

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ – CPRL**

Τίτλος Διατριβής:

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ
ΜΕ ΑΤΕΛΕΙΕΣ, ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΠΑΛΜΟΥΣ LASER ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

**Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων
για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος υπό του**

Εμμανουήλ Γ. Σκαρβελάκη

Χανιά, Σεπτέμβριος 2015

Η διατριβή του Σκαρβελάκη Εμμανουήλ εγκρίνεται:

Νικολός Ιωάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Σταυρουλάκης Γεώργιος, Καθηγητής

Δημητρίου Βασίλης, Επίκουρος Καθηγητής

Η παρούσα εργασία αφιερώνεται
στη γυναίκα μου
και στους γονείς μου
που χωρίς την υποστήριξη και την υπομονή τους δεν θα ερχόταν σε πέρας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά, για την ευκαιρία που μου έδωσαν να εργαστώ στον τομέα των laser τους Καθηγητές του Τ.Ε.Ι Κρήτης Μιχάλη Ταταράκη και Νεκτάριο Παπαδογιάννη, όπως επίσης για την πολύτιμη συνεργασία και υποστήριξη στη διεκπεραίωση της διατριβής μου τον Υπ. Διδάκτορα του Πολυτεχνείου Κρήτης Κασελούρη Ευάγγελο, τον Επίκουρο Καθηγητή του Τ.Ε.Ι. Κρήτης Δημητρίου Βασίλειο, τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης Νικολό Ιωάννη και τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης Σταυρουλάκη Γεώργιο. Καθώς και όλους τους συνεργάτες του Διατμηματικού Εργαστηρίου Προσομοιώσεων & Μηχανολογικών Κατασκευών – SMM της Σχολής Εφαρμοσμένων Επιστημών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	7
1. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ.....	7
1.1 Μη καταστροφικός έλεγχος υλικών.....	7
1.2 Αλληλεπίδραση laser -μεταλλικού υλικού	9
1.2.1 Προσομοίωση αλληλεπίδρασης ns-laser με ύλη	11
1.3 Λεπτά υμένα –Thin films.....	14
1.3.1 Ανάπτυξη λεπτών φίλμ	16
1.3.2 Τεχνικές εναπόθεσης -deposition techniques.....	17
1.4 Έλεγχος ατελειών –defect detection	18
1.4.1 Ρωγμές –Cracks, Φυσαλίδες –Bubbles, Εγκλεισμοί –Enclosures.....	19
1.4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραματικών και θεωρητικών μελετών	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	24
2. Πεπερασμένα στοιχεία και σύζευξη θερμικών-μηχανικών προβλημάτων	24
2.1 FEM μοντέλο προσομοίωσης αλληλεπίδρασης laser -ύλης.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	31
3. FEM προσομοίωση δειγμάτων με ατέλειες -defects	31
3.1 Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης ατελειών ρωγμής -cracks	31
3.2 FEM μοντέλα μελέτης επιρροής πάχους, υλικού μεταλλικού φίλμ και ατελειών στη δυναμική συμπεριφορά του.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	36
4. Μαθηματική και υπολογιστική ανάλυση του FEM μοντέλου.....	36
4.1 Μαθηματική περιγραφή φυσικού προβλήματος	36
4.2 Μαθηματική μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων	37
4.3 Περιγραφή FEM μοντέλου	39
4.4 Οριακές συνθήκες B.C. και ιδιότητες των υλικών	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	47
5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων θερμομηχανικής συμπεριφοράς μεταλλικών δειγμάτων	47
5.1 Επίδραση πάχους μεταλλικών φίλμ ακτινοβολούμενων με ns-παλμούς laser στη δυναμική συμπεριφορά φίλμ-υποστρώματος	49
5.1.1 Au-01	50
5.1.2 Au-02	51
5.1.3 Au-03.....	55
5.1.4 Au-04.....	57
5.1.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης επιρροής παχών φίλμ Χρυσού.....	58

5.1.6 Cu-01.....	60
5.1.7 Cu-02.....	62
5.1.8 Cu-03.....	65
5.1.9 Cu-04.....	66
5.1.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης επιρροής παχών φιλμ Χαλκού	68
5.1.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων χρυσού-χαλκού.....	70
5.2 Μοντέλα με ατέλειες -cracks/gaps	71
5.2.1 C1.....	73
5.2.2 C2.....	76
5.2.3 C3.....	80
5.2.4 C4.....	83
5.2.5 C5.....	86
5.2.6 C6.....	90
5.2.7 C7.....	93
5.2.8 C8.....	96
5.2.9 C9.....	99
5.2.10 C10.....	102
5.2.11 C11	105
5.2.12 Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφορετικών περιπτώσεων μελέτης με ατέλεια.	108
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	112
6. Συμπεράσματα	112
Βιβλιογραφία Β	115

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προτεινόμενη μεταπτυχιακή εργασία αφορά τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης υπερβραχέων παλμών laser, με μεταλλικά δείγματα που παρουσιάζουν ατέλειες στη δομή τους. Βασίζεται σε μέρος των ερευνητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. Ευάγγελου Κασελούρη που αφορά τη μελέτη της αλληλεπίδρασης υπερβραχέων ns διάρκειας παλμών laser με μεταλλικά δείγματα χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Μελετάται η θερμομηχανική συμπεριφορά του υλικού καθώς και το πώς επηρεάζεται η συμπεριφορά των παραγόμενων υπερήχων λόγω της παρουσίας ατελειών. Πραγματοποιείται παραμετρική μελέτη για δείγματα από διαφορετικό υλικό και είδη ατελειών. Η συλλογή και σύγκριση των αποτελεσμάτων οδηγεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την διάγνωση, πρόβλεψη και ερμηνεία της συμπεριφοράς των υλικών με ατέλειες που εξετάζονται.

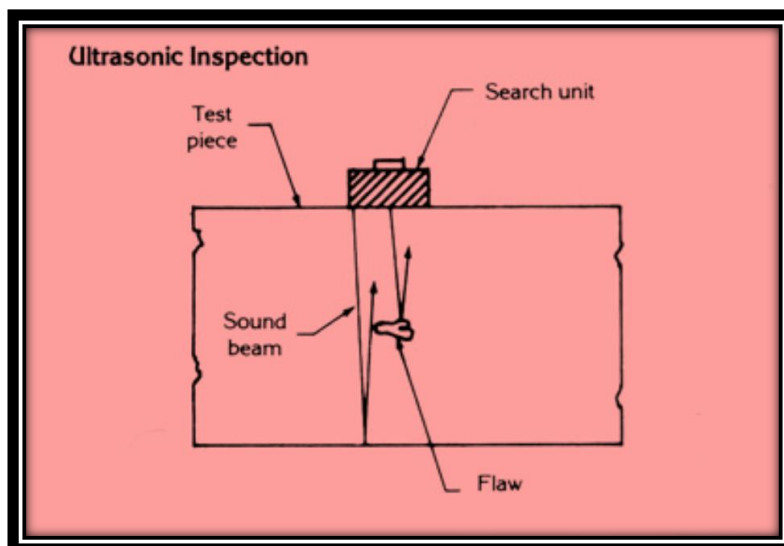
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΣΤΑΘΜΗ ΓΝΩΣΕΩΝ

1.1 Μη καταστροφικός έλεγχος υλικών

Μη Καταστροφικός Έλεγχος -ΜΚΕ είναι μια μεγάλη ομάδα τεχνικών ανάλυσης που χρησιμοποιούνται στον τομέα της επιστήμης και της βιομηχανίας για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων ενός υλικού, μέρους ή ολόκληρου συστήματος χωρίς να προκληθούν ζημιές σε αυτό. Οι όροι μη καταστροφική εξέταση, μη καταστροφική επιθεώρηση και μη καταστροφική αξιολόγηση χρησιμοποιούνται επίσης για να περιγράψουν αυτήν την τεχνολογία. Επειδή η διαδικασία ΜΚΕ δεν μεταβάλλει μόνιμα το αντικείμενο που πρόκειται να επιθεωρηθεί, είναι μια εξαιρετικά πολύτιμη τεχνική που μπορεί να εξοικονομήσει χρόνο και χρήμα στην αξιολόγηση των προϊόντων, αντιμετώπιση προβλημάτων και την έρευνα. Κοινές μέθοδοι ΜΚΕ περιλαμβάνουν υπερήχους, μαγνητικά σωματίδια, διεισδυτικά υγρά, ραδιογραφίες, απομακρυσμένη οπτική επιθεώρηση, δοκιμές ροής με στροβίλους και χαμηλής συνέχειας συμβολομετρία. Η ΜΚΕ χρησιμοποιείται συνήθως στην ιατροδικαστική, μηχανολογία, στον κλάδο των ηλεκτρολόγων μηχανικών, πολιτικών μηχανικών, μηχανικών συστημάτων, αεροναυπηγικής, ιατρικής αλλά και στην τέχνη.

Οι ΜΚΕ βασίζονται στη χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, του ήχου και των εγγενών ιδιοτήτων των υλικών για την εξέταση δειγμάτων. Το εσωτερικό ενός δείγματος μπορεί να εξετασθεί με διεισδυτική ακτινοβολία, όπως ακτίνες -Χ ή νετρονίων. Τα ηχητικά κύματα χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των δοκιμών με υπερήχους. Σχηματική αναπαράσταση επιθεώρησης με υπερήχους για την εύρεση ελαττώματος σε δείγμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1 [1]. Μονάδα ανίχνευσης υπερήχων –search unit, τοποθετείται στο επιθεωρούμενο δείγμα –test piece, και ανιχνεύεται η ύπαρξη ατέλειας - flaw, με βάση την μεταβολή της ανακλώμενης ηχητικής δέσμης –sound beam. Η αύξηση της αντίθεσης μεταξύ του δοκιμίου και του ελαττώματος που βρίσκεται σε αυτό, μπορεί να πραγματοποιηθεί με την χρήση υγρών που θα διεισδύουν στις ρωγμές κόπωσης, για την εξέταση με γυμνό μάτι. Μία τέτοια μέθοδος με υγρά περιλαμβάνει τη χρήση χρωμάτων, φθορισμού ή μη φθορισμού, σε ρευστά για μη μαγνητικά υλικά συνήθως μέταλλα [2].



Σχήμα 1.1 Τυπική διαδικασία ελέγχου με υπερήχους για την ανίχνευση ελαττώματος [1].

Μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος ΜΚΕ που χρησιμοποιείται για υλικά από σίδηρο βασίζεται στη χρήση λεπτών σωματιδίων σιδήρου που εφαρμόζονται σε ένα τμήμα του αντικειμένου, ενώ αυτό είναι εξωτερικά μαγνητικά διεγερμένο. Τα σωματίδια προσελκύονται από πεδία διαρροής εντός του αντικειμένου δοκιμής, και σχηματίζουν ειδικές μορφές στην επιφάνεια των αντικειμένων. Η δοκιμή με μαγνητικά σωματίδια μπορεί να εμφανίσει κάποιες ατέλειες στην επιφάνεια και κάτω από αυτήν, δηλαδή στο εσωτερικό του δείγματος. Αντίστοιχα, το φαινόμενο του θερμοηλεκτρισμού εκμεταλλεύεται τις θερμικές ιδιότητες ενός κράματος για να χαρακτηρίσει γρήγορα και εύκολα πολλά κράματα. Ακόμη, υπάρχει η χημική μέθοδος που επιστρατεύει την χρήση ευαίσθητων χημικών ουσιών που μπορούν να υποδηλώσουν την παρουσία των επιμέρους στοιχείων του κράματος. Τέλος, οι ηλεκτροχημικές μέθοδοι, όπως ηλεκτροχημικοί αισθητήρες ρωγμών κόπωσης, χρησιμοποιούν την τάση του μεταλλικού δομικού υλικού να οξειδώνεται εύκολα με σκοπό την ανίχνευση προοδευτικής βλάβης [2].

Μετά την αλματώδη εξέλιξη των πηγών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που σημειώθηκαν τα τελευταία 30 χρόνια οι μέθοδοι χαρακτηρισμού μπορούν να καταταγούν σε δύο βασικές κατηγορίες:[3]

- i. Στις συμβατικές μεθόδους που στηρίζονται στην χρήση «φωτός» από συμβατικές πηγές όπως για παράδειγμα τα laser, οι λάμπες υπεριώδους ή υπέρυθρου, οι ακτίνες X που παράγονται από συμβατικές πηγές

- ii. Στις μεθόδους που στηρίζονται σε «φως» που παράγεται από μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής ακτινοβολίας synchrotron που καλύπτει το φάσμα από το υπέρυθρο μέχρι τις σκληρές ακτίνες Χ.

Η ακτινοβολία ενός παλμικού laser σε λεπτά φιλμ είναι ένα ευέλικτο εργαλείο για τη διέγερση των υλικών. Οι οπτικές μέθοδοι παραγωγής υπερήχων σε στερεά υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε τομείς όπως η μη-καταστρεπτική δοκιμή και ο χαρακτηρισμός των υλικών, ο προσδιορισμός των μηχανικών και ελαστικών ιδιοτήτων τους, και εφαρμογές ανίχνευσης σπασιμάτων. Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στη διερεύνηση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς μεταλλικών δειγμάτων με ατέλειες και πιο ειδικά σε λεπτά μεταλλικά υμένα εναποτιθέμενα σε διηλεκτρικά υποστρώματα. Η διέγερση αυτών πραγματοποιείται με ακτινοβολία από παλμούς laser και η δυναμική συμπεριφορά τους μελετάται με τη χρήση προσομοιώσεων βασιζόμενων στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η χρήση των παραγόμενων υπερήχων από παλμούς laser, για την εύρεση μεταβολών στη συμπεριφορά του άρα και στη δομή του, αποτελεί βασική μέθοδο ΜΚΕ. Αυτή η μέθοδος μελετάται και αναλύεται στην παρούσα διατριβή.

1.2 Αλληλεπίδραση laser -μεταλλικού υλικού

Ο όρος Laser προέρχεται από το αγγλικό ακρωνύμιο “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” που αποδίδεται στα ελληνικά ως η ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Το πρώτο laser κατασκευάστηκε το 1960 στη Καλιφόρνια και ονομάζεται Ruby Laser. Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων τα laser παρέχουν εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια δέσμης, ταχύτητα και ευκολία, μεγάλη ανάλυση και τέλος τη δυνατότητα συγκέντρωσης υψηλής ενέργειας σε μικρή επιφάνεια.

Τα πλεονεκτήματα των lasers είναι: η μονοχρωματικότητα της ακτινοβολίας δηλαδή τα μήκη κύματος των Laser κυμαίνονται από τη περιοχή των υπέρυθρων ως εκείνη των υπεριωδών κυμάτων; η κατευθυντικότητα της δέσμης και η λαμπρότητα της δέσμης με εξαιρετικά μεγάλη ένταση έχοντας χαρακτηριστικό παράδειγμα το laser He-Ne με λαμπρότητα με 100 φορές μεγαλύτερη από αυτή του ήλιου; η σύμφωνη ακτινοβολία ή αλλιώς η απόλυτη και σταθερή συσχέτιση μεταξύ μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του χώρου με αυτές σε κάθε άλλο σημείο; τέλος η πόλωση της δέσμης Laser και η λεπτότητα φασματικής γραμμής είναι ακόμη ένα μεγάλο πλεονέκτημα των laser [4].

Η χρήση των laser για τη διέγερση, επεξεργασία και μελέτη της ύλης, αποτελεί πλέον μια από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές. Συνήθεις εφαρμογές της αλληλεπίδρασης περιλαμβάνουν την τήξη με laser, την ενίσχυση επιφανειών με δονήσεις παραγόμενες από laser, φυσικές και χημικές μετρήσεις, καθαρισμό επιφανειών, κατεργασίες συγκόλλησης, κοπής και διάτρησης. Η ικανότητα της ακτινοβολίας των παλμικών laser να παράγουν ευρυζωνικά σήματα χρησιμοποιείται επίσης για την ανίχνευση της επιφανειακής δομής, της σύνθεσης, της γεωμετρίας, της τραχύτητας και της μέτρησης των δομικών ιδιοτήτων μεταλλικών δειγμάτων. Οι κύριες περιοχές ακτινοβολήσης της ύλης των παλμικών laser είναι η θερμοελαστική όπου το υλικό βρίσκεται κάτω από το όριο τήξης του, η περιοχή τήξεως και η περιοχή φωτοαποδόμησης κατά την οποία η ύλη περνάει το όριο διαρροής και καταρρέει. Τότε, εάν οι συνθήκες το ευνοήσουν, η ύλη φτάνει στην τέταρτη κατάστασή της, το πλάσμα –plasma [5,6,7].

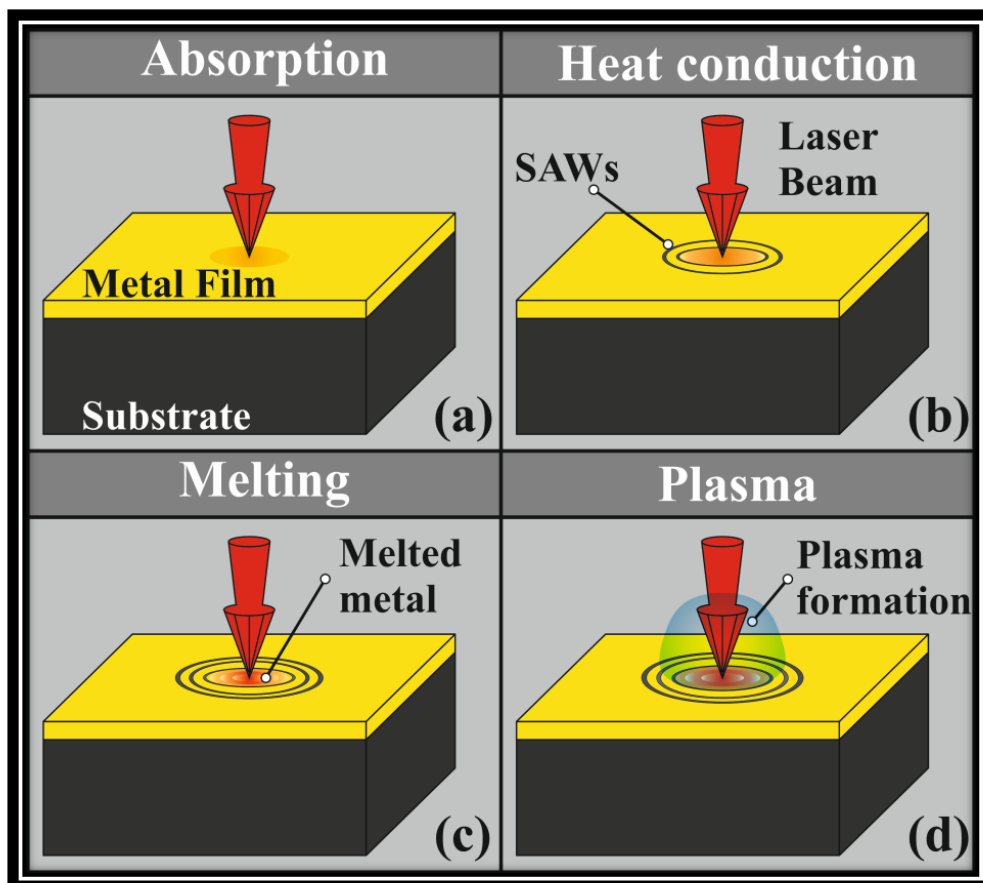
Βασικό χαρακτηριστικό που λαμβάνει χώρα κατά την ακτινοβολήση με παλμικό laser της ύλης είναι οι υπέρηχοι –SAWs (surface acoustic waves) που γεννούνται και διαδίδονται σε αυτή. Τα παραγόμενα από laser ακουστικά κύματα, εμφανίζονται σε όλες τις περιοχές ακτινοβολίας της ύλης, τη θερμοελαστική, τήξεως και φωτοαποδόμησης και προσελκύουν το ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω της δυνατότητας του μη-καταστρεπτικού προσδιορισμού των δομικών στοιχείων του ακτινοβολούμενου δείγματος. Τα SAWs είναι ηχητικά κύματα που ταξιδεύουν κατά μήκος της επιφάνειας με πλάτος που συνήθως μειώνεται εκθετικά με το βάθος του υποστρώματος.

Κατά την αλληλεπίδραση παλμικού laser με λεπτά μεταλλικά υμένια, η διάδοση των SAWs κατά μήκος της λεπτής επιφάνειας του φιλμ επηρεάζεται από το πάχος του φιλμ, δεδομένου ότι είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με το μήκος κύματος που έχουν. Επιπλέον η διάδοση των SAWs εξαρτάται τόσο από τις ιδιότητες του φιλμ, όσο κι από αυτές του υποστρώματος, αναδεικνύοντας τα SAWs ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τον προσδιορισμό των μηχανικών και ελαστικών ιδιοτήτων τους. Τα χαρακτηριστικά των παραγόμενων από laser υπέρηχων εξαρτώνται έντονα από τις θερμικές και μηχανικές ιδιότητες του υλικού, από τη θερμική ικανότητα διάχυσης, την οπτική διείσδυση, την δομή και σύσταση του υλικού αλλά και παραμέτρους της πηγής laser όπως η ενέργεια, η διάμετρος της εστίας και η διάρκεια του παλμού [7].

1.2.1 Προσομοίωση αλληλεπίδρασης ns-laser με ύλη

Η αλληλεπίδραση διάρκειας νάνο-δευτερόλεπτων –nanoseconds -ns παλμών laser με μεταλλικά λεπτά φιλμ αποτελεί ερευνητικό θέμα συνεχούς ενδιαφέροντος λόγω των σημαντικών εφαρμογών που έχει. Οι εφαρμογές αυτές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών κλάδων, από τις κατεργασίες με laser, την επιμετάλλωση, τις νανοκατασκευές, μέχρι την παραγωγή υπερήχων υψηλής συχνότητας για μη καταστροφικές δοκιμές και τον χαρακτηρισμό υλικών. Επιπλέον, τέτοιες αλληλεπιδράσεις laser παλμών με λεπτά φιλμ μετάλλου προσελκύουν σημαντικό ενδιαφέρον λόγω των θεμελιωδών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα. Η δυναμική αντίδραση της ύλης που ακτινοβολείται από μια πηγή laser ns παλμού εξαρτάται από τις θερμομηχανικές ιδιότητες της ύλης, καθώς και από τα χαρακτηριστικά του παλμού laser. Για την κατανόηση αυτού του πολύπλοκου φυσικού φαινομένου της αλληλεπίδρασης, διάφορες αναλυτικές και αριθμητικές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί. Ωστόσο, οι αριθμητικές μέθοδοι είναι περισσότερο κατάλληλες για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων που εμπλέκεται μεγάλος αριθμός δυναμικά μεταβαλλόμενων παραμέτρων.

Κατά τη διάρκεια αλληλεπίδρασης ns παλμών laser με film, οι παλμοί laser μεταφέρουν την ενέργεια τους στην επιφάνεια του φιλμ και αυτή με την σειρά της την απορροφά. Οι θερμο-μηχανικές ιδιότητες του λεπτού υμενίου μεταβάλλονται δυναμικά λόγω της σταδιακής θέρμανσής του. Η αποτελεσματικότητα ενός λεπτού φιλμ εξαρτάται καθοριστικά από τις χημικές του ιδιότητες καθώς και από τα μακροσκοπικά μηχανικά χαρακτηριστικά του, όπως το πάχος του και η κόλλησή του -adhesion στο υπόστρωμα. Η αλληλεπίδραση των παλμών laser με το φιλμ καθορίζεται από την χαρακτηριστική χρονική αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με το πλέγμα σε διάρκεια πικο-δευτερολέπτων –picoseconds -ps. Δεδομένου ότι ένας ns παλμός laser είναι τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος, μπορεί να θεωρηθεί ότι υπάρχει θερμική ισορροπία μεταξύ των ηλεκτρονίων και του πλέγματος κατά τη διάρκεια της ακτινοβολήσής του στόχου από το laser.



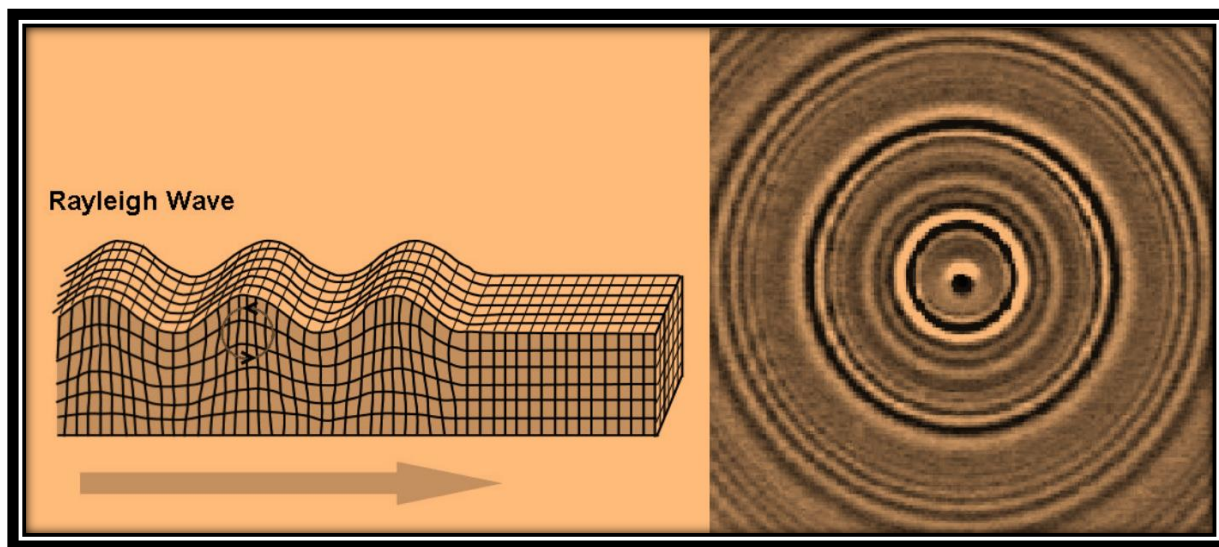
Σχήμα 1.2 Περιοχές ύλης κατά την ακτινοβολήση με παλμό laser [8].

Κατά την αλληλεπίδραση ns παλμού laser με μεταλλικό φιλμ, τρεις είναι οι περιοχές ενδιαφέροντος ανάλογα με την απορροφούμενη ενέργεια του laser από το στόχο. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 1.2 τρεις βασικές περιοχές καθορίζουν τη συμπεριφορά του δείγματος: α) η θερμοελαστική περιοχή, β) η περιοχή τήξεως και γ) η περιοχή φωτόαποδόμησης.

Για χαμηλές εντάσεις ακτινοβολίας laser, η θερμοελαστική περιοχή κυριαρχεί, όπου η καθοδηγούμενη παραμόρφωση της επιφάνειας του φιλμ δεν επηρεάζει τις ελαστικές ιδιότητες του πλέγματος και κατ' επέκταση του φιλμ. Λόγω της απορρόφησης -absorption της ενέργειας του laser από την επιφάνεια του φιλμ (βλ. Σχήμα 1.2a), η θερμοκρασία του ακτινοβολούμενου δείγματος αυξάνεται, η οποία με τη σειρά της προκαλεί τοπική θερμική διαστολή λόγω της αγωγιμότητας –heat conduction. Η τοπική θερμική διαστολή δημιουργεί ένα πεδίο τάσεων και υπερηχητικών κυμάτων που διαδίδονται στο στόχο. Οι υπέρηχοι που δημιουργούνται από το laser διαδίδονται ακτινικά, έξω από την περιοχή αλληλεπίδρασης και προς όλες τις κατευθύνσεις (βλ. Σχήμα 1.2b). Λόγω του μικρού μήκους κύματος και της μικρής τους διάρκειας αυτού του είδους τα ακουστικά κύματα –

SAWs, είναι πολύ χρήσιμα σε ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η παραγωγή και η μελέτη των υπερήχων αυτών χρησιμοποιώντας ης παλμούς laser αποτελεί αντικείμενο έρευνας από ερευνητικές ομάδες τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά. Επιπλέον, τα επιφανειακά ακουστικά κύματα έχουν αποδειχθεί ότι είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τον προσδιορισμό των μηχανικών και ελαστικών ιδιοτήτων των φιλμ και των υποστρωμάτων τους [8]. Καθώς η ένταση του laser αυξάνεται, η θερμοκρασία της επιφάνειας του φιλμ φθάνει το σημείο τήξης του. Κατά συνέπεια, οι μηχανικές, οι θερμικές καθώς και οι οπτικές ιδιότητες του υλικού του φιλμ αλλάζουν γρήγορα. Το υλικό λιώνει και μεταβαίνει σε ρευστή κατάσταση –melted στην περιοχή τήξεως (βλ. Σχήμα 1.2c).

Για ακόμα υψηλότερες εντάσεις laser στο στόχο, η θερμοκρασία στην επιφάνεια του φιλμ φτάνει στο σημείο βρασμού και έτσι αρχίζει η διαδικασία αφαίρεσης υλικού από το στόχο. Αυτή είναι η περιοχή φωτοαποδόμησης. Σε υψηλότερες ακόμα εντάσεις, η θερμοκρασία των ατμού που έχει δημιουργηθεί αυξάνεται και έχει ως αποτέλεσμα την ατομική διέγερση και τον ιονισμό του. Το ιονισμένο αυτό αέριο συνεχίζει να απορροφά τα προσπίπτοντα φωτόνια από το laser, με αποτέλεσμα όταν ξεπεράσει συγκεκριμένο κατώφλι πυκνότητας ροής ενέργειας (laser fluence) να ονομάζεται πλάσμα (βλ. Σχήμα 1.2d) [8]. Κύρια κατηγορία των SAWs που δημιουργούνται και αναλύονται αποτελούν τα κύματα Rayleigh.



Σχήμα 1.3 Μετάδοση κύματος Rayleigh και η διάδοση του κύματος Rayleigh στην επιφάνεια φύλλου χρυσού πάνω σε γυαλί.

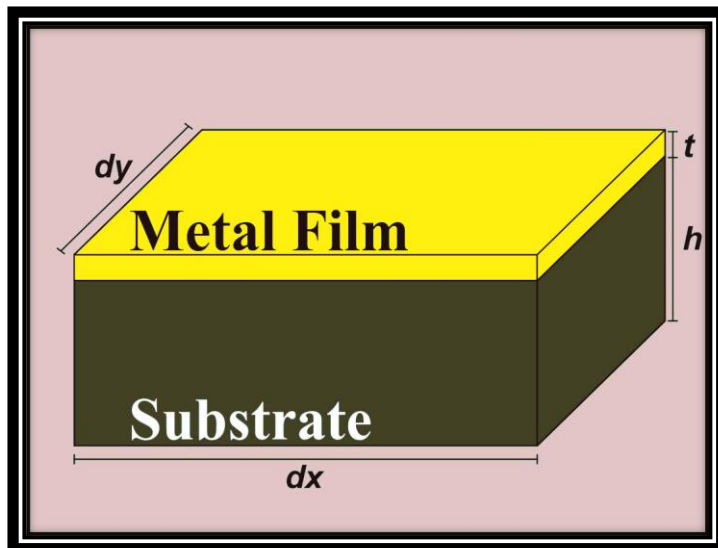
Στο Σχήμα 1.3 απεικονίζεται η εγκάρσια και η διαμήκης διάδοση των Rayleigh κυμάτων πάνω στην επιφάνεια μετάλλου τοποθετημένου σε γυαλί. Η ύπαρξη των κυμάτων

Rayleigh είχε προβλεφθεί το 1885 από τον Lord Rayleigh, από τον οποίο πήραν το όνομά τους. Τα κύματα Rayleigh είναι ένας τύπος επιφανειακών ακουστικών κυμάτων που ταξιδεύουν σε στερεά. Μπορούν να παραχθούν σε υλικά με πολλούς τρόπους, όπως με τοπική επίδραση ή με πιεζοηλεκτρική μεταγωγή, και χρησιμοποιούνται συχνά σε μη καταστρεπτικούς ελέγχους για την ανίχνευση ελαττωμάτων. Αποτελούν μέρος των σεισμικών κυμάτων που παράγονται στη Γη από τους σεισμούς. Όταν καθοδηγούνται σε στρώματα αναφέρονται ως κύματα Lamb, κύματα Rayleigh-Lamb, ή γενικευμένα κύματα Rayleigh. Πραγματοποιούν ταυτόχρονα διαμήκεις και εγκάρσιες κινήσεις που μειώνονται εκθετικά σε πλάτος καθώς η απόσταση από την επιφάνεια αυξάνεται και υπάρχει διαφορά φάσης μεταξύ αυτών των δύο κινήσεων. Σε ισοτροπικά στερεά αυτά τα κύματα προκαλούν τα σωματίδια επιφάνειας να κινούνται ελλειπτικά σε επίπεδα κάθετα προς την επιφάνεια και παράλληλα προς την κατεύθυνση της διάδοσης. Στην επιφάνεια και σε μικρά βάθη η κίνηση αυτή είναι παλινδρομική καθώς μέσα στο επίπεδο ενός σωματιδίου είναι αριστερόστροφη, όταν το κύμα ταξιδεύει από αριστερά προς τα δεξιά. Σε μεγαλύτερα βάθη η κίνηση των σωματιδίων γίνεται γραμμική. Επιπλέον, το πλάτος κίνησης φθίνει και η εκκεντρότητα αλλάζει καθώς το βάθος στο υλικό αυξάνει. Το βάθος της μετατόπισης στο στερεό είναι περίπου ίσο με το μήκος του ακουστικού κύματος. Τα κύματα Rayleigh είναι διακριτά από τα άλλα είδη των επιφανειακών ή καθοδηγούμενων ακουστικών κυμάτων, όπως τα κύματα -Love waves ή τα κύματα -Lamb waves, που είναι είδη κατευθυνόμενων κυμάτων που υποστηρίζονται από ένα στρώμα, ή διαμήκη και εγκάρσια κύματα, τα οποία ταξιδεύουν σε όλο το στερεό. Δεδομένου ότι τα κύματα Rayleigh περιορίζονται κοντά στην επιφάνεια, το πλάτος τους μέσα στο επίπεδο όταν παράγονται από μια σημειακή πηγή φθίνει μόνο έως $1/\sqrt{r}$, όπου r η ακτινική απόσταση. Ως εκ τούτου, τα επιφανειακά κύματα μειώνονται πιο αργά με την απόσταση από ότι φθίνουν τα κύματα που μεταδίδονται σε όλο τον όγκο του δοκιμίου, τα οποία εξαπλώνονται σε τρεις διαστάσεις από μια σημειακή πηγή [9].

1.3 Λεπτά υμένια –Thin films

Το λεπτό υμένιο –Thin film, είναι ένα λεπτό φιλμ αποτελούμενο από ένα στρώμα από υλικά που κυμαίνονται από κλάσματα ενός νανόμετρου –μονοστιβάδα έως μερικά μικρόμετρα σε πάχος. Η σχηματική απεικόνιση που έχει καθιερωθεί για αυτά παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.4 [10]. Οι ηλεκτρονικές συσκευές ημιαγωγών και οι οπτικές

επικαλύψεις είναι οι κύριες εφαρμογές που επωφελούνται από την κατασκευή λεπτών ταινιών. Μια γνωστή εφαρμογή των λεπτών φιλμ είναι ο οικιακός καθρέφτης, ο οποίος τυπικά έχει μία λεπτή μεταλλική επίστρωση στο πίσω μέρος ενός φύλλου γυαλιού για να σχηματίσει μια αντανάκλαστική διεπαφή. Η διαδικασία της επαργύρωσης συνήθως χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή καθρεφτών.



Σχήμα 1.4 Σχηματική απεικόνιση συστήματος λεπτού υμενίου –metal film πάχους $-t$, με υπόστρωμα –substrate πάχους $-h$, πλάτους $-dy$ και μήκους $-dx$.

Η απόδοση των οπτικών επικαλύψεων για παράδειγμα ανακλαστικών ή μη ανακλαστικών AR επιχρισμάτων, συνήθως ενισχύεται όταν η επικάλυψη λεπτής μεμβράνης αποτελείται από πολλαπλά στρώματα που έχουν διάφορα πάχη και δείκτες διάθλασης. Ομοίως, μια περιοδική δομή εναλλασσόμενων λεπτών φιλμ από διαφορετικά υλικά μπορούν να σχηματίζουν συλλογικά ένα λεγόμενο υπέρ-πλέγμα, το οποίο εκμεταλλεύεται το φαινόμενο του κβαντικού περιορισμού, περιορίζοντας ηλεκτρονικά φαινόμενα σε δύο διαστάσεις. Έχει γίνει μελέτη με σιδηρο-μαγνητικά και σιδηρο-ηλεκτρικά λεπτά φιλμ, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ως μνήμη υπολογιστή. Ακόμη, έχουν εφαρμοστεί σε φαρμακευτικά προϊόντα με χρήση λεπτής μεμβράνης για τη χορήγηση φαρμάκου. Λεπτά υμένια χρησιμοποιούνται και στην παραγωγή μπαταριών καθώς και ηλιακών κυψελών.

Τα κεραμικά λεπτά φιλμ είναι υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην βιομηχανία. Η σχετικά υψηλή σκληρότητα και αδράνεια των κεραμικών υλικών κάνουν αυτό τον τύπο λεπτής επίστρωσης να έχει ενδιαφέρον για την προστασία των υλικών υποστρώματος από την διάβρωση, οξείδωση και φθορά. Ειδικότερα, η χρήση αυτών των επικαλύψεων στα κοπτικά εργαλεία μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των

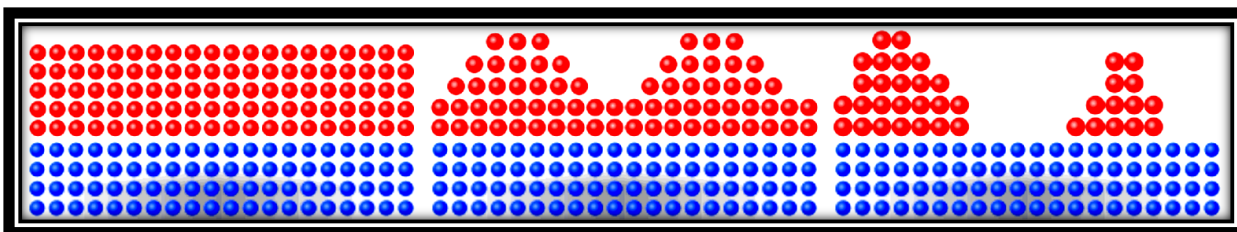
στοιχείων αυτών κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Έρευνα γίνεται σε μια νέα κατηγορία υλικών λεπτής μεμβράνης από ανόργανα οξείδια, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή διαφανών τρανζίστορ και είναι φθηνά, σταθερά και φιλικά προς το περιβάλλον [10].

Η τεχνολογία λεπτών υμενίων αναπτύσσεται ραγδαία με εφαρμογές που καλύπτουν σχεδόν όλους τους τομείς της βιομηχανικής δραστηριότητας. Οι θερμομηχανικές ιδιότητες των λεπτών υμενίων γίνονται όλο και πιο σημαντικές ειδικά για εφαρμογές σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες. Μερικές εφαρμογές τέτοιων ακραίων συνθηκών είναι οι ηλεκτρονικές συσκευές που χρησιμοποιούνται στη διαστημική βιομηχανία και σε πυρηνικές εφαρμογές, τα εσωτερικά τοιχώματα ακτινοβολούμενων θαλάμων υψηλής ενέργειας, και τα οπτικά υλικά που υποστηρίζουν υψηλής ισχύος laser. Η βελτίωση των υλικών των φιλμ, καθώς και ο έλεγχος και η βελτιστοποίηση των θερμομηχανικών ιδιοτήτων τους και οι διαδικασίες παραγωγής τους απαιτούν νέους τρόπους για την παρακολούθηση των ελαττωμάτων τους και το χαρακτηρισμό των ιδιοτήτων τους [11].

1.3.1 Ανάπτυξη λεπτών φιλμ

Η ανάπτυξη λεπτών φιλμ μπορεί να ομαδοποιηθεί σε τρεις κατηγορίες όπως και παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.5 [10]

- i. **Frank Van der Merwe** - «στρώμα με στρώμα». Με αυτόν τον τρόπο ανάπτυξης οι αλληλεπιδράσεις απορρόφησης-επιφάνειας και απορρόφησης-απορρόφησης είναι ισορροπημένες. Αυτό το είδος της ανάπτυξης απαιτεί το ταίριασμα του πλέγματος, και ως εκ τούτου θεωρείται ένα ιδανικό μοντέλο ανάπτυξης.
- ii. **Stranski-Krastanov** - «ενωμένα νησιά». Εδώ οι αλληλεπιδράσεις απορρόφησης-επιφάνειας είναι ισχυρότερες από τις αλληλεπιδράσεις απορρόφησης-απορρόφησης.
- iii. **Volmer-Weber** - «απομονωμένα νησιά». Οι αλληλεπιδράσεις απορρόφησης-απορρόφησης είναι ισχυρότερες από τις αλληλεπιδράσεις απορρόφησης-επιφάνειας.



Σχήμα 1.5 Μοντέλα ανάπτυξης λεπτών φίλμ: Frank-van-der-Merwe, Stranski–Krastanov και Volmer-Weber [10].

1.3.2 Τεχνικές εναπόθεσης -deposition techniques

Η πράξη της εφαρμογής ενός λεπτού φίλμ σε μια επιφάνεια ονομάζεται απόθεση λεπτού φίλμ -thin film deposition, όπως ομοίως και κάθε τεχνική για την εναπόθεση ενός λεπτού φίλμ του υλικού επάνω σε ένα υπόστρωμα ή σε προηγούμενα ανατοποθετημένα στρώματα. «Λεπτό» είναι ένας σχετικός όρος, αλλά οι περισσότερες τεχνικές εναπόθεσης περιορίζουν το πάχος της στρώσης εντός λίγων δεκάδων νανομέτρων. Οι τεχνικές απόθεσης εμπίπτουν σε τρεις ευρείες κατηγορίες, ανάλογα με το αν η διαδικασία είναι κατά κύριο λόγο χημική, φυσική ή μηχανική.

Τεχνικές Εναπόθεσης				
Μηχανικές	Φυσικές			Χημικές
Ψεκασμός	Μηχανική συγκόλληση	Συμπύκνωση	Καθοδική διασκόρπιση	Τεχνική Sol-Gel
Βαφή	Συγκόλληση με διάχυση	Φυσική εναπόθεση	Επίταξη μοριακής δέσμης	Τεχνική Langmuir
Επίστρωση με βύθιση	Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με laser SLS	Επίταξη υγρής φάσης LPE	Επίταξη ραδιοσυχνοτήτων	Απόθεση ατομικού στρώματος ALD
	Χαλκοσυγκόλληση		Παλμική εναπόθεση με laser	Μαγνητο-οπτική MOCVD
	3Δ-εκτυπωτής			Ενισχυμένη με πλάσμα PECVD

Πίνακας 1.1 Κατηγορίες τεχνικών απόθεσης [10].

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες τεχνικών απόθεσης που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Η μηχανική απόθεση είναι η φθηνότερη και μπορεί να πραγματοποιηθεί με ψεκασμό, βαφή, επίστρωση με βύθιση. Η φυσική εναπόθεση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε μηχανική συγκόλληση, συμπύκνωση ή επιμετάλλωση. Η συγκόλληση συνήθως σημαίνει την εφαρμογή πίεσης και θερμοκρασίας. Στην

περίπτωση της συγκόλλησης με διάχυση, η ενεργοποιημένη επιφάνεια συγκόλλησης - surface activated bonding -SAB χρησιμοποιείται στη μικροηλεκτρονική μετά την ανακάλυψη ότι καθαρισμένες και ατομικά επίπεδες γυαλισμένες επιφάνειες μπορούν να συνδέονται με σχετικά χαμηλή πίεση και χαμηλή θερμοκρασία. Στην περίπτωση χαλαρής συγκόλλησης, ισχυρής συγκόλλησης και ακόμη πιο ισχυρής συγκόλλησης, συχνά προστίθενται λιπαντικά και οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες. Η επιλεκτική πυροσυσσώματωση με laser -selective laser sintering -SLS είναι μια από τις πρόσφατα αναπτυσσόμενες μεθόδους επεξεργασίας για τρισδιάστατη εκτύπωση και αποτελεί προσθετική κατασκευαστική. Αυτή η λεγόμενη προσθετική κατασκευαστική -additive manufacturing -AM αποτελεί μια σχετικά νέα τεχνική επεξεργασίας και μαζεύει σταδιακά στρώμα με στρώμα υλικού. Στην τρίτη στήλη του Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι μέθοδοι συμπύκνωσης. Οι περισσότεροι από αυτές τις μεθόδους απαιτούν την ύπαρξη κενού, όπως η φυσική εναπόθεση ατμών -PVD, με εξαίρεση την επίταξη υγρής φάσης -LPE. Στη συνέχεια, στην τέταρτη στήλη, παρουσιάζονται οι τεχνικές καθοδικής διασκόρπισης -sputter, όπως η επίταξη μοριακής δέσμης -molecular beam epitaxy -MBE, ραδιοσυχνοτήτων -RF, μαγνητική ή παλμική εναπόθεση με laser -pulse laser deposition -PLD. Αυτές αποτελούν δαπανηρές μεθόδους με βραδείς ρυθμούς ανάπτυξης αλλά συνήθως εξασφαλίζουν ατομικά τέλεια επιταξιακή ανάπτυξη και με ισχυρούς δεσμούς. Τέλος, οι μέθοδοι χημικών δεσμών είναι συνήθως φθηνότερες αλλά απαιτούν σχετικά ακριβές πρόδρομες ουσίες: τεχνική sol-gel, την τεχνική Langmuir, απόθεση ατομικού στρώματος -atomic layer deposition -ALD, απόθεση με χημική λύση -chemical solution deposition -CSD. Η μαγνητο-οπτική και η ενισχυμένη με πλάσμα χημική εναπόθεση ατμών -MOCVD και -PECVD απαιτούν ροή αερίου [10].

1.4 Έλεγχος ατελειών –defect detection

Όπως και περιγράφηκε στην 1.3 Παράγραφο, η κατασκευή των λεπτών φιλμ είναι μία επίπονη διαδικασία, κατά την οποία απαιτείται μεγάλη προσοχή, ώστε τα παραγόμενα λεπτά υμένια να είναι όσο το δυνατόν πιο άψογα. Ενίοτε όμως αυτό δεν επιτυγχάνεται, με αποτέλεσμα σε αυτά να περιέχουν ατέλειες και ξένα σώματα που δυσκολεύουν την παρατήρηση. Τέτοιες ατέλειες είναι συνήθως φυσαλίδες αέρα, κόκκοι υλικού, διάφορες ίνες, κλωστές ή τρίχες, σκόνη, ενώ οι συνηθέστερα παρατηρούμενες ατέλειες αφορούν σπασίματα και οπές. Οι φυσαλίδες αέρα είναι δυνατό να εκληφθούν εσφαλμένα ως ισότροπα υλικά με υψηλό ανάγλυφο. Οι φυσαλίδες έχουν συνήθως ακανόνιστο σχήμα με

καμπυλόμορφα άκρα. Τα σπασίματα, οι ρωγμές και οι εγκοπές έχουν ως επί το πλείστον και αυτά ακανόνιστο σχήμα.

1.4.1 Ρωγμές –Cracks, Φυσαλίδες –Bubbles, Εγκλεισμοί –Enclosures

Τα cracks ή ρωγμές αναπτύσσονται συνήθως κατά τον σχηματισμό ημιτελών προς την κατασκευή τελικών μεταλλικών υποσυστημάτων. Κατά τη διάρκεια της κατασκευής των λεπτών μεταλλικών φιλμ, υψηλά επίπεδα τριαξονικής τάσης εφαρμόζονται στα κομμάτια. Αν η πίεση υπερβαίνει το όριο αντοχής εφελκυσμού του μετάλλου, τότε δημιουργούνται ρωγμές. Αυτές μπορεί να είναι επιφανειακές ρωγμές αλλά πιο συχνά είναι ολοκληρωτικά ενσωματωμένες στο στερεό σώμα και είναι δύσκολο να εντοπιστούν. Επιπροσθέτως, μέταλλα που είναι αρκετά εύπλαστα σε θερμοκρασία δωματίου, όπως το αλουμίνιο και ο Χαλκός μπορούν να μετασχηματιστούν χωρίς επιπλέον θερμότητα.

Οι φυσαλίδες αερίων αποτελούν ελαττώματα που δημιουργούνται κυρίως σε μέταλλα. Το λιωμένο μέταλλο έχει μεγαλύτερη διαλυτότητα σε αέριο από ότι το στερεό μέταλλο. Ως αποτέλεσμα, ένα μέρος του αερίου που έχει διαλυθεί στην φάση της τήξης εκτινάσσεται και παγιδεύεται κατά την στερεοποίηση. Επίσης το αέριο μπορεί να παραχθεί μέσω χημικών αντιδράσεων μεταξύ των συστατικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή.

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τύποι εγκλεισμών, οι ενδογενείς και οι εξωγενείς. Οι ενδογενείς εγκλεισμοί είναι μικρά διαμεταλλικά σωματίδια τέτοια όπως σουλφίδια, οξειδία και πυριτικά που σχηματίζονται από χημικές αντιδράσεις μεταξύ διάφορων συστατικών των κραμάτων μετάλλου και επίσης με την ατμόσφαιρα. Συνήθως είναι μικρά σε μέγεθος, μικρότερα του ενός χιλιοστού, και δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερο πρόβλημα αν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα. Ωστόσο μπορεί να παρουσιάσουν απειλή, αν ένα σημαντικό ποσοστό από εγκλεισμούς είναι συγκεντρωμένο σε μία περιοχή. Οι εξωγενείς εγκλεισμοί είναι μεγαλύτεροι και προκύπτουν από τυχαίους εγκλεισμούς ξένων υλικών. Αυτοί οι εγκλεισμοί αποτελούν σημαντική απειλή για την ακεραιότητα του μεταλλικού σώματος [12].

Οι πιο σύνηθες εμφανιζόμενες ατέλειες είναι οι ρωγμές –cracks. Η ανεπιθύμητη δημιουργία τους μπορεί να γίνει με πάρα πολλούς τρόπους, κατά την κατασκευή, τη μεταφορά, τη χρήση αλλά και λόγω φθοράς χρόνου. Η εμφάνισή τους στην ύλη είναι ως επί το πλείστον καταστροφική και για το λόγο αυτό, ακόμη πιο σημαντικός είναι ο

έγκαιρος εντοπισμός τους. Για τους λόγους αυτούς, τα cracks είναι τα ελαττώματα που θα μοντελοποιηθούν και θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία.

