείμενα, το είδος της κίνησης που πρόκειται να πραγματοποιήσουν και τη διεύθυνση πρόκειται να ακολουθήσουν.

Οι προσομοιώσεις της κίνησης δείχνουν ότι τα μικροαντικείμενα μπορούν να κεντραριστούν σε ένα ηλεκτρόδιο της «Έξυπνης Πλατφόρμας» που περικυκλώνει το Κέντρο Μάζας του. Με αυτό το δεδομένο:

- ✓ Αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι ευθυγράμμισης των μικροαντικειμένων συναρτήσει του ηλεκτροδίου στην πλατφόρμα όπου κεντράρονται.

Παρατηρήθηκε ότι εξαιτίας της δομής της «Εξυπνης Πλατφόρμας» και των ενεργοποιήσεων που πραγματοποιήθηκε το 2^ο Κεφάλαιο το μικροαντικείμενο μπορεί να μετατοπίζεται μεταξύ των ηλεκτροδίων που περικυκλώνουν το Κέντρο Μάζας του, εφόσον είναι κεντραρισμένο κι ευθυγραμμισμένο. Συνεπώς για ένα κεντραρισμένο/ευθυγραμμισμένο μικροαντικείμενο:

- ✓ Διερευνήθηκαν οι δυνατές κινήσεις ανά διάταξη: οριζόντια/κάθετη κίνηση για τα μικροαντικείμενα σταυρωτής διάταξης, οριζόντια/κάθετη/διαγώνια για τα μικροαντικείμενα σταυρωτής διάταξης
- ✓ Αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι ενεργοποιήσεων για την μετατόπιση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας με βάση τις διευθύνσεις που μπορεί να ακολουθήσει το μικροαντικείμενο
 - Για την περίπτωση της σταυρωτής διάταξης προτάθηκαν αλγόριθμοι ενεργοποίησης για την ακρίβη μετατόπιση του μικροαντικειμένου στο μέσο της οριζόντιας/κάθετης απόστασης δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας

Οι υπολογισμοί και οι προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν στο 3^ο Κεφάλαιο δείχνουν ότι μέσω των αλγορίθμων ΜΕ/ΠΕ μπορούν να εντοπίζονται όλες οι δυνατές ενεργοποιήσεις που μπορούν να εφαρμοσθούν στα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας, υπολογίζοντας σωστά την κίνηση που μπορούν να κάνουν τα μικροαντικείμενα που βρίσκονται στην αντίστοιχη περιοχή της ΕΠ. Οι προσομοιώσεις των κινήσεων του μικροαντικειμένου τυχαίας διαμόρφωσης δείχνουν ότι υπάρχει η ευελιξία από μεριάς της πλατφόρμας να μετατοπίζει τα μικροαντικείμενα μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας και να τα κεντράρει σε ηλεκτρόδια της. Οι κινήσεις συμβάλλουν στην παραδοχή ότι η πλατφόρμα μπορεί να υλοποιήσει ευέλικτο και αυτόνομο χειρισμό μικροαντικειμένων τυχαίας διαμόρφωσης μετά τη μεταφορά τους στην πλατφόρμα. Εφόσον τα μικροαντικείμενα κεντραριστούν κι ευθυγραμμισθούν μπορούν να τους εφαρμοσθούν συγκεκριμένοι αλγόριθμοι ενεργοποιήσεων για τη διακριτή κίνηση τους μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας. Η ιδιότητα αυτή λαμβάνετε υπόψη για τη διερεύνηση της παράλληλης πολλαπλών μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» που πρόκειται να διερευνηθεί στο 4^ο Κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 4^ο Παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων στην Έξυπνη Πλατφόρμα

4.1 Περίληψη 4^{ου} Κεφαλαίου

Η αυτόνομη παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων για εφαρμογές διαχωρισμού και μικροσυναρμολόγησης αποτελεί ένα μεγάλο στοίχημα στη βελτιστοποίηση της μαζικής παραγωγής των Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στον 3^ο Κεφάλαιο επιβεβαιώνουν τη δυνατότητα ενός μικροαντικειμένου τυχαίας αρχικής τοποθέτησης να κεντράρεται σε ηλεκτρόδια τα οποία περικυκλώνουν το Κέντρο Μάζας (ΚΜ) του. Στα πλαίσια του 4^{ου} Κεφαλαίου προτείνεται μια νέα μέθοδος για το παράλληλο κεντράρισμα και την ευθυγράμμιση πολλαπλών μικροαντικειμένων με τυχαία αρχική τοποθέτηση στην ΕΠ. Εν συνεχεία διερευνάται η ταυτόχρονη κίνηση πολλαπλών κεντραρισμένων/ευθυγραμμισμένων μικροαντικειμένων στην ΕΠ αποφεύγοντας τη σύγκρουση με κινούμενα και στατικά εμπόδια. Για τον προσδιορισμό των ελεύθερων διαδρομών κίνησης των μικροαντικειμένων, ορίζεται καταρχάς ο ελεύθερος χώρος διαμορφώσεων των μικροαντικειμένων λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο κίνησης των μικροαντικειμένων καθώς και τις επιτρεπτές αποστάσεις από τα στατικά εμπόδια. Επιπλέον, υπολογίζεται ο ελεύθερος χώρος καταστάσεων των μικροαντικειμένων ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση μεταξύ τους κατά την παράλληλη κίνηση τους στην ΕΠ. Ο υπολογισμός των μονοπατιών πραγματοποιείται με έναν νέο, τροποποιημένο A* αλγόριθμο. Η καινοτομία της προτεινόμενης μεθόδου υπολογισμού βέλτιστων διαδρομών στηρίζεται σε μια νέα ευρεστική συνάρτηση για τους υπολογισμούς της οποίας πέραν από την απόσταση από την αρχική και τελική θέση του μικροαντικειμένου λαμβάνεται υπόψη και η απόσταση μεταξύ των παράλληλα κινούμενων μικροαντικειμένων.

4.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας – Περιγραφή και Συνεισφορά του 4^{ου} Κεφαλαίου

Όπως ορίστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια τα μικροαντικείμενα μεταφέρονται κατά πλειάδες στην ΕΠ με γραμμές μεταφοράς. Συνεπώς, έπειτα από την αρχικής τους τοποθέτηση έχουν τυχαίες διαμορφώσεις – μη-κεντραρισμένα και μη-ευθυγραμμισμένα. Λαμβάνοντας υπόψη τις μεθόδους ενεργοποίησης των ηλεκτροδίων για την κίνηση των μικροαντικειμένων στην ΕΠ γίνεται αντιληπτό ότι επαναληψιμότητα παρουσιάζουν οι ενεργοποιήσεις για την κίνηση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο ηλεκτροδίων της ΕΠ εφόσον αυτά είναι κεντραρισμένα κι ευθυγραμμισμένα. Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιασθεί συσκευές μικροχειρισμού χωρίς όμως να γίνεται αναφορά στον τρόπο με τον οποίο εντάσσεται το σύστημα στη γραμμή παραγωγής του μικρο-εργοστασίου για το οποίο προορίζεται [15]. Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη μεθόδων για το χειρισμό των μικροαντικειμένων στην «Έξυπνη Πλατφόρμα» (ΕΠ) ούτως ώστε να αποτελέσει μια αυτόνομη κι ευέλικτη μικρο-συσκευή.

Στα πλαίσια του 4^{ου} Κεφαλαίου εφαρμόζεται μια νέα μέθοδος η οποία προσδιορίζει τις ενεργοποιήσεις για το παράλληλο κεντράρισμα και την ευθυγράμμιση πολλαπλών μικροαντικειμένων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος ME που προτάθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο ο οποίος έχει τη δυνατότητα εντοπισμού των ηλεκτροδίων γύρω από το ΚΜ του μικροαντικειμένου όπου μπορεί να κεντραριστεί έπειτα από την ενεργοποίηση τους. Εν συνεχεία,

επιλέγεται η βέλτιστη λύση λαμβάνοντας υπόψη τις ελεύθερες διευθύνσεις που μπορεί να ακολουθήσει το κάθε μικροαντικείμενο αποφεύγοντας τη σύγκρουση με τους γείτονες του [49].

Μετά από το κεντράρισμα και την ευθυγράμμιση τους τα μικροαντικείμενα πρέπει να οδηγηθούν με ασφάλεια στις τελικές τους θέσεις στην ΕΠ. Ο τρόπος τοποθέτησης των ηλεκτροδίων στην ΕΠ ορίζει ένα πλέγμα στην ΕΠ όπου τα ηλεκτρόδια αντιστοιχούν στους κόμβους του. Όπως επιβεβαιώθηκε από τις προσομοιώσεις του 3^{ου} Κεφαλαίου το μικροαντικείμενο μπορεί και κινείται διακριτά ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια της ΕΠ. Επίσης όπως ορίστηκε στο 2^ο Κεφάλαιο οι αποστάσεις μεταξύ δύο διαδοχικών ηλεκτροδίων της ΕΠ είναι σταθερές. Συνεπώς, το πρόβλημα είναι η εύρεση μονοπατιών για την παράλληλη κίνηση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο γνωστών θέσεων ισορροπίας, μετατοπιζόμενο διακριτά από ηλεκτρόδιο σε ηλεκτρόδιο με ίσες μεταξύ τους αποστάσεις.

Το πρόβλημα εύρεσης διαδρομών για την ασφαλή κίνηση των κινούμενων ρομπότ είναι ένα κοινό πρόβλημα στο πεδίο της ρομποτικής. Μια βασική διαφορά μεταξύ των κινούμενων ρομπότ και των μικροαντικειμένων είναι ο τρόπος κίνησης τους. Συγκεκριμένα, η κίνηση των ρομπότ εξαρτάται από την ορθή λειτουργία των κινητήρων τους ενώ τα μικροαντικείμενα μετατοπίζονται εξαιτίας των ενεργοποιήσεων των ηλεκτροδίων της ΕΠ που τα περικυκλώνουν. Οι ενεργοποιήσεις αυτές λαμβάνονται υπόψη για τον ορισμό του ελεύθερου χώρου διαμορφώσεων των μικροαντικειμένων καθώς και του ελεύθερου χώρου καταστάσεων για την παράλληλη κίνηση τους [50].

Η αναζήτηση μονοπατιών σε γράφους που ορίζονται πάνω σε πλέγματα είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος στη ρομποτική. Ο A^* αλγόριθμος [51] αποτελεί την πιο εξελιγμένη δομή του best first αλγόριθμου [52] αξιοποιώντας ταυτόχρονα τα συγκεκριμένα κόστη μετάβασης και την αντίστοιχη προσαρμοσμένη συνάρτηση κόστους. Στην [53] προτάθηκε η πρώτη τροποποιημένη εκδοχή του A^* με στόχο τον περιορισμό του υπολογιστικού κόστους του αλγόριθμου. Από τότε έχουν παρουσιασθεί διάφορες εκδοχές του αλγόριθμου όπως ο Basic Theta [53] και ο D^* [54]. Στη βιβλιογραφία έχουν επίσης προταθεί προσαρμοσμένοι αλγόριθμοι για την κίνηση ενός και πολλαπλών κινούμενων ρομπότ [54, 55]. Στην [56] παρουσιάστηκε μια μέθοδος για την εύρεση μονοπατιών κατά τη διάρκεια της κίνησης πολλαπλών ρομπότ (on – line) λαμβάνοντας υπόψη την προτεραιότητα του καθενός σε μια συνεχή περιοχή. Ο D^* αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό ανεξάρτητων μονοπατιών για κάθε ρομπότ και η σύγκρουση των μικροαντικειμένων αποφεύγεται μέσω της μείωσης της ταχύτητας του κάθε ρομπότ. Μια ακόμα τροποποιημένη εκδοχή του A^* παρουσιάστηκε στην [57] για την παράλληλη κίνηση των ρομπότ στο χωρόχρονο με στατικά εμπόδια λαμβάνοντας υπόψη την προτεραιότητα των μικροαντικειμένων. Η πρωτοτυπία της μεθόδου στο [58] είναι ο εντοπισμός της προτεραιότητας κάθε ρομπότ με έναν ειδικά προσαρμοσμένο γενετικό αλγόριθμο. Ο M^* αποτελεί μια τροποποιημένη εκδοχή του A^* με τον οποίο υπολογίζεται το βέλτιστο μονοπάτι πολλαπλών ρομπότ αποφεύγοντας τις μεταξύ τους συγκρούσεις. Η διαφοροποίηση του M^* είναι ότι σε κάθε διαδικασία υπολογισμού ο αλγόριθμος βελτιστοποιεί τα μονοπάτια των μικροαντικειμένων [58].

Το πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα διατριβή αφορά την παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων για τα οποία η προτεραιότητα είναι προκαθορισμένη. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος

συμβατός είναι ο συνεργατικός A^* (cooperative A^*) [59] ο οποίος ορίζει μοναδικά μονοπάτια στο χωρόχρονο για κάθε μικροαντικείμενο. Κατά τη διάρκεια της κίνησης τους τα μικροαντικείμενα έχουν τη δυνατότητα να παραμείνουν σταθερά στην προσωρινή τους θέση ώστε να αποφύγουν τη σύγκρουση με κάποιο από τα μικροαντικείμενα με μεγαλύτερη προτεραιότητα. Οι συγγραφείς στην [59] εφάρμοσαν τον συνεργατικό A^* αλγόριθμο για τον ορισμό μονοπατιών για την παράλληλη κίνηση πολλαπλών κινούμενων ρομπότ. Οι υπολογισμοί του αλγορίθμου ήταν επιτυχείς ως προς την αποφυγή συγκρούσεων, αλλά εντοπίστηκε ότι με την αύξηση του αριθμού των ρομπότ, τα ρομπότ με χαμηλότερη προτεραιότητα παρέμεναν σταθερά σε μια θέση για αρκετά χρονικά βήματα. Αυτή την αδυναμία έρχεται να καλύψει μια νέα συνάρτηση κόστους που προτείνεται στο 4^ο Κεφάλαιο.

4.3 Μέθοδος για το παράλληλο κεντράρισμα/ευθυγράμμιση πολλαπλών μικροαντικειμένων στην «Έξυπνη Πλατφόρμα»

Σε αυτή την ενότητα προτείνεται μια νέα μέθοδος για το παράλληλο κεντράρισμα κι ευθυγράμμιση πολλαπλών μικροαντικειμένων στην «Έξυπνη Πλατφόρμα». Όπως ορίστηκε στο 2^ο και 3^ο Κεφάλαιο τα μικροαντικείμενα τετραγωνικών κι εξαγωνικών γεωμετριών μεταφέρονται στην «Έξυπνη Πλατφόρμα με γραμμές μεταφοράς. Για τον επιτυχή παράλληλο χειρισμό επιλέγονται μικροαντικείμενα με την ίδια διάταξη ηλεκτροδίων. Η διαδικασία της τοποθέτησης ελέγχεται από τους αισθητήρες όρασης που είναι τοποθετημένοι πάνω από την ΕΠ ώστε οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων δυο μικροαντικειμένων να επαληθεύει τη συνθήκη:

$$d(r^i, r^j) \geq d_{close} \quad \forall i, j \in [1, k] \quad (4.1)$$

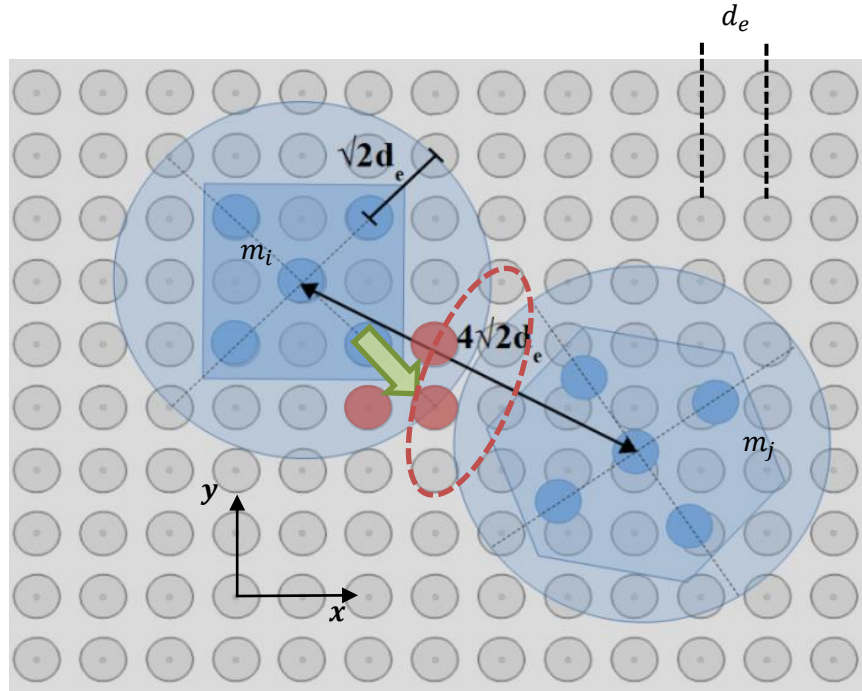
Όπου $d(r^i, r^j)$ η Ευκλείδεια απόσταση [60] ανάμεσα στα κέντρα των μικροαντικειμένων m_i , m_j όπου k ο συνολικός αριθμός μικροαντικειμένων στην επιφάνεια της ΕΠ και d_{close} η ελάχιστη επιτρεπτή απόσταση η οποία ορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία των μικροαντικειμένων και τις ενεργοποιήσεις για την κίνηση των μικροαντικειμένων. Στην εικόνα E.4.1 παρουσιάζεται η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων όπου $d_{close} = 4\sqrt{2}d_e$. Όπως φαίνεται η απόσταση που ορίζεται είναι επαρκής ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση μεταξύ των μικροαντικειμένων εξαιτίας της γεωμετρίας τους. Επιπλέον, η απόσταση επιτρέπει στα μικροαντικείμενα να μην επηρεάζονται ανεπιθύμητα από τις ενεργοποιήσεις ηλεκτροδίων της ΕΠ που δεν προορίζονται για αυτά. Στο παράδειγμα της E.4.1 επιβεβαιώνεται ότι οι ενεργοποιήσεις για τη διαγώνια κίνηση του m_i μικροαντικειμένου δεν επηρεάζουν τα ηλεκτρόδια του m_j μικροαντικειμένου.

4.3.1 Ορίζοντας τους γείτονες των μικροαντικειμένων και τις ελεύθερες διευθύνσεις για ασφαλή κίνηση

Τα παράλληλο κεντράρισμα κι ευθυγράμμιση των μικροαντικειμένων πραγματοποιείται με ασφάλεια όταν αποφεύγεται η σύγκρουση μεταξύ των γειτονικών μικροαντικειμένων. Δύο μικροαντικείμενα τυχαίας διαμόρφωσης στην ΕΠ θεωρούνται ως γειτονικά [49] όταν η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρότερη ή ίση από $1,1 \cdot d_{close}$ όπου το $0,1 \cdot d_{close}$ αποτελεί μια επιπλέον απόσταση ασφαλείας (σφάλμα). Για κάθε μικροαντικείμενο m_i ορίζεται ένα σύνολο $neighbors^{m_i}$ στο οποίο εμπεριέχονται λίστες με δομή:

$$[m_j, q^j, d(r^i, r^j), \gamma] \in neighbors^{m_i}, \text{ όταν } d(m_i, m_j) \leq 1,1 \cdot d_{close}, \gamma \in [1, n_{m_i}] \quad (4.1)$$

Όπου m_j ένα γειτονικό μικροαντικείμενο του m_i μικροαντικειμένου με διαμόρφωση q^j , γ ένας δείκτης και n_{m_i} ο συνολικός αριθμός των λιστών στο σύνολο $neighbors^{m_i}$.



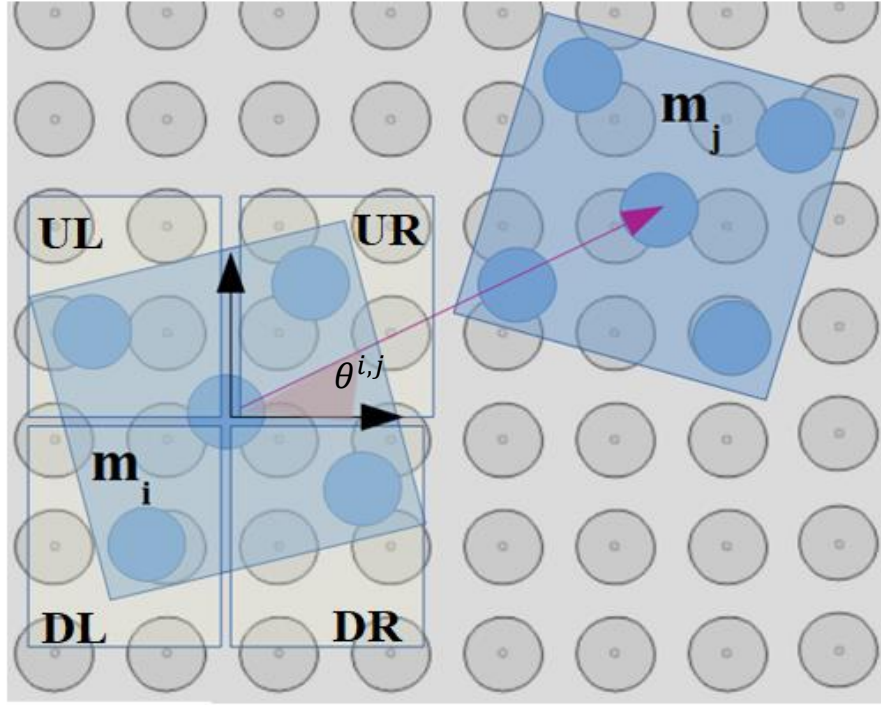
Ε.4.1: Απόσταση ασφαλείας για την ασφαλή μεταφορά των μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα»

Οι ελεύθερες διευθύνσεις γύρω από κάθε μικροαντικείμενο εντοπίζονται λαμβάνοντας υπόψη τον τρόπο τοποθέτησης των γειτόνων του γύρω από το Κέντρο Μάζας (ΚΜ) του. Συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.4.2 στο ΚΜ του κάθε μικροαντικείμενου ορίζεται ένα τοπικό σύστημα συντεταγμένων με προσανατολισμό ίδιο με αυτό του συστήματος αναφοράς της ΕΠ με βάση το οποίο ορίζονται τέσσερα τεταρτημόρια γύρω από το ΚΜ. Η γωνία:

$$\theta^{i,j} = \tan^{-1} \left(\frac{y^j - y^i}{x^j - x^i} \right) \quad (4.2)$$

Προσδιορίζεται τον προσανατολισμό του διανύσματος θέσης του κέντρου μάζας του γειτονικού μικροαντικείμενου m_j ως προς το τοπικό σύστημα αναφοράς στον ΚΜ του m_i μικροαντικείμενου, όπου x^i, y^i, x^j, y^j οι συντεταγμένες του ΚΜ των μικροαντικειμένων m_i και m_j αντίστοιχα.

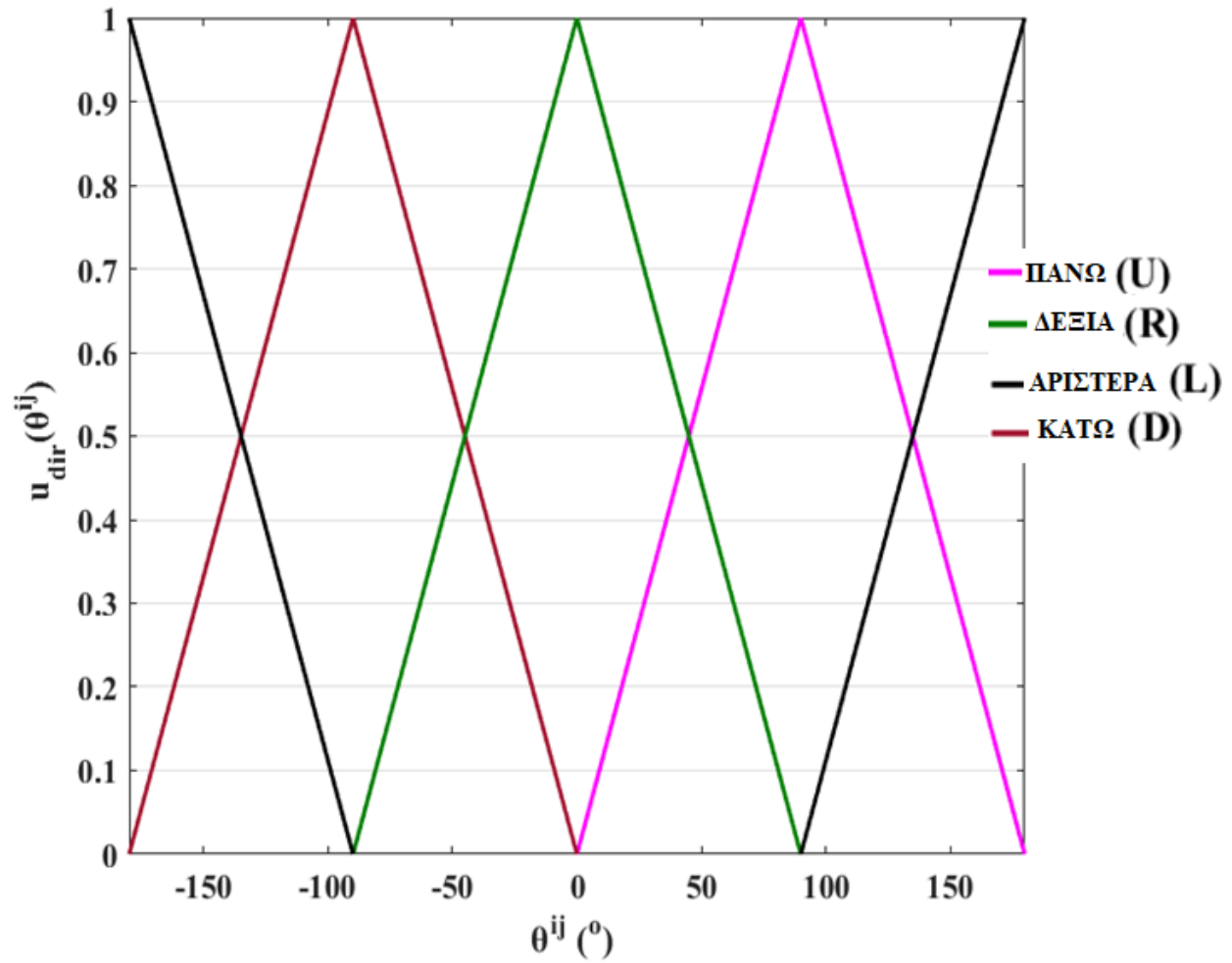
Ο ακριβής προσανατολισμός των γειτόνων του κάθε μικροαντικείμενου σε σχέση με το ΚΜ του ορίζεται με τη βοήθεια της συνάρτησης $u_{dir}(\theta^{i,j})$, $dir \in \{Up, Down, Left, Right\}$ η οποία υπολογίζεται συναρτήσει της γωνίας $\theta^{i,j}$. Στον πίνακα Π.4.1 παρουσιάζεται η μορφή της συνάρτησης $u_{dir}(\theta^{i,j})$ για όλες οι δυνατές τιμές της γωνίας $\theta^{i,j}$. Όπως φαίνεται στη γραφική της εικόνας Ε.4.3 η συνάρτηση $u_{dir}(\theta^{i,j})$ ορίζει ανά τεταρτημόριο την ακριβή διεύθυνση του γειτονικού μικροαντικείμενου m_j .



E.4.2: Εντοπισμός γειτόνων γύρω από το μικροαντικείμενο

Π.4.1: Η μορφή της $u_{dir}(\theta^{i,j})$ συναρτήσει του εύρους τιμών της $\theta^{i,j}$

θ^{ij}	Quartiles ⁱ	Συνάρτηση $u_{dir}(\theta^{ij}), dir \in \{Up, Down, Left, Right\}$
$0^\circ \leq \theta^{ij} \leq 90^\circ$	UR^i	$u_U(\theta^{ij}) = \frac{\theta^{ij}}{90^\circ}, u_R(\theta^{ij}) = -\frac{\theta^{ij}}{90^\circ} + 1$
$90^\circ < \theta^{ij} \leq 180^\circ$	UL^i	$u_U(\theta^{ij}) = -\frac{\theta^{ij}}{90^\circ} + 2, u_L(\theta^{ij}) = \frac{\theta^{ij}}{90^\circ} - 1$
$-90^\circ \leq \theta^{ij} < 0^\circ$	DR^i	$u_D(\theta^{ij}) = -\frac{\theta^{ij}}{90^\circ}, u_R(\theta^{ij}) = \frac{\theta^{ij}}{90^\circ} + 1$
$-180^\circ < \theta^{ij} < -90^\circ$	DL^i	$u_D(\theta^{ij}) = \frac{\theta^{ij}}{90^\circ} + 2, u_L(\theta^{ij}) = -\frac{\theta^{ij}}{90^\circ} - 1$

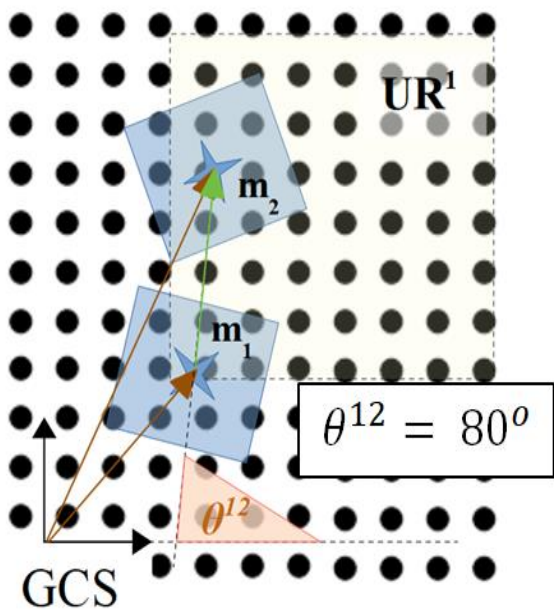


Ε.4.3 Η $u_{dir}(\theta^{i,j})$ συναρτήσει της $\theta^{i,j}$

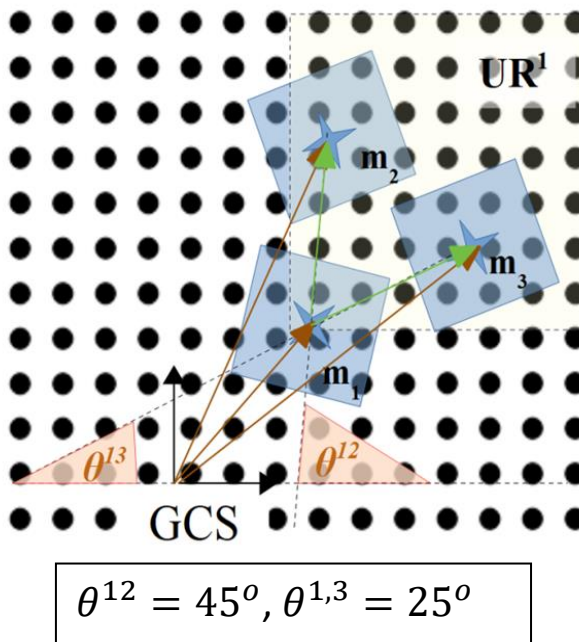
Αναλύοντας τη γραφική στην εικόνα Ε.4.3 φαίνεται ότι η μέγιστη τιμή της συνάρτησης $u_{dir}(\theta^{i,j})$ είναι η μονάδα η οποία αντιστοιχεί σε μια από τις τέσσερις διευθύνσεις πάνω/κάτω/δεξιά/αριστερά. Συγκεκριμένα, για τις τέσσερις περιπτώσεις όπου $u_R(0^\circ) = u_U(90^\circ) = u_L(180^\circ) = u_D(270^\circ) = 1$ γίνεται αντιληπτό ότι το γειτονικό μικροαντικείμενο m_j είναι τοποθετημένο δεξιά, πάνω, αριστερά και κάτω του m_i μικροαντικειμένου αντίστοιχα. Με βάση τις τιμές της συνάρτησης $u_{dir}(\theta^{i,j})$ ορίζονται κανόνες για τις επιτρεπτές διευθύνσεις που μπορεί να ακολουθήσει το m_i μικροαντικείμενο σε κάθε τεταρτημόριο οι οποίοι εμπεριέχονται στον πίνακα Π.4.2.

Π.4.2: Κανόνες κίνησης ανά τεταρτημόριο με βάση τις τιμές του $u_{dir}(\theta^{ij})$

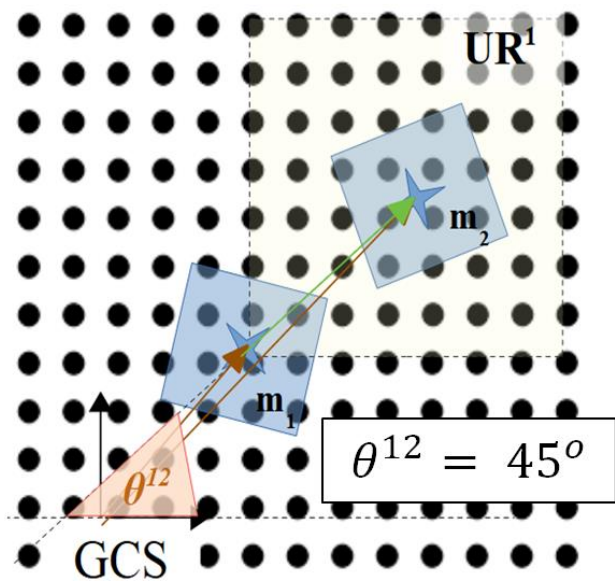
<i>Τεταρτημόριαⁱ</i>	<i>Απαγορευμένες Διευθύνσεις</i>	<i>Κανόνες Κίνησης</i>
UR^i	Δεξιά	$u_U(\theta^{ij}) > 0.5, u_R(\theta^{ij}) < 0.5$
	Πάνω	$u_U(\theta^{ij}) < 0.5, u_R(\theta^{ij}) > 0.5$
	Κατειλημμένο Τεταρτημόριο	$u_U(\theta^{ij}) = u_R(\theta^{ij}) = 0.5$
UL^i	Αριστερά	$u_U(\theta^{ij}) > 0.5, u_L(\theta^{ij}) < 0.5$
	Πάνω	$u_U(\theta^{ij}) < 0.5, u_L(\theta^{ij}) > 0.5$
	Κατειλημμένο Τεταρτημόριο	$u_U(\theta^{ij}) = u_L(\theta^{ij}) = 0.5$
DR^i	Δεξιά	$u_R(\theta^{ij}) < 0.5, u_D(\theta^{ij}) > 0.5$
	Κάτω	$u_R(\theta^{ij}) > 0.5, u_D(\theta^{ij}) < 0.5$
	Κατειλημμένο Τεταρτημόριο	$u_R(\theta^{ij}) = u_D(\theta^{ij}) = 0.5$
DL^i	Αριστερά	$u_D(\theta^{ij}) > 0.5, u_L(\theta^{ij}) < 0.5$
	Κάτω	$u_D(\theta^{ij}) < 0.5, u_L(\theta^{ij}) > 0.5$
	Κατειλημμένο Τεταρτημόριο	$u_D(\theta^{ij}) = u_L(\theta^{ij}) = 0.5$



(α)



(β)



(γ)

E.4.4: Διερεύνηση της κίνησης του m_1 στο πάνω δεξιά τεταρτημόριο

Η συνεισφορά της συνάρτησης $u_{dir}(\theta^{i,j})$, γίνεται καλύτερα κατανοητή με τη βοήθεια των τριών παραδειγμάτων που παρουσιάζονται στις εικόνες E.4.4 (α) (β) και (γ) όπου και στα τρία διερευνάται η κίνηση του m_1 μικροαντικειμένου στο πάνω – δεξιά τεταρτημόριο. Στην εικόνα E.4.4 (α) το m_2 μικροαντικείμενο είναι τοποθετημένο στο πάνω-δεξιά τεταρτημόριο ώστε η γωνία $\theta^{1,2} = 80^\circ$ με αποτέλεσμα: $u_U(\theta^{1,2}) = \frac{80^\circ}{90^\circ} = 0,88 > 0,5$, $u_R(\theta^{1,2}) = -\frac{80^\circ}{90^\circ} + 1 = 0,12 < 0,5$ συνεπώς το μικροαντικείμενο δεν επιτρέπεται να κινηθεί προς τα πάνω. Στην περίπτωση της εικόνας πέραν του E.4.4(β) προστίθεται στο πάνω δεξιά τεταρτημόριο ένα ακόμα μικροαντικείμενο m_3 γειτονικό του m_1 σε θέση τέτοια $\theta^{1,3} = 25^\circ$ ώστε: $u_U(\theta^{1,3}) = \frac{25^\circ}{90^\circ} = 0,28 < 0,5$, $u_R(\theta^{1,3}) = -\frac{25^\circ}{90^\circ} + 1 = 0,72 > 0,5$ Λαμβάνοντας υπόψη τις $u_U(\theta^{1,2})$ και $u_R(\theta^{1,2})$ από το παράδειγμα στην εικόνα E.4.4 (α) προκύπτει ότι το πάνω δεξιά τεταρτημόριο είναι κατειλημμένο και το m_1 δεν μπορεί να κινηθεί σε αυτό. Κατειλημμένο θεωρείται το πάνω δεξιά τεταρτημόριο και στο παράδειγμα στην εικόνα E.4.4 (γ) όπου το γειτονικό μικροαντικείμενο m_2 τοποθετείται ως προς το m_1 με τέτοιο τρόπο ώστε $\theta^{1,2} = 45^\circ$, συνεπώς $u_U(\theta^{1,2}) = \frac{45^\circ}{90^\circ} = 0,5$, $u_R(\theta^{1,2}) = -\frac{45^\circ}{90^\circ} + 1 = 0,5$.

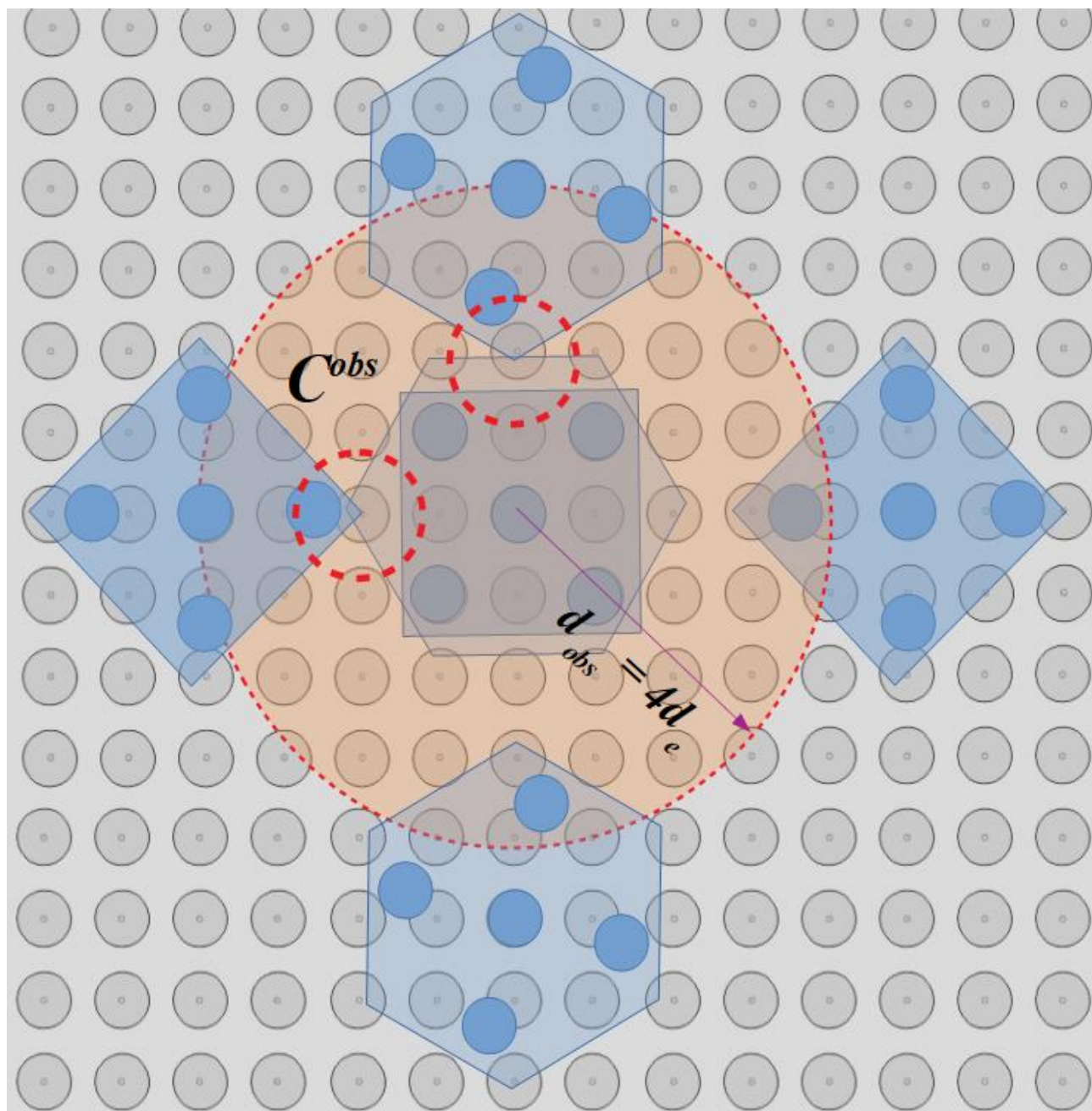
Για κάθε μικροαντικείμενο m_i στην περίπτωση που $u_{dir}(\theta^{ij}) \geq 0.5$ δημιουργείται μια λίστα $[Quartiles^i, dir]$ η οποία εμπεριέχεται στο σύνολο FD^i όπου υπάγονται όλα τα απαγορευμένα τεταρτημόρια και διευθύνσεις του μικροαντικειμένου.

4.3.2 Ο χώρος των στατικών εμποδίων

Κατά τη διαδικασία του κεντραρίσματος/ευθυγράμμισης των μικροαντικειμένων ως γείτονες ορίζονται όλα τα μικροαντικείμενα τα οποία είναι τοποθετημένα με τυχαία διαμόρφωση στην ΕΠ. Όλα τα κεντραρισμένα κι ευθυγραμμισμένα μικροαντικείμενα ορίζονται ως στατικά τα οποία περικλύονται σε κυκλικές επιφάνειες οι οποίες ορίζονται ως ο χώρος στατικών εμποδίων ο οποίος δίνεται από:

$$C^{obs} = (x - x^i)^2 + (y - y^i)^2 = (d_{obs})^2 \forall m_i \notin NC^{MP} \quad (4.3)$$

Όπου m_i κάθε κεντραρισμένο και ευθυγραμμισμένο μικροαντικείμενο το ΚΜ του οποίου αποτελεί κέντρο μιας κυκλικής επιφάνειας με ακτίνα d_{obs} , όπου τα ηλεκτρόδια που περικυκλώνονται σε αυτή την περιοχή δεν αποτελούν πιθανές θέσεις κεντραρίσματος. Στην εικόνα E.4.5 παρουσιάζεται η περίπτωση του στατικού χώρου γύρω από ένα μικροαντικείμενο τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων όπου $d_{obs} = 4d_e$. Όπως φαίνεται στην E.4.5 η επιλογή της συγκεκριμένης ακτίνας αποτρέπει τη σύγκρουση μεταξύ των μικροαντικειμένων τυχαίας διαμόρφωσης με το στατικό κεντραρισμένο μικροαντικείμενο. Επιπλέον, οι συγκρούσεις μεταξύ των δύο μικροαντικειμένων και του στατικού κεντραρισμένου μικροαντικειμένου που έχουν σημειωθεί με τους κόκκινους διακεκομμένους κύκλους στην E.4.5 επιβεβαιώνουν τον ισχυρισμό για μη επιτρεπτές θέσεις κεντραρίσματος.