1.4.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση πειραματικών και θεωρητικών μελετών

Η μελέτη και ο εντοπισμός των παραπάνω ατελειών με τη βοήθεια ΜΚΕ έχουν απασχολήσει πλήθος ερευνητών. Οι Achenbach et al [13-14], μελέτησαν λεπτομερώς την διάθλαση και την διάδοση των κυμάτων επιφανείας από σπασίματα και ρωγμές στην επιφάνεια. Με τη χρήση της θεωρίας των ακτινών, οι συνιστώσες μετατόπισης τους τόσο προς τα εμπρός όσο και προς τα πίσω των διάσπαρτων επιφανειακών κυμάτων έχουν ληφθεί υπόψη από αυτούς. Οι Tuan and Li [15], Kawasaki and Tanaka [16] και ο Simons [17] μελέτησαν το πρόβλημα της ανάκλασης και μετάδοσης των κυμάτων Rayleigh, όταν επηρεάζονται από αυλάκια επιφάνειας χρησιμοποιώντας συνοριακές τεχνικές διαταραχής. Οι Kino [18] and Auld [19] χρησιμοποίησαν το θεώρημα αμοιβαιότητας για να αναπτύξουν ένα γενικό μοντέλο σκέδασης το οποίο περιγράφει το σχετικό πλάτος ενός κύματος που σκεδάζεται από ένα μετατροπέα σε έναν άλλο με την ακύρωση ενός αυθαίρετου σχήματος. Ο Resch et al [20,21] εξειδίκευσαν το μοντέλο των Kino and Auld για την περίπτωση αντανάκλασης των ακουστικών κυμάτων επιφανείας από μία μικρή ρωγμή σε επιφάνεια λόγω κόπωσης σε μία συχνότητα τέτοια ώστε το βάθος ρωγμής να είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του ακουστικού κύματος. Από την υπολογιστική ανάπτυξη αυτού του προβλήματος, ο Blake [22], οι Blake και Bond [23,24] και οι Hirao και Fukuoaka [25] εισήγαγαν υπολογιστικά μοντέλα για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης των κυμάτων Rayleigh με ασυνέχειες και ρωγμές επιφάνειας από σπάσιμο, πράγμα που τους επέτρεψε να εμφανίσουν γραφικά τα διερχόμενα κύματα από μια ρωγμή. Ο Liu et al. [26] χρησιμοποίησαν μια υβριδική μέθοδο που συνδυάζει την διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων του κοντινού πεδίου με την ολοκληρωτική συνοριακή αναπαράσταση του μακρινού πεδίου για τη μελέτη της σκέδασης των υπερήχων από μια ρωγμή σε γυάλινη πλάκα.

Ο Imran et al. [27] χρησιμοποίησαν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για να μοντελοποιήσουν ραγισμένο μέσο και να μελετήσουν τη δυνατότητα χρησιμοποίησης τεχνικών διάδοσης κυμάτων στο πεδίο του χρόνου για τον εντοπισμό και την εκτίμηση μεγέθους των ρωγμών. Πειραματικά, ο Viktorov απασχολήθηκε με μία μέθοδο υπερήχων για τη μέτρηση των συντελεστών ανάκλασης και μετάδοσης για τα κύματα Rayleigh αλληλεπιδρώντα με μία κανονική υποδοχή σε μία μπάρα αλουμινίου [28]. Παρατήρησε ότι η αναλογία της συνολικής ενέργειας των ανακλώμενων και μεταδιδόμενων κυμάτων

Rayleigh με την ενέργεια του προσπίπτοντος κύματος ήταν πάντα μικρότερη από τη μονάδα. Αυτό γιατί ένα μέρος της ενέργειας του προσπίπτοντος Rayleigh κύματος πάντα μετατρέπεται σε διαμήκη και εγκάρσια κύματα που διασκορπίζονται από τη ρωγμή στο μεγαλύτερο μέρος του υλικού. Οι Reihardt and Dally μελέτησαν την φωτοελαστική οπτικοποίηση της αλληλεπίδρασης των κυμάτων Rayleigh με μια ελλαττωματική επιφάνεια [29]. Η διαδικασία αλληλεπίδρασης παρήγαγε τόσο μεταδιδόμενα όσο και ανακλώμενα κύματα Rayleigh που παρουσιάζονται στο πρωτότυπο φωτοελαστικό υπόδειγμα. Η ποσοτική περιγραφή των ανακλώμενων και μεταδιδόμενων χαρακτηριστικών της αλληλεπίδρασης των κυμάτων Rayleigh με τη σχισμή θα μπορούσε τότε να επιτευχθεί με την σύγκριση των φωτοελαστικών αποτελεσμάτων για μοντέλα με και χωρίς σχισμές.

Οι Tittmann et al.[30,31] χρησιμοποίησαν ένα πολύ μικρού μήκους κύμα Rayleigh για να εκτιμήσουν το μέγεθος ρωγμής. Οι Domarkas et al. [32] διαπίστωσαν ότι οι κορυφές σε μία γραφική παράσταση της συχνότητας σε σχέση με το συντελεστή ανάκλασης Rayleigh θα μπορούσε να ερμηνευθεί ως ανακλάσεις της ρωγμής και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην εκτίμηση του μεγέθους της. Παρά το γεγονός ότι τα πειράματα έχουν δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα, οι Tittmann and Domarkas έχουν χρησιμοποιήσει μια απλοποιημένη θεωρία στις ερμηνείες των δεδομένων τους ενώ δεν έχουν γίνει προσπάθειες σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα μοντέλα. Οι Yew et al. [33] παρουσίασαν μια πειραματική μελέτη της σκέδασης των επιφανειακών κυμάτων από μια σχισμή. Διεξήγαγαν μια λεπτομερή πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς του κύματος κάτω από την επίδραση των ρωγμών στην επιφάνεια από θραύση, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τις υφιστάμενες αναλυτικές προβλέψεις και διερεύνησαν την πιθανή εφαρμογή τους σε μη καταστροφικό έλεγχο.

Οι Scala and Bowles [34] παρουσίασαν τα αποτελέσματα μιας πειραματικής και θεωρητικής μελέτης στην οποία εφαρμόστηκε laser υπερήχων για να αναπτύξει μια νέα και βελτιωμένη μέθοδο για τη μέτρηση του βάθους επιφανειακών εγκοπών σε χιλιοστά και υποδιαιρέσεις χιλιοστών σε αλουμίνιο. Αυτή η νέα μέθοδος περιλαμβάνει τη μέτρηση των εκπεμπόμενων κυμάτων Rayleigh στο κοντινό πεδίο της σχισμής [35]. Η μετάδοση των κυμάτων Rayleigh έχει μελετηθεί πειραματικά αλλά και υπολογιστικά. Οι Jian et al. και ο Cooper et al. δημιούργησαν κύματα Rayleigh χρησιμοποιώντας πηγή laser, και παρατηρήθηκαν πολλαπλά μεταδιδόμενα και ανακλώμενα κύματα Rayleigh κατά μήκος

μιας ρωγμής στην επιφάνεια. Οι Arias and Achenbach ανέπτυξαν την τεχνική σάρωσης με πηγή laser, με προσεγγιστικό μοντέλο βασισμένο στην ανάλυση του πεδίου που παράχθηκε από το laser σε μια ρωγμή, χρησιμοποιώντας συνοριακά στοιχεία -BEM. Οι Mendelson et al. ανέλυσαν το πεδίο μετάδοσης σε συμμετρικά και αντί-συμμετρικά πεδία σε σχέση με το επίπεδο της ρωγμής. Ο Gautesen ανέπτυξε μια σταθερή αριθμητική διαδικασία και υπολόγισε σε σταθερή κατάσταση τη μετάδοση ενός προσπίπτοντος κύματος Rayleigh υπό γωνία. Οι Babich et al. ανέπτυξαν περαιτέρω τη θεωρητική προσέγγιση των Budaev και Bogy. Οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης στο ευρύτερο πεδίο μιας ρωγμής έχουν υπολογιστεί και μετρηθεί σε αρκετές εργασίες. Οι Blackshire και Sathish, μελέτησαν την μετάδοση υπερήχων στο εγγύς πεδίο από επιφανειακές ρωγμές κόπωσης, χρησιμοποιώντας συμβολόμετρο σάρωσης. Οι Boonsang και Dewhurst υπολόγισαν τη χωρική κατανομή γύρω από το ένα τέταρτο του χώρου, με βάση την χωρική κατανομή ενός κύματος Rayleigh και σε βάθος που περιείχε το κύμα Rayleigh [36].

Η εκτεταμένη προσπάθεια για τη μελέτη και ανάλυση της αλληλεπίδρασης των SAWs με τις ρωγμές καθίσταται σαφής από τον μεγάλο αριθμό των άρθρων που συνεχώς αυξάνεται στη βιβλιογραφία. Όλες σχεδόν αυτές οι μελέτες επικεντρώνονται στην απόκριση του μακρο -πεδίου εξαιτίας μίας τέτοιας αλληλεπίδρασης. Η απόκριση του μικρο-πεδίου λόγω της αλληλεπίδρασης του κύματος Rayleigh με τις ρωγμές δεν έχει μελετηθεί εκτεταμένα. Αυτό οφείλεται στο ότι οι περισσότερες από τις μη καταστροφικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση και εκτίμηση τέτοιων ρωγμών, χρησιμοποιούν πιεζοηλεκτρικούς μετατροπείς μεγάλους σχετικά σε διαστάσεις σε σύγκριση με το μέγεθος της ρωγμής, γεγονός που τους τοποθετεί εγγενώς στο μακροπεδίο. Οι πρόσφατες εξελίξεις στη σημειακή ανίχνευση των επιφανειακών υπερηχητικών κυμάτων με τη χρήση laser και συμβολομετρίας, καθώς και η διαθεσιμότητα αποτελεσματικών υπολογιστικών εργαλείων, όπως τα πεπερασμένα στοιχεία, προσφέρουν την ευκαιρία να ερευνηθεί λεπτομερώς η διαφορά ανάμεσα στο μακρινό πεδίο -μακροπεδίο και στο κοντινό πεδίο -μικροπεδίο.

Η δυνατότητα εξέτασης υλικών και ειδικά μεταλλικών, αλλά και η ανίχνευση ύπαρξης πιθανού ελαττώματος-ατέλειας στην δομή τους είναι ιδιαίτερα σημαντική στην βιομηχανία. Η αποφυγή αστοχιών στην παραγωγή και την κατασκευή τελικών προϊόντων και συνεπώς ο μειωμένος χρόνος παραγωγής και το φθηνότερο κόστος παραγωγής είναι

θέμα πολύ κρίσιμης σημασίας. Η δυνατότητα εύρεσης πιθανής ατέλειας στην δομή υλικού αποκτά ιδιαίτερη σπουδαιότητα και για την ίδια την ασφάλεια της κατασκευής. Ο έλεγχος υλικών με χρήση παλμικών laser στην θερμοελαστική περιοχή, παρέχει μια νέα ελκυστική δυνατότητα μη καταστροφικού ελέγχου. Δεν είναι καταστρεπτικός για το δείγμα και δεν επηρεάζει την δομή και την λειτουργικότητα του, ενώ μπορεί να υλοποιηθεί από απόσταση χωρίς την ανάγκη επαφής με την ύλη. Ο συνδυασμός πειραματικών συμβολομετρικών τεχνικών με χρήση laser μαζί με αριθμητικές προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων, αποτελεί σπουδαίο διαγνωστικό εργαλείο για τους ΜΚΕ, την εύρεση ατελειών στη δομή, αλλά και για το χαρακτηρισμό του υλικού. Οι προσομοιώσεις με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων αποτελούν ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων μηχανικής. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής και θερμότητας ροής. Η αλληλεπίδραση των προσομοιώσεων με τα πειράματα μπορεί με ελάχιστο κόστος να αποτελέσει ένα δυνατό εργαλείο επιθεώρησης, μελέτης και ανάλυσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προσφέρουν δεδομένα για τη συμπεριφορά των υλικών των δειγμάτων προσφέροντας έτσι εικόνα σύγκρισης και ελέγχου στις πειραματικές τεχνικές, αλλά και πληροφορίες καθοδήγησης και ρύθμισης των παραμέτρων των πειραματικών laser διατάξεων και συστημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. Πεπερασμένα στοιχεία και σύζευξη θερμικών-μηχανικών προβλημάτων

Οι βασικές έννοιες της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων -Finite Element Method –FEM προήλθαν από τις εξελίξεις στη δοκιμή ανάλυσης αεροσκαφών. Το 1941, ο Hrenikoff παρουσίασε μια λύση προβλημάτων ελαστικότητας με τη χρήση της “μεθόδου των δικτυωμάτων”. Το 1943 δημοσιεύτηκε μία εργασία του Courant, η οποία χρησιμοποιούσε κατά τμήματα τριγωνική παρεμβολή σε τριγωνικές υπό-περιοχές για να μοντελοποιήσει προβλήματα στρέψης. Οι Turner et al., δημιούργησαν μητρώα ακαμψίας για δικτυώματα δοκούς και άλλα στοιχεία και παρουσίασαν τα ευρήματά τους το 1956. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία πρωτοεμφανίστηκε και χρησιμοποιήθηκε από τον Clough το 1960. Στις αρχές του 1960, οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν τη μέθοδο για να δώσουν προσεγγιστικές λύσεις σε προβλήματα ανάλυσης τάσεων, ροής ρευστών, μεταφοράς θερμότητας και άλλων τομέων [37].

Ο Αργύρης, το 1955, σε ένα βιβλίο για θεωρήματα ενέργειας και μητρωικές μεθόδους, έθεσε τα θέματα για μελλοντική ανάπτυξη στις μελέτες των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο βιβλίο για πεπερασμένα στοιχεία των Zienkiewicz και Chung κυκλοφόρησε το 1967. Στα τέλη της δεκαετίας του 60' και αρχές του 70', η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόστηκε σε μη γραμμικά προβλήματα. Οι μαθηματικές βάσεις τέθηκαν στη δεκαετία του 70' και περιέλαβαν την ανάπτυξη νέων στοιχείων, μελέτες σύγκλισης και άλλα πεδία [37].

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων μηχανικής. Οι εφαρμογές εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής και θερμότητας. Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών -H/Y και των συστημάτων –Computer Aided Design –CAD, σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν σχετικά εύκολα. Διάφορες εναλλακτικές συνθέσεις μπορούν να δοκιμαστούν σε έναν H/Y πριν κατασκευαστεί το πρότυπο της κατασκευής [37].

Για την εφαρμογή της FEM και την υλοποίηση μελέτης και ανάλυσης, μία περίπλοκη περιοχή, η οποία ορίζει ένα συνεχές, διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία -Finite Elements -FE. Οι ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις υπολογίζονται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μία διαδικασία σύνθεσης, η οποία καταλλήλως θεωρεί τα φορτία και τους περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

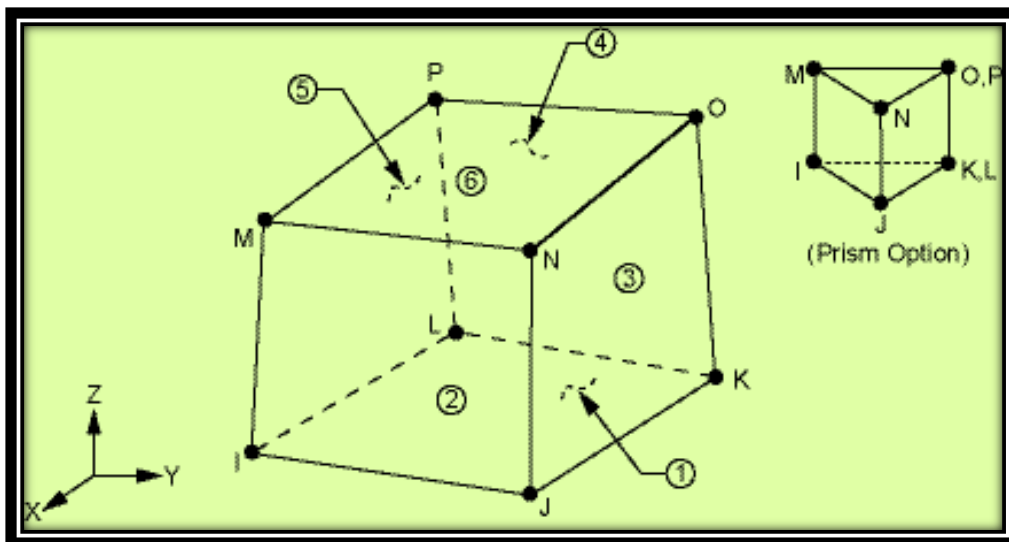
Για να εφαρμοστεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής στάδια:

1. Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής σε ένα πρόγραμμα CAD και δημιουργείται το τρισδιάστατο μοντέλο.
2. Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και αφού ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης και εισάγονται τα επιπλέον δεδομένα που απαιτούνται. Παραδείγματος χάριν, αν επιλεγεί να λυθεί το μοντέλο σε στατική καταπόνηση θα πρέπει να δοθούν τα δεδομένα για τις δυνάμεις και τις στηρίξεις. Αυτή η διαδικασία γίνεται με προγράμματα που αποκαλούνται προ-επεξεργαστές -preprocessors.
3. Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα προς επίλυση, εισάγονται σε ένα πρόγραμμα το οποίο θα κάνει την επίλυση του προβλήματος. Τέτοιου είδους προγράμματα που επιλύουν ονομάζονται επιλύτες –solvers/processors.
4. Όταν τελειώσει η επίλυση, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα πρόγραμμα, γνωστό ως μετα-επεξεργαστής –post-processor, για να μπορέσει ο ερευνητής να διαβάσει τα αποτελέσματα [37].

Πλήθος εμπορικών λογισμικών FEM καλύπτουν τα παραπάνω έχοντας διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μεταξύ τους. Πολλές είναι και οι εφαρμογές που έχουν αναπτυχθεί για την κάλυψη συγκεκριμένων μελετών με FEM από ερευνητικές ομάδες ή μεμονωμένα. Το λογισμικό που επιλέχθηκε για την υλοποίηση της παρούσας μελέτης είναι το ANSYS. Το πρόγραμμα ANSYS έχει τη μεγαλύτερη βιβλιοθήκη πεπερασμένων στοιχείων και πέραν του ότι παρέχει τα 1.-4. περιλαμβάνει δυνατότητες για: α. Γραφική εισαγωγή δεδομένων, β. εισαγωγή γεωμετρικού μοντέλου από οποιοδήποτε σχεδιαστικό πρόγραμμα και γ. γραμμική και μη γραμμική ανάλυση σε δύο και τρεις διαστάσεις.

Δυναμική ανάλυση με τη μέθοδο των ιδιομορφών, χρήση του φάσματος της σεισμικής απόκρισης, εισαγωγή αρμονικών ή παροδικών φορτίσεων σε συνάρτηση του χρόνου. δ. θερμική ανάλυση σταθερής κατάστασης, μετάβασης, αλλαγής φάσης, θερμική-δομική. ε. ηλεκτρομαγνητική ανάλυση σε ηλεκτροστατικά, μαγνητοδομικά, σταθερό και χρονομεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο στ. ροή ρευστών με αριθμητική δυναμική ρευστών, ροή σε αγωγούς, ροή δυναμικού, διάχυση μέσω πορώδους.

Το βασικό χαρακτηριστικό που οδήγησε στην επιλογή του προγράμματος FEM ANSYS είναι η παροχή της δυνατότητας να συνδυάζει δύο ή περισσότερα πεδία Μηχανικής/Φυσικής. Ανάλυση πεδίων σε σύζευξη -coupled field analysis είναι συνδυασμός αναλύσεων από διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους της μηχανικής (διαφορετικά φυσικά πεδία) που αλληλεπιδρούν για την επίλυση καθολικού προβλήματος μηχανικής. Multiphysics Analysis είναι η ανάλυση που σε πραγματικό χρόνο πραγματοποιείται για την επίλυση προβλημάτων υπό συνδυασμό πεδίων. Όταν η είσοδος ενός πεδίου ανάλυσης εξαρτάται από τα αποτελέσματα μίας άλλης ανάλυσης, οι αναλύσεις είναι συζευγμένες. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ένα συγκεκριμένο είδος ανάλυσης συζευγμένων πεδίων, η οποία λέγεται γραμμική ανάλυση συζευγμένων πεδίων -direct coupled field analysis. Κατά την direct coupled field analysis πραγματοποιείται μία μόνο ανάλυση όμως με την χρήση ενός στοιχείου που συνδυάζει φυσικά πεδία μεταξύ τους. Αυτού του είδους η ανάλυση κρίθηκε η καταλληλότερη για την υλοποίηση της παρούσας διατριβής. Το τρισδιάστατο -3D πεπερασμένο στοιχείο που επιλέχθηκε με ικανότητα υλοποίησης συζευγμένης ανάλυσης είναι το εξαεδρικό SOLID5 που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Το συγκεκριμένο στοιχείο έχει και την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και ως πενταεδρικό πρίσμα.



Σχήμα 2.1 Απεικόνιση στοιχείου SOLID5.

Το SOLID5 έχει την ικανότητα να χρησιμοποιηθεί σε τρισδιάστατα μαγνητικά, θερμικά, ηλεκτρικά, πιεζοηλεκτρικά, και κατασκευαστικά πεδία. Το στοιχείο αποτελείται από οκτώ κόμβους εκ των οποίων ο κάθε κόμβος έχει μέχρι και έξι βαθμούς ελευθερίας. Έχει τη δυνατότητα μοντελοποίησης μαγνητοστατικών πεδίων σε στατική ανάλυση. Στοιχεία συζευγμένων πεδίων με παρόμοιες δυνατότητες πεδίων είναι το στοιχείο PLANE13, και το SOLID98 [38].

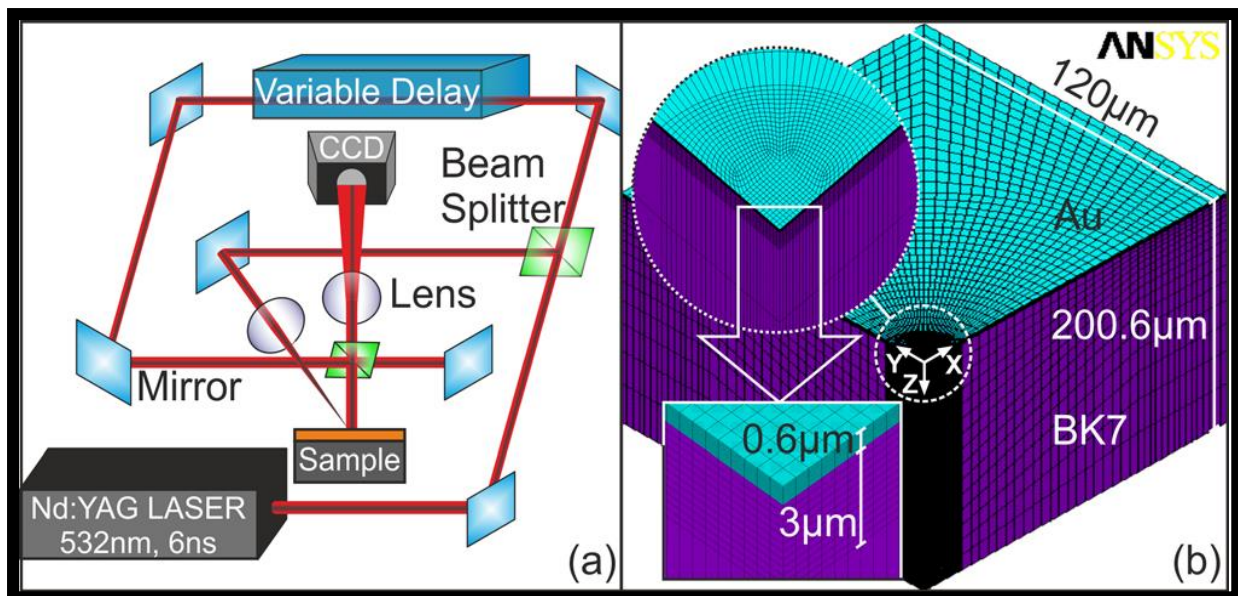
2.1 FEM μοντέλο προσομοίωσης αλληλεπίδρασης laser-ύλης

Για την μελέτη της επιρροής της δέσμης παλμικού laser σε μεταλλικά υμένια αναπτύχθηκε στα πλαίσια της υπό εκπόνηση Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. Κασελούρη Ευάγγελου, που υλοποιείται στο Centre of Plasma Physics & Lasers – CPPL, τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιώνει την δυναμική συμπεριφορά του φαινομένου. Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε για τη μελέτη της συμπεριφοράς αντίστοιχων δειγμάτων με ατέλειες.

Η μελέτη της παραγωγής και διάδοσης των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων σε μεταλλικό λεπτό φιλμ, το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα γυάλινο υπόστρωμα γίνεται υιοθετώντας καινοτόμο προσέγγιση, που συνδυάζει ένα αριθμητικό μοντέλο βασισμένο στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων -FE και πειραματική τεχνική δυναμικής συμβολομετρίας με δυνατότητα απεικόνισης στη θερμοελαστική περιοχή, περιοχή τήξης και φωτοαποδόμησης. Το 3D μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώνει την αλληλεπίδραση ύλης με laser παρέχοντας ολοκληρωμένη εικόνα για την παραμόρφωση του μέσου αλλά και τη γένεση και διάδοση ακουστικών κυμάτων στο

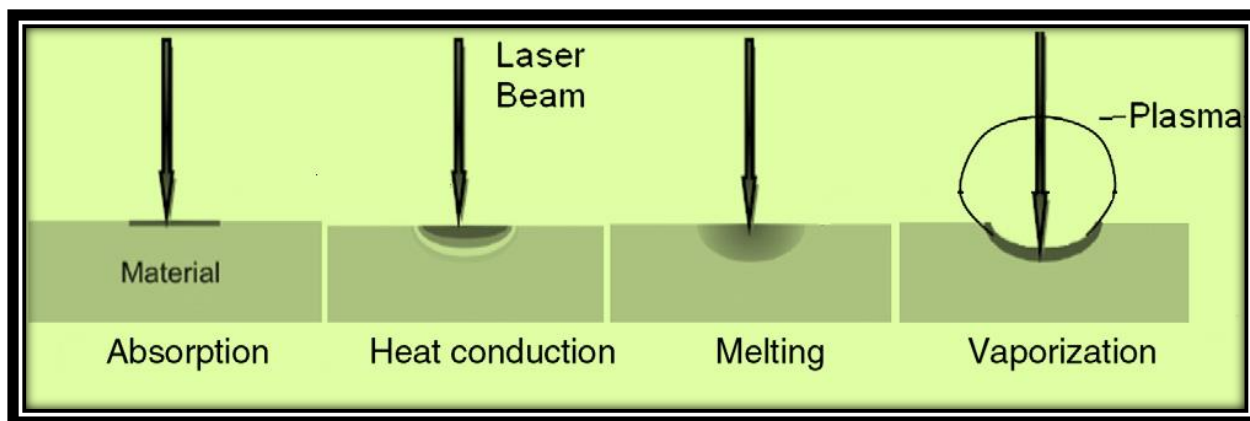
δοκίμιο στο χώρο-χρονικό συνεχές. Η πειραματική τεχνική βασίζεται σε πηγή laser παλμού ns τόσο για την παραγωγή όσο και την παρακολούθηση των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων. Παρέχει χωρική ανάλυση τάξεως ενός ~ 1 nm κάθετα στην ακτινοβολούμενη επιφάνεια και χρονική ανάλυση τάξεως -ns με άμεση απεικόνιση ολικού πεδίου, αποφεύγοντας έτσι την εκτεταμένη σάρωση της επιφάνειας. Ως εκ τούτου, αυτή η τεχνική έχει πλεονέκτημα και είναι πιο ελκυστική σε εφαρμογές, όπου απαιτείται ένας δυναμικός χαρακτηρισμός των φιλμ σε όλη την επιφάνεια τους που περιέχουν ελαττώματα, ανομοιογένειες ή άλλες ανωμαλίες. Ο συνδυασμός προσομοίωσης και πειράματος είναι απαραίτητος. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα το FEM μοντέλο επαληθεύτηκε για την σωστή συμπεριφορά του από πλήθος πειραμάτων σύγκρισης και στις τρεις περιοχές [7,8,11]. Μετά την επιβεβαίωση σωστής προσέγγισης, η προσομοίωση μπορεί πλέον να καθοδηγεί τα πειράματα για τον εντοπισμό λεπτομερειών απόκρισης της ύλης και για τη ρύθμιση παραμέτρων της πειραματικής διάταξης, ανέξοδα και σε σύντομους χρόνους αποτρέποντας μη αναγκαίες πειραματικές μελέτες.

Στο Σχήμα 2.2(α), απεικονίζεται σχηματικά η πειραματική διάταξη της διαγνωστικής τεχνικής της δυναμικής απεικόνισης -συμβολομετρίας που έχει αναπτυχθεί από την ερευνητική ομάδα του CPPL. Χαρακτηριστικά και τεχνικές λεπτομέρειες της πειραματικής διάταξης αλλά και της τεχνικής απεικόνισης, περιγράφονται λεπτομερώς σε δημοσιευμένες ερευνητικές εργασίες της ομάδας [39]. Οι παλμοί laser που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή επιφανειακών ακουστικών κυμάτων ονομάζονται παλμοί άντλησης -pump pulse, ενώ για την καταγραφή της μετατόπισης της ορατής ακτινοβολούμενης επιφάνειας χρησιμοποιούνται παλμοί ανίχνευσης -probe pulses. Οι probe pulses προέρχονται και αυτοί από το ίδιο παλμικό ns-laser διπλής συχνότητας, με $\lambda=532$ nm, Q-switched Nd: YAG, που διεγείρει το δείγμα. Οι παλμοί έχουν χαρακτηριστικά παραμέτρων: FWHM -Full Width of Half Max διάρκειας 6 ns και γραμμική οριζόντια πόλωση. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται κυμαίνεται στην περιοχή των 0.8 - 17 μ J/παλμό. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας έναν και μόνο παλμό από το σύστημα laser, ο οποίος χωρίζεται σε pump- και probe- pulse, σε θερμοκρασία δωματίου και ατμοσφαιρικής πίεσης [7,8,11,39]. Ο συνδυασμός πειράματος – υπολογιστικού μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 (a) Σχηματική απεικόνιση πειραματικής διάταξης διέγερσης και συμβολομετρίας και (b) 3D $\frac{1}{4}$ -συμμετρικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Η δυναμική αντίδραση της ύλης που ακτινοβολείται από μια πηγή laser παλμού σε ns εξαρτάται από την θερμό-φυσικές του ιδιότητες, καθώς και με τα χαρακτηριστικά του παλμού laser. Για την κατανόηση του πολύπλοκου φυσικού φαινομένου αυτής της αλληλεπίδρασης, διάφορες αναλυτικές και αριθμητικές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί. Ωστόσο, οι αριθμητικές μέθοδοι είναι περισσότερο κατάλληλες για την αντιμετώπιση πιο πολύπλοκων προβλημάτων που αφορούν έναν αριθμό διαφορετικών παραμέτρων. Κατά τη διάρκεια μιας αλληλεπίδρασης παλμού laser με λεπτό φιλμ, οι παλμοί laser εναποθέτουν ενέργεια στην επιφάνεια του φιλμ της οποίας ποσοστό απορροφάται και η ύλη θερμαίνεται. Κατά συνέπεια οι θερμό-μηχανικές ιδιότητες του φιλμ μεταβάλλονται δυναμικά. Η αλληλεπίδραση των παλμών laser με το φιλμ καθορίζεται από την χαρακτηριστική χρονική αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων και πλέγματος που βρίσκεται στην περιοχή ps. Δεδομένου ότι ένας παλμός laser σε ns είναι τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος, η θερμική ισορροπία μεταξύ των ηλεκτρονίων και του πλέγματος μπορεί να θεωρηθεί κατά τη διάρκεια φωτισμού του στόχου από τον παλμό laser. Στην περίπτωση ps παλμών laser και μικρότερης διάρκειας, τα ηλεκτρόνια και το πλέγμα αρχικά δεν είναι σε θερμική ισορροπία. Τότε τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα είναι διαφορετικά και περιγράφονται με ακόμη πιο σύνθετο μαθηματικό τρόπο.



Σχήμα 2.3 Μεταβολές κατάστασης της ύλης [40].

Όπως προαναφέρθηκε στην Παράγραφο 1.2.1, κατά την αλληλεπίδραση παλμού laser σε ns με μέταλλα, τρεις είναι οι περιοχές ενδιαφέροντος ανάλογα με την εναποτιθέμενη ενέργεια της δέσμης του laser στο στόχο. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται οι μεταβολές κατάστασης της ύλης, κατά την αλληλεπίδραση παλμικού laser διάρκειας ns με μεταλλικό υλικό. Για χαμηλές εντάσεις ακτινοβολίας laser, στη θερμοελαστική περιοχή η απορροφούμενη ενέργεια του laser θερμαίνει την επιφάνεια του στόχου, δίχως να μεταβάλλονται οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού. Λόγω της απορρόφησης της ενέργειας του laser στο υλικό, η θερμοκρασία του ακτινοβολούμενου όγκου αυξάνεται, γεγονός που προκαλεί μια τοπική θερμική διαστολή. Η τοπική θερμική διαστολή δημιουργεί ένα πεδίο τάσεων και υπερηχητικών κυμάτων που διαδίδονται στο στόχο. Τα υπερηχητικά κύματα που δημιουργούνται από το laser διαδίδονται έξω από την περιοχή αλληλεπίδρασης σε όλες τις κατευθύνσεις. Καθώς η ένταση laser αυξάνει περαιτέρω, η θερμοκρασία της επιφάνειας του υλικού φθάνει το σημείο τήξης και οι μηχανικές, θερμικές, καθώς και οι οπτικές ιδιότητες του μεταλλικού στόχου αλλάζουν γρήγορα. Το υλικό λιώνει και μεταβαίνει στην περιοχή τήξης. Για ακόμα υψηλότερες εντάσεις laser στο στόχο, η επιφάνεια του υλικού φθάνει στο σημείο βρασμού και αρχίζει η διαδικασία αφαίρεσης υλικού από το στόχο, περιοχή φωτοαποδόμησης [40].

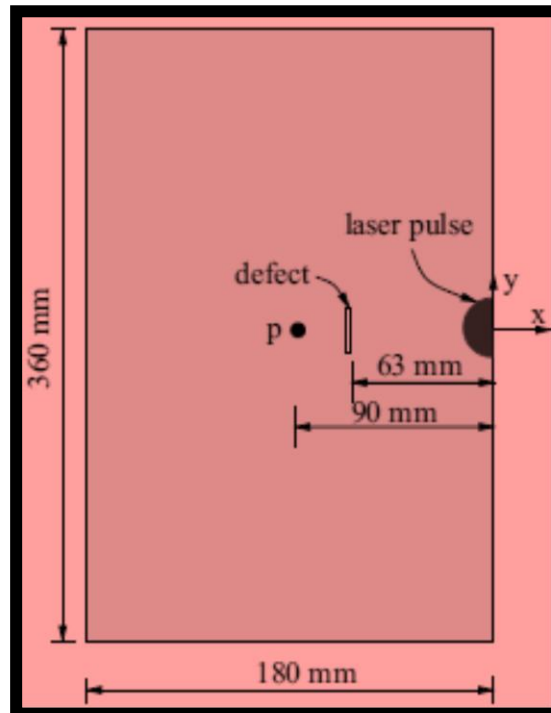
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. FEM προσομοίωση δειγμάτων με ατέλειες -defects

Μοντέλα ρωγμών -cracks παρουσιάζονται σε πολλές επιστημονικές μελέτες όπου εξετάζεται η επίδραση των ελαττωμάτων στη συμπεριφορά των μετάλλων με διάφορες προσεγγίσεις. Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 1.4.1 τα ελαττώματα που μελετούνται εδώ αφορούν τις ρωγμές –cracks.

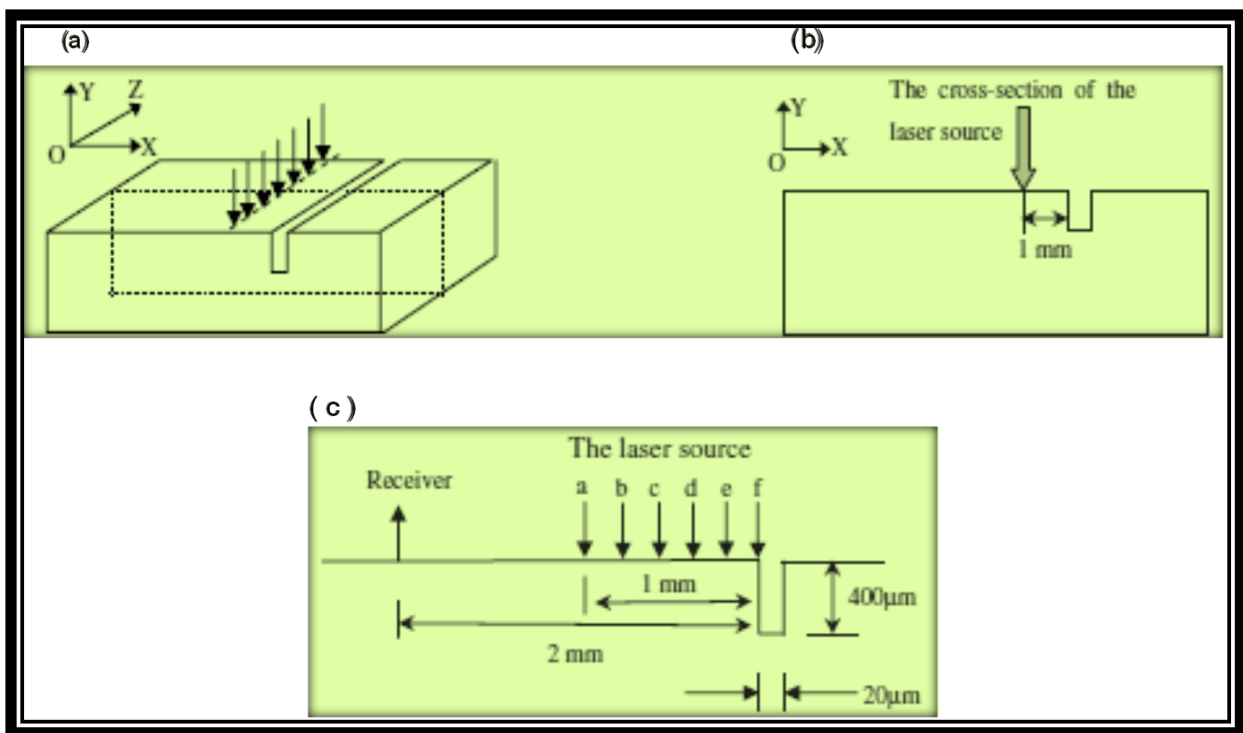
3.1 Αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης ατελειών ρωγμής -cracks

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι Wenyang Liu and Jung-Wuk Hong [41] εξέτασαν κύματα Lamb πάνω σε μία μεταλλική πλάκα με ελάττωμα. Προσομοιώθηκαν δύο ειδών παλμοί laser –laser pulse, μη-εστιασμένοι και εστιασμένοι σε μία ευθεία γραμμή με την βοήθεια αριθμητικών μελετών. Το ελάττωμα –defect έχει πάχος που εκτείνεται σε όλο το βάθος της πλάκας και είναι κάθετο προς τη σύνδεση του σημείου μέτρησης ρ και της προσομοιωμένης πηγής laser. Η απόσταση μεταξύ του άκρου του ελαττώματος και του κέντρου της πηγής laser είναι 63 mm, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Το πλάτος του ελαττώματος είναι 0.9 mm και θεωρούνται δύο διαφορετικά μήκη, των 9 mm και 18 mm αντίστοιχα. Παρατηρήθηκε ότι το πλάτος των κυμάτων -Lamb είναι μικρότερο όταν έχουμε ελάττωμα από ότι στην περίπτωση που υπάρχουν ελαττώματα στην μεταλλική πλάκα.



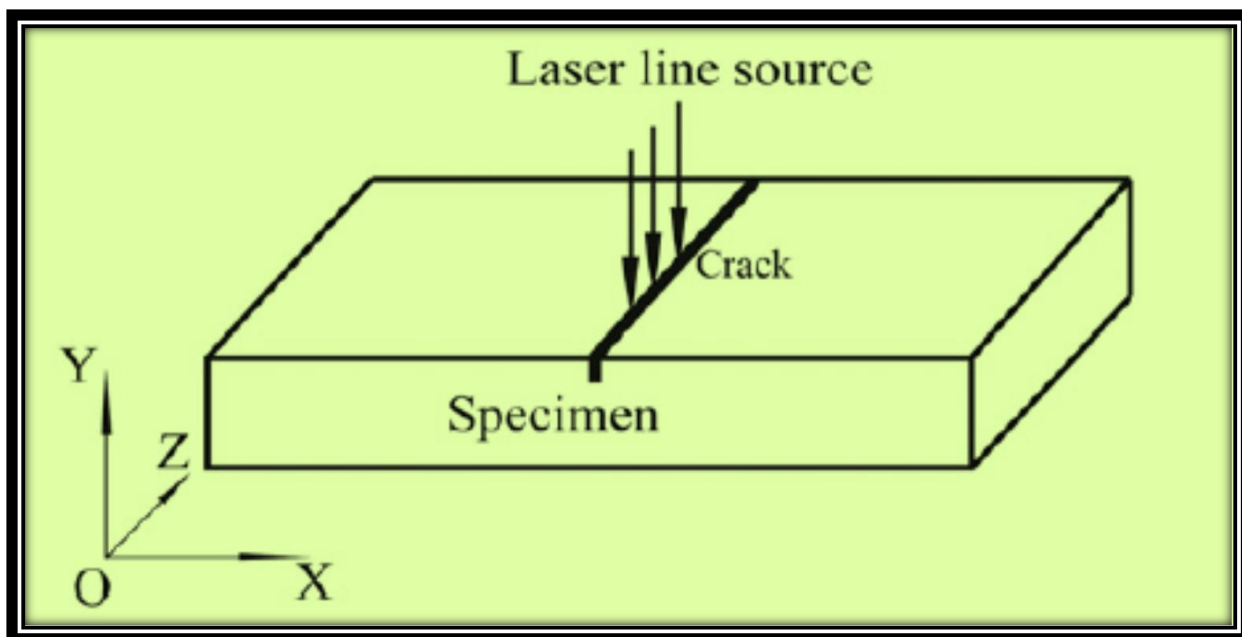
Σχήμα 3.1 Πλάκα με ελάττωμα ρωγμής των Wenyang Liu and Jung-Wuk Hong [41]. Το πλάτος των Lamb waves που παράγονται από την εστιασμένη πηγή laser σε γραμμή, μειώνεται σημαντικά σε σύγκριση με τα αποτελέσματα στην περίπτωση που δεν υπάρχουν ελαττώματα στην πλάκα. Οι κυματομορφές που δημιουργούνται με προσομοίωση μη-εστιασμένων και γραμμικά εστιασμένων πηγών laser μοιάζει να είναι παρόμοιες. Αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα επειδή το μήκος του crack είναι σχετικά μεγάλο σε σύγκριση με τις διαστάσεις των πηγών laser [41].

Μοντελοποίηση crack πάνω σε μεταλλική πλάκα και εξέταση της συμπεριφοράς των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων που αναπτύσσονται κατά την διέγερση της από παλμούς laser, πραγματοποιείται από τους Jianfei Guan et al [42]. Η αλληλεπίδραση ενός laser που δημιουργεί επιφανειακά ακουστικά κύματα με μια επιφανειακή ρωγμή έχει προσομοιωθεί με λεπτομέρεια με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Επιφανειακή εγκοπή ορθογώνιου σχήματος έχει εισαχθεί και αντιπροσωπεύει τη ρωγμή -crack. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται σχηματικά η τοπολογία του μοντέλου.



Σχήμα 3.2 (a) Διάταξη δοκιμίου που διεγείρεται από γραμμικά εστιασμένο παλμό laser, (b) κάθετη τομή δείγματος και (c) διάταξη του σαρωτή-laser.

Οι Chenyin Ni et al [43] μελέτησαν τη διάδοση και τη σκέδαση των υπερήχων που αναπτύσσονται σε ένα δείγμα με crack και ανιχνεύονται από σύστημα αξιολόγησης αποτελούμενο από πηγή διπλού laser με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Οι τύποι των υπερήχων αναλύονται λεπτομερώς και παρουσιάζεται μέθοδος υπολογισμού της γωνίας προσανατολισμού του crack με την χρήση των χρόνων διάδοσης των διαφόρων τύπων των ανακλώμενων υπερήχων. Αναπτύχθηκε και αντίστοιχη πειραματική διάταξη και μετρήθηκαν οι χρόνοι άφιξης των ανακλώμενων υπερήχων, οι οποίοι μεταδίδονται σε δύο δείγματα αλουμινίου με crack. Υπολογίστηκε η γωνία προσανατολισμού των crack με την βοήθεια της αριθμητικής προσομοίωσης και συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του μοντέλου στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων, το δείγμα -specimen, η ρωγμή -crack, και η πηγή laser γραμμικής εστίασης -laser line source.



Σχήμα 3.3 Μοντέλο δοκιμίου των Chenyin Ni et al [43].

Άλλη μία μέθοδος εντοπισμού ατελειών κάτω από την επιφάνεια δοκιμίων αναπτύχθηκε από τον G.E.Stavroulaki. Σε άρθρο του εξετάστηκε η ανάκλαση των ελαστικών κυμάτων από μονομερή cracks που παρεμβάλλονται κάτω από την επιφάνεια υλικού, μελετάται δυναμικά με την μέθοδο συνοριακών στοιχείων (BEM-Boynitary element method) σε συνδυασμό με θεώρηση γραμμικού συμπληρωματιού προβλήματος (LCP, linear complementarity problem). Η επίδραση του crack στην απόκριση της παραγόμενης ηχώ, μελετάται με την βοήθεια αριθμητικών δοκιμών. Ακόμα, ένα μοντέλο νευρωνικού δικτύου προτείνεται και εξετάζεται για την ταξινόμηση των δεδομένων που βασίζονται στις αριθμητικά παραγόμενες κυματομορφές. Η θέση ή το μέγεθος του crack που βρίσκεται στο υπόστρωμα μπορεί να προσδιοριστεί από το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο [44].

3.2 FEM μοντέλα μελέτης επιρροής πάχους, υλικού μεταλλικού φιλμ και ατελειών στη δυναμική συμπεριφορά του

Για την FEM προσομοίωση δειγμάτων με ατέλειες –defects κρίνεται απαραίτητο να μελετηθεί αρχικά η επιρροή του πάχους του φιλμ στη δυναμική συμπεριφορά του όταν διεγείρεται από ns παλμό laser καθώς και ο βαθμός επιρροής του υλικού του φιλμ. Στην ανάλυση αυτή το υπόστρωμα του συστήματος του δείγματος διατηρείται αμετάβλητο.

Αρχικά μοντελοποιείται δείγμα με φιλμ Χρυσού πάχους 0.6 μm και υπόστρωμα γυαλιού πάχους 200 μm . Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε ως μοντέλο αναφοράς [7,8,11,39], επαληθευμένο και επιβεβαιωμένο από πειραματικές μετρήσεις όπως αναφέρθηκε και στην Παράγραφο 2.2. Σε αυτό το μοντέλο έγιναν τροποποιήσεις του πάχους του χρυσού

αρχικά για τη μελέτη επιρροή του. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε και αλλαγή υλικού και συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε Χαλκός, ώστε να εξεταστεί η επιρροή του υλικού στις θερμοελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου. Και για τα δύο υλικά πραγματοποιούνται αναλύσεις σε πάχη από 0.5 μm έως 1.2 μm .

Το μεταλλικό φιλμ Χρυσού, πάχους 0.6 μm , επιλέγεται να φιλοξενήσει τις ατέλειες, ρωγμές-cracks, που θα μελετηθούν. Έντεκα διαφορετικές περιπτώσεις μοντελοποιούνται και αναλύονται στη θερμοελαστική περιοχή του Χρυσού, στοχεύοντας στην ικανότητα ανίχνευσης των ατελειών με την βοήθεια της μελέτης των SAWs που γενιούνται και διαδίδονται στο δείγμα. Αρχικά κατασκευάζεται επιφανειακό crack ορθογώνιου σχήματος ανοικτής γεωμετρίας και μελετάται η συμπεριφορά των SAWs. Αυτό δημιουργείται με μορφή γρατζουνιάς –scratch, ανοικτής γεωμετρίας, πάνω στην επιφάνεια του Χρυσού, με μικρό βάθος στο μισό πάχος του μετάλλου, δηλαδή τα 0.3 μm . Το πλάτος αρχικά ήταν πολύ μικρό της τάξεως του 1 μm . Εν συνέχεια το ίδιο crack τροποποιείται καλύπτοντας διαφορετικά βάθη και στη συνέχεια επεκτείνεται σε βάθος και στο υπόστρωμα. Αφού μελετήσαμε την συμπεριφορά μετάδοσης των ακουστικών κυμάτων στο χρυσό ενώ τα crack υπήρχαν μόνο σε αυτόν το βάθος τη ρωγμής τροποποιήθηκε επίσης ώστε αυτή να επεκτείνεται και στο γυαλί. Επιπρόσθετα, εκτός του βάθους εξετάστηκε και το πλάτος του. Τέλος, δημιουργήθηκε μοντέλο με crack κλειστής γεωμετρίας και βάθη αντίστοιχα και άμεσα συγκρίσιμα με αυτά της ανοικτής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. Μαθηματική και υπολογιστική ανάλυση του FEM μοντέλου

4.1 Μαθηματική περιγραφή φυσικού προβλήματος

Όταν ένα στερεό δείγμα ακτινοβολείται από ένα βραχύ παλμό laser, με ενέργεια μικρότερη από το όριο τήξης του στερεού, ένα ορισμένο ποσό της ενέργειας του φωτός ανακλάται και το εναπομείναν διεισδύει στο δείγμα. Η απορρόφηση της ενέργειας του laser οδηγεί σε ταχεία αύξηση της θερμοκρασίας στον ακτινοβολημένο όγκο που με τη σειρά της προκαλεί ταχεία τοπική θερμική διαστολή.

Για διάρκεια παλμού laser της τάξης των μερικών ns, το νέφος ηλεκτρονίων είναι πάντα σε θερμική ισορροπία με το πλέγμα και η κοινή τους θερμοκρασία T , ακολουθεί την κλασσική Εξίσωση θερμική αγωγής:

$$\dot{T} = \left(\frac{\kappa}{\rho c} \right) \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c} - \frac{T_0 \varepsilon}{\rho c} \nabla \cdot \dot{u} \quad (1)$$

όπου T η συνάρτηση χρονικά μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας, \dot{T} η θερμοκρασιακή μεταβολή και T_0 η θερμοκρασία αναφοράς, κ , ρ , c οι σταθερές για την θερμική αγωγιμότητα, την πυκνότητα και την ειδική θερμοχωρητικότητα αντίστοιχα, ενώ ε η θερμική ακουστική σταθερά σύζευξης. Q η πηγή θερμότητας που ορίζεται ως η απορροφούμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου ανά δευτερόλεπτο. Ο τελευταίος όρος στην Εξίσωση περιγράφει την θερμότητα που παράγεται από μηχανικές ταλαντώσεις στο υλικό και u το διάνυσμα μετατόπισης. Η τιμή αυτού είναι αμελητέα σε σύγκριση με την θερμότητα που απορροφάται από την ενέργεια του laser, έτσι αυτός ο όρος μπορεί να αγνοηθεί, καταλήγοντας στην απλουστευμένη μορφή:

$$\dot{T} = \left(\frac{\kappa}{\rho c} \right) \nabla^2 T + \frac{Q}{\rho c} \quad (2)$$

Η τοπική αύξηση της θερμότητας προκαλεί διαστολή στο μεταλλικό φιλμ με αποτέλεσμα τη δημιουργία τασικού πεδίου και τη γένεση υπερηχητικών κυμάτων που διαδίδονται ακτινικά στο υλικό προς όλες τις κατευθύνσεις. Για ένα στερεό, η ελαστική διάδοση του κύματος που προκύπτει από την θερμική διαστολή, λόγω της αύξησης του πεδίου της θερμοκρασίας εκφράζεται από την ακόλουθη Εξίσωση:

$$\rho \ddot{u} = \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla u) \quad (3)$$

λ, μ είναι οι σταθερές Lamé.

4.2 Μαθηματική μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων

Η τρισδιάστατη μοντελοποίηση πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε προσφέρει μια ταυτόχρονη ανάλυση των θερμικών και δομικών παραμέτρων όπως ορίζεται από την επίλυση της θερμικής αγωγιμότητας και την κυματική Εξίσωση. Η Εξίσωση του κύματος καθορίζει τις μετατοπίσεις του στόχου που επιβάλλονται από την απόθεση ενέργειας του laser, ενώ η Εξίσωση της θερμικής αγωγιμότητας προβλέπει την κατανομή της θερμοκρασίας που προκαλείται από την απορρόφηση του παλμού στο στόχο. Η συναγωγή μεταφοράς θερμότητας, καθώς και η μεταφορά ακτινοβολίας στο στόχο θεωρήθηκαν αμελητέες.

Οι εξισώσεις της θερμικής αγωγιμότητας καθώς και της μετάδοσης των κυμάτων, αντίστοιχα, γράφονται ως έξης σε μητρωϊκή μορφή:

$$[K]\{T\} + [C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} = \{Q\} \quad (4)$$

$$[M] \left\{ \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right\} + [S]\{U\} = \{F\} \quad (5)$$

όπου $[K]$ είναι το μητρώο θερμικής αγωγιμότητας, $\{T\}$ το διάνυσμα της θερμοκρασίας, $[C]$ το μητρώο της θερμοχωρητικότητας, $\left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}$ το διάνυσμα του ρυθμού μεταβολής της θερμοκρασίας, $\{Q\}$ το διάνυσμα της πηγής θερμότητας, που ορίζεται ως η ενέργεια του laser που απορροφάται από το δείγμα ανά μονάδα όγκου ανά μονάδα χρόνου. Το $[M]$

είναι το μητρώο της μάζας, $[S]$ το μητρώο δυσκαμψίας, $\{U\}$ το διάνυσμα μετατόπισης, $\{\partial^2 U / \partial t^2\}$ το διάνυσμα της επιτάχυνσης και $\{F\}$ το διάνυσμα της δύναμης. Η δύναμη επί των στοιχείων του Λαγκραζιανού πλέγματος του στόχου οφείλεται στη θερμική παραμόρφωση που δημιουργείται από τις μεταβολές του θερμοκρασιακού πεδίου και περιγράφεται από το ολοκλήρωμα:

$$\{F\} = \int [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV \quad (6)$$

όπου $\{\varepsilon_0\}$ είναι το διάνυσμα θερμικής παραμόρφωσης, $[B]^T$ είναι το ανάστροφο μητρώο παραμορφώσεων-μετατοπίσεων βασισμένο σε συναρτήσεις σχήματος των στοιχείων και $[D]$ είναι το μητρώο τάσεων-παραμορφώσεων. Γι' αυτή τη θερμική-δομική ανάλυση, το ασθενές πεδίο σύζευξης των κυρίαρχων εξισώσεων (1) και (2) χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των μητρώων της Εξίσωσης

$$\begin{bmatrix} [M] & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{T} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [C] \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{T} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [S] & 0 \\ 0 & [K] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_c\} \\ \{Q_c\} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Τα συζευγμένα αποτελέσματα υπολογίζονται μέσω των όρων των φορτίων F_c και Q_c .

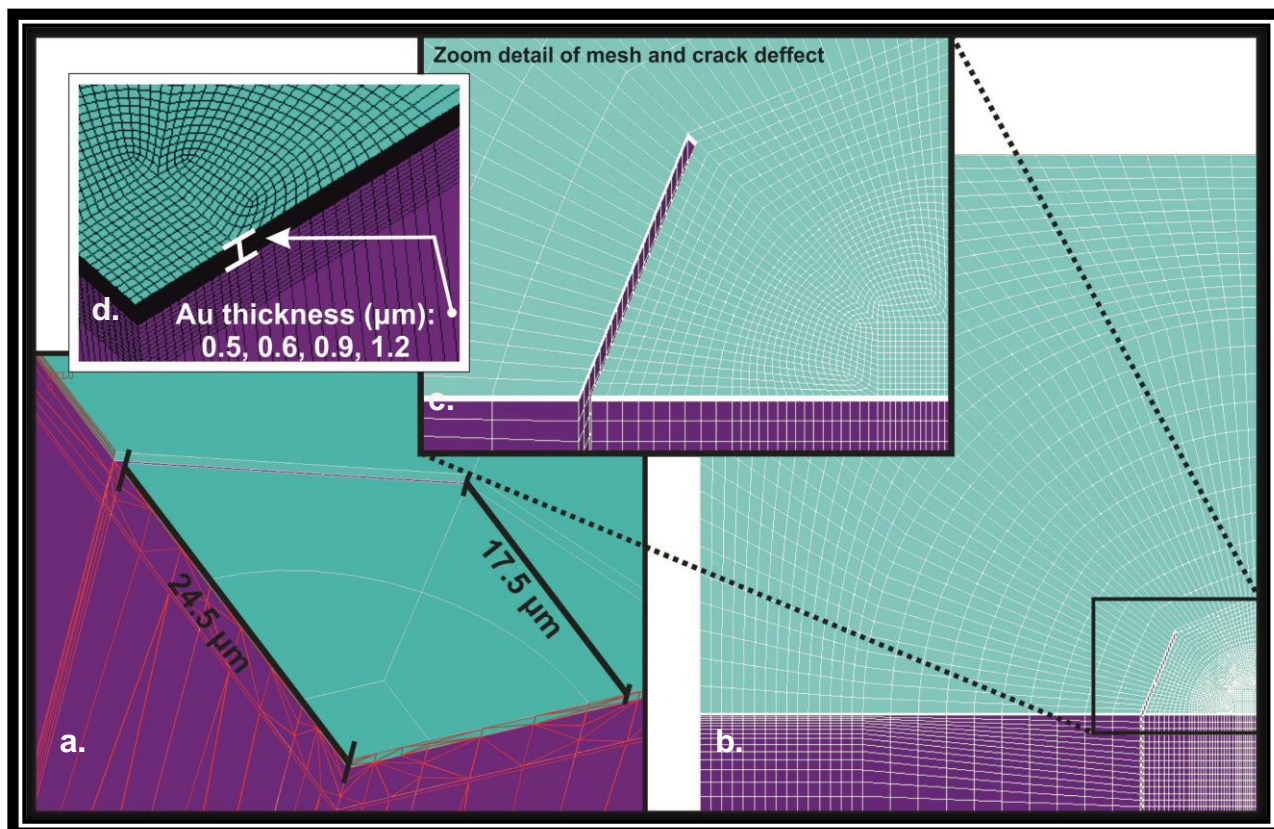
Η πηγή ενέργειας Q (ενέργεια ανά μονάδα όγκου ανά χρόνο) είναι ουσιαστικά η απορροφώμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου ανά μονάδα χρόνου και περιγράφεται από την ακόλουθη κατανομή Gauss στο χρόνο και στο χώρο:

$$Q(x, y, z, t) = I_0 (1 - R) e^{-4 \ln 2 (t/t_0)^2} e^{-\left(x^2 + y^2 / r_0^2\right)} a_b e^{-a_b z} \quad (8)$$

όπου I_0 είναι η ένταση του προσπίπτοντος laser στο στόχο, R είναι η οπτική ανακλαστικότητα του δείγματος, a_b είναι ο συντελεστής οπτικής απορρόφησης, t_0 είναι η διάρκεια του παλμού laser σε πλήρες πλάτος στο ήμισυ του μεγίστου (FWHM), (το πλήρες πλάτος στο ήμισυ του μεγίστου (FWHM) είναι έκφραση του βαθμού μιας συνάρτησης, που δίνεται από τη διαφορά μεταξύ των δύο ακραίων τιμών της ανεξάρτητης μεταβλητής στην οποία η εξαρτημένη μεταβλητή είναι ίση προς το ήμισυ της μέγιστης τιμής του) και r_0 είναι η ακτίνα της δέσμης FWHM (full width at half maximum) laser στο στόχο [8].

4.3 Περιγραφή FEM μοντέλου

Το μοντέλο που υλοποιήθηκε στο Ansys αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα χρυσού μετάλλου που έχει πάχος 0.6 μm και στηρίζεται σε ένα χοντρό γυάλινο υπόστρωμα πάχους 200 μm . Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η διακριτοποίηση του $\frac{1}{4}$ -συμμετρικού τρισδιάστατου μοντέλου και η θέση των ελαττωμάτων των διαφόρων περιπτώσεων δοκιμής. Στην αριστερή πλευρά του Σχήματος 4.1, απεικονίζεται το επιφανειακό κενό-ελάττωμα ανοικτής γεωμετρίας, ενώ η διακριτοποιημένη μορφή του όγκου και μια μεγεθυσμένη λεπτομέρεια απεικονίζεται στα δεξιά του ίδιου Σχήματος. Το ελάττωμα του υλικού έχει μήκος 20 μm και πλάτος 1 μm . Μια σημαντική θεώρηση της ανεπτυγμένης προσομοίωσης είναι ότι το Lagrangian πλέγμα προσαρμόζεται τοπικά ανάλογα με τις ανάγκες της προσομοίωσης [45]. Λόγω των υψηλών συχνοτήτων του laser που παράγει τα επιφανειακά ακουστικά κύματα, καθώς και της ανάγκης για χρονικά μεταβαλλόμενη ανάλυση, είναι απαραίτητη η χρήση μικρού μεγέθους στοιχείων. Ως εκ τούτου, μία ορθογώνια καλά διακριτοποιημένη κατασκευή δημιουργείται στο κέντρο του ακτινοβολημένου στόχου όπου αναπτύσσονται μεγάλες θερμικές τάσεις [32]. Θεωρήθηκαν συμμετρικά φορτία και οριακές συνθήκες και η συνάρτηση παραγωγής θερμότητας \mathbf{Q} , όπως περιγράφεται στην Εξ. (8), εφαρμόζεται στο σώμα φιλμ.



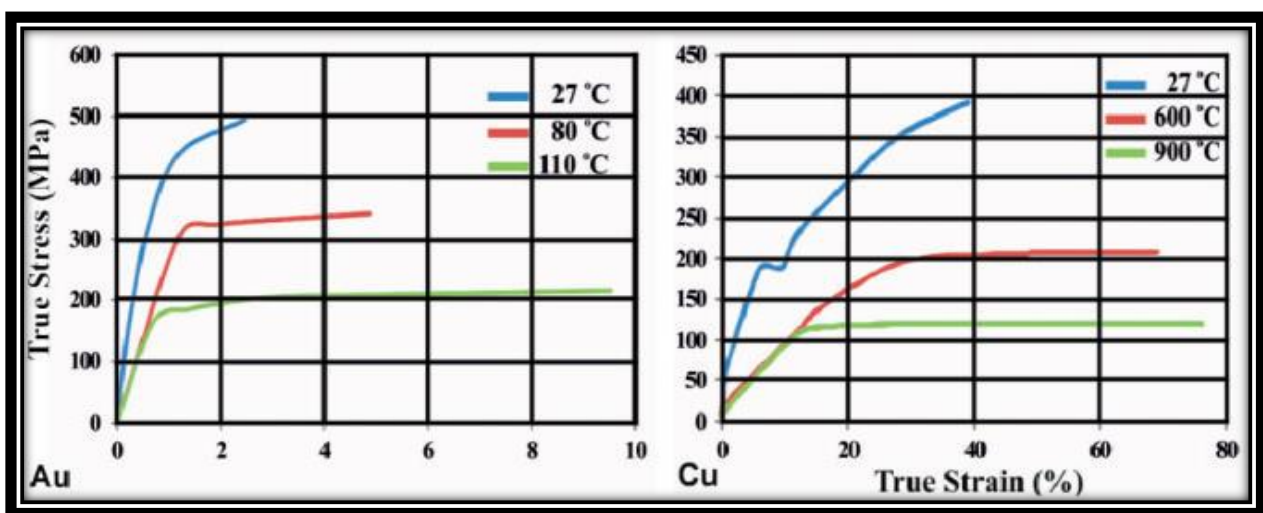
Σχήμα 4.1 Τρισδιάστατο μοντέλο: α.Θέση επιφανειακού και διαμπερούς ελαττώματος, β.διακριτοποίηση του διαμπερούς crack και γ.μεγεθυνση. Τα πάχη Χρυσού – Au. που εξετάστηκαν, δ. όπως και για Χαλκό -Cu.

Προκειμένου να προσομοιωθεί η πλαστική συμπεριφορά του υλικού και να καθοριστεί η σχέση τάσεων παραμορφώσεων του μεταλλικού φιλμ, υιοθετήθηκε μια ελαστοπλαστική προσέγγιση με πολυγραμμική ιστροπική σκλήρυνση, ανεξάρτητη ρυθμού παραμόρφωσης, η οποία είναι διαθέσιμη στο ANSYS. Η προσέγγιση αυτή έχει αξιολογηθεί στη βιβλιογραφία όχι μόνο για τα μέταλλα, αλλά και για πολυμερή υλικά [46]. Το καταστατικό αυτό μοντέλο για την ελαστική-πλαστική συμπεριφορά του υλικού ξεκινά με μια διάσπαση της συνολικής παραμόρφωσης σε ελαστικό και πλαστικό μέρος και ξεχωριστά καταστατικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για κάθε μέρος. Τα βασικά χαρακτηριστικά του αποτελούν: 1) η χρήση ενός Von Mises κριτηρίου διαρροής που καθορίζει την κατάσταση του υλικού κατά τη μετάβαση από την ελαστική στην ελαστική-πλαστική συμπεριφορά, 2) η ύπαρξη ενός κανόνα που καθορίζει την αύξηση στην πλαστική παραμόρφωση λόγω της αύξησης του φορτίου και 3) ένας κανόνας ιστροπικής σκλήρυνσης ο οποίος καθορίζει την εξέλιξη του κριτηρίου διαρροής κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης. Το κριτήριο διαρροής Von Mises είναι μια

βαθμωτή συνάρτηση, μια επιφάνεια στο χώρο των τάσεων. Το κριτήριο διαρροής έχει τη μορφή $f(\sigma) = \sigma_y$ όπου $f(\sigma)$ είναι μια βαθμωτή συνάρτηση της Von Mises τάσης, σ_y τρέχουσα τάση διαρροής που εξελίσσεται ως συνάρτηση της ποσότητας του πλαστικού παραγόμενου έργου. Οι τάσεις στο εσωτερικό της επιφάνειας διαρροής δίνονται από τη σχέση $f(\sigma) - \sigma_y < 0$ και καταλήγουν σε ελαστική παραμόρφωση. Η ιστροπική σκλήρυνση προκαλεί μια ομοιόμορφη αύξηση στο μέγεθος της επιφάνειας διαρροής και οδηγεί σε αύξηση της τάσης διαρροής κατά την περαιτέρω φόρτιση. Το υλικό διαρρέει όταν οι τάσεις φθάσουν στην επιφάνεια διαρροής και περαιτέρω φόρτιση προκαλεί πλαστική παραμόρφωση. Οι πλαστικές παραμορφώσεις συμβαίνουν σε κατεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια διαρροής. Τάσεις έξω από την επιφάνεια διαρροής δεν υπάρχουν και η πλαστική παραμόρφωση και το σχήμα της επιφάνειας διαρροής εξελίσσονται για να διατηρήσουν τις τάσεις είτε στο εσωτερικό είτε στην επιφάνεια διαρροής. Επιπλέον, σε μια πολυγραμμική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, το Young μέτρο ελαστικότητας και η τάση διαρροής ορίζουν το ελαστικό μέρος, ενώ το υπόλοιπο μέρος της καμπύλης προσεγγίζεται με διαφορετικά ζεύγη σημείων τάσης-παραμόρφωσης. Μετά την τάση διαρροής και έως την μέγιστη αντοχή του υλικού (ultimate tensile strength), η καμπύλη παρουσιάζει παραμορφωσιακή σκλήρυνση. Για θερμοκρασιακά-εξαρτώμενες καμπύλες, η τρέχουσα τάση διαρροής προσδιορίζεται με παρεμβολή θερμοκρασίας των τάσεων-πλαστικών παραμορφώσεων καμπυλών εισόδου.

Όταν το υλικό περνάει στην πλαστική περιοχή, περαιτέρω παραμόρφωση υλικού είναι ισοχωρική, συνεπώς επιτρέπεται η μεταβολή στο μήκος να σχετίζεται με την αλλαγή στην επιφάνεια και τα δεδομένα των μηχανικών τάσεων-παραμορφώσεων μπορούν να μετατραπούν σε δεδομένα πραγματικών τάσεων-παραμορφώσεων. Οι εξισώσεις που συνδέουν τις μηχανικές τάσεις-παραμορφώσεις με τις πραγματικές του υλικού ισχύουν μέχρι το σημείο μέγιστης αντοχής και έχουν την ακόλουθη μορφή $\sigma_t = \sigma_e (1 + \epsilon_e)$ και $\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e)$ (όπου σ_t πραγματική τάση; σ_e μηχανική τάση). Για το χαλκό, οι καμπύλες πραγματικών τάσεων-παραμορφώσεων [47] για ρυθμό παραμόρφωσης 1800 1/sec και 1900 1/sec. Για το χρυσό, οι καμπύλες πραγματικών τάσεων-παραμορφώσεων ελήφθησαν για συγκεκριμένη τάση της τάξεως των 6×10^{-4} 1/sec [48]. Οι καμπύλες πραγματικών τάσεων παραμορφώσεων που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μελέτη απεικονίζονται στο Σχήμα 4.2. Μετά το τελευταίο σημείο στις καμπύλες, ο κώδικας προσομοίωσης υποθέτει ότι το υλικό είναι τέλεια πλαστικό. Η παραμόρφωση συνεχίζει να αυξάνεται, χωρίς αύξηση της τάσης. Επιπλέον, αναφορικά με το Young μέτρο

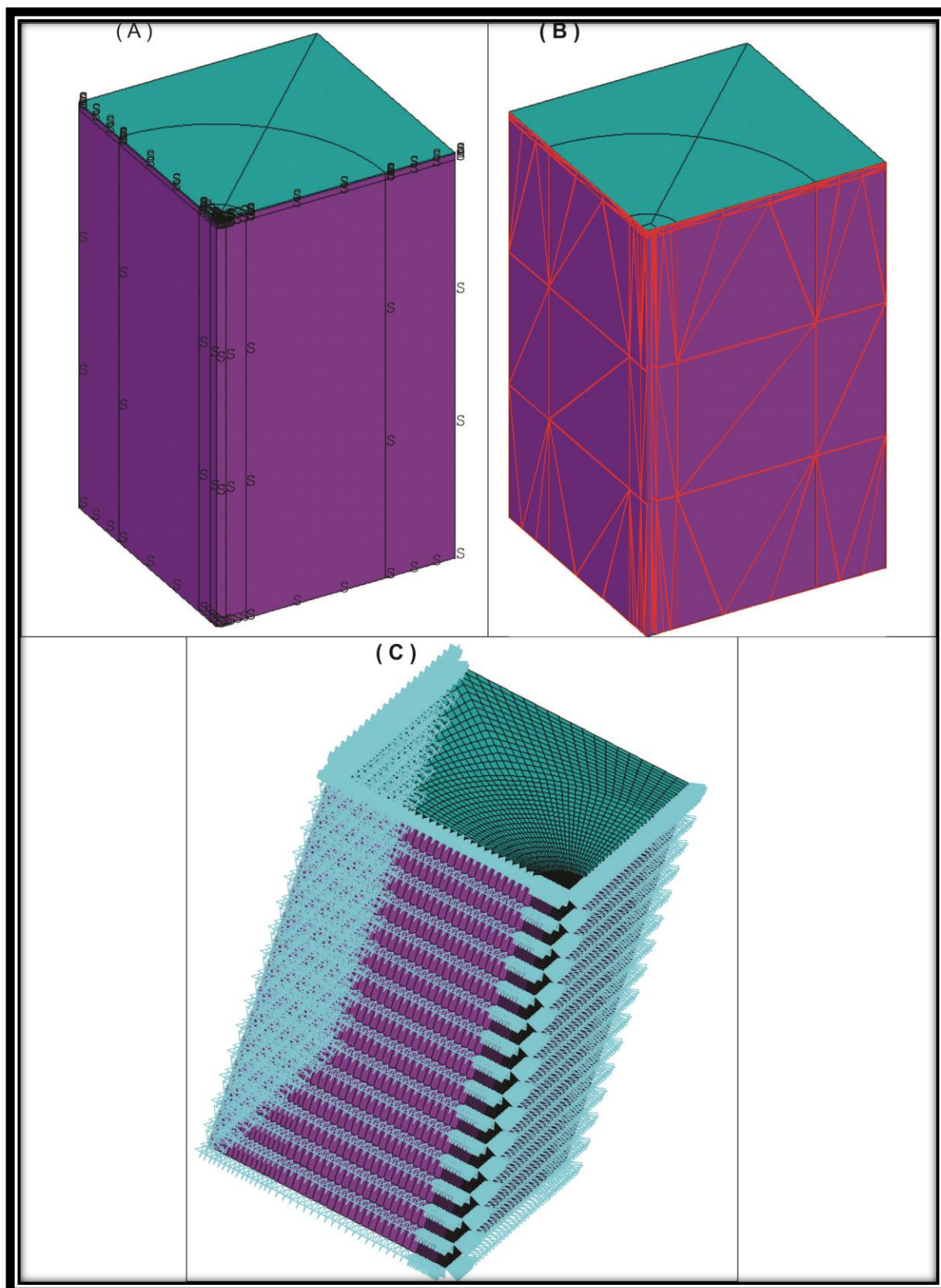
ελαστικότητας, θερμοκρασιακά εξαρτώμενες τιμές λαμβάνονται υπόψη για την προσομοίωση βάση των θερμοκρασιακά εξαρτώμενων καμπύλων τάσης-παραμόρφωσης. Οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας δεν μεταβάλλονται συνεχώς για δεδομένο εύρος θερμοκρασίας. Επιπρόσθετα, προσεγγιστικές καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων δοκιμάσθηκαν, με παρεμβολή μεταξύ των τριών επιπέδων θερμοκρασίας, για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της συμβολής τους στη λύση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής έδειξαν ότι η προσθήκη τους δεν οδηγεί σε αξιόλογες μεταβολές. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες που χρησιμοποιούνται για το χρυσό και χαλκό παρουσιάζονται όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία.



Σχήμα 4.2 Γραφικές παραστάσεις πραγματικών τάσεων για χρυσό και χαλκό

4.4 Οριακές συνθήκες B.C. και ιδιότητες των υλικών

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε είναι ¼ -συμμετρικό, με αποτέλεσμα να εφαρμοστούν συνθήκες συμμετρίας στις δύο πλευρές όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2 (Α).



Σχήμα 4.3 Οριακές συνθήκες: (Α) συνθήκη συμμετρίας (Β) μηδενική ροή θερμότητας (C) πακτώσεις.

Η ροή θερμότητας στις πλευρές που επιβλήθηκε συνθήκη συμμετρίας να είναι ίση με μηδέν όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3 (Β). Τέλος εισήχθησαν οι αναγκαίες πακτώσεις ως προς τους άξονες x, y, z σε μία από τις πλευρές του μοντέλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα

4.3 (Γ) -αριστερή πλευρά, έτσι ώστε να αποφύγουμε την μετατόπιση του από τη θέση ισορροπίας του και παράλληλα σε δύο πλευρές του μοντέλου η μία περιορίζεται να μην κινείται κατά x-άξονα και η άλλη κατά y-άξονα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3 (Γ). Αυτές οι οριακές συνθήκες εφαρμόζονται σε όλες τις περιπτώσεις και στα μοντέλα με ελαττώματα και σε αυτά τα οποία δεν είχαν ελάττωμα αλλά διαφοροποιούνταν το πάχος τους, με σκοπό την μελέτη της μεταβολής της θερμοκρασίας και του πεδίου μετατοπίσεων.

Η εξέταση των προαναφερθέντων μοντέλων με διαφορετικό μόνο πάχος φιλμ, υλοποιείται με την χρήση δύο υλικών, του Χρυσού και του Χαλκού, πάνω σε υπόστρωμα από γυαλί. Οι μηχανικές τους ιδιότητες του Χρυσού και του Χαλκού: πυκνότητα -density, λόγος Poisson -Poisson's ratio, μέτρο ελαστικότητας -Young modulus και συντελεστής θερμικής διαστολής -thermal expansion coefficient παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.1. και 4.2. Για το Χρυσό και το Χαλκό, στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι θερμικές ιδιότητες: θερμική αγωγιμότητα -thermal conductivity και η ειδική θερμότητα -specific heat, σε σχέση με τη θερμοκρασία του μετάλλου.

Μηχανικές ιδιότητες Χρυσού -Au				
Θερμοκρασία °C	Μέτρο ελαστικότητας kPa	Λόγος Poisson	Πυκνότητα g/cm ³	Συντελεστής θερμικής διαστολής 1/°C
27	64.6 x 10 ⁶	0.44	19320 x 10 ⁻¹⁵	14.2 x 10 ⁻⁶
80	25.47 x 10 ⁶	0.44		
110	23.549 x 10 ⁶	0.45		
550	16 x 10 ⁶	0.455		
1065	6 x 10 ⁶	0.46		

Πίνακας 4.1 Μηχανικές ιδιότητες Χρυσού [49-52].

Μηχανικές ιδιότητες Χαλκού -Cu				
Θερμοκρασία °C	Μέτρο ελαστικότητας kPa	Λόγος Poisson	Πυκνότητα g/μm ³	Συντελεστής θερμικής διαστολής 1/°C
27	110 x 10 ⁶	0.3406	8938 x 10 ⁻¹⁵	14.2 x 10 ⁻⁶
75	108 x 10 ⁶	0.3406		
125	106 x 10 ⁶	0.3435		
200	92 x 10 ⁶	0.345		
315	82 x 10 ⁶	0.345		
425	56 x 10 ⁶	0.347		
525	40 x 10 ⁶	0.35		
650	26 x 10 ⁶	0.35		
760	16 x 10 ⁶	0.355		
870	14 x 10 ⁶	0.355		
1085	10 x 10 ⁶	0.36		

Πίνακας 4.2 Μηχανικές ιδιότητες Χαλκού [49-52].

Θερμικές ιδιότητες Χρυσού -Au			Θερμικές ιδιότητες Χαλκού -Cu		
Θερμοκρασία °C	Θερμική αγωγιμότητα fW/(μm·°C)	Ειδική θερμότητα fJ/(g·°C)	Θερμοκρασία °C	Θερμική αγωγιμότητα fW/(μm·°C)	Ειδική θερμότητα fJ/(g·°C)
27	317 x 10 ⁹	129 x 10 ¹²	27	401 x 10 ⁹	393 x 10 ¹²
127	311 x 10 ⁹	129.5 x 10 ¹²	127	391 x 10 ⁹	398.4 x 10 ¹²
227	304 x 10 ⁹	132.3 x 10 ¹²	227	385 x 10 ⁹	408 x 10 ¹²
327	298 x 10 ⁹	135.3 x 10 ¹²	327	379 x 10 ⁹	417 x 10 ¹²
527	284 x 10 ⁹	135.3 x 10 ¹²	527	366 x 10 ⁹	-
727	270 x 10 ⁹		627	-	441 x 10 ¹²
927	255 x 10 ⁹		727	352 x 10 ⁹	-
1000	255 x 10 ⁹		927	339 x 10 ⁹	480 x 10 ¹²
			1000	332 x 10 ⁹	506 x 10 ¹²

Πίνακας 4.3 Τιμές ειδικής θερμότητας και θερμικής αγωγιμότητας εξαρτώμενες της θερμοκρασίας Χρυσού και Χαλκού [49-52].

Τέλος, στον Πίνακα 4.4 φαίνονται οι μηχανικές ιδιότητες του γυαλιού που είναι το κοινό υπόστρωμα για όλα τα μοντέλα.

Μηχανικές ιδιότητες υποστρώματος γυαλιού -BK7						
Θερμοκρασία °C	Μέτρο ελαστικότητας kPa	Λόγος Poisson	Πυκνότητα g/μm ³	Συντελεστής θερμικής διαστολής 1/°C	Ειδική θερμότητα fJ/(g·°C)	Θερμική αγωγιμότητα fW/(μm·°C)
27	81 x 10 ⁶	0.206	2510 x 10 ⁻¹⁵	7.1 x 10 ⁻⁶	858 x 10 ¹²	1.114 x 10 ⁹

Πίνακας 4.4 Θερμομηχανικές ιδιότητες υποστρώματος Γυαλιού -BK7 [49-52].

Όλες αυτές οι θερμομηχανικές ιδιότητες των υλικών εισάγονται παραμετρικά στο πρόγραμμα Ansys, όπου έχει αναπτυχθεί το μοντέλο. Έτσι, με βάση τη θερμοκρασιακή του συμπεριφορά λαμβάνονται υπόψη οι αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες, σε κάθε υπολογιστικό βήμα επίλυσης του συζευγμένου μαθηματικού προβλήματος. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

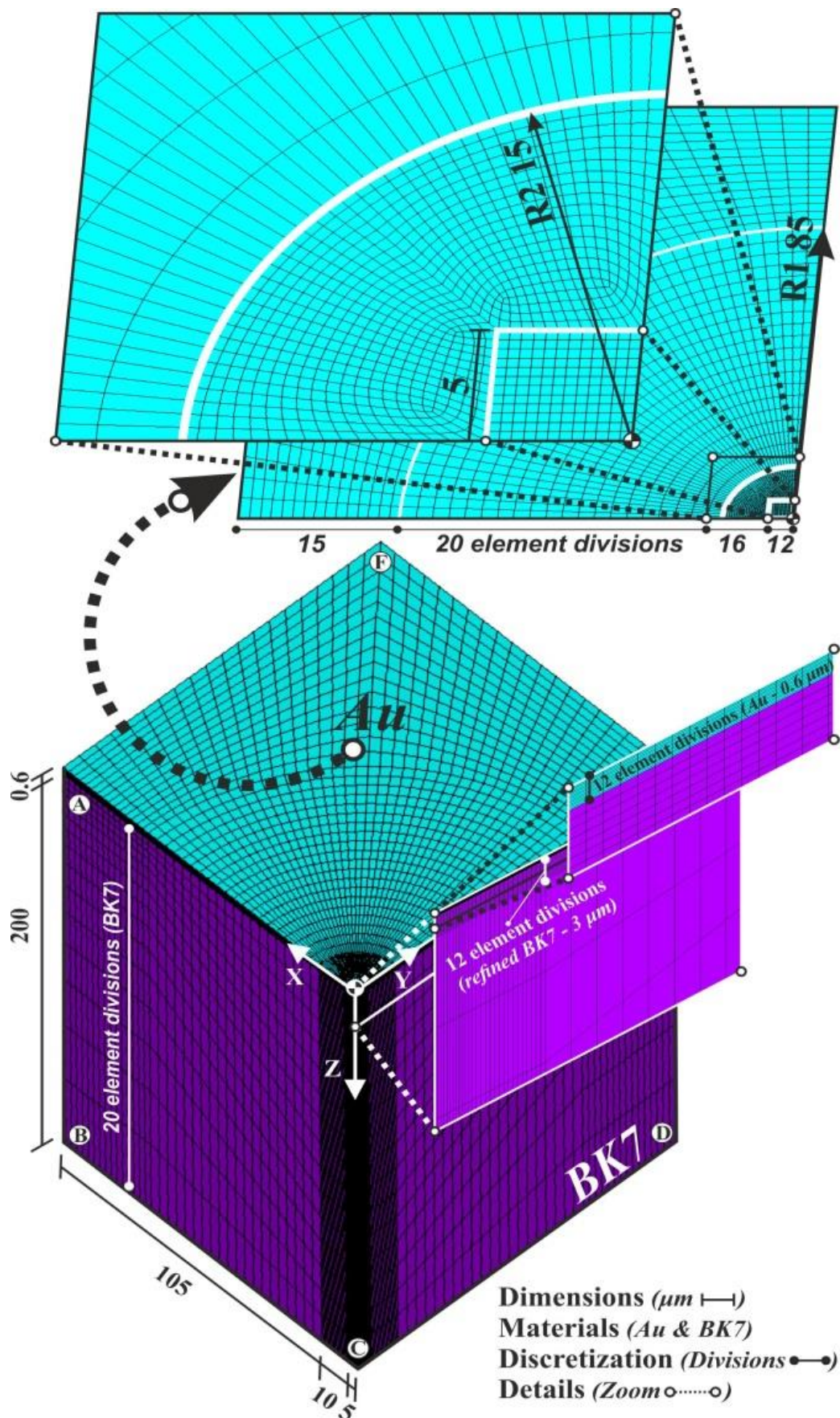
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων θερμομηχανικής συμπεριφοράς μεταλλικών δειγμάτων

Το μοντέλο αναφοράς που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4, χρησιμοποιείται για τη μελέτη της επιρροής του πάχους του μεταλλικού φιλμ, αλλά και της ύπαρξης ατελειών, στη δυναμική συμπεριφορά του φιλμ-υποστρώματος όταν ακτινοβολείται από παλμικό laser διάρκειας ns. Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι γεωμετρικές διαστάσεις του μοντέλου, καθώς και λεπτομέρειες για τη διακριτοποίηση που υιοθετήθηκε.

Όπως απεικονίζεται με λεπτομέρειες στη μεγεθυμένη εικόνα της ακτινοβολημένης επιφάνειας, ειδική μεταχείριση δίδεται στο τοπικά προσαρμοστικό πλέγμα της κυκλικής επιφάνειας της ακτίνας R2 του spot της δέσμης του laser. Μια δεύτερη κυκλική επιφάνεια με ακτίνα R1 περικλείει την R2 και δημιουργεί κατάλληλη ομαλή διακριτοποίηση που απαιτείται για την προσομοίωση της γένεσης και μετάδοσης των SAWs. Οι προϋποθέσεις αυτές καταλήγουν σε ένα τοπικά προσαρμοστικό ομαλό πλέγμα των ~20000 στοιχείων στο τεταρτοκυκλικό τομέα ακτίνας $R1 = 85 \mu\text{m}$, συνολικά ~27000 στοιχείων για ολόκληρο τον όγκο του λεπτού φιλμ. Ολόκληρο το δείγμα διακριτοποιείται με συνολικό αριθμό ~90000 στοιχείων. Στο Σχήμα δίδονται οι αριθμητικές λεπτομέρειες της κάθε τοπικής διακριτοποίησης στοιχείων -element division.

Το μοντέλο αναφοράς, βλ. Παραγράφους 4.2 και 4.3, είναι $\frac{1}{4}$ -συμμετρικό. Αναφορικά με τις συνθήκες φόρτισης, η συνάρτηση παραγωγής θερμότητας ανά μονάδα όγκου που δίδεται στην Εξίσωση 8, στην Παράγραφο 4.2, εφαρμόζεται στο φιλμ. Συνθήκες συμμετρίας εφαρμόζονται στις εξωτερικές πλευρές XZ και YZ. Η ροή θερμότητας είναι ίση με μηδέν στις πλευρές που επιβλήθηκε συνθήκη συμμετρίας. Η ένταση του laser παραμένει σταθερή στα 0.20 J/cm^2 για όλες τις προσομοιώσεις. Η διάμετρος r_0 του spot της δέσμης του laser είναι $11.5 \mu\text{m}$. Η χρονική διάρκεια του χρονικά εξαρτώμενου συζευγμένου προβλήματος είναι 32 ns με χρονικό βήμα επίλυσης $\Delta t = 1 \text{ ns}$.



Σχήμα 5.1 Λεπτομέρειες τρισδιάστατου $\frac{1}{4}$ -συμμετρικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων [8].

Διατηρώντας το πάχος του γυάλινου υποστρώματος σταθερό, στα 200 μm , εξετάζεται στην Παράγραφο 5.1 η θερμομηχανική χώρο-χρονική απόκριση του συστήματος μεταλλικού φιλμ-υποστρώματος για τέσσερα πάχη: 0.5, 0.6, 0.9 και 1.2 μm , όταν ακτινοβολείται με παλμικό laser διάρκειας ns. Η ανάλυση πραγματοποιείται πρώτα σε δείγματα με φιλμ χρυσού και στη συνέχεια χαλκού, στοχεύοντας στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επιρροή της συμπεριφοράς του πάχους στο θερμοκρασιακό πεδίο και στο πεδίο μετατοπίσεων.

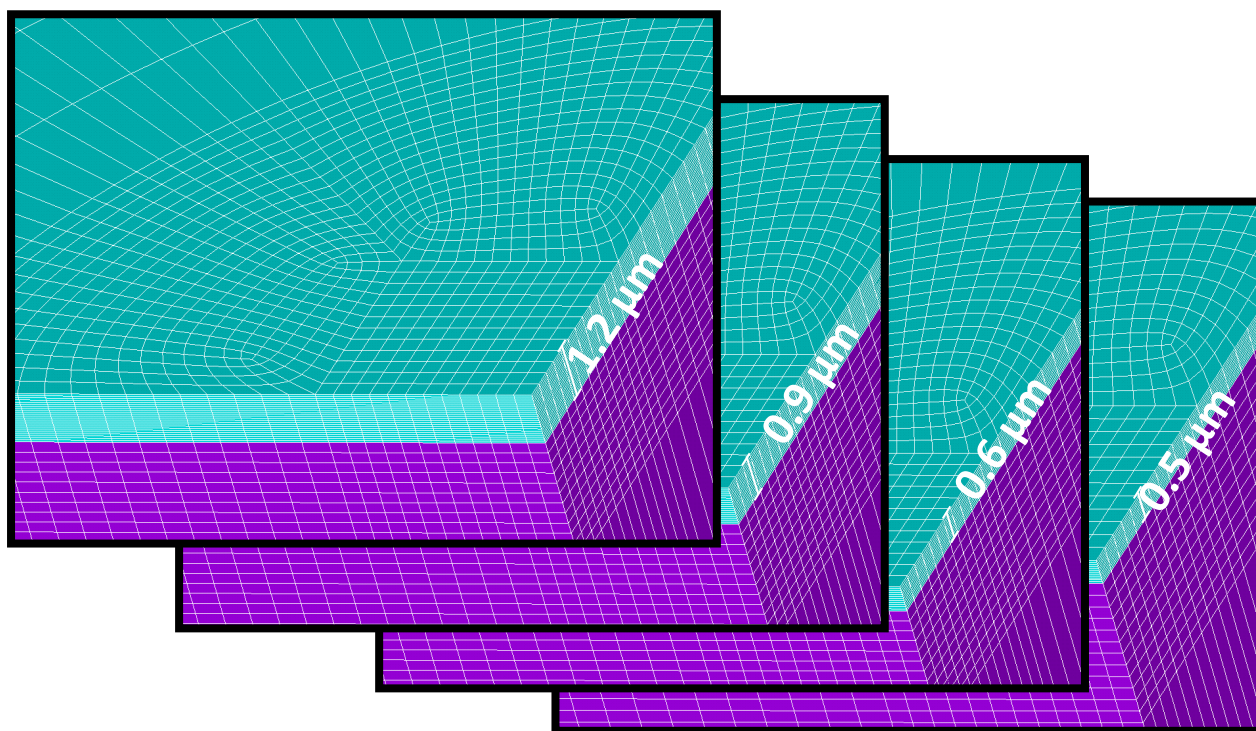
Στην Παράγραφο 5.2 που ακολουθεί, δημιουργούνται ατέλειες, συγκεκριμένα ρωγμές-gaps, τόσο επιφανειακά, στο φιλμ χρυσού, όσο και επεκτεινόμενες στο υπόστρωμα. Μελετάται η επιρροή των gaps στη θερμομηχανική χώρο-χρονική συμπεριφορά του συστήματος μεταλλικού φιλμ-υποστρώματος. Εξετάζονται η γένεση, η διάδοση και τα χαρακτηριστικά των SAWs και κατ' επέκταση με βάση την παρατήρηση αυτών, η δυνατότητα εντοπισμού ύπαρξης, θέσης και είδους ατέλειας στα ακτινοβολούμενα δείγματα. Η δημιουργία των SAWs έχει ως επίκεντρο το σημείο ακτινοβόλησης και η διάδοσή τους είναι ακτινική, προς όλες τις κατευθύνσεις στο δείγμα. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν τα πεδία μετατοπίσεων και θερμότητας στο ίδιο χρονικό βήμα $-\Delta t$ (ns) επίλυσης $-\text{time step}$.

5.1 Επίδραση πάχους μεταλλικών φιλμ ακτινοβολούμενων με ns-παλμούς laser στη δυναμική συμπεριφορά φιλμ-υποστρώματος

Στον Πίνακα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και αφορούν μεταλλικά φιλμ Χρυσού -Au και Χαλκού -Cu με πάχος αυξανόμενο από 0.5, σε 0.6, σε 0.9 έως 1.2 μm . Στον ίδιο Πίνακα, δίδεται η ονομασία των μοντέλων καθώς και η αντίστοιχη Παράγραφος παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

Χρυσός		Πάχος Φιλμ	Χαλκός	
Ονομασία	Παράγραφος		Ονομασία	Παράγραφος
Au-01	5.1.1	0.5 μm	Cu-01	5.1.6
Au-02	5.1.2	0.6 μm	Cu-02	5.1.7
Au-03	5.1.3	0.9 μm	Cu-03	5.1.8
Au-04	5.1.4	1.2 μm	Cu-04	5.1.9

Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστική ονομασία, υλικό, πάχος φίλμ και Παράγραφος.

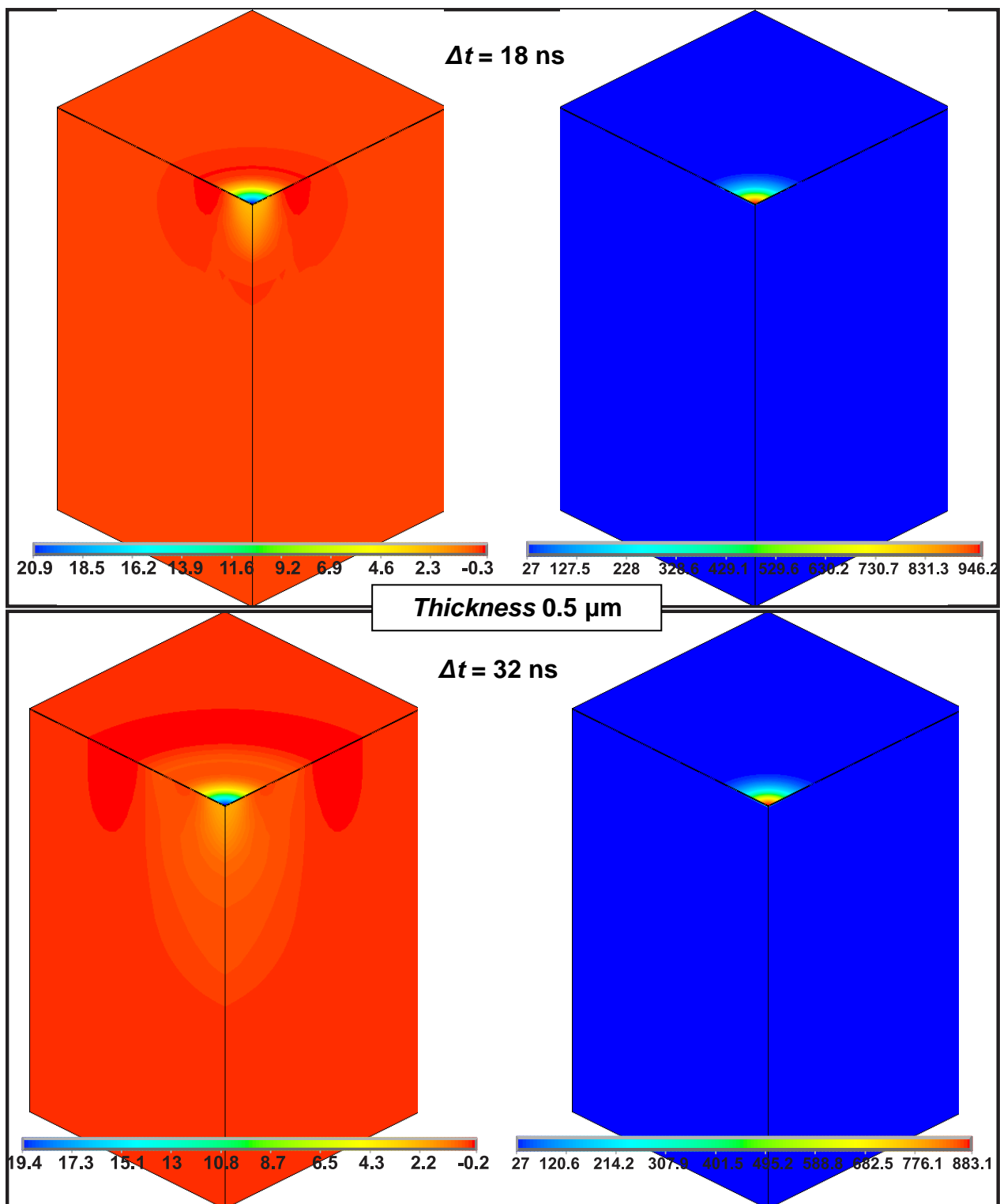


Σχήμα 5.2 Απεικόνιση διακριτοποίησης πλέγματος για τα τέσσερα διαφορετικά πάχη.

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται το πλέγμα για τα τέσσερα διαφορετικά πάχη χρυσού, για σταθερή τιμή πάχους του γυάλινου υποστρώματος. Η διακριτοποίηση κατά μήκος του άξονα $-Z$ παραμένει σταθερή στα 50 nm ύψος για κάθε στοιχείο για όλα τα πάχη. Επιπλέον, οι οριακές συνθήκες και συνθήκες φόρτισης παραμένουν ίδιες για όλα τα μοντέλα. Για κάθε ένα από τα τέσσερα διαφορετικά πάχη μετάλλου, χρυσό και χαλκό, παρουσιάζονται χαρακτηριστικά στιγμιότυπα -screenshots που προβάλλουν το πεδίο των μετατοπίσεων (nm) στον καθολικό κάθετο άξονα $-Z$, βλ. Σχήμα 5.1, με ορατή τη γέννηση και διάδοση των SAWs, καθώς και το αντίστοιχο θερμοκρασιακό πεδίο για κάθε Δt (ns).

5.1.1 Au-01

Το πρώτο μοντέλο που εξετάστηκε έχει πάχος φιλμ Χρυσού 0.5 μm . Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μετατοπίσεων και θερμοκρασιών για τις χρονικές στιγμές $\Delta t=18$ ns και $\Delta t=32$ ns. Τη χρονική στιγμή $\Delta t=18$ ns παρατηρούνται οι μέγιστες εγκάρσιες μετατοπίσεις. Η μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία είναι 946 $^{\circ}\text{C}$ η οποία είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του χρυσού 1064 $^{\circ}\text{C}$, εξασφαλίζοντας την παραμονή του μετάλλου στην ελαστική περιοχή. Για $\Delta t=32$ ns, την τελευταία χρονική στιγμή της διάρκειας της προσομοίωσης, παρατηρείται η δημιουργία δεύτερου υπερήχου.