Ε.4.5: Ο Χώρος γύρω από ένα Στατικό Εμπόδιο στην ΕΠ

4.3.3 Η μέθοδος για το παράλληλο κεντράρισμα/ευθυγράμμιση

Η διαδικασία του παράλληλου κεντράρισματος και της ευθυγράμμισης υλοποιείται σε Περιόδους Μικροχειρισμού $PM \in [1 K]$ όπου K ο συνολικός αριθμός περιόδων χειρισμού. Κάθε PM διαρκεί όσο χρόνο χρειάζεται ώστε να κεντραριστούν και να ευθυγραμμισθούν όλα τα μικροαντικείμενα που χειρίζονται κατά τη διάρκεια της αντίστοιχης PM . Σε κάθε PM λαμβάνονται υπόψη μόνο τα μικροαντικείμενα τα οποία έχουν τυχαία διαμόρφωση στην ΕΠ. Για κάθε ένα από αυτά διερευνάται η επόμενη δυνατή θέση κεντράρισματος με τη βοήθεια του αλγορίθμου ΜΕ ο οποίος περιεγράφηκε στο 3^ο Κεφάλαιο. Από τη στιγμή που πρόκειται για την εφαρμογή κεντράρισματος η διερεύνηση ηλεκτροδίων προς ενεργοποίηση στον ΜΕ αλγόριθμο περιορίζεται στην περιοχή D_1 με ακτίνα $2r$ για την περίπτωση των μικροαντικειμένων με τετραγωνική διάταξη και με $2R$ για τη σταυρωτή αντίστοιχα (εικόνα Ε.3.20). Τα στοιχεία της λίστα S_{m_i} φιλτράρονται με κριτήριο την αποφυγή συγκρούσεων συνεπώς και για κάθε σ_1^o στοιχείο της υπολογίζεται η γωνία:

$$\theta^{\Sigma F^i}(\sigma_1) = \tan^{-1} \left(\frac{\sum F^{iy}(\sigma_1)}{\sum F^{ix}(\sigma_1)} \right) + \theta^i, \quad \left| \sum F^i(\sigma_1) \right| > F_s \text{ and } \left| \sum \tau^i(\sigma_1) \right| < T_s \quad (4.4)$$

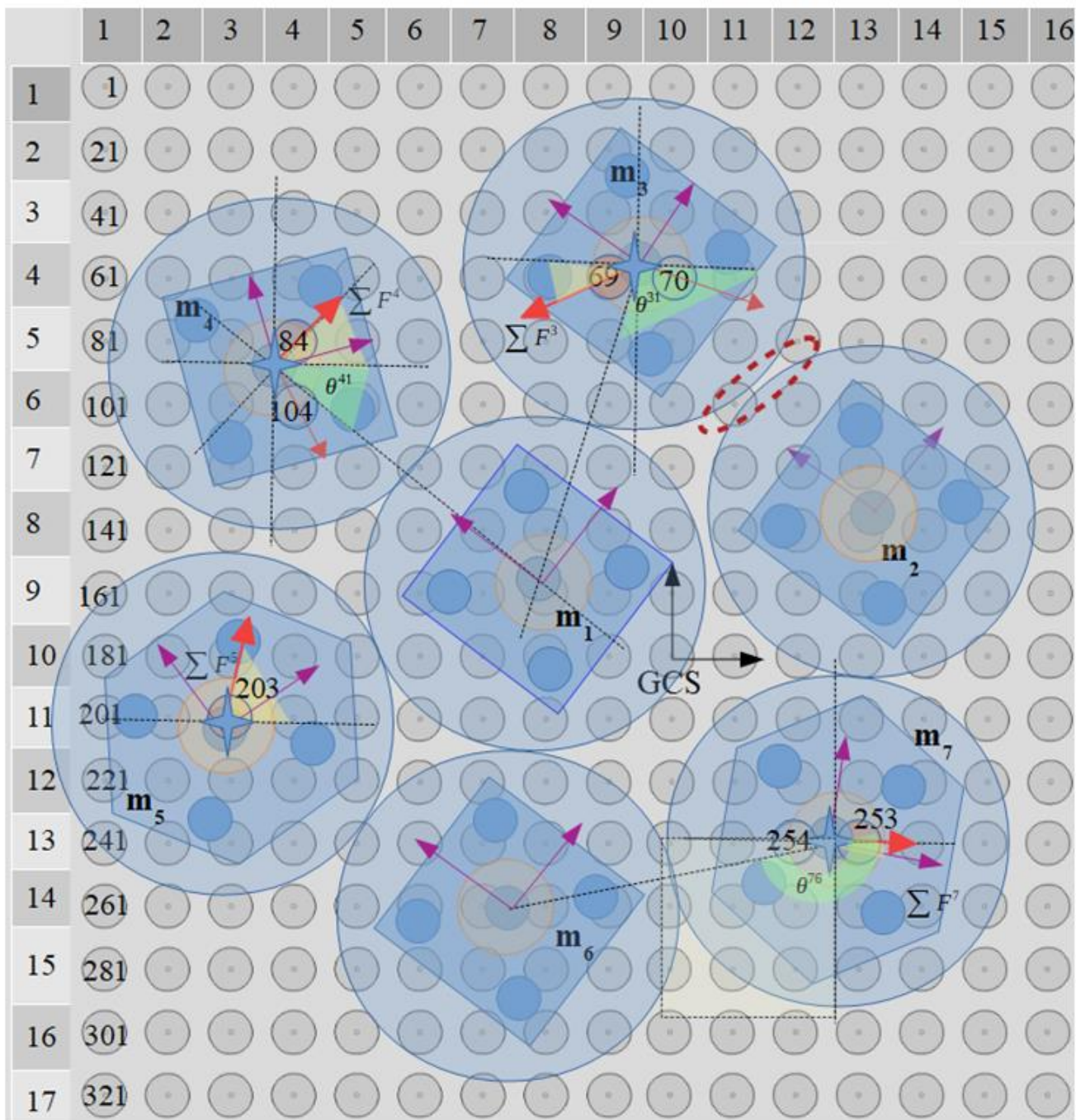
Η γωνία $\theta^{\Sigma F^i}(\sigma_1)$ προσδιορίζει τη διεύθυνση της κίνησης που θα ακολουθήσει το μικροαντικείμενο κατά το κεντράρισμα του εξαιτίας της ενεργοποίησης του αντίστοιχου ηλεκτροδίου της $\sigma_1^{\eta s}$ λίστας του S_{m_i} συνόλου. Συγκεκριμένα, η $\theta^{\Sigma F^i}(\sigma_1)$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συνάρτησης $u_{dir}(\theta^{\Sigma F^i}(\sigma_1))$ με βάση τον πίνακα Π.4.1. Για κάθε μικροαντικείμενο διατυπώνεται από τη μέθοδο το σύνολο $center^i$ το οποίο εμπεριέχει τις λίστες που προκύπτουν από το ΜΕ αλγόριθμο για το κεντράρισμα του μικροαντικειμένου. Εάν το αντίστοιχο ηλεκτρόδιο της κάθε λίστας δεν ανήκει στο C^{obs} η δεν οδηγεί το μικροαντικείμενο σε κατειλημμένη διεύθυνση του τεταρτημόριου από κάποιο γείτονα του, τότε η σ_1^{η} λίστα του S_{m_i} συνόλου αποτελεί μια από τις πιθανές λύσεις και $S_{m_i}(\sigma_1) \in center^i$. Στο τέλος των υπολογισμών της μεθόδου αξιολογείται το σύνολο $center^i$ ώστε, σε περίπτωση που $center^i = \emptyset$ το m_i μικροαντικείμενο δεν μπορεί να κεντραριστεί κατά τη διάρκεια της αντίστοιχης PM . Σε περίπτωση που η $center^i$ εμπεριέχει περισσότερες από δύο λίστες τότε επιλέγεται η λίστα με το μέγιστο $|\sum F^i|$ το οποίο αντιστοιχεί στο εγγύτερο ηλεκτρόδιο στο ΚΜ του μικροαντικειμένου.

4.3.4. Παράλληλο κεντράρισμα/ευθυγράμμιση πολλαπλών Μικροαντικειμένων – Εφαρμογή

Το παράλληλο κεντράρισμα και η ευθυγράμμιση 7 μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων τα τυχαίας αρχικής διαμόρφωσης σε μια ΕΠ 20x20 ηλεκτροδίων με ακτίνα $r = 25\mu m$ και $d_1 = 0.7$ έτσι ώστε $d_e = 67.5\mu m$, διερευνάται με την προτεινόμενη μέθοδο. Όπως ορίστηκε από την σχέση (4.1) δύο μικροαντικείμενα m_i, m_j ορίζονται ως γειτονικά όταν $d(m_i, m_j) \leq 1,1 \cdot d_{close}$. Για την καλύτερη δυνατή απεικόνιση των γειτόνων στην εικόνα Ε.4.7 ορίζονται οι μπλε κυκλικοί δίσκοι γύρω από τα ΚΜ των

$\frac{4.4\sqrt{2}d_e}{2}$. Συνεπώς, οι δίσκοι που εφάπτονται ή τέμνονται μεταξύ τους περικλείουν δύο γειτονικά μικροαντικείμενα.

Οι κίτρινοι δίσκοι γύρω από το ΚΜ του κάθε μικροαντικειμένου αναπαριστούν την κυκλική επιφάνεια D_1 εντός της οποίας ψάχνει ο ΜΕ για πιθανές ενεργοποιήσεις/θέσεις κεντραρίσματος.



E.4.7: Παράλληλο κεντράρισμα 7 μικροαντικειμένων σε πλατφόρμα 20x20 ηλεκτροδίων

Τα αποτελέσματα της μεθόδου εμπεριέχονται στον Πίνακα Π.4.3 όπου παρουσιάζονται τα σύνολα από λίστες $center^i \forall i[1 \ 7]$. Αξιολογώντας τα στοιχεία του πίνακα προκύπτει ότι όλα τα μικροαντικείμενα μπορούν να κεντραριστούν όχι όμως ταυτόχρονα, αλλά σε $PM \in [1 \ 3]$ Τα μικροαντικείμενα m_3, m_4, m_5 και m_7 είναι αυτά που κεντράρονται και ευθυγραμμίζονται κατά την 1^η PM , τα m_2 και m_6 κατά τη 2^η και τέλος κατά την 3^η PM το m_7 . Με βάση την περιγραφή της μεθόδου στην προηγούμενη παράγραφο το σύνολο $center^i$ δύναται να εμπεριέχει περισσότερες από μια λίστες. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών στον πίνακα Π.4.3 επιβεβαιώνουν αυτό το ενδεχόμενο. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του μικροαντικειμένου m_4 το σύνολο $center^4$ εμπεριέχει δύο λίστες μια για το 104^ο ηλεκτρόδιο όπου $\theta^{\Sigma F^4}(n = 104) = -72.782^\circ$ ενώ η 2^η λίστα του $center^4$ αντιστοιχεί στην ενεργοποίηση του 84^{ου} ηλεκτροδίου και όπως φαίνεται στον Π.4.3. αποδίδει μέγιστη $|\Sigma F^4|$. Με ανάλογα κριτήρια γίνεται η αξιολόγηση, ανάμεσα στις λίστες των συνόλων $center^3$ και $center^6$ αντίστοιχα επιλέγοντάς τις ενεργοποιήσεις του 69^{ου} και 267^{ου}.

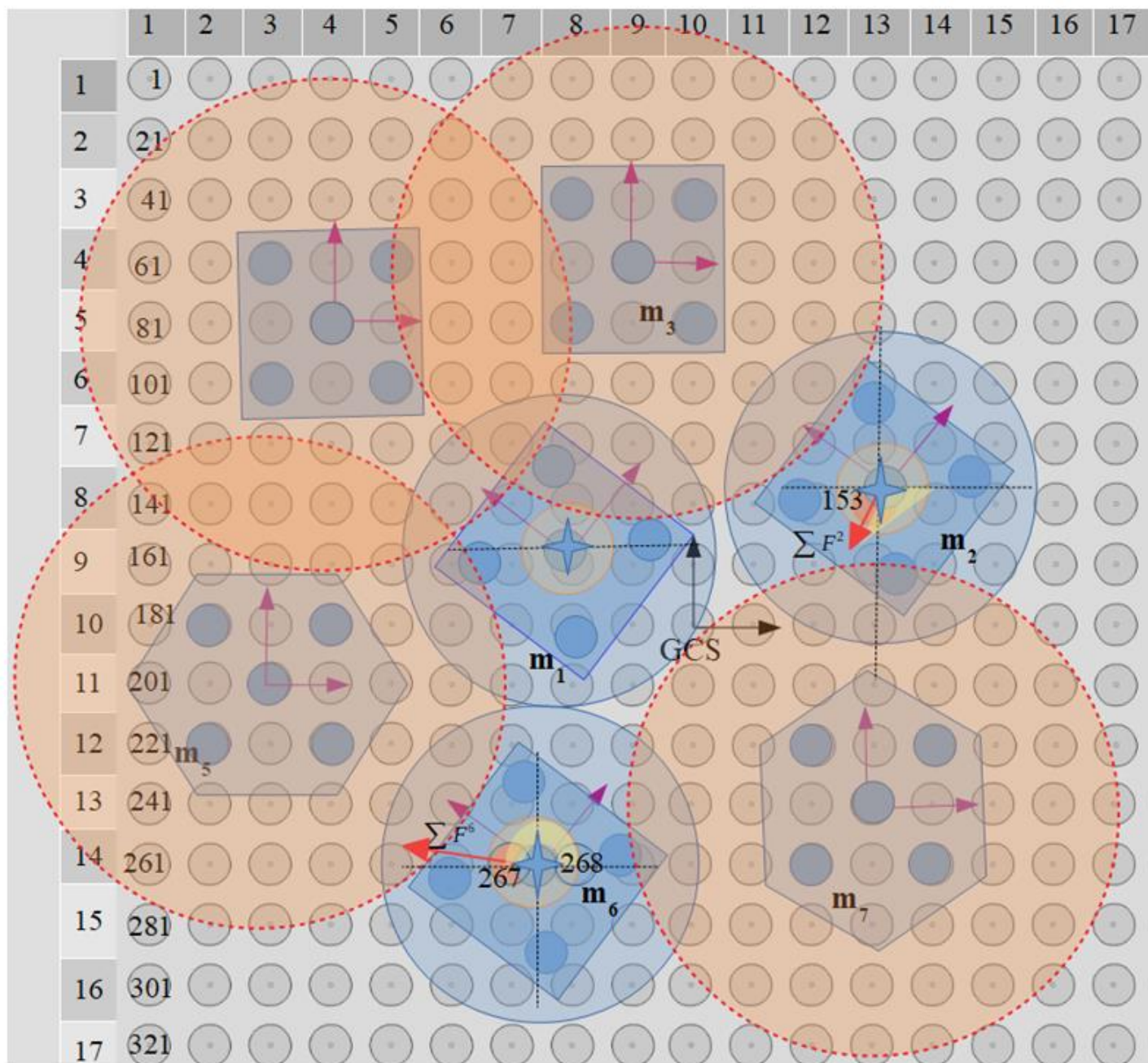
Π.4.3: Αποτελέσματα μεθόδου κεντραρίσματος

PM	Micropart	$center^i$				
		$\sum F^{ix} (\mu N)$	$\sum F^{iy} (\mu N)$	$\sum \tau^i (pm \cdot N)$	$\theta^{\Sigma F^i} (^\circ)$	n
1	m_3	-1.1897	-0.838	0.2235	-159.04	69
		0.81853	-0.581	-0.1235	-26.1	70
	m_4	0.401	0.82112	0.2253	53.13	84
		-0.45	0.14	0.1857	-72.782	104
	m_5	0.9714	1.0491	0.2153	80.88	203
	m_7	0.754	-0.1396	0.1253	-8.602	253
2	m_2	-1.33287	-0.2357	-0.1235	-103.05	153
	m_6	-1.59127	0.695	-0.251	170.1	267
		0.81913	0.1295	0.1325	3.3821	268
3	m_1	0.5297	-1.0938	-0.2215	60.1	168

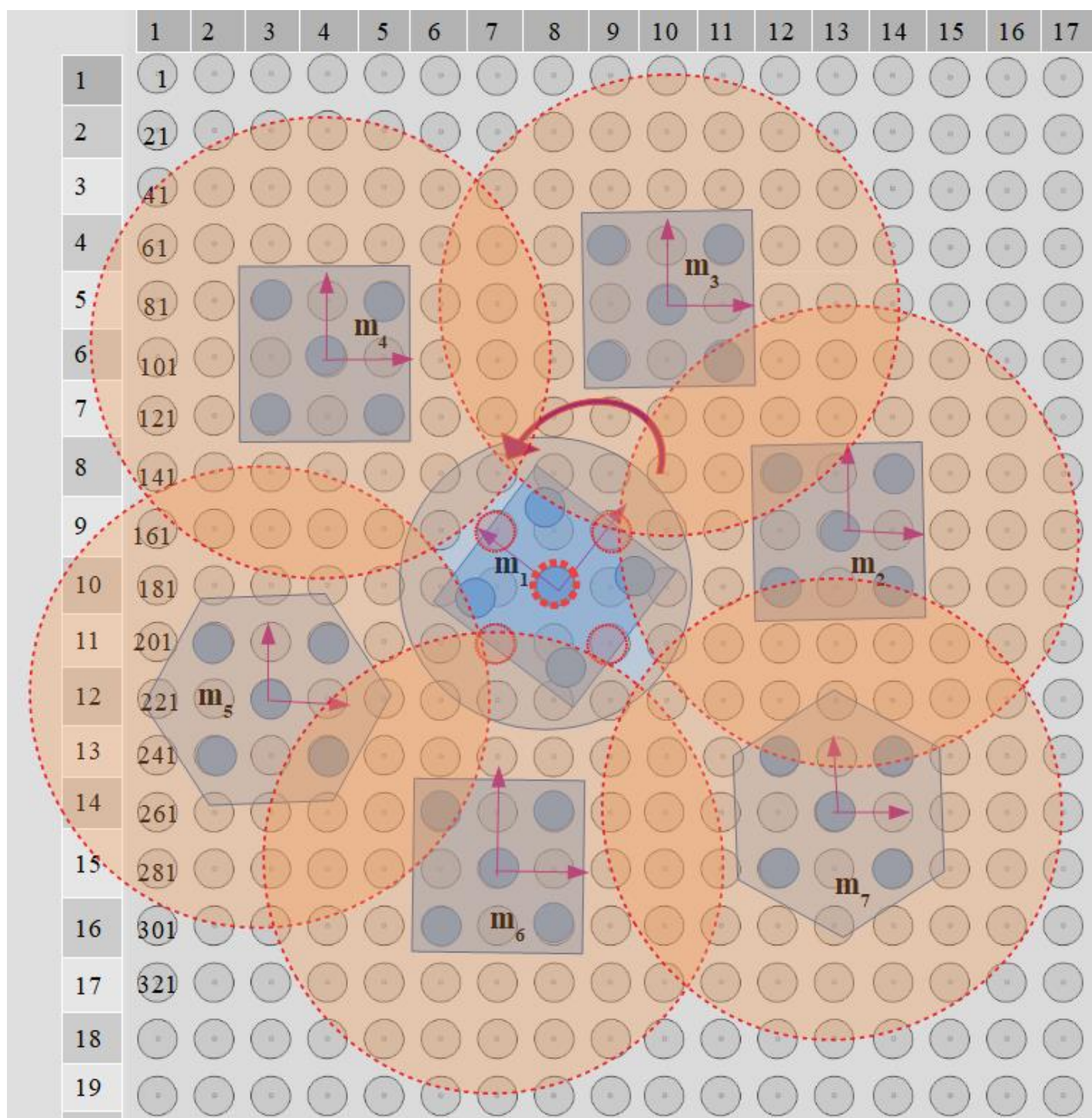
Στις εικόνες E.4.8 και E.4.9. αναπαρίστανται στιγμιότυπα από τη 2^η και 3^η *ΠΜ* των μικροαντικειμένων. Όπως περιεγράφηκε στην 4.3 ενότητα η μέθοδος απορρίπτει ηλεκτρόδια τα οποία είναι στο χώρο στατικού εμποδίου C^{obs} (4.3) γύρω από κάθε μικροαντικείμενο καθώς και διευθύνσεις τις οποίες εάν ακολουθήσει το μικροαντικείμενο θα πλησιάσει τους γείτονες του. Τα αποτελέσματα στις E.4.8 και E.4.9 επιβεβαιώνουν επίσης αυτές τις υποθέσεις μιας και τα μικροαντικείμενα δεν έχουν κεντραριστεί πάνω σε ηλεκτρόδια εντός των C^{obs} περιοχών (ροζ κυκλικοί δίσκοι E.4.8 & E.4.9). Επιπλέον, οι διαμορφώσεις τους επιβεβαιώνουν την αποφυγή συγκρούσεων με τα γειτονικά τους μικροαντικείμενα ακόμα και κατά τη διάρκεια εφαρμογής των ενεργοποιήσεων ευθυγράμμισης τους (E.4.9). Στον πίνακα Π.4.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι ενεργοποιήσεις που επιλέγονται να εφαρμοσθούν ταυτόχρονα στα μικροαντικείμενα ανα *ΠΜ* πρώτα για το κεντράρισμα τους και εν συνεχεία (με το που κεντραριστούν) για την ευθυγράμμιση τους.

Π. 4.4: Ενεργοποιήσεις Κεντραρίσματος/Ευθυγράμμισης

<i>ΠΜ</i>	Μικροαντικείμεν α	<i>n</i> Κεντραρίσματος	<i>n</i> Ευθυγράμμισης
1	m_3	69	69, 48,50,88,90
	m_4	84	84,63,55, 103,105
	m_5	203	203,182,184,222,224
	m_7	253	253,232,234,272,274
2	m_2	153	153,132,134,172,174
	m_6	267	267,246,248,266,268
3	m_1	168	168,147,149,187,189



Ε.4.8: Ολοκλήρωση 1^{ης} ΠΜ, εκκίνηση 2^{ης} ΠΜ



Ε.4.9: Χειρισμός κατά την 3^η ΠΜ

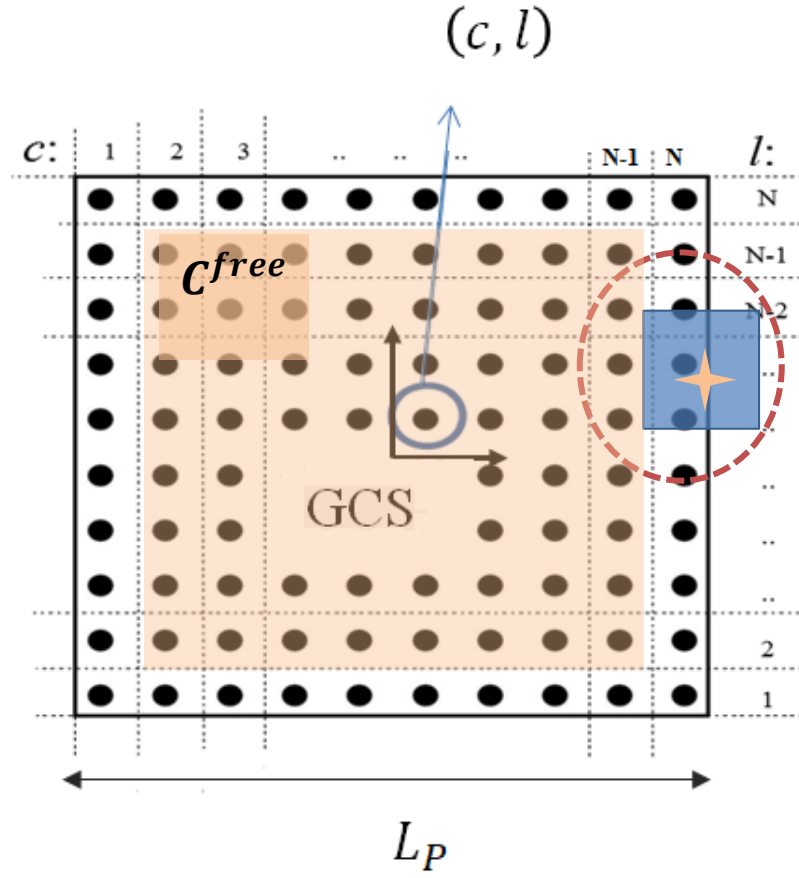
4.4 Σχεδιασμός της Παράλληλης Κίνηση Πολλαπλών Κεντραρισμένων και Ευθυγραμμισμένων

Μικροαντικειμένων

Ο σκοπός του 4^{ου} Κεφαλαίου είναι η περιγραφή κι η εφαρμογή μεθόδων για την παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων με στόχο η ΕΠ να αποτελέσει μια ευέλικτη συσκευή με αυτονομία στο χειρισμό των μικροαντικειμένων. Όπως σχολιάστηκε στην αρχή του 4^{ου} Κεφαλαίου το παράλληλο κεντράρισμα κι ευθυγράμμιση υλοποιούνται με στόχο όλα τα μικροαντικείμενα να λάβουν αρχική διαμόρφωση τέτοια ώστε να είναι εφικτή πλέον η εφαρμογή αλγορίθμων ενεργοποίησης ίδιου φορμαλισμού για την κίνηση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο Θ.Ι.. Με αυτό το τρόπο όλα τα μικροαντικείμενα μπορούν να μετατοπίζονται μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της ΕΠ με ταχύτητα η οποία μεταβάλλεται για όλα τα μικροαντικείμενα το ίδιο συναρτήσει του χρόνου. Αυτές οι παράμετροι απλοποιούν τους υπολογισμούς για την εύρεση μονοπατιών μεταξύ δύο ηλεκτροδίων της ΕΠ για ένα μικροαντικείμενο [50].

Συνεπώς, κατά τη διαδικασία του παράλληλου χειρισμού των μικροαντικειμένων και έπειτα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας του ταυτόχρονου κεντράρισματος/ ευθυγράμμισης τους, ξεκινάει ο υπολογισμός των μονοπατιών που πρέπει να ακολουθήσει καθένα από αυτά ώστε να οδηγηθούν στην τελική τους θέση στην «Εξυπνη Πλατφόρμα». Από τη στιγμή που τα μικροαντικείμενα είναι κεντραρισμένα και ευθυγραμμισμένα, η διαμόρφωση των μικροαντικειμένων μπορεί να δοθεί συναρτήσει του αριθμού της στήλης και της γραμμής του ηλεκτροδίου όπου είναι κεντραρισμένο. Συνεπώς, η διαμόρφωση του κάθε μικροαντικειμένου ισούται με $q^i = (c^i, l^i)$ όπου c^i η αντίστοιχη στήλη και l^i η γραμμή στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο ηλεκτρόδιο της πλατφόρμας.

Για τη διαδικασία υπολογισμού μονοπατιών για την παράλληλη κίνηση των μικροαντικειμένων απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο ορισμός του ελεύθερου χώρου διαμορφώσεων για το κάθε μικροαντικείμενο. Ως ελεύθερος χώρος διαμορφώσεων ορίζεται το σύνολο με όλες τις επιτρεπτές διαμορφώσεις που μπορεί να έχει ένα μικροαντικείμενο στο χώρο εργασίας [50]. Σε αυτό το στάδιο του χειρισμού θεωρείται ότι στα μικροαντικείμενα εφαρμόζονται ενεργοποιήσεις για την κίνηση τους μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων. Ο συνολικός χώρος διαμορφώσεων είναι το πλέγμα $N \times N$ των ηλεκτροδίων της ΕΠ, αλλά όπως φαίνεται στην εικόνα E.4.10 υπάρχουν διαμορφώσεις στα άκρα των μικροαντικειμένων οι οποίες τα οδηγούν εκτός της ΕΠ (μικροαντικείμενο μέσα στον κόκκινη έλλειψη της εικόνας E.4.10). Συνεπώς, για να αποτραπούν αυτές οι μη επιθυμητές καταστάσεις τα ηλεκτρόδια της ΕΠ τα οποία υπάγονται στα σύνολα ηλεκτροδίων που εμπεριέχονται στον πίνακα Π.4.5 απορρίπτονται από τον ελεύθερο χώρο διαμορφώσεων των μικροαντικειμένων. Ορίζεται το σύνολο C_{SPE} όπου υπάγονται όλα τα ηλεκτρόδια στα άκρα της ΕΠ.



Ε.4.10: Ορίζοντας τον ελεύθερο χώρο διαμορφώσεων C_{free} της «Εξυπνης Πλατφόρμας»

Π. 4.5. Ηλεκτρόδια στα άκρα της «Εξυπνης Πλατφόρμας»

Ηλεκτρόδια του C_{SPE}

$$n = 1:1:N$$

$$n = 1:N:Nx(N-1)+1$$

$$n = Nx(N-1)+1:1:NxN$$

$$n = N:N:NxN$$

Συνεπώς, ο ελεύθερος χώρος διαμορφώσεων C_{free} ισούται με:

$$C_{free} = (N \times N) / C_{SPE} \quad (4.6)$$

Όπως συζητήθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο τα μικροαντικείμενα με σταυρωτή διάταξη μπορούν να μετατοπισθούν μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας πάνω/κάτω/δεξιά/αριστερά, ενώ στην τετραγωνική διάταξη είναι δυνατή κι η διαγώνια κίνηση. Τα μικροαντικείμενα που χειρίζονται ταυτόχρονα πρέπει να διαθέτουν τους ίδιους τρόπους τοποθέτησης ηλεκτροδίων. Το σύνολο των δυνατών βηματικών κινήσεων από τη θέση ισορροπίας των μικροαντικειμένων περιγράφεται από τις Εξισώσεις (4.7) και (4.8) όπου U^S το σύνολο που αντιστοιχεί στην τετραγωνική διάταξη και U^C το σύνολο για τη σταυρωτή αντίστοιχα.

$$U^C = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{(1,0), (-1,0), (0,-1), (0,1), (0,0)\} = U^C(q^i), \forall q^i \in C^i \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} U^S &= U^C \cup \{v_6, v_7, v_8, v_9\} \\ &= \{(1,0), (-1,0), (0,-1), (0,1), (0,0), (1,1), (1,-1), (-1,1), (-1,-1)\} \\ &= U^S(q^i), \forall q^i \in C^i \end{aligned} \quad (4.8)$$

Όπου με βάση την εικόνα E.4.10 το $(\pm 1,0)$ και $(0, \pm 1)$ στο $q^i = (c^i, l^i)$ αντιστοιχεί στη βηματική κατά ένα προς τα πάνω και κάτω ανά στήλη και γραμμή αντίστοιχα. Η Εξίσωση (4.9) περιγράφει τη μετάβαση του μικροαντικειμένου εξαιτίας της δράσης της συνάρτησης μετάβασης $v_a \in U = \{U^C, U^S\}$ αναλόγως τον τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων στα μικροαντικείμενα.

$$U(q^{i'}) = f(q^i) = q^i + v_a, \quad v_a \in U \quad (4.9)$$

Όπου $q^{i'}$ η διαμόρφωση του μικροαντικειμένου μετά την εξάσκηση της δράσης της v_a .

4.4.1. Χώρος Ελεύθερων Διαμορφώσεων – Στατικά Εμπόδια

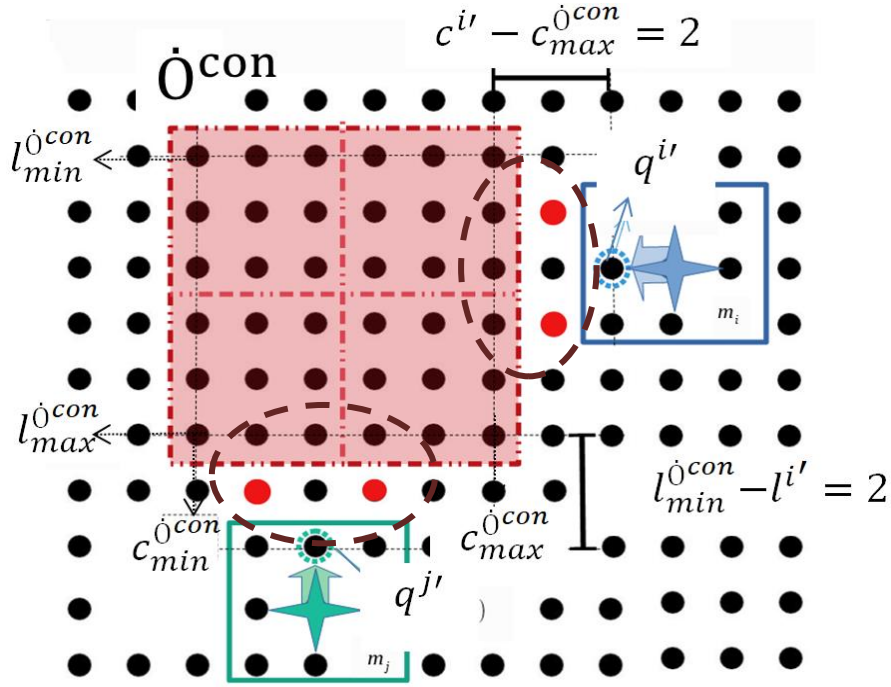
Η εύρεση των μονοπατιών της κίνησης των μικροαντικειμένων υλοποιείται στον ελεύθερο χώρο διαμορφώσεων C^{free} . Στην προηγούμενη ενότητα ορίσθηκε ο ελεύθερος χώρος διαμορφώσεων λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση του μικροαντικειμένου στα άκρα της ΕΠ. Η περιοχή στην οποία είναι τοποθετημένα τα στατικά εμπόδια στην ΕΠ είναι μια ακόμα παράμετρος που συνυπολογίζεται στον ορισμό του ελεύθερου χώρου διαμορφώσεων των μικροαντικειμένων. Ως στατικά εμπόδια στην ΕΠ ορίζονται οι ομάδες συναρμολογημένων μικροαντικειμένων τα οποία είναι τοποθετημένα με τρόπο ώστε να ορίζουν κυρτές ή μη κυρτές (κοίλες) επιφάνειες. Στις επόμενες δύο ενότητες ορίζονται οι περιοχές στατικών κυρτών ή μη κυρτών εμποδίων για την περίπτωση των μικροαντικειμένων τετραγωνικής και σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων.

4.4.1.α Χώρος Διαμορφώσεων Στατικών Εμποδίων – Κυρτά Πολύγωνα

Ως κυρτά ορίζονται τα πολύγωνα με άκρα τα οποία βρίσκονται εκτός της επιφάνειας του πολυγώνου [61]. Για τα στατικά εμπόδια που σχηματίζουν κυρτά πολύγωνα ορίζεται το σύνολο $\dot{O}^{con}$ στο οποίο εμπεριέχονται όλα τα ηλεκτρόδια κάτω από τα στατικά εμπόδια (ροζ τετραγωνική περιοχή στην εικόνα Ε.4.11). Τα στατικά εμπόδια, όμως απαρτίζονται από ήδη συναρμολογημένα μικροαντικείμενα συνεπώς, πέραν από τις αποστάσεις ασφαλείας για αποφυγή συγκρούσεων λόγω της γεωμετρίας τους λαμβάνονται υπόψη οι ενεργοποιήσεις γειτονικών ηλεκτροδίων της ΕΠ που μπορεί να τα επηρεάσουν ανεπιθύμητα.

Στην εικόνα Ε.4.11 παρουσιάζεται η κίνηση δύο μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης γύρω από την περιοχή των στατικών εμποδίων όπου στις ελλείψεις περιέχονται οι ενεργοποιήσεις των ηλεκτροδίων της ΕΠ για την κίνηση των μικροαντικειμένων προς τα αριστερά και προς τα πάνω. Οι ενεργοποιήσεις αντίστοιχα επηρεάζουν ανεπιθύμητα τα μικροαντικείμενα του συνόλου $\dot{O}^{con}$ συνεπώς, η περιοχή των στατικών εμποδίων πρέπει να επεκταθεί ώστε να απομονώνονται και τα ηλεκτρόδια της ΕΠ που περικυκλώνουν το $\dot{O}^{con}$. Για τον υπολογισμό του χώρου των στατικών εμποδίων στην περίπτωση της τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων εντοπίζονται τα ηλεκτρόδια του $\dot{O}^{con}$ συνόλου με συντεταγμένες $c_{min}^{\dot{O}^{con}}, c_{max}^{\dot{O}^{con}}, l_{min}^{\dot{O}^{con}}$ και $l_{max}^{\dot{O}^{con}}$. Συναρτήσει αυτών των συντεταγμένων ορίζεται ο χώρος στατικών κυρτών εμποδίων C_{obs}^{cons} για την περίπτωση μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης:

$$C_{obs}^{cons} = \dot{O}^{con} \cup \left\{ \forall (c, l), \text{ όπου } c_{min}^{\dot{O}^{con}} - 2 \leq c \leq c_{max}^{\dot{O}^{con}} + 2 \text{ και } l_{min}^{\dot{O}^{con}} - 2 \leq l \leq l_{max}^{\dot{O}^{con}} + 2 \right\} \quad (4.10)$$



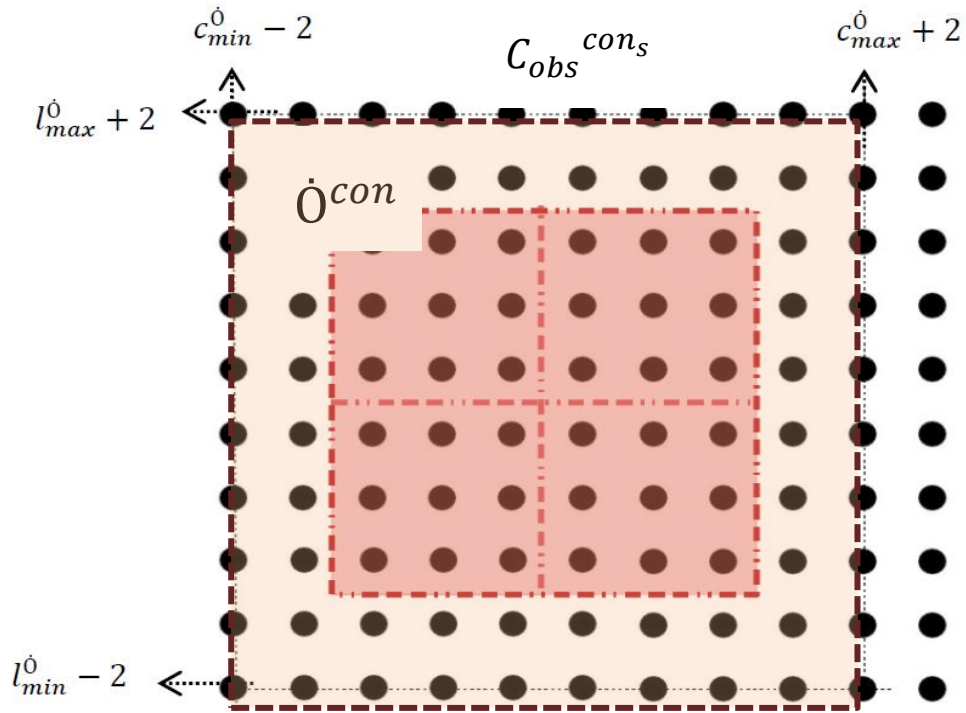
E.4.11: Κυρτό πολύγωνο – Τετραγωνική τοποθέτηση

Ο χώρος των στατικών εμποδίων C_{obs}^{cons} αναπαριστάται στην εικόνα E.4.12.

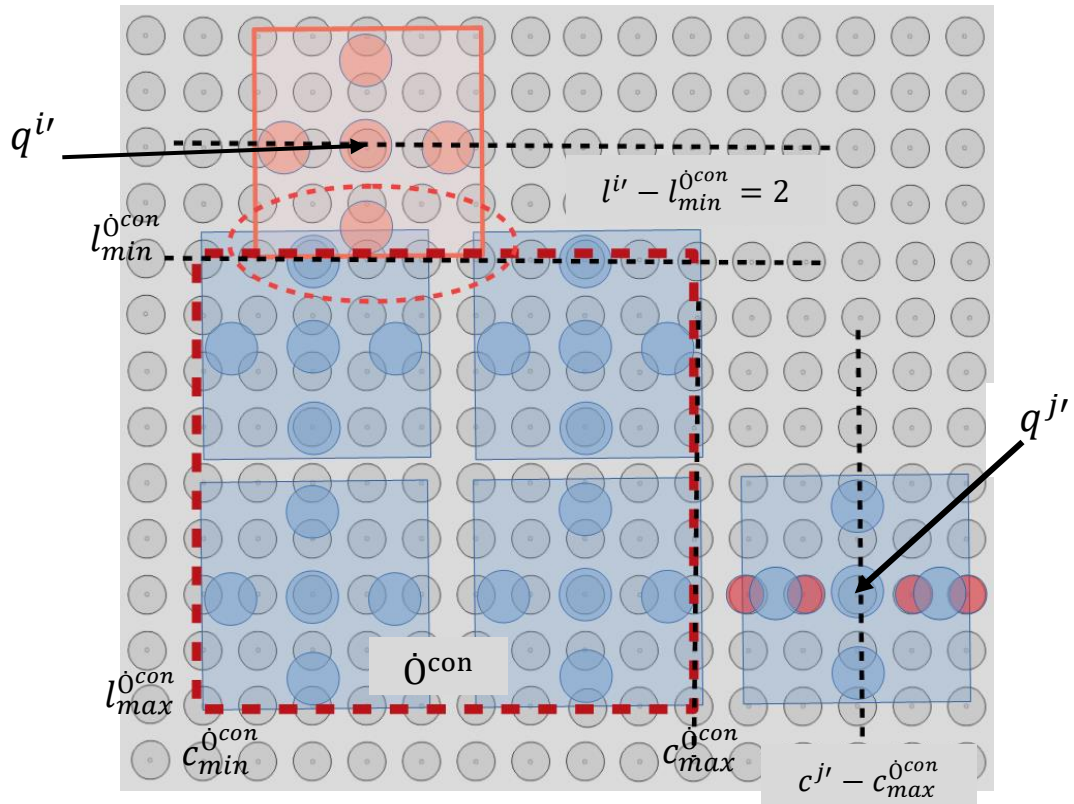
Αντίστοιχα με την περίπτωση των μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων γίνεται κι ο υπολογισμός του χώρου στατικών εμποδίων για την περίπτωση των μικροαντικειμένων με σταυρωτή διάταξη ηλεκτροδίων. Στην εικόνα E.4.13 παρουσιάζεται μια ομάδα στατικών μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης και δύο μικροαντικείμενα τα οποία κινούνται δίπλα σε αυτά. Στην περίπτωση της διαμόρφωσης $q^{i'}$ όπου $l^{i'} - l_{min}^{con} = 2$ το κινούμενο μικροαντικείμενο συγκρούεται με τα στατικά μικροαντικείμενα. Εν αντιθέσει με τα μικροαντικείμενα τετραγωνικής διάταξης όπως φαίνεται στην εικόνα E.4.13 στην περίπτωση της $q^{j'}$ διαμόρφωσης οι ενεργοποιήσεις δεν επηρεάζουν ανεπιθύμητα τα στατικά μικροαντικείμενα.