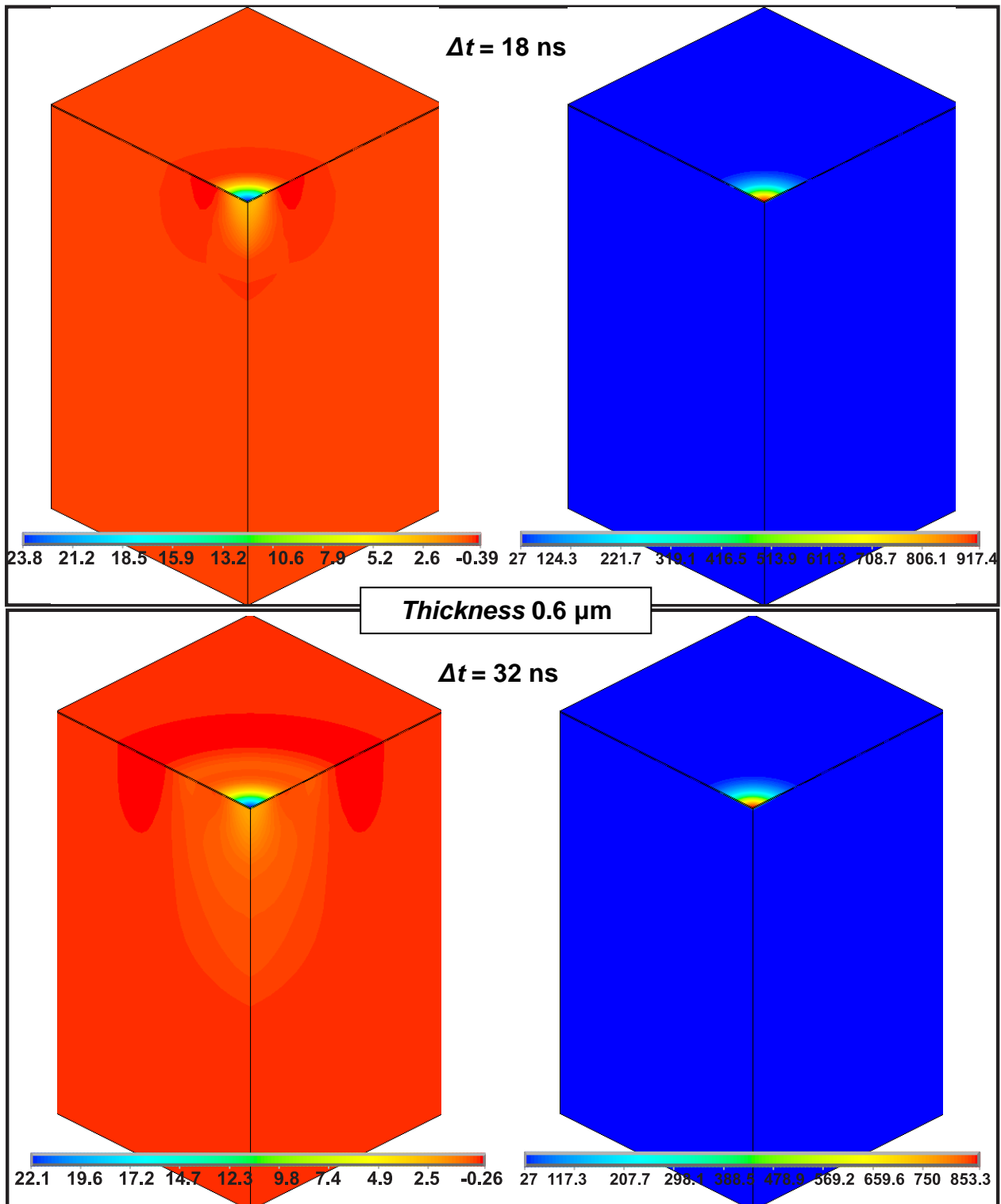
Σχήμα 5.3 Au-01 - Κάθετη μετατόπιση Z-άξονα (nm) και Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) για $\Delta t = 18$ και 32 ns .

Στο Σχήμα 5.3 με μπλέ χρωματισμό χαρακτηρίζεται το ύψωμα του υπερήχου προς τα πάνω. Με έντονο κόκκινο τιμή -0.3 και -0.2 nm βλέπουμε τη βύθιση του υλικού (το πλάτος υπερήχου) ενώ προπορεύεται ο υπέρηχος.

5.1.2 Au-02

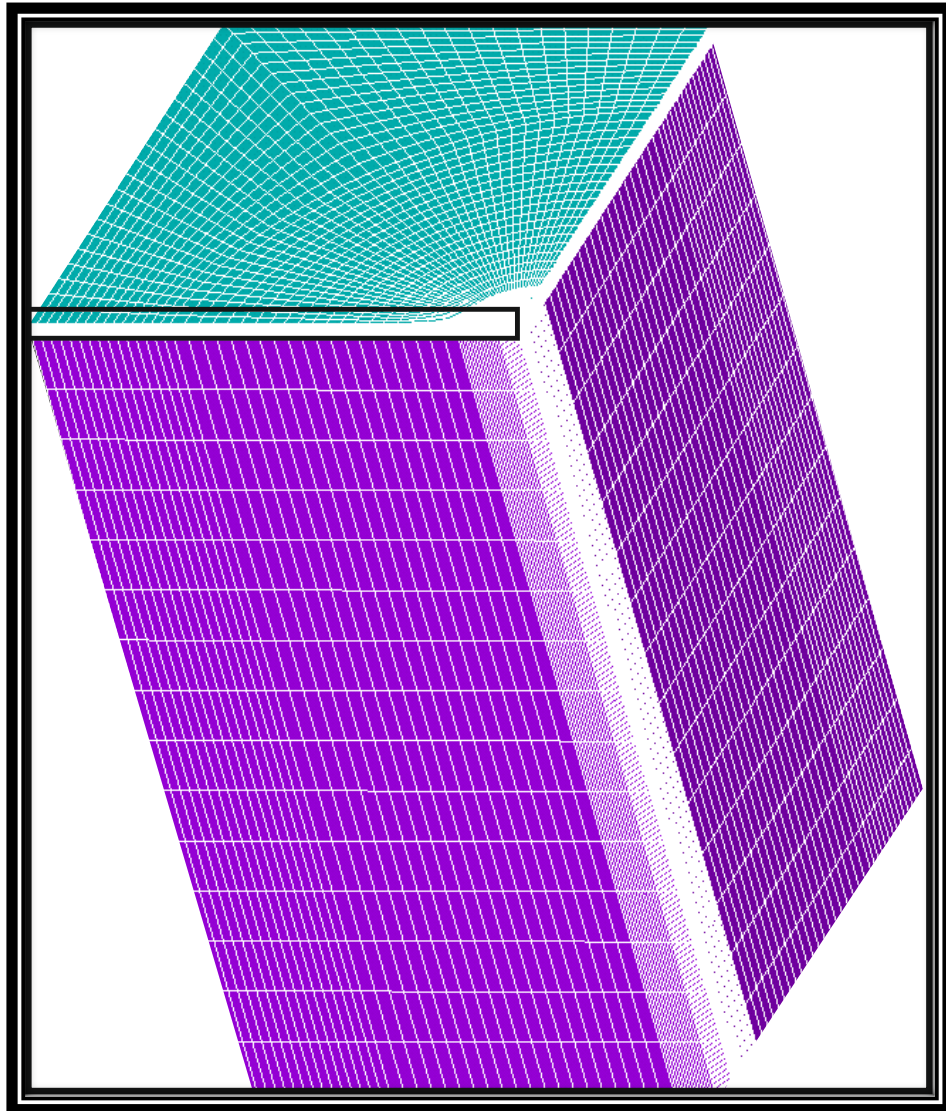
Το δεύτερο μοντέλο που εξετάστηκε έχει πάχος φιλμ Χρυσού $0.6 \mu\text{m}$. Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μετατοπίσεων και θερμοκρασιών για τις

χρονικές στιγμές $\Delta t=18$ ns και $\Delta t=32$ ns. Τη χρονική στιγμή $\Delta t=18$ ns παρατηρούνται οι μέγιστες εγκάρσιες μετατοπίσεις. Η μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία είναι 917.4°C η οποία είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του Χρυσού 1064°C , εξασφαλίζοντας την παραμονή του μετάλλου στην ελαστική περιοχή. Για $\Delta t=32$ ns, την τελευταία χρονική στιγμή της διάρκειας της προσομοίωσης, παρατηρείται η δημιουργία δεύτερου υπερήχου.



Σχήμα 5.4 Au-02 - Κάθετη μετατόπιση Z-άξονα (nm) και Θερμοκρασία (°C) για $\Delta t = 18$ και 32 ns.

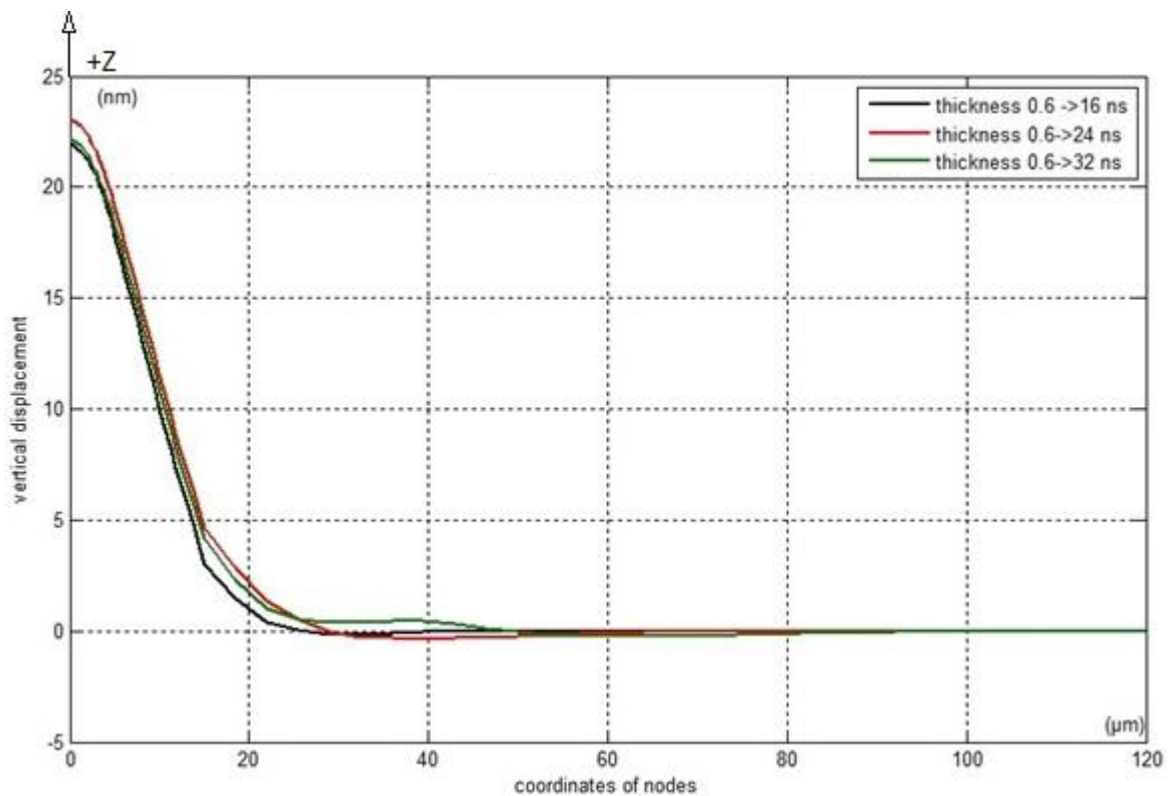
Στο Σχήμα 5.4 με μπλέ χρωματισμό χαρακτηρίζεται το ύψωμα του υπερήχου προς τα πάνω. Με έντονο κόκκινο τιμή -0.39 και -0.26 nm βλέπουμε τη βύθιση του υλικού (το πλάτος υπερήχου) ενώ προτοpreύεται ο υπέρηχος.



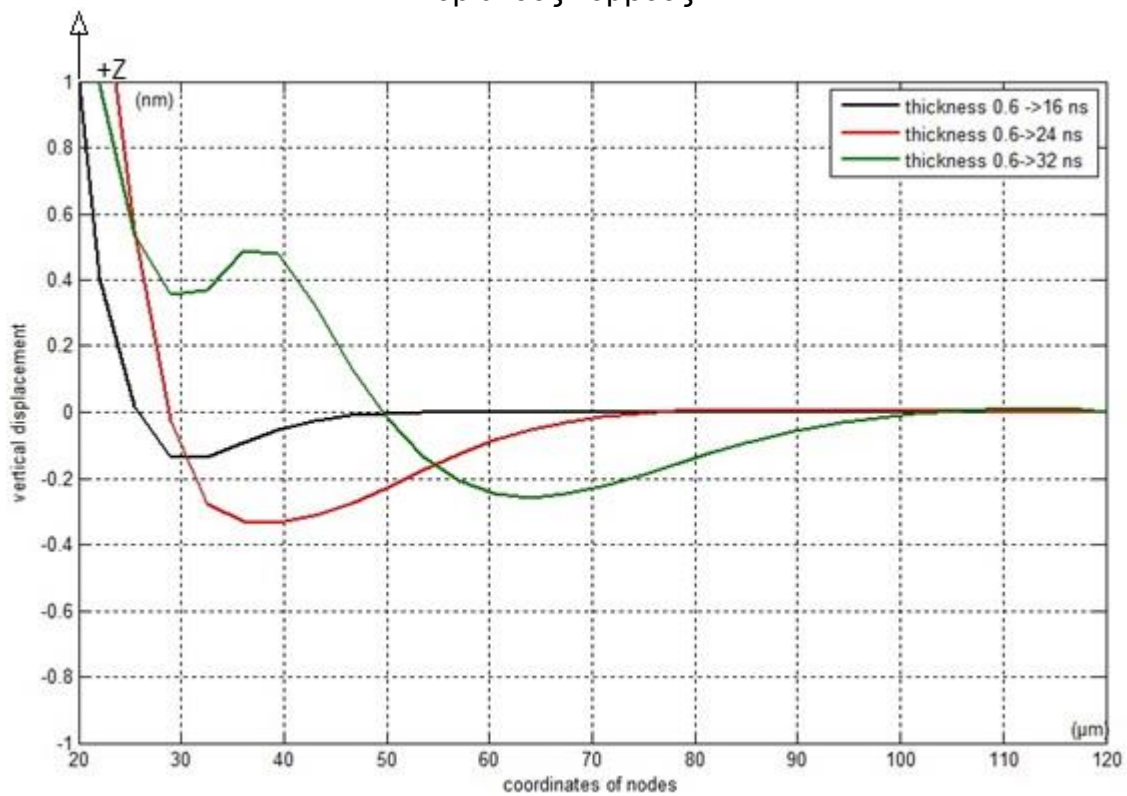
Σχήμα 5.5 Κόμβοι με συντεταγμένες $Y, Z=0, 0 \leq X \leq 120 \mu\text{m}$.

Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζονται επιλεγμένοι οι οριακοί στη συμμετρία, επιφανειακοί κόμβοι του φιλμ, με συντεταγμένες $Z=0, Y=0, 0 \leq X \leq 120 \mu\text{m}$. Για την καλύτερη οπτική απόδοση της συμπεριφοράς των SAWs, οι κόμβοι αυτοί επιλέγονται και για τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές, $\Delta t=16, 24, 32$ ns, καταγράφονται οι τιμές των μετατοπίσεων τους. Η απεικόνιση των τιμών αυτών καταλήγει στη Γραφική παράσταση του Σχήματος 5.6 όπου η ανάπτυξη και εξέλιξη των υπερήχων για στις τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές είναι καθαρά ορατή. Οι τιμές του οριζόντιου άξονα αντιπροσωπεύουν τις συντεταγμένες των κόμβων κατά τον X-άξονα σε μm , ενώ στον κάθετο άξονα οι τιμές αντιπροσωπεύουν την μετατόπιση στον Z-άξονα των κόμβων (βλ. Καθολικό Σύστημα Συντεταγμένων Σχήματος

5.1). Στο Σχήμα 5.7 μεγεθύνεται η περιοχή της γραφικής παράστασης από $20 \leq X \leq 120$ μm και $-5 \leq Z \leq 1$ μm .



Σχήμα 5.6 Μετατοπίσεις στον Z-άξονα για $\Delta t = 16, 24, 32$ ns για τους επιλεγμένους οριακούς κόμβους.

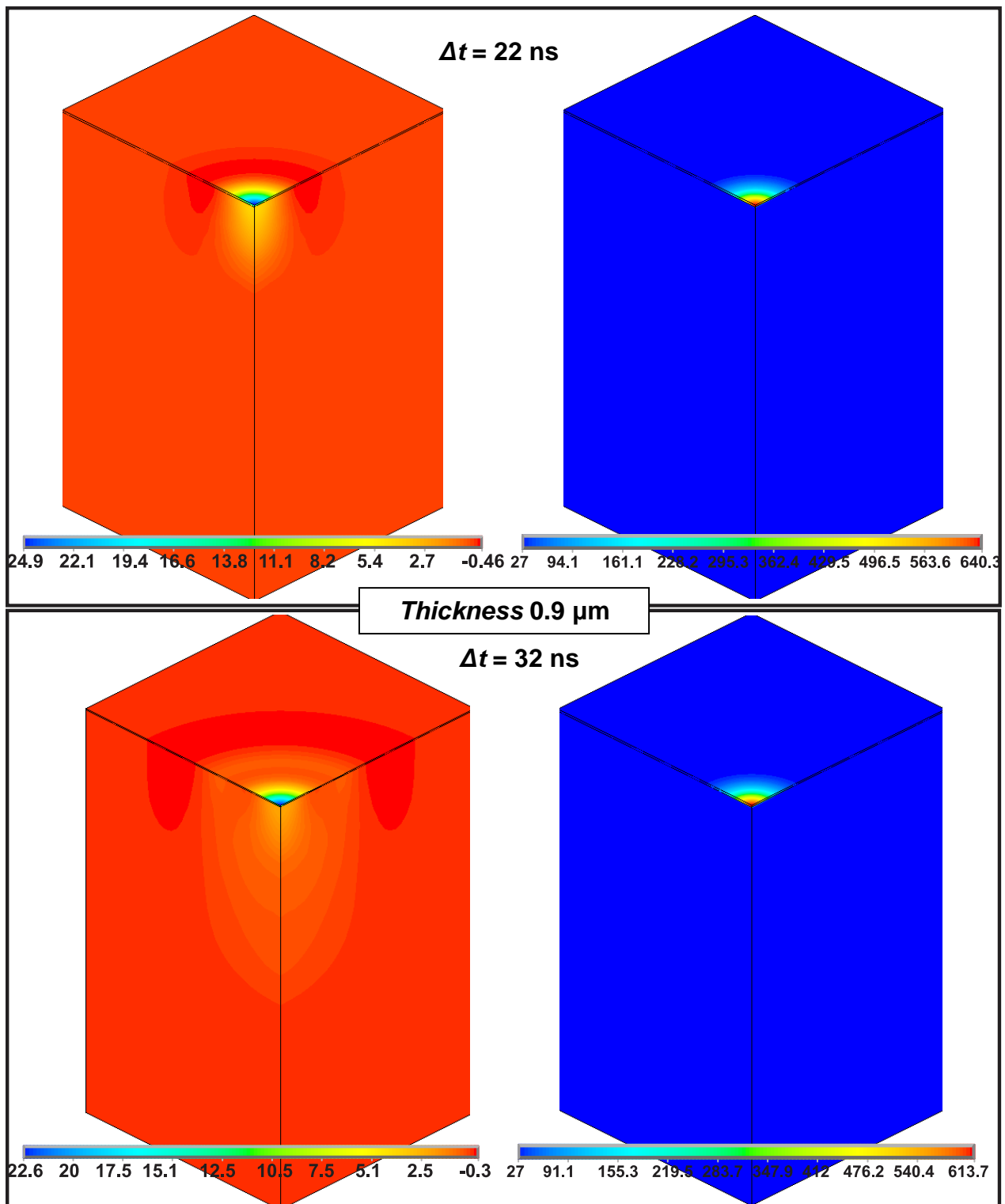


Σχήμα 5.7 Μεγέθυνση περιοχής από $20 \leq X \leq 120$ μm και $-5 \leq Z \leq 1$ μm .

Παρατηρούμε ότι την χρονική στιγμή $t=16$ ns έχει αρχίσει και δημιουργείται ο πρώτος υπέρηχος (μαύρη γραμμή). Στην συνέχεια στη χρονική στιγμή $\Delta t= 24$ ns (κόκκινη γραμμή) έχει ελάχιστο -0.35 nm και μέγιστο λίγο πάνω από το 0. Τελικά στη χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns φαίνεται να έχει δημιουργηθεί ένας δεύτερος υπέρηχος με μέγιστη τιμή 0.44 nm.

5.1.3 Au-03

Το τρίτο μοντέλο που εξετάστηκε έχει πάχος φιλμ Χρυσού 0.9 μm .



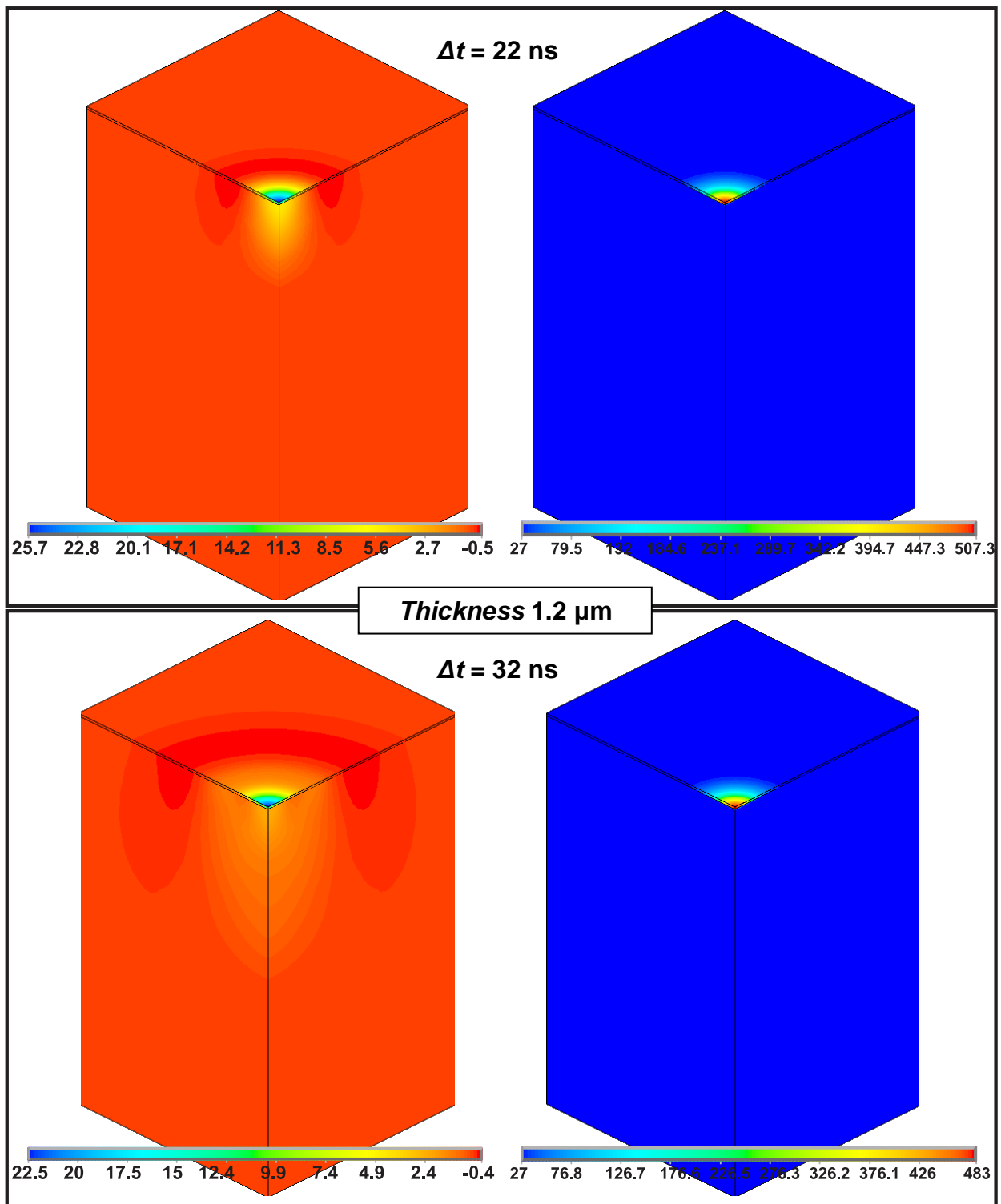
Σχήμα 5.8 Au-03 - Κάθετη μετατόπιση Z-άξονα (nm) και Θερμοκρασία (°C) για $\Delta t = 22$ και 32 ns.

Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μετατοπίσεων και θερμοκρασιών για τις χρονικές στιγμές $\Delta t = 22 \text{ ns}$ και $\Delta t = 32 \text{ ns}$. Τη χρονική στιγμή $\Delta t = 22 \text{ ns}$ παρατηρούνται οι μέγιστες εγκάρσιες μετατοπίσεις. Η μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία είναι 640.3 °C η οποία είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του χρυσού 1064 °C.

5.1.4 Au-04

Το τέταρτο μοντέλο που εξετάστηκε έχει πάχος φιλμ Χρυσού 1.2 μm . Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μετατοπίσεων και θερμοκρασιών για τις χρονικές στιγμές $\Delta t=22$ ns και $\Delta t=32$ ns. Τη χρονική στιγμή $\Delta t=22$ ns παρατηρούνται οι μέγιστες εγκάρσιες μετατοπίσεις.

Η μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία είναι 507.3 $^{\circ}\text{C}$ η οποία είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του χρυσού 1064 $^{\circ}\text{C}$, εξασφαλίζοντας την παραμονή του μετάλλου στην ελαστική περιοχή. Για $\Delta t=32$ ns, την τελευταία χρονική στιγμή της διάρκειας της προσομοίωσης, δεν παρατηρείται η δημιουργία δεύτερου υπερήχου. Στο Σχήμα 5.9 με μπλέ χρωματισμό χαρακτηρίζεται το ύψωμα του υπερήχου προς τα πάνω. Με έντονο κόκκινο τιμή -0.5 και -0.4 nm βλέπουμε τη βύθιση του υλικού (το πλάτος υπερήχου) ενώ προπορεύεται ο υπέρηχος.



Σχήμα 5.9 Au-04 - Κάθετη μετατόπιση Z-άξονα (nm) και Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) για $\Delta t = 22$ και 32 ns.

5.1.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης επιρροής παχών φιλμ Χρυσού

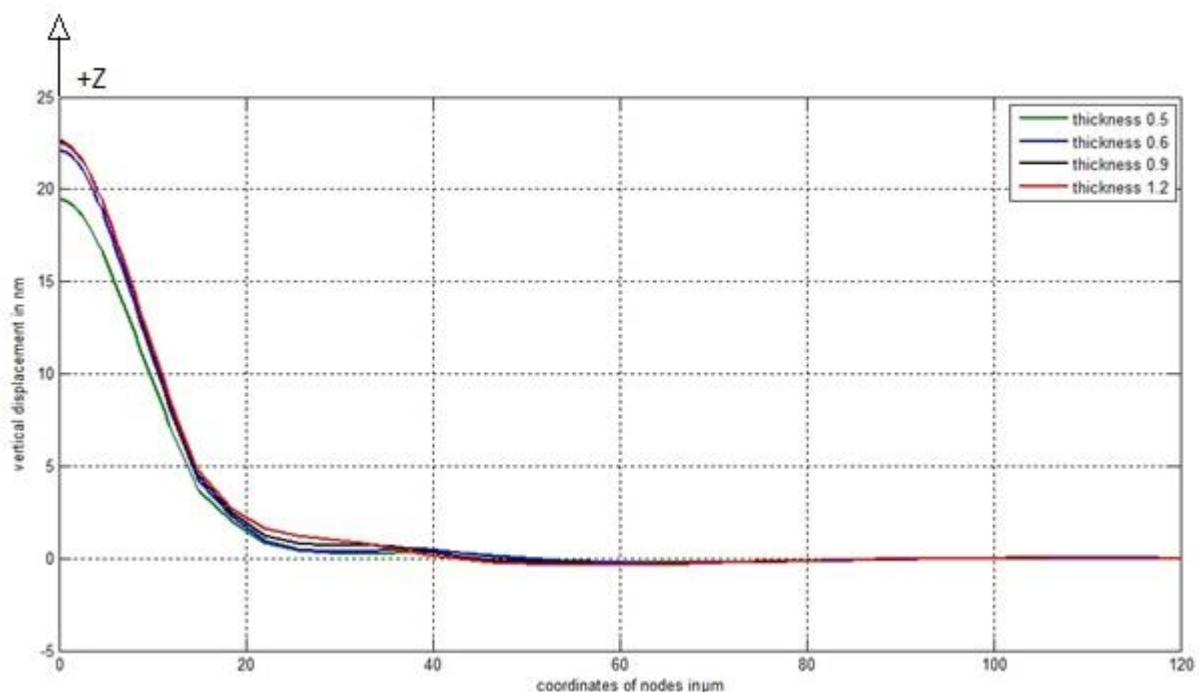
Συνοψίζοντας παρατίθεται ο Πίνακας 5.3 με τις μέγιστες μετατοπίσεις στο Z-άξονα και τις αντίστοιχες θερμοκρασίες για τις δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές, για τα τέσσερα

μοντέλα που παρουσιάστηκαν. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην τελική χρονική στιγμή της προσομοίωσης $\Delta t=32$ ns αλλά και για χρονική στιγμή $\Delta t_{\max\text{disp}}$ (σε ns), διαφορετική για κάθε πάχος, όπου η κάθετη μετατόπιση στον Z άξονα είναι μέγιστη.

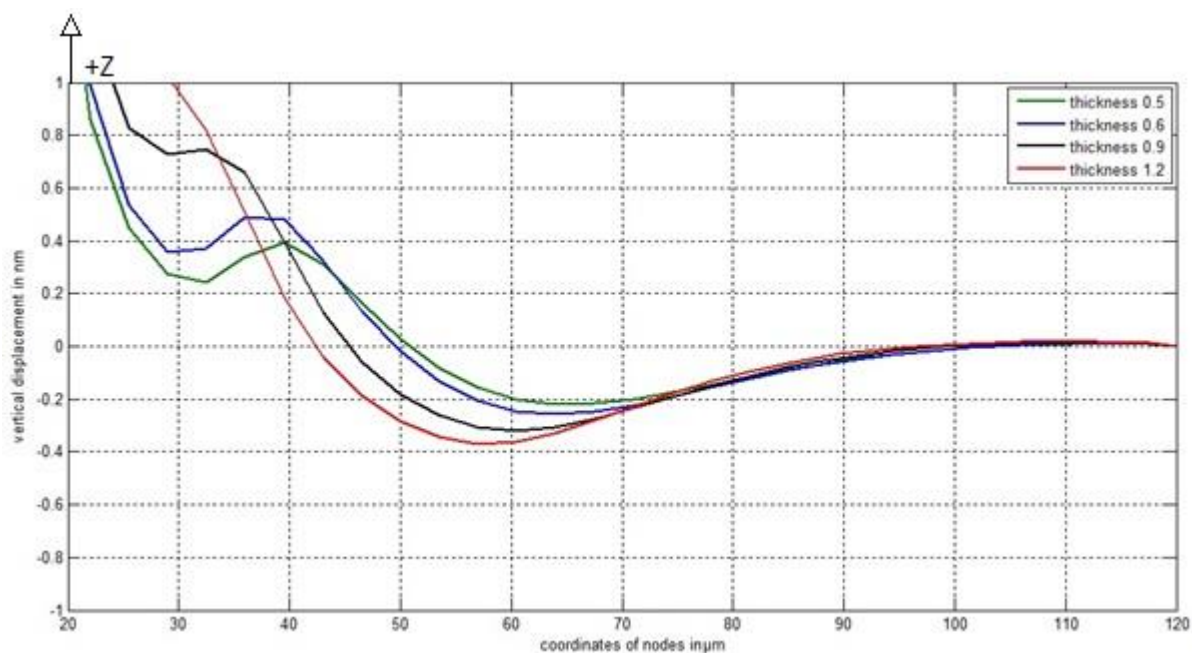
Χρυσός	$\Delta t=32$ ns		$\Delta t_{\max\text{disp}}$		
Πάχος μm	Μετατόπιση nm	Θερμοκρασία $^{\circ}\text{C}$	Δt ns	Μετατόπιση nm	Θερμοκρασία $^{\circ}\text{C}$
0.5	-0.2	883.1	18	-0.3	946.2
0.6	-0.26	853.3	18	-0.39	917.4
0.9	-0.3	613.7	22	-0.46	640.3
1.2	-0.4	483	22	-0.5	507.3

Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτικός Πίνακας αποτελεσμάτων μετατόπισης και θερμοκρασίας στον Z-άξονα για το δείγμα από χρυσό.

Είναι προφανές πως όπως και αναμενόταν, η αύξηση τους πάχους του χρυσού επιδρά αυξητικά στην κάθετη μετατόπιση κατά τον Z- άξονα ενώ παράλληλα η θερμοκρασία μειώνεται. Για κάθε μοντέλο από τα τέσσερα και για τους επιλεγμένους οριακούς στη συμμετρία κόμβους στα Σχήματα 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετατοπίσεων τους για $\Delta t=32$ ns.



Σχήμα 5.10 Μετατοπίσεις στον Z-άξονα για διαφορετικά πάχη για τους επιλεγμένους οριακούς κόμβους.

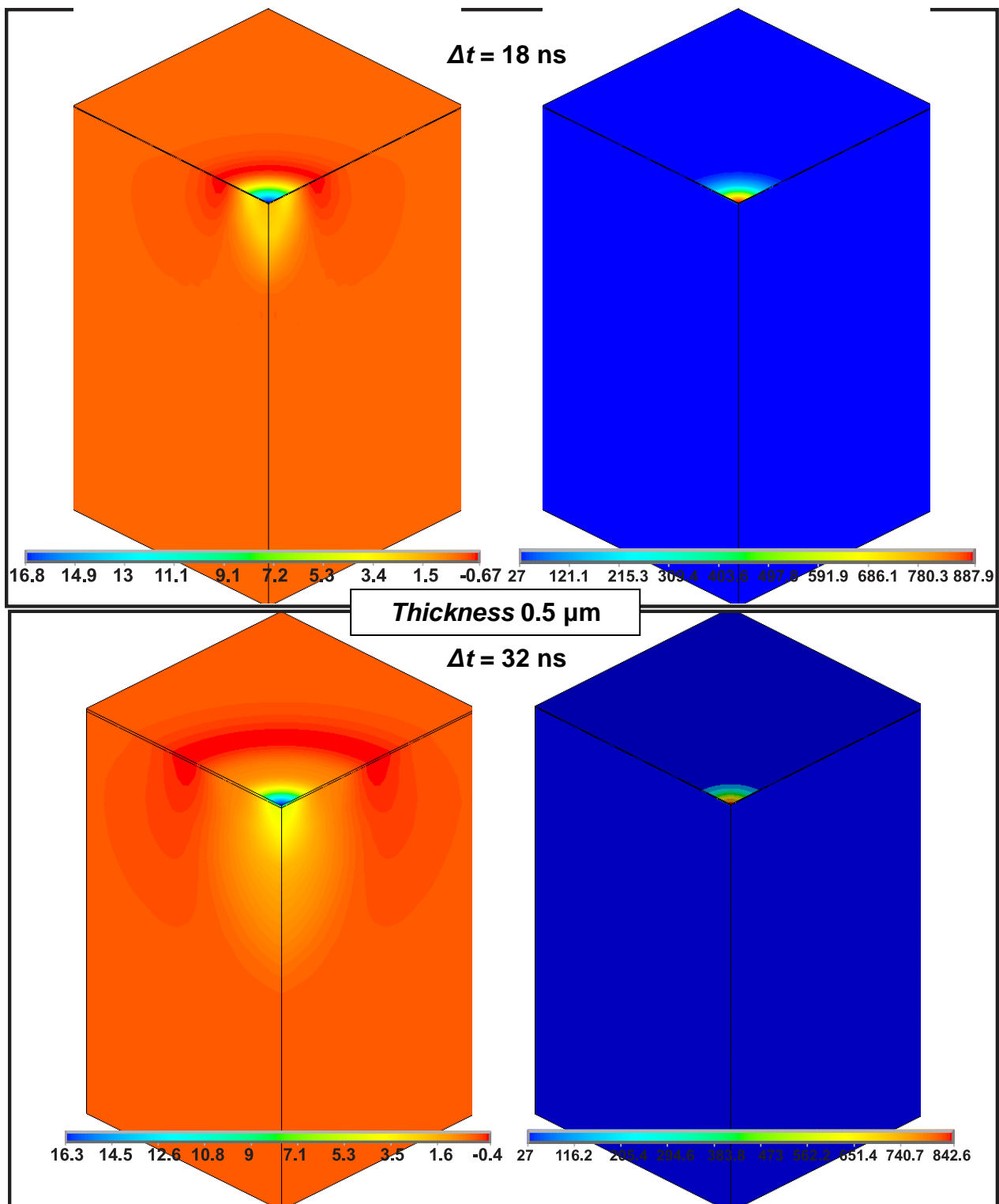


Σχήμα 5.11 Μεγέθυνση περιοχής από $20 \leq X \leq 120 \mu\text{m}$ και $-1 \leq X \leq 1 \text{ nm}$.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, όσο αυξάνεται το πάχος αυξάνεται και το μέγιστο ύψος του υπέρηχου. Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως για πάχος $1.2 \mu\text{m}$ δεν διαπιστώθηκε η δημιουργία δευτέρου υπέρηχου, ενώ αντίθετα για τα άλλα τρία πάχη είναι εμφανής η αρχή της ανάπτυξης δευτέρου υπερήχου.

5.1.6 Cu-01

Το πρώτο μοντέλο που εξετάστηκε έχει πάχος φιλμ Χαλκού $0.5 \mu\text{m}$. Στο Σχήμα 5.12 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μετατοπίσεων και θερμοκρασιών για τις χρονικές στιγμές $\Delta t = 18 \text{ ns}$ και $\Delta t = 32 \text{ ns}$. Τη χρονική στιγμή $\Delta t = 18 \text{ ns}$ παρατηρούνται οι μέγιστες εγκάρσιες μετατοπίσεις.



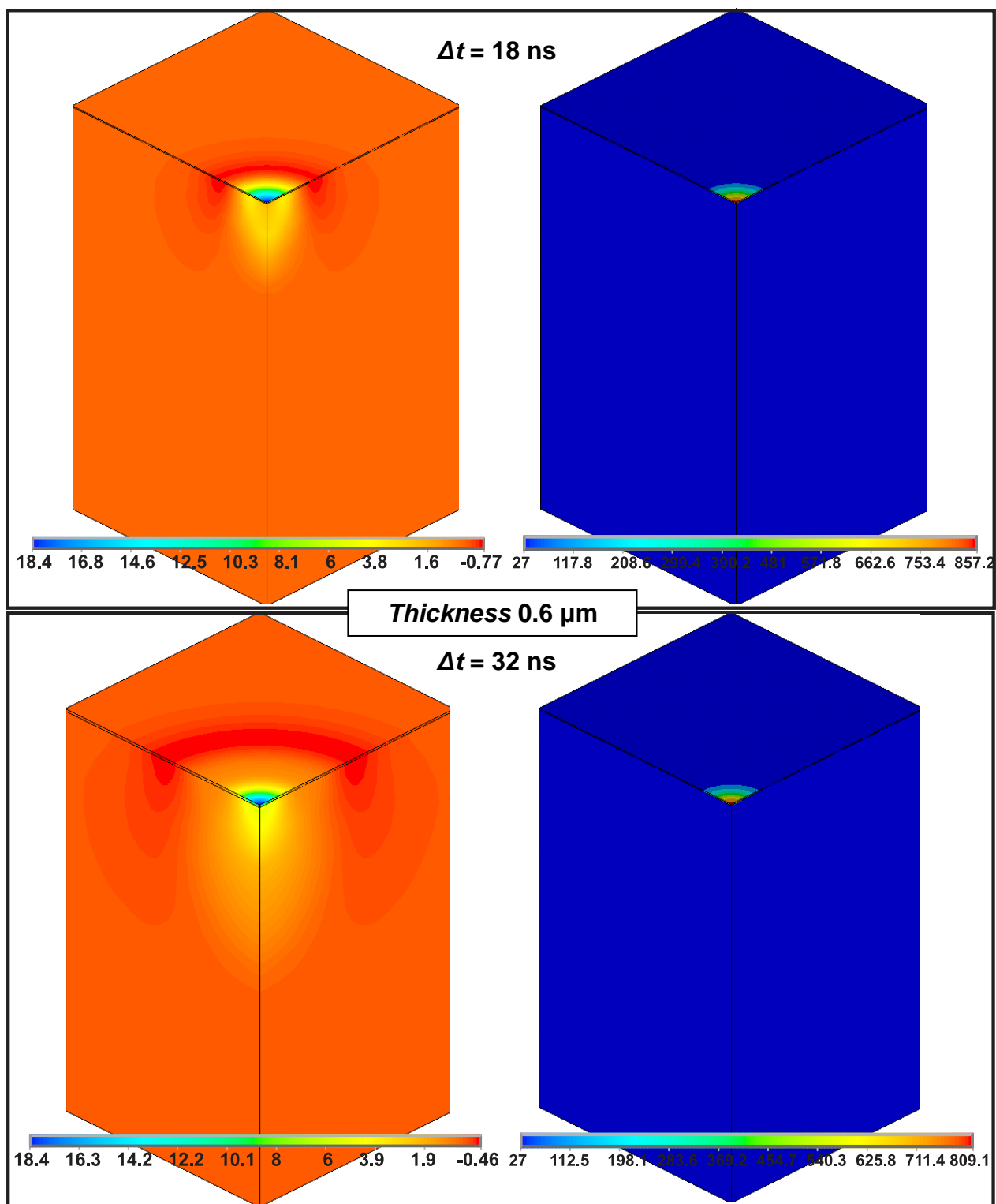
Σχήμα 5.12 Cu-01 - Κάθετη μετατόπιση Z-άξονα (nm) και Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) για $\Delta t = 18$ και 32 ns.

Η μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία είναι 887.9°C η οποία είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του Χαλκού 1085°C , εξασφαλίζοντας την παραμονή του μετάλλου στην ελαστική περιοχή. Για $\Delta t = 32 \text{ ns}$, την τελευταία χρονική στιγμή της διάρκειας της προσομοίωσης, παρατηρείται η δημιουργία δεύτερου υπερήχου. Στο Σχήμα 5.12 με

μπλέ χρωματισμό χαρακτηρίζεται το ύψωμα του υπερήχου προς τα πάνω. Με έντονο κόκκινο τιμή -0.67 και -0.4 nm βλέπουμε τη βύθιση του υλικού (το πλάτος υπερήχου) ενώ προπορεύεται ο υπέρηχος.

5.1.7 Cu-02

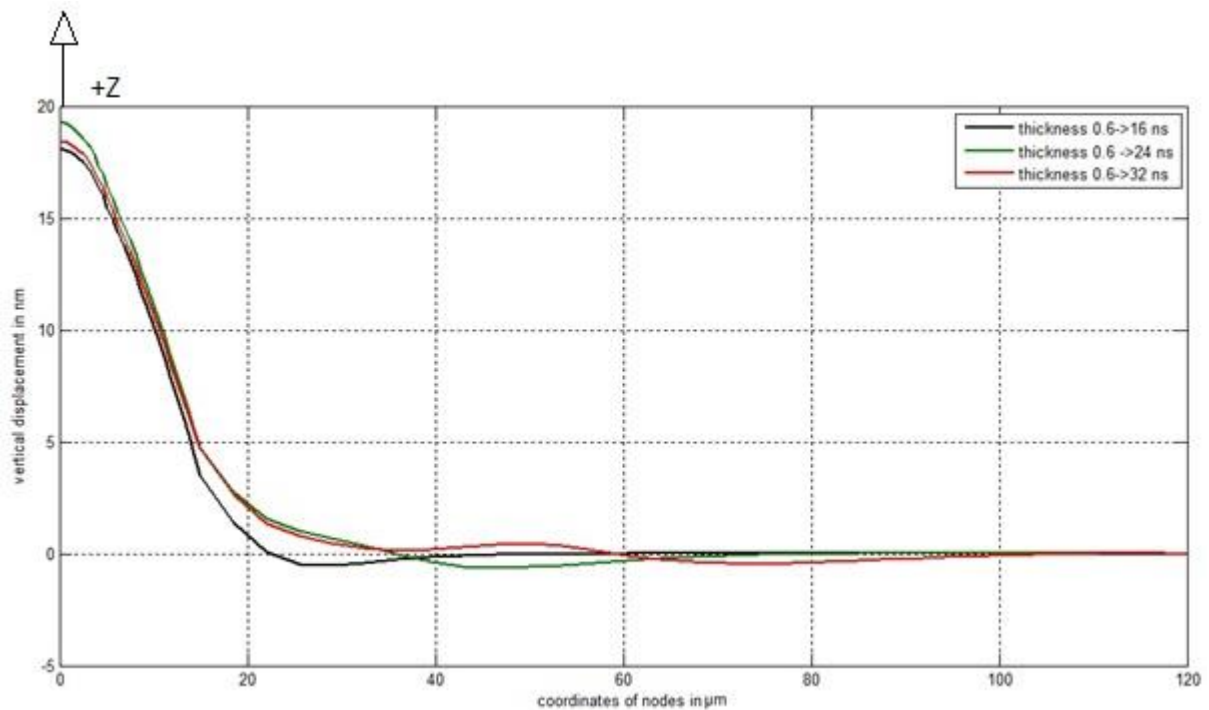
Το δεύτερο μοντέλο που εξετάστηκε έχει πάχος φιλμ Χαλκού $0.6 \mu\text{m}$. Στο Σχήμα 5.13 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μετατοπίσεων και θερμοκρασιών για τις χρονικές στιγμές $\Delta t=18$ ns και $\Delta t=32$ ns. Τη χρονική στιγμή $\Delta t=18$ ns παρατηρούνται οι μέγιστες εγκάρσιες μετατοπίσεις. Η μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία είναι 857.2°C η οποία είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του Χαλκού 1085°C , εξασφαλίζοντας την παραμονή του μετάλλου στην ελαστική περιοχή. Για $\Delta t=32$ ns, την τελευταία χρονική στιγμή της διάρκειας της προσομοίωσης, παρατηρείται η δημιουργία δεύτερου υπερήχου.



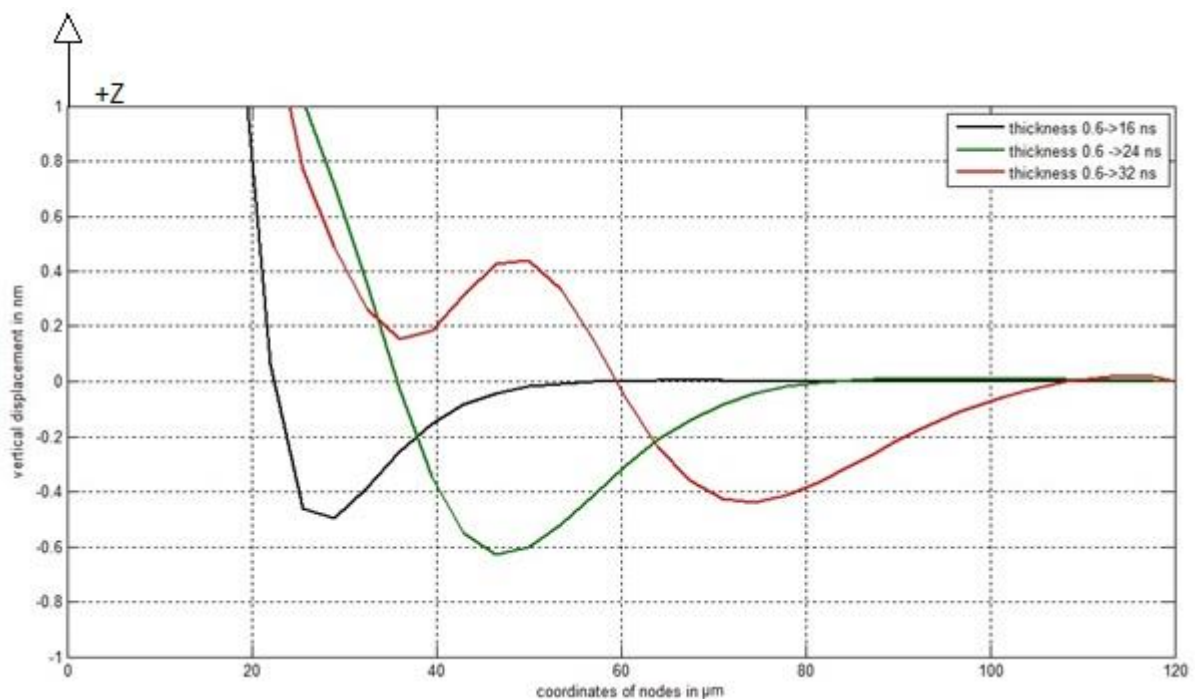
Σχήμα 5.13 Cu-02 - Κάθετη μετατόπιση Z-άξονα (nm) και Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) για $\Delta t = 18$ και 32 ns.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα Σχήματα 5.14 και 5.15 της εγκάρσιας μετατόπισης στον $-Z$ άξονα, συναρτήσεως της ακτινικής απόστασης $-X$ από το επίκεντρο για συγκεκριμένους κόμβους των οποίων οι συντεταγμένες είναι $Z=0$ και $Y=0$ και $X=0$ έως 120 μm . Στο Σχήμα 5.13 με μπλέ χρωματισμό χαρακτηρίζεται το ύψωμα του υπερήχου προς τα

πάνω. Με έντονο κόκκινο τιμή -0.77 και -0.46 nm βλέπουμε τη βύθιση του υλικού (το πλάτος υπερήχου) ενώ προπορεύεται ο υπέρηχος.



Σχήμα 5.14 Μετατοπίσεις στον Z-άξονα για $\Delta t = 16, 24, 32$ ns για τους επιλεγμένους οριακούς κόμβους.



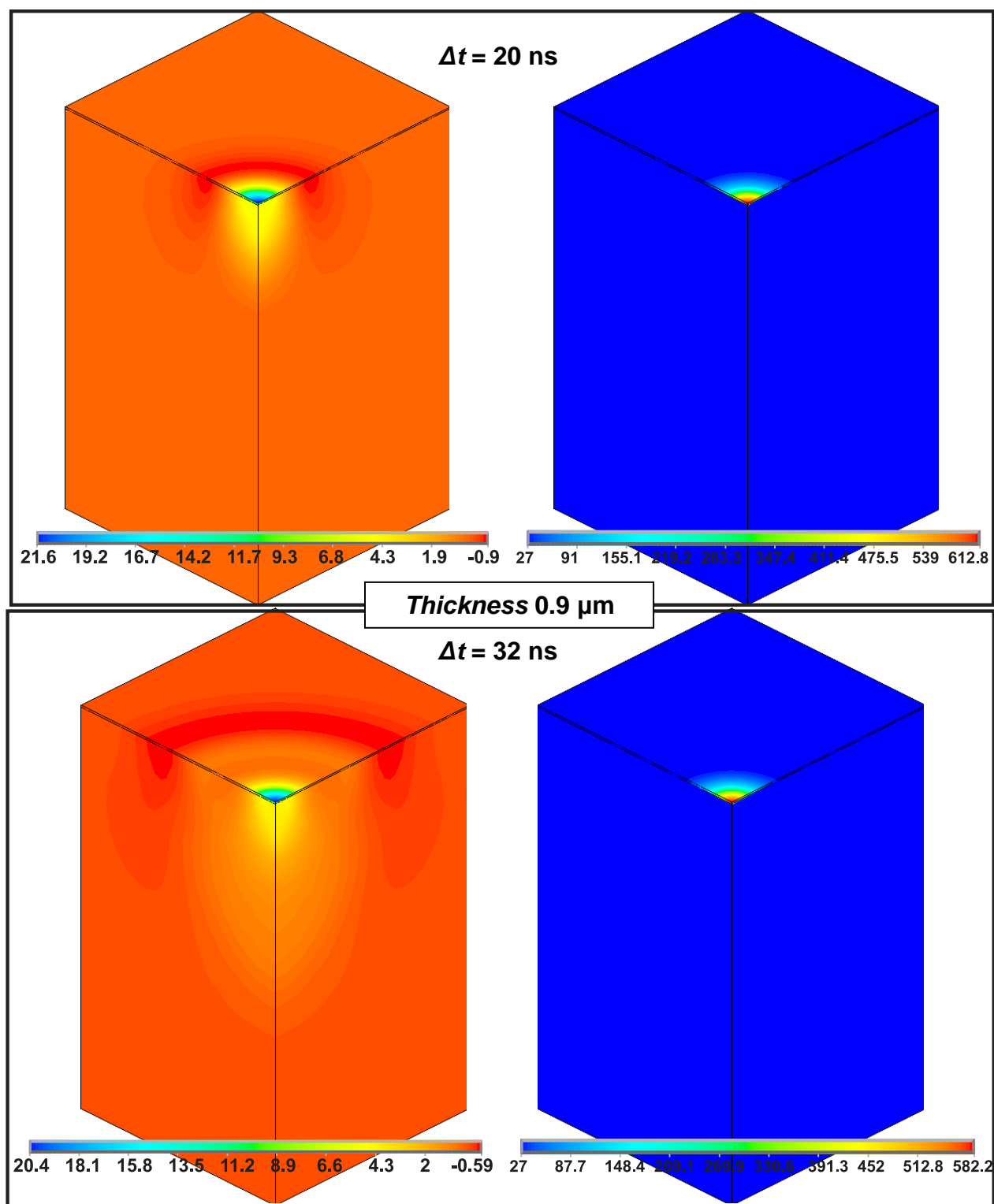
Σχήμα 5.15 Μεγέθυνση περιοχής από $20 \leq X \leq 120$ μm και $-1 \leq X \leq 1$ nm.