Αντίστοιχα με τα μικροαντικείμενα τετραγωνικής διάταξης για τον υπολογισμό του χώρου διαμορφώσεων για κυρτά στατικά εμπόδια C_{obs}^{con} στην περίπτωση των μικροαντικειμένων με σταυρωτή διάταξη εντοπίζονται τα ηλεκτρόδια τα οποία αντιστοιχούν στα $(c_{min}^{con}, c_{max}^{con}, l_{min}^{con}, l_{max}^{con})$ δηλαδή στα ηλεκτρόδια στα άκρα του κυρτού πολυγώνου. Ο χώρος των στατικών εμποδίων για την περίπτωση τη σταυρωτής τοποθέτησης ισούται με:

$$C_{obs}^{con_c} = \dot{O}^{con} \cup \left\{ \begin{array}{l} \forall (c, l), \text{ όπου} \\ c_{min}^{con} - 3 \leq c \leq c_{max}^{con} + 3 \text{ and } l_{min}^{con} - 3 \leq l \leq l_{max}^{con} + 3 \end{array} \right\} \quad (4.11)$$



E.4.13: Κυρτό πολύγωνο – Τετραγωνική διάταξη



E.4.13: Κυρτό πολύγωνο – Σταυρωτή διάταξη

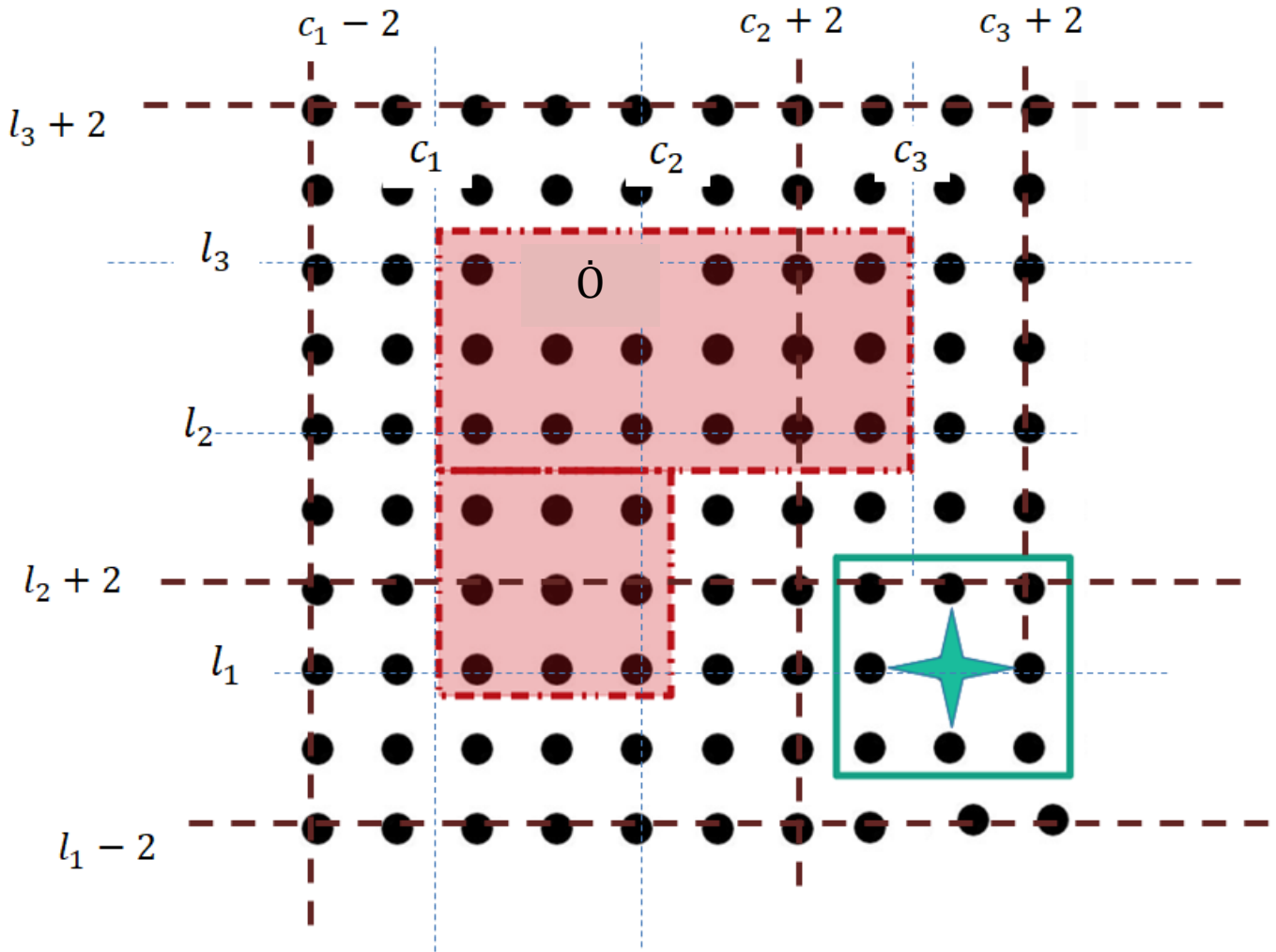
4.5.1.β. Χώρος Στατικών Εμποδίων – Μη Κυρτά Πολύγωνα

Ως μη κυρτό ορίζεται κάθε πολύγωνο τουλάχιστον ένα από τα άκρα του οποίου είναι εντός του πολυγώνου. Ο τρόπος υπολογισμού του χώρου στατικών μη – κυρτών εμποδίων $C_{obs}^{non-con}$ για την περίπτωση της τετραγωνικής και σταυρωτής διάταξης στηρίζεται στις δύο παραμέτρους που περιεγράφηκαν και στην προηγούμενη ενότητα: 1) την αποφυγή συγκρούσεων εξαιτίας της γεωμετρίας των μικροαντικειμένων 2) την κίνηση των στατικών μικροαντικειμένων εξαιτίας ανεπιθύμητων ενεργοποιήσεων γειτονικών ηλεκτροδίων της ΕΠ. Για τους υπολογισμούς του χώρου στατικών εμποδίων εντοπίζονται αρχικά τα σημεία μη κυρτότητας γύρω από το σύνολο $\dot{O}^{non-con}$. Αναλόγως το μη κυρτό πολύγωνο που σχεδιάζουν τα στατικά μικροαντικείμενα τα σημεία μη κυρτότητας μπορούν να είναι περισσότερα από ένα. Στην εικόνα Ε.4.14 παρουσιάζεται η περίπτωση στατικών εμποδίων με μικροαντικείμενα τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων με ένα μη κυρτό άκρο. Εντοπίζονται οι στήλες c_1, c_2, c_3 , και οι γραμμές l_1, l_2, l_3 όπου έχουν τοποθετηθεί τα έξι άκρα των του πολυγώνου. Ο χώρος του στατικού μη κυρτού εμποδίου για την περίπτωση της εικόνας Ε.4.14 ισούται με:

$$C_{obs}^{non-con_s} = \dot{O} \cup \left\{ \begin{array}{l} c_1 - 2 \leq c \leq c_2 + 2 \text{ και } c_2 + 2 \leq c \leq c_3 + 2 \\ l_1 - 2 \leq l \leq l_2 + 2 \text{ και } l_2 + 2 \leq l \leq l_3 + 2 \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

Στην περίπτωση που η γεωμετρία της εικόνας Ε.4.14 είχε διαμορφωθεί με μικροαντικείμενα σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων ο χώρος στατικών μη κυρτών εμποδίων θα οριζόταν από:

$$C_{obs}^{non-con_c} = \dot{O} \cup \left\{ \begin{array}{l} c_1 - 3 \leq c \leq c_2 + 3 \text{ και } c_2 + 3 \leq c \leq c_3 + 3 \\ l_1 - 3 \leq l \leq l_2 + 3 \text{ και } l_2 + 3 \leq l \leq l_3 + 3 \end{array} \right\} \quad (4.13)$$



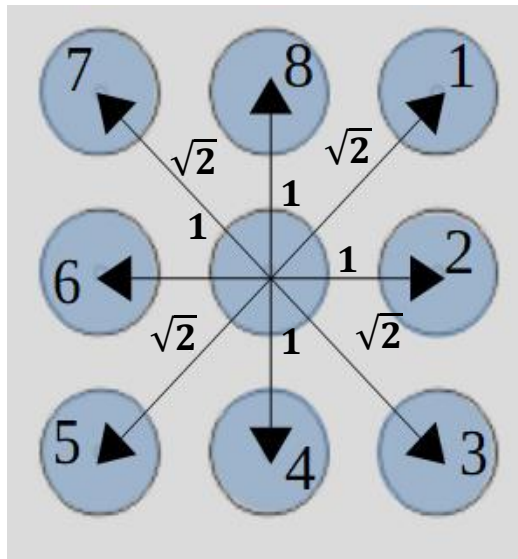
Ε.4.14: Στατικό Μη κυρτό εμπόδιο – Παράδειγμα τετραγωνικής διάταξης Ηλεκτροδίων

4.5.2.Ο Γράφος

Η διερεύνηση των ελεύθερων μονοπατιών για την παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων γίνεται πάνω σε γράφο. Ο γράφος μη προκαθορισμένης διεύθυνσης [62] ορίζεται με βάση των ελεύθερο χώρο διαμορφώσεων ο οποίος δίνεται από:

$$C_{free} = ((N \times N) / C_{SPE}) / C_{obs} \quad (4.15)$$

Όπου C_{obs} ο χώρος στατικών εμποδίων στην περίπτωση κυρτών και μη κυρτών πολυγώνων. Οι κόμβοι του γράφου είναι τα ηλεκτρόδια που υπάγονται στον ελεύθερο χώρο διαμορφώσεων C_{free} και οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων (ηλεκτροδίων) ορίζονται με βάση τις δυνατές κινήσεις των μικροαντικειμένων. Τα μικροαντικείμενα με σταυρωτή διάταξη μπορούν να μετακινούνται πάνω/κάτω/δεξιά κι αριστερά συνδέοντας τέσσερα ηλεκτρόδια [63] συνεπώς σε αυτή την περίπτωση ορίζεται ο γράφος: $G_c(M, E)$, [$M = C_{free}$ & E_c ακμές] όπου E_c ο αριθμός των ακμών η απόσταση των οποίων ισούται με 1 με βάση τη Μανχάταν μετρική μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων Στην περίπτωση της τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων τα μικροαντικείμενα έχουν τη δυνατότητα να κινηθούν διαγώνια συνεπώς υπάρχουν 8 γειτονικά ηλεκτρόδια στα οποία μπορεί να μετατοπισθεί (4-geometry neighborhood [44] μCA*). Ο γράφος σε αυτή την περίπτωση περιγράφεται από $G_s(M, E)$, [$M = C_{free}$ & E_s ακμές] όπου E_s ο αριθμός των ακμών αντίστοιχα οι οποίες παίρνουν είτε την τιμή 1 είτε $\sqrt{2}$ με βάση την Ευκλείδεια απόσταση των γειτονικών ηλεκτροδίων (εικόνα E.4.15).



E.4.15: Κινήσεις σε γειτονικά ηλεκτρόδια

4.5.3. Ο Χώρος Καταστάσεων Των μικροαντικειμένων για την Παράλληλη Κίνηση τους στο χώρο – χρόνο

Όπως ορίστηκε και στην αρχή της ενότητας παράλληλα μπορούν να κινηθούν είτε μικροαντικείμενα τετραγωνικής είτε σταυρωτής διάταξης. Η παράλληλη κίνηση των μικροαντικειμένων χωρίς συγκρούσεις μεταξύ τους μπορεί να επιτευχθεί εφόσον όλα τα μικροαντικείμενα κινούνται εντός του ελεύθερου χώρου καταστάσεων X_{free} . Ο χώρος καταστάσεων X των μικροαντικειμένων στην ΕΠ περιγράφεται από:

$$X = C_{free} \times T \in \mathbb{N}^3 \quad (4.16)$$

Όπου T ο διακριτός χρόνος με πεπερασμένα όρια όπου:

$$T = [t_0, t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots, t_0 + s\Delta t, \dots, t_0 + S\Delta t] \quad (4.17)$$

Όπου t_0 η χρονική στιγμή που όλα τα μικροαντικείμενα ξεκινάνε να κινούνται, και $t_0 + S\Delta t$ η χρονική στιγμή που ολοκληρώνεται η παράλληλη κίνηση τους. Ως Δt ορίζεται το μέγιστο χρονικό διάστημα που χρειάζεται κάθε μικροαντικείμενο για να μετατοπισθεί μεταξύ δύο γειτονικών θέσεων ισορροπίας. Στην περίπτωση των ηλεκτροδίων τετραγωνικής τοποθέτησης όπου τα μικροαντικείμενα μπορούν να κινηθούν οριζόντια/ κάθετα και διαγώνια ως Δt ορίζεται το χρονικό διάστημα της διαγώνιας κίνηση μιας κι αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη απόσταση που διανύει το μικροαντικείμενο.

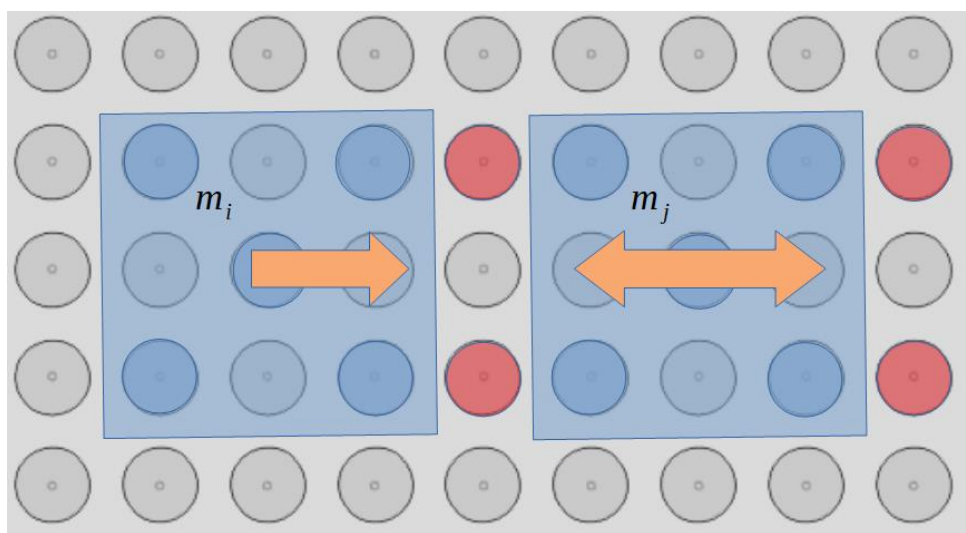
Η διαμόρφωση ενός μικροαντικειμένου στο χώρο – χρόνο περιγράφεται ως $q_{t_0+s\Delta t}^i = (c_i, l_i, t_0 + s\Delta t) = (q^i, t_0 + s\Delta t)$ η οποία πρέπει να ανήκει στον ελεύθερο χώρο καταστάσεων X_{free} ο οποίος δίνεται από:

$$X_{free} = X/X_{obs} \quad (4.18)$$

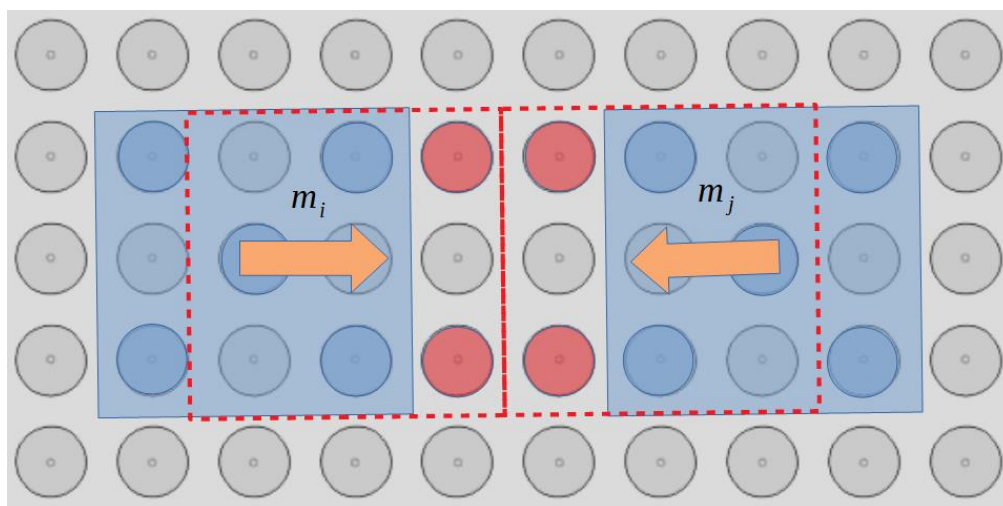
Όπου ως X_{obs} ορίζεται ο χώρος καταστάσεων των κινούμενων εμποδίων, όπου σε κάθε $t_0 + s\Delta t$ εμπεριέχονται όλες οι διαμορφώσεις που δεν μπορούν να πάρουν ταυτόχρονα τα μικροαντικείμενα ώστε να αποφευχθεί η μεταξύ τους σύγκρουση. Κατά την παράλληλη κίνηση των μικροαντικειμένων στην πλατφόρμα δίνεται πάντα προτεραιότητα μεταξύ τους, μιας και ειδικά σε εφαρμογές συναρμολόγησης υπάρχουν πάντα μικροαντικείμενα τα οποία προηγούνται έναντι των υπολοίπων ως προς την τοποθέτηση τους. Συνεπώς, για την αποφυγή των μεταξύ τους συγκρούσεων οι διαμορφώσεις των μικροαντικειμένων με χαμηλότερη προτεραιότητα υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τη θέση αυτών με μεγαλύτερη. Στις δύο παραγράφους που ακολουθούν προσδιορίζονται για τα μικροαντικείμενα m_i και m_j οι διαμορφώσεις $q_{t_0+s\Delta t}^i = (c^i, l^i, t_0 + s\Delta t)$ και $q_{t_0+s\Delta t}^j = (c^j, l^j, t_0 + s\Delta t)$ τις οποίες μπορούν να έχουν ταυτόχρονα, λαμβάνοντας υπόψη τις διαμορφώσεις $q_{t_0+(s-1)\Delta t}^i$ και $q_{t_0+(s-1)\Delta t}^j$ και ότι το m_i διαθέτει μεγαλύτερη προτεραιότητα σε σχέση με το m_j .

4.5.3.α Ελεύθερος Χώρος Καταστάσεων για τα Μικροαντικείμενα με Τετραγωνική Διάταξη Ηλεκτροδίων

Τα μικροαντικείμενα με τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων μπορούν να κινηθούν κάθετα /οριζόντια και διαγώνια. Η κίνηση των μικροαντικειμένων οφείλεται στην ενεργοποίηση των ηλεκτροδίων της πλατφόρμας που τα περικυκλώνουν, όποτε πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε να αποφευχθούν περιπτώσεις ενεργοποιήσεων οι οποίες μπορεί να μετακινήσουν ανεπιθύμητα γειτονικά μικροαντικείμενα. Επίσης δεν παραλείπεται το γεγονός ότι τα μικροαντικείμενα ταλαντώνονται γύρω από τις θέσεις ισορροπίας τους συνεπώς θα πρέπει να αποφευχθεί και η σύγκρουση όταν καταλαμβάνουν την τελική τους διαμόρφωση. Συγκεκριμένα, στο παράδειγμα της εικόνας E.4.13 οι ενεργοποιήσεις για μετατόπιση του m_i επηρεάζουν ανεπιθύμητα το m_j ενώ στην εικόνα E.4.14 φαίνεται ότι φτάνοντας τα μικροαντικείμενα στην τελική Θ.Ι. τους θα συγκρουστούν εξαιτίας των ταλαντώσεων τους μέχρι να ισορροπήσουν.

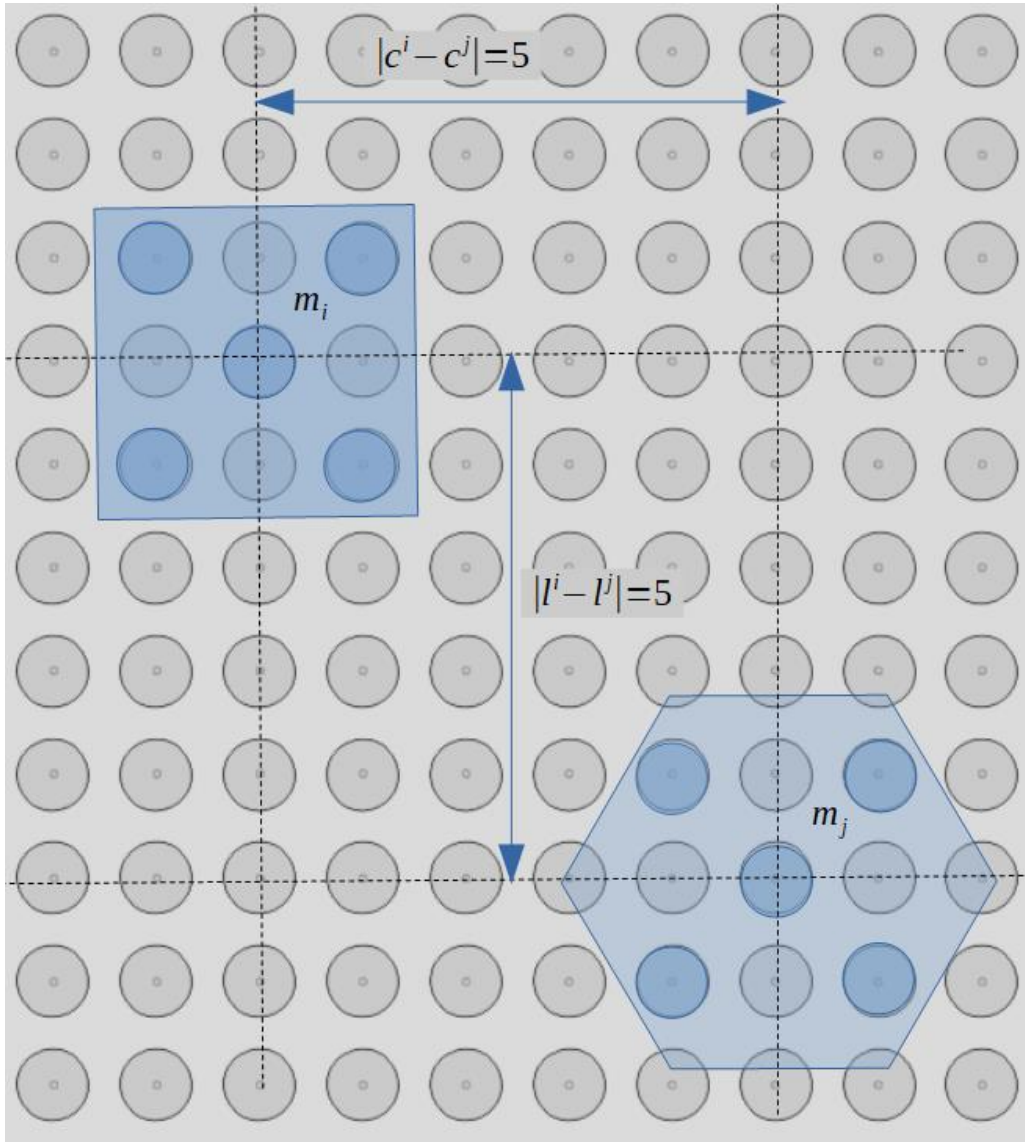


E.4.13: Οι ενεργοποιήσεις για το m_i επηρεάζουν ανεπιθύμητα το m_j



E.4.14: Σύγκρουση λόγω ταλαντώσεων στην τελική Θ.Ι.

Στην εικόνα E.4.15 επιβεβαιώνεται ότι όταν τα μικροαντικείμενα έχουν διαμορφώσεις ώστε $|l^i - l^j| \geq 5$ και $|c^i - c^j| \geq 5$ διασφαλίζεται η αποφυγή σύγκρουσης μεταξύ τους. Κρατώντας όμως αυτές τις αποστάσεις αναμεταξύ των μικροαντικειμένων χάνονται αρκετές πιθανές θέσεις τις οποίες θα μπορούσαν να καταλάβουν χωρίς να συγκρουστούν. Συνεπώς όταν η απόσταση μεταξύ των μικροαντικειμένων είναι τέτοια ώστε $|l^i - l^j| < 6$ και $|c^i - c^j| < 6$ ορίζονται κανόνες για τον ορισμό των ελεύθερων καταστάσεων οι οποίοι εμπεριέχονται στον πίνακα Π.4.5. Για τους κανόνες του πίνακα Π.4.5 έχουν προσδιορισθεί οι επιτρεπτές διαμορφώσεις $q_{t_0+s\Delta t}^j$ για το m_j συναρτήσει των $q_{t_0+(s-1)\Delta t}^j$, $q_{t_0+s\Delta t}^i$ και $q_{t_0+(s-1)\Delta t}^i$ λαμβάνοντας υπόψη για όλους τους συγκεκριμένους υπολογισμούς ότι $c^i > c^j$ και $l^i > l^j$.



E.4.15: Ασφαλείς αποστάσεις για τετραγωνική τοποθέτηση

Π.4.5: Κανόνες για ασφαλή παράλληλη κίνηση των μικροαντικειμένων

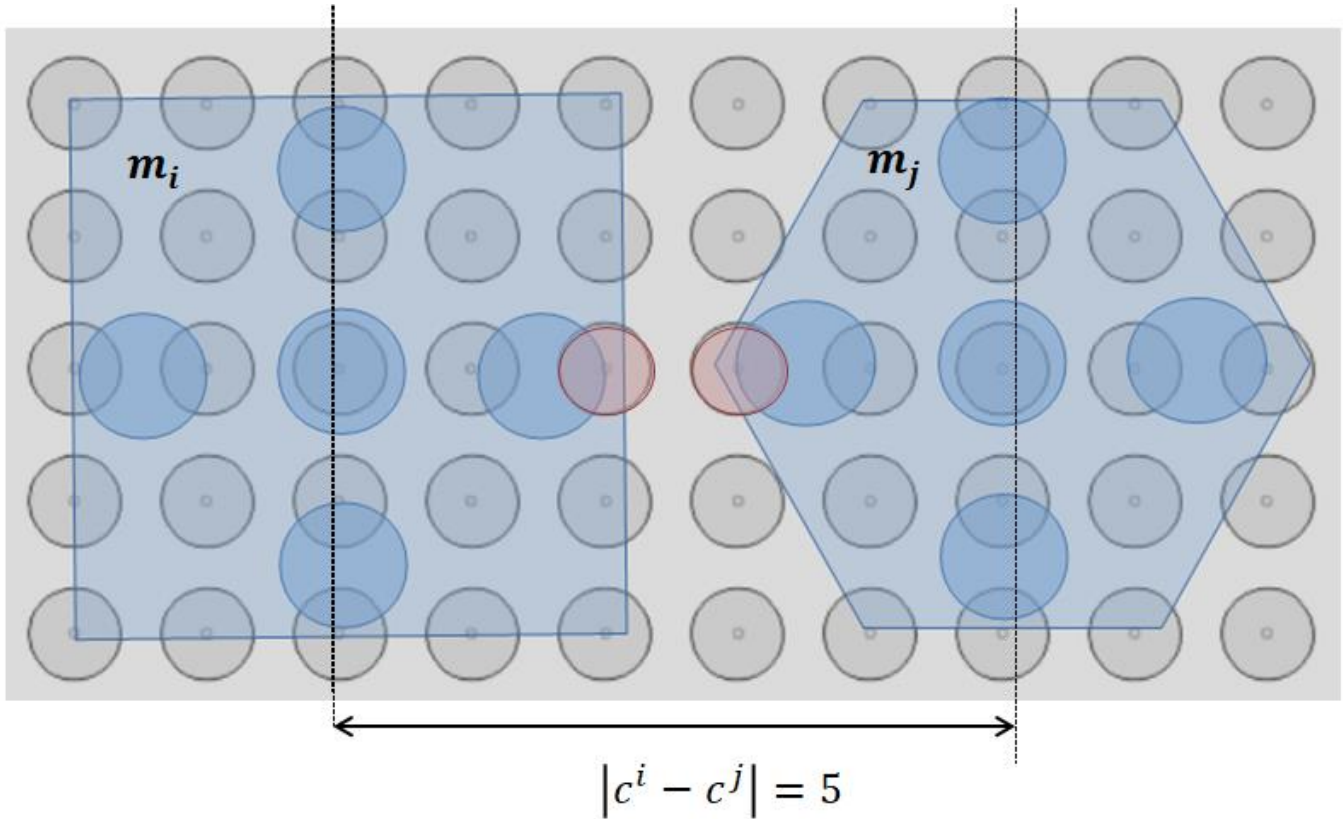
Επόμενη Διαμόρφωση	Συνθήκες για την Επιλογή της Επόμενης Διαμόρφωσης
$q_{t_0+s\Delta t}^i = (c^i, l^i, t_0 + s\Delta t) \text{ του } m_i$ $q^i + v_1$ $q_{t_0+(s-1)\Delta t}^j = (c^j, l^j, t_0 + s\Delta t) \text{ του } m_j$ $q^j + v_1$ όταν $c^i - c^j \geq 5$, $q^j + v_2$ όταν $c^i - c^j \geq 6$, $q^j + v_3$ όταν $c^i - c^j \geq 6$ ή $l^i - l^j \geq 6$ $q^j + v_4$ όταν $c^i - c^j \geq 4$ ή $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_5$ όταν $c^i - c^j \geq 4$ $q^j + v_6$ όταν $c^i - c^j \geq 5$, $q^j + v_7$ όταν $c^i - c^j \geq 5$ $q^j + v_8$ όταν $c^i - c^j \geq 6$, $q^j + v_9$ όταν $c^i - c^j \geq 6$	
Προσωρινή Διαμόρφωση $q_{t_0+(s-1)\Delta t}^i = (c^i, l^i, t_0 + (s-1)\Delta t) = (q^i, (s-1)\Delta t) \text{ του } m_i$ Micropart και προσωρινή διαμόρφωση του m_j $q^i + v_2$ $q^j + v_1$ όταν $c^i - c^j \geq 6$, $q^j + v_2$ όταν $c^i - c^j \geq 5$, $q^j + v_3$ όταν $c^i - c^j \geq 4$ ή $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_4$ όταν $c^i - c^j \geq 6$ ή $l^i - l^j \geq 6$ $q^j + v_5$ όταν $c^i - c^j \geq 5$ $q^j + v_6$ όταν $c^i - c^j \geq 6$, $q^j + v_7$ όταν $c^i - c^j \geq 6$ $q^j + v_8$ όταν $c^i - c^j \geq 5$, $q^j + v_9$ όταν $c^i - c^j \geq 5$	
$q_{t_0+(s-1)\Delta t}^j = (c^j, l^j, t_0 + (s-1)\Delta t) = (q^j, (s-1)\Delta t) \text{ του } m_j$ $q^i + v_3$ $q^j + v_1$ όταν $c^i - c^j \geq 4$ ή $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_2$ όταν $c^i - c^j \geq 6$ ή $l^i - l^j \geq 6$ $q^j + v_3$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_4$ όταν $l^i - l^j \geq 6$ $q^j + v_5$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_6$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_7$ όταν $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_8$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_9$ όταν $l^i - l^j \geq 4$	
$q^i + v_4$ $q^j + v_1$ όταν $c^i - c^j \geq 6$ ή $l^i - l^j \geq 6$ $q^j + v_2$ όταν $c^i - c^j \geq 4$ ή $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_3$ όταν $l^i - l^j \geq 6$, $q^j + v_4$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_5$ όταν $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_6$ όταν $l^i - l^j \geq 4$, $q^j + v_7$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_8$ όταν $l^i - l^j \geq 4$, $q^j + v_9$ όταν $l^i - l^j \geq 5$	
$q^i + v_5$ $q^j + v_1$ όταν $c^i - c^j \geq 5$, $q^j + v_2$ όταν $c^i - c^j \geq 4$, $q^j + v_3$ όταν $l^i - l^j \geq 4$, $q^j + v_4$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_5$ όταν $c^i - c^j \geq 5$ ή $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_6$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_7$ όταν $l^i - l^j \geq 4$	

	$q^j + v_8$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, , $q^j + v_9$ όταν $l^i - l^j \geq 4$
$q^i + v_6$	$q^j + v_1$ όταν $l^i - l^j \geq 4$, $q^j + v_2$ όταν $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_3$ όταν $l^i - l^j \geq 4$, $q^j + v_4$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_5$ όταν $c^i - c^j \geq 4$ ή $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_6$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_7$ όταν $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_8$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_9$ όταν $l^i - l^j \geq 4$
$q^i + v_7$	$q^j + v_1$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_2$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_3$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_4$ όταν $l^i - l^j \geq 6$ $q^j + v_5$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_6$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_7$ όταν $l^i - l^j \geq 6$ $q^j + v_8$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_9$ όταν $l^i - l^j \geq 6$
$q^i + v_8$	$q^j + v_1$ όταν $l^i - l^j \geq 4$, $q^j + v_2$ όταν $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_3$ όταν $l^i - l^j \geq 4$, $q^j + v_4$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_5$ όταν $c^i - c^j \geq 4$ ή $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_6$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_7$ όταν $l^i - l^j \geq 4$ $q^j + v_8$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_9$ όταν $l^i - l^j \geq 4$
$q^i + v_9$	$q^j + v_1$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_2$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_3$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_4$ όταν $l^i - l^j \geq 6$ $q^j + v_5$ όταν $l^i - l^j \geq 5$ $q^j + v_6$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_7$ όταν $l^i - l^j \geq 6$ $q^j + v_8$ όταν $l^i - l^j \geq 5$, $q^j + v_9$ όταν $l^i - l^j \geq 6$

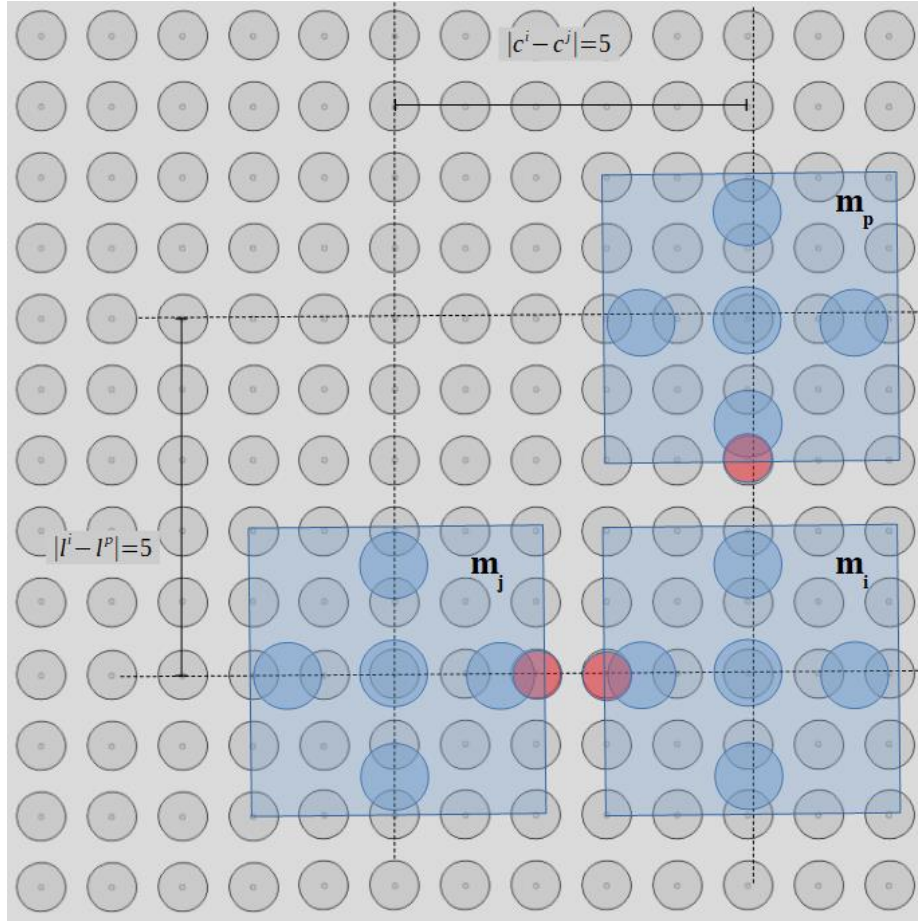
4.5.3.β Ελεύθερος Χώρος Καταστάσεων για τα Μικροαντικείμενα με Σταυρωτή Διάταξη Ηλεκτροδίων

Ο υπολογισμός του ελεύθερου χώρου καταστάσεων για μικροαντικείμενα με σταυρωτή διάταξη ηλεκτροδίων διερευνάται σε αυτή την παράγραφο. Όπως συζητήθηκε και στην παράγραφο για τα μικροαντικείμενα σταυρωτής διάταξης, η παράμετρος με βάση την οποία διερευνάται η αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ γειτονικών μικροαντικειμένων είναι η γεωμετρία τους. Όπως παρουσιάζεται στις εικόνες E.4.1 και E.4.1 όταν οι αποστάσεις μεταξύ των μικροαντικειμένων είναι τέτοιες ώστε $|l^i - l^j| \geq 5$ και $|c^i - c^j| \geq 5$ αποφεύγονται οι συγκρούσεις μεταξύ των μικροαντικειμένων όποια κι αν είναι η γεωμετρία τους (εξαγωνική ή τετραγωνική)

Οι εικόνες E.4.16 και E.4.17 επαληθεύουν επίσης τον ισχυρισμό ότι οι ενεργοποιήσεις για την κίνηση των μικροαντικειμένων δεν επηρεάζουν ανεπιθύμητα τα γειτονικά μικροαντικείμενα. Συνεπώς, για κάθε μικροαντικείμενο m_j σταυρωτής διάταξης με μικρότερη προτεραιότητα σε σχέση με το m_i η επόμενη του διαμόρφωση $q_{t_0+s\Delta t}^j$ επιλέγεται συναρτήσει του $q_{t_0+s\Delta t}^i$ εφόσον οι συντεταγμένες του q^j είναι τέτοιες ώστε $|l^i - l^j| \geq 5$ ή $|c^i - c^j| \geq 5$.



E.4.17: Ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης



Ε.4.16: Ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης

Συνεπώς, στην περίπτωση της σταυρωτής διάταξης ο χώρος καταστάσεων X_{obs}^{ij} δίνεται από:

$$q^j \in X_{obs}^{ij}, \text{ όταν } \forall q^i, q^j \rightarrow |l^i - l^j| < 5 \text{ ή } |c^i - c^j| < 5 \quad (4.19)$$

Ο χώρος καταστάσεων όπου υπάρχουν όλες οι απαγορευμένες διαμορφώσεις τις οποίες δεν επιτρέπεται να λάβουν ταυτόχρονα δύο παράλληλα κινούμενα μικροαντικείμενα m_i και m_j στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» δίνεται από:

$$X_{obs} = \bigcup_{j=i+1}^k X_{obs}^{ij}, \quad i \in [1, k-1] \quad (4.20)$$

Όπου k το σύνολο των παράλληλα κινούμενων μικροαντικειμένων στην ΕΠ και X_{obs}^{ij} η κατάσταση που οδηγεί στη σύγκρουση δύο μικροαντικειμένων στην ΕΠ.

4.5.4. Υπολογισμός Μονοπατιών για την Παράλληλη Κίνηση των Μικροαντικειμένων

Ο στόχος αυτής της ενότητας είναι η εύρεση μονοπατιών για τη παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων στο χωροχρόνο. Με βάση τις προδιαγραφές του συγκεκριμένου προβλήματος επιλέγεται μια ευρεστική μέθοδος πάνω σε γράφο. Η διερεύνηση των μονοπατιών υλοποιείται με τη βοήθεια ενός προσαρμοσμένου A^* αλγόριθμου. Όπως έχει σημειωθεί και σε προηγούμενες παραγράφους στο πρόβλημα λαμβάνεται υπόψη η προτεραιότητα του κάθε μικροαντικειμένου.

Μια προσαρμοσμένη μορφή του A^* αλγόριθμου για την εύρεση μοναδικών μονοπατιών για πολλαπλά ρομπότ στο χωροχρόνο, λαμβάνοντας υπόψη την προτεραιότητα του καθενός είναι ο συνεργατικός A^* αλγόριθμος (Cooperative A^* -CA*) [59]. Μια παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς αυτού του αλγόριθμου είναι η δυνατότητα των ρομπότ με μικρότερη προτεραιότητα να παραμένουν ακίνητα σε έναν κόμβο μέχρι να ελευθερωθεί μια διαδρομή από ένα ρομπότ με μεγαλύτερη. Όπως σε όλους τους αλγόριθμους τύπου A^* οι μεταβάσεις από την προσωρινή θέση στην επόμενη επιλέγεται με κριτήριο την ελάχιστη τιμή της συνάρτησης κόστους του συμβατικού A^* [51] η οποία ισούται με:

$$f(q^{i'}) = (q^{i,start} - q^{i'}) + (q^{i,goal} - q^{i'}) \quad (4.21)$$

Όπου $q^{i,start}$ η αρχική διαμόρφωση του ρομπότ, $q^{i,goal}$ η τελική θέση/θέση στόχος και $q^{i'}$ η επόμενη δυνατή μετάβαση του. Οι συγγραφείς στην [59] τονίζουν ότι σε προβλήματα με μεγάλο αριθμό ρομπότ οι υπολογισμοί του CA* συμβάλλουν στην αύξηση του χρόνου κίνησης του κάθε ρομπότ. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του χρόνου παραμονής των ρομπότ μικρότερης προτεραιότητας στην προσωρινή τους θέση ώστε να αποφευχθεί η σύγκρουση με ρομπότ μεγαλύτερης προτεραιότητας για τα οποία είναι ήδη γνωστό το μονοπάτι που πρόκειται να ακολουθήσουν.

Όπως συζητήθηκε στην αρχή του 4^{ου} κεφαλαίου οι ευρεστικές μέθοδοι σε γράφο μπορούν να εφαρμοσθούν και για την εύρεση μονοπατιών στην ΕΠ αρκεί να λαμβάνεται υπόψη ο τρόπος κίνησης των μικροαντικειμένων εξαιτίας των ενεργοποιήσεων της ΕΠ. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής προτείνεται μια νέα εκδοχή του CA* αλγόριθμου ο οποίος χρησιμοποιείται για την εύρεση μονοπατιών στον ελεύθερο χώρο καταστάσεων X_{free} όπως αυτός ορίστηκε στις προηγούμενες ενότητες του 4^{ου} Κεφαλαίου. Επιπλέον, διατυπώνεται μια νέα συνάρτησης κόστους για τους υπολογισμούς των μονοπατιών των μικροαντικειμένων στο χωροχρόνο, η οποία συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των διακριτών κινήσεων που κάνει κάθε ένα εξ αυτών έως ότου φτάσει στη θέση στόχο.

4.5.4.α Συνάρτηση Κόστους του Προσαρμοσμένου A^*

Όπως και στον συμβατικό A^* αλγόριθμο έτσι και για τον μCA^* δημιουργείται μια «ΑΝΟΙΧΤΗ» λίστα στην οποία εμπεριέχονται οι υπολογισμοί της συνάρτησης κόστους για τις θέσεις στις οποίες μπορεί να μετατοπισθεί το

μικροαντικείμενο. Συγκεκριμένα η διαμόρφωση $q_{t_0+(s-1)\Delta t}^i$ θεωρείται ως η προσωρινή θέση του μικροαντικειμένου m_i και $q_{t_0+s\Delta t}^i$ η επόμενη η οποία επιλέγεται ανάμεσα στα στοιχεία του συνόλου $Q^{i'} = \{(q^i + v_a, \forall v_a \in U, t_0 + s\Delta t)\}$. Στον μCA^* η εκτίμηση για την επιλογή της βέλτιστης θέσης του μικροαντικειμένου αποφεύγοντας τις συγκρούσεις με στατικά και κινούμενα εμπόδια υλοποιείται στο χρονικό βήμα $t_0 + (s - 1)\Delta t$.

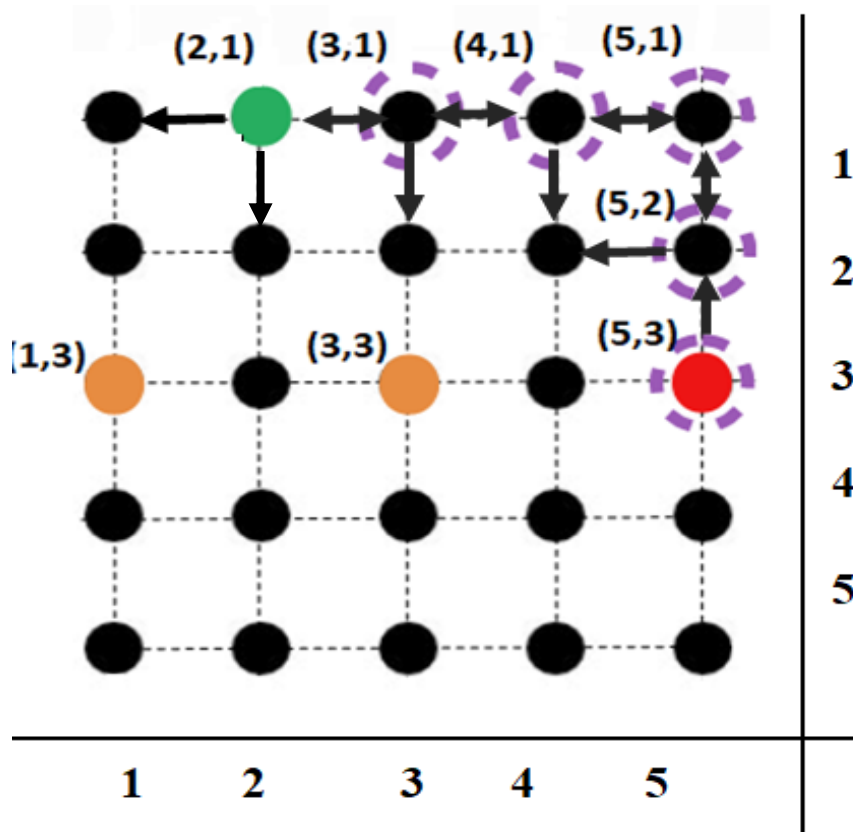
Λαμβάνεται υπόψη ότι τα μονοπάτια που υπολογίζονται από τον μCA^* για τα μικροαντικείμενα με υψηλότερη προτεραιότητα στο χώρο – χρόνο είναι μοναδικά και δεν αλλάζουν κατά τον υπολογισμό των μονοπατιών μικροαντικειμένων με χαμηλότερη προτεραιότητα. Επίσης η ευρεστική για κάθε διαμόρφωση $q_{t_0+s\Delta t}^{i'}$ υπολογίζεται εφόσον η διαμόρφωση είναι εντός του ελεύθερου χώρου καταστάσεων X_{free} . Όπως τέθηκε και στην εισαγωγή της ενότητας ο στόχος είναι να βελτιστοποιηθεί ο χρόνος κίνησης του κάθε μικροαντικειμένου περιορίζοντας το χρόνο που παραμένει ακίνητο σε κόμβους της ΕΠ. Σε αυτή την ενότητα προτείνεται μια ανανεωμένη συνάρτηση κόστους με μια νέα ευρεστική στόχος της οποίας είναι να «προβλέπει» τις επόμενες κινήσεις του μικροαντικειμένου λαμβάνοντας υπόψη τις ήδη γνωστές κινήσεις των μικροαντικειμένων με μεγαλύτερη προτεραιότητα. Στους υπολογισμούς που ακολουθούν ο δείκτης i του κάθε μικροαντικειμένου υποδεικνύει και την προτεραιότητά του όπου ο δείκτης $i = 1$ αντιστοιχεί στο μικροαντικείμενο με μεγαλύτερη προτεραιότητα ενώ $i = k$ είναι ο δείκτης του μικροαντικειμένου με την μικρότερη. Η συνάρτηση κόστους δίνεται από:

$$\begin{aligned} g(q^{i'}, q^{w=1:i-1}) &= w_f \cdot f(q^{i'}) + w_h \cdot h(q^{i'}, q^{w=1:i-1}) \\ &= w_f \cdot f(q^{i'}) + w_h \cdot \frac{1}{\sum_{w=1}^{i-1} d(q^{i'} - q^w)}, \text{ όταν } t = t_0 + s\Delta t \end{aligned} \quad (4.22)$$

Όπου η συνάρτηση $f(q^{i'})$ είναι η συμβατική συνάρτηση κόστους του A^* αλγορίθμου πολλαπλασιασμένη με το βάρος w_f . Η νέα συνάρτησης κόστους διαφοροποιείται από τη συμβατική συνάρτηση A^* εξαιτίας της νέας ευρεστικής συνάρτησης $h(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$ η οποία πολλαπλασιάζεται με το βάρος w_h . Η τιμή της $h(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$ εξαρτάται από τη συνάρτηση $\sum_{w=1}^{i-1} d(q^{i'} - q^w)$ η οποία ισούται με το άθροισμα των αποστάσεων της επόμενης πιθανής θέσης $q^{i'}$ από τη θέση των υπόλοιπων μικροαντικειμένων $q^{w=1:i-1}$ με μεγαλύτερη προτεραιότητα. Η συνάρτηση $\sum_{w=1}^{i-1} d(q^{i'} - q^w)$ συνεισφέρει στην επιλογή της $q^{i'}$ η οποία είναι πιο απομακρυσμένη από τα υπόλοιπα μικροαντικείμενα τη χρονική στιγμή $t_0 + s\Delta t$ προστατεύοντας το m_i από το να παγιδευτεί και να παραμένει στατικό για αρκετά βήματα. Το κριτήριο για την επιλογή της βέλτιστης διαμόρφωσης $q^{i'}$ είναι η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης $g(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$. Συνεπώς, για τους υπολογισμούς της (4.22) λαμβάνεται υπόψη το αντίστροφο του $\sum_{w=1}^{i-1} d(q^{i'} - q^w)$ πολλαπλασιασμένο με το βάρος w_h .

Τα βάρη w_f και w_h ορίζονται με βάση τις δυνατές κινήσεις των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο Θέσεων Ισορροπίας. Συγκεκριμένα τα μικροαντικείμενα σταυρωτής διάταξης μπορούν να κινούνται πάνω κάτω δεξιά κι αριστερά συνεπώς χρησιμοποιείται η Μανχάταν Μετρική [50] για τους υπολογισμούς των αποστάσεων. Το κόστος μετάβασης μεταξύ δύο Θ.Ι. είναι το ίδιο σε μέτρο κι επίσης η συνάρτηση $f(q^{i'})$ δεν συνεισφέρει αισθητά στην λήψη αποφάσεων για την επιλογή της βέλτιστης επόμενης κίνησης των μικροαντικειμένων. Από την άλλη στην περίπτωση κίνησης Μανχάταν η συνάρτηση $h(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$ είναι σημαντική στην επιλογή της επόμενης βέλτιστης θέσης ώστε να αποφευχθεί η περιοχή όπου βρίσκονται και τα υπόλοιπα μικροαντικείμενα. Στην περίπτωση όμως των μικροαντικειμένων με τετραγωνική διάταξη ηλεκτροδίων είναι δυνατή η διαγώνια κίνηση, συνεπώς στους υπολογισμούς της (4.22) χρησιμοποιείται η Ευκλείδεια απόσταση. Αποτέλεσμα αυτού είναι η συνεισφορά των συναρτήσεων $h(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$ και $f(q^{i'})$ να είναι διαφορετική. Αναλόγως λοιπόν τον τύπο διάταξης μικροαντικειμένων που πρόκειται να κινηθούν παράλληλα στην ΕΠ ορίζονται οι τιμές για τα βάρη w_f και w_h .

Η κίνηση ενός σημειακού μικροαντικειμένου σε ένα πλέγμα 5x5 κόμβων επιλέγοντας τη βέλτιστη θέση με βάση τη συνάρτηση (4.22) παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους. Τρία σημειακά μικροαντικείμενα (A^1, A^2, A^3) τοποθετούνται στο πλέγμα όπου τα A^1, A^2 θεωρούνται στατικά καθ' όλη τη διάρκεια των υπολογισμών. Συγκεκριμένα, τα A^1 & A^2 τοποθετούνται στους κόμβους με συντεταγμένες (1, 3) and (3, 3) αντίστοιχα ενώ το A^3 ξεκινάει από τη θέση (2, 1) με στόχο τον κόμβο με συντεταγμένες (5, 3). Στην εικόνα Ε.17 παρουσιάζεται το παράδειγμα στο οποίο είναι δυνατές οι δράσεις του U^c (4.7) συνόλου όπου οι υπολογισμοί των αποστάσεων για την κίνηση του A^3 γίνεται με τη Μανχάταν μετρική [50]. Στον πίνακα Π.4.6 4 εμπεριέχονται οι υπολογισμοί των τιμών των συναρτήσεων $f(q^{i'})$ και $h(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$ σε κάθε κόμβο για όλες τις δυνατές κινήσεις. Ο στόχος είναι το μικροαντικείμενο να φτάσει τον στόχο αποφεύγοντας ταυτόχρονα το στατικά μικροαντικείμενα.:



Ε.4.17: Διερεύνηση για την κίνηση του σημειακού μικροαντικειμένου μεταξύ της αρχικής και τελικής του θέσης στην ΕΠ

Π.4.6: Τιμές συνάρτησης κόστους για οριζόντια/κάθετη κίνηση

A^3 προσωρινό	Πιθα νό	$q^{i,goal} - q^{i'}$	$q^{i'} - q^{i,start}$	$h(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$ λαμβάνοντας υπόψη τα A^1 & A^2
(2,1)	(1,1)	5	1	$\frac{1}{6}$
	(2,2)	4	1	$\frac{1}{4}$
	(2,1)	5	0	$\frac{1}{6}$
	(3,1)	4	1	$\frac{1}{6}$
(3,1)	(3,2)	3	2	$\frac{1}{5}$
	(4,1)	3	2	$\frac{1}{6}$

	(3,1)	4	1	$\frac{1}{6}$
	(2, 1)	5	0	$\frac{1}{6}$
(4,1)	(5,1)	2	3	$\frac{1}{10}$
	(3,1)	4	1	$\frac{1}{6}$
	(4,1)	3	2	$\frac{1}{6}$
	(4,2)	2	3	$\frac{1}{5}$
(5,1)	(4,1)	3	2	$\frac{1}{6}$
	(5,1)	2	3	$\frac{1}{10}$
	(5,2)	1	4	$\frac{1}{8}$
(5,2)	(4,2)	2	3	$\frac{1}{5}$
	(5,2)	1	4	$\frac{1}{8}$
	(5,3)	0	5	$\frac{1}{6}$
	(5,1)	2	3	$\frac{1}{10}$

Από τις τιμές του πίνακα Π.4.6 προκύπτει ότι το κόστος $f(q^{i'})$ είναι ίδιο οποιαδήποτε διαδρομή κι αν ακολουθήσει το μικροαντικείμενο ακόμα κι αν μείνει στατικό στην ίδια θέση. Άρα οι δύο πιο σημαντικές παράμετροι είναι 1) εάν πλησιάζει το μικροαντικείμενο στο στόχο και 2) εάν αποφεύγει τα υπόλοιπα μικροαντικείμενα. Με αυτά τα κριτήρια επιλέγεται να αποδυναμωθεί η συνεισφορά της $(q^{i,start} - q^{i'})$ συνάρτησης και να ενισχυθεί η συνεισφορά της νέας ευρεστικής ενώ το βάρος τη $(q^{i,goal} - q^{i'})$ να είναι στη μονάδα μιας κι αποτελεί το γνώμονα εάν το μικροαντικείμενο πλησιάζει στο στόχο. Συνεπώς η συνάρτηση κόστους δίνεται από:

$$g(q^{i'}, q^{w=1:i-1}) = 0,1 \cdot (q^{i,start} - q^{i'}) + 1 \cdot (q^{i,goal} - q^{i'}) + \frac{i-1}{\sum_{w=1}^{i-1} d(q^{i'} - q^w)}, \quad (4.23)$$

$$\text{όταν } t = t_0 + s\Delta t$$

Στον πίνακα Π.4.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τη διερεύνηση της κίνησης του μικροαντικειμένου χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση κόστους που δίνεται στην (4.22).

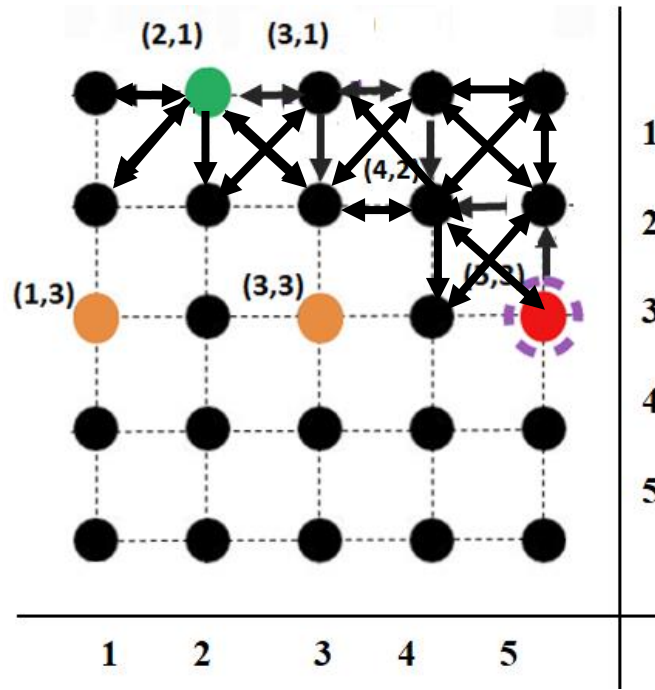
Π.4.7: Τιμές συνάρτησης κόστους για οριζόντια/κάθετη κίνηση

A^3 προσωρινό	Πιθανό	$0,1 \cdot (q^{i,start} - q^{i'})$	$q^{i,goal} - q^{i'}$	$2 \cdot h(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$	$g(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$
(2,1)	(1,1)	0,2	5	$\frac{2}{6}$	5,53
	(2,2)	0,2	4	$\frac{2}{4}$	4,7
	(2,1)	0	5	$\frac{2}{6}$	5,33
	(3,1)	0,1	4	$\frac{2}{6}$	4,43
(3,1)	(3,2)	0,2	3	$\frac{2}{5}$	3,6
	(4,1)	0,2	3	$\frac{2}{6}$	3,53
	(3,1)	0,1	4	$\frac{2}{6}$	4,43
	(2, 1)	0	5	$\frac{2}{6}$	5,33
(4,1)	(5,1)	0,3	2	$\frac{2}{10}$	2,5

	(3,1)	0,1	4	$\frac{2}{6}$	4,43
	(4,1)	0,2	3	$\frac{2}{6}$	3,53
	(4,2)	0,3	2	$\frac{2}{5}$	2,7
(5,1)	(4,1)	0,2	3	$\frac{2}{6}$	3,53
	(5,1)	0,3	2	$\frac{2}{10}$	2,5
	(5,2)	0,4	1	$\frac{2}{8}$	1,65
(5,2)	(4,2)	0,3	2	$\frac{2}{5}$	2,7
	(5,2)	0,4	1	$\frac{2}{8}$	1,65
	(5,3)	0,5	0	$\frac{2}{6}$	0,83
	(5,1)	0,3	2	$\frac{2}{10}$	2,5

Στις τιμές του πίνακα Π.4.6 έχουν σημειωθεί με έντονο (bold) μαύρο χρώμα οι τιμές στους κόμβους με την ελάχιστη τιμή της $g(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$ συνάρτησης και οι κόμβοι που αντιστοιχούν στη διαδρομή που πρόκειται να ακολουθήσει το μικροαντικείμενο εξαιτίας αυτών των επιλογών είναι εντός των μοβ κύκλων στην εικόνα Ε.4.17. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών επιβεβαιώνουν ότι σε κάθε συνάρτηση της (4.22) αποδόθηκε το σωστό βάρος μιας και με τη διαδρομή που υπολογίστηκε το μικροαντικείμενο φτάνει στο στόχο του αποφεύγοντας στο μέγιστο δυνατό τα στατικά μικροαντικείμενα.

Το ίδιο πρόβλημα διερευνάται για την περίπτωση των μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης όπου το οι αποστάσεις μετρούνται Ευκλείδεια. Πάλι το μικροαντικείμενο ξεκινάει από το (2,1) κόμβο με στόχο τον (5,1) και οι τιμές των συναρτήσεων για όλες τις δυνατές μεταβάσεις εμπεριέχονται στον πίνακα Π.4.8



E.4.19: Μονοπάτι με βάση τον Π.4.7

Αξιολογώντας τις τιμές του πίνακα Π.4.8 προκύπτει ότι εάν η συνάρτηση $f(q^{i'})$ έχει το ίδιο βάρος με την ευρεστική $h(q^{i'}, q^w)$ θα ακολουθήσει τη διαδρομή που θα επέλεγε και στην περίπτωση της συμβατικής συνάρτησης του A*. Συνεπώς για να μετριάσθει η συνεισφορά της $f(q^{i'})$ σε επίπεδο τέτοιο ώστε να είναι συγκρίσιμη με την $h(q^{i'}, q^w)$ για την περίπτωση των Ευκλείδειων αποστάσεων ορίζεται η συνάρτηση:

$$g(q^{i'}, q^{w=1:i-1}) = [0,1 \cdot f(q^{i'})] + 1 \cdot h(q^{i'}, q^{w=1:i-1}) \quad (4.24)$$

$$= [0,1 \cdot f(q^{i'})] + \frac{1}{\sum_{w=1}^{i-1} d(q^{i'} - q^w)}, \text{ όταν } t = t_0 + s\Delta t$$

Η τιμή $[0,1 \cdot f(q^{i'})]$ ορίζεται ώστε ο συμψηφισμός με την $h(q^{i'}, q^w)$ να γίνει στο 1^ο δεκαδικό ψηφίο και να εντοπισθεί με αυτό το κριτήριο η επόμενη βέλτιστη θέση του μικροαντικειμένου. Τα αποτελέσματα για την περίπτωση του παραδείγματος της εικόνας E.4.18 με τη χρήση της συνάρτησης κόστους της (4.24) παρουσιάζονται στον πίνακα Π.4.9

Π. 4.8 Τιμές συνάρτησης κόστους για οριζόντια/κάθετη/διαγώνια κίνηση

A^3 προσωρινή	Πιθανές Θέσεις	$(q^{i,start} - q^{i'})$	$q^{i,goal} - q^{i'}$	$f(q^{i'})$	$h(q^{i'}, q^w)$
(2,1)	(1,1)	2,2361	4,4721	6,7082	0,17
	(2,2)	1	3,163	4,163	0,27
	(2,1)	0	3,6056	3,6056	0,17
	(3,1)	1,4142	2,8284	4,2426	0,17
	(1,2)	1	4,1234	5,1234	0,17
	(3,2)	1	2,2361	3,2361	0,5
(3,1)	(3,2)	1	2,2361	3,2361	0,2
	(4,1)	2,2361	2,2361	4,4722	0,33
	(3,1)	1,4142	2,8284	4,2426	0,17
	(2, 1)	0	3,6056	3,6056	0,17
	(2,3)	1	3	4	0,5
	(4,2)	2	1,4142	3,4142	0,17
(4,2)	(3,1)	1.4142	2.8284	4,2426	0,17
	(3,2)	1	2,2361	3,2361	0,25
	(4,1)	2,2361	2,2361	4,4722	0,17
	(5,1)	3.1623	2	5,1623	0,1
	(4,2)	2	1.4142	3,4142	0,17
	(4,3)	2.2361	1	3,2361	0,33
	(5,3)	3.1623	0	3,1623	0,17
	(5,2)	3	1	4	0,125

Π. 4.9 Τιμές συνάρτησης κόστους για οριζόντια/κάθετη/διαγώνια κίνηση λαμβάνοντας υπόψη τα βάρη

A^3 προσωρινή	Πιθανές Θέσεις	$[0, 1 \cdot f(q^i)]$	$h(q^i, q^{w=1:i-1})$	$g(q^i, q^{w=1:i-1})$
(2,1)	(1,1)	0,7	0,17	0,87
	(2,2)	0,4	0,27	0,67
	(2,1)	0,5	0,17	0,67
	(3,1)	0,4	0,17	0,57
	(1,2)	0,5	0,17	0,67
	(3,2)	0,3	0,5	0,8
(3,1)	(3,2)	0,3	0,2	0,5
	(4,1)	0,4	0,33	0,73
	(3,1)	0,4	0,17	0,57
	(2, 1)	0,4	0,17	0,57
	(2,3)	0,4	0,5	0,9
	(4,2)	0,3	0,17	0,47
(4,2)	(3,1)	0,4	0,17	0,57
	(3,2)	0,3	0,25	0,85
	(4,1)	0,5	0,17	0,67
	(5,1)	0,5	0,1	0,6
	(4,2)	0,3	0,17	0,47
	(4,3)	0,3	0,33	0,66
	(5,3)	0,3	0,17	0,47
	(5,2)	0,4	0,125	0,525

Οι ελάχιστες τιμές ανά κόμβο για το μικροαντικείμενο έχουν σημειωθεί με έντονο μαύρο κι όπως φαίνεται με αυτή την αλλαγή στα βάρη έγινε υπολογίσιμη η συνεισφορά της $h(q^i, q^{w=1:i-1})$ στους υπολογισμούς της (4.24) συνάρτησης κόστους.

4.5.5.Ο προσαρμοσμένος A* αλγόριθμος - μCA *

Ο παράλληλος χειρισμός πολλαπλών μικροαντικειμένων συνεισφέρει στο διαχωρισμό και τη συναρμολόγηση των Μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS). Όπως έχει σημειωθεί αρκετές φορές στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής ειδικά κατά την εφαρμογή της συναρμολόγησης δίνεται προτεραιότητα στη σειρά με την οποία τοποθετούνται τα μικροαντικείμενα. Ο συνεργατικός A* αλγόριθμος (Cooperative A* - CA*) για τους υπολογισμούς μονοπατιών στην Έξυπνη Πλατφόρμα με το όνομα μCA* περιγράφεται σε αυτή την ενότητα. Ο αλγόριθμος αποτελεί μια διαφορετική εκδοχή του CA* με βάση τις προδιαγραφές για την κίνηση των μικροαντικειμένων στην ΕΠ. Αναλόγως τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων στο μικροαντικείμενο ορίζονται οι βηματικές δράσεις που μπορεί να εφαρμοσθούν σε αυτό ώστε να μετατοπισθεί μεταξύ δύο θέσεων ισορροπίας καθώς κι ο ελεύθερος Χώρος Καταστάσεων στο οποίο πρέπει να κινείται. Εφόσον το μικροαντικείμενο κινείται εντός του ελεύθερου χώρου καταστάσεων υπολογίζεται η συνάρτηση κόστους χρησιμοποιώντας την (4.23) και (4.24) για Μανχάταν κι Ευκλείδεια κίνηση αντίστοιχα.

Ο ψευδοκώδικας του μCA* αλγόριθμου παρουσιάζεται στον Αλγόριθμο 4.Ι. Η είσοδος του αλγόριθμου είναι ο γράφος, ο συνολικός αριθμός των μικροαντικειμένων k , η προτεραιότητα τους καθώς και η αρχική και η επιθυμητή τελική τους θέση στην πλατφόρμα. Όπως και στο συμβατικό A* αλγόριθμο ορίζονται η «Ανοιχτή» και η «Κλειστή» λίστα με βάση τις οποίες γίνεται η διερεύνηση για το μονοπάτι με τις ελάχιστες διακριτές κινήσεις για κάθε μικροαντικείμενο. Όπως ορίστηκε σε προηγούμενη παράγραφο ο χρόνος T (4.17) είναι διακριτός με πεπερασμένα όρια, συνεπώς αρχικά ορίζεται το σύνολο των χρονικών βημάτων S καθώς και η αρχική χρονική στιγμή t_0 . Ο αλγόριθμος ψάχνει για λύσεις στο σύνολο T και υπολογίζει αναλόγως τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων των μικροαντικειμένων τα σύνολα $Q^{i'}$ και $\forall q_{t_0+s\Delta t}^i \in Q^{i'}$ ελέγχεται εάν $q^{i'} \in G$ την χρονική στιγμή $t_0 + s\Delta t$ και $q_{t_0+s\Delta t}^i \notin \text{«Κλειστή»}$ λίστα.

Εφόσον ικανοποιούνται και οι δύο συνθήκες ο αλγόριθμος συνεχίζει τους υπολογισμούς του καλώντας το σύνολο Path το οποίο εμπεριέχει όλα τα μονοπάτια που ήδη έχουν υπολογισθεί για τα μικροαντικείμενα με μεγαλύτερη προτεραιότητα και οι διαμορφώσεις του καθενός για το χρονικό διάστημα από $t_0 + (s - 1)\Delta t$ έως $t_0 + s\Delta t$. Στην περίπτωση που η διαμόρφωση $q_{t_0+s\Delta t}^i$ είναι εντός του ελεύθερου χώρου καταστάσεων X_{free} , υπολογίζεται η συνάρτηση κόστους $g(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$ και τα στοιχεία $[q_t^i, q_{t_0+s\Delta t}^i, f(q^{i'}, q^w, t_0 + s\Delta t)]$ εντάσσονται προσωρινά στο σύνολο λιστών “Προσωρινή” και όταν οι υπολογισμοί $\forall q_{t_0+s\Delta t}^i \in Q^{i'}$ ολοκληρωθούν το στοιχείο της λίστας “ Προσωρινή ” για την οποία η εξίσωση $f(q^{i'}, q^w, t_0 + s\Delta t)$ έχει την ελάχιστη τιμή εντάσσεται στην «Ανοιχτή» λίστα. Στο τέλος αυτών των υπολογισμών η λίστα $[q_t^i, q_{t_0+s\Delta t}^i, f(q^{i'}, q^w, t_0 + s\Delta t)]$ τοποθετείται στην «Κλειστή» λίστα ώστε να μην κληθεί ξανά.

Αλγόριθμος 4.I.

Κάλεσε το “γράφο” and **Όρισε** k {συνολικός αριθμός μικροαντικειμένων}

$t_0 = \Delta t$;

Όρισε το S

$i = 1$;

Όσο $i \leq k$

$w_1 = i - 1$;

Αν $w_1 \neq 0$

Για $w = 1:w_1$

$Path = \mathbf{Κάλεσε}[P_1, P_2, \dots, P_w]$ {τα μονοπάτια των μικροαντικειμένων με μεγαλύτερη προτεραιότητα}

Τέλος Για

Τέλος Αν

q^i : Αρχική θέση του m_i ;, $q^{i,goal}$: Στόχος του m_i ;

ΑΝΟΙΧΤΗ = $[\emptyset]$; , ΚΛΕΙΣΤΗ = $[\emptyset]$;

Για $s = 1:S$

$Q^{i'} \leftarrow \{(q^{i'} = f(q^i) = q^i + v, v \in U), t_0 + s\Delta t\}$

Για $q_{t_0+s\Delta t}^i \in Q^{i'}$

Αν $q^{i'} \in \text{graph}$ and $\notin \text{CLOSE}$

Αν $w_1 = 0$

Υπολόγισε: $f(q^{i'})$

Αλλιώς Αν $w_1 \neq 0$

Για $w = 1:w_1$

Βρες $q_{t_0+(s-1)\Delta t}^w$ και $q_{t_0+s\Delta t}^w \in Path$

Εάν $q_{t_0+(s-1)\Delta t}^i, q_{t_0+(s-1)\Delta t}^w, q_{t_0+s\Delta t}^i, q_{t_0+s\Delta t}^w \in X^{free}$

Υπολόγισε: $g(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$

Αλλιώς

Συνέχισε {Προσπέρασε το $q_{t_0+s\Delta t}^i$ }

Τέλος Εάν

Τέλος Για

Τέλος Αν

Αν $[q_{t_0+(s-1)\Delta t}^i, q_{t_0+s\Delta t}^i, g(q^{i'}, q^{w=1:i-1})] \in \text{ANOIXTH}$

Συνέχισε {Προσπέρασε το $q_{t_0+s\Delta t}^i$ }

Τέλος Αν

Προσωρινή Λίστα $\leftarrow [q_{t_0+(s-1)\Delta t}^i, q_{t_0+s\Delta t}^i, g(q^{i'}, q^{w=1:i-1})];$

Τέλος Αν

Τέλος Για

Αν Προσωρινή Λίστα = $[\emptyset]$

Τύπωσε “ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΚΑΝΕΝΑ ΜΟΝΟΠΑΤΙ”

Διαφορετικά

Για μέλος $\in$ Προσωρινή Λίστα

Βρες “μέλος” όπου $g(q^{i'}, q^{w=1:i-1})$ έχει την ελάχιστη τιμή

ANOIXTH $\leftarrow$ “μέλος”

Τέλος Για

Τέλος Αν

ΚΛΕΙΣΤΗ $\leftarrow$ “μέλος”,

$q^i \leftarrow q^{i'}$ ($q^{i'} \in$ “μέλος”)

Τέλος Για

$P_i = [q_{t_0}^i, \{2^{\text{η}} \text{στήλη της ANOIXTHΣ λίστας}\}]$,

$i++;$

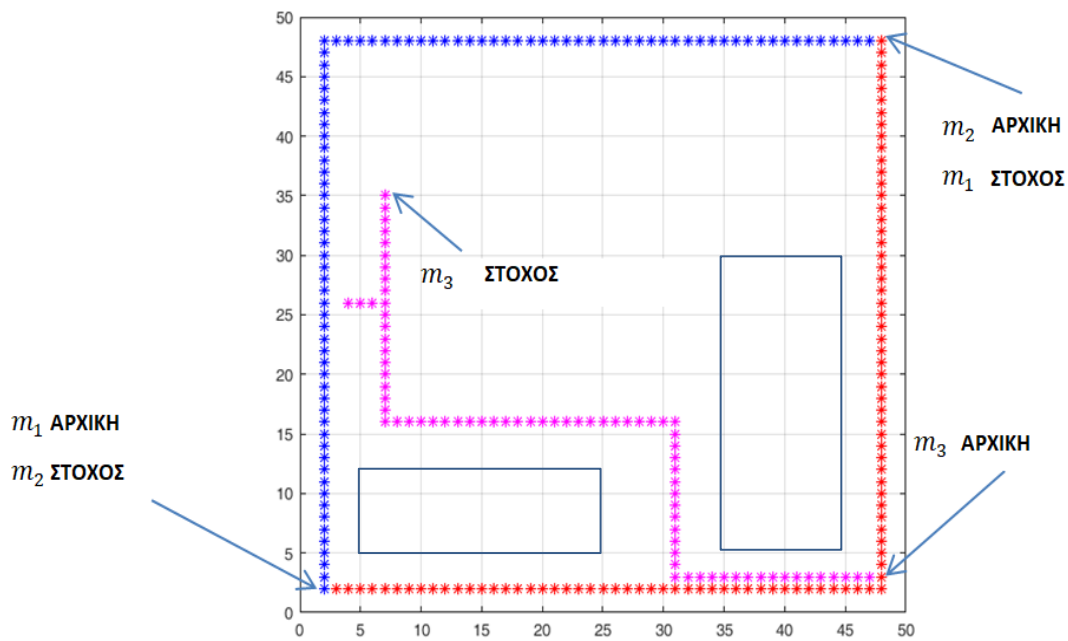
Τέλος όσο

Εφαρμογή του μCA^ αλγόριθμου – Σύγκριση με τη συνάρτηση κόστους του Συμβατικού A^**

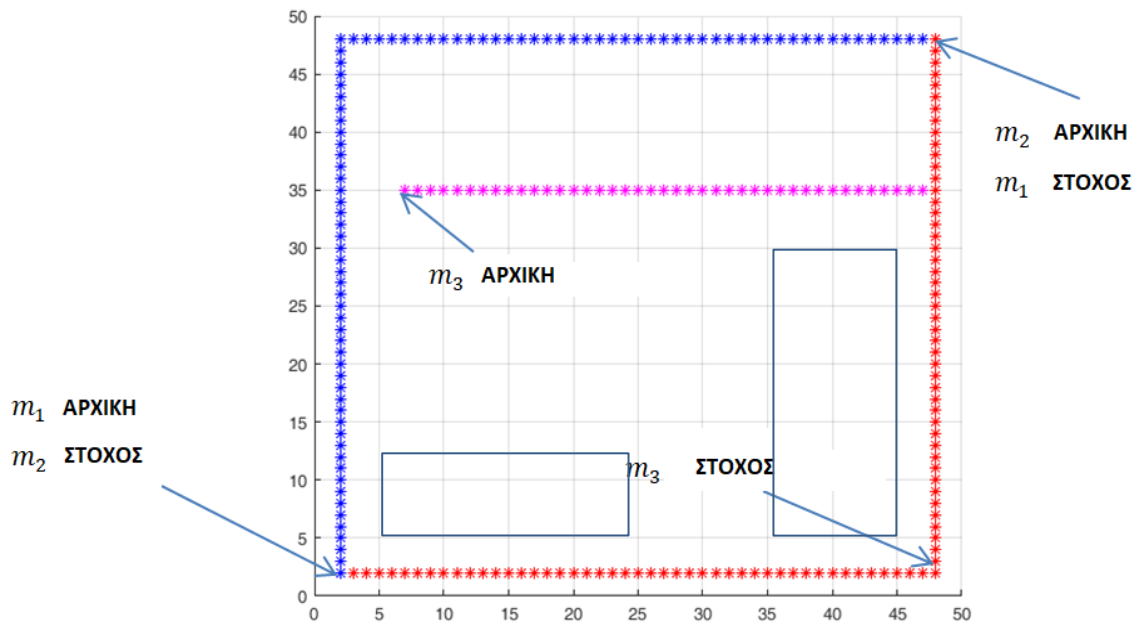
Οι υπολογισμοί του μCA^* αλγόριθμου διερευνώνται σε αυτή την ενότητα και η συνεισφορά της νέας ευρεστικής συνάρτησης συγκρίνεται με τη συμβατική συνάρτηση του A^* αλγορίθμου. Αρχικά διερευνάται η παράλληλη κίνηση τριών μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης σε μια ΕΠ με δύο στατικά εμπόδια. Η πλατφόρμα διαθέτει ένα πλέγμα 50×50 ηλεκτροδίων ο χρόνος δίνεται ισούται με $T = [t_0, t_0 + S\Delta t]$ και για να περιορισθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος ορίζεται ότι $s = 1$. Επίσης, θεωρείται ότι $S = 100 = 2 \times 50$, έτσι ώστε $T = [1, 101]$. Ο πρώτος στόχος είναι να αποδειχθεί η ικανότητα του μCA^* να υπολογίζει ασφαλή μονοπάτια στο χωρόχρονο και η συνεισφορά της Εξίσωσης (4.23) ώστε να βελτιωθεί η διαδικασία σε σύγκριση με την (4.21). Στον πίνακα Π.4.8 παρουσιάζονται οι αρχικές και τελικές θέσεις των τριών μικροαντικειμένων και τα αποτελέσματα για τις αντίστοιχες συναρτήσεις κόστους παρουσιάζονται στις εικόνες Ε.4.

Π.4.8 Είσοδος του μCA^* για την παράλληλη κίνηση τριών μικροαντικειμένων σταυρωτής τοποθέτησης

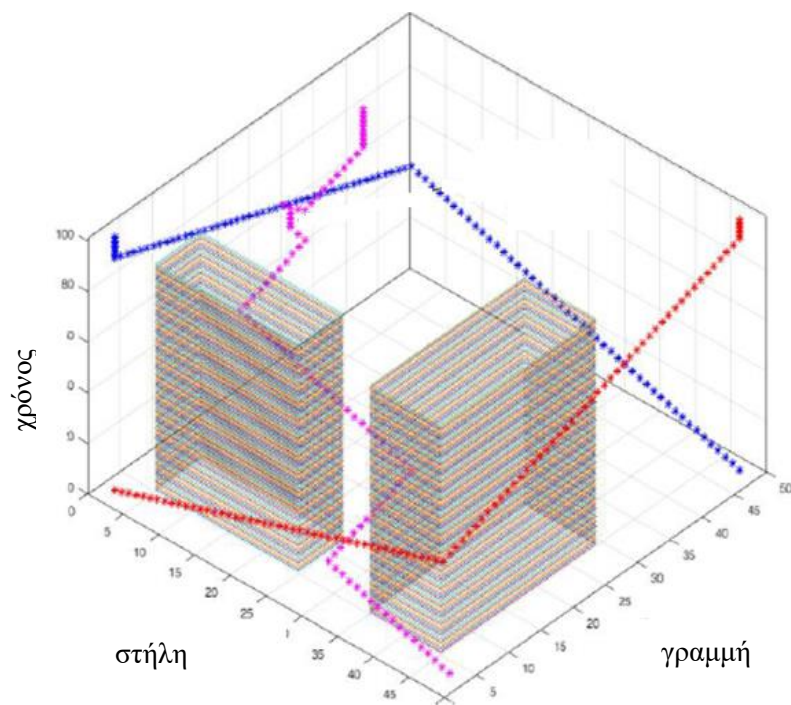
Μικροαντικείμενα - Σύμβολο	Αρχική Διαμόρφωση ($q_1^i \forall i \in [1, 3], i \in \mathbb{N}$)	Στόχος $q^i \forall i \in [1, 3], i \in \mathbb{N}$
m_1 (κόκκινο * Εικόνα Ε4.20 έως Ε4.23)	$q_1^1 = (2, 2, 1)$	$q_{101}^1 = (48, 48, 101)$
m_2 (μπλε * Εικόνα Ε4.20 έως Ε4.23)	$q_1^2 = (48, 48, 1)$	$q_{101}^2 = 2(2, 2, 101)$
m_3 (ροζ * Εικόνα Ε4.20 έως Ε4.23)	$q_1^3 = (48, 3, 1)$	$q_{101}^3 = (7, 35, 101)$



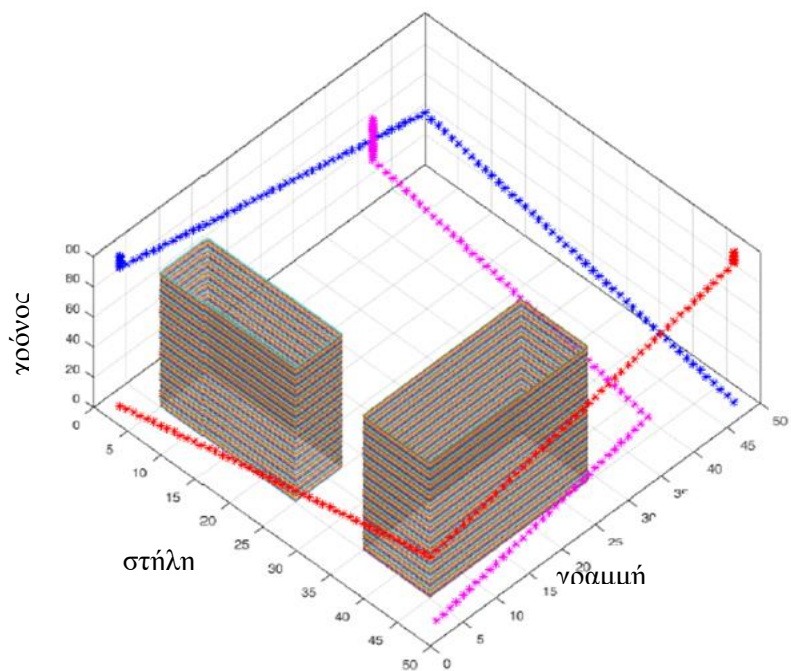
E.4.20: Μονοπάτια για την παράλληλη κίνηση τριών μικροαντικειμένων υπολογισμένα με τον μCA^* με τη συνάρτηση κόστους (4.21) – 2D



E.4.21: Μονοπάτια για την παράλληλη κίνηση τριών μικροαντικειμένων υπολογισμένα με τον μCA^* με τη συνάρτηση κόστους (4.23)- 2D



E.4.22 : Παράλληλη κίνηση τριών μικροαντικειμένων υπολογισμένα με τον μCA^ με τη συνάρτηση κόστους (4.21) – Τρισδιάστατη αναπαράσταση της E.2.20*



E.4.23: Παράλληλη κίνηση τριών μικροαντικειμένων υπολογισμένα με τον μCA^ με τη συνάρτηση κόστους (4.23) – Τρισδιάστατη αναπαράσταση της E.2.21*

Οι γραφικές στις Εικόνες E.4.20 – E.4.23 αποδεικνύουν την επιτυχή εύρεση μονοπατιών με τον μCA^* και για τα τρία μικροαντικείμενα στο χωροχρόνο με τη χρήση και των δύο ευρεστικών αποφεύγοντας τις συγκρούσεις

μεταξύ στατικών και κινούμενων εμποδίων. Η συνεισφορά της ευρεστικής συνάρτησης είναι σημαντική από τη στιγμή που αρχίζει ο υπολογισμός του μονοπατιού για το 3^ο μικροαντικείμενο. Όπως φαίνεται και στους υπολογισμούς που περιέχονται στον πίνακα Π.4.9 στην περίπτωση της Εξίσωσης (4.21) το μικροαντικείμενο φτάνει στο στόχο του έπειτα από 86 βήματα. Από την άλλη, με τη χρήση της ευρεστικής της Εξίσωσης (4.20) το μικροαντικείμενο φτάνει στο στόχο έπειτα από 74 βήματα μειώνοντας τον αριθμό των βημάτων του m_3 κατά 12.