Και στις δύο γραφικές παραστάσεις οι τιμές του Χ-άξονα είναι οι συντεταγμένες των κόμβων κατά τον Χ-άξονα σε μm ,ενώ στον άξονα των Υ οι τιμές αντιπροσωπεύουν την μετατόπιση στον Ζ-άξονα των κόμβων.

Για τους συγκεκριμένους κόμβους παρατηρούμε ότι την χρονική στιγμή $\Delta t = 16$ ns δεν έχει δημιουργηθεί ο υπέρηχος (μαύρη γραμμή). Στην συνέχεια στη χρονική στιγμή $\Delta t = 24$ ns (πράσινη γραμμή) έχει αρχίσει και δημιουργείται έχοντας ελάχιστο -0.62 nm και μέγιστο κοντά στα 0.01 nm. Τελικά στη χρονική στιγμή $\Delta t = 32$ ns φαίνεται να έχει δημιουργηθεί δεύτερος υπέρηχος με μέγιστη τιμή 0.42 nm.

5.1.8 Cu-03

Το τρίτο μοντέλο που εξετάστηκε έχει πάχος φιλμ Χαλκού 0.9 μm. Στο Σχήμα 5.16 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μετατοπίσεων και θερμοκρασιών για τις χρονικές στιγμές $\Delta t = 20$ ns και $\Delta t = 32$ ns. Τη χρονική στιγμή $\Delta t = 20$ ns παρατηρούνται οι μέγιστες εγκάρσιες μετατοπίσεις. Η μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία είναι 612.8 °C η οποία είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του Χαλκού 1085 °C, εξασφαλίζοντας την παραμονή του μετάλλου στην ελαστική περιοχή. Για $\Delta t = 32$ ns, την τελευταία χρονική στιγμή της διάρκειας της προσομοίωσης, παρατηρείται η δημιουργία δεύτερου υπερήχου.

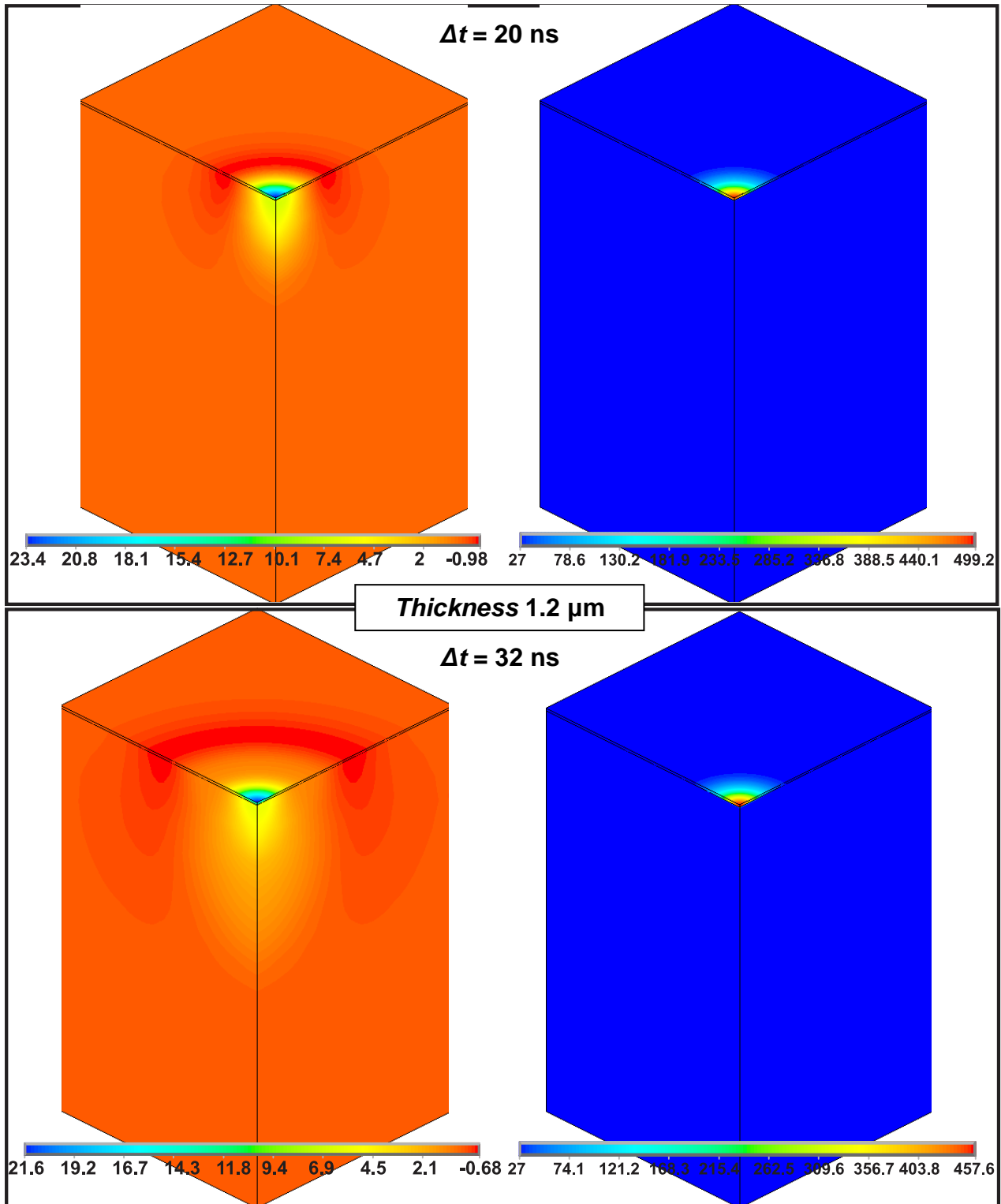


Σχήμα 5.16 Cu-03 - Κάθετη μετατόπιση Z-άξονα (nm) και Θερμοκρασία (°C) για $\Delta t = 20$ και 32 ns.

5.1.9 Cu-04

Το τέταρτο και τελευταίο μοντέλο που εξετάστηκε έχει πάχος φιλμ Χαλκού 1.2 μm. Στο Σχήμα 5.17 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μετατοπίσεων και θερμοκρασιών για τις χρονικές στιγμές $\Delta t = 20$ ns και $\Delta t = 32$ ns. Τη χρονική στιγμή $\Delta t = 20$ ns παρατηρούνται οι

μέγιστες εγκάρσιες μετατοπίσεις. Η μέγιστη παρατηρούμενη θερμοκρασία είναι 499.2°C η οποία είναι μικρότερη από το σημείο τήξης του Χαλκού 1085°C , εξασφαλίζοντας την παραμονή του μετάλλου στην ελαστική περιοχή. Για $\Delta t=32\text{ ns}$, την τελευταία χρονική στιγμή της διάρκειας της προσομοίωσης, παρατηρείται η δημιουργία δεύτερου υπερήχου.



Σχήμα 5.17 Cu-04 - Κάθετη μετατόπιση Z-άξονα (nm) και Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$) για $\Delta t = 20$ και 32 ns .

5.1.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης επιρροής παχών φιλμ Χαλκού

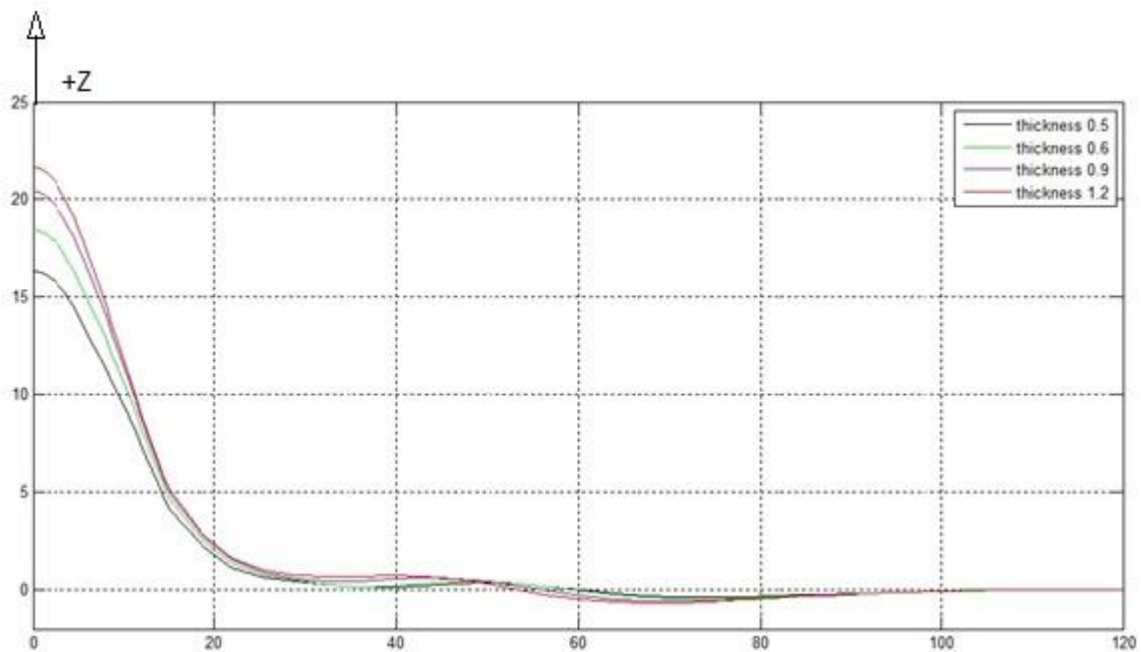
Συνοψίζοντας παρατίθεται ο Πίνακας 5.4 με τις μέγιστες μετατοπίσεις στο Z-άξονα και τις αντίστοιχες θερμοκρασίες για τις δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές, για τα τέσσερα μοντέλα με φιλμ Χαλκού που παρουσιάστηκαν. Τα αποτελέσματα αναφέρονται στην τελική χρονική στιγμή της προσομοίωσης $\Delta t=32$ ns αλλά και για χρονική στιγμή $\Delta t_{\max\text{disp}}$ (ns), διαφορετική για κάθε πάχος, όπου η κάθετη μετατόπιση στον Z άξονα είναι μέγιστη

Χαλκός	$\Delta t=32$ ns		$\Delta t_{\max\text{disp}}$		
Πάχος μm	Μετατόπιση nm	Θερμοκρασία $^{\circ}\text{C}$	Δt ns	Μετατόπιση nm	Θερμοκρασία $^{\circ}\text{C}$
0.5	-0.4	842.6	18	-0.67	887.9
0.6	-0.46	809.1	18	-0.77	857.2
0.9	-0.59	582.2	20	-0.9	612.8
1.2	-0.68	457.6	20	-0.98	499.2

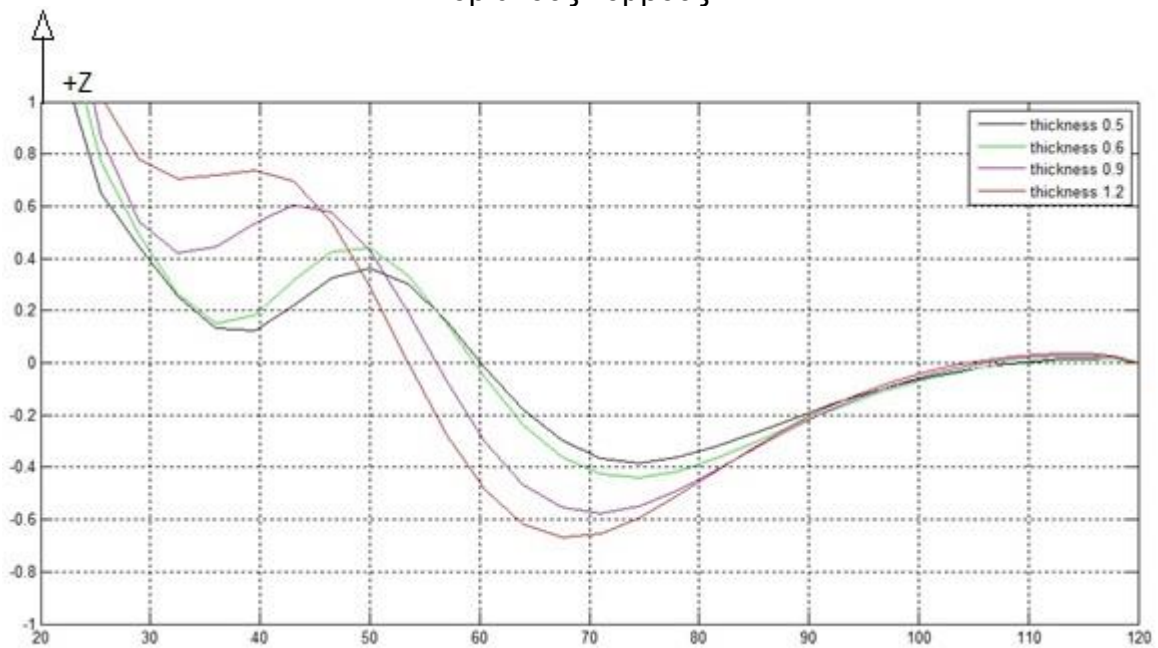
Πίνακας 5.4 Συγκεντρωτικός Πίνακας αποτελεσμάτων θερμοκρασίας-μετατόπισης στον Z-άξονα για μοντέλου χαλκού-γυάλινου υποστρώματος.

Στον Πίνακα 5.4 παρατηρούμε ότι με την αύξηση τους πάχους του χαλκού όπως και στον χρυσό και για τις δύο χρονικές στιγμές η κάθετη μετατόπιση κατά τον Z-άξονα αυξάνεται, ενώ η θερμοκρασία μειώνεται.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των μετατοπίσεων στην ίδια διεύθυνση για τους επιφανειακούς κόμβους του φιλμ όπου: $Z=0$, $Y=0$, $0 \leq X \leq 120$ μm Για κάθε μοντέλο παρουσιάζονται αποτελέσματα, την χρονική στιγμή 32 ns της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.18 Μετατοπίσεις στον Z-άξονα για διαφορετικά πάχη για τους επιλεγμένους οριακούς κόμβους.



Σχήμα 5.19 Μεγέθυνση περιοχής από $20 \leq X \leq 120 \mu\text{m}$ και $-1 \leq Z \leq 1 \text{ nm}$.

Στη γραφική παράσταση του Σχήματος 5.18 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το πάχος αυξάνεται το πλάτος του υπέρηχου. Επίσης και στα τέσσερα πάχη διαφαίνεται η αρχή δημιουργίας δευτέρου υπέρηχου.

5.1.11 Σύγκριση αποτελεσμάτων χρυσού-χαλκού

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και των δύο υλικών σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές και πιο συγκεκριμένα η θερμοκρασία και η κάθετη μετατόπιση στον Z άξονα για τους επιλεγμένους κόμβους που προσδιορίστηκαν στο Σχήμα 5.5. Παρατηρείται ότι στον χρυσό αναπτύσσονται υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι στο υλικό του χαλκού, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τις τιμές που αφορούν στην κάθετη μετατόπιση στον Z άξονα. Σε αυτές τις τιμές τα μοντέλα που αποτελούνται από χαλκό έχουν μεγαλύτερες τιμές μέγιστων μετατοπίσεων.

Χρυσός	$\Delta t=32$ ns		$\Delta t_{\max disp}$	
Πάχος μm	Θερμοκρασία °C	Μετατόπιση nm	Θερμοκρασία °C	Μετατόπιση nm
0.5	-0.2	883.1	-0.3	946.2
0.6	-0.26	853.3	-0.39	917.4
0.9	-0.3	613.7	-0.46	640.3
1.2	-0.4	483	-0.5	507.3
Χαλκός				
0.5	-0.4	842.6	-0.67	887.9
0.6	-0.46	809.1	-0.77	857.2
0.9	-0.59	582.2	-0.9	612.8
1.2	-0.68	457.6	-0.98	499.2

Πίνακας 5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων Χρυσού – Χαλκού.

5.2 Μοντέλα με ατέλειες -cracks/gaps

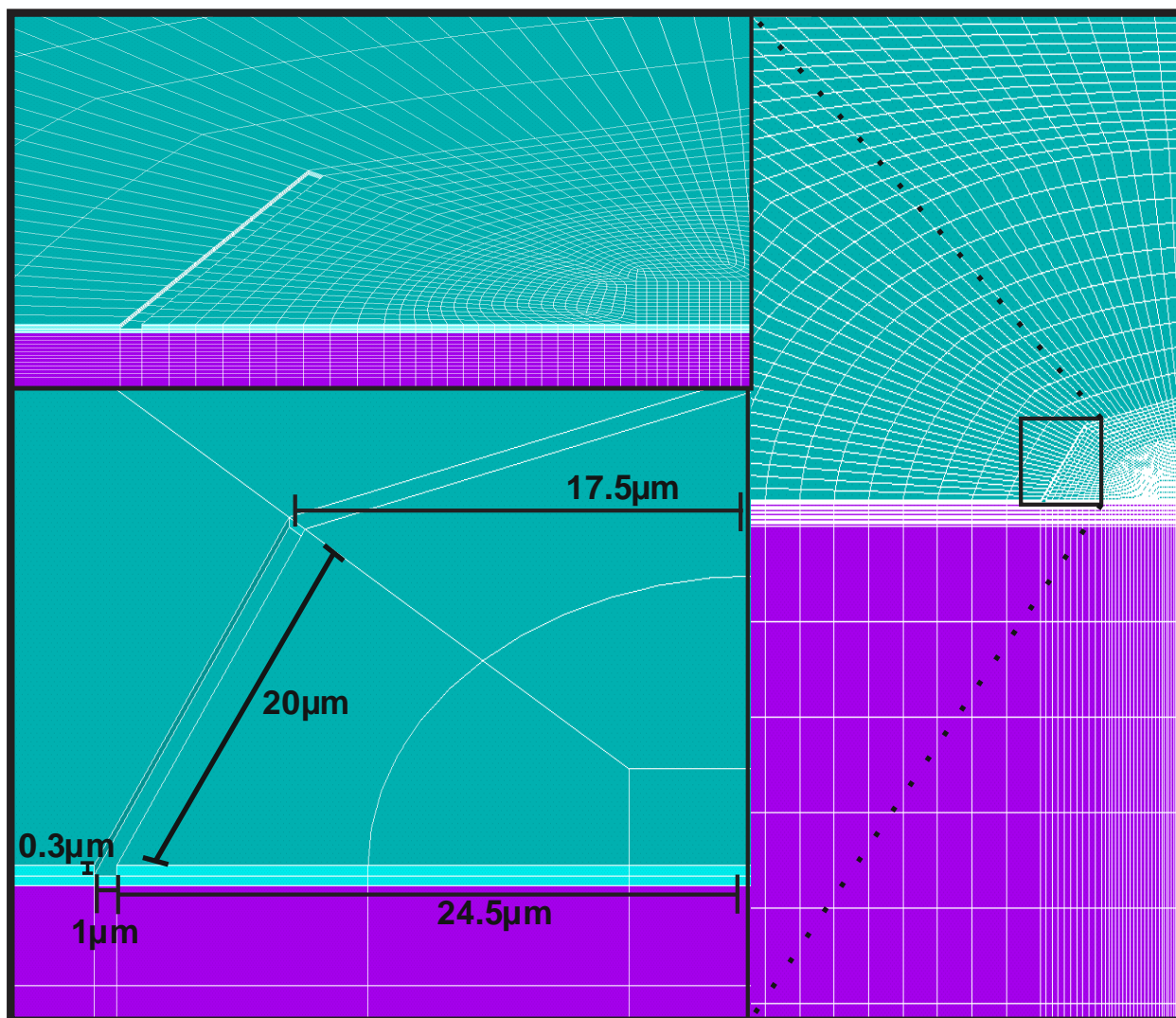
Στην συνέχεια μελετώνται οι περιπτώσεις ελαττωμάτων στα δείγματα Χρυσού φιλμ με γυάλινο υπόστρωμα και εξετάζεται η επιρροή διαφορετικής μορφής και μεγέθους της ατέλειας-gap στη μετάδοση των υπερήχων. Μελετώνται διαφορετικά είδη ατελειών που διαφέρουν σε πάχος, ύψος και πλάτος. Συνολικά μελετήθηκαν 11 περιπτώσεις ατελειών, εκ των οποίων εννέα ανοικτής και δύο κλειστής γεωμετρίας. Στον Πίνακα 5.6 απεικονίζονται οι έντεκα περιπτώσεις μελέτης ανά γεωμετρία τη ατέλειας ρωγμής-gap και θέσης (μόνο στο φιλμ ή/και στο γυαλί) στο μοντέλο, καθώς και η ονομασία τους. Αρχικά κατασκευάζεται ατέλεια που οποίο εκτείνεται μόνο στο χρυσό με συγκεκριμένο μήκος και πλάτος, το οποίο σταδιακά επεκτείνεται σε βάθος και στο γυαλί. Συνολικά κατασκευάστηκαν έξι διαφορετικά μοντέλα με μεταβαλλόμενο βάθος (C1-C6). Στη συνέχεια τροποποιείται το μήκος του και κατασκευάζονται δύο μοντέλα κλειστής γεωμετρίας (C7 & C8). Τέλος κατασκευάζονται τρία μοντέλα ανοικτής γεωμετρίας στα οποία μεταβάλλεται το πλάτος τους και στο ένα από αυτά το (C11) μεταβάλλεται και το βάθος.

Όνομα	Γεωμετρία Μήκος x Πλάτος x Βάθος	Θέση	Παράγραφος
C1	20 μ m x 1 μ m x 0.3 μ m	Χρυσός	5.2.1
C2	20 μ m x 1 μ m x 0.6 μ m	Χρυσός	5.2.2
C3	20 μ m x 1 μ m x 53.6 μ m	Χρυσός Γυαλί	5.2.3
C4	20 μ m x 1 μ m x 103.6 μ m	Χρυσός Γυαλί	5.2.4
C5	20 μ m x 1 μ m x 153.6 μ m	Χρυσός Γυαλί	5.2.5
C6	20 μ m x 1 μ m x 203.6 μ m	Χρυσός Γυαλί	5.2.6
C7	40 μ m x 1 μ m x 0.6 μ m	Χρυσός	5.2.7
C8	40 μ m x 1 μ m x 103.6 μ m	Χρυσός Γυαλί	5.2.8
C9	20 μ m x 2 μ m x 0.6 μ m	Χρυσός	5.2.9
C10	20 μ m x 3 μ m x 0.6 μ m	Χρυσός	5.2.10
C11	20 μ m x 2 μ m x 103.6 μ m	Χρυσός Γυαλί	5.2.11

Πίνακας 5.6 Ονομασία Περιπτώσεις μελέτης μοντέλου με διαφορετικές ατέλειες.

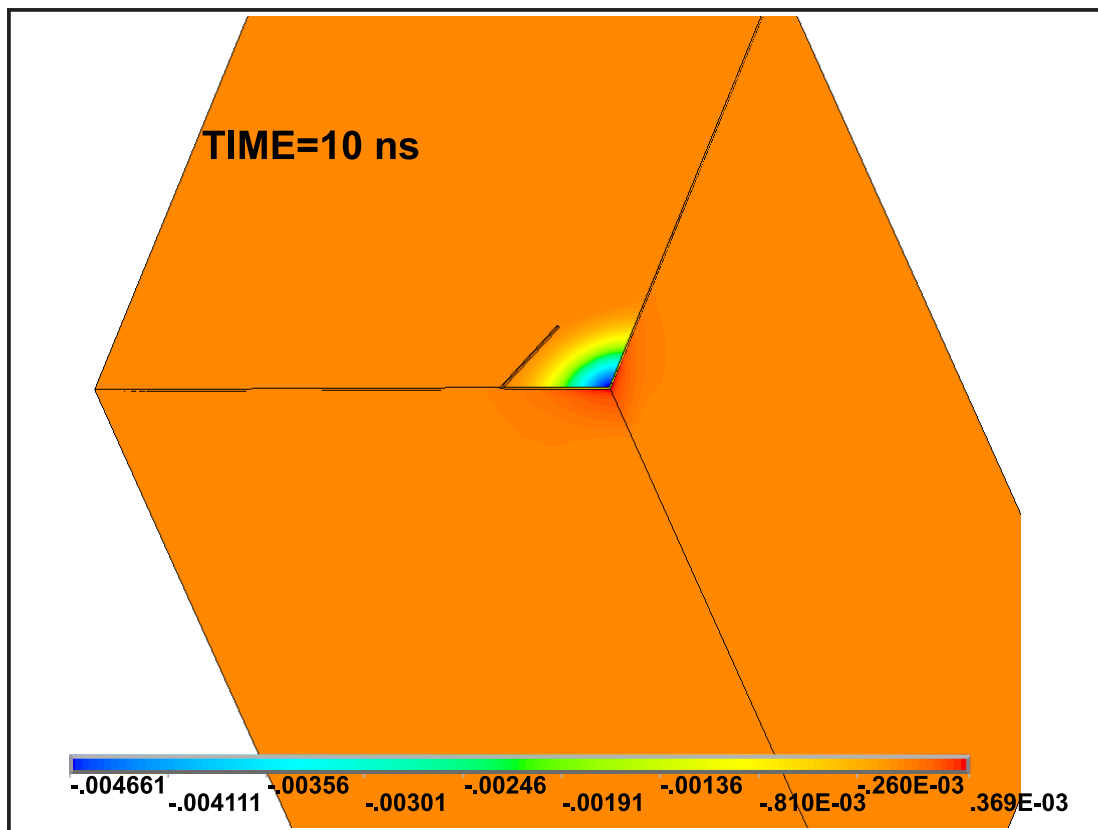
5.2.1 C1

Στην πρώτη περίπτωση μελέτης το gar που κατασκευάστηκε εκτείνεται πάνω στο λεπτό μεταλλικό φιλμ χρυσού. Έχει βάθος $0.3\ \mu\text{m}$, μήκος $20\ \mu\text{m}$ και πλάτος περίπου $1\ \mu\text{m}$. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μοιάζει σαν μία γρατζουνιά πάνω στην μεταλλική επιφάνεια. Οι οριακές συνθήκες, η ένταση του laser καθώς και οι ιδιότητες του υλικού, είναι ίδιες με τα μοντέλα της παραγράφου 5.1. Παρακάτω στο Σχήμα 5.20 απεικονίζεται η γεωμετρία του gar και η θέση του πάνω στην επιφάνεια του χρυσού.

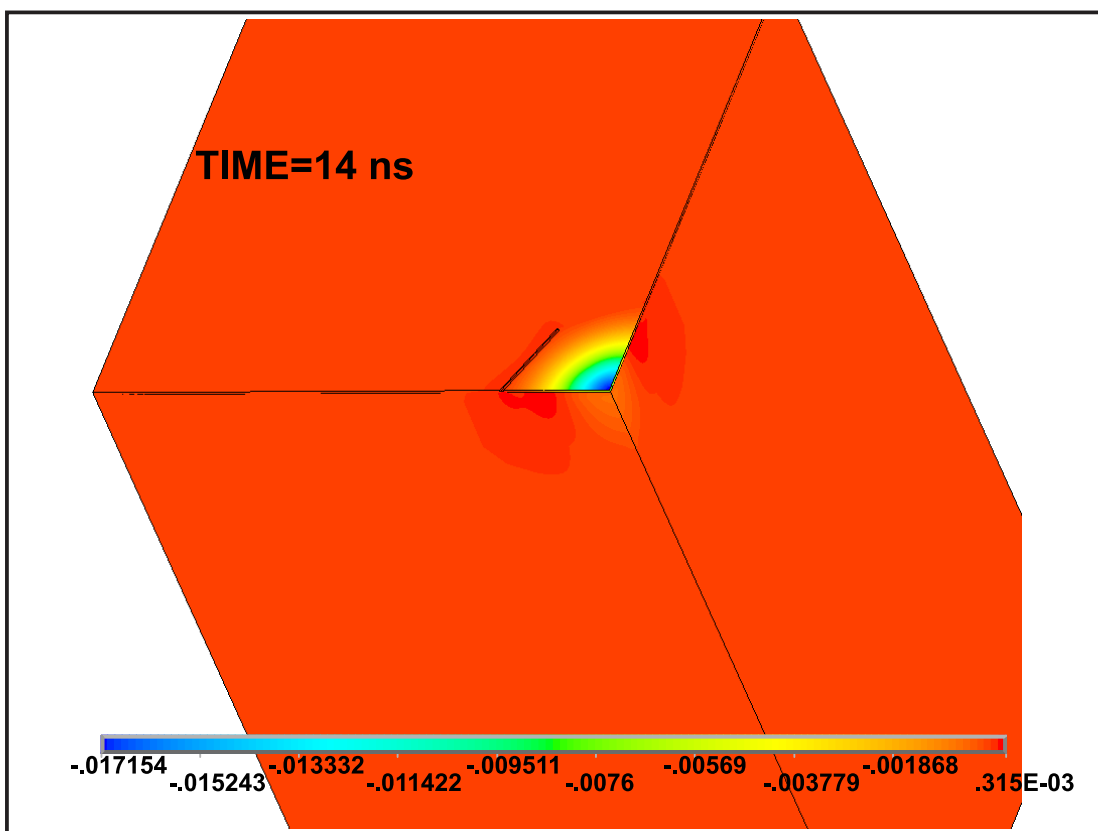


Σχήμα 5.20 Απεικόνιση της θέσης του gar στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

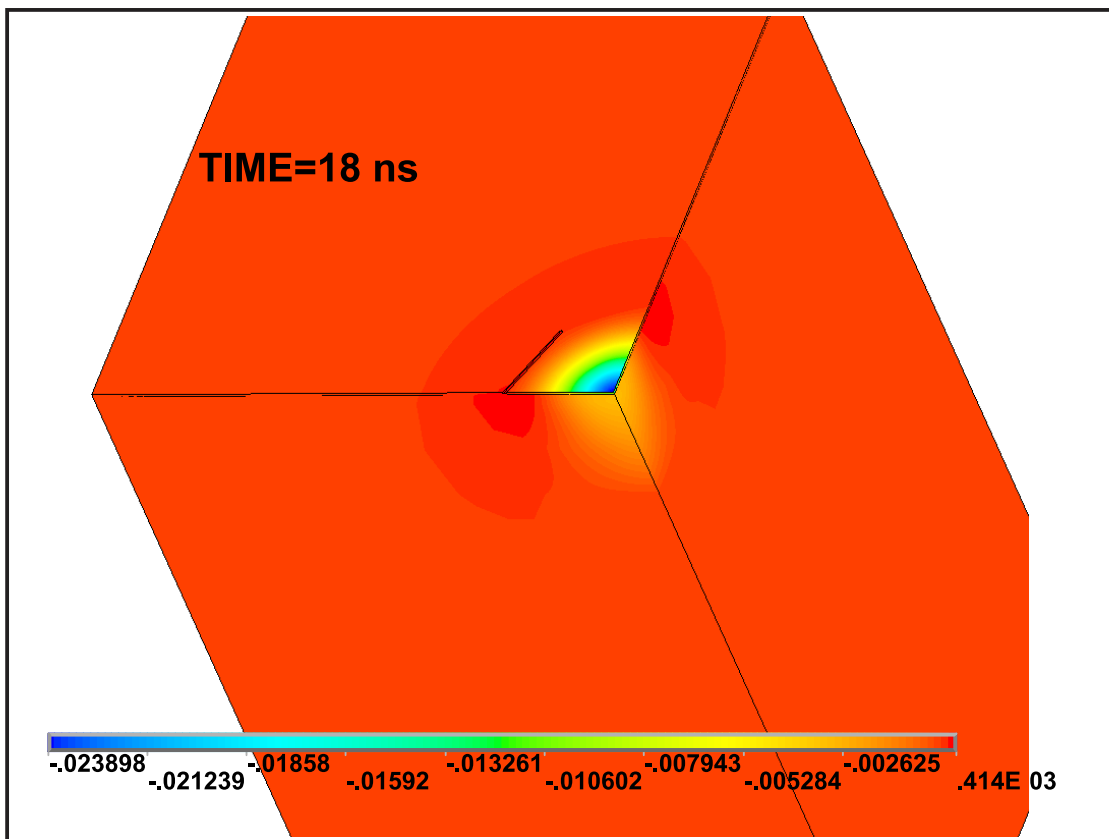
Στα ακόλουθα Σχήματα 5.21 έως 5.24 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δείγματος με gar και η δημιουργία και διάδοση των ακουστικών κυμάτων.



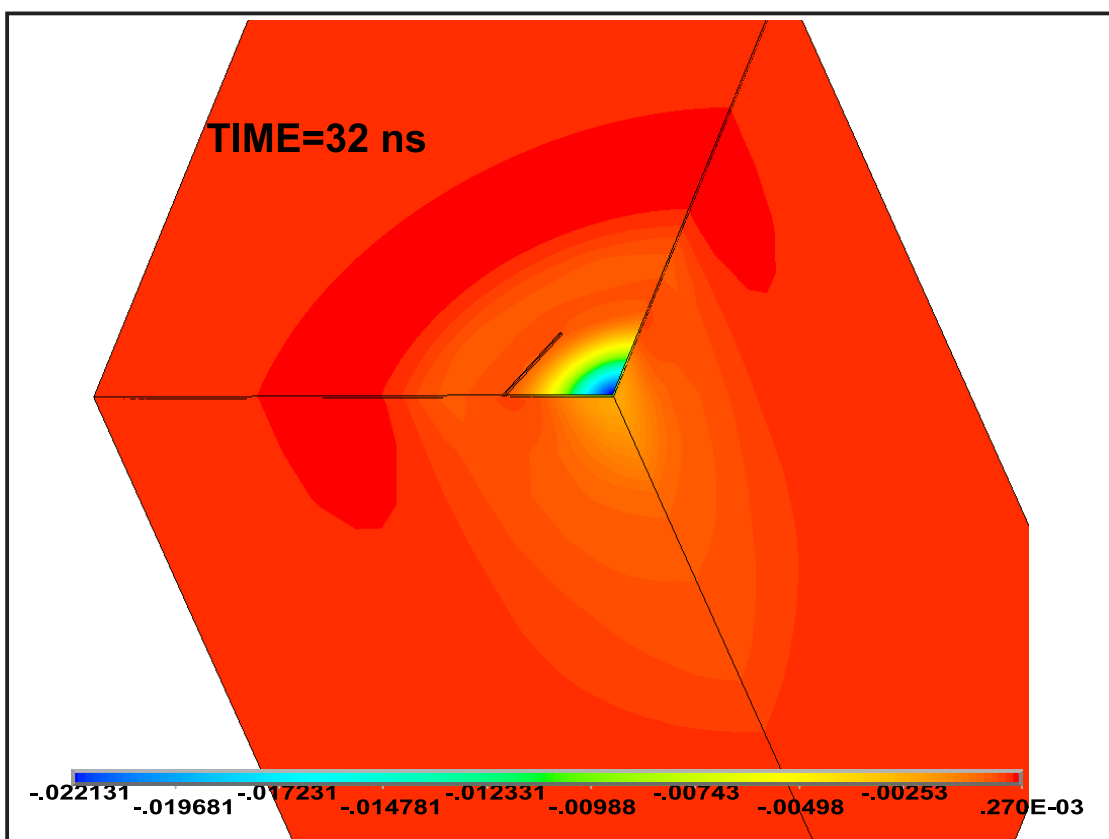
Σχήμα 5.21 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=10$ ns.



Σχήμα 5.22 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=14$ ns.



Σχήμα 5.23 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=18$ ns.

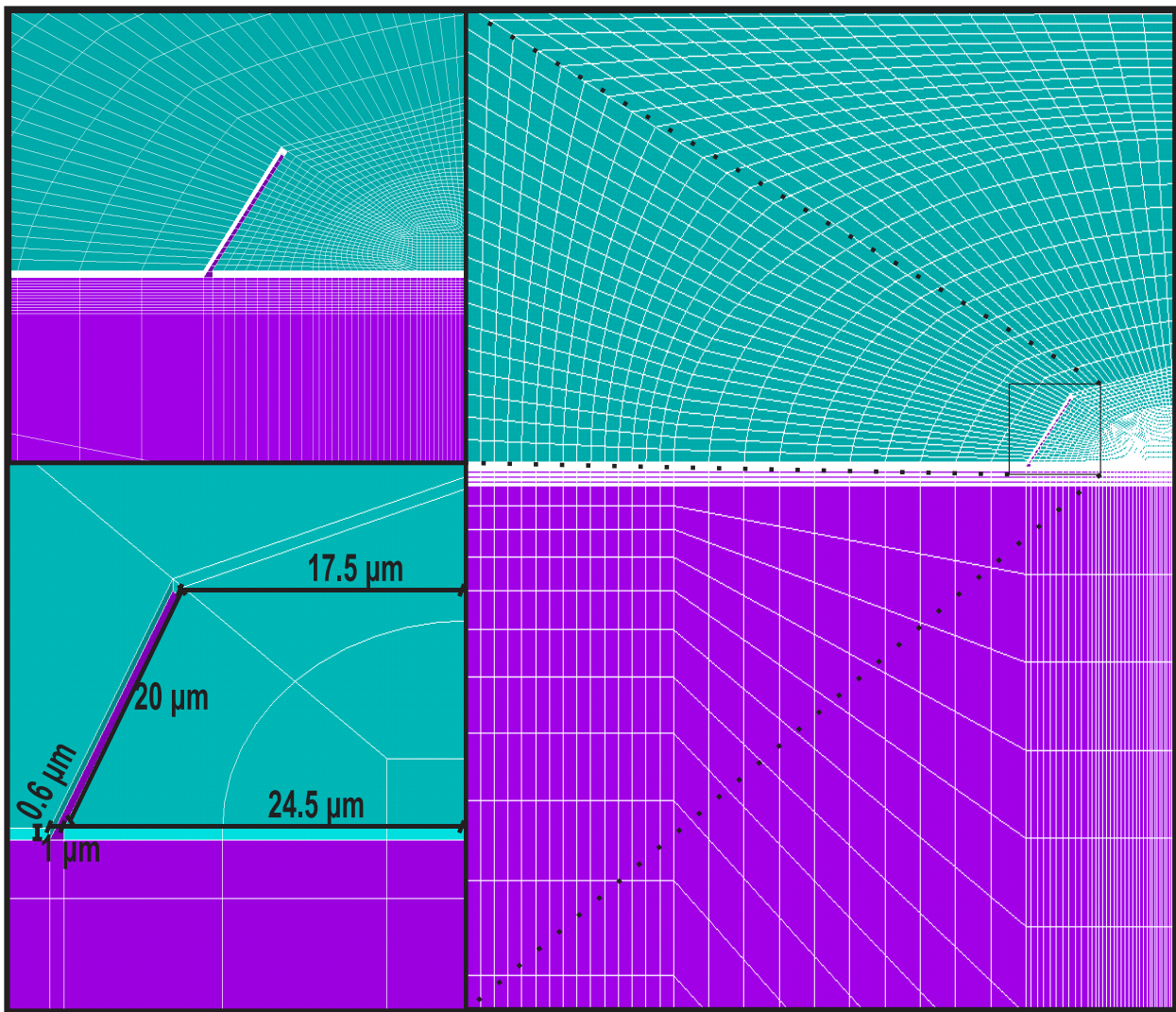


Σχήμα 5.24 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns.

Στο Σχήμα 5.21 για χρονική στιγμή 10 ns, μετά την ακτινοβολήση του δείγματος, παρατηρείται ότι δεν έχει περάσει ο υπέρηχος από το gap. Έπειτα στο Σχήμα 5.22 τη χρονική στιγμή 14 ns ο υπέρηχος παρατηρείται να περνάει το gap, ενώ στα Σχήματα 5.23, 5.24 παρουσιάζεται η διάδοση του υπερήχου αφού έχει περάσει από την ατέλεια, στις χρονικές στιγμές $\Delta t=18$ και 32 ns αντίστοιχα. Παρατηρώντας το πεδίο μετατοπίσεων στο Σχήμα 5.22 τη χρονική στιγμή 14 ns γίνεται αντιληπτή η επίδραση του gap στη διάδοση του υπερήχου, καθώς παρατηρείται ανομοιομορφία στη διάδοση στο εσωτερικό του γυαλιού, γεγονός που δεν μπορεί να καταγραφεί από τα διαγνωστικά στις πειραματικής διάταξης. Η δυνατότητα παρατήρησης αυτής της ανομοιομορφίας από την προσομοίωση παρέχει σημαντικές πληροφορίες σε πειράματα που θα εκτελεστούν στο μέλλον. Με μπλέ χρωματισμό χαρακτηρίζεται το ύψωμα του υπερήχου προς τα πάνω. Με έντονο κόκκινο τιμή βλέπουμε τη βύθιση του υλικού (το πλάτος υπερήχου) ενώ προπορεύεται ο υπέρηχος. Το πρόσημο δηλώνει την αντίθετη κατεύθυνση του από το θετικό άξονα $-Z$ που είναι προσανατολισμένος προς τα κάτω.

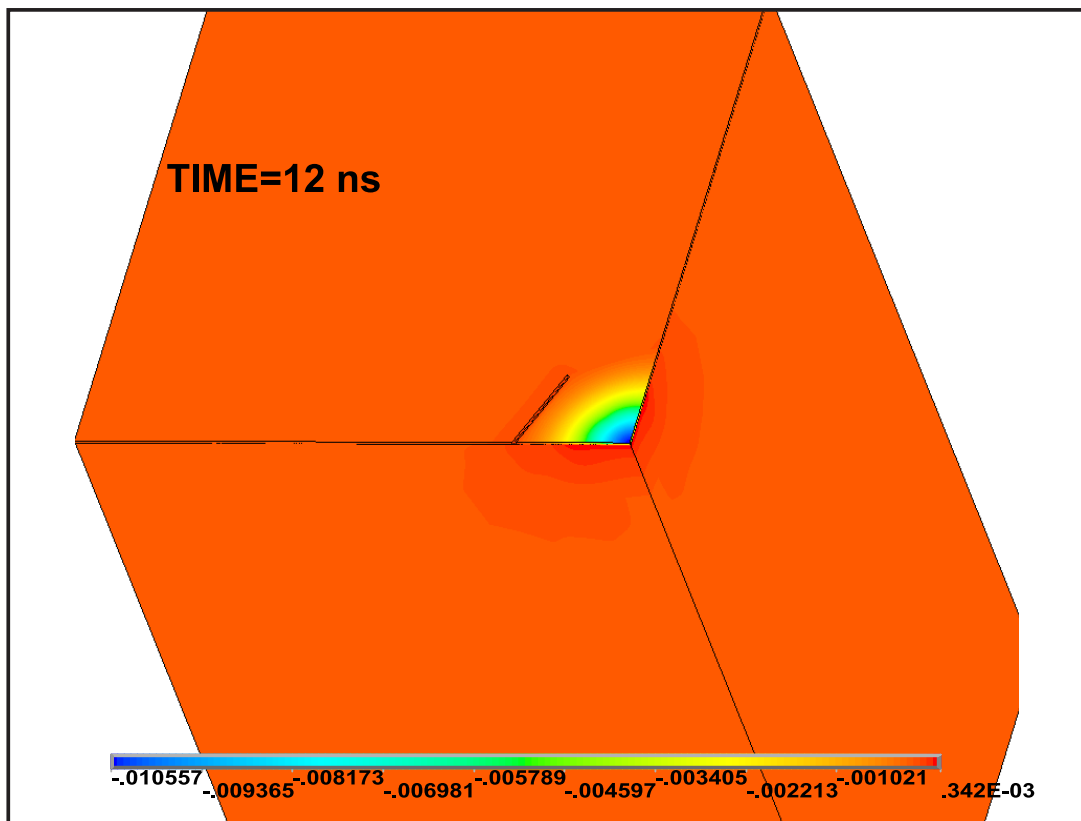
5.2.2 C2

Σε αυτήν την περίπτωση το μοντέλο τροποποιήθηκε ως προς την γεωμετρία του gap. Παραμένουν σταθερά το πλάτος και το μήκος του gap και αυτό που μεταβάλλεται είναι το βάθος του από 0.3 μm σε 0.6 μm , επεκτείνεται σε όλο το πάχος του χρυσού. Παρακάτω στο Σχήμα 5.21 απεικονίζεται η γεωμετρία του gap και η θέση του πάνω στην επιφάνεια του χρυσού.

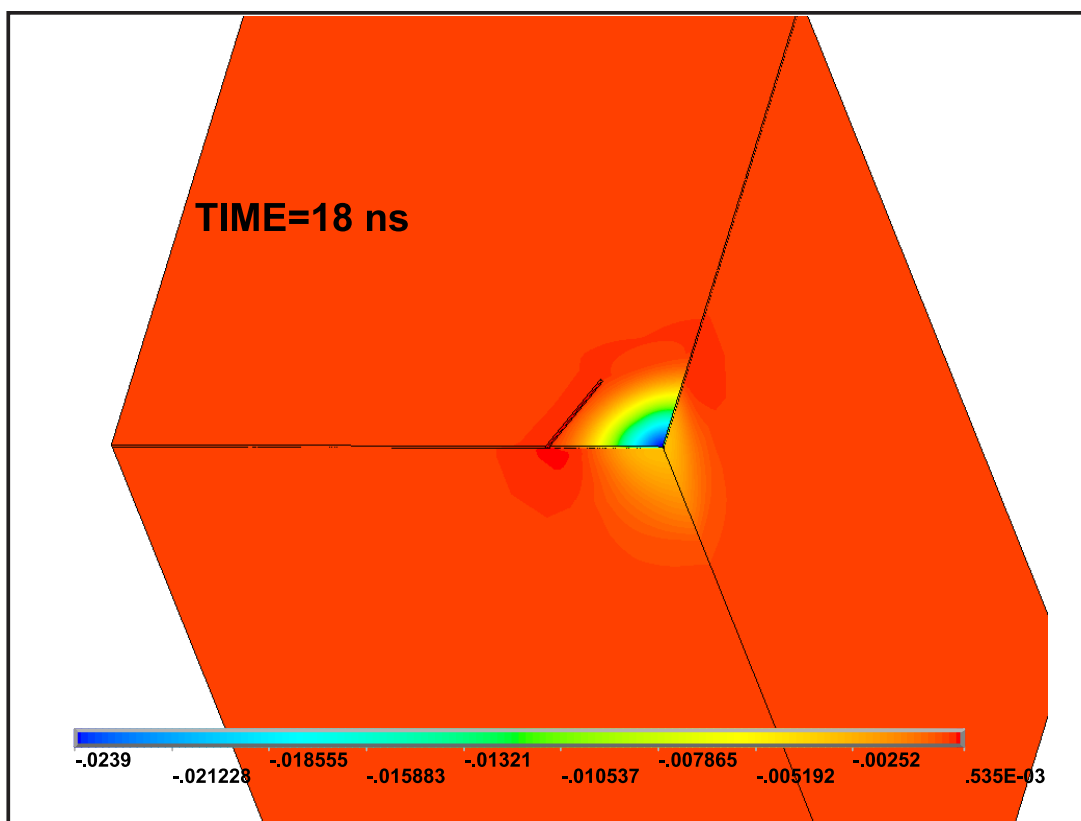


Σχήμα 5.25 Απεικόνιση της θέσης του gap στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

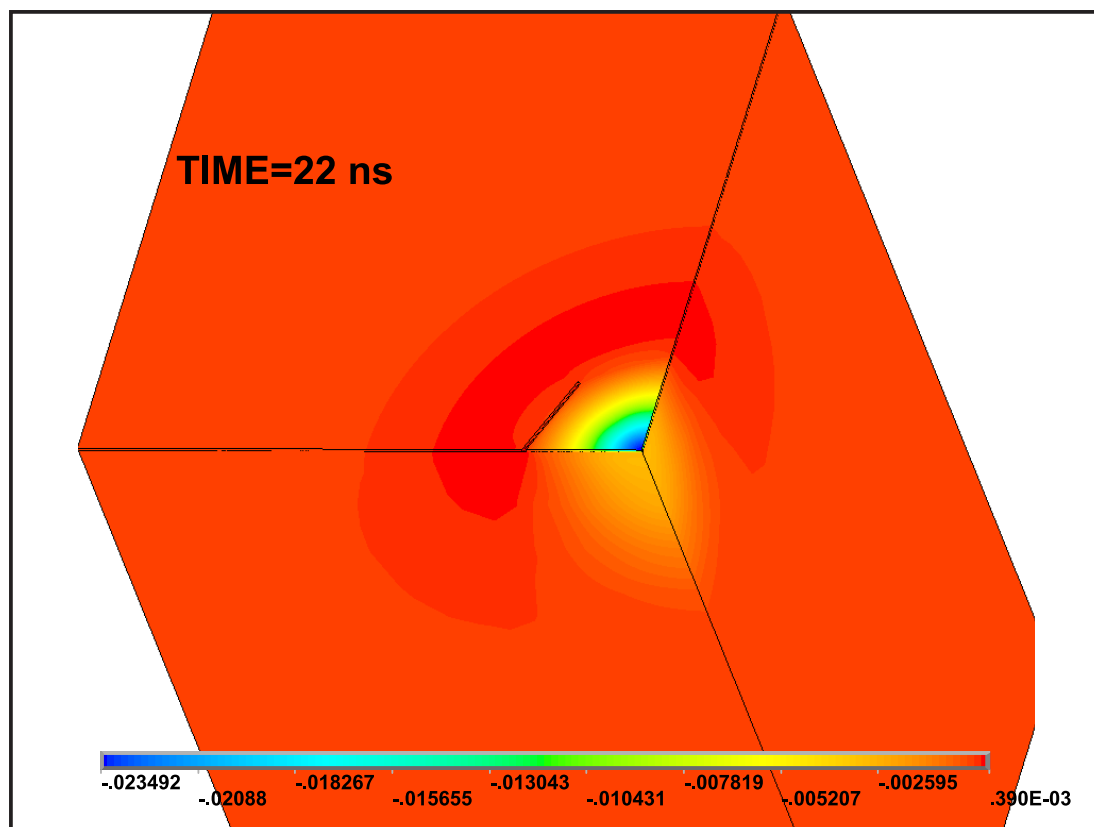
Στα Σχήματα 5.26 έως 5.29 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δείγματος με gap και η δημιουργία και διάδοση ακουστικών κυμάτων.