Π. 4.9: Αποτολέσματα για την κίνηση του m_3 μικροαντικειμένου

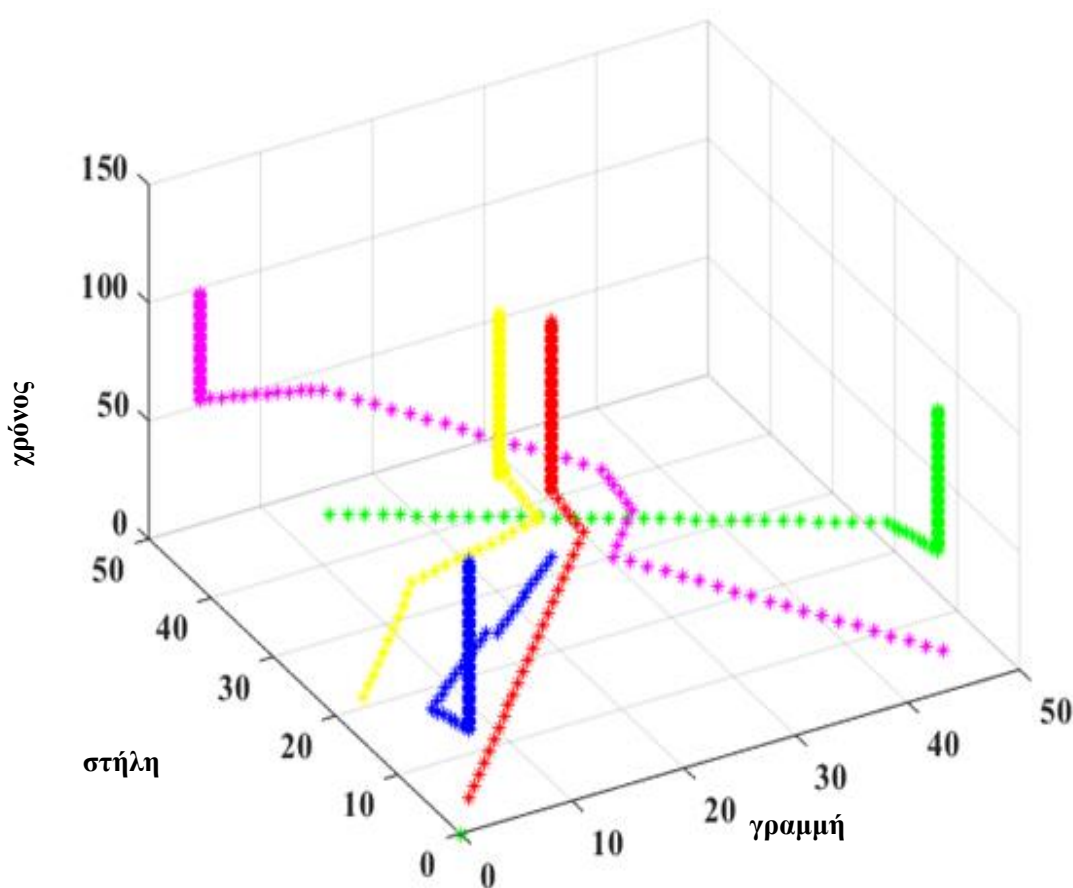
Μικροαντικείμενο	Τελική Διαμόρφωση με (4.21)	Τελική Διαμόρφωση με (4.20)	Διαφορά Χρονικών Βημάτων
m_3	$q_{86}^3 = (7,35,86)$	$q_{74}^3 = (7,35,74)$	$86 - 74 = 12$

Στο επόμενο παράδειγμα διερευνώνται τα μονοπάτια για την παράλληλη κίνηση πέντε μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων στην ΕΠ των 50x50 ηλεκτροδίων. Στον πίνακα Π.4.10 εμπεριέχονται η αρχική και τελική θέση των μικροαντικειμένων στην ΕΠ. Αντίστοιχα και σε αυτό το παράδειγμα ορίζεται ότι $S = 100$.

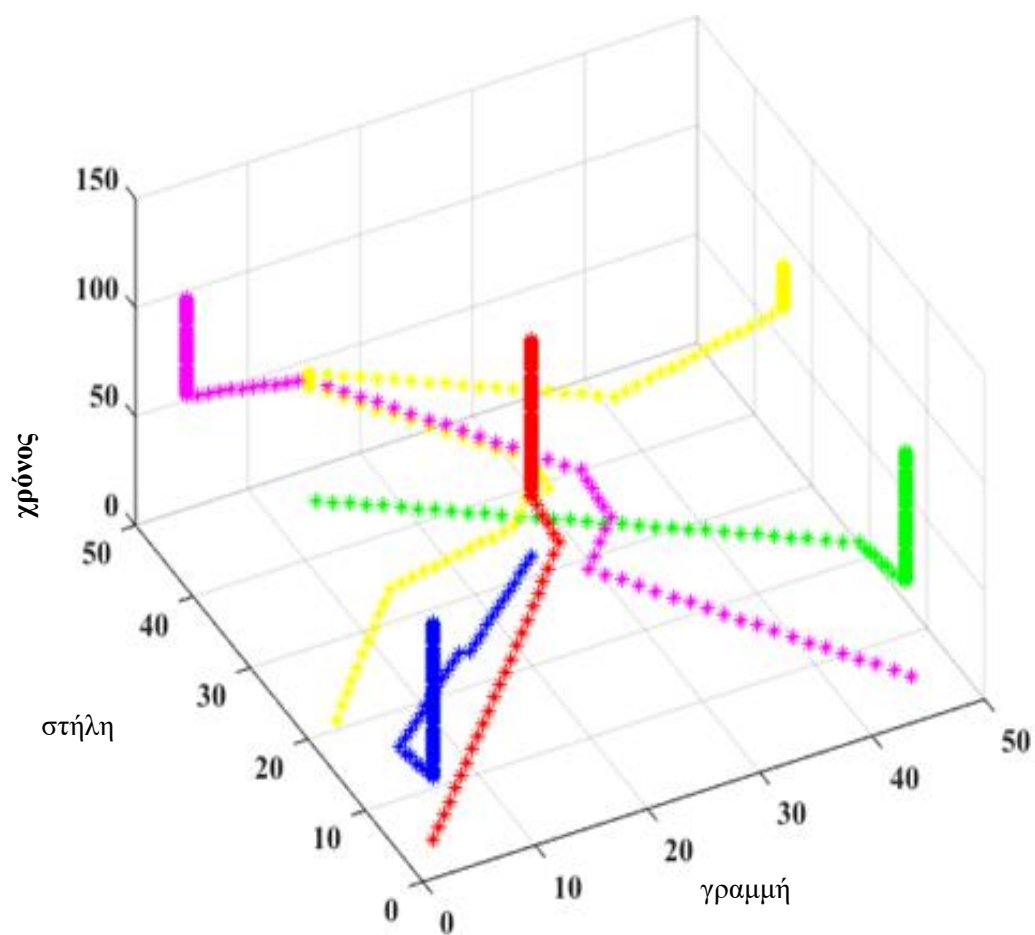
Π.4.10: Είσοδος του μCA^* για την παράλληλη κίνηση πέντε μικροαντικειμένων τετραγωνικής τοποθέτησης

Μικροαντικείμενο	Αρχική Διαμόρφωση	Τελική Διαμόρφωση
m_1 (κόκκινο*)	(5,3,1)	(26,31,101)
m_2 (μπλε*)	(26,31,1)	(5,3,101)
m_3 (ροζ*)	(46,4,1)	(4,48,101)
m_4 (πράσινο*)	(14,45,1)	(46,4,101)
m_5 (κίτρινο*)	(3,20,1)	(48,30,101)

Τα αποτελέσματα της κίνησης των πέντε μικροαντικειμένων παρουσιάζονται στις εικόνες E.4.24 και E.4.25 όπου επιβεβαιώνεται η ικανότητα του μCA^* αλγόριθμου να υπολογίζει ασφαλή μονοπάτια για την παράλληλη κίνηση των μικροαντικειμένων στο χωρόχρονο αποφεύγοντας τις συγκρούσεις μεταξύ τους. Η συνεισφορά της νέας συνάρτησης κόστους (4.24) έναντι τις (4.21) γίνεται αντιληπτή με το μονοπάτι για την κίνηση του 5^{ου} μικροαντικειμένου (κίτρινα μονοπάτια). Συγκεκριμένα, οι εικόνες E.4.23 και E.4.24 αποδεικνύουν ότι το μικροαντικείμενο m_5 παγιδεύτηκε στην ΕΠ στη θέση (45,28) και δεν κατάφερε να φτάσει στη θέση στόχο (48,30,101). Αντίστοιχα, στα αποτελέσματα του αλγορίθμου που παρουσιάζονται στην εικόνα E.4.25 επιβεβαιώνεται η συνεισφορά της συνάρτησης κόστους (4.24) ώστε το μικροαντικείμενο να φτάσει στη θέση στόχο.



E.4.24 Παράλληλη κίνηση 5 μικροαντικειμένων – Υπολογισμός των μονοπατιών με τον μCA^* και την (4.21) συνάρτηση κόστους



Ε.4.25 Παράλληλη κίνηση 5 μικροαντικειμένων – Υπολογισμός των μονοπατιών με τον μCA^ και την (4.24) συνάρτηση κόστους*

4.6 Σύνοψη – Συμβολή

Στα πλαίσια του 4^{ου} Κεφαλαίου περιεγράφηκαν και εφαρμόστηκαν μέθοδοι για τον παράλληλο χειρισμό πολλαπλών μικροαντικειμένων στην ΕΠ. Συγκεκριμένα:

- Προτάθηκε μια αυτοματοποιημένη μέθοδος για το παράλληλο κεντράρισμα και ευθυγράμμιση πολλαπλών τετραγωνικών και εξαγωνικών μικροαντικειμένων στην πλατφόρμα στα πλαίσια της οποίας:

- Αναπτύχθηκαν κανόνες γειτνίασης μεταξύ των μικροαντικειμένων
- Αναπτύχθηκαν κανόνες κίνησης για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ παράλληλα κινούμενων γειτόνων για τις εφαρμογές του ταυτόχρονου κεντραρίσματος και ευθυγράμμισης
- Προτάθηκε μια νέα μέθοδος η οποία λαμβάνοντας υπόψη τους κανόνες γειτνίασης και παράλληλης κίνησης, εντοπίζει ποια μικροαντικείμενα μπορούν να κεντραρισθούν ταυτόχρονα με ασφάλεια.

✓ Οι υπολογισμοί της μεθόδου και η εφαρμογή της σε πρόβλημα ταυτόχρονου κεντραρίσματος/ευθυγράμμισης στην πλατφόρμα έδειξαν ότι η μέθοδος βοηθάει στον απεγκλωβισμό μικροαντικειμένων από γειτονικά, τα οποία είναι αδύνατο να κινηθούν χωρίς να συγκρουστούν μετά την πρώτη τοποθέτηση τους στην πλατφόρμα.

- Για την παράλληλη κίνηση πολλαπλών κεντραρισμένων κι ευθυγραμμισμένων μικροαντικειμένων στο χωρόχρονο αναπτύχθηκε ένας τροποποιημένος συνεργατικός A* αλγόριθμος (μCA^*) λαμβάνοντας υπόψη την προτεραιότητα τους και την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ στατικών και κινούμενων εμποδίων. Στα πλαίσια αυτής της διερεύνησης:

- Υπολογίσθηκε ο χώρος διαμορφώσεων των στατικών εμποδίων για την περίπτωση κυρτών και μη κυρτών πολυγώνων

- Υπολογίσθηκε ο χώρος διαμορφώσεων κι ο χώρος καταστάσεων των μικροαντικειμένων στην επιφάνεια της πλατφόρμας λαμβάνοντας υπόψη τα στατικά και τα κινούμενα εμπόδια

- Προσδιορίσθηκε οι γράφοι πάνω στους οποίους γίνεται η διερεύνηση των μονοπατιών του κάθε μικροαντικειμένου

✓ Σημαντική συμβολή αποτελεί η νέα συνάρτηση κόστους η οποία προτάθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο για τους υπολογισμούς και την αξιολόγηση των μονοπατιών των μικροαντικειμένων στο χωροχρόνο. Η καινοτομία της συνάρτησης κόστους αφορά κυρίως το κομμάτι της ευρεστικής, όπου για πρώτη φορά συνεκτιμάται η απόσταση του μικροαντικειμένου από τα υπόλοιπα με μεγαλύτερη προτεραιότητα κατά την παράλληλη κίνηση στην πλατφόρμα.

- Ο μCA^* κλήθηκε να υπολογίσει ελεύθερα μονοπάτια κίνησης για την παράλληλη κίνηση μικροαντικειμένων τετραγωνικής και σταυρωτής διάταξης. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν η νέα

συνάρτηση κόστους καθώς και η συμβατική συνάρτηση κόστους του A^* και συγκρίθηκαν. Οι υπολογισμοί του αλγόριθμου για τις δύο περιπτώσεις έδειξαν ότι η νέα συνάρτηση κόστους μπορεί να συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των κινήσεων που υλοποιεί ένα μικροαντικείμενο πάνω στην πλατφόρμα.

Συνοψίζοντας, η εφαρμογή της μεθόδου παράλληλου κεντραρίσματος και ευθυγράμμισης ενισχύει την ευελιξία και την αυτονομία που έχει η πλατφόρμα στο χειρισμό πολλαπλών μικροαντικειμένων τυχαίας αρχικής διαμόρφωσης. Η μέθοδος για τον ορισμό μονοπατιών για την ταυτόχρονη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων στην πλατφόρμα αποδεικνύει ότι, τεχνικές που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό κίνησης των ρομπότ μπορούν να εφαρμοσθούν στο παρόν σύστημα εφόσον ληφθεί υπόψη ο τρόπος κίνησης των μικροαντικειμένων στην πλατφόρμα. Μια σημαντική καινοτομία που παρουσιάστηκε στο 4^ο Κεφάλαιο αποτελεί η νέα συνάρτηση κόστους για τους υπολογισμούς του μCA^* αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου επιβεβαιώνουν τη συνεισφορά της συνάρτησης στον ορισμό μονοπατιών κίνησης βελτιστοποιώντας το χρόνο κίνησης των μικροαντικειμένων σε σύγκριση με τους υπολογισμούς με τη συμβατική συνάρτηση κόστους του A^* αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 5^ο Μέθοδοι Παράλληλου Διαχωρισμού και Συναρμολόγησης Τετραγωνικών και Εξαγωνικών Μικροαντικειμένων

5.1 Σκοπός – Περίληψη

Στο 3^ο και 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν μέθοδοι και αλγόριθμοι για το παράλληλο κεντράρισμα και ευθυγράμμιση πολλαπλών μικροαντικειμένων καθώς επίσης και για τον υπολογισμό μονοπατιών για την ταυτόχρονη κίνηση τους στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» (ΕΠ). Η έρευνα των προηγούμενων Κεφαλαίων υλοποιήθηκε ώστε να εφαρμοσθεί στο διαχωρισμό και τη μικροσυναρμολόγηση των μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» αγωγίμων επενεργητών. Όπως συζητήθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια ο στόχος είναι να αυτοματοποιηθούν όλες οι διεργασίες στην ΕΠ και να προταθούν μέθοδοι με τις οποίες η ΕΠ θα εξελιχθεί σε ένα αυτόνομο σύστημα.

Στη Βιομηχανία ο διαχωρισμός είναι μια διαδικασία κατά την οποία τα υλικά κατηγοριοποιούνται με βάση τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά και συγκεντρώνονται ανά περιοχές στο χώρο εργασίας [64]. Μια αντίστοιχη μέθοδος προτείνεται στα πλαίσια του 5^{ου} Κεφαλαίου, προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά της ΕΠ. Σκοπός της μεθόδου διαχωρισμού είναι να αναδείξει το χαρακτηριστικό το οποίο λαμβάνεται υπόψη ώστε να κατηγοριοποιηθούν τα μικροαντικείμενα, τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέγεται η περιοχή στην οποία θα συγκεντρωθούν, ο αριθμός των μικροαντικειμένων που μπορούν να διαχωρισθούν ταυτόχρονα και ο ορισμός της τελικής τους θέσης στην περιοχή συγκέντρωσης. Η συναρμολόγηση έπεται του διαχωρισμού, συνεπώς τα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέγεται ο αριθμός και το είδος των μικροαντικειμένων που διαχωρίζονται συνδέεται άμεσα με το πόσα και ποια μικροαντικείμενα επιθυμείτε και μπορούν να συναρμολογηθούν.

Ο σκοπός του 5^{ου} Κεφαλαίου στο πεδίο της μικροσυναρμολόγησης είναι η διατύπωση μεθόδων και κανόνων ώστε τα μικροαντικείμενα να συνθέσουν αναμεταξύ τους ομάδες και συνθέσεις με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό κινήσεων και κατ' επέκταση με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό ενεργοποιήσεων των ηλεκτροδίων της ΕΠ. Στις παραγράφους που ακολουθούν ορίζονται κανόνες συναρμολόγησης με βάση τη γεωμετρία των μικροαντικειμένων και τους τρόπους ενεργοποίησης των ηλεκτροδίων για την παράλληλη κίνηση τους.

5.2. Μέθοδος για τον παράλληλο διαχωρισμό των μικροαντικειμένων.

Ο διαχωρισμός αποτελεί μια διαδικασία κατά την οποία τα μικροαντικείμενα κατηγοριοποιούνται ανά συστάδες με βάση τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Εν προκειμένω επιλέγεται η κατηγοριοποίηση τους με βάση τη γεωμετρία τους. Όπως έχει σημειωθεί επανειλημμένως στα προηγούμενα κεφάλαια τα μικροαντικείμενα κινούνται εξαιτίας των ενεργοποιήσεων της ΕΠ. Αυτή η ιδιότητα είναι μια σημαντική παράμετρος για την επιλογή της τελικής τους θέσης στην περιοχή όπου θα συγκεντρωθούν έπειτα από το διαχωρισμό τους.

Η μέθοδος του διαχωρισμού υλοποιείται ορίζοντας ανά βήμα τις ακόλουθες παραμέτρους :

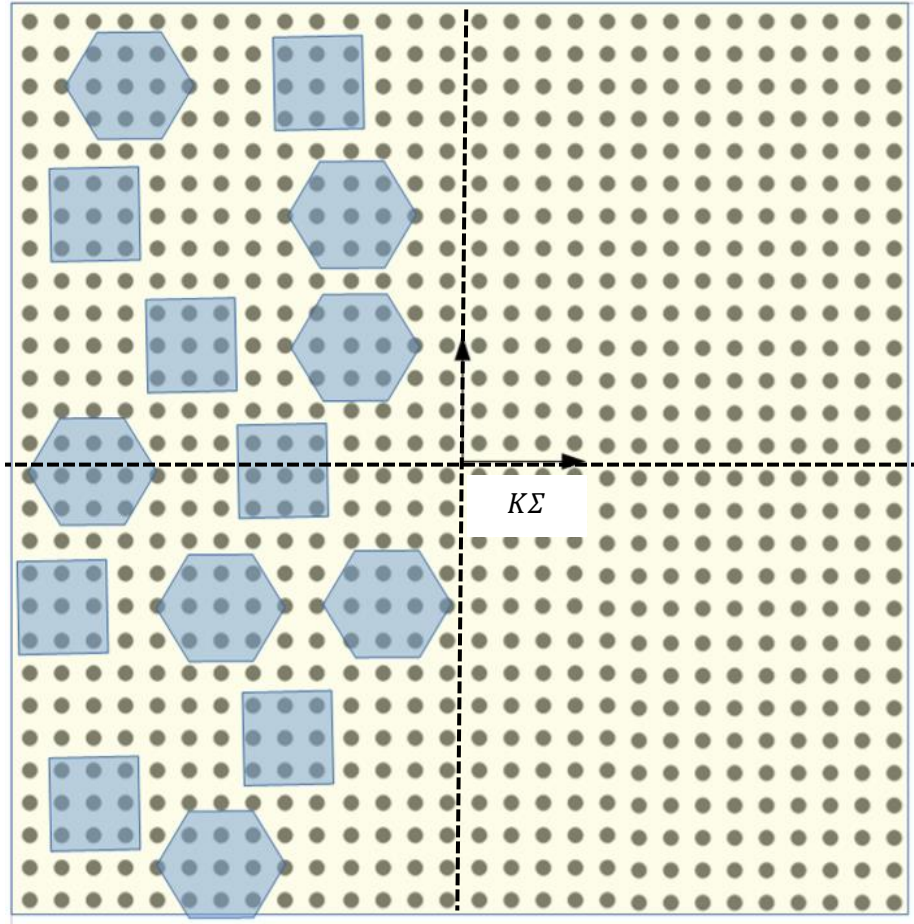
1. Πληθυσμός μικροαντικειμένων που μεταφέρονται στην ΕΠ για την εφαρμογή του διαχωρισμού
2. Περιοχή αρχικής τοποθέτησης των μικροαντικειμένων
3. Περιοχή συγκέντρωσης των μικροαντικειμένων με βάση τη γεωμετρία τους
4. Θέση μετά το διαχωρισμό
5. Ορισμός προτεραιότητας κατά το διαχωρισμό
6. Μονοπάτι για την παράλληλη κίνηση/διαχωρισμό

Τα μικροαντικείμενα (είτε αποκλειστικά τετραγωνικής είτε αποκλειστικά σταυρωτής διάταξης) μεταφέρονται στην ΕΠ με γραμμές μεταφοράς και όπως ορίστηκε στο 4^ο Κεφάλαιο τοποθετούνται ώστε η απόσταση μεταξύ των Κέντρων Μάζας τους (ΚΜ) να έρχεται σε συμφωνία με την (4.1). Για την αυτοματοποίηση της εφαρμογής του διαχωρισμού ορίζονται επίσης περιοχές στις οποίες επιτρέπεται να τοποθετηθούν αρχικά τα μικροαντικείμενα ώστε οι υπόλοιποι ελεύθεροι χώροι της ΕΠ να αξιοποιούνται για τη συγκέντρωση των μικροαντικειμένων. Η διαδικασία της μεταφοράς των μικροαντικειμένων ελέγχεται με σύστημα αισθητήρων όρασης της ΕΠ. Όπως φαίνεται στην εικόνα Ε.5.1 το Σύστημα Αναφοράς της ΕΠ συμπίπτει με το Κέντρο Συμμετρίας της (ΚΣ) με βάση το οποίο ορίζονται τέσσερα τεταρτημόρια. Ο 1^{ος} Κανόνας που λαμβάνεται υπόψη κατά τη μεταφορά των μικροαντικειμένων είναι:

Κανόνας Διαχωρισμού

Στην ΕΠ ορίζονται περιοχές συγκέντρωσης των μικροαντικειμένων οι οποίες εκτείνονται σε δύο τουλάχιστον τεταρτημόρια. Εν συνεχεία ορίζεται ο αριθμός των μικροαντικειμένων που μπορούν να τοποθετηθούν στις περιοχές. Κατά τη μεταφορά τους στην ΕΠ τα μικροαντικείμενα επιτρέπεται να εκτείνονται το πολύ σε δύο από τα τεταρτημόρια και ο αριθμός τους είναι σχεδόν ίσος (± 1) με το συνολικό αριθμό των μικροαντικειμένων που μπορούν να τοποθετηθούν στις περιοχές συγκέντρωσης.

Όπως συζητήθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο τα μικροαντικείμενα τοποθετούνται σε τυχαίες διαμορφώσεις στην ΕΠ. Σε αυτό το σημείο θεωρείται δεδομένη η διαδικασία για το παράλληλο κεντράρισμα/ευθυγράμμιση των μικροαντικειμένων ώστε να λάβουν τις διαμορφώσεις της εικόνας Ε.5.1.



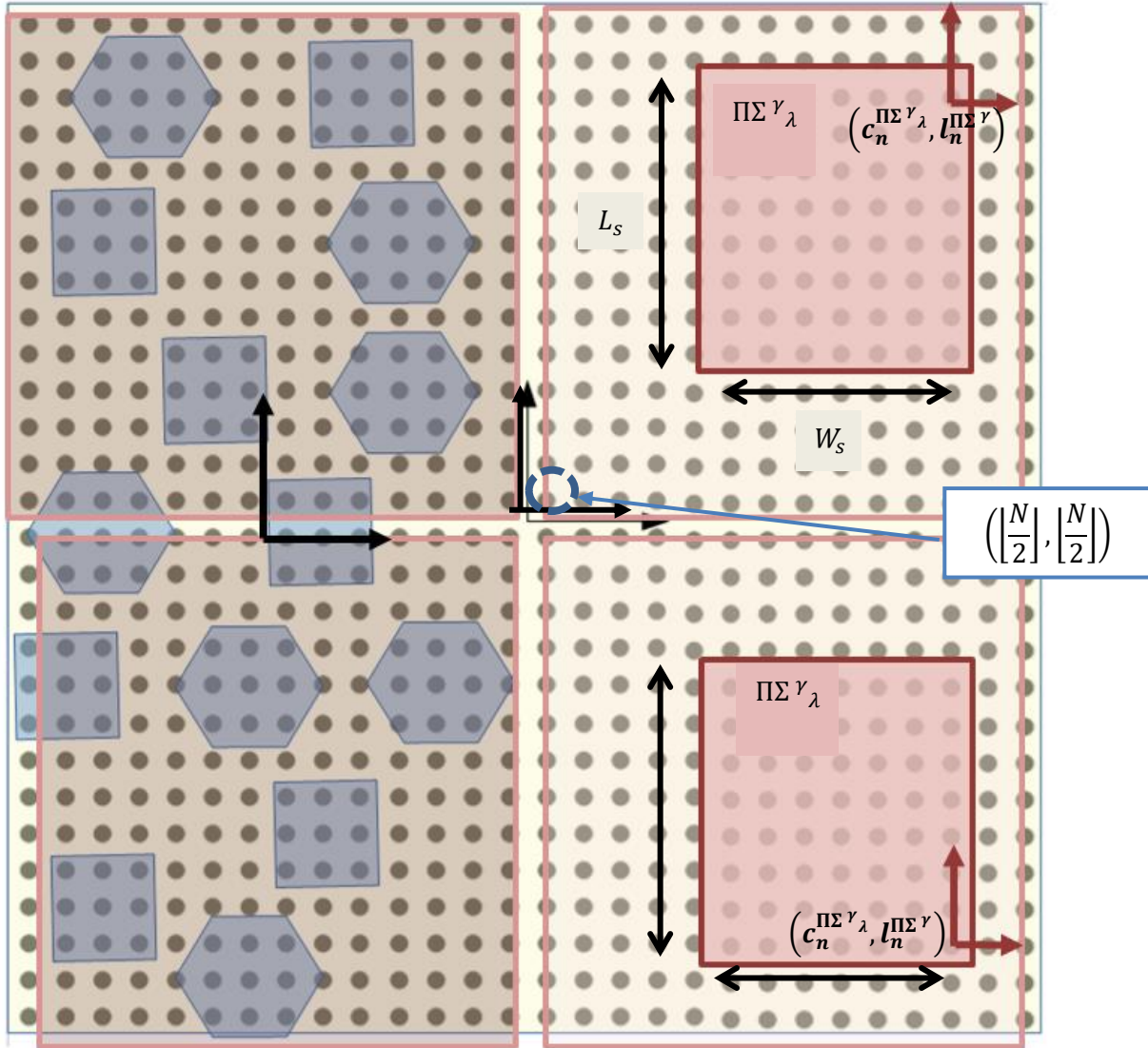
E.5.1. Περιοχή της «Έξυπνης Πλατφόρμας» κατά την τοποθέτηση των μικροαντικειμένων για την εφαρμογή του διαχωρισμού

Όπως σημειώθηκε στην αρχή του κεφαλαίου τα μικροαντικείμενα διαχωρίζονται με κριτήριο τη γεωμετρία τους. Ο αριθμός των μικροαντικειμένων που μεταφέρονται στην ΕΠ πρέπει να προσεγγίζει τον αριθμό των μικροαντικειμένων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για το διαχωρισμό περιορίζοντας έτσι τα μικροαντικείμενα που παραμένουν στατικά κατά τη διαδικασία. Στα τεταρτημόρια για την εφαρμογή του διαχωρισμού ορίζονται ορθογώνιες περιοχές συγκέντρωσης των μικροαντικειμένων οι $\Pi\Sigma \gamma_\lambda$ $\gamma \in [h, s]$ όπου h για την περίπτωση συγκέντρωσης μικροαντικειμένων εξαγωνικής και s τετραγωνική γεωμετρίας αντίστοιχα. Το μήκος των $\Pi\Sigma \gamma_\lambda$ $\gamma \in [h, s]$ ισούται με L_s και το πλάτος με W_s (εικόνα E.5.2.) και $\lambda \in [1, \Lambda]$ όπου Λ το σύνολο των περιοχών $\Pi\Sigma \gamma_\lambda$ στην πλατφόρμα..

Με τη βοήθεια των αισθητήρων όρασης εντοπίζονται τα μικροαντικείμενα τα οποία είναι κεντραρισμένα στα ηλεκτρόδια με συντεταγμένες $c_n^{min}, c_n^{max}, l_n^{min}, l_n^{max}$ (Εικόνα E.5.2.), όπου c_n^{min} και c_n^{max} η ελάχιστη και μέγιστη τιμή των στηλών όπου έχουν κεντραριστεί τα μικροαντικείμενα και l_n^{min}, l_n^{max} η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της

γραμμής αντίστοιχα. Με βάση τις τιμές $c_n^{min}, c_n^{max}, l_n^{min}, l_n^{max}$ ορίζεται το σημείο αναφοράς της περιοχής αρχικής τοποθέτησης των μικροαντικειμένων το οποίο ισούται με:

$$\left(\left\lfloor \frac{c_n^{max} - c_n^{min}}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{l_n^{max} - l_n^{min}}{2} \right\rfloor \right) = (c_n^s, l_n^s) \quad (5.1)$$



Ε.5.2: Ορίζοντας τις περιοχές διαχωρισμού ανά γεωμετρία

Ο στόχος είναι τα μικροαντικείμενα να διαχωρίζονται, αποσυμφορίζοντας την περιοχή αρχικής τους τοποθέτησης και διανύοντας κατά το διαχωρισμό τους την ελάχιστη δυνατή απόσταση. Ο εντοπισμός των θέσεων εντός της κάθε περιοχής συγκέντρωσης $\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}$ γίνεται συναρτήσει ενός σημείου αναφοράς του $\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}$. Για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας διαχωρισμού ως σημείο αναφοράς του $\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}$ ορίζεται το ηλεκτρόδιο με συντεταγμένες $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}})$ το οποίο απέχει τη μέγιστη απόσταση από το (c_n^S, l_n^S) (Εικόνα E.5.2).

Ο διαχωρισμός των μικροαντικειμένων υλοποιείται εντός του Ελεύθερου Χώρου Καταστάσεων (X_{free}) όπως αυτός ορίστηκε με τους κανόνες που διατυπώθηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο. Με βάση την ελάχιστη απόσταση που μπορούν να έχουν τα γειτονικά μικροαντικείμενα σταυρωτής και τετραγωνικής διάταξης ώστε να κινούνται πάντως εντός του X_{free} ορίζεται ότι για τις αποστάσεις δύο μικροαντικειμένων στο $\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}$ πρέπει να ισχύει: $|c^j - c^i| \geq 5$ ή $|l^j - l^i| \geq 5$ όπου $(c^i, l^i), (c^j, l^j)$ οι συντεταγμένες δύο γειτονικών μικροαντικειμένων m_i, m_j .

Συνεπώς, ο αριθμός των μικροαντικειμένων που μπορούν να τοποθετηθούν σε κάθε $\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}$ ισούται με:

$$Pop^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} = \frac{\max(|c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - c_n|)}{5} \times \frac{\max(|l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - l_n|)}{5} \quad \forall n \in \Pi\Sigma^{\gamma_\lambda} \quad (5.2)$$

Για τη συγκέντρωση των μικροαντικειμένων στις $\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}$ ορίζονται θέσεις ανά γραμμή και στήλη ως προς το ηλεκτρόδιο $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}})$ με συντεταγμένες που υπολογίζονται με τους κανόνες που εμπεριέχονται στον πίνακα Π.5.1. Ο εντοπισμός της στήλης και της γραμμής του ηλεκτροδίου με συντεταγμένες $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}})$ συναρτήσει της ΕΠ υλοποιείται με οδηγό το $\left(\left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \cdot N\right)^0$ ηλεκτρόδιο της ΕΠ (Εικόνα E.5.2).

Εφόσον έχουν ορισθεί οι θέσεις και το πλήθος των μικροαντικειμένων που μπορούν να τοποθετηθούν στις αντίστοιχες $\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}$ σειρά έχει η διαδικασία για την επιλογή των μικροαντικειμένων που μπορούν να μετέχουν στη διαδικασία. Όπως διατυπώθηκε και στην αρχή τα μικροαντικείμενα διαχωρίζονται με βάση τη γεωμετρία τους. Συνεπώς, επιλέγονται $Pop^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}$ μικροαντικείμενα εξαγωνικής ή τετραγωνικής γεωμετρίας τα οποία είναι πιο κοντά στο ηλεκτρόδιο με συντεταγμένες $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}})$ τα οποία ορίζουν το σύνολο των μικροαντικειμένων Σ^{γ_λ} .

Το επόμενο βήμα είναι η κατανομή κάθε μικροαντικειμένου m_i του συνόλου Σ^{γ_λ} , στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια της $\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}$ περιοχής. Για την κατανομή των μικροαντικειμένων ορίζονται οι λίστες:

Π 5.1: Κανόνες Τοποθέτησης των Μικροαντικειμένων σε κάθε $\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}$

$$\begin{array}{c} \text{Θέση του} \\ (c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}) \text{ συναρτηθεί} \\ \text{του } (c_n^s, l_n^s) \end{array} \quad \forall \lambda_1 \in \left[1, \frac{\max(|c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - c_n|)}{5}\right], \forall \lambda_2 \in \left[1, \frac{\max(|l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - l_n|)}{5}\right], \forall n \in \Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}$$

$$c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} > \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} > \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \quad (c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - \lambda_1 \cdot 5, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - \lambda_2 \cdot 5)$$

$$c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} < \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} > \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \quad (c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + \lambda_1 \cdot 5, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - \lambda_2 \cdot 5)$$

$$c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} > \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} < \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \quad (c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - \lambda_1 \cdot 5, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + \lambda_2 \cdot 5)$$

$$c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} < \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} < \left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor \quad (c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + \lambda_1 \cdot 5, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + \lambda_2 \cdot 5)$$

Όπου n το ηλεκτρόδιο όπου είναι κεντραρισμένο το m_i μικροαντικείμενο και $d((c^i, l^i), (c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}))$ η απόσταση του m_i από το ηλεκτρόδιο συντεταγμένων $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}})$ και p ένας δείκτης για την κατανομή των μικροαντικειμένων στο Σ^{γ_λ} όπου $p = 1$ το μικροαντικείμενο που βρίσκεται πιο κοντά στο $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}})$ ηλεκτρόδιο και $p = \text{Pop}^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}$ για το πιο απομακρυσμένο.

Αντίστοιχα δημιουργείται ένα σύνολο με λίστες:

$$[n, d((c_n^s, l_n^s), (c_n, l_n)), p'] \quad \forall p' \in [1, \text{Pop}^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}], \forall n \in \Pi \Sigma^{\gamma_\lambda} \quad (5.4)$$

Οι οποίες κατανέμονται έτσι ώστε $p' = 1$ να αντιστοιχεί στη λίστα με το ηλεκτρόδιο που είναι πιο απομακρυσμένο από το (c_n^s, l_n^s) και $p' = \text{Pop}^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}$ το πιο κοντινό. Οι λίστες (5.3) και (5.4) αντιστοιχίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το αντικείμενο που βρίσκεται πιο κοντά στο $\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}$ να αποστέλλεται στο πιο απομακρυσμένο του ηλεκτρόδιο σε σχέση με το σημείο αναφοράς (c_n^s, l_n^s) κ.ο.κ. Συνεπώς ένα μικροαντικείμενο αντιστοιχεί σε ένα ηλεκτρόδιο της $\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}$ εφόσον $p = p'$, συνεπώς

$$[n, m_i, p = p'] \quad p, p' \in [1, \text{Pop}^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}]. \quad (5.5)$$

Όπου αντιστοιχίζονται μεταξύ τους τα ηλεκτρόδια και τα μικροαντικείμενα για τα οποία ισχύει $p = p'$.

Στην εικόνα Ε.5.3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για τη συγκέντρωση τετραγωνικών και εξαγωνικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων σε δύο περιοχές συγκέντρωσης. Συγκεκριμένα ορίζονται δύο περιοχές οι $\Pi\Sigma^s_1$ και $\Pi\Sigma^h_2$ στις οποίες μπορούν να συγκεντρωθούν έξι τετραγωνικά και 4 εξαγωνικά μικροαντικείμενα αντίστοιχα. Όπως σημειώθηκε και στην αρχή της παραγράφου ο αριθμός των μικροαντικειμένων που μεταφέρεται στην ΕΠ είναι σχεδόν ίσος με αυτόν που πρόκειται να διαχωρισθούν ώστε να περιορίζονται τα στατικά εμπόδια.

Όπως φαίνεται στην εικόνα Ε.5.3 οι αποστάσεις εντός της $\Pi\Sigma^s_1$ και $\Pi\Sigma^h_2$ επιβεβαιώνουν ότι οι κανόνες τοποθέτησης αποτρέπουν τις συγκρούσεις μεταξύ των μικροαντικειμένων και την ανεπιθύμητη κίνηση των μικροαντικειμένων εξαιτίας των ενεργοποιήσεων γειτονικών ηλεκτροδίων στην ΕΠ. Το ηλεκτρόδιο αναφορά της ΕΠ ως προς το οποίο γίνονται οι υπολογισμοί για την $\Pi\Sigma^s_1$ και για την $\Pi\Sigma^h_2$ είναι το (14,14). Η $\Pi\Sigma^s_1$ εκτείνεται εντός του ορθογωνίου με συντεταγμένες (26,3), (26,13), (21,13) και (21,3) και η συντεταγμένες του $\Pi\Sigma^h_2$ είναι: (26,26), (26,21), (21,21) και (21,26). Η κατανομή των θέσεων διαχωρισμού σε κάθε περιοχή συγκέντρωσης με βάση την (5.4) στο $\Pi\Sigma^s_1$ είναι :

$$\begin{bmatrix} n = 82, d((26,3), (14,14)), & 1 \\ n = 77, d((21,3), (14,14)), & 2 \\ n = 222, d((26,8), (14,14)), & 3 \\ n = 217, d((21,8), (14,14)), & 4 \\ n = 362, d((26,13), (14,14)), & 5 \\ n = 357, d((21,13), (14,14)), & 6 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Αντίστοιχα για την $\Pi\Sigma^h_2$ η (5.4) ισχύει ότι:

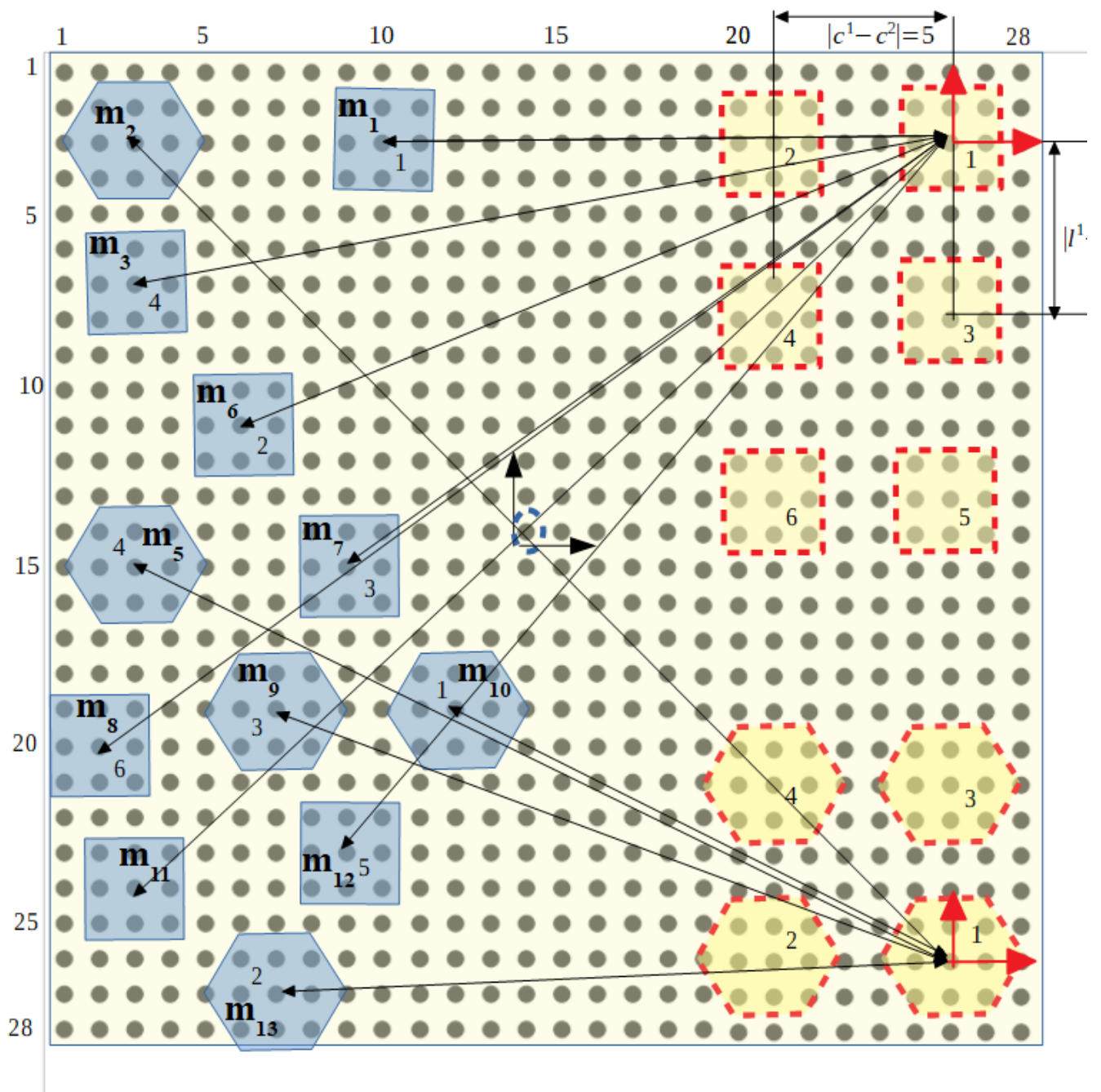
$$\begin{bmatrix} n = 726, d((26,26), (14,14)), & 1 \\ n = 586, d((26,21), (14,14)), & 2 \\ n = 581, d((21,21), (14,14)), & 3 \\ n = 721, d((21,26), (14,14)), & 4 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Με βάση τα κριτήρια που ορίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους το ηλεκτρόδιο $n = 82$ με συντεταγμένες (26,3) είναι το σημείο αναφοράς για την $\Pi\Sigma^s_1$ και $n = 726$ με συντεταγμένες (26,26) στην $\Pi\Sigma^h_2$. Η απόσταση των μικροαντικειμένων από το σημείο αναφοράς ανά περιοχή συγκέντρωσης με βάση τους υπολογισμούς της (5.4) ισούται με:

$$\left[\begin{array}{l} m_1, n = 66, d((26,3), (10,3)), 1 \\ m_6, n = 287, d((26,3), (7,11)), 2 \\ m_7, n = 401, d((26,3), (9,15)), 3 \\ m_3, n = 171, d((26,3), (3,7)), 4 \\ m_{12}, n = 625, d((26,3), (9,23)), 5 \\ m_8, n = 534, d((26,3), (2,20)), 6 \\ m_{11}, n = 647, d((26,3), (3,24)), 7 \end{array} \right] \quad (5.8)$$

$$\left[\begin{array}{l} m_{10}, n = 515, d((26,26), (11,19)), 1 \\ m_{13}, n = 735, d((26,26), (7,27)), 2 \\ m_9, n = 512, d((26,26), (8,19)), 3 \\ m_5, n = 395, d((26,26), (3,15)), 4 \\ m_2, n = 59, d((26,26), (3,24)), 5 \end{array} \right] \quad (5.9)$$

Όπως συζητήθηκε στην ενότητα () τα μικροαντικείμενα κατανέμονται στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια των περιοχών συγκέντρωσης με βάση την (5.5). Συνεπώς, ο δείκτης p των (5.6) και (5.7) αντιστοιχίζεται με το δείκτη p' των (5.8) και (5.9) ώστε $p = p'$. Οι δείκτες p και p' είναι σημειωμένοι στην εικόνα E.5.3 υποδεικνύοντας σε ποια θέση πρέπει να διαχωρισθεί κάθε μικροαντικείμενο. Όπως φαίνεται και στον τρόπο κατανομής μικροαντικειμένων στην εικόνα E.5.3 τα μικροαντικείμενα που βρίσκονται πιο κοντά στο σημείο αναφοράς της περιοχής συγκέντρωσης τοποθετούνται στις θέσεις πιο κοντά στο σημείο αναφοράς.



Ε.5.3: Κατανομή των μικροαντικειμένων στις θέσεις των περιοχών συγκέντρωσης

5.2.1 Υπολογισμός της Προτεραιότητας των Μικροαντικειμένων κατά το Διαχωρισμό

Η διαδρομή που ακολουθούν τα μικροαντικείμενα ώστε να καταλάβουν τις τελικές τους θέσεις στις περιοχές συγκέντρωσης υπολογίζεται με τον μCA^* αλγόριθμο που προτάθηκε στο 4^ο Κεφάλαιο. Μια σημαντική παράμετρος για τους υπολογισμούς του αλγορίθμου είναι η προτεραιότητα του κάθε μικροαντικειμένου κατά την παράλληλη κίνηση τους. Για τα μικροαντικείμενα για τα οποία έχει επιλεγεί θέση διαχωρισμού σε μια $\Pi\Sigma \gamma_\lambda$ περιοχή υπολογίζεται ο συντελεστής προτεραιότητας Pr για τον υπολογισμό του μονοπατιού τους με τον μCA^* αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στο 4^ο Κεφάλαιο. Ο συνολικός αριθμός των μικροαντικειμένων που πρόκειται να διαχωρισθούν ισούται με:

$$\Sigma\Delta = \text{sum}(Pop^{\Pi\Sigma \gamma_\lambda}) \forall \lambda \in [1 \Lambda] \quad (5.6)$$

Συνεπώς ο δείκτης προτεραιότητας Pr ανήκει :

$$Pr \in [1 \Sigma\Delta] \quad (5.7)$$

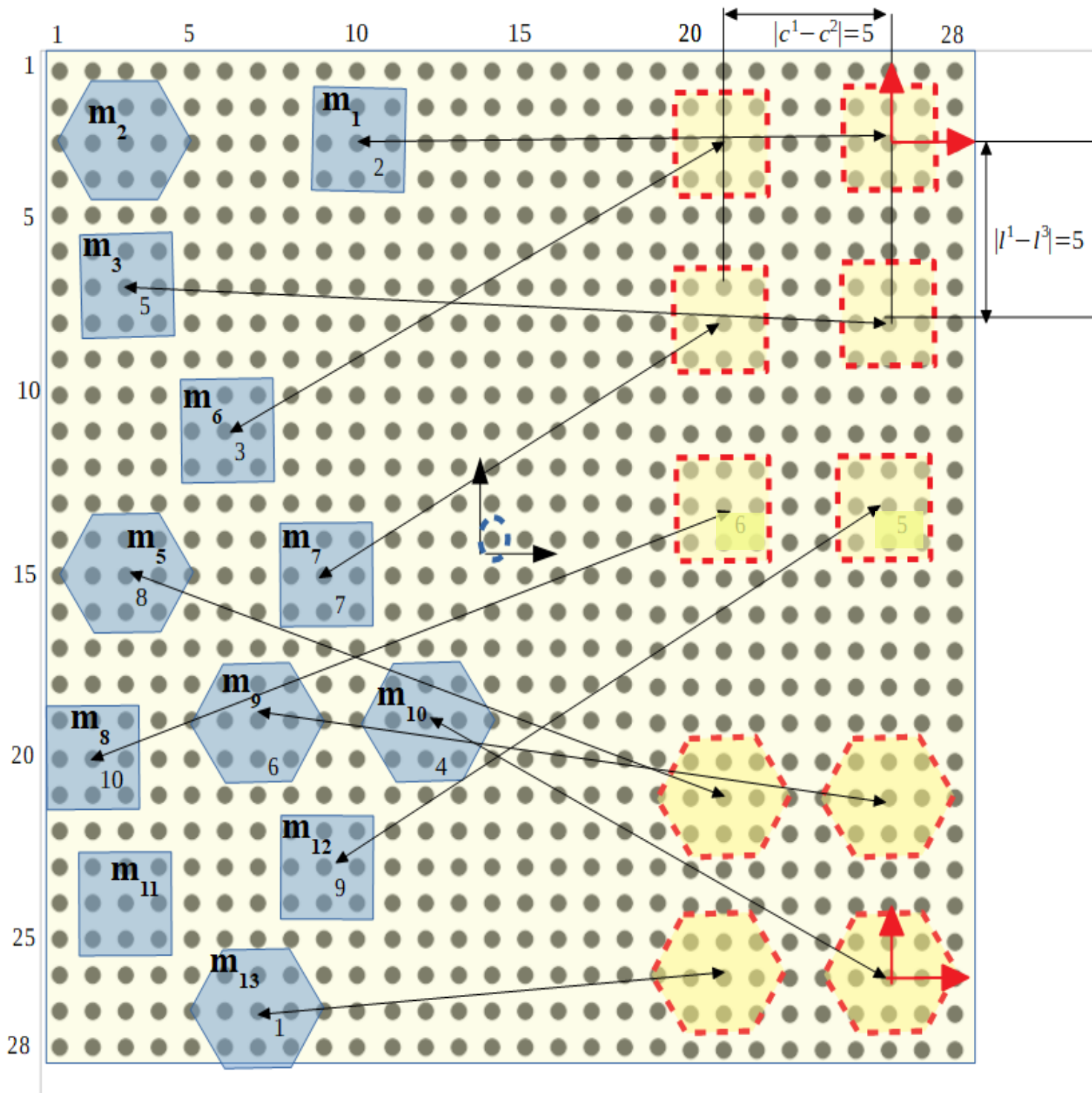
Όπου $Pr = 1$ το μικροαντικείμενο με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα και $Pr = \Sigma\Delta$ το μικροαντικείμενο με την ελάχιστη. Τα υπόλοιπα μικροαντικείμενα που δεν ανήκουν σε μια $\Pi\Sigma \gamma_\lambda$ ορίζονται ως στατικά εμπόδια και ο χώρος διαμορφώσεων τους υπολογίζεται με τους κανόνες για τα κυρτά πολύγωνα που αναπτύχθηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο. Η υψηλότερη προτεραιότητα ($Pr = 1$) δίνεται στο μικροαντικείμενο που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο διαχωρισμού του στο αντίστοιχο $\Pi\Sigma \gamma_\lambda$ και η μικρότερη ($Pr = \Sigma\Delta$) στο πιο απομακρυσμένο.

Στον πίνακα Π.5. παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και ο υπολογισμός της προτεραιότητας τους με κριτήριο την απόσταση από την τελική τους θέση. Οι αποστάσεις μεταξύ τελικής και αρχικής θέσης καθώς και η προτεραιότητα των μικροαντικειμένων παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.5.4.

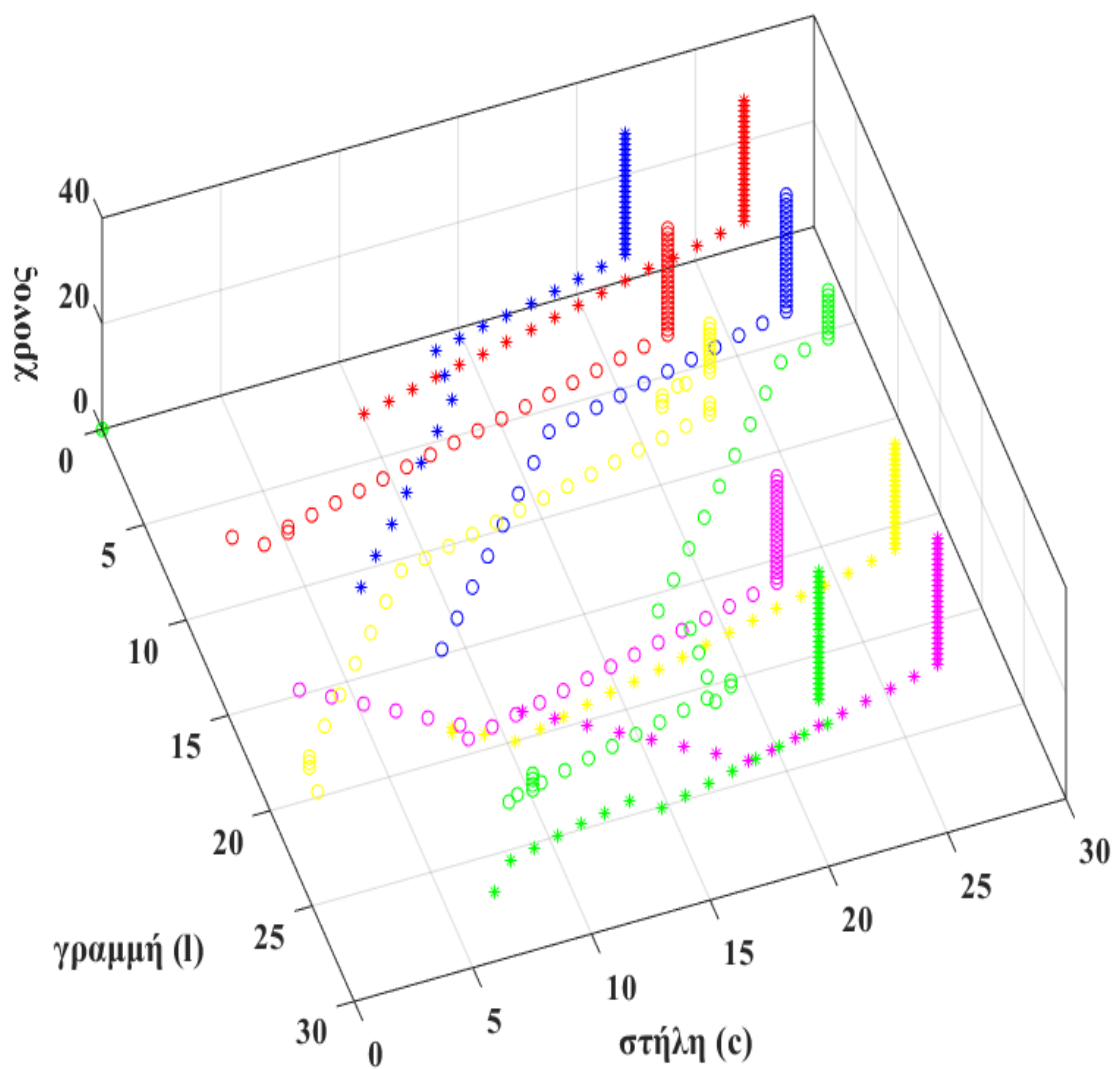
Οι αποστάσεις μεταξύ των αρχικών και τελικών θέσεων των μικροαντικειμένων επιβεβαιώνουν τους ισχυρισμούς σχετικά με τις αποστάσεις μεταξύ τελικής και αρχικής θέσης. Το τελευταίο βήμα είναι ο υπολογισμός των μονοπατιών ώστε να φτάσουν τα μικροαντικείμενα με ασφάλεια στις περιοχές συγκέντρωσης. Πρόκειται για μικροαντικείμενα τετραγωνικής διάταξης, συνεπώς χρησιμοποιείται ο μCA^* με βάση τα αντίστοιχα κριτήρια για την τετραγωνική διάταξη όπως παρουσιάστηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα Ε.5.5.

Π.5.2 Ορισμός της προτεραιότητας των μικροαντικειμένων κατά τον παράλληλο διαχωρισμό τους

Μικροαντικείμενο	Αρχική Θέση $(c, l), n$	Τελική Θέση $(c, l), n$	Ευκλείδεια Απόσταση Τελική - Αρχική	Pr
m_{13}	$(7,27), n = 735$	$(21,26) n = 721$	14.0357	1
m_1	$(10,3), n = 66$	$(26,3), n = 82$	16	2
m_6	$(7,11), n = 287$	$(21,3), n = 77$	16,1245	3
m_{10}	$(11,19) n = 515$	$(26,26) n = 726$	16,5529	4
m_3	$(3,7), n = 171$	$(21,8), n = 217$	18,0278	5
m_9	$(8,19), n = 512$	$(26,21) n = 586$	18,1108	6
m_7	$(9,15) n = 401$	$(26,8) n = 222$	18,3845	7
m_5	$(3,15) n = 395$	$(21,21), n = 581$	18,9737	8
m_{12}	$(9,23), n = 625$	$(26,13), n = 362$	19,7231	9
$m_{8,}$	$(2,20) n = 534$	$(21,13) n = 357$	20,2485	10



Ε.5.4: Υπολογισμός της προτεραιότητας των μικροαντικειμένων



E.5.5: Υπολογισμός μονοπατιών για τον παράλληλο διαχωρισμό των μικροαντικειμένων με τον μCA^ για την περίπτωση μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης – δυνατή η διαγώνια κίνηση*

5.3. Μέθοδοι Μικροσυναρμολόγησης

Τα μικροαντικείμενα συναρμολογούνται στα $\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}$ όπου αποστέλλονται κατά το διαχωρισμό τους. Όταν τα μικροαντικείμενα συναρμολογούνται πλησιάζουν αρκετά με αποτέλεσμα ο χώρος ελεύθερων καταστάσεων που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς του μCA^* να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτούς τους υπολογισμούς. Συνεπώς για την εφαρμογή της μικροσυναρμολόγησης ορίζονται εκ νέου οι ελάχιστες αποστάσεις που μπορούν να έχουν τα μικροαντικείμενα λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που τίθενται εξαιτίας της γεωμετρίας των μικροαντικειμένων, τον τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων και τις μεθόδους ενεργοποίησης ώστε να πλησιάσουν. Ο γενικός κανόνας που εφαρμόζεται σε όλες τις καταστάσεις μικροσυναρμολόγησης είναι:

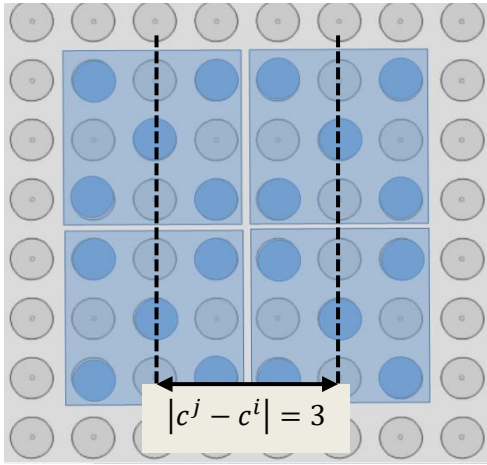
Κανόνας Μικροσυναρμολόγησης

Η εφαρμογή της μικροσυναρμολόγησης υλοποιείται εντός των $\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}$ περιοχών. Ως σημείο αναφοράς για τη μικροσυναρμολόγηση αποτελεί το μικροαντικείμενο που έχει τοποθετηθεί στο ηλεκτρόδιο $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}})$. Τα υπόλοιπα μικροαντικείμενα της $\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}$ προσεγγίζουν το σημείο αναφοράς πλησιάζοντας μεταξύ τους χωρίς να συγκρουστούν συνθέτοντας ταυτόχρονα ομάδες ίδιας γεωμετρίας.

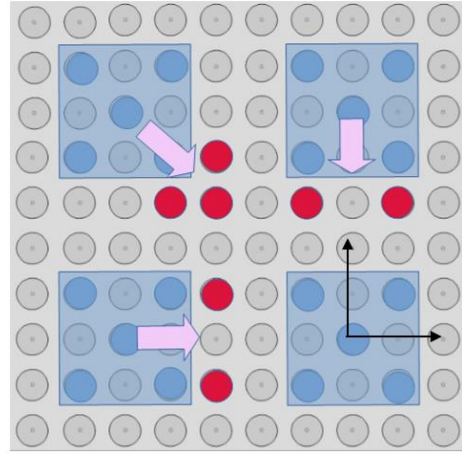
5.3.1. Τετραγωνικά Μικροαντικείμενα με Τετραγωνική Διάταξη Ηλεκτροδίων

Για τον ορισμό κανόνων για τη μικροσυναρμολόγηση τετραγωνικών μικροαντικειμένων με τετραγωνική διάταξη διερευνώνται αρχικά οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ τους σε κάθε $\Pi\Sigma^s_{\lambda}$. Στην εικόνα E.5.6.(β) παρουσιάζεται η αρχική διαμόρφωση των μικροαντικειμένων μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία του παράλληλου διαχωρισμού. Γίνεται μια πρώτη διερεύνηση των ελάχιστων αποστάσεων που μπορούν να έχουν τα μικροαντικείμενα λαμβάνοντας υπόψη και τις ενεργοποιήσεις που πρέπει να εφαρμοσθούν ώστε να λάβουν τις διαμορφώσεις αυτές ελέγχοντας τις ελάχιστες αποστάσεις από το $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}})$ ηλεκτρόδιο.

Όπως φαίνεται από την εικόνα E.5.6 (α) η γεωμετρία τους επιτρέπει να πλησιάσουν τόσο ώστε $|c^j - c^i| = 3$ και $|l^j - l^i| = 3$ όπου m_i και m_j δύο γειτονικά υπό συναρμολόγηση μικροαντικείμενα. Ταυτόχρονα μπορούν να υλοποιηθούν οι πρώτες ενεργοποιήσεις για οριζόντια, κάθετη και διαγώνια κίνηση των μικροαντικειμένων προς το ηλεκτρόδιο αναφοράς (E.5.6.β). Στη συνέχεια όπως παρουσιάζεται και στις εικόνες E.5.7.(α) (β), (γ) , (δ) το κάθε μικροαντικείμενο μπορεί να πλησιάσει το $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}})$ ενεργοποιώντας συμπληρωματικά ηλεκτρόδια για τη σταθεροποίηση του μικροαντικειμένου στο ηλεκτρόδιο $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}})$. Μια τέτοια διαδικασία όπως είναι αντιληπτό δεν μπορεί να αυτοματοποιήσει την παράλληλη μικροσυναρμολόγηση πολλαπλών μικροαντικειμένων.

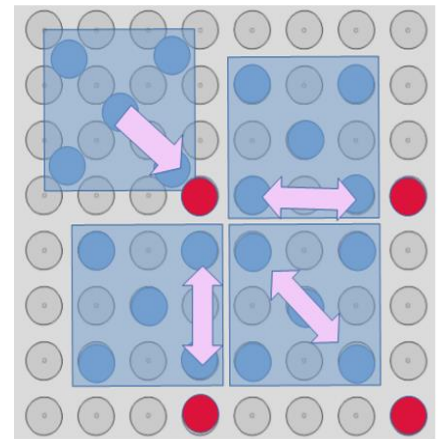
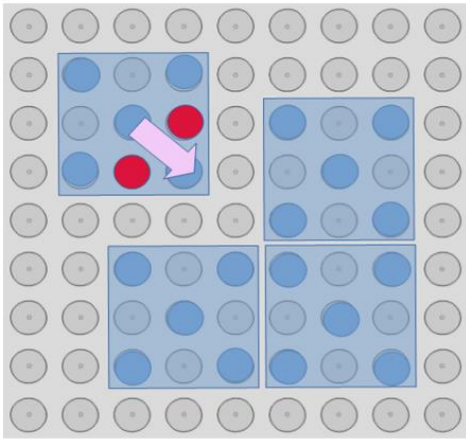
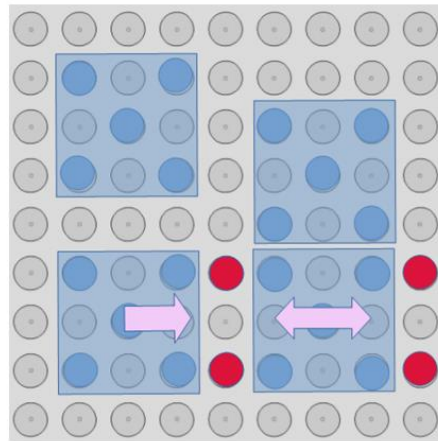
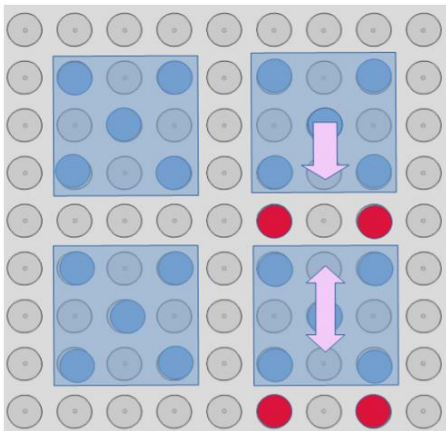


(α)



(β)

Ε.5.6: Ελάχιστες επιτρεπτές αποστάσεις λόγω γεωμετρίας – Ταυτόχρονες Ενεργοποιήσεις



Ε.5.7. Συναρμολόγηση ομάδας τεσσάρων μικροαντικειμένων για ελάχιστη απόσταση μεταξύ των μικροαντικειμένων ώστε $|c^j - c^i| = 3$ και $|l^j - l^i| = 3$

Για τη συναρμολόγηση τετραγωνικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης ώστε η απόσταση μεταξύ τους να ισούται με $|c^j - c^i| = 4$ και $|l^j - l^i| = 4$ (Ε.5.7.(α)) μπορεί να αυτοματοποιηθεί με τη χρήση των κανόνων που εμπεριέχονται στον πίνακα Π.5.3. Για τον περιορισμό των ταυτόχρονων ενεργοποιήσεων στο ελάχιστο ορίζεται ότι τα μικροαντικείμενα σε αυτή την εφαρμογή μπορούν να υλοποιούν μόνο κινήσεις πάνω/κάτω/δεξιά κι αριστερά.

Π.5.3 Κανόνες για την Παράλληλη Μικροσυναρμολόγηση Τετραγωνικών Μικροαντικειμένων Τετραγωνικής Διάταξης ώστε να καταλάβουν θέσεις με ελάχιστες αποστάσεις $|c^j - c^i| = 4$ και $|l^j - l^i| = 4$.

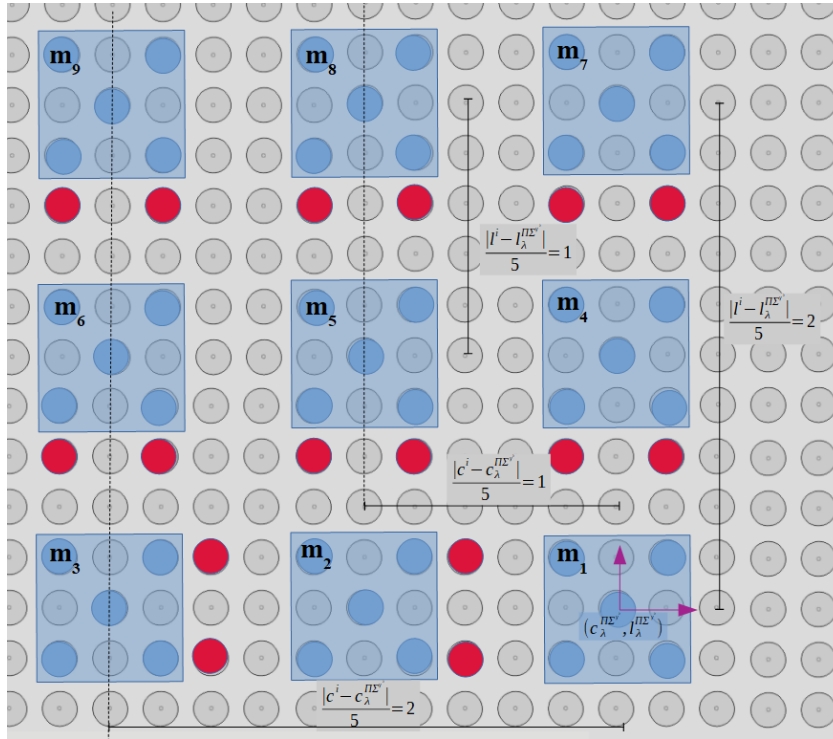
$$\forall m_i \in \Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}, \quad \pi_1 = \frac{|c^i - c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}|}{5}, \quad \nu_1 = \frac{|l^i - l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}|}{5}$$

$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > l^i$	π_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά ν_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω
$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > l^i$	π_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά ν_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω
$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < l^i$	π_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά ν_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω
$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < l^i$	π_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά ν_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω

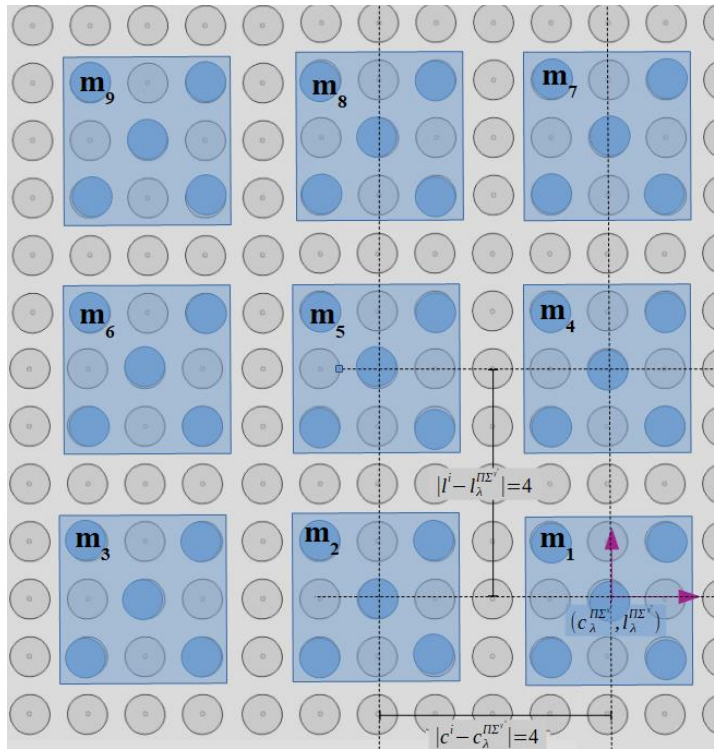
Ένα παράδειγμα συναρμολόγησης παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.5.5 για την περίπτωση όπου $c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < l^i$. Στον πίνακα Π.5.4 εμπεριέχονται οι ενεργοποιήσεις που εφαρμόζονται ώστε να πλησιάσουν ταυτόχρονα τα μικροαντικείμενα στο m_1 ενώ στην εικόνα Ε.5.8 αναπαρίσταται η τελική διαμόρφωση των μικροαντικειμένων μετά τη συναρμολόγηση.

Π.5.4. Κανόνες για την παράλληλη συναρμολόγηση των μικροαντικειμένων στην E.5.5

Μικροαντικείμενο	Αριθμός Ενεργοποιήσεων/ Κινήσεις
m_1	- —
m_2	1 ενεργοποίηση για κίνηση δεξιά —
m_3	2 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά —
m_4	— 1 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω
m_5	1 ενεργοποίηση για κίνηση δεξιά 1 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω
m_6	2 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά 1 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω
m_7	— 2 ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω
m_8	1 ενεργοποίηση για κίνηση δεξιά 2 ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω
m_9	2 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά 2 ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω



Ε.5.8: Ενεργοποιήσεις για την παράλληλη μικροσυναρμολόγηση 9 τετραγωνικών μικροαντικειμένων, τετραγωνικής διάταξης ηλεκτροδίων



Ε.5.9 Τελική φάση μετά τη συναρμολόγηση, ελάχιστη απόσταση μεταξύ των μικροαντικειμένων

Κλείνοντας στον πίνακα Π.5.5 εμπεριέχονται οι κανόνες ενεργοποίησης για τη μικροσυναρμολόγηση τετραγωνικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης για ελάχιστες αποστάσεις ώστε $|c^j - c^i| = 3$ και $|l^j - l^i| = 3$.

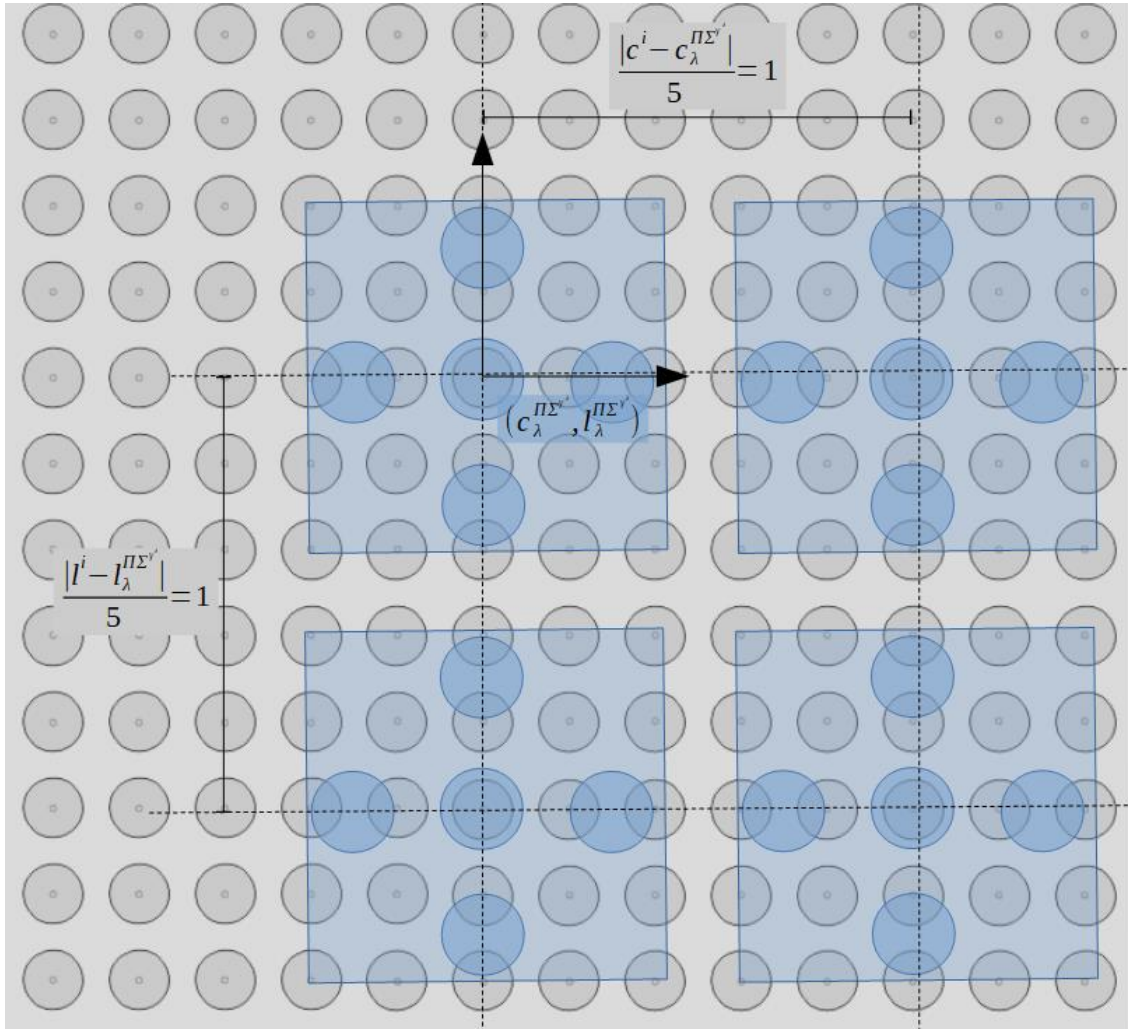
Π.5.5: Κανόνες για τη συναρμολόγηση 4 τετραγωνικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης ώστε μεταξύ γειτονικών μικροαντικειμένων να ισχύει: $|c^j - c^i| = 3$ και $|l^j - l^i| = 3$

$\forall m_i \in \Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}$	Ενεργοποιήσεις Ηλεκτροδίων	Σταθεροποίηση Μικροαντικειμένου με συντεταγμένες ($c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}}$)
$c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} > l^i$	$\frac{ c^i - c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 1$	$(c^i + 2, l^i + 1)$ $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 1)$
		$(c^i + 2, l^i - 1)$ $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 1)$
	$\frac{ l^i - l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 1$	$(c^i - 1, l^i - 2)$ $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 1, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
		$(c^i + 1, l^i - 2)$ $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 1, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
	$\frac{ c^i - c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} + \frac{ l^i - l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 2$	$(c^i + 1, l^i)$ -
		$(c^i, l^i - 1)$
		$(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
		$(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
	$(c^i + 2, l^i - 2)$	$(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$
		$(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$
$c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} > l^i$	$\frac{ c^i - c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 1$	$(c^i - 2, l^i + 1)$ $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 1)$
		$(c^i - 2, l^i - 1)$ $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 1)$
	$\frac{ l^i - l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 1$	$(c^i - 1, l^i - 2)$ $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 1, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
		$(c^i + 1, l^i - 2)$ $(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 1, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
	$\frac{ c^i - c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} + \frac{ l^i - l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 2$	$(c^i - 1, l^i)$ -
		$(c^i, l^i - 1)$
		$(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
	$(c^i - 2, l^i - 2)$	$(c_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi \Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$

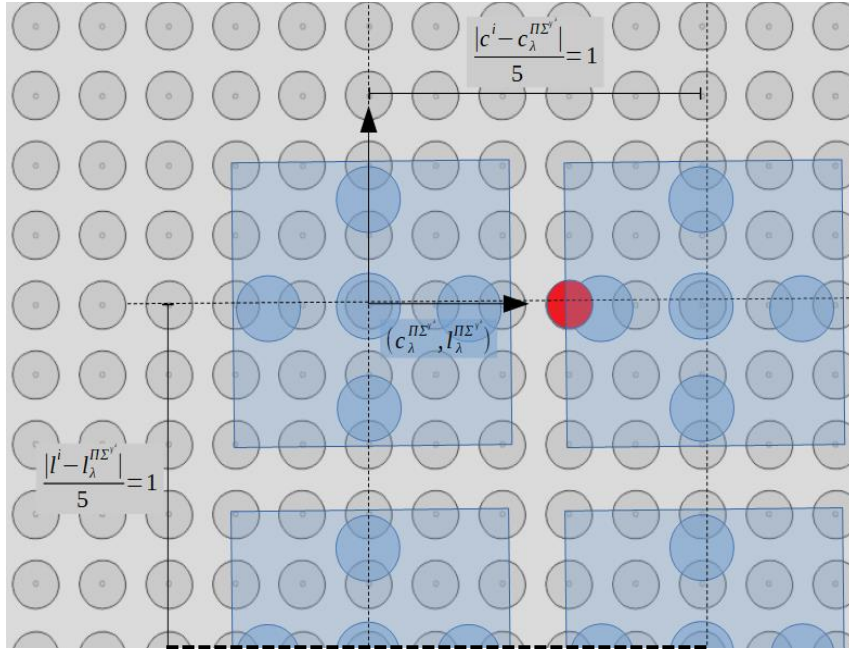
$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < l^i$			$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$
			$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$
	$\frac{ c^i - c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 1$	$(c^i + 2, l^i + 1)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 1)$
		$(c^i + 2, l^i - 1)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 1)$
	$\frac{ l^i - l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 1$	$(c^i - 1, l^i + 2)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 1, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$
		$(c^i + 1, l^i + 2)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 1, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$
	$\frac{ c^i - c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} + \frac{ l^i - l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 2$	$(c^i + 1, l^i)$	-
		$(c^i, l^i + 1)$	-
			$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
			$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < l^i$		$(c^i + 2, l^i + 2)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$
			$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$
	$\frac{ c^i - c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 1$	$(c^i - 2, l^i + 1)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 1)$
		$(c^i - 2, l^i - 1)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 1)$
	$\frac{ l^i - l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 1$	$(c^i - 1, l^i + 2)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 1, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
		$(c^i + 1, l^i + 2)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 1, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
	$\frac{ c^i - c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} + \frac{ l^i - l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} }{4} = 2$	$(c^i - 1, l^i)$	-
		$(c^i, l^i + 1)$	-
			$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
			$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2)$
		$(c^i - 2, l^i + 2)$	$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} - 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$
			$(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} + 2)$

5.3.2. Τετραγωνικά Μικροαντικείμενα με Σταυρωτή Διάταξης Ηλεκτροδίων

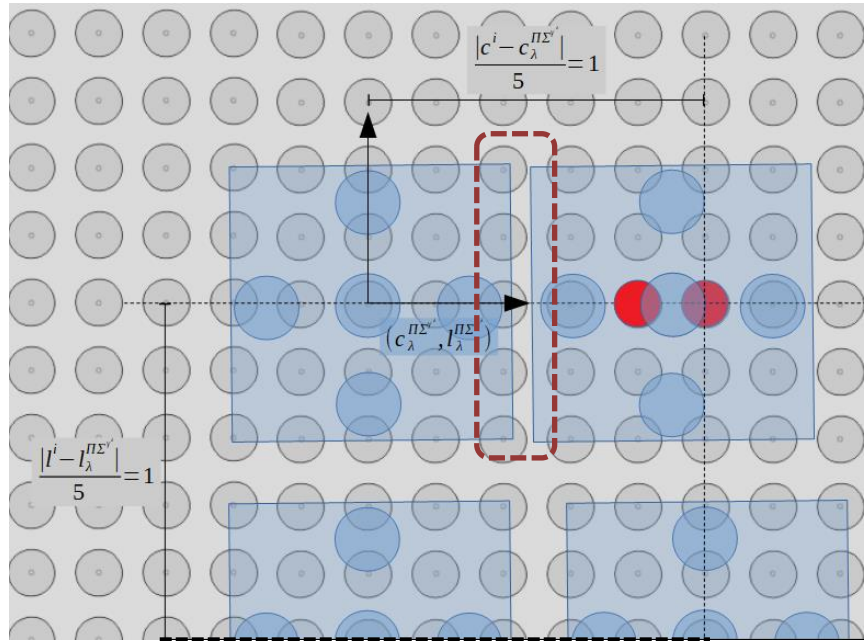
Σε αυτή την ενότητα διερευνάται η παράλληλη συναρμολόγηση πολλαπλών τετραγωνικών μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων. Όπως συζητήθηκε και στο 4^ο Κεφάλαιο κατά την παράλληλη κίνηση μικροαντικειμένων με σταυρωτή διάταξη τα γειτονικά μικροαντικείμενα πρέπει να ικανοποιούν τις συνθήκες: $|c^j - c^i| = 5$ ή $|l^j - l^i| = 5$. Επιπλέον, από τη στιγμή που τα μικροαντικείμενα έχουν επαρκείς αποστάσεις δεν τίθεται ζήτημα ενεργοποιήσεων που να επηρεάζουν ταυτόχρονα την κίνηση δύο μικροαντικειμένων όπως στην περίπτωση της τετραγωνικής διάταξης. Στην εικόνα E.5.10 παρουσιάζεται η ελάχιστη απόσταση μετά το διαχωρισμό και εν συνεχεία εικόνα E.5.11 η ελάχιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα μικροαντικείμενο ώστε να πλησιάσει στο μέγιστο το μικροαντικείμενο στη θέση $(c_n^{\Pi\Sigma\gamma_\lambda}, l_n^{\Pi\Sigma\gamma_\lambda})$ επιτυγχάνεται έπειτα από μια ενεργοποίηση και μια σταθεροποίηση.



E.5.10: Ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των τετραγωνικών μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων



A



B

E.5.11 A,B, Το μικροαντικείμενο πλησιάζει προς το $(c_n^{\pi\Sigma^{\gamma\lambda}}, l_n^{\pi\Sigma^{\gamma\lambda}})$ ηλεκτρόδιο έπειτα από μια ενεργοποίηση και μια σταθεροποίηση

Στον πίνακα Π.5.6 εμπεριέχονται οι κανόνες για τη συναρμολόγηση τετραγωνικών μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων.