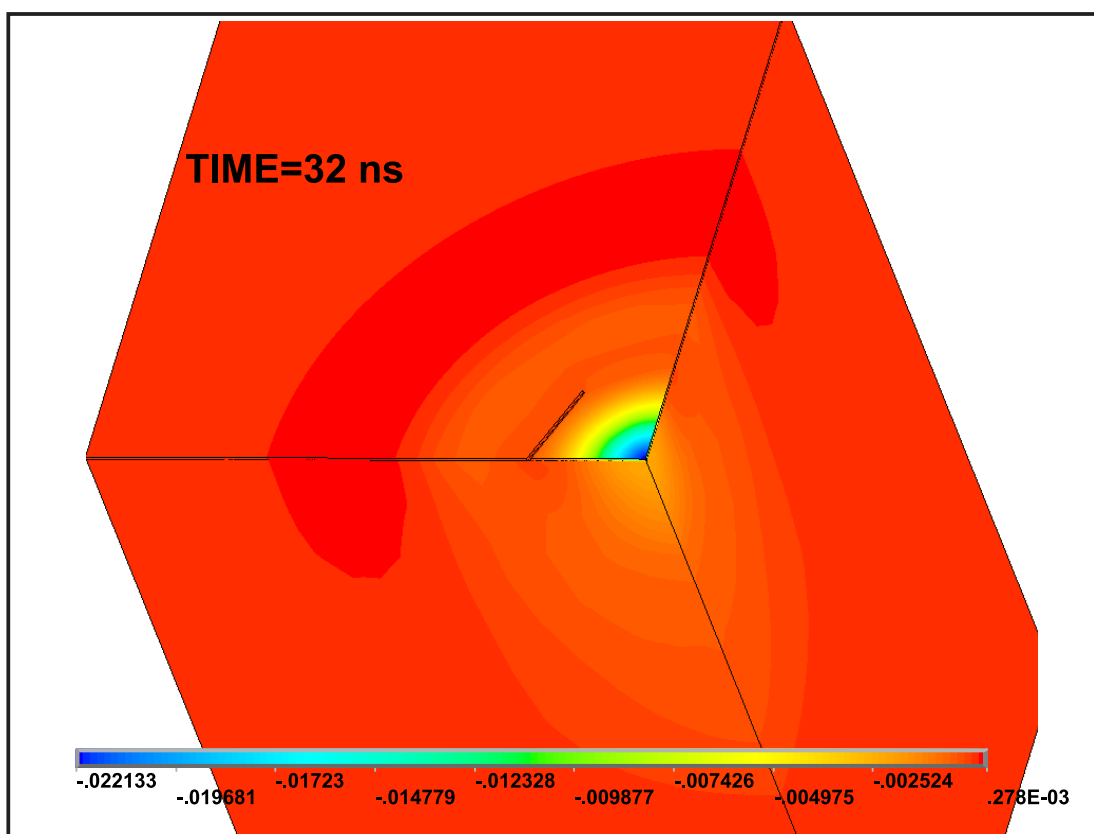
Σχήμα 5.26 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=12$ ns.



Σχήμα 5.27 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=18$ ns.



Σχήμα 5.28 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=22$ ns.

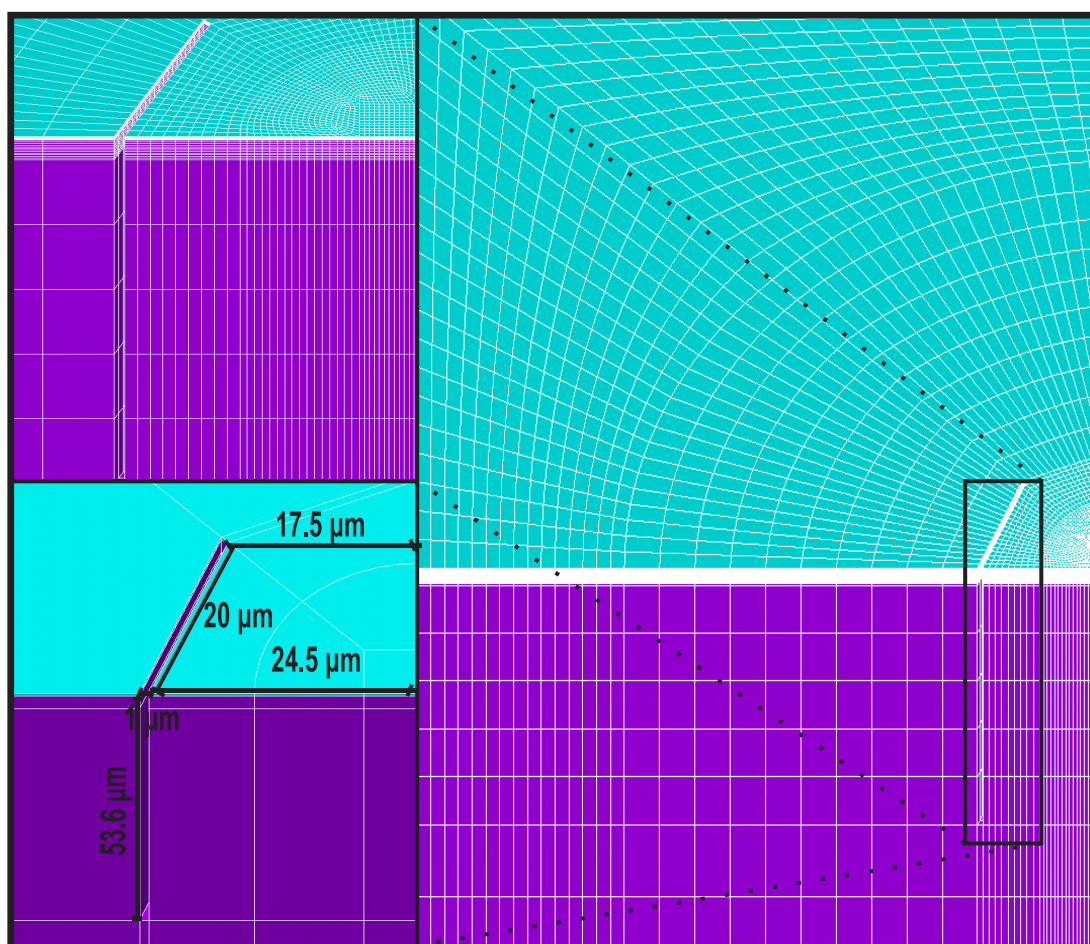


Σχήμα 5.29 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns.

Στο Σχήμα 5.26 τη χρονική στιγμή 12 ns μετά την ακτινοβολήση του δείγματος, παρατηρείται ότι ο υπέρηχος τείνει να περάσει από το gap. Έπειτα τη χρονική στιγμή 18 ns (βλ. Σχήμα 5.27) ο υπέρηχος παρατηρείται να περνάει το gap, ενώ στα Σχήματα 5.28, 5.29 φαίνεται η διάδοση του υπερήχου αφού έχει περάσει από την ατέλεια, τις χρονικές στιγμές $\Delta t=22$ και 32 ns αντίστοιχα. Παρατηρώντας το πεδίο μετατοπίσεων στο Σχήμα 5.27 τη χρονική στιγμή 18 ns γίνεται αντιληπτή η επίδραση του gap στη διάδοση του υπερήχου. Η παρατηρούμενη ανομοιομορφία δε μπορεί να καταγραφεί από τα διαγνωστικά στις πειραματικής διάταξης, συμπληρώνοντας έτσι το πείραμα και καθοδηγώντας την υλοποίηση νέων τεχνικών διάγνωσης.

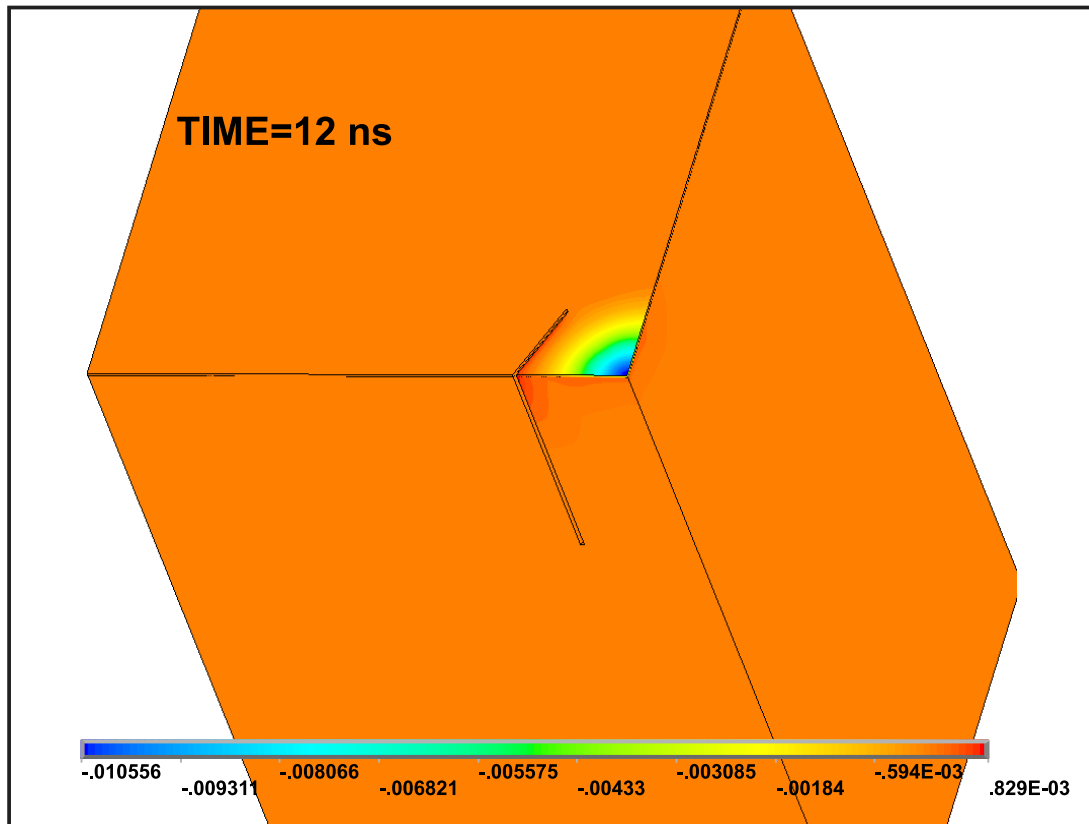
5.2.3 C3

Για την περίπτωση του C3 μοντέλου τροποποιήθηκε η γεωμετρία του gap και το βάθος του είναι πλέον 53.6 μm . Επεκτείνεται σε βάθος περίπου στο $\frac{1}{4}$ του πάχους του γυαλιού. Στο Σχήμα 5.30 απεικονίζεται η θέση του gap στο δοκίμιο, καθώς και τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά.

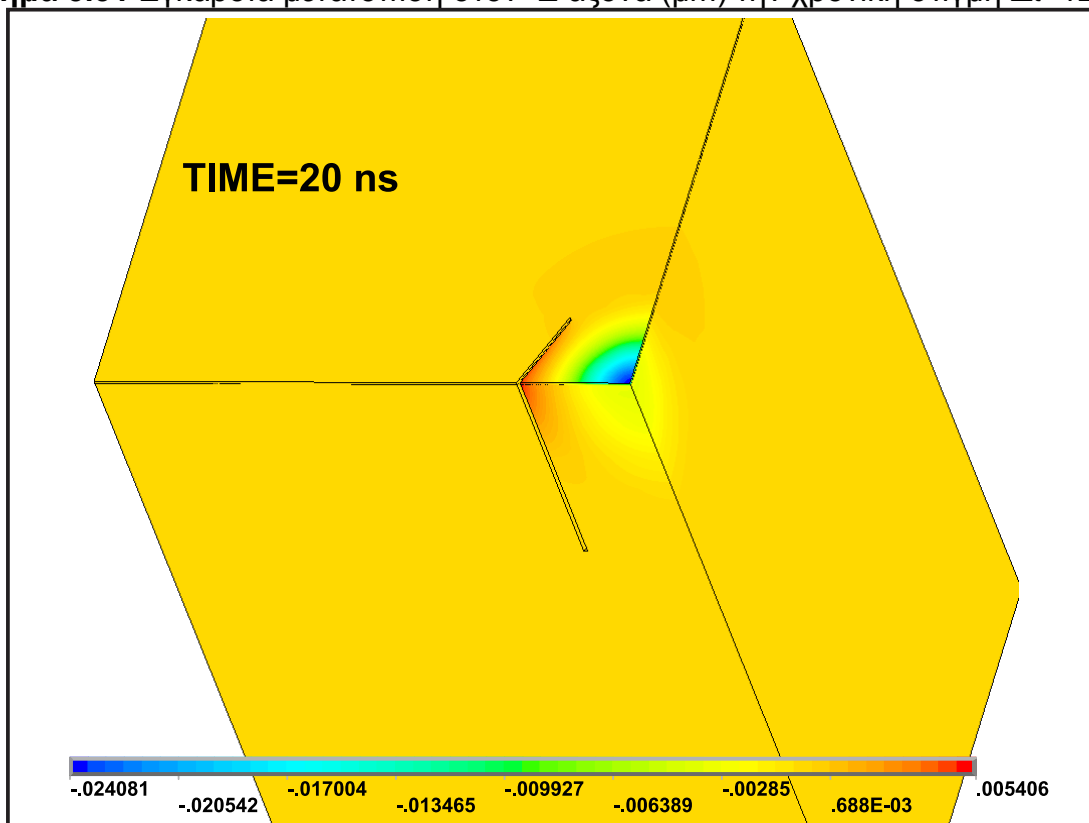


Σχήμα 5.30 Απεικόνιση της θέσης του gap στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

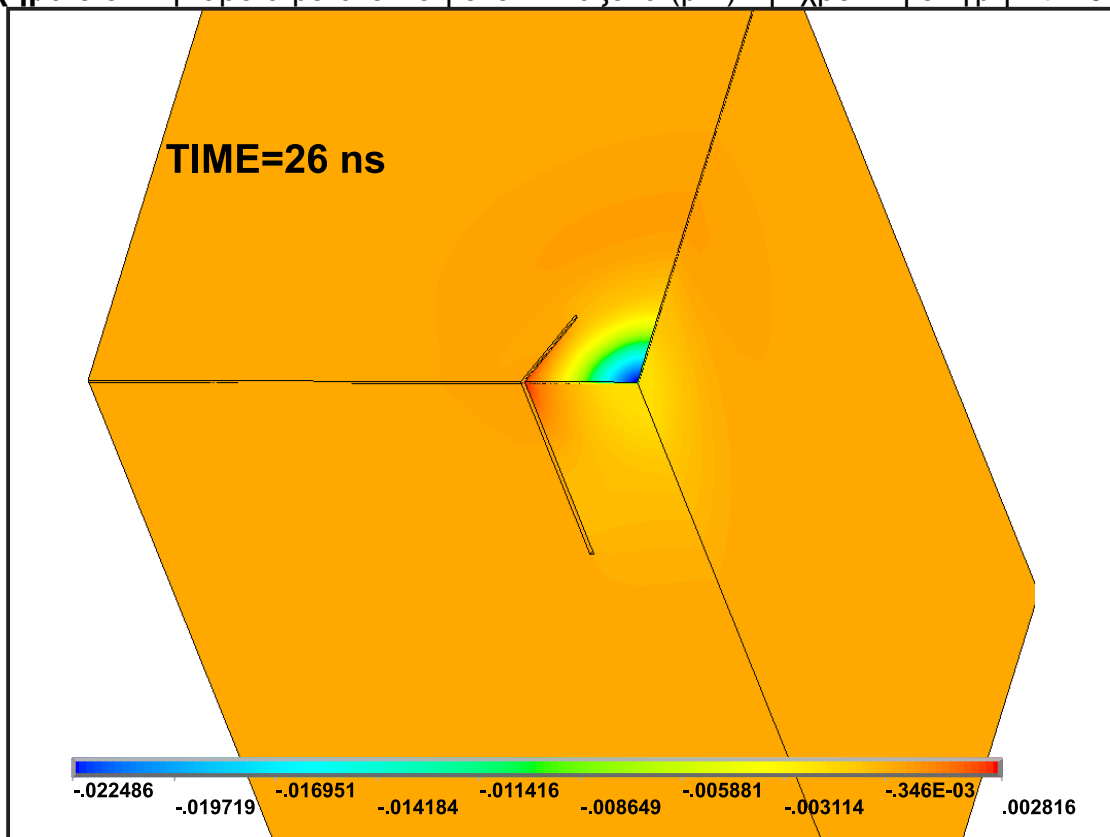
Στα Σχήματα 5.31 έως 5.34 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δείγματος με gap και η δημιουργία και διάδοση ακουστικών κυμάτων.



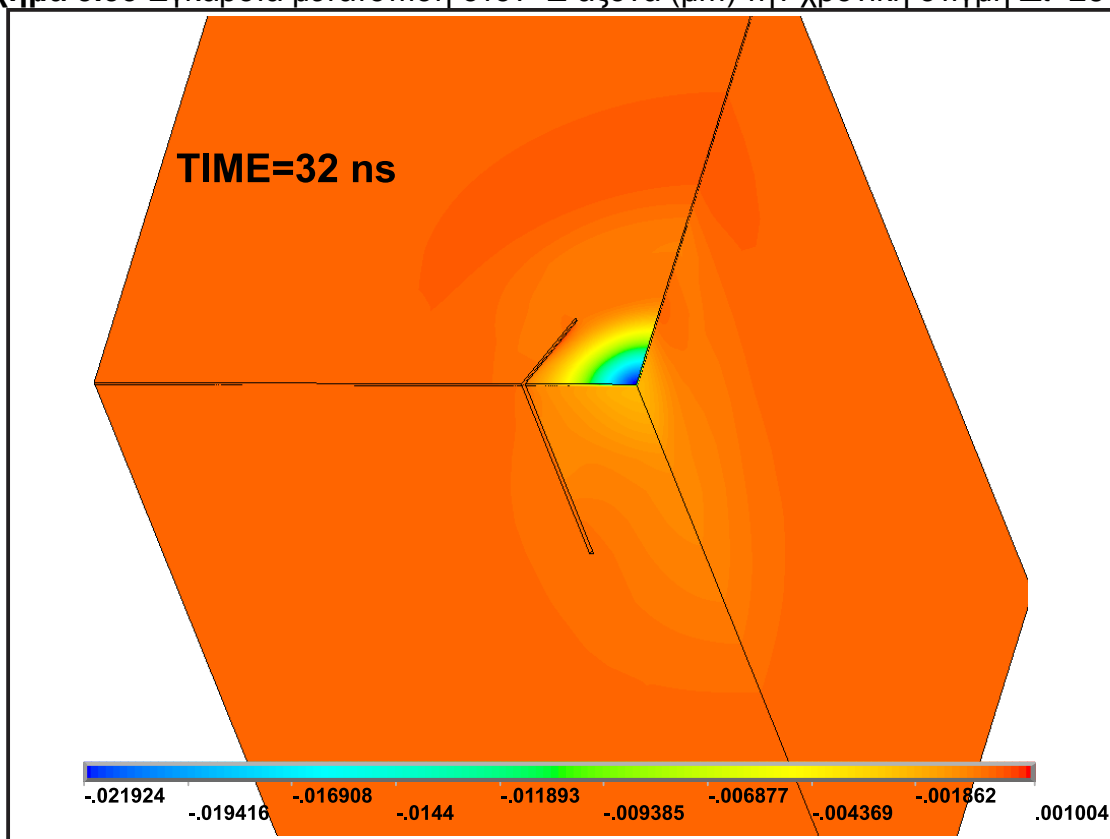
Σχήμα 5.31 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=12$ ns.



Σχήμα 5.32 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=20$ ns.



Σχήμα 5.33 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=26$ ns.

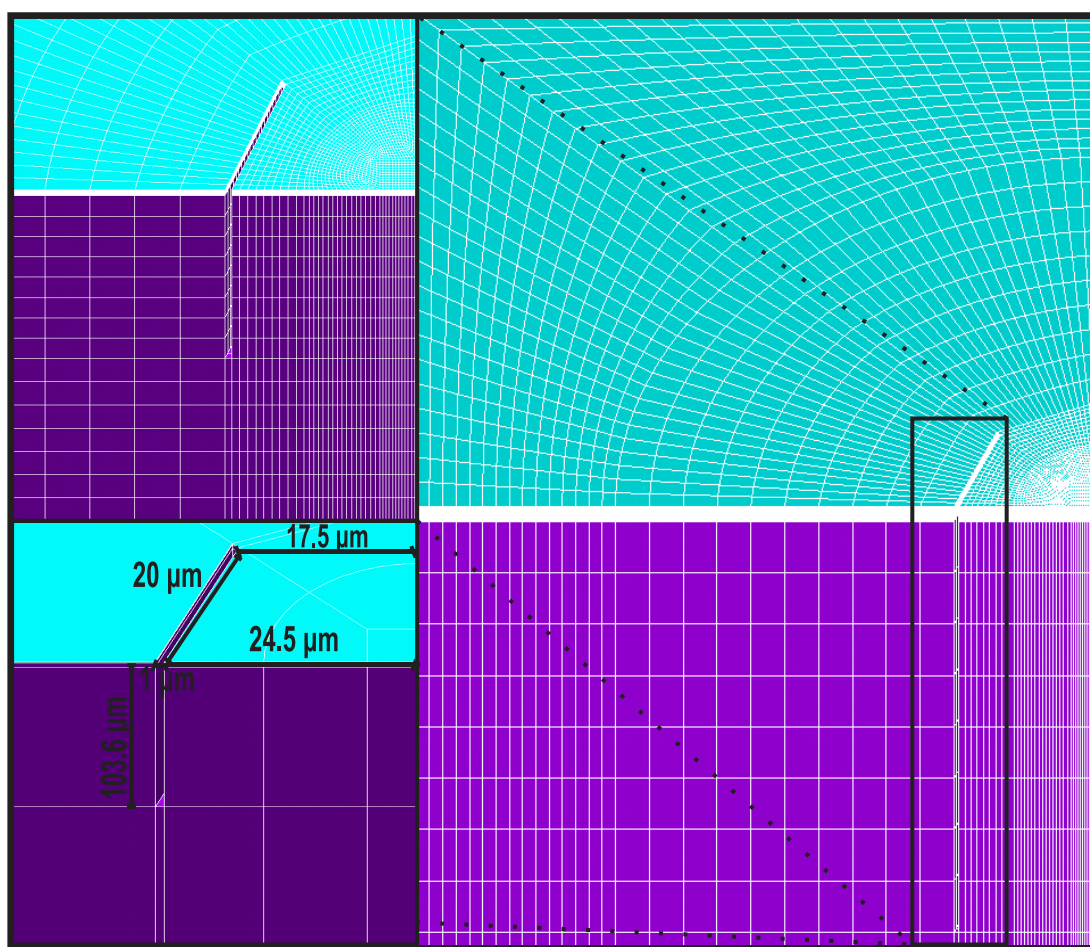


Σχήμα 5.34 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns.

Στο Σχήμα 5.31 για χρονική στιγμή 12 ns μετά την ακτινοβολήση του δείγματος παρατηρείται ότι δεν έχει περάσει ο υπέρηχος από το gap. Έπειτα στα Σχήματα 5.32 έως 5.34 ο υπέρηχος παρατηρείται να περνάει το gap και φαίνεται η διάδοση του αφού έχει περάσει από την ατέλεια, στις χρονικές στιγμές $\Delta t=20, 26$ και 32 ns αντίστοιχα. Παρατηρώντας το πεδίο μετατοπίσεων στα Σχήματα 5.31-5.34 γίνεται αντιληπτή η σημαντική επίδραση του gap στη διάδοση του υπερήχου. Συγκρινόμενη η περίπτωση αυτή μελέτης σε σχέση με τις περιπτώσεις C1 και C2 παρατηρείται ότι λόγο μεγαλύτερων ανακλάσεων στο gap μικρό μέρος του κύματος το διαπερνά, ενώ γίνεται αντιληπτό ότι η επέκταση του gap στο γυαλί επηρεάζει αισθητά τη διάδοση των SAWs.

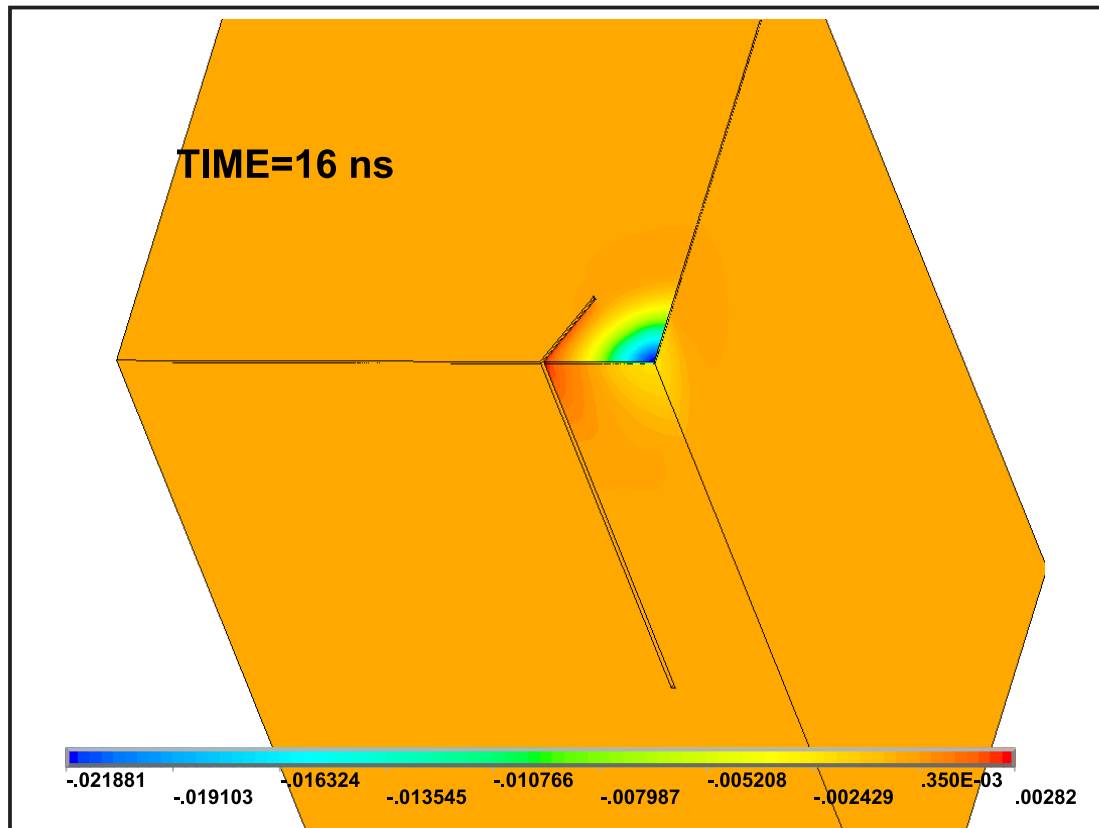
5.2.4 C4

Στην συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, σχεδιάστηκε το gap προχωρώντας σε μεγαλύτερο βάθος μέσα στο γυαλί και πιο συγκεκριμένα στο μισό πάχος του γυαλιού. Άρα το νέο βάθος που απλώνεται η γεωμετρία του gap είναι $103.6 \mu\text{m}$. Στο Σχήμα 5.35 απεικονίζεται η θέση του gap στο δοκίμιο, καθώς και τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά.

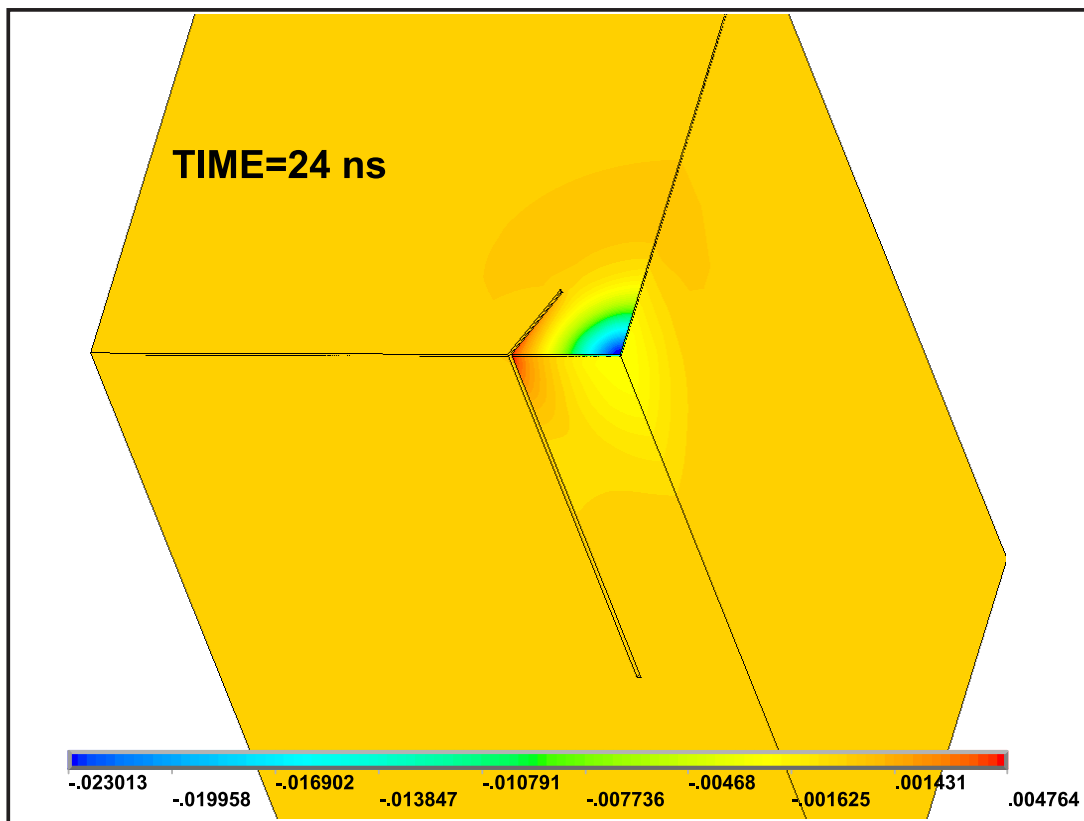


Σχήμα 5.35 Απεικόνιση της θέσης του gap στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

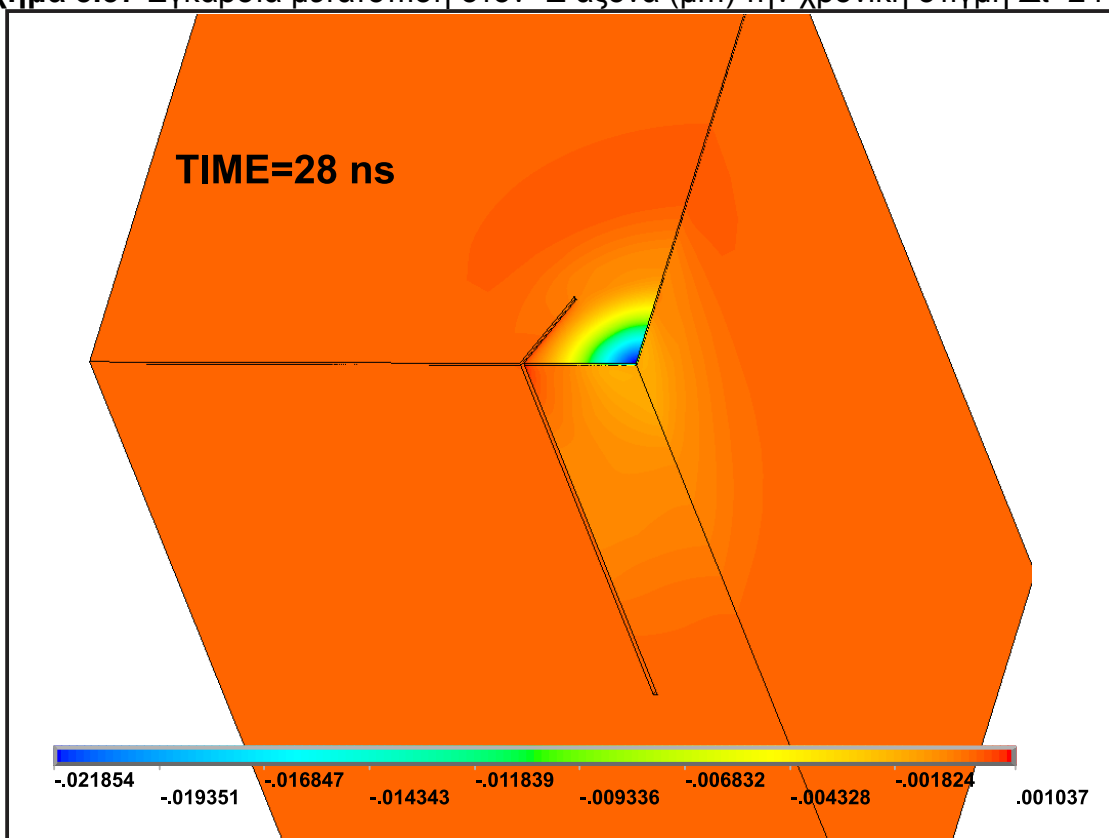
Στα Σχήματα 5.36-5.39 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δείγματος με gap και η δημιουργία και διάδοση ακουστικών κυμάτων.



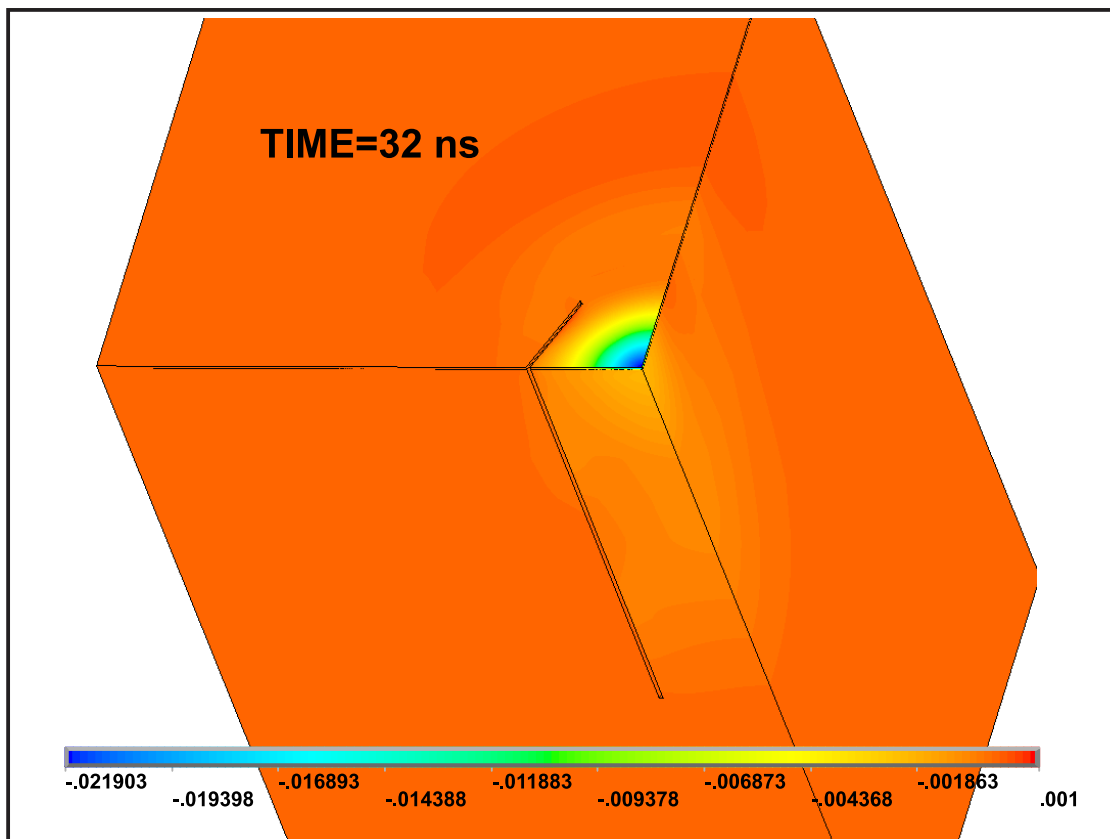
Σχήμα 5.36 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=16$ ns.



Σχήμα 5.37 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=24 \text{ ns}$.



Σχήμα 5.38 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=28 \text{ ns}$.

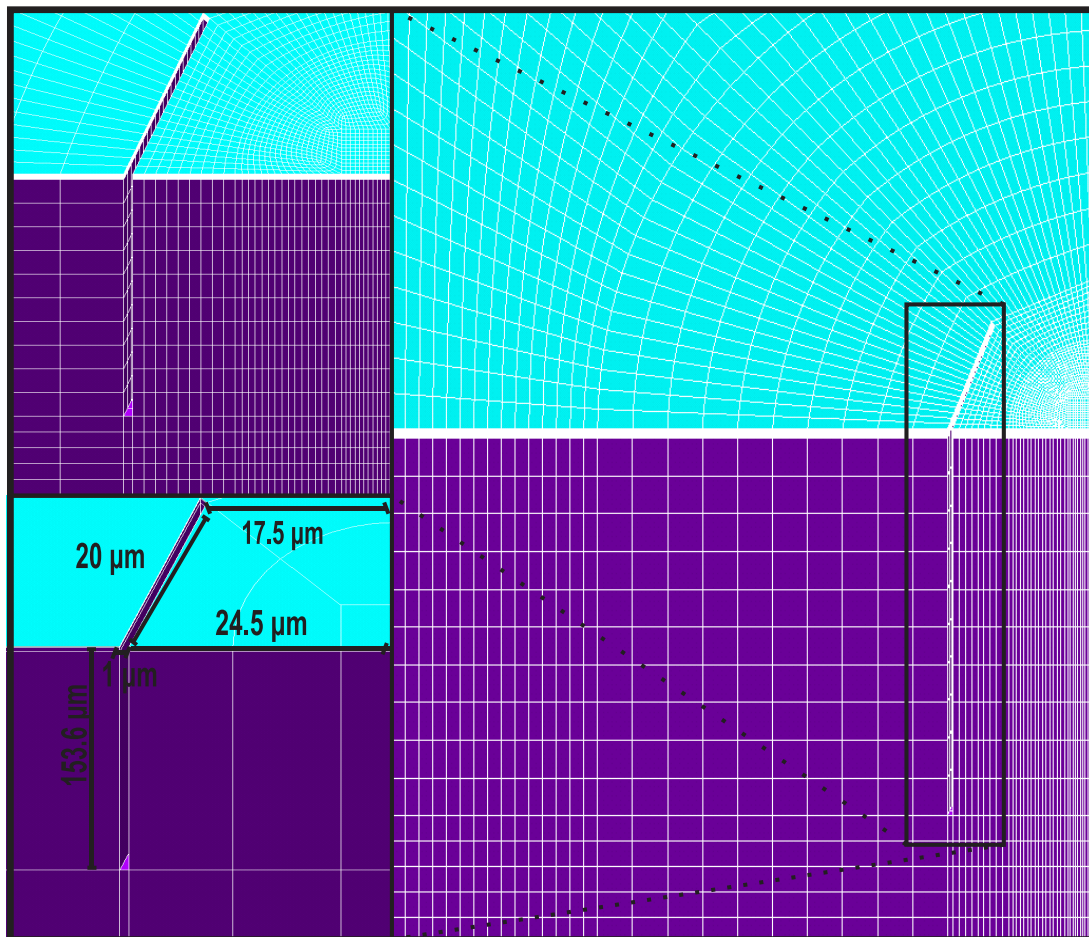


Σχήμα 5.39 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns.

Στο Σχήμα 5.36 για χρονική στιγμή 16 ns μετά την ακτινοβολήση του δείγματος παρατηρείται να μην περνάει ο υπέρηχος από το gap. Έπειτα στο Σχήμα 5.37 τη χρονική στιγμή 24 ns ο υπέρηχος παρατηρείται να περνάει το gap, ενώ στα Σχήματα 5.38, 5.39 φαίνεται η διάδοση του υπερήχου αφού έχει περάσει από την ατέλεια, στις χρονικές στιγμές $\Delta t=28$ και 32 ns αντίστοιχα. Παρατηρώντας το πεδίο μετατοπίσεων στα Σχήματα 5.36-5.39 γίνεται αντιληπτή η σημαντική επίδραση του gap στη διάδοση του υπερήχου.

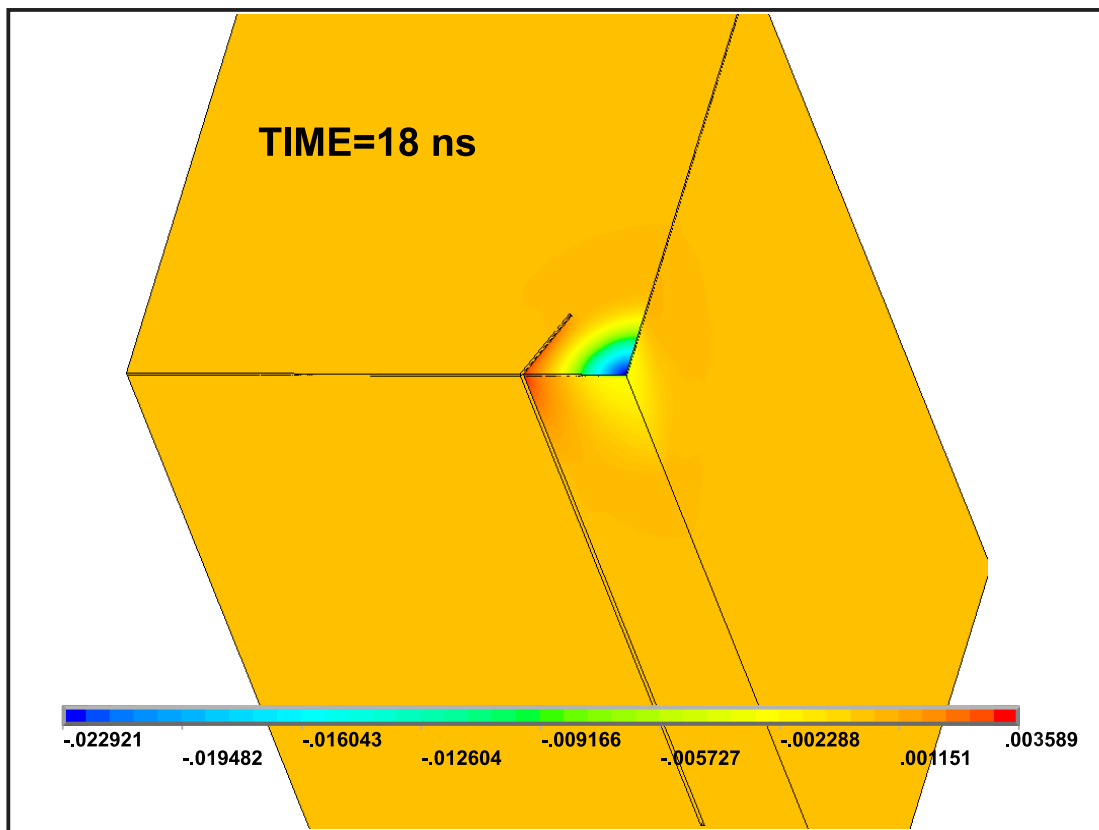
5.2.5 C5

Στην περίπτωση μελέτης C5 το gap επεκτείνεται πιο βαθιά στο πάχος του γυαλιού και ειδικότερα στα $\frac{3}{4}$ του πάχους του. Στο Σχήμα 5.40 απεικονίζεται η θέση του gap στο δοκίμιο, καθώς και τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά.

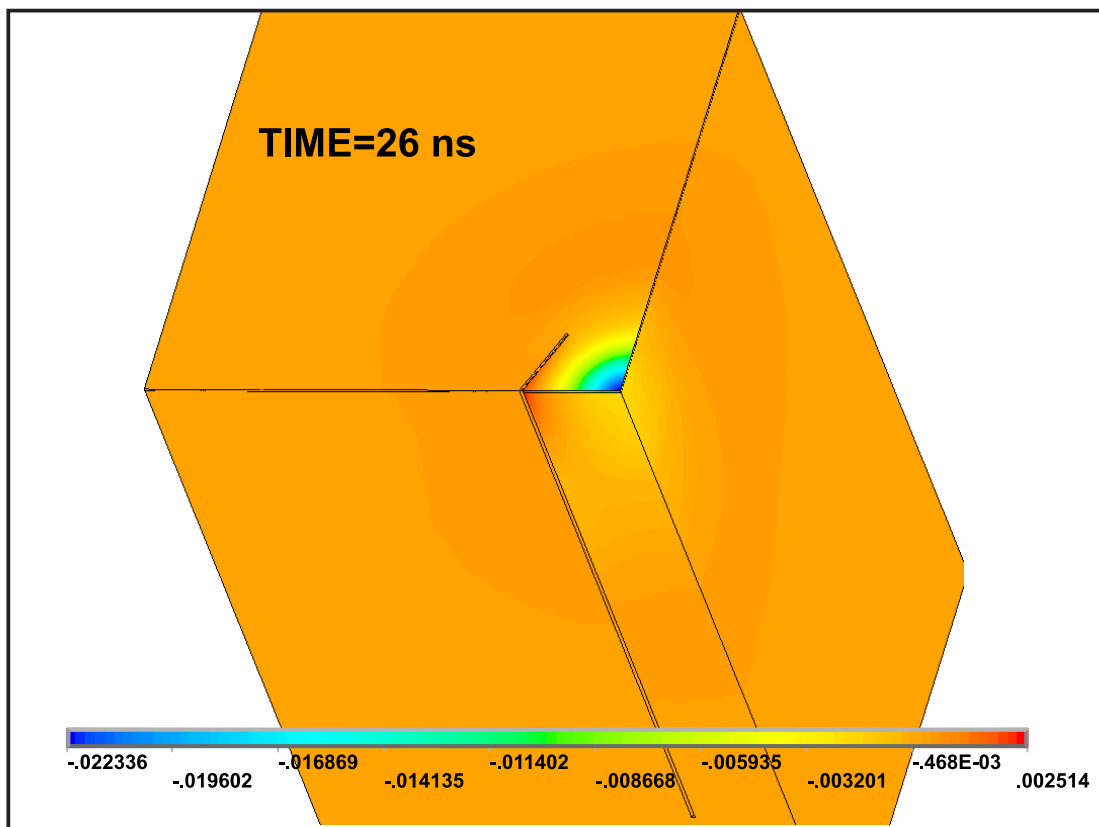


Σχήμα 5.40 Απεικόνιση της θέσης του gap στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

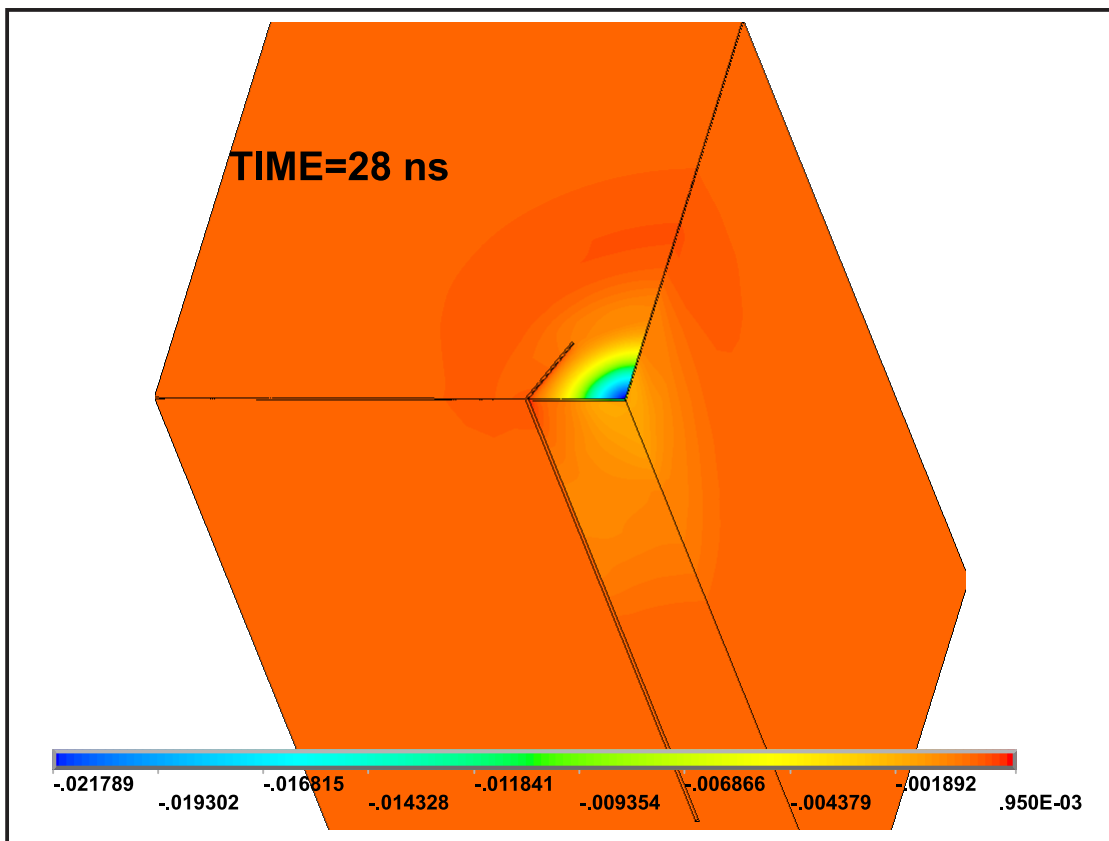
Στα Σχήματα 5.41-5.44 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δείγματος με gap και η δημιουργία και διάδοση ακουστικών κυμάτων.



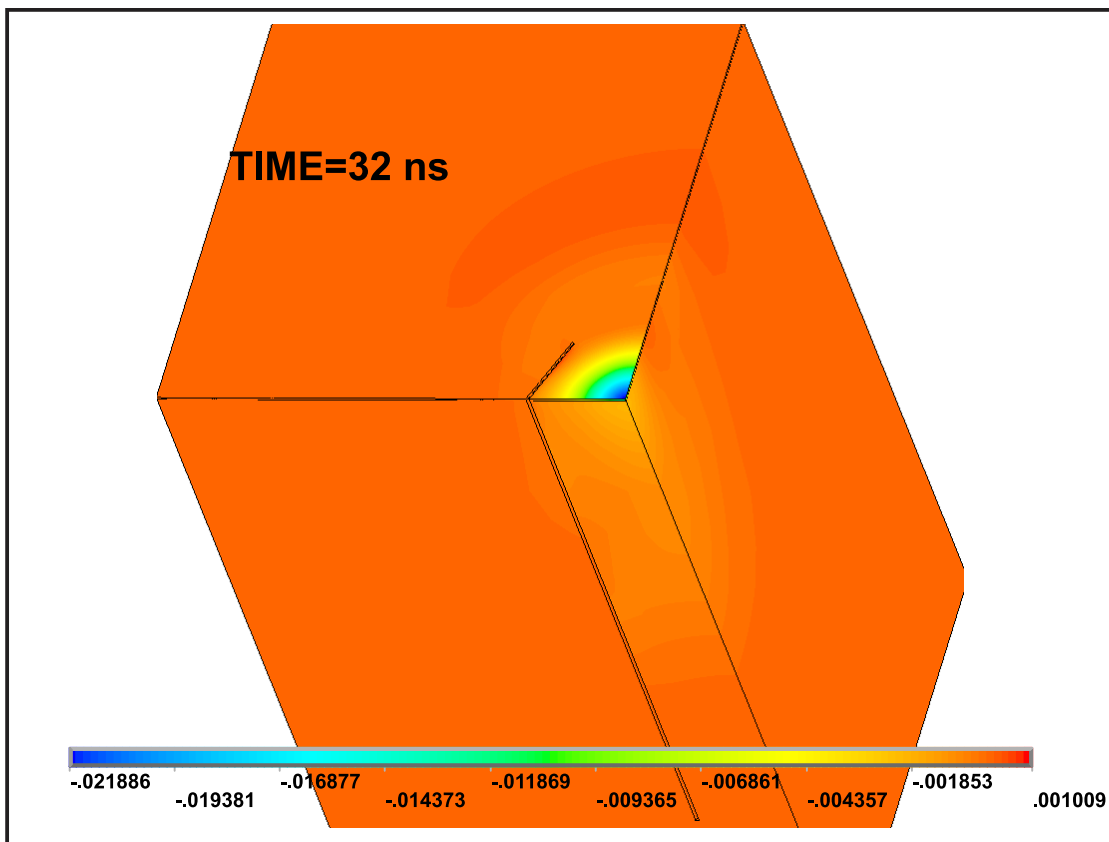
Σχήμα 5.41 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=18 \text{ ns}$.



Σχήμα 5.42 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=26 \text{ ns}$.



Σχήμα 5.43 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t = 28$ ns.

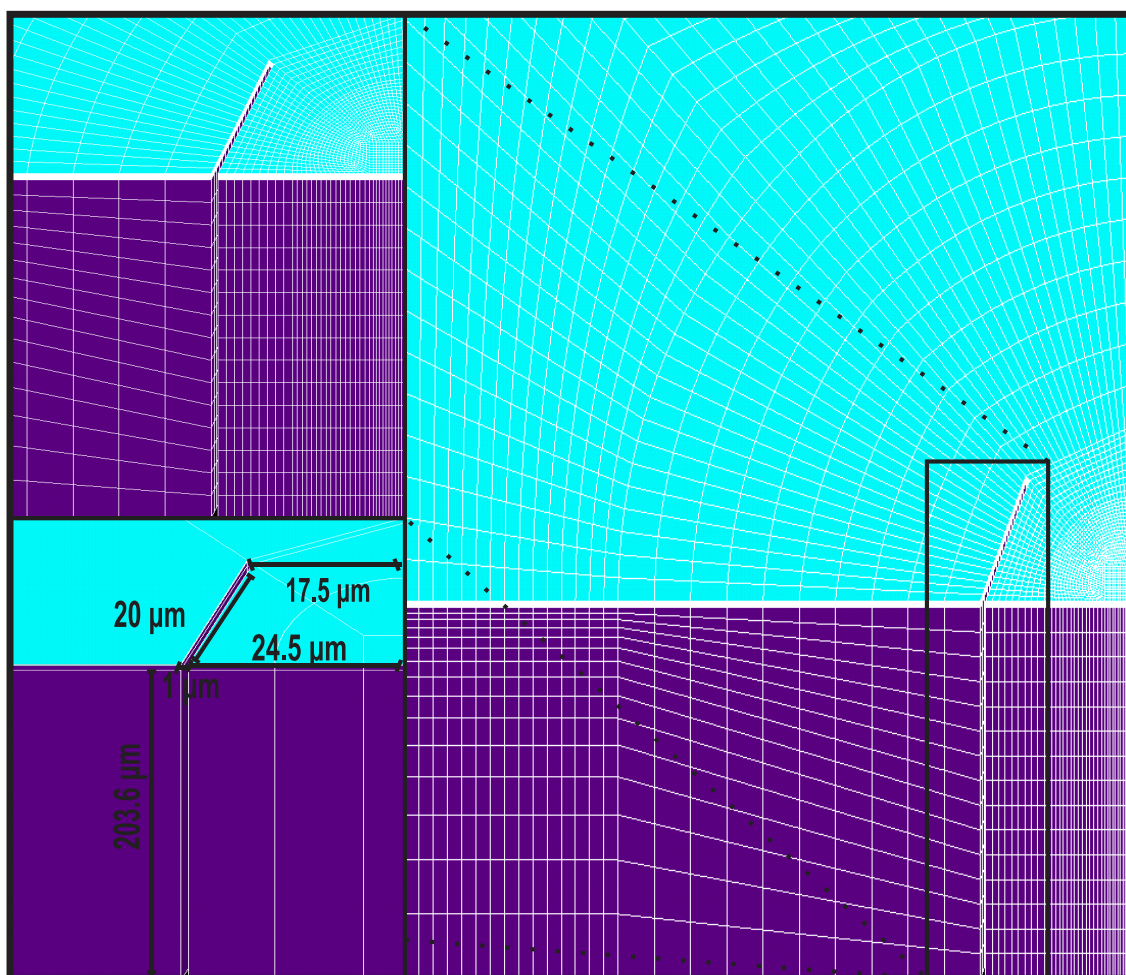


Σχήμα 5.44 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t = 32$ ns.

Στα Σχήματα 5.42-5.44 φαίνεται η διάδοση του υπερήχου αφού έχει περάσει από την ατέλεια, στις χρονικές στιγμές $\Delta t=26$, 28 και 32 ns αντίστοιχα. Παρατηρώντας το πεδίο μετατοπίσεων στα Σχήματα 5.41-5.44 γίνεται αντιληπτή η σημαντική επίδραση του gap στη διάδοση του υπερήχου, η οποία δεν παρουσιάζει αισθητές διαφορές σε σχέση με τις περιπτώσεις C3-C4.

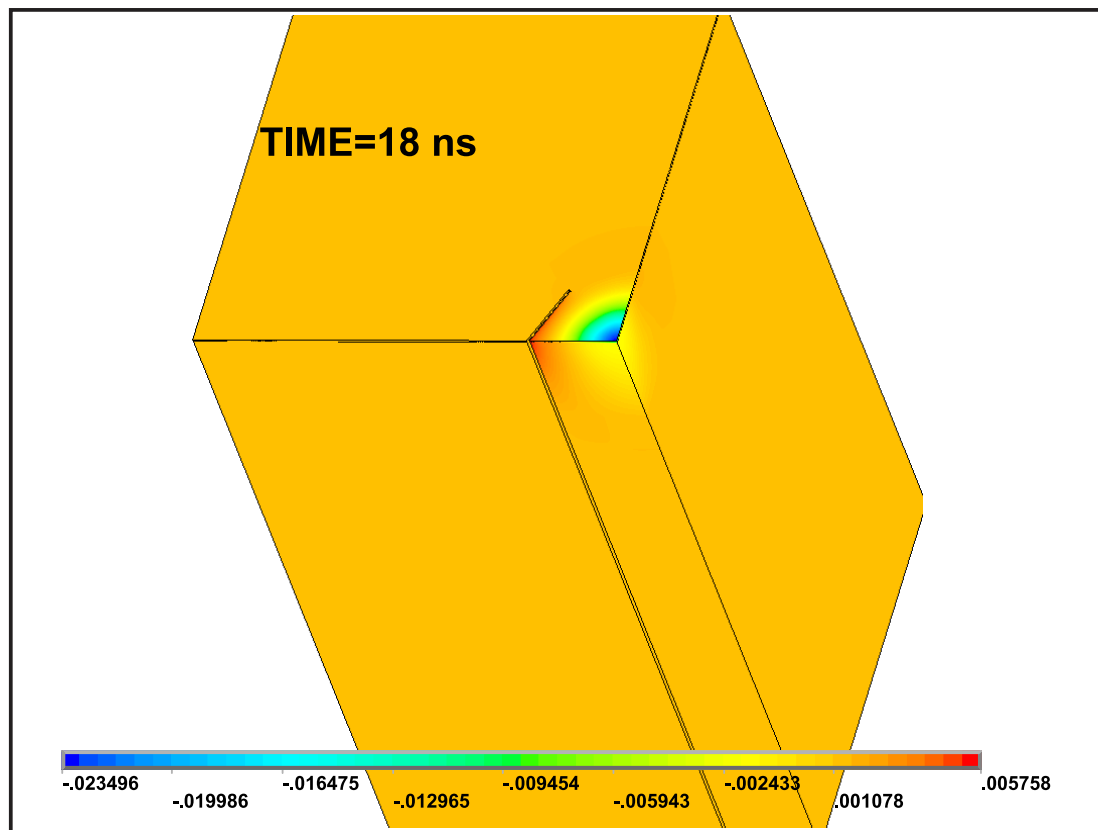
5.2.6 C6

Η παρούσα περίπτωση δοκιμών είναι και η τελευταία, όσο αφορά τη μεταβολή του βάθους του gap με παράλληλη διατήρηση σταθερών των άλλων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ελαττώματος (μήκος, πλάτος). Σε αυτήν την περίπτωση το βάθος που έχει το gap διαπερνά όλο το πάχος του χρυσού και γυαλιού που είναι 203.6 μm . Παρακάτω παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.45 η θέση και η γεωμετρία του gap στο δοκίμιο.

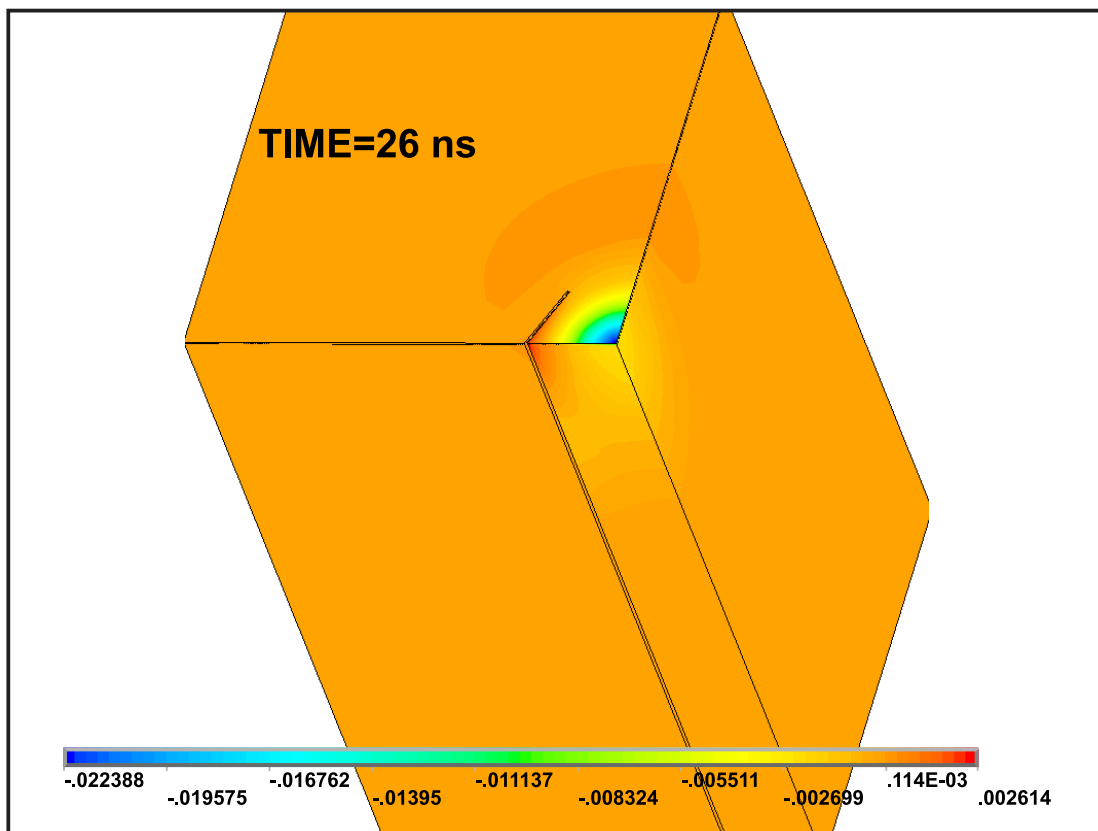


Σχήμα 5.45 Απεικόνιση της θέσης του gap στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

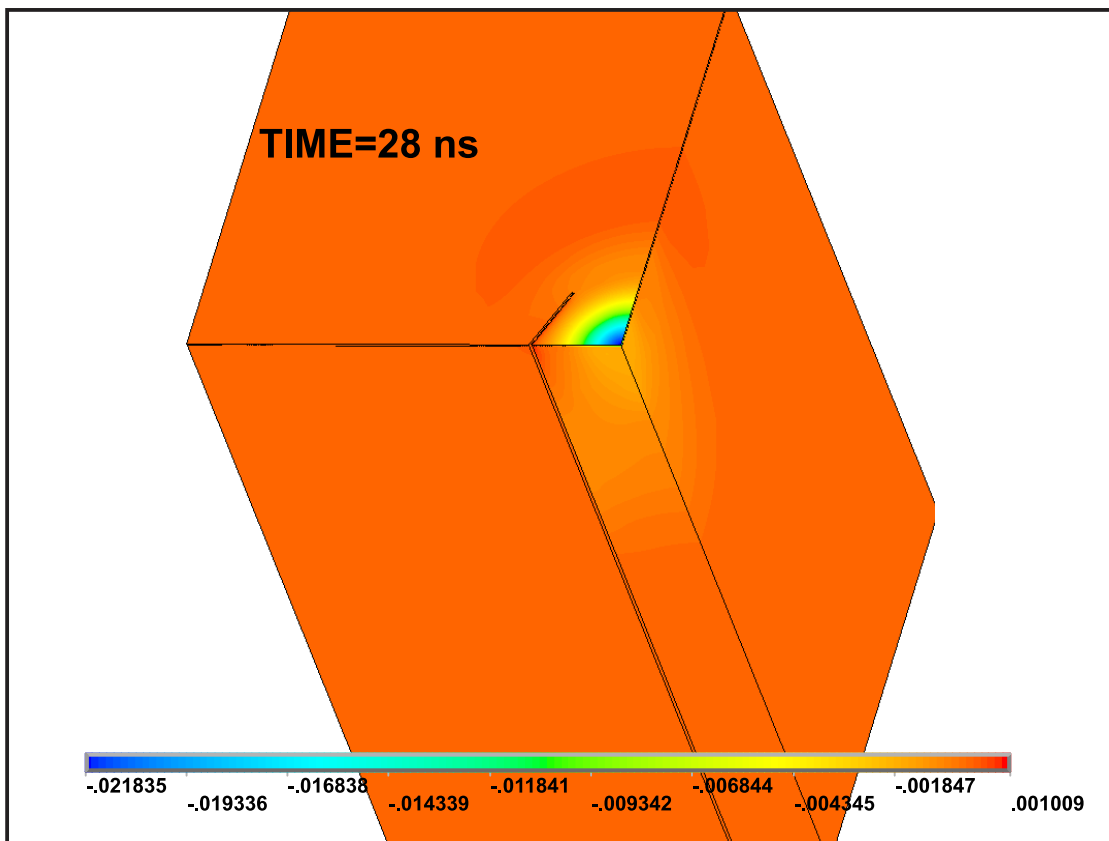
Στα Σχήματα 5.46-5.49 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δείγματος με gap και η δημιουργία και διάδοση ακουστικών κυμάτων.



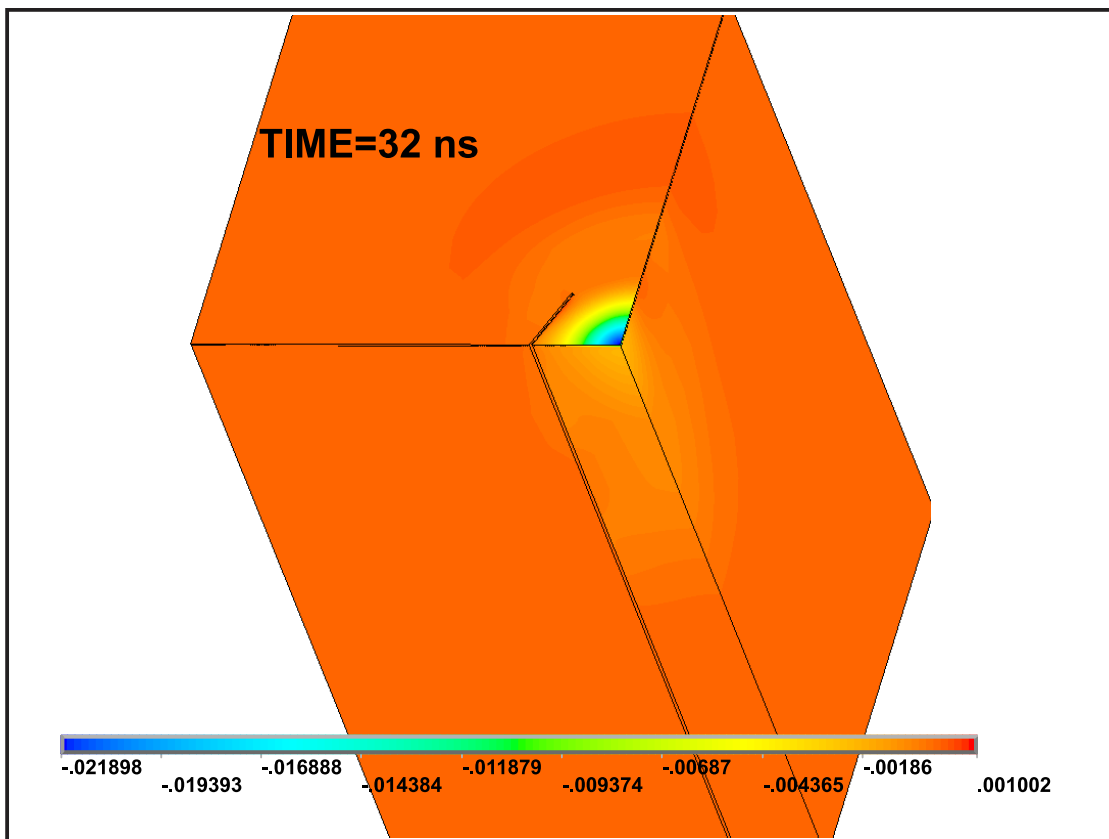
Σχήμα 5.46 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=18 \text{ ns}$.



Σχήμα 5.47 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=26 \text{ ns}$.



Σχήμα 5.48 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=28 \text{ ns}$.

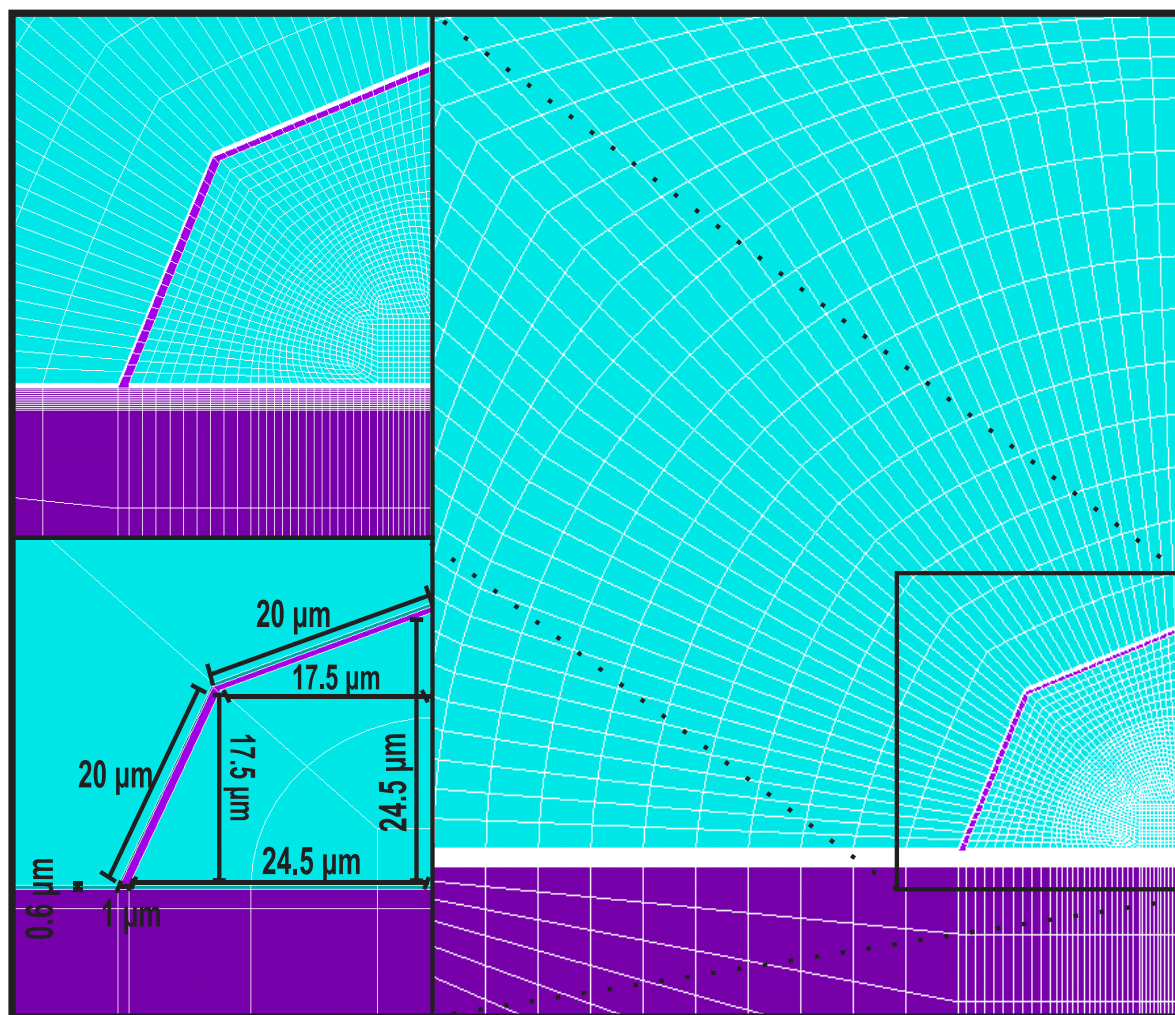


Σχήμα 5.49 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=32 \text{ ns}$.

Παρατηρώντας το πεδίο μετατοπίσεων στα Σχήματα 5.46-5.49 γίνεται αντιληπτή η σημαντική επίδραση του gar στη διάδοση του υπερήχου, η οποία δεν παρουσιάζει αισθητές διαφορές σε σχέση με τις περιπτώσεις C3-C5.

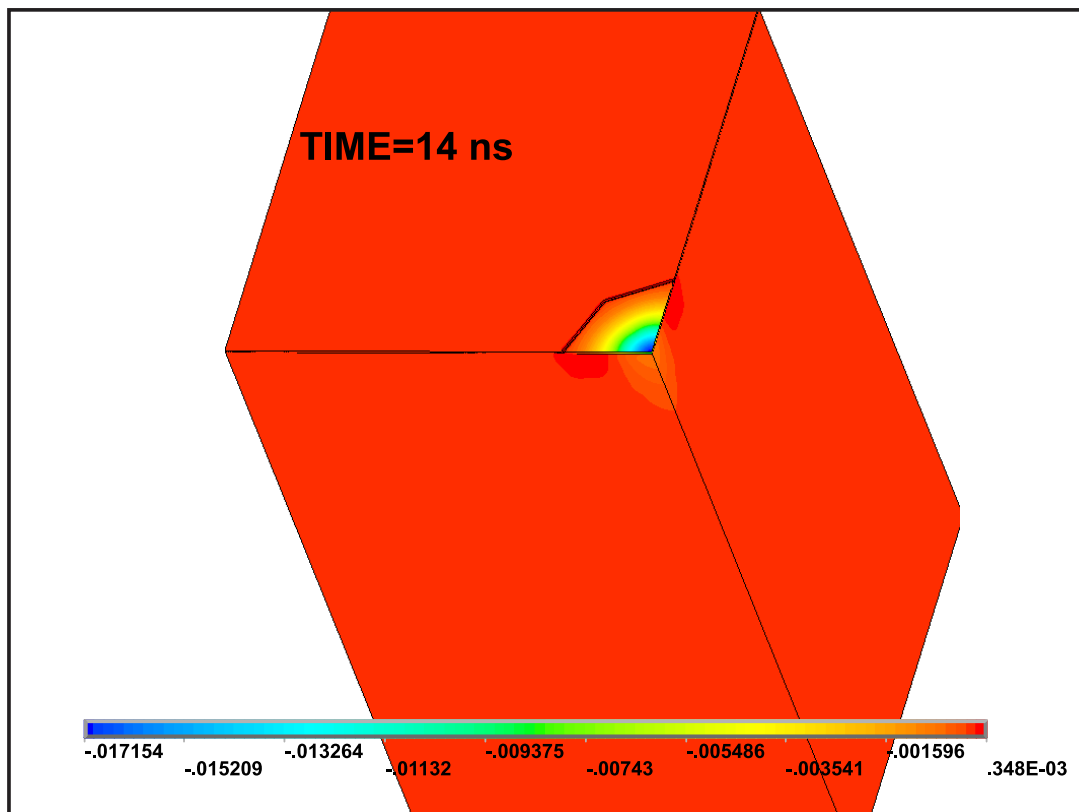
5.2.7 C7

Για την περίπτωση μελέτης C7 εξετάζεται κλειστή γεωμετρία του gar. Αυτό επιτυγχάνεται με την μεταβολή του μήκος του κενού-gar και διατηρώντας βάθος και πλάτος σταθερό. Ειδικότερα το πλάτος του παραμένει 1 μm και το βάθος του είναι 0.6 μm , επεκτείνεται σε όλο το πάχος του χρυσού. Το μήκος του αυξάνεται κατά 20 μm με συνολικό μήκος 40 μm με αποτέλεσμα να επεκτείνεται και στην απέναντι πλευρά. Στο Σχήμα 5.50 που ακολουθεί φαίνεται λεπτομερώς η θέση και γεωμετρία του στο δοκίμιο.

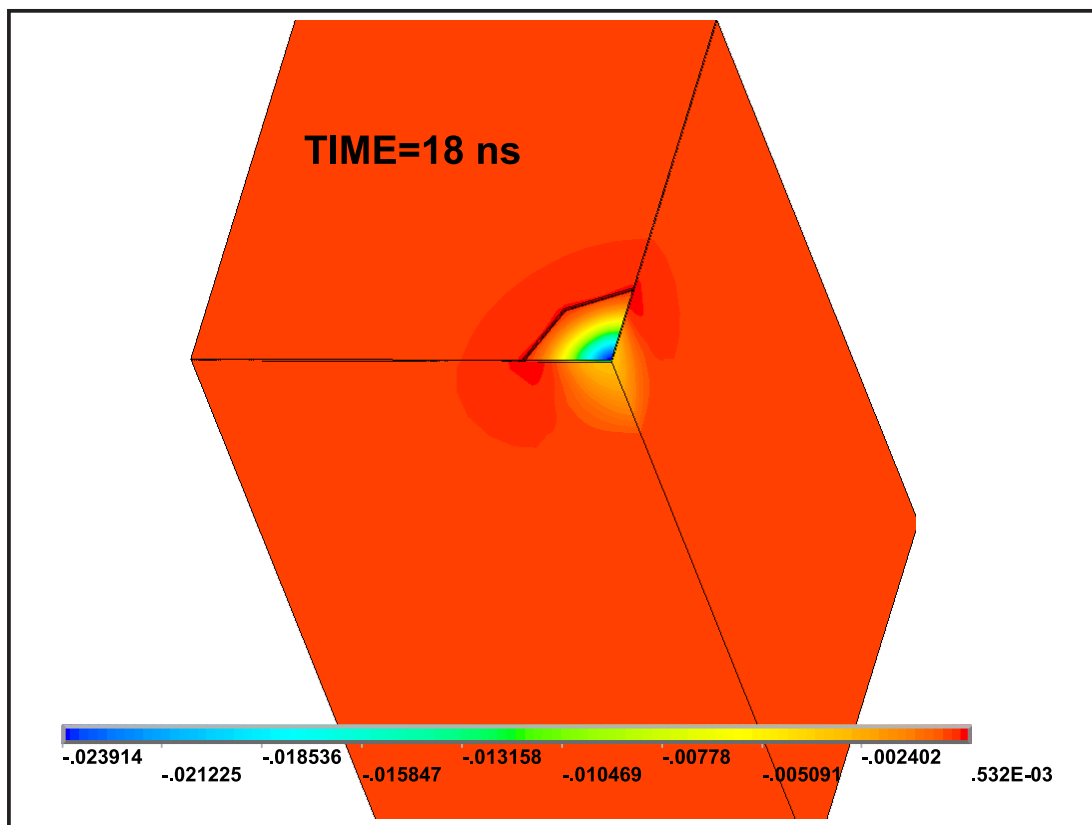


Σχήμα 5.50 Απεικόνιση της θέσης του gar στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

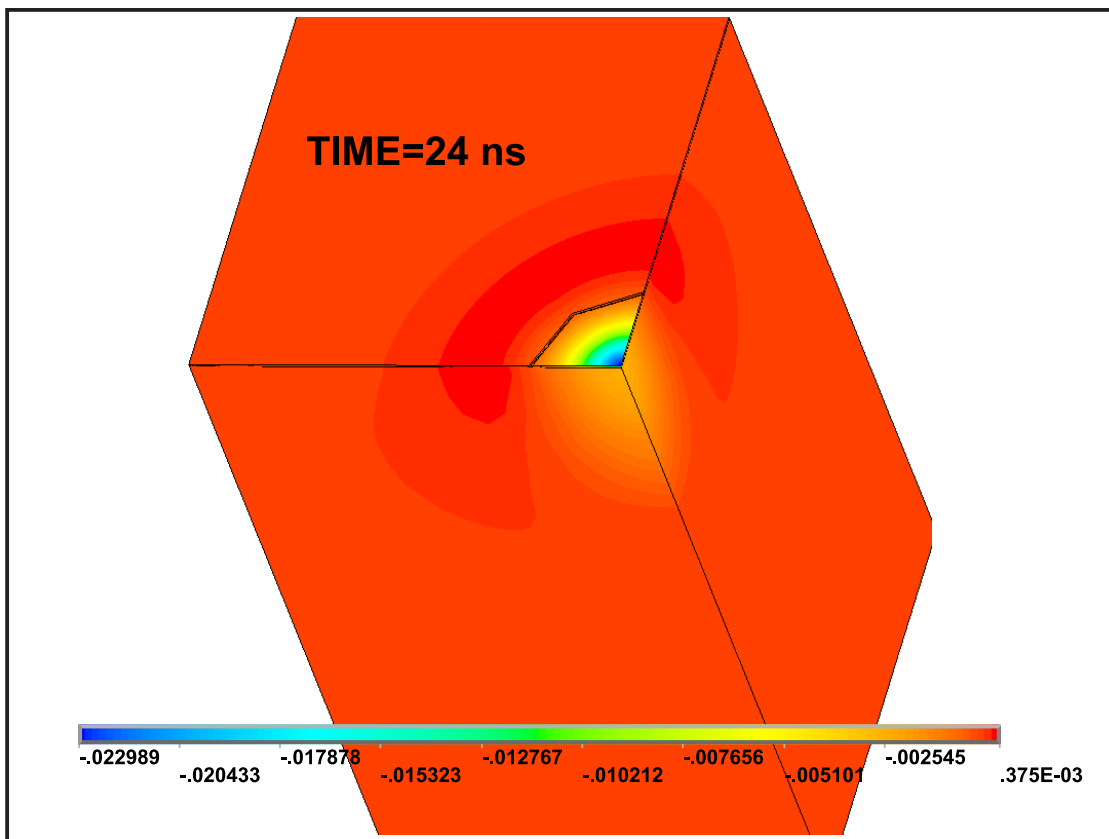
Στα Σχήματα 5.51-5.54 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δοκιμίου με gar και η δημιουργία και διάδοση ακουστικών κυμάτων.



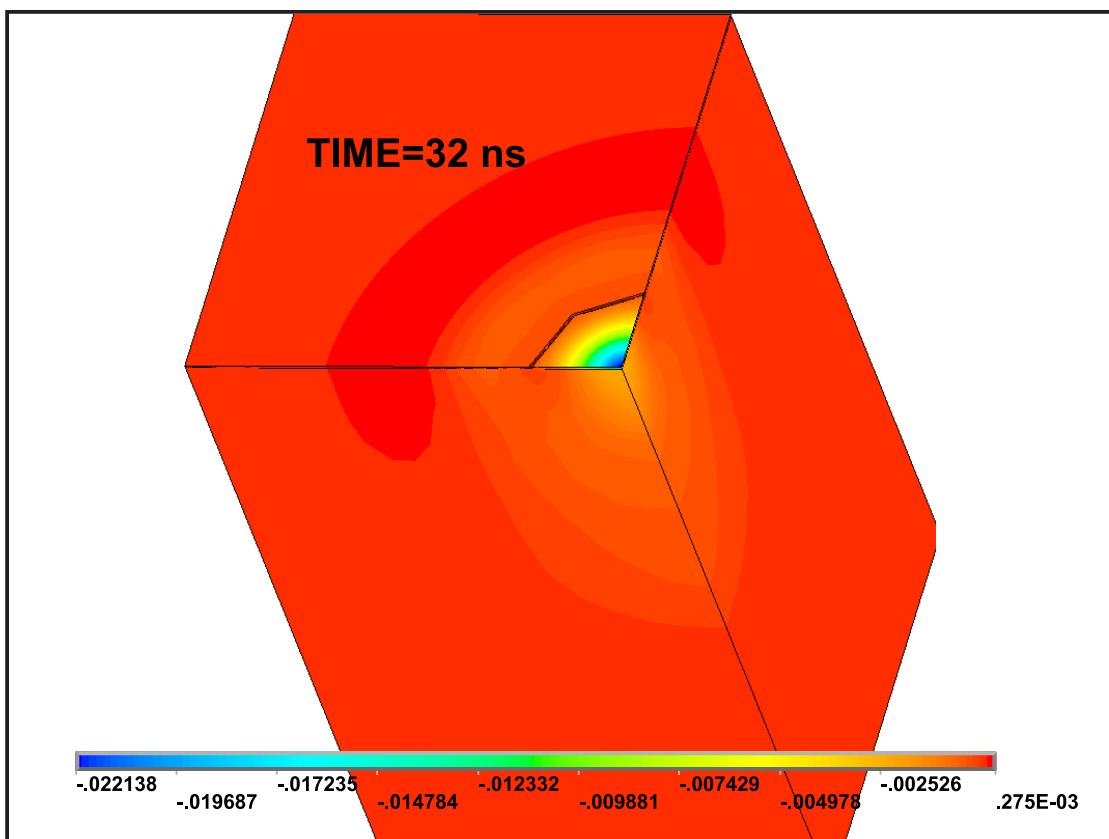
Σχήμα 5.51 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=14$ ns.



Σχήμα 5.52 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=18$ ns.



Σχήμα 5.53 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t = 24 \text{ ns}$.

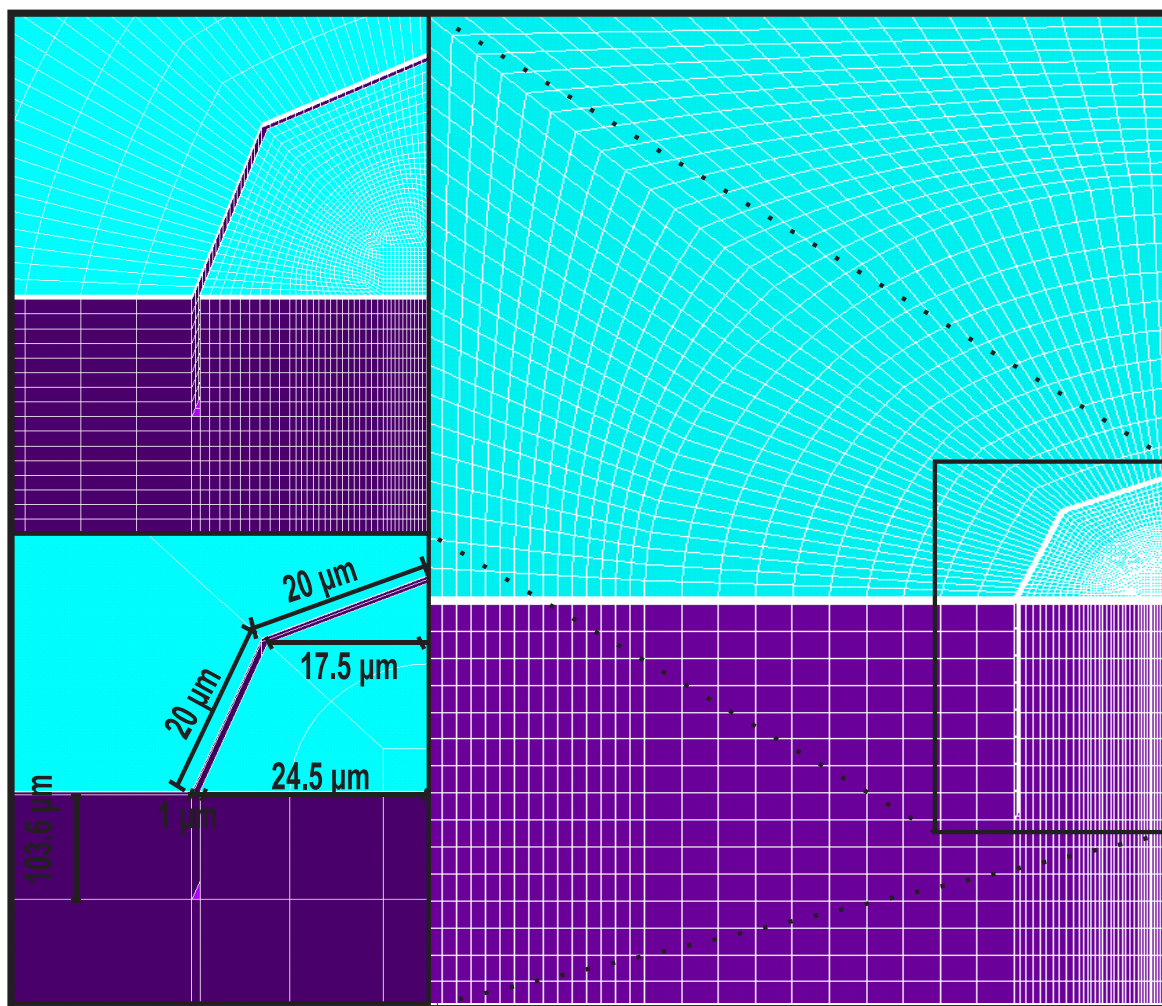


Σχήμα 5.54 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t = 32 \text{ ns}$.

Στο Σχήμα 5.51 για χρονική στιγμή 14 ns μετά την ακτινοβόληση του δείγματος δεν παρατηρείται να περνάει ο υπέρηχος από το gap. Στο Σχήμα 5.52 τη χρονική στιγμή 18 ns ο υπέρηχος παρατηρείται να περνάει το gap, ενώ στα Σχήματα 5.53, 5.54 φαίνεται η διάδοση του υπερήχου αφού έχει περάσει από την ατέλεια, στις χρονικές στιγμές $\Delta t=24$ και 32 ns αντίστοιχα.

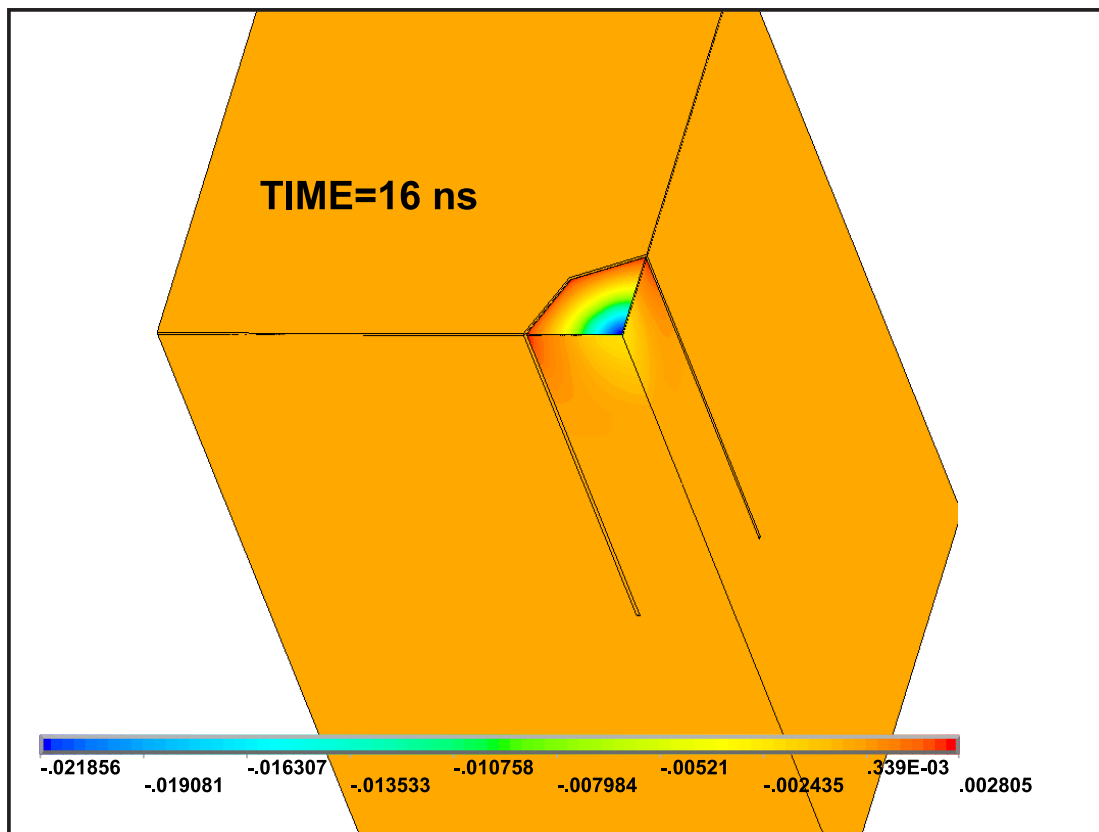
5.2.8 C8

Στην συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης το μοντέλο που εξετάζεται είναι συνέχεια της περίπτωσης C7. Στο παρών μοντέλο το gap επεκτείνεται σε βάθος στο μισό του γυαλιού, διατηρώντας το πλάτος του σταθερό και ίσο με 1 μm . Στο Σχήμα 5.55 που ακολουθεί φαίνεται λεπτομερώς η θέση και γεωμετρία του στο δοκίμιο.

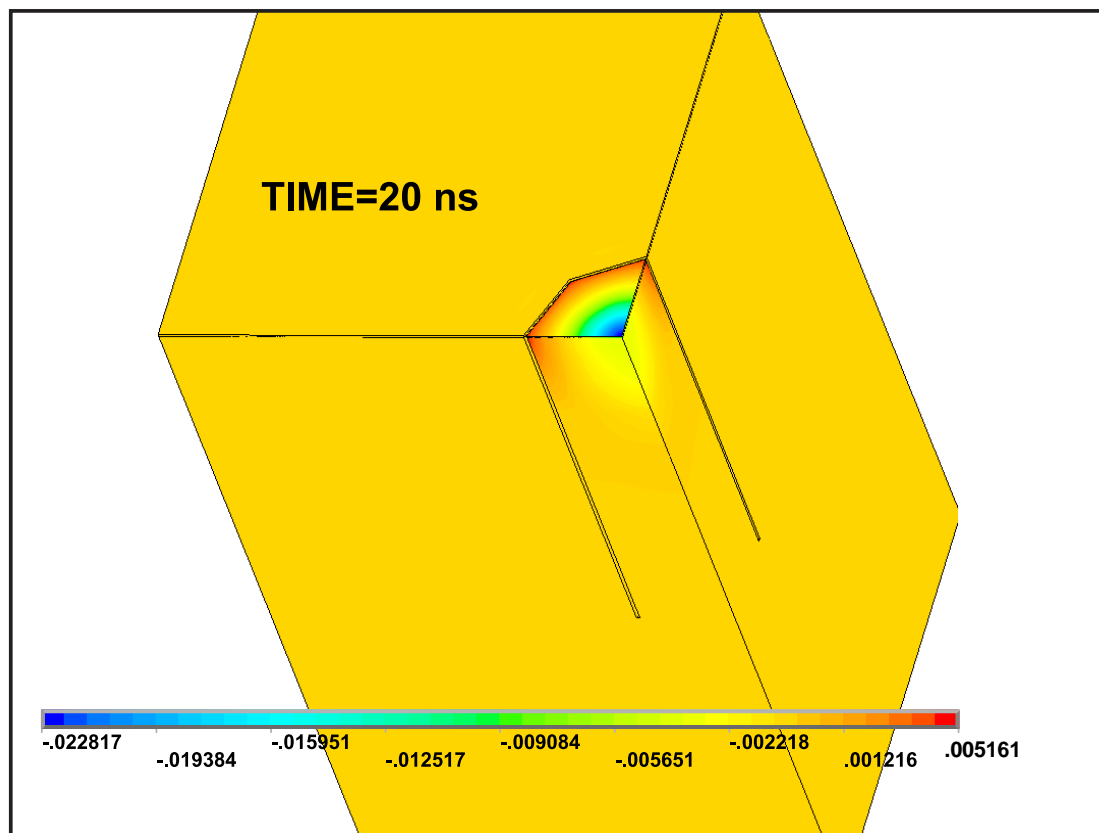


Σχήμα 5.55 Απεικόνιση της θέσης του gap στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

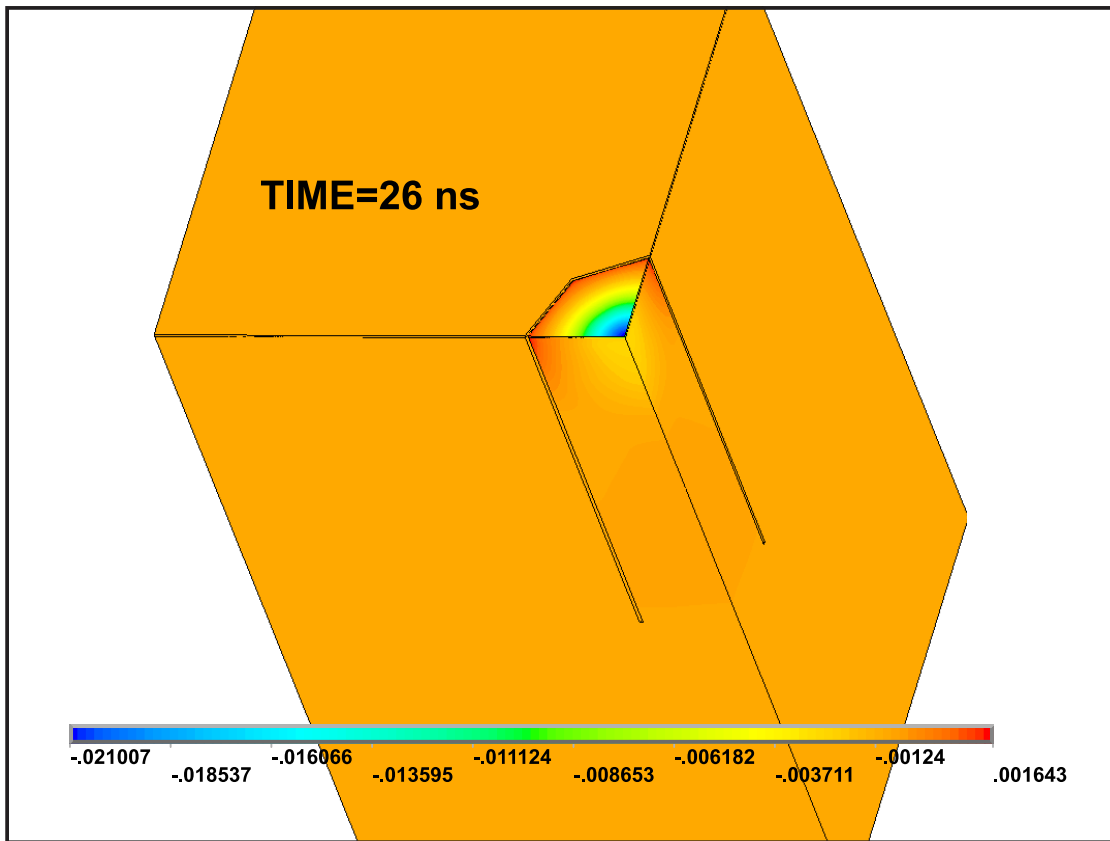
Στα Σχήματα 5.56-5.59 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δοκιμίου.