Π.5.6 Ενεργοποιήσεις για την Συναρμολόγηση Τετραγωνικών Μικροαντικειμένων Σταυρωτής Διάταξης

$$\forall m_i \in \Pi\Sigma^\gamma_\lambda, \quad \pi_1 = \frac{|c^i - c_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda}|}{5}, v_1 = \frac{|l^i - l_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda}|}{5}$$

$$c_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} > l^i$$

π_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά ,
 π_1 ενεργοποιήσεις για σταθεροποίηση μετά την
κίνηση προς τα δεξιά

v_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω
 v_1 ενεργοποιήσεις για σταθεροποίηση μετά
την κίνηση προς τα πάνω

$$c_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} > l^i$$

π_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά
 π_1 ενεργοποιήσεις για σταθεροποίηση μετά
την κίνηση προς τα αριστερά
 v_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω
 v_1 ενεργοποιήσεις για σταθεροποίηση μετά
την κίνηση προς τα πάνω

$$c_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} < l^i$$

π_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά
 π_1 ενεργοποιήσεις για σταθεροποίηση μετά
την κίνηση προς τα δεξιά
 v_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω
 v_1 ενεργοποιήσεις για σταθεροποίηση μετά
την κίνηση προς τα κάτω

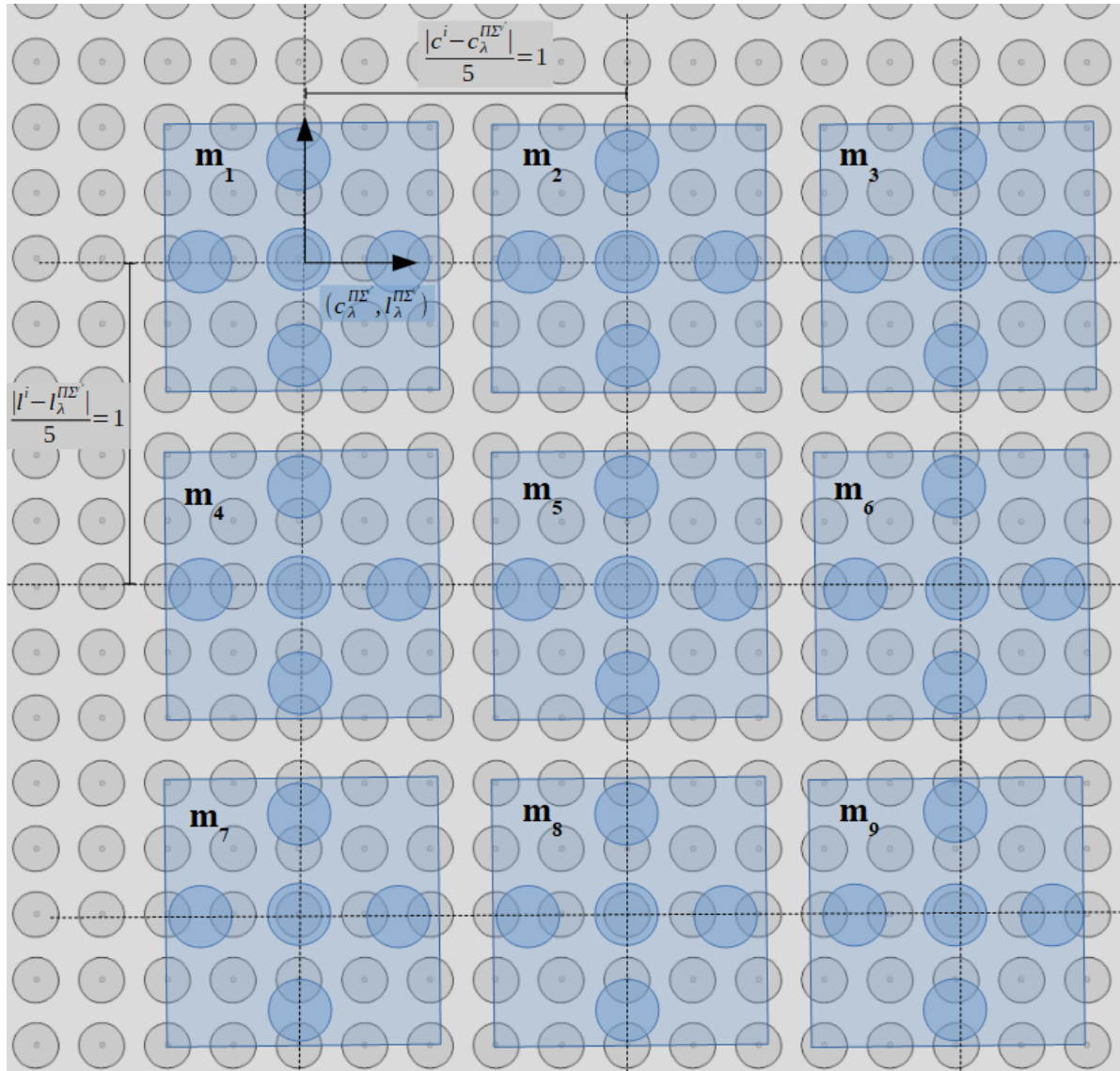
$$c_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} < l^i$$

π_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά
 π_1 ενεργοποιήσεις για σταθεροποίηση μετά
την κίνηση προς τα αριστερά
 v_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω
 v_1 ενεργοποιήσεις για σταθεροποίηση μετά
την κίνηση προς τα κάτω

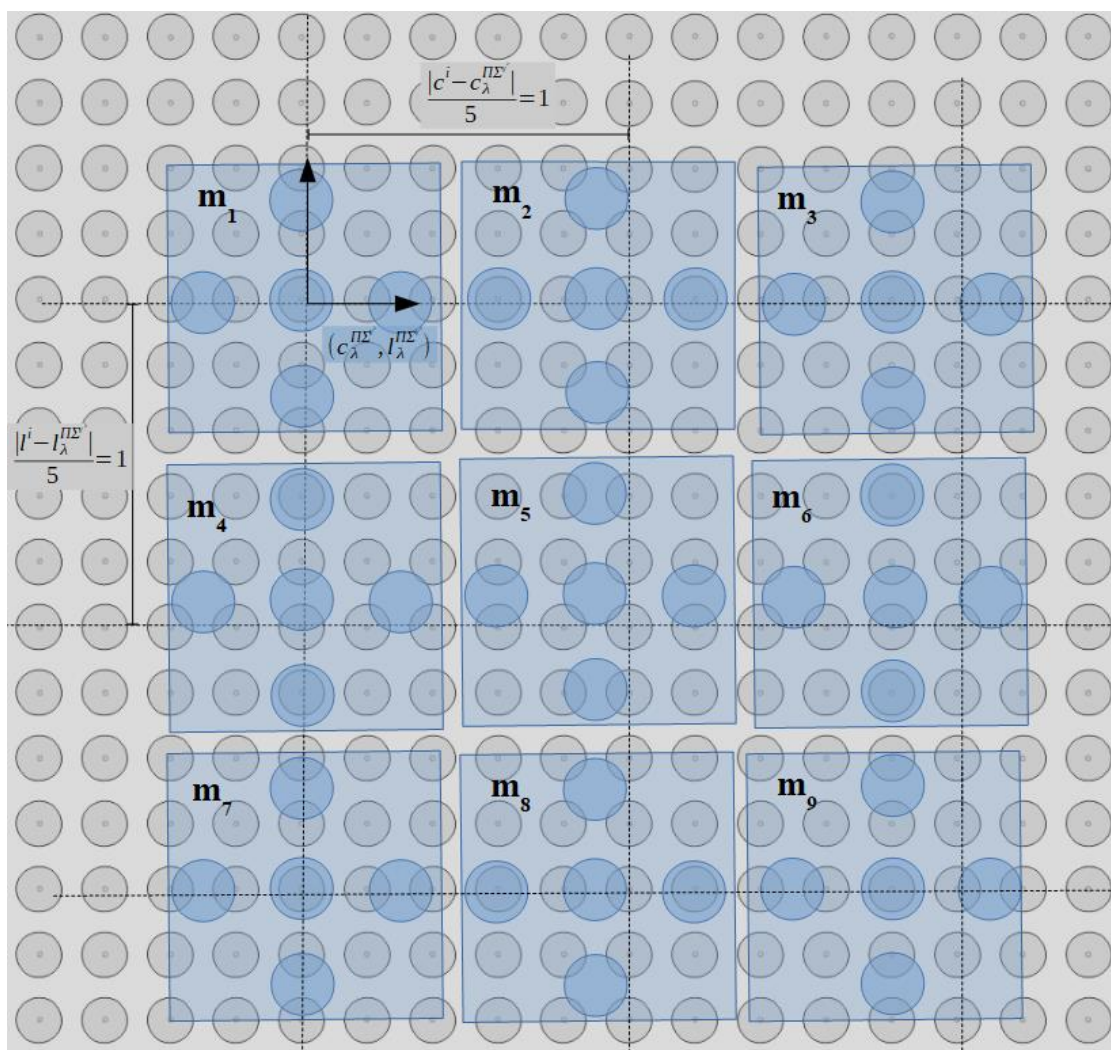
Η μικροσυναρμολόγηση 9 τετραγωνικών μικροαντικειμένων με σταυρωτή διάταξη και σημείο αναφοράς τέτοιο ώστε $c_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^\gamma_\lambda} > l^i$ διερευνάται κι η αρχική θέση τους παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.5.12. Οι ενεργοποιήσεις για την κίνηση/σταθεροποίηση κατά την παράλληλη συναρμολόγηση των 9 μικροαντικειμένων εμπεριέχονται στον πίνακα Π.5.6. Στην εικόνα Ε.5.13 αναπαρίσταται η τελική θέση των μικροαντικειμένων μετά τη συναρμολόγηση τους.

Π.5.7: Ενεργοποιήσεις για την Συναρμολόγηση 9 μικροαντικειμένων με σταυρωτή διάταξη.

Μικροαντικείμενο	Αριθμός Ενεργοποιήσεων/ Κινήσεις	Σταθεροποιήσεις
m_1	- —	- -
m_2	1 ενεργοποίηση για κίνηση αριστερά —	1 αριστερά -
m_3	2 ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά —	2 αριστερά -
m_4	— 1 ενεργοποίηση για κίνηση πάνω	- 1 πάνω
m_5	1 ενεργοποίηση για κίνηση αριστερά 1 ενεργοποίηση για κίνηση πάνω	1 αριστερά 1 πάνω
m_6	2 ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά 1 ενεργοποίηση για κίνηση πάνω	2 αριστερά 1 πάνω
m_7	0 ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά 2 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω	0 αριστερά 2 πάνω
m_8	1 ενεργοποίηση για κίνηση αριστερά 2 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω	1 αριστερά 20 πάνω
m_9	2 ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά 2 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω	2 αριστερά 2 πάνω



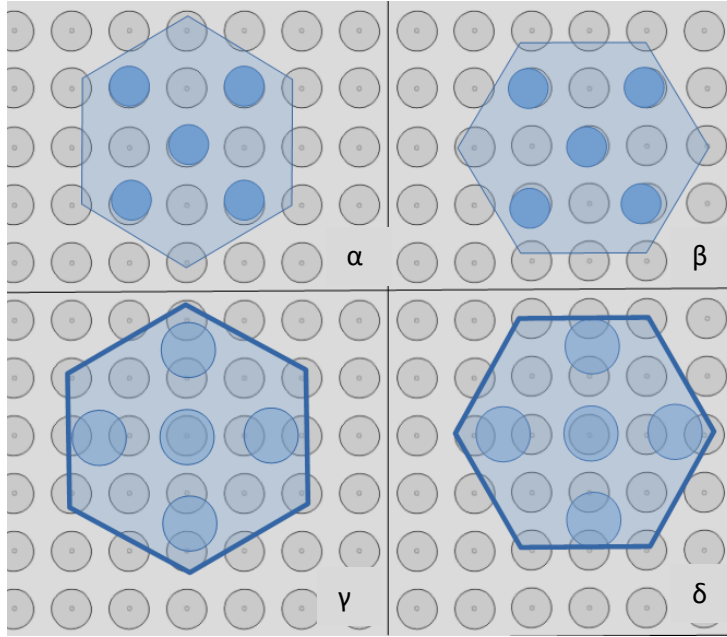
Ε.5.12.: Αρχική διαμόρφωση 9 προς συναρμολόγηση τετραγωνικών μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης.



Ε.5.13: Τελική διαμόρφωση των 9 μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης μετά την ταυτόχρονη συναρμολόγηση τους.

5.3.3.Συναρμολόγηση Εξαγωνικών Μικροαντικειμένων – Αλλάζοντας τον προσανατολισμό

Όπως συζητήθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής όταν τα μικροαντικείμενα ευθυγραμμίζονται στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» έχουν προσανατολισμό τέτοιο ώστε $\theta^i = 0$. Στα εξαγωνικά μικροαντικείμενα αυτό μπορεί να αντιστοιχεί και στις δύο διαμορφώσεις των μικροαντικειμένων στην εικόνα E.5.14 για την τετραγωνική και σταυρωτή διάταξη αντίστοιχα. Συνεπώς, πριν την διαδικασία μικροσυναρμολόγησης και αφού έχουν διαχωρισθεί εντοπίζονται από τους αισθητήρες όρασης τα εξαγωνικά μικροαντικείμενα της ΠΣ γ_λ τα οποία δεν διαθέτουν τη διαμόρφωση της Εικόνας 5.14 (β) και περιστρέφονται με τις ενεργοποιήσεις της Εικόνας 5.14(δ) ώστε να λάβουν τον κατάλληλο προσανατολισμό ώστε να τους εφαρμοσθούν κοινοί κανόνες μικροσυναρμολόγησης.



E.5.14: Διαμορφώσεις Εξαγωνικών Μικροαντικειμένων ώστε $\theta^i = 0$.

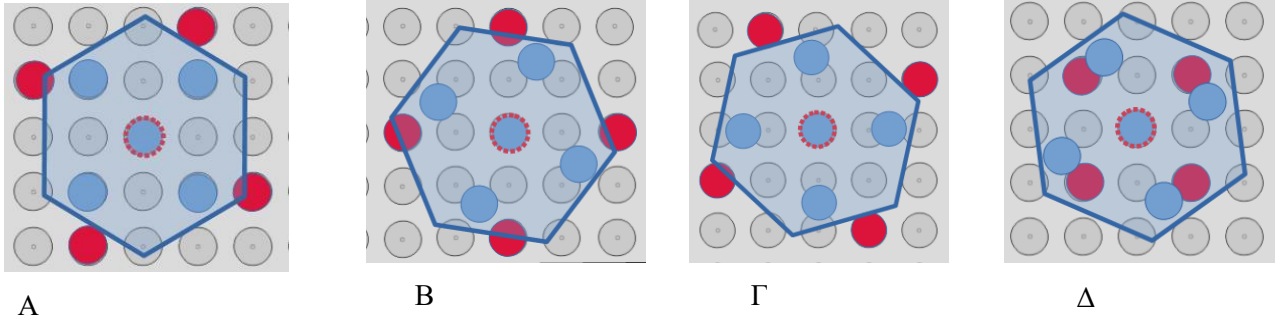
Θεωρώντας ότι το μικροαντικείμενο είναι τοποθετημένο έτσι ώστε το κέντρο του να ταυτίζεται με το ηλεκτρόδιο με συντεταγμένες (c^i, l^i) οι ενεργοποιήσεις που εφαρμόζονται είναι:

1^ο σετ ενεργοποιήσεων: $(c^i, l^i), (c^i + 2, l^i + 1), (c^i + 1, l^i - 2), (c^i - 2, l^i - 1), (c^i - 1, l^i + 2)$

2^ο σετ ενεργοποιήσεων: $(c^i, l^i), (c^i + 2, l^i), (c^i, l^i - 2), (c^i - 2, l^i), (c^i, l^i + 2)$

3^ο σετ ενεργοποιήσεων: $(c^i, l^i), (c^i - 1, l^i - 2), (c^i - 2, l^i - 1), (c^i + 1, l^i + 2), (c^i + 2, l^i - 1)$

4^ο σετ ενεργοποιήσεων: $(c^i, l^i), (c^i + 1, l^i - 1), (c^i - 1, l^i - 1), (c^i - 1, l^i + 1), (c^i + 1, l^i + 1)$



E.5.15: Ενεργοποιήσεις για την Περιστροφή των Μικροαντικειμένων: τετραγωνικής διάταξης A) 1^ο B) 2^ο Γ) 3^ο Δ) 4^ο σετ

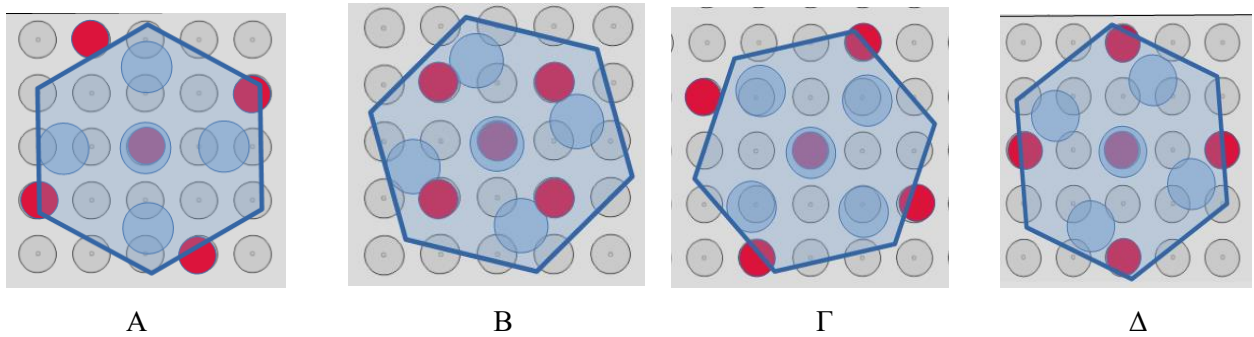
Αντίστοιχα όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. για τη σταυρωτή τοποθέτηση ισχύουν οι ενεργοποιήσεις:

1^ο σετ ενεργοποιήσεων: $(c^i, l^i), (c^i - 1, l^i - 2), (c^i - 2, l^i - 1), (c^i + 1, l^i + 2), (c^i + 2, l^i - 1)$

2^ο σετ ενεργοποιήσεων: $(c^i, l^i), (c^i + 1, l^i - 1), (c^i - 1, l^i - 1), (c^i - 1, l^i + 1), (c^i + 1, l^i + 1)$

3^ο σετ ενεργοποιήσεων: $(c^i, l^i), (c^i + 2, l^i + 1), (c^i + 1, l^i - 2), (c^i - 2, l^i - 1), (c^i - 1, l^i + 2)$

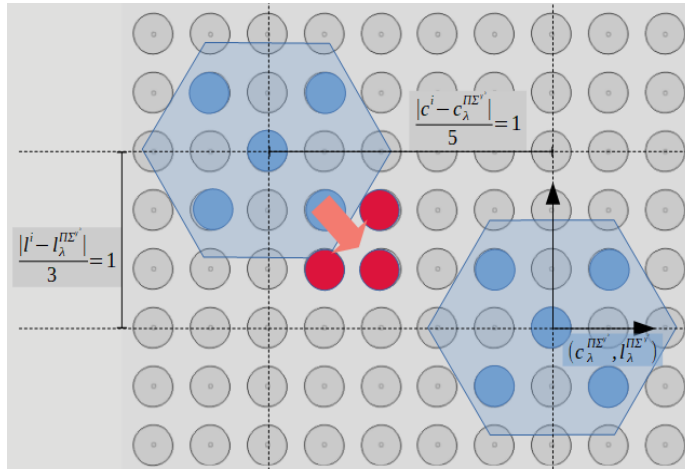
4^ο σετ ενεργοποιήσεων: $(c^i, l^i), (c^i + 2, l^i), (c^i, l^i - 2), (c^i - 2, l^i), (c^i, l^i + 2)$



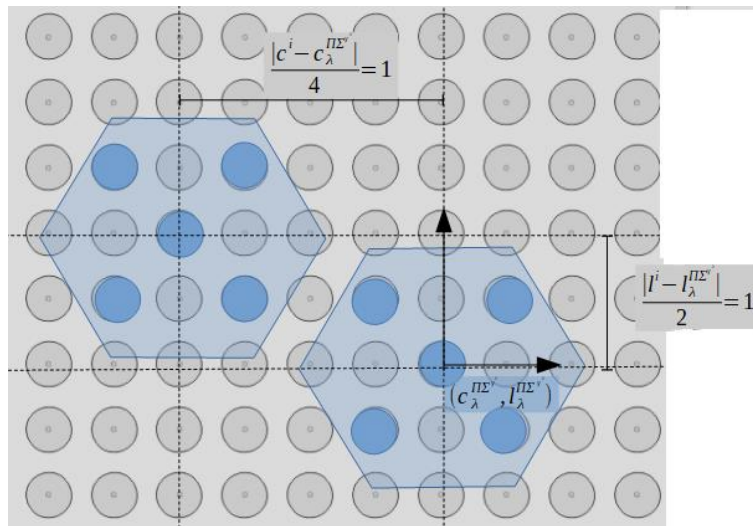
E.5.16: Ενεργοποιήσεις για την Περιστροφή των Μικροαντικειμένων Σταυρωτής Διάταξης: A) 1^ο B) 2^ο Γ) 3^ο Δ) 4^ο σετ

5.3.4. Συναρμολόγηση Εξαγωνικών μικροαντικειμένων Τετραγωνικής Διάταξης

Για την μικροσυναρμολόγηση των εξαγωνικών μικροαντικειμένων λαμβάνονται υπόψη οι ελάχιστες αποστάσεις που μπορούν να έχουν ταυτόχρονα γειτονικά μικροαντικείμενα ώστε να συναρμολογηθούν με τις πλάγιες ακμές. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην εικόνα E.5.17, η γεωμετρία αυτή επιτρέπει τη διαγώνια κίνηση των μικροαντικειμένων δίχως να χρειάζονται ενεργοποιήσεις σταθεροποίησης του μικροαντικειμένου όπου συναρμολογείται το μικροαντικείμενο. Στην εικόνα E.5.18 παρουσιάζονται οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ δύο γειτονικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης για την μικροσυναρμολόγηση από τις πλάγιες ακμές του εξάγωνου.



E.5.17: Διαγώνια κίνηση προς γειτονικά μικροαντικείμενα χωρίς σύγκρουση ή αλληλεπικαλυπτόμενη ενεργοποίηση



E.5.18: Ελάχιστη απόσταση μεταξύ των πλάγιων ακμών των εξαγωνικών μικροαντικειμένων

Για την παράλληλη μικροσυναρμολόγηση εξαγωνικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης στις πλάγιες τους ακμές προσδιορίζονται οι κανόνες που εμπεριέχονται στον πίνακα Π. 5.6 Από το παράδειγμα που παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.5.16 προκύπτει ότι για να επιτευχθεί η μικροσυναρμολόγηση με διαγώνια κίνηση θα πρέπει οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των μικροαντικειμένων να ικανοποιούν τις συνθήκες $|c^i - c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}}| = 5$ και $|l^i - l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}}| = 3$. Όπως σε όλες τις μεθόδους που έχουν παρουσιασθεί μέχρι στιγμής στο 5^ο Κεφάλαιο, η μικροσυναρμολόγηση υλοποιείται σε μια περιοχή $\Pi\Sigma^h_\lambda$ με σημείο αναφοράς το μικροαντικείμενο με συντεταγμένες $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}})$. Επίσης λαμβάνεται υπόψη ότι η αρχική τοποθέτηση των μικροαντικειμένων στα $\Pi\Sigma^h_\lambda$ είναι τέτοια ώστε κατ' ελάχιστο να απέχουν $|c^i - c^j| = 5$ ή $|l^i - l^j| = 5$.

Π.5.8: Ενεργοποιήσεις για την Συναρμολόγηση Εξαγωνικών Μικροαντικειμένων Τετραγωνικής Διάταξης στις πλάγιες ακμές των εξάγωνων

$$\forall m_i \in \Pi\Sigma^{\gamma\lambda}, \quad \pi_1 = \frac{|c^i - c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}}|}{5}, \nu_1 = \frac{|l^i - l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}}|}{5}$$

$$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} > l^i$$

$3 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω

π_1 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω - δεξιά

$$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} > l^i$$

$3 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω

π_1 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω - αριστερά

$$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} < l^i$$

$3 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω

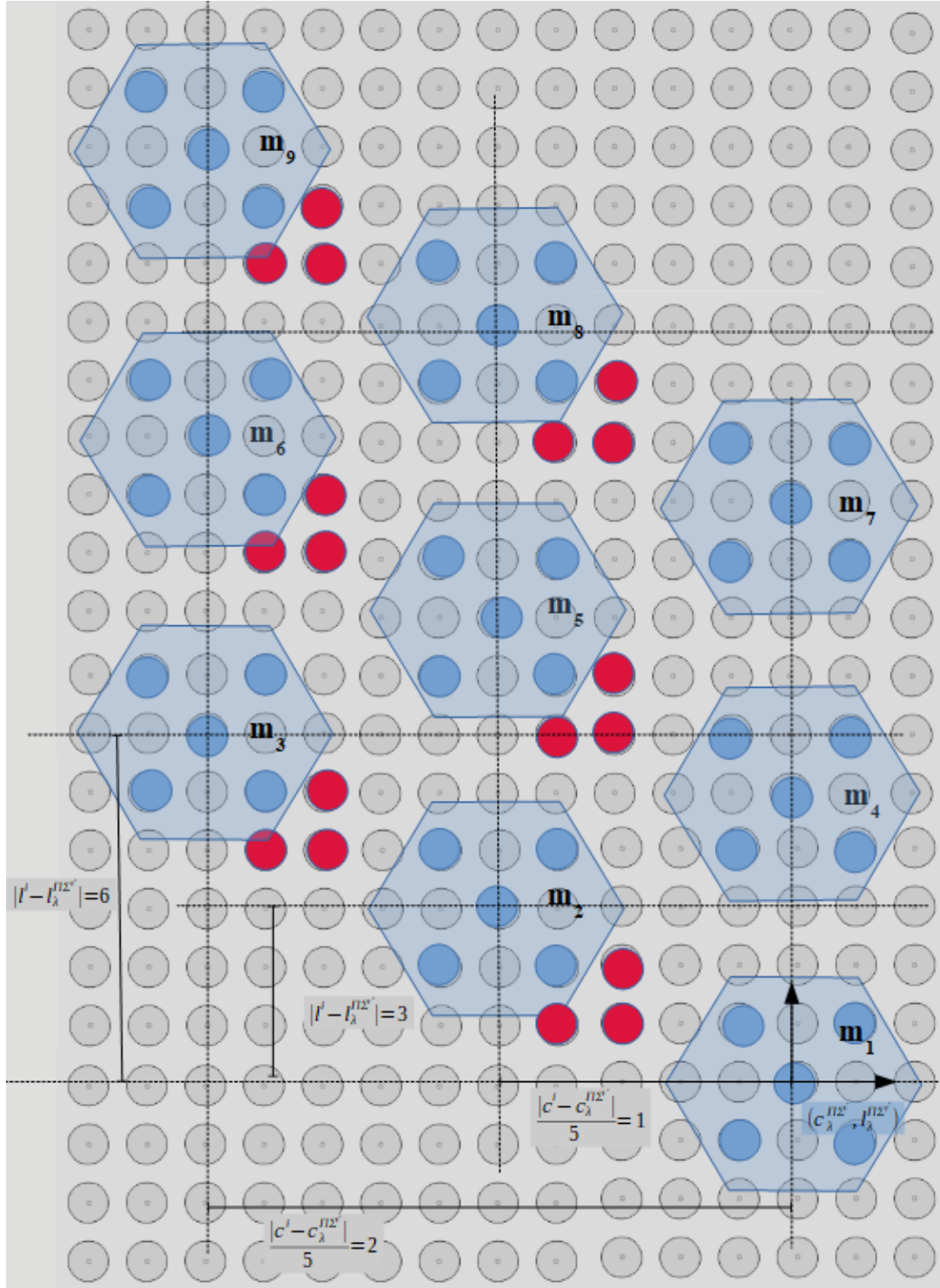
π_1 ενεργοποίηση για κίνηση πάνω - δεξιά

$$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} < l^i$$

$3 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω

c_2 ενεργοποίηση για κίνηση πάνω - αριστερά

Συνεπώς από τους κανόνες του πίνακα Π 5.8 γίνεται αντιληπτό τα μικροαντικείμενα συναρμολογούνται εφόσον $\pi_1 \neq 0$. Ο χειρισμός 9 εξαγωνικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης διερευνάται στην περίπτωση που $c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}} > l^i$ και στην εικόνα Ε.5.19 παρουσιάζεται η φάση της συναρμολόγησης έπειτα από την πρώτη ταυτόχρονη ενεργοποίησή των ηλεκτροδίων για κίνηση των μικροαντικειμένων πάνω, παρουσιάζοντας την πρώτη ενεργοποίηση για την παράλληλη διαγώνια κίνηση τους προς το $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma\lambda}})$ ηλεκτρόδιο.

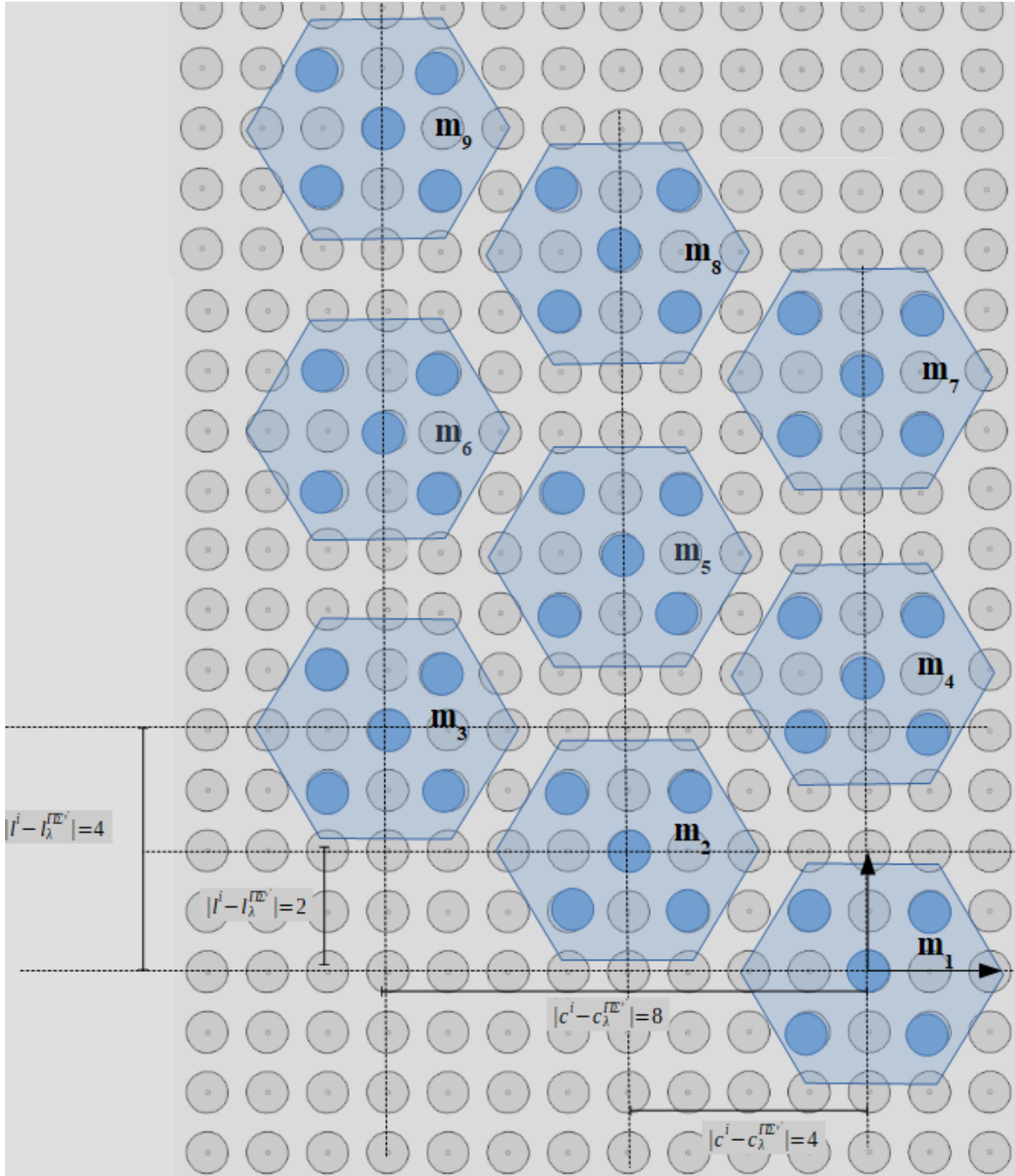


Ε.5.19: Διαδικασία παράλληλης συναρμολόγησης εξαγωνικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής τοποθέτησης στις πλάγιες ακμές.

Οι κανόνες με τις ενεργοποιήσεις για την κίνηση των μικροαντικειμένων εμπεριέχονται στον πίνακα Π.5.9 και η τελική φάση έπειτα από την διαγώνια κίνηση των μικροαντικειμένων φαίνεται στην εικόνα Ε.5.20 όπου αναπαρίστανται οι ελάχιστες αποστάσεις των μικροαντικειμένων και η τελική τους σύνθεση.

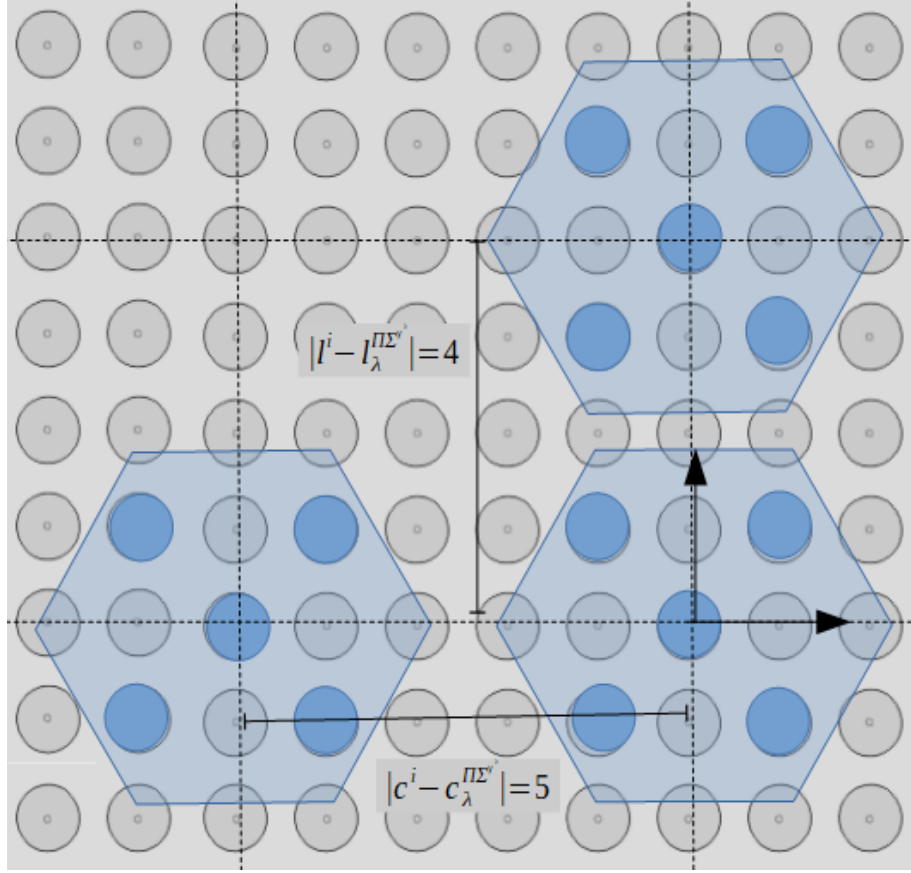
Πίνακας 5.9: Ενεργοποιήσεις για την Συναρμολόγηση 9 μικροαντικειμένων με σταυρωτή διάταξη.

Μικροαντικείμενο	Αριθμός Ενεργοποιήσεων/ Κινήσεις
m_1	-
m_2	3 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 1 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω - δεξιά
m_3	6 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 2 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω - δεξιά
m_4	-
m_5	3 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 2 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω - δεξιά
m_6	6 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 1 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω - δεξιά
m_7	-
m_8	3 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 1 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω - δεξιά
m_9	6 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 2 ενεργοποίηση για κίνηση κάτω - δεξιά



Ε.5.20: Τελική φάση της παράλληλης μικροσυναρμολόγησης των 9 εξαγωνικών μικροαντικειμένων

Στην περίπτωση που ζητείται η συναρμολόγηση των εξαγωνικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης με τις άνω και κάτω πλευρές, οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των μικροαντικειμένων παρουσιάζονται στην εικόνα Ε.5.21. και οι κανόνες για αυτή τη μέθοδο εμπεριέχονται στον πίνακα Π.5.10.



E.5.21: Ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των εξαγωνικών μικροαντικειμένων τετραγωνικής διάταξης για συναρμολόγηση στις άνω και κάτω ακμές

Π.5.10: Ενεργοποιήσεις για την Συναρμολόγηση Εξαγωνικών Μικροαντικειμένων Τετραγωνικής Διάταξης στις άνω και κάτω ακμές

$$\forall m_i \in \Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}, \quad \pi_1 = \frac{|c^i - c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}}|}{5}, v_1 = \frac{|l^i - l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}}|}{5}$$

$$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}} > l^i$$

v_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω

$$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}} > l^i$$

v_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω

$$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}} < l^i$$

v_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω

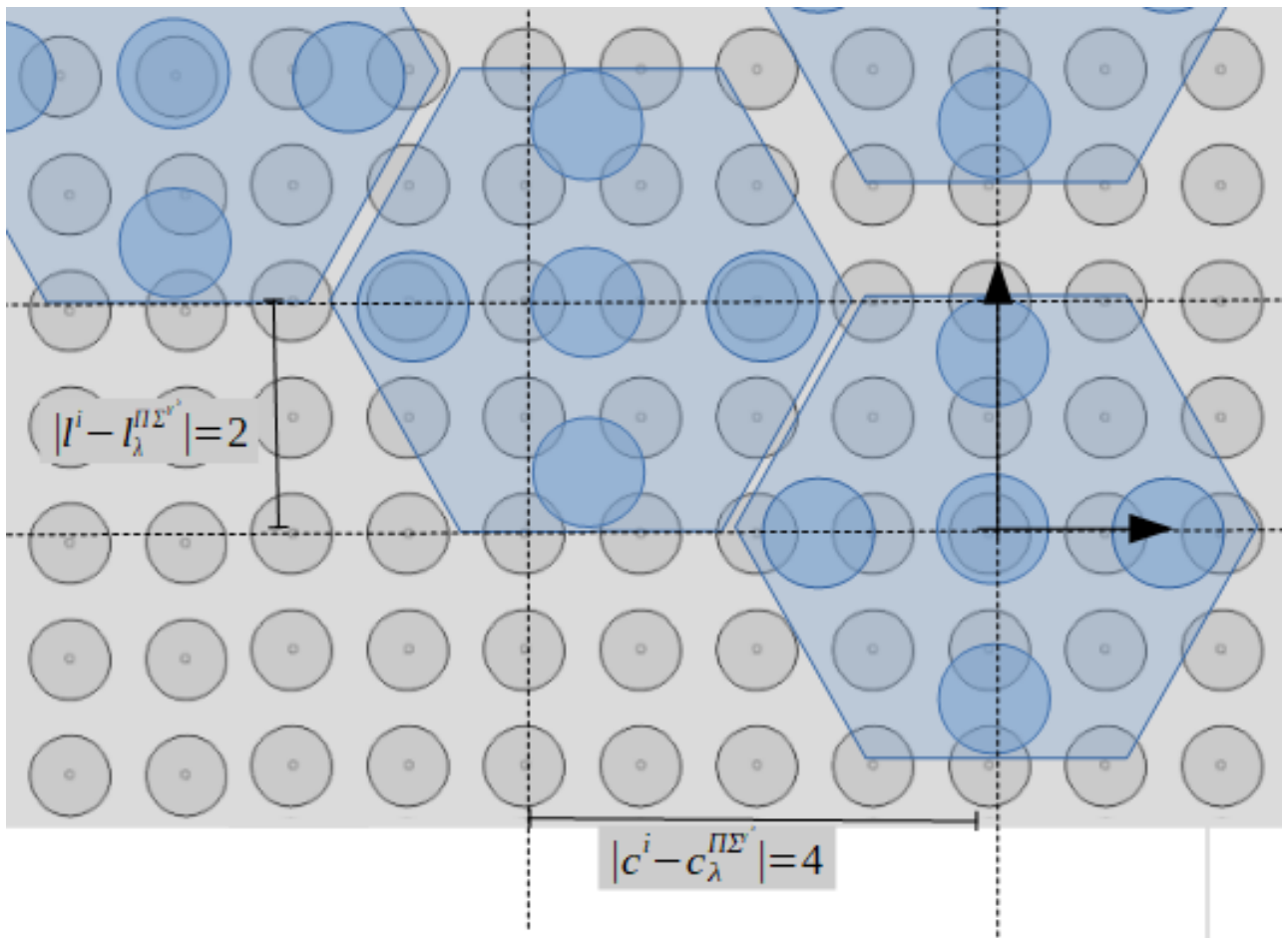
$$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma}_{\lambda}} < l^i$$

v_1 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω

Όπως φαίνεται από τις ενεργοποιήσεις του πίνακα Π.5.10 και από την εικόνα Ε.5.21 το μικροαντικείμενα μπορούν να μετατοπισθούν κατακόρυφα προσεγγίζοντας τα μικροαντικείμενα κατά μήκος της γραμμής $l_n^{\Pi\Sigma^{\nu\lambda}}$.

5.3.5. Συναρμολόγηση Εξαγωνικών μικροαντικειμένων Σταυρωτής Διάταξης

Σε αυτή την ενότητα τα εξαγωνικά μικροαντικείμενα σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων και στην εικόνα Ε.5.22 παρουσιάζονται οι ελάχιστες αποστάσεις για την περίπτωση της συναρμολόγησης στις πλάγιες ακμές.



Ε.5.22: Ελάχιστες αποστάσεις για τα εξαγωνικά μικροαντικείμενα σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων

Οι κανόνες ενεργοποιήσεων που μπορούν να λάβουν ταυτόχρονα όλα τα μικροαντικείμενα για τη συγκεκριμένη μέθοδο μικροσυναρμολόγησης εμπεριέχονται στον πίνακα Π.5.11.

Π.5.11: Ενεργοποιήσεις για την Συναρμολόγηση Εξαγωνικών Μικροαντικειμένων Σταυρωτής Διάταξης στις πλάγιες ακμές

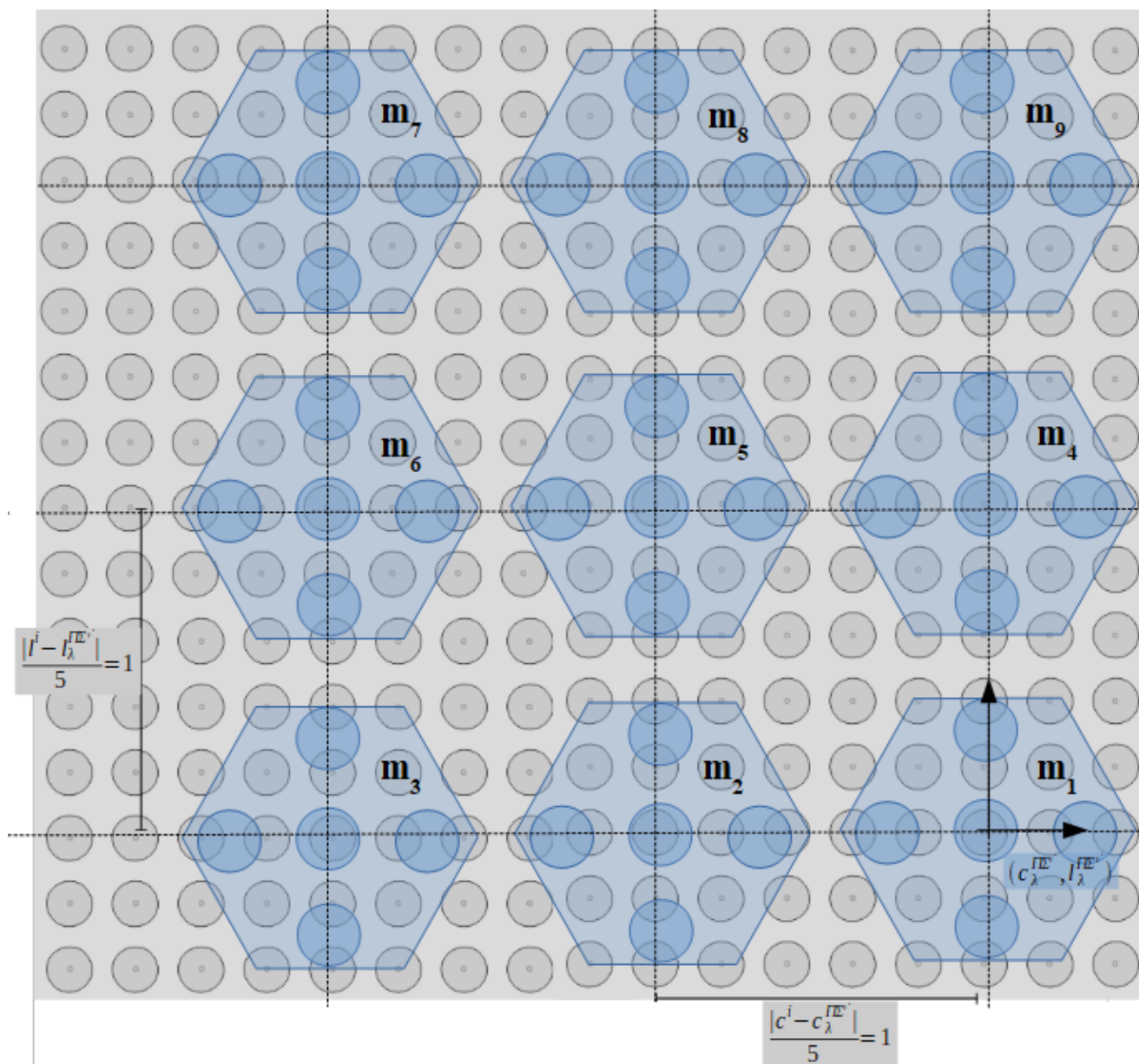
$$\forall m_i \in \Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}, \quad \pi_1 = \frac{|c^i - c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}|}{5}, v_1 = \frac{|l^i - l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}|}{5} \quad \text{Σταθεροποιήσεις}$$

$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > l^i$	$4 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω $3 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά	
$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > l^i$	$4 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω $3 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά	$4 \cdot \pi_1$
$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < l^i$	$4 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω $3 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά	$3 \cdot \pi_1$
$c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} < l^i$	$4 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση κάτω $3 \cdot \pi_1$ ενεργοποιήσεις για κίνηση αριστερά	

Η μικροσυναρμολόγηση των 9 μικροαντικειμένων ως προς το $(c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}}, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}})$ για την περίπτωση που $c_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > c^i, l_n^{\Pi\Sigma^{\gamma_\lambda}} > l^i$ με την αρχική διαμόρφωση που παρουσιάζεται στην εικόνα Ε.5.23 διερευνάται. Οι ενεργοποιήσεις για την κίνηση των μικροαντικειμένων εμπεριέχονται στον πίνακα Π.5.12. Οι ενεργοποιήσεις που προτείνονται αντιστοιχούν σε κίνηση προς την επόμενη Θέση Ισορροπίας

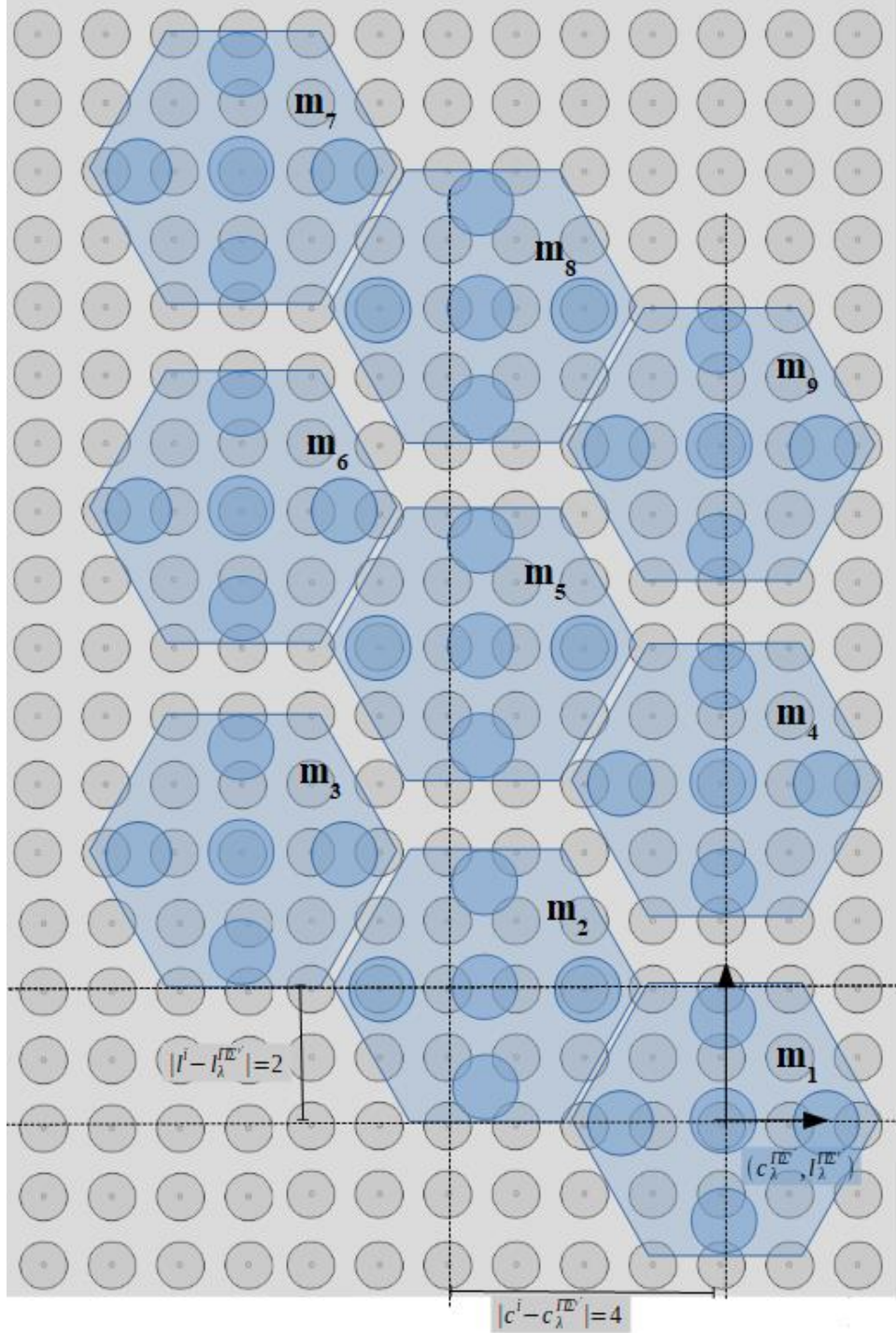
Π.5.12: Ενεργοποιήσεις για την Συναρμολόγηση των 9 εξαγωνικών μικροαντικειμένων με σταυρωτή διάταξη και αρχική διαμόρφωση όπως φαίνεται στην Ε.5.23

Μικροαντικείμενο	Αριθμός Ενεργοποιήσεων/ Κινήσεις
m_1	-
m_2	4 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 3 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά
m_3	8 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 6 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά
m_4	-
m_5	4 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 3 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά
m_6	8 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 6 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά
m_7	-
m_8	4 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 3 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά
m_9	8 ενεργοποιήσεις για κίνηση πάνω 6 ενεργοποιήσεις για κίνηση δεξιά



E.5.23: Αρχική διαμόρφωση των 9 μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης ηλεκτροδίων

Στην εικόνα E.5.24 παρουσιάζεται η τελική διαμόρφωση των μικροαντικειμένων μετά τη διαδικασία της μικροσυναρμολόγησης. Η σταυρωτή διάταξη επιτρέπει στα εξαγωνικά μικροαντικείμενα να πλησιάσουν πολύ περισσότερο σε σύγκριση με τα μικροαντικείμενα τετραγωνικής τοποθέτησης.



Ε.5.24: Συναρμολόγηση των 9 Εξαγωνικών Μικροαντικειμένων σταυρωτής διάταξης

Τέλος για την περίπτωση της συναρμολόγησης από την πάνω και κάτω πλευρά του εξαγωνικού μικροαντικειμένου σταυρωτής διάταξης ισχύουν ακριβώς οι ίδιοι κανόνες που εμπεριέχονται στον πίνακα Π.5.10.

5.4 Σύνοψη 5^{ου} Κεφαλαίου – Συμβολή

Στα πλαίσια του 5^{ου} Κεφαλαίου διερευνήθηκε ο παράλληλος διαχωρισμός πολλαπλών μικροαντικειμένων και περιεγράφηκαν μέθοδοι για την ταυτόχρονη συναρμολόγηση τους. Συγκεκριμένα, λαμβάνοντας ως δεδομένο τις μεθόδους και τους υπολογισμούς για την παράλληλη κίνηση των μικροαντικειμένων που αναπτύχθηκαν στο 4^ο Κεφάλαιο στα πλαίσια του 5^{ου} Κεφαλαίου προτάθηκαν μέθοδοι μέσω των οποίων υπολογίζονται :

1. Οι περιοχές συγκέντρωσης των μικροαντικείμενα στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» όπου διαχωρίζονται με κριτήριο τη γεωμετρία τους.
2. Ο τρόπος κατανομής των μικροαντικειμένων στις περιοχές συγκέντρωσης τους
3. Η θέση όπου πρέπει να οδηγηθεί το κάθε μικροαντικείμενο
4. Ο δείκτης προτεραιότητας του κάθε μικροαντικειμένου ο οποίος προσδιορίζει την προτεραιότητα των μικροαντικειμένων για τον υπολογισμό των μονοπατιών κατά την παράλληλη κίνηση τους.
5. Τα μονοπάτια που ακολουθούν τα μικροαντικείμενα κατά τον παράλληλο διαχωρισμό του

Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι ενεργοποίησης ηλεκτροδίων για την παράλληλη συναρμολόγηση των μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» όπου

1. Με βάση τη γεωμετρία και τον τρόπο διάταξης των ηλεκτροδίων υπολογίσθηκαν οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των μικροαντικειμένων
2. Αναπτύχθηκαν κανόνες για την παράλληλη μικροσυναρμολόγηση τους υλοποιώντας τις ελάχιστες δυνατές κινήσεις που πρέπει να κάνουν τα μικροαντικείμενα ώστε να πλησιάσουν σε ένα μικροαντικείμενο αναφορά και κατ' επέκταση τις ενεργοποιήσεις που πρέπει να εφαρμοσθούν στα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας.
3. Παρουσιάσθηκαν παραδείγματα και αναπαραστήθηκαν οι ταυτόχρονες ενεργοποιήσεις καθώς κι οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των συναρμολογημένων μικροαντικειμένων.

Ανατρέχοντας στις υποθέσεις του 1^{ου} Κεφαλαίου, προκύπτει ότι ο σκοπός της διδακτορικής διατριβής είναι η ανάπτυξη μεθόδων για τον παράλληλο διαχωρισμό και τη μικροσυναρμολόγηση πολλαπλών μικροαντικειμένων στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» αγωγίων επενεργητών. Με την ολοκλήρωση και του 5^{ου} Κεφαλαίου προκύπτει ότι η παρούσα διατριβή αποτελεί ένα εγχειρίδιο όπου εμπεριέχονται μια σειρά από μεθόδους και αλγορίθμους οι οποίοι εφαρμόζονται στην «Εξυπνη Πλατφόρμα» αγωγίων επενεργητών για τον αυτόνομο – ευέλικτο χειρισμό των μικροαντικειμένων.

Κεφάλαιο 6

6.1 Συμπεράσματα – Συμβολή της διατριβής

Η μαζική παραγωγή Μικροηλεκτρομηχανικών Συστημάτων (MEMS) αποτελεί ένα μεγάλο ζήτημα για τη Βιομηχανία. Μια από τις πιο χρονοβόρες διεργασίες κατά την σύνθεση και προετοιμασία των MEMS αποτελεί ο χειρισμός των επιμέρους μικροαντικειμένων που τα συνθέτουν, για εφαρμογές διαχωρισμού και συναρμολόγησης των. Προς το παρόν στη βιομηχανία χρησιμοποιούνται μαζικά οι μέθοδοι σειριακού χειρισμού οι οποίες όμως δεν αποδίδουν χρονικά, ποιοτικά και από άποψη κόστους τα βέλτιστα αποτελέσματα. Με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου και του κόστους παραγωγής καθώς επίσης και τον περιορισμό των μικροφθορών στα μικροαντικείμενα που προκαλούν τα μικροεργαλεία έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία μέθοδοι για τον παράλληλο χειρισμό μικροαντικειμένων με πεδία δυνάμεων. Παρ' όλο που πρόκειται για αρκετά υποσχόμενες μεθόδους προς το παρόν δεν έχουν εφαρμοσθεί στη βιομηχανία για το μαζικό παράλληλο χειρισμό πολλαπλών μικροαντικειμένων. Βασικά ζητήματα που τίθενται ως προς τη μη εφαρμοστικότητα τους είναι η ένταση των πεδίων δυνάμεων που χρησιμοποιούνται καθώς και η περιορισμένη αυτονομία που έχουν οι διατάξεις όπου αναπτύσσονται τα πεδία.

Η παρούσα διατριβή εστίασε στην σχεδίαση της «Εξυπνης Πλατφόρμας» αγωγίμων ηλεκτροδίων, μια αυτόνομη διάταξης για παράλληλο χειρισμό μικροαντικειμένων με ηλεκτροστατικά πεδία δυνάμεων. Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο αποτελεί μέρος ενός μικρο-εργοστασίου, όπου τα μικροαντικείμενα – κατασκευασμένα από μονωτικά υλικά με αγωγή ηλεκτρόδια στην κάτω επιφάνεια τους - μεταφέρονται μαζικά με γραμμές μεταφοράς και η διαδικασία χειρισμού τους υλοποιείται αυτόνομα, αποκλειστικά με πεδία δυνάμεων χωρίς την χρήση μικρο – εργαλείων. Για το σκοπό αυτό η έρευνα στη διατριβή επικεντρώθηκε σε τέσσερα ζητήματα που σχετίζονται με τον τρόπο λειτουργίας της πλατφόρμας α) Τις φυσικές διεργασίες για τον προσδιορισμό των ηλεκτροστατικών δυνάμεων β) αλγόριθμους και μεθόδους για την ενεργοποίηση των ηλεκτροδίων της πλατφόρμας με στόχο τον αυτόνομο και ευέλικτο χειρισμό των μικροαντικειμένων γ) μεθόδους για την παράλληλη κίνηση πολλαπλών μικροαντικειμένων αποφεύγοντας τις μεταξύ τους συγκρούσεις δ) παράλληλος διαχωρισμός και μικροσυναρμολόγηση

Η ερευνητική συμβολή και τα πρωτότυπα στοιχεία της παρούσας διατριβής μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω:

- Εξέλιξη και βελτιστοποίηση του τρόπου λειτουργίας συσκευής για την εφαρμογή μεθόδων χειρισμού μικροαντικειμένων με ηλεκτροστατικά πεδία
- Περιγραφή των φυσικών διεργασιών και του τρόπου φόρτισης των ηλεκτροδίων. Υπολογίσθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το φορτίο των ηλεκτροδίων καθώς και οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτροδίων του μικροαντικειμένου και της πλατφόρμας.
- Υπολογισμός του ελάχιστου αριθμού ενεργοποιήσεων που πρέπει να εφαρμοσθούν στα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας ώστε να αφήσει το μικροαντικείμενο τη στατική κατάσταση.

- Υπολογισμός του ελάχιστου δυναμικού που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας
- Με βάση τον αριθμό των ενεργοποιήσεων προτάθηκαν στα πλαίσια της διατριβής δύο νέοι τρόποι διάταξης

στα μικροαντικείμενα:

- Τετραγωνική Διάταξη: Δυνατότητα μετάβασης κεντραρισμένου/ ευθυγραμμισμένου μικροαντικειμένου μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας
- Σταυρωτή Διάταξη: Δυνατότητα μετάβασης κεντραρισμένου/ ευθυγραμμισμένου μικροαντικειμένου μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας και κατά το ήμισι

Η ευελιξία και η αυτονομία της «Εξυπνης Πλατφόρμας» στο χειρισμό των μικροαντικειμένων αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους σκοπούς της διατριβής οι οποίες συνδέονται άμεσα με το χειρισμό των μικροαντικειμένων σε τυχαίες διαμορφώσεις μέσω ενός ή πολλαπλών ταυτόχρονα ενεργοποιημένων ηλεκτροδίων ώστε να υλοποιήσουν μια συγκεκριμένη κίνηση. Στο πλαίσιο αυτό:

- Προτείνεται ένας νέος αλγόριθμος για τον εντοπισμό όλων των ηλεκτροδίων της πλατφόρμας που περικυκλώνουν το μικροαντικείμενο προσδιορίζοντας τις δυνάμεις που ασκούνται στο Κέντρο Μάζας, καθώς και το είδος της κίνησης του εξαιτίας της ενεργοποίησης καθ' ενός εξ αυτών.

- Αναπτύσσεται ένας καινούριος αλγόριθμος ο οποίος υπολογίζει όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ταυτόχρονων ενεργοποιήσεων που μπορούν να εφαρμοσθούν ταυτόχρονα στο μικροαντικείμενο και το αντίκτυπο τους στην κίνηση του μικροαντικειμένου

- Οι υπολογισμοί των αλγορίθμων δείχνουν ότι η πλατφόρμα έχει την ευελιξία να διαχειριστεί μικροαντικείμενα σε τυχαίες διαμορφώσεις

- Με βάση την προσομοίωση της κίνησης μικροαντικειμένων σε τυχαίες διαμορφώσεις επιλέγεται να υλοποιούνται αρχικά οι εφαρμογές του κεντραρίσματος και της ευθυγράμμισης και εν συνεχεία η εφαρμογή ενεργοποιήσεων για τη μετάβαση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας

- Αναπτύσσονται αλγόριθμοι ενεργοποίησης για την κίνηση των μικροαντικειμένων μεταξύ δύο ηλεκτροδίων της πλατφόρμας

- Οι διακριτές κινήσεις των μικροαντικειμένων με βάση τους προτεινόμενους αλγόριθμους ενεργοποίησης προσομοιώνονται σε κατάλληλο λογισμικό

- Σημαντική είναι η συμβολή των ενεργοποιήσεων σταθεροποίησης στην περίπτωση της σταυρωτής διάταξης ώστε το μικροαντικείμενο να ισορροπήσει με ακρίβεια στο μέσο της απόστασης των κέντρων δύο γειτονικών ηλεκτροδίων της πλατφόρμας.

Έχοντας ως δεδομένο τις μεθόδους χειρισμού μικροαντικειμένων σε τυχαίες διαμορφώσεις προτείνεται στα πλαίσια της διατριβής μια μέθοδος για το αυτόνομο παράλληλο κεντράρισμα των μικροαντικειμένων μετά τη μεταφορά τους στην πλατφόρμα.

1. Αναπτύσσονται κανόνες γειτνίασης λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση και την ακριβή θέση μεταξύ των μικροαντικειμένων στην πλατφόρμα

2. Προτάθηκε μια νέα μέθοδος η οποία υπολογίζει ποια μικροαντικείμενα μπορούν να κεντραρισθούν ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου παραγωγής της πλατφόρμας αποφεύγοντας τις μεταξύ τους συγκρούσεις.

3. Οι υπολογισμοί της μεθόδου βοηθούν στο να απεγκλωβισθούν μικροαντικείμενα τα οποία είναι περικυκλωμένα από άλλα γειτονικά τους.

Εν συνεχεία, διερευνήθηκε η παράλληλη κίνηση πολλαπλών τετραγωνικών και εξαγωνικών κεντραρισμένων και ευθυγραμμισμένων μικροαντικειμένων στην πλατφόρμα, λαμβάνοντας υπόψη την προτεραιότητα του καθενός. Στο πλαίσιο αυτό:

- Αναπτύχθηκαν κανόνες για τον υπολογισμό του Χώρου Διαμορφώσεων, του Χώρου Στατικών Εμποδίων και του Ελεύθερου Χώρου Διαμορφώσεων για ένα μικροαντικείμενο στην «Εξυπνη Πλατφόρμα»

- Υπολογίσθηκε ο Ελεύθερος Χώρος Καταστάσεων για την παράλληλη κίνηση των μικροαντικειμένων. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν κανόνες για τις διαμορφώσεις που απαγορεύεται να λάβουν ταυτόχρονα τα μικροαντικείμενα κατά την παράλληλη κίνηση τους λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία τους, τις διαστάσεις τους και τις ενεργοποιήσεις που πρέπει να εφαρμοσθούν στα ηλεκτρόδια της πλατφόρμας ώστε να λάβουν τις αντίστοιχες διαμορφώσεις.

- Υπολογίσθηκαν μονοπάτια για την παράλληλη κίνηση των μικροαντικειμένων στο χωροχρόνο με την εφαρμογή ενός προσαρμοσμένου συνεργατικού A* αλγόριθμου (μCA^*).

➤ Σημαντική κρίνεται η συμβολή της νέας συνάρτησης κόστους που προτάθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Η πρωτοτυπία της έγκειται στη νέα ευρεστική της συνάρτηση μέσω της οποίας συνυπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των μικροαντικειμένων με μεγαλύτερη προτεραιότητα για τον εντοπισμό της επόμενης θέσης. Συγκρίνοντας τους υπολογισμούς του αλγορίθμου με τη συμβατική συνάρτηση του A* προέκυψε ότι η νέα συνάρτηση κόστους συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση των διακριτών κινήσεων που πρέπει να κάνει το κάθε μικροαντικείμενο ώστε να φτάσει στη θέση στόχο. Επίσης συνεισφέρει ώστε να βρεθούν λύσεις για την κίνηση των μικροαντικειμένων χωρίς να εγκλωβίζονται από τα υπόλοιπα στην πλατφόρμα.

- Αναπτύχθηκαν νέοι αλγόριθμοι για τον παράλληλο διαχωρισμό πολλαπλών μικροαντικειμένων με βάση τη γεωμετρία τους.

➤ Δείχθηκε ότι οι προτεινόμενοι κανόνες συμβάλλουν στον ταυτόχρονο διαχωρισμό των μικροαντικειμένων σε προκαθορισμένες περιοχές στην πλατφόρμα αποφεύγοντας τις συγκρούσεις μεταξύ τους

- Αναπτύχθηκαν νέοι αλγόριθμοι για την παράλληλη συναρμολόγηση πολλαπλών μικροαντικειμένων ίδιας γεωμετρίας αποφεύγοντας ανεπιθύμητες συγκρούσεις μεταξύ τους με το ελάχιστο δυνατό αριθμό ταυτόχρονων ενεργοποιήσεων των ηλεκτροδίων.

Κλείνοντας, στην παρούσα διατριβή παρουσιάσθηκαν μέθοδοι χειρισμού μικροαντικειμένων σε μια πλατφόρμα αγωγίμων επενεργητών η οποία μπορεί να λειτουργήσει ως μια αυτόνομη μονάδα στην γραμμή παραγωγής ενός μικρο – εργοστασίου χωρίς καμία παρέμβαση από κάποιο ρομποτικό βραχίονα. Στα Κεφάλαια της διατριβής διατίθενται αλγόριθμοι και μέθοδοι οι οποίοι υποδεικνύουν το πως πρέπει να χειρισθεί η πλατφόρμα τα μικροαντικείμενα από τη στιγμή που μεταφέρονται σε αυτή έως ότου τα παραδώσει σε ομάδες συναρμολογημένων πακέτων.

6.2. Ανοικτά ζητήματα και μελλοντική έρευνα

Οι μέθοδοι και οι προσομοιώσεις που προτάθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής επαληθεύουν τους ισχυρισμούς ότι η «Εξυπνη Πλατφόρμα» αποτελεί ένα ευέλικτο, αυτόνομο σύστημα για το παράλληλο χειρισμό πολλαπλών μικροαντικειμένων. Στο πλαίσιο αυτό η «Εξυπνη Πλατφόρμα» αγωγίμων ηλεκτροδίων βρίσκεται υπό κατασκευή σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Τα απόμεινα βήματα και η μελλοντική έρευνα θα εστιάσει στην ολοκλήρωση της κατασκευής της πλατφόρμας και στην εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων σε αυτή.

Παράρτημα

Π.1. Υπολογισμός της 1^{ης} παραγώγου της επιφάνειας αλληλεπικάλυψης δύο κυκλικών δίσκων διαφορετικών ακτινών ως προς την απόσταση των κέντρων τους

Η επιφάνεια μεταξύ δύο κυκλικών δίσκων με ακτίνες r , και R ισούται με:

$$A(d) = r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + r^2 - R^2}{2dr} \right) + r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + r^2 - R^2}{2dR} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{-d+r+R} \cdot \sqrt{d+r+R} \cdot \sqrt{d-r+R} \cdot \sqrt{d+r-R}$$

Όπου d η απόσταση των κέντρων τους. Η πρώτη παράγωγος της επιφάνειας ως προς την απόσταση d ισούται με:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(A(d))}{\partial d} \\ &= \frac{\partial \left(r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + r^2 - R^2}{2dr} \right) + r^2 \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + r^2 - R^2}{2dR} \right) - \frac{1}{2} \sqrt{-d+r+R} \cdot \sqrt{d+r+R} \cdot \sqrt{d-r+R} \cdot \sqrt{d+r-R} \right)}{\partial d} \\ &= \\ & \frac{\sqrt{(R+d+r) \cdot (R+d-r) \cdot (-R+d+r)}}{4\sqrt{R-d+r}} - \frac{r^2 \cdot (d^2 \cdot r + r \cdot \left(\frac{-R^2}{2} + \frac{d^2}{2} + \frac{r^2}{2} \right))}{1 - d^2 \cdot r^2 \sqrt{\left(\frac{-R^2}{2} + \frac{d^2}{2} + \frac{r^2}{2} \right)}} \\ & \quad - \frac{\sqrt{(R+d-r) \cdot (R-d+r) \cdot (-R+d+r)}}{4\sqrt{R+d+r}} \\ & \quad - \frac{\sqrt{(R+d+r) \cdot (R-d+r) \cdot (-R+d+r)}}{4\sqrt{R+d-r}} - \frac{r^2 \cdot (d^2 \cdot R + R \cdot \left(\frac{-R^2}{2} + \frac{d^2}{2} + \frac{r^2}{2} \right))}{1 - d^2 \cdot R^2 \sqrt{\left(\frac{-R^2}{2} + \frac{d^2}{2} + \frac{r^2}{2} \right)}} \\ & \quad - \frac{\sqrt{(R+d+r) \cdot (R+d-r) \cdot (R-d+r)}}{4\sqrt{-R+d+r}} \end{aligned}$$

Αναφορές

1. K.F. Böhringer, Ronald S. Fearing, Ken Y. Goldberg “Microassembly”, The Handbook of Industrial Robotics, p.p. 1045 -1066, John Wiley & Sons, (1999)
2. J. Cecil, Derek Powell, Daniel Vasquez “ Assembly and manipulation of micro devices – A state of the art survey”, Robotics and Computer – Integrated Manufacturing, vol.23,. p.p. 580 – 588 (2007)
3. Ravi K. Jain, Somajoyti Majumder, Bhaskar Ghosh, Surajit Saha, “Design and manufacturing of mobile micro manipulation system with a compliant piezoelectric actuator based micro gripper” ,Manufacturing System, Vol. (35), p.p. 76-91, (2015)
4. R.K.Jaina1S.Majumdera1A.Duttab “SCARA based peg-in-hole assembly using compliant IPMC micro gripper” Robotics and Autonomous Systems, Volume 61, Issue 3, p.p. 297-311 (2013)
5. Eric Diller, Metin Sitti “Three-Dimensional Programmable Assembly by Untethered Magnetic Robotic Micro-Grippers, Advanced Functional Materials, vol. 24, issue 28, p.p. 4397-4404 (2014)
6. Glen R. Kirkham ,Emily Britchford Thomas Upton, James Ware, Graham M. Gibson, Yannick Devaud Martin Ehrbar, Miles Padgett, Stephanie Allen, Lee D. Buttery & Kevin Shakesheff “Precision Assembly of Complex Cellular Microenvironments using Holographic Optical Tweezers”, Scientific Reports volume5, Article number: 8577 (2015)
7. M. Veiga-Gutiérrez M. Woerdemann E. Prasetyanto C. Denz L. De Cola “Optical-Tweezers Assembly-Line for the Construction of Complex Functional Zeolite L Structures”, Volume24, Issue38, p.p.5199-5204 (2012)
8. Jörg Seyfried, Marc Szymanski, Natalie Bender, Ramon Estaña, Michael Thiel, Heinz Wörn, “ Intelligent Small World Autonomous Robots for Micro-manipulation”, Swarm Robotics pp 70-83 (2004)
9. Alexander A. Solovev ,Samuel Sanchez, Martin Pumera, Yong Feng Mei, “Magnetic Control of Tubular Catalytic Microbots for the Transport, Assembly, and Delivery of Micro-objects” , Advanced Functional Materials Vol. 20, Issue15, p.p. 2430-2435, (2010)
- 10.L. Alting, F. Kimura, H.N. Hansen, G. Bicasso “Micro Engineering” , “world science.org”
- 11.Hui Xie and Stéphane Régnier “Three-dimensional automated micromanipulation using a nanotip ripper with multi-feedback”, Journal of Micromechanics and Microengineering,(2009)
- 12.Lidai Wang Lu Ren ; James K. Mills ; William L. Cleghorn, « Automated 3-D Micrograsping Tasks Performed by Vision-Based Control» , IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (Volume: 7 , Issue: 3 , July p.p. 417 – 426 (2010)
- 13.Zhe Lu1, Peter C Y Chen, Anand Ganapathy, Guoyong Zhao, Joohoo Nam, Guilin Yang, Etienne Burdet, “A force-feedback control system for micro-assembly”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Volume 16, Number 9
- 14.H. Van Brussel, J. Peirs, D. Reynaerts, A. Delchambre, F. Reinhart, N. Roth, M.Weck, E. Zussman,“Assembly of Microsystems”, Keynote Papers, CIRP , p.p.451 – 472 (2000)

- 15.S. Ruggeri, G. Fontanna, I. Fassi, “Micro – Assembly” Chapter 9, Micro – Manufacturing Technologies and Their Applications” Springer, p.p.223-259, (2017)
- 16.Gualtiero Fantoni, Marcello Porta “A Critical Review of Releasing Strategies in Microparts Handling”, IPAS 2008: Micro-Assembly Technologies and Applications p.p. 223-234 (2008)
- 17.R.S. Fearing “Survey of sticking effects for micro parts handling”, Proceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots,(1995)
- 18.K.-F. Bohringer, B. R. Donald, and N. C. MacDonald. Programmable vector fields for distributed manipulation, with applications to MEMS actuator arrays and vibratory parts feeders. Int. Journal of Robotics Research, Feb. (1999)
- 19.Jiangchun Luo , Lydia Kavraki “Part Assembly Using Static and Dynamic Force Fields”, Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, p.p. 1468 – 1473, (2000)
- 20.P. Lazarou, N.A. Aspragathos, “An integrated mechatronic approach for the systematic design of force fields and programming of microactuator arrays for micropart manipulation, Mechatronics vol. 19(3) p.p, 287-303 (2009)
- 21.Y. – A. Chapuis, L. Zhou, H. Fujita, Y. Herve “Multi – domain simulation using VHDL – AMS for distributed MEMS in functional environment: Case of a 2D air-jet micromanipulator”, Sensors and Actuators A, p.p.224-238, (2008)
- 22.K. Boutoustous. G.J.Laurent, E Dedu, L. Matigon, J. Bourgeois, N. Le Fort-Piat, “Distributed control architecture for smart surfaces” Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems, IROS
- 23.Dkhil, M.; Bolopion, A.; Regnier, D.; Gauthier, M. Modeling and experiments of high speed magnetic micromanipulation at the air/liquid interface. In Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Chicago, IL, USA, 14–18 September; pp. 4649–4655, doi:10.1109/IROS.2014.6943222 (2014)
- 24.Sun, W.; Khalil, I.S.M.; Mirsa, S.; Alterovitz, R. Motion Planning for Paramagnetic Microparticles under Motion and Sensing Uncertainty. In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Hong Kong, China, 31 May–7 June 2014; doi:10.1109/ICRA.2014.6907713.
- 25.Berkelman, P.; Dzadovsky, M. Magnetic Levitation Over Large Translation and Rotation Ranges in All Directions. IEEE Trans. Mech. 2013, 18, 44–52, doi:10.1109/TMECH.2011.2161614.
- 26.Chowdhury, S.; Jing, W.; Cappelleri, D. Towards Independent Control of Multiple Magnetic Mobile Microrobots. Micromachines 2016, doi:10.3390/mi7010003.
- 27.M. Boncheva, G. Whiteshides, “Making things by self –assembly” MRS bulletin, Vol. 30 (2005)
- 28.U. Srinivasan ; D. Liepmann ; R.T. Howe « Microstructure to substrate self-assembly using capillary forces», Journal of Microelectromechanical Systems (Volume: 10 , Issue: 1 , Mar 2001)
- 29.Karl F. Böhringer, “Modeling and Controlling Parallel Tasks in Droplet-Based Microfluidic Systems”, IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTER-AIDED DESIGN OF INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS, VOL. 25, NO. 2 (2006)

30. Karl-Friedrich Böhringer, Ken Goldberg, Michael Cohn, Roger Howe, Al Pisano, "Parallel Microassembly with Electrostatic Force Fields", International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Leuven, (1998).
31. Jiandong Fang and Karl F. Böhringer, "Wafer-Level Packaging Based on Uniquely Orienting Self-Assembly (The DUO-SPASS Processes)", JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 15, NO. 3, (2006)
32. Gengerbach, U.K.; Boole, C.J. Electrostatic feeder for contactless transport of miniature and microparts. Microrobot. Microassembly (2010)
33. Johan Dalin , Jürgen Wilde , Azeem Zulfiqar , Panos Lazarou , Aris Synodinos , Nikolaos Aspragathos , « Electrostatic attraction and surface-tension-driven forces for accurate self-assembly of microparts», Microelectronic Engineering 87 (2010) 159–162
34. Fumihito ARAI, Daisuke ANDOU, Toshio FUKUDA, "Adhesion Forces Reduction for Micro Manipulation Based on Micro Physics", Proceedings of Ninth International Workshop on Micro Electromechanical Systems, (2002)
35. Hesselbach, J., Buttgenbach, S., Wrege, J., Butefisch, S. and Graf, C. "Centering electrostatic microgripper and magazines for microassembly tasks" Proceedings of the SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly, Newton, Massachusetts, Vol. 4568 (2001)
36. N. Senthil Kumar, M. Saravanan, S. Jeevanathan, "Microprocessors and Microcontrollers", Oxford University Press, (2011)
37. S. K. Chou, W. M. Yang, K. J. Chua, J. Li, K. L. Zhang, "Development of micro power generators – A review", Applied Energy, vol. 18, p.p. 1 – 16, (2011)
38. Nakao, M., Tsuchiya, K., Matsumoto, K. and Hatamura, Y. Micro handling with rotational needle-type tools under realtime observation. Ann. CIRP, 2001, 50(1), 9–12.
39. Hesselbach, J., Buttgenbach, S., Wrege, J., Butefisch, S. and Graf, C. Centering electrostatic microgripper and magazines for microassembly tasks. In Proceedings of the SPIE Conference on Microrobotics and Microassembly, Newton, Massachusetts, 2001, Vol. 4568.
40. Gengerbach, U. and Boole, J. Electrostatic feeder for contactless transport of miniature and microparts. In Proceedings of the SPIE Conference on Microrobotics and Micromanipulation, Boston, Massachusetts, 2000, pp. 75–81.
41. Lazarou, P.; Aspragathos, N.; Wilde, J. Modeling simulation and design constraints of electrostatic self-assembly of microparts. CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 2011, 401–407, doi:10.1016/j.cirpj.2011.03.004
42. Alexander L. Schulz "Capacitors: Theory, Types and Applications (Electrical Engineering Developments), UK ed. Edition (2010)
43. M.D. Groner , J.W. Elam , F.H. Fabreguette , S.M. George, "Electrical characterization of thin Al₂O₃ films grown by atomic layer deposition on silicon and various metal substrates", Thin Solid Films, p.p. 186–197, (2002)
44. Engineering ToolBox, (2001). [online] Available at: <https://www.engineeringtoolbox.com>

- 45.M.Sausse Lhernoud, A. Delchambrem, S. Reginier, P. Lambert. “Electrostatic forces in micromanipulations: Review of analytical models in Simulations including roughness”, *Applied Surface Science*, Vol. 253, Issue 14, (2007)
- 46.F.Mondon S.Blankowski “Electrical characterisation and reliability of HfO₂ and Al₂O₃–HfO₂ MIM capacitors”, *Microelectronics Reliability* Volume 43, Issue 8, August 2003,p.p.1259-1266
- 47.Hango Hammer “Analytical Model for Comb-Capacitance Fringe Fields”, *Journal of Microelectromechanical Systems* (Volume: 19 , Issue: 1 , p.p. 175 - 182 (2010)
- 48.Knuth, D.: *The Art of Computer Programming, Volume 1, Fundamental Algorithms*, Addison – Wesley, (1968)
- 49.C. A. Glabsey and K. V. Mardia “A review of image – warping methods”, *Journal of Applied Statistics*, Vol. 25, p.p. 155 – 171 (1998)
- 50.M.D. Groner , J.W. Elam , F.H. Fabreguette , S.M. George, “Electrical characterization of thin Al₂O₃ films grown by atomic layer 2 3 deposition on silicon and various metal substrates” , *Thin Solid Films*, p.p. 186–197, (2002)
- 51.Nick Roussopoulos, Stephen Kelley, Frédéric Vincent “Nearest neighbor queries”, *Proceedings of the 1995 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, Pages 71-79 (1995)
- 52.Steven M. Lavalle “*Planning Algorithms*”, Cambridge University Press, (2006)
- 53.Parth Mehta, Hetasha Shah, Soumya Shukla, Saurav Verma, “A Review on Algorithms for Pathfinding in Computer Games”, *Conference: IEEE Sponsored 2nd International Conference on Innovations in Information Embedded and Communication Systems ICIIECS’15* (2015)
- 54.Sariff, N.; Buniyamin, N. An Overview of Autonomous Mobile Robot Path Planning Algorithms. In *Proceedings of the 4th IEEE Student Conference on Research and Development*, Selangor, Malaysia, 27–28 June 2006; pp. 183–188, doi:10.1109/SCORED.2006.4339335.
- 55.Warren, C.W. Fast Path Planning Using Modified A* Method. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, USA, 2–6 May 1993; pp. 662–667, doi:10.1109/ROBOT.1993.291883.
- 56.Duchon, F.; Babinec, A.; Kajan, M.; Beno, P.; Florek, M.; Fico, T.; Jurislca, L. Path planning with modified A star algorithm for a mobile robot. *Procedia Eng.* 2014, 96, 59–69, doi:10.1016/j.proeng.2014.12.098.
- 57.Zhang, Z.; Zhao, Z. A Multiple Mobile Robots Path Planning Algorithm Based on A-star and Dijkstra Algorithm. *Int. J. Smart Home* 2014, 8, 75–86, doi:10.14257/ijsh.2014.8.3.07.
- 58.Guo, Y.; Parker, L.E. A Distributed and Optimal Motion Planning Approach for Multiple Mobile Robots. In *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, USA, 11–15 May 2002; doi:10.1109/ROBOT.2002.1013625.
- 59.Kala, R. Multirobot motion planning using hybrid mnhs and genetic algorithms. *Appl. Artif. Intell.* 2013, 27, 170–198, doi:10.1080/08839514.2013.768880.

60. Wagner, G.; Choset, H. M*: A Complete Multirobot Path Planning Algorithm with Performance Bounds. In Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA, 25–30 September 2011; doi:10.1109/IROS.2011.6095022.
61. Silver, D. Cooperative Pathfinding. In Proceedings of the American Association of Artificial Intelligence, Marina del Rey, CA, USA, 1–3 June 2005; pp. 1–6.
62. Liberti Leo and Lavor Carille “Euclidean Distance Geometry”, Springer Undergraduate Texts in Mathematics and Technology
63. Meera Sitharam, Audrey St. John, Jessica Sidman “, Handbook of Geometric Constraint Systems Principles”, Chapman and Hall/CRC, B/W Illustrations, (2018)
64. Zhao, T.; Liu, H.; Roeder, K.; Lafferty, J.; Wasserman, L. The huge Package for High-Dimensional Undirected Graph estimation in R. J. Mach. Learn. Res. 2012, 13, 1059–1062.
65. Jan, G.E.; Chang, K.Y.; Parberry, I. Optimal Path Planning for Mobile Robot Navigation. IEEE/ASME Trans. Mech.(2008), 23, 451–460, doi:10.1109/TMECH.2008.200822.
66. Levent Bayındır “A review of swarm robotics tasks”, Neurocomputing, Volume 172, p.p. 292-321, (2016)

Σύντομο Βιογραφικό Σημείωμα

Η Κρητικού Γεωργία εισήχθη το 2007 στο Τμήμα Φυσικής της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Πατρών, από το οποίο αποφοίτησε το Φλεβάρη του 2013. Από το Φλεβάρη του 2013 έως και τον Ιούλιο του 2013 πραγματοποίησε πρακτική άσκηση στο Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής στο ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος στο πεδίο της «Συγκομιδής Ενέργειας» (energy harvesting). Τον Ιούλιο του 2013 έγινε δεκτή στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών για εκπόνηση διδακτορικής διατριβής στο γνωστικό πεδίο της Μίκρορομποτικής. Από το Μάρτιο του 2014 είναι υποψήφια διδάκτορας του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών. Παράλληλα προσέφερε επικουρικό έργο από τον Νοέμβριο του 2013 έως και σήμερα στις εργαστηριακές ασκήσεις των μαθημάτων του Τμήματος: «Ηλεκτροτενία και Ηλεκτρικές Μηχανές», «Μηχανοτρονικά», «Ρομποτική» και «Βιομηχανικός Αυτοματισμός». Έχει βοηθήσει στη συνεπίβλεψη τριών διπλωματικών εργασιών και μιας σπουδαστικής εργασίας. Από τη λήψη του πτυχίου της έως και το Σεπτέμβριο του 2017 παράλληλα με τις διδακτορικές της σπουδές εργαζόταν ως Φυσικός στην ιδιωτική εκπαίδευση. Το Σεπτέμβριο του 2017 έλαβε υποτροφία από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών στα πλαίσια του «Προγράμματος χορήγησης υποτροφιών για μεταπτυχιακές σπουδές δεύτερου κύκλου σπουδών» του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού για την Εκπαίδευση και τη Δια Βίου Μάθηση», το οποίο συγχρηματοδοτείται από το ΕΣΠΑ 2014 – 2020 και το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ). Στο πλαίσιο της διδακτορικής της διατριβής εκπόνησε 7 (επτά) δημοσιεύσεις (3 σε περιοδικά και 4 σε συνέδρια).