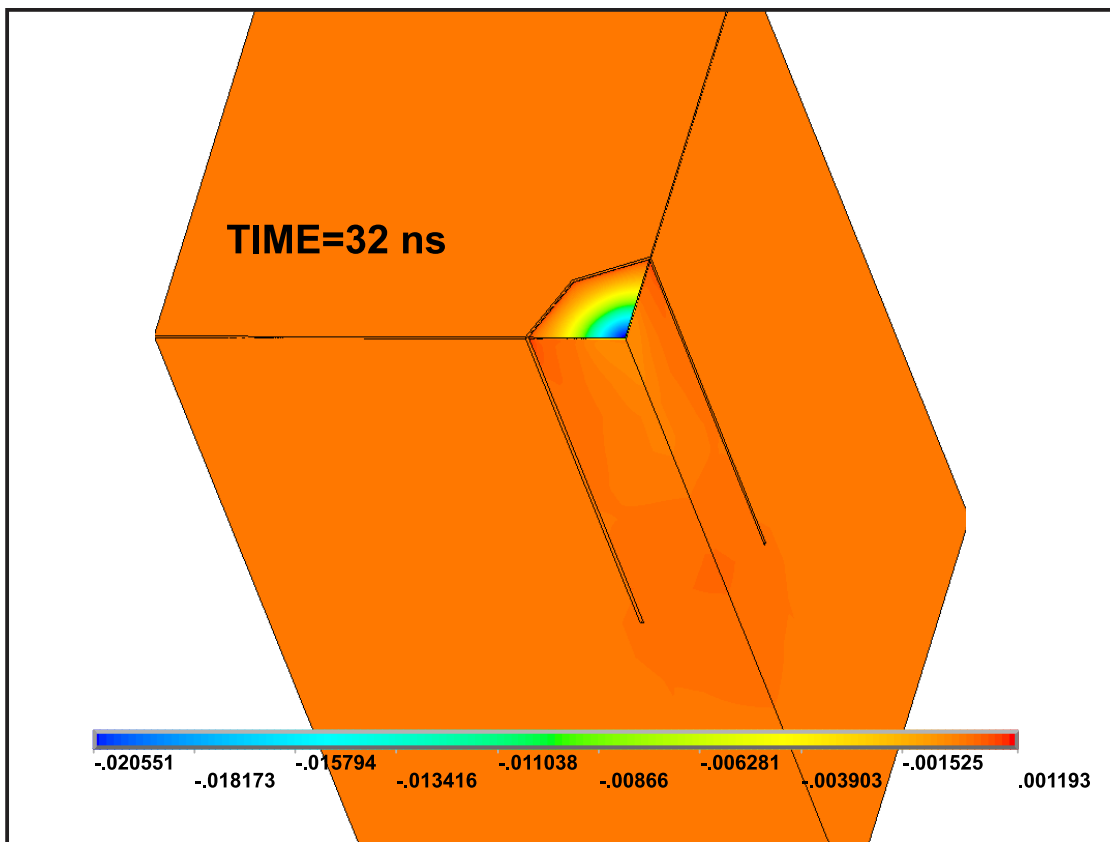
Σχήμα 5.56 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=16 \text{ ns}$.



Σχήμα 5.57 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=20 \text{ ns}$.



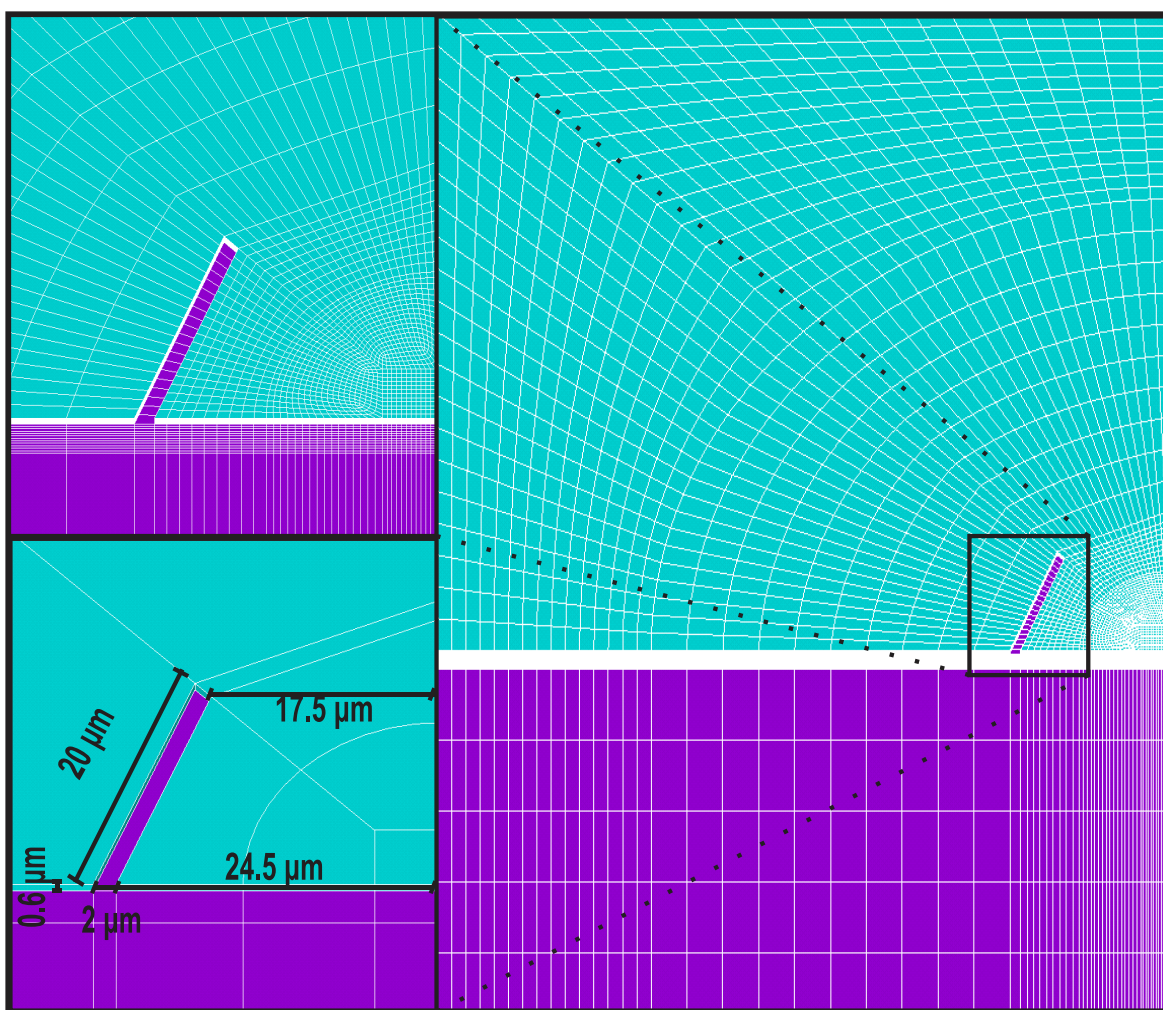
Σχήμα 5.58 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=26$ ns.



Σχήμα 5.59 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα αυτά με αντίστοιχα αποτελέσματα για τις περιπτώσεις κλειστής γεωμετρίας gap C1-C6, δε γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη ή διάδοση υπερήχου.

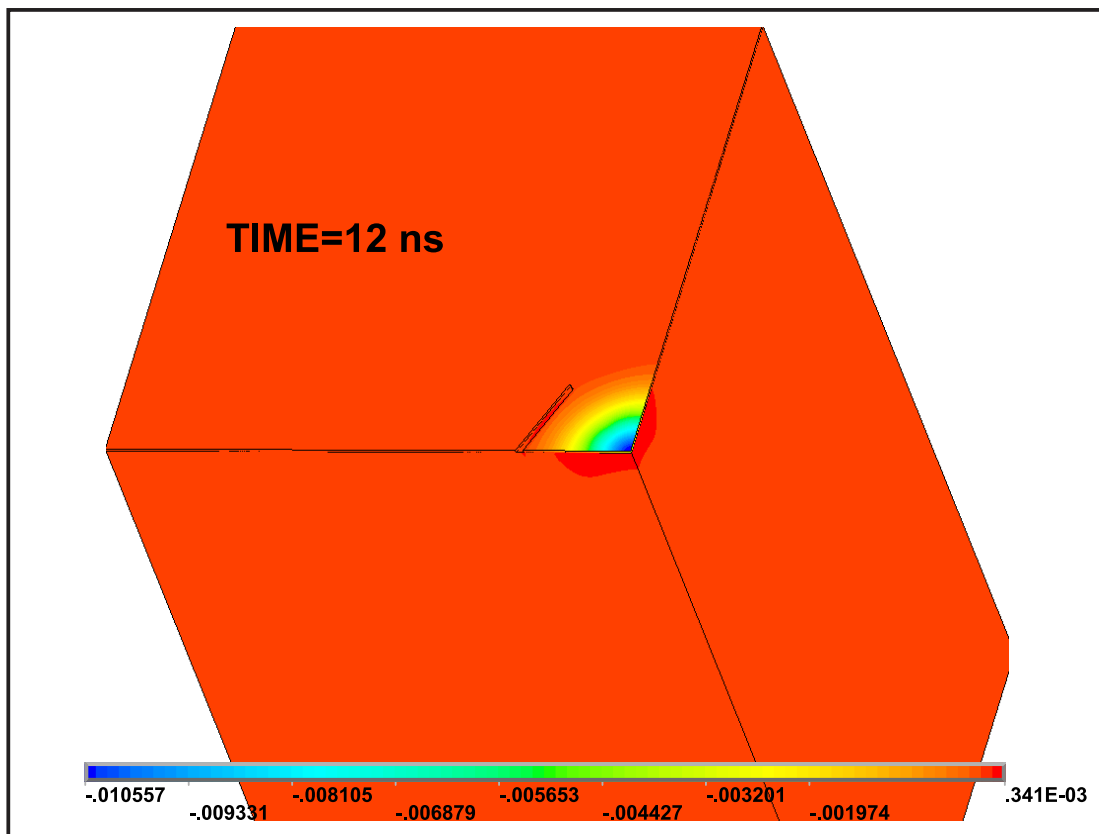
5.2.9 C9

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή αυτού του κεφαλαίου, η έρευνα μας εστιάζεται στην τροποποίηση της γεωμετρίας του gar για τρεις διαφορετικές παραμέτρους, το βάθος, το μήκος και το πλάτος. Στις επόμενες δύο περιπτώσεις μελέτης εξετάζεται η μεταβολή του πλάτους του gar ανοικτής γεωμετρίας, για σταθερό μήκος και βάθος. Αρχικά στη περίπτωση μελέτης C9 διπλασιάζεται σε 2 μm και μετά στη περίπτωση μελέτης C10 τριπλασιάζεται σε 3 μm . Το βάθος του επεκτείνεται σε όλο το πάχος του χρυσού, ενώ το μήκος του είναι 20 μm . Στο παρακάτω Σχήμα 5.60 φαίνεται η θέση και γεωμετρία του στο δοκίμιο.

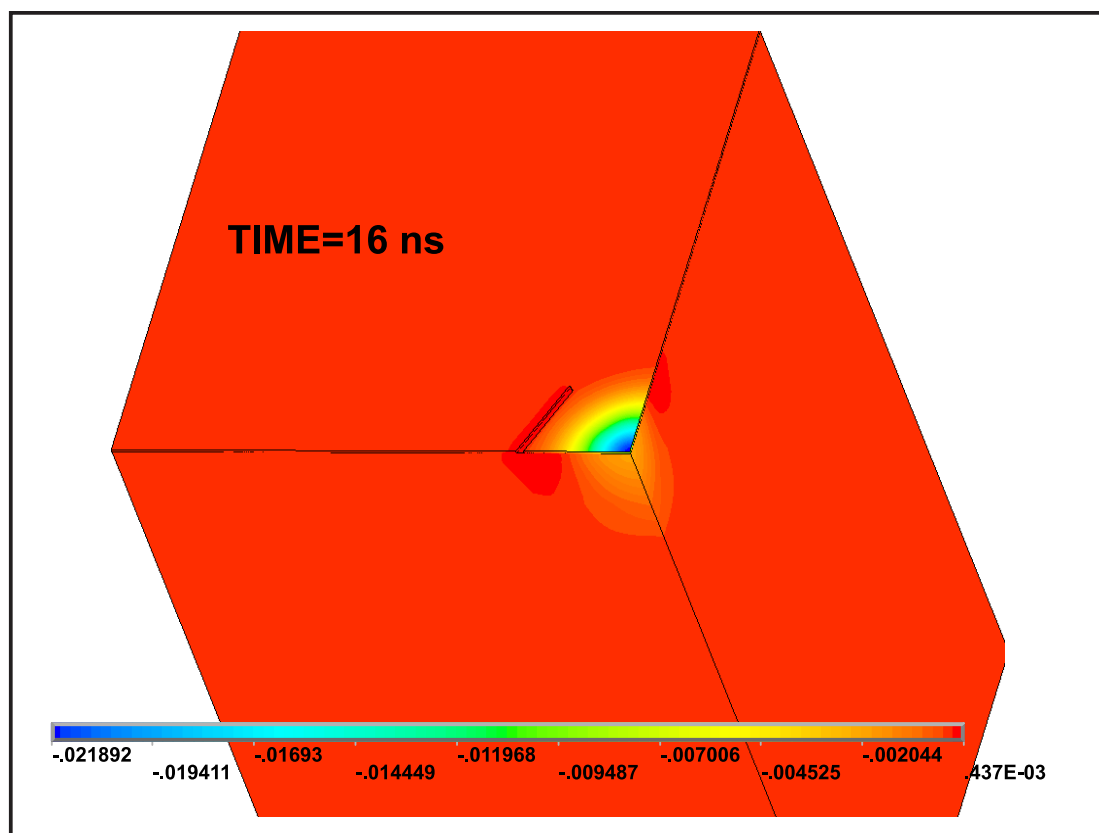


Σχήμα 5.60 Απεικόνιση της θέσης του gar στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

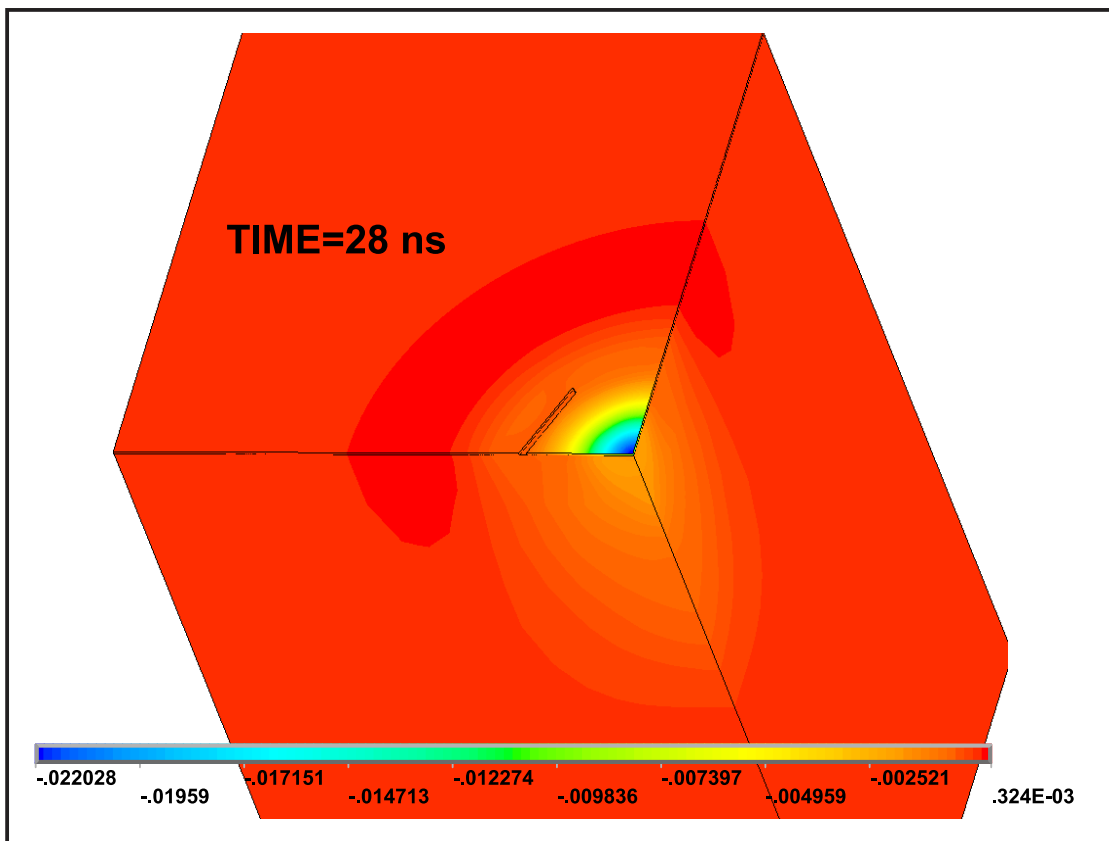
Στα Σχήματα 5.61-5.64 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δοκιμίου με gar και η δημιουργία και διάδοση ακουστικών κυμάτων.



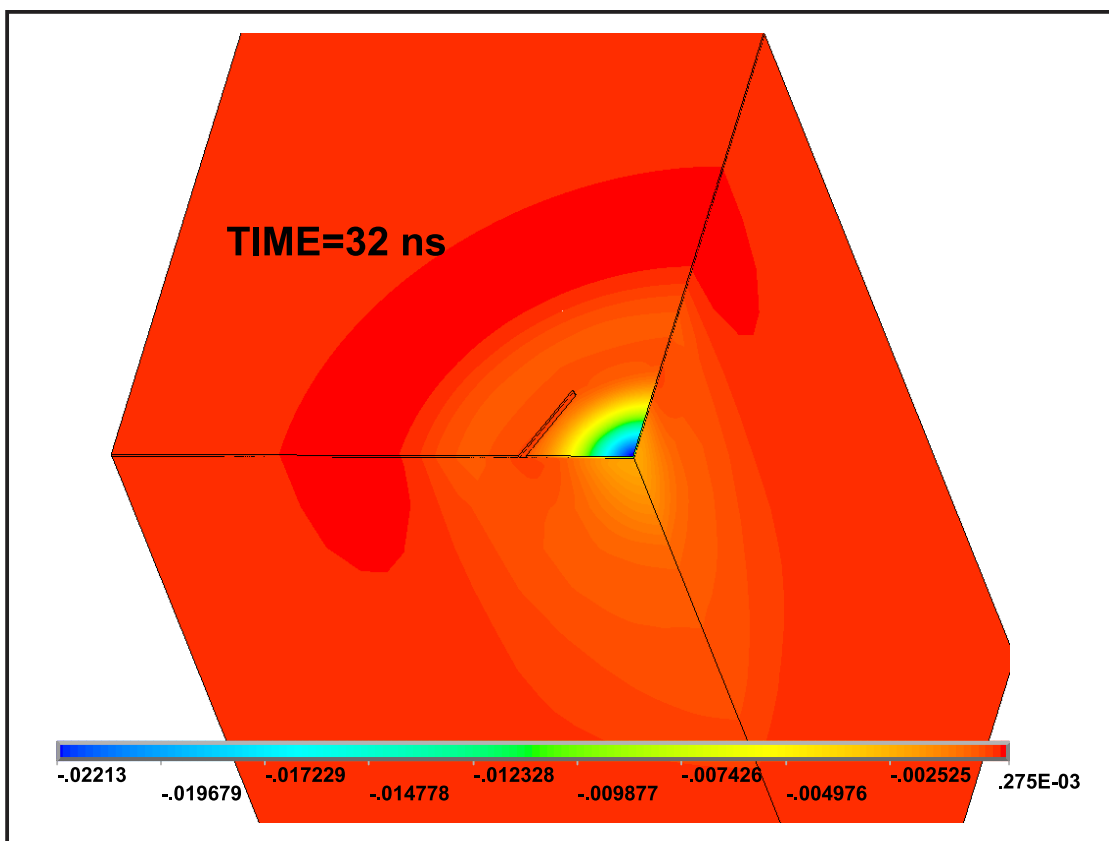
Σχήμα 5.61 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=12$ ns.



Σχήμα 5.62 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=16$ ns.



Σχήμα 5.63 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=28$ ns.

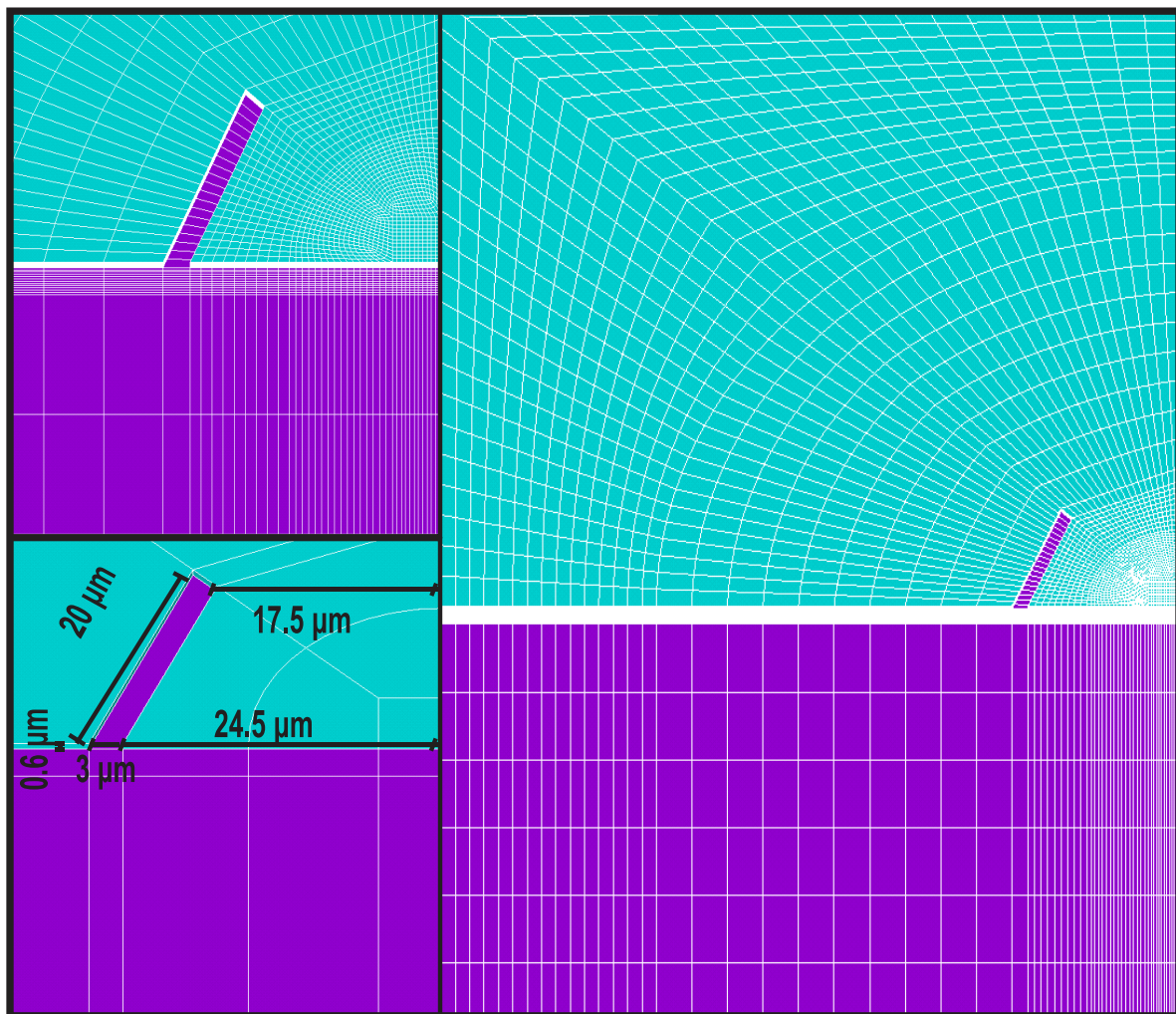


Σχήμα 5.64 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns.

Στο Σχήμα 5.61 για χρονική στιγμή 12 ns μετά την ακτινοβόληση του δείγματος δεν παρατηρείται να περνάει ο υπέρηχος από το gap. Τη χρονική στιγμή 16 ns (Σχήμα 5.62) ο υπέρηχος παρατηρείται να περνάει το gap, ενώ στα Σχήματα 5.63, 5.64 φαίνεται η διάδοση του υπερήχου αφού έχει περάσει από την ατέλεια, στις χρονικές στιγμές $\Delta t=28$ και 32 ns αντίστοιχα. Η μηχανική συμπεριφορά του δείγματος με gap που ακτινοβολείται είναι παρόμοια με αυτή των περιπτώσεων μελέτης C1-C2.

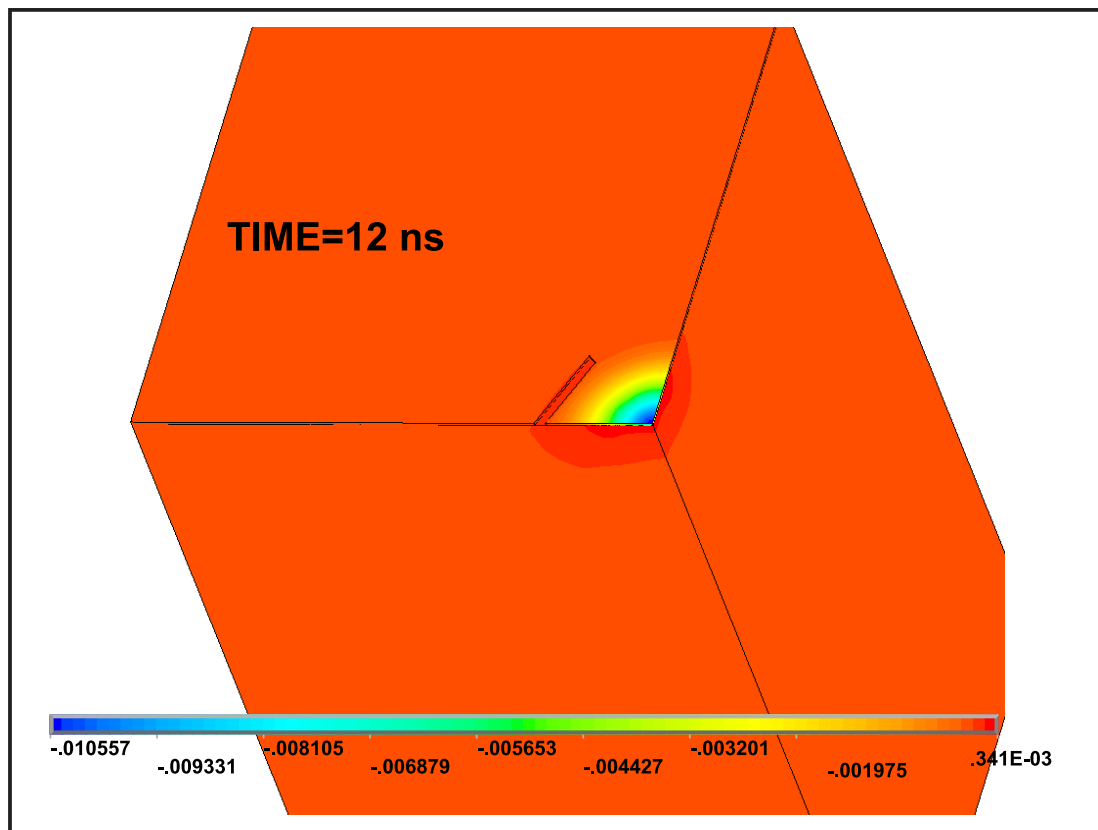
5.2.10 C10

Η περίπτωση αυτή μελέτης αφορά στον τριπλασιασμό του πλάτους του κενού σε 3 μm . Στο παρακάτω Σχήμα 5.65 φαίνεται η θέση και γεωμετρία του κενού στο δοκίμιο.

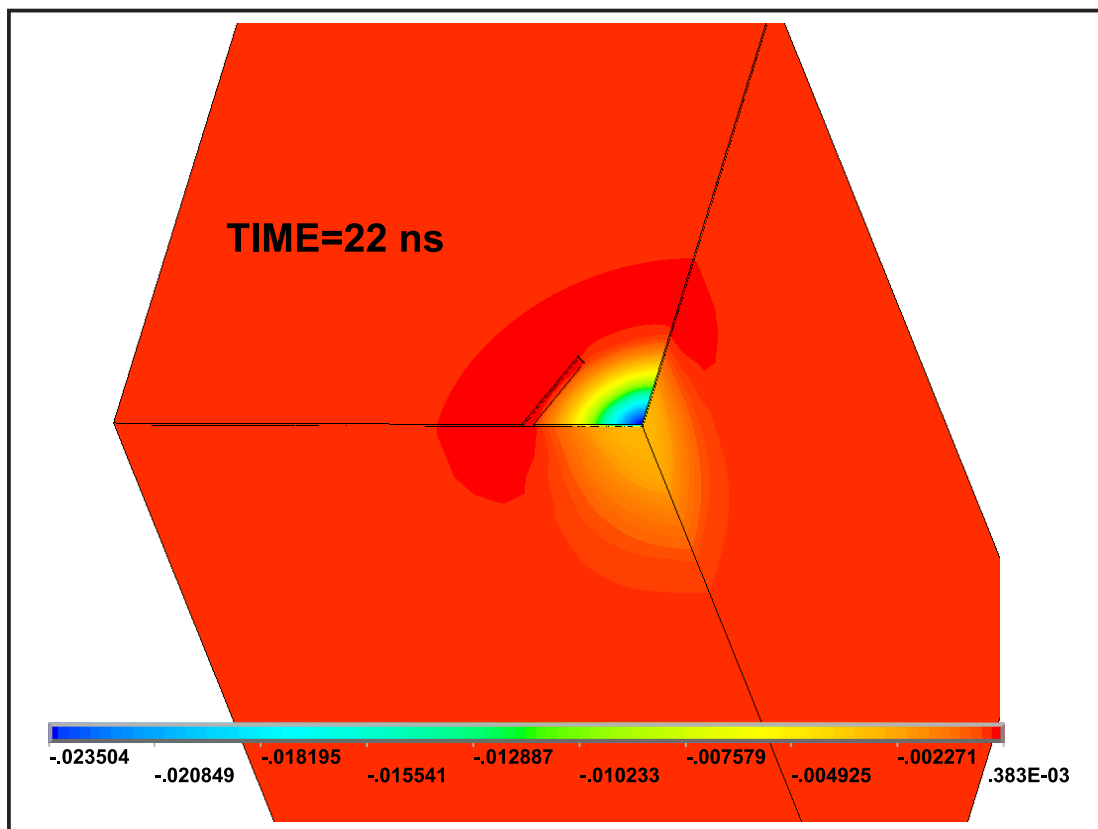


Σχήμα 5.65 Απεικόνιση της θέσης του gap στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

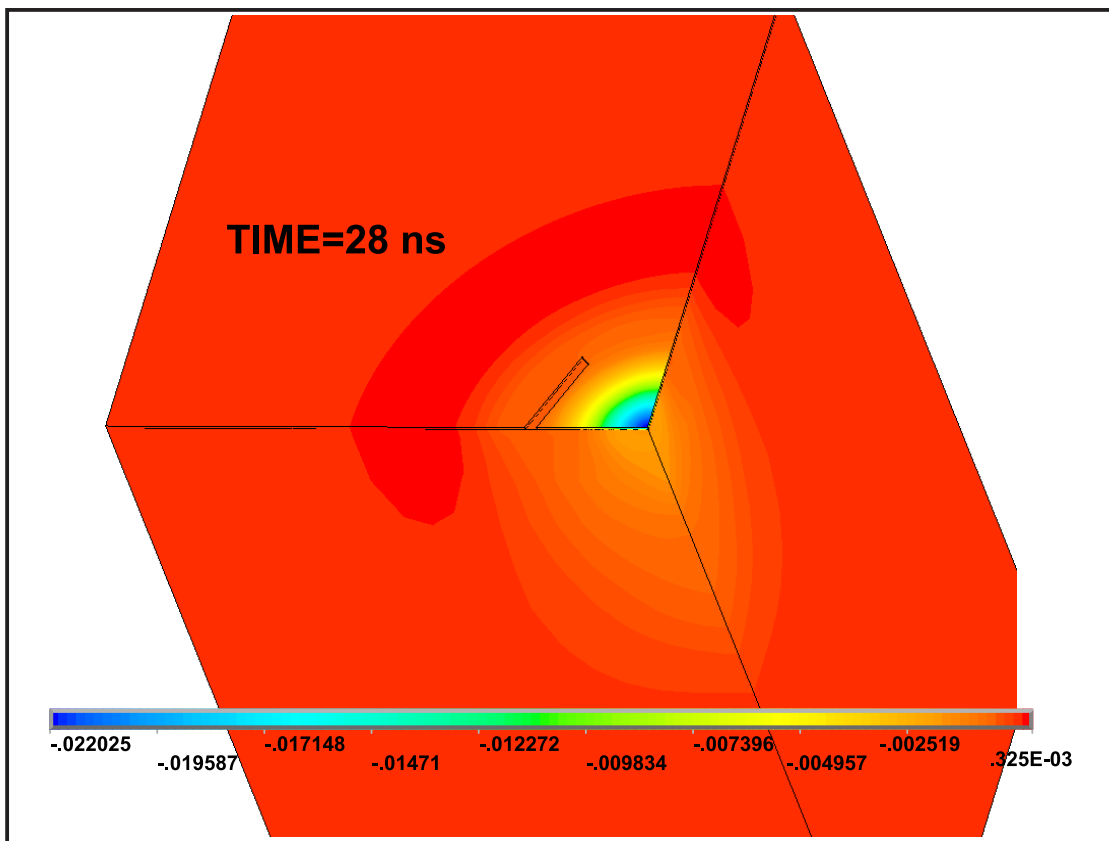
Στα Σχήματα 5.66-5.69 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δοκιμίου με gap και η δημιουργία και διάδοση ακουστικών κυμάτων.



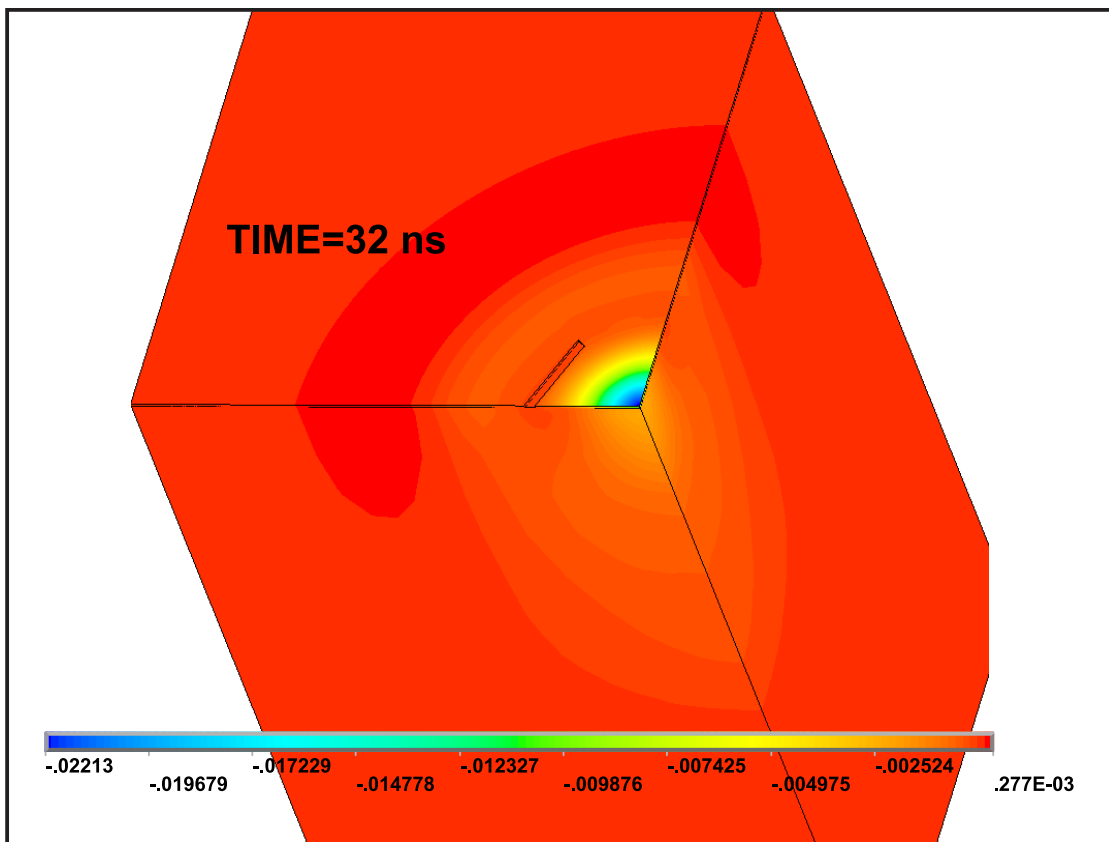
Σχήμα 5.66 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=12$ ns.



Σχήμα 5.67 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=22$ ns.



Σχήμα 5.68 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=28$ ns.

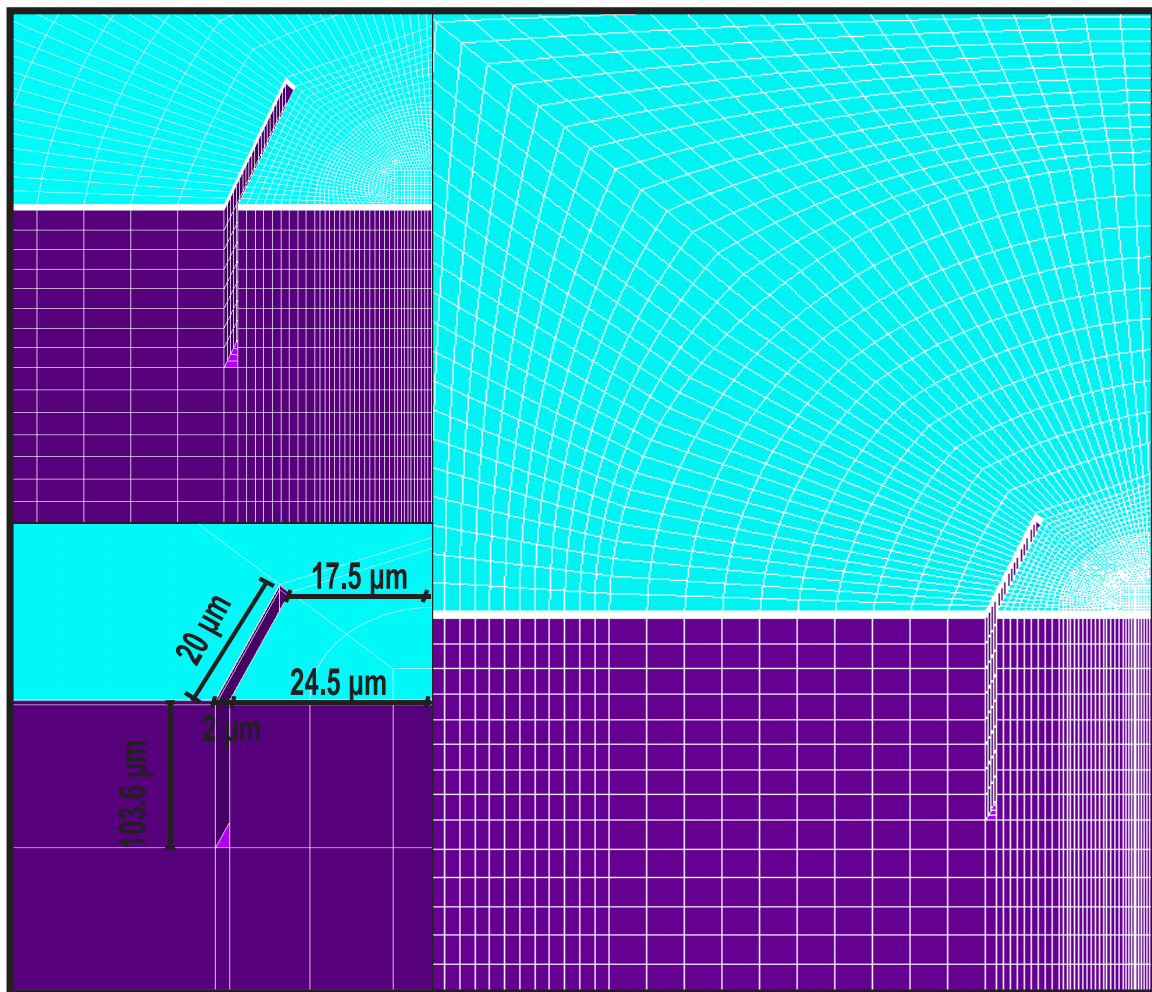


Σχήμα 5.69 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns.

Στο Σχήμα 5.66 για χρονική στιγμή 12 ns μετά την ακτινοβόληση του δείγματος, δεν παρατηρείται να περνάει ο υπέρηχος από το gap. Τη χρονική στιγμή 22 ns (Σχήμα 5.67) ο υπέρηχος παρατηρείται να περνάει το gap, ενώ στα Σχήματα 5.68, 5.69 φαίνεται η διάδοση του υπερήχου αφού έχει περάσει από την ατέλεια, στις χρονικές στιγμές $\Delta t=28$ και 32 ns αντίστοιχα. Η μηχανική συμπεριφορά του δείγματος με gap που ακτινοβολείται είναι παρόμοια με αυτή των περιπτώσεων μελέτης C1-C2 και C9. Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει ότι το αυξανόμενο πλάτος δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη διάδοση των SAWs.

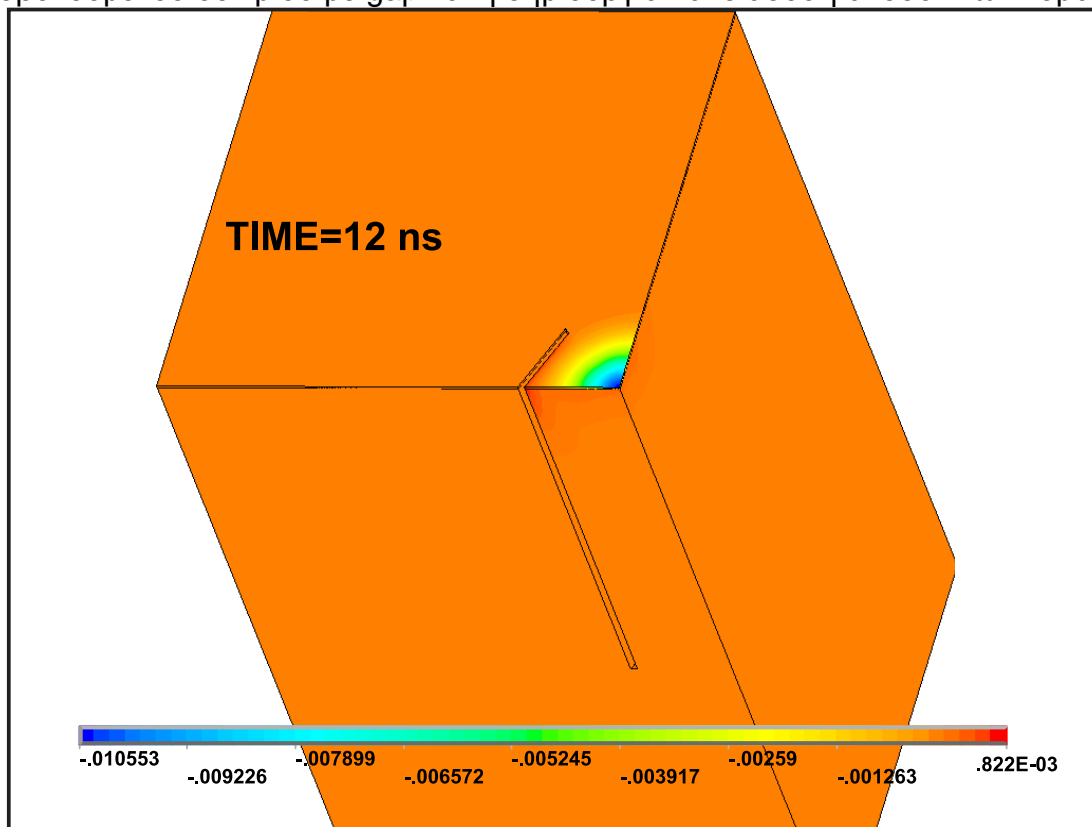
5.2.11 C11

Τέλος θα εξετασθεί ο συνδυασμός μεταβολής του πλάτους και του βάθους που έχει το gap. Έτσι ο συγκεκριμένος τύπος κενού-gap έχει πλάτος 2 μm , μήκος 20 μm και βάθος που επεκτείνεται στο μισό πάχος του γυαλιού. Στο παρακάτω Σχήμα 5.70 φαίνεται η θέση και γεωμετρία του κενού στο δοκίμιο.

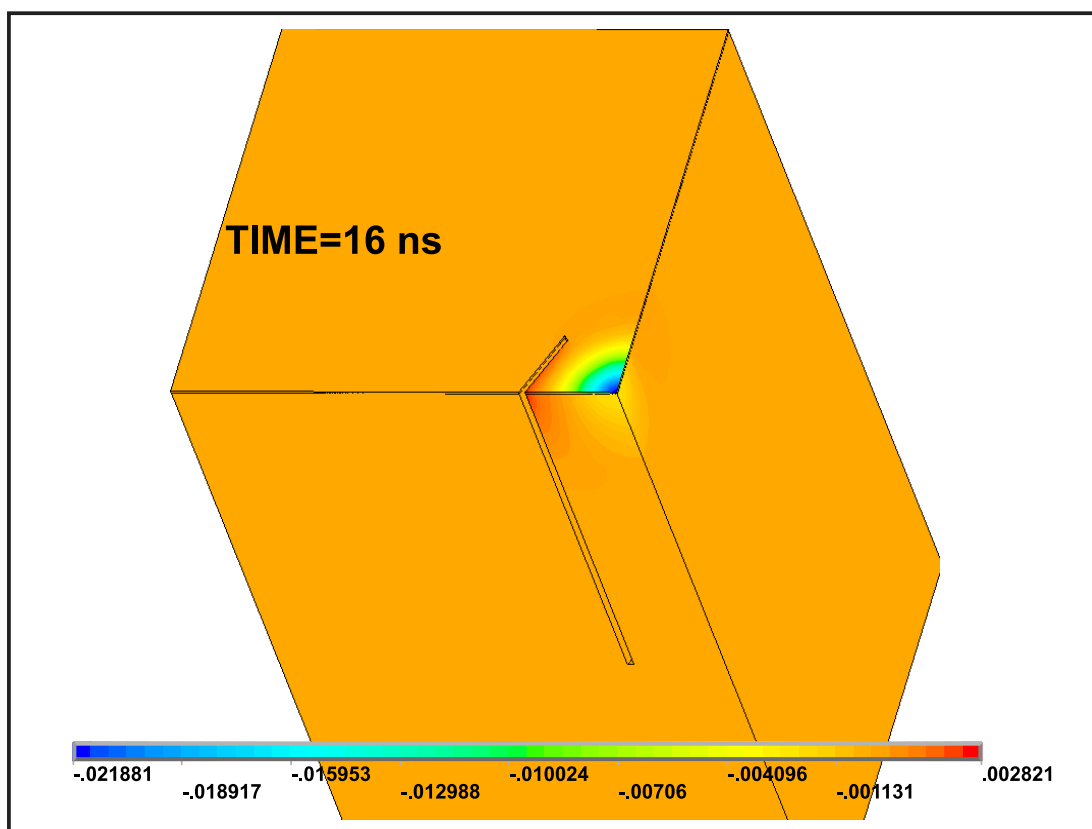


Σχήμα 5.70 Απεικόνιση της θέσης του gap στο δοκίμιο και της γεωμετρίας του.

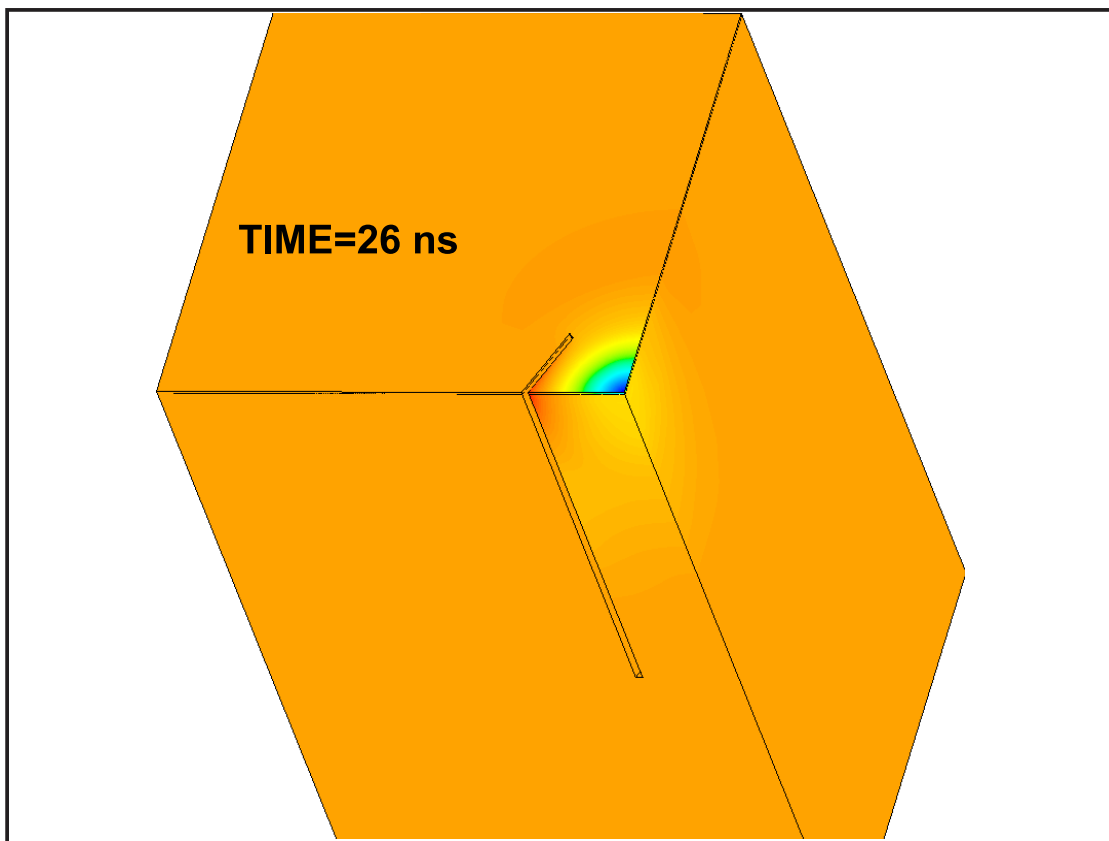
Στα Σχήματα 5.71-5.74 απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του πεδίου μετατοπίσεων του ακτινοβολούμενου δοκιμίου με gap και η δημιουργία και διάδοση ακουστικών κυμάτων.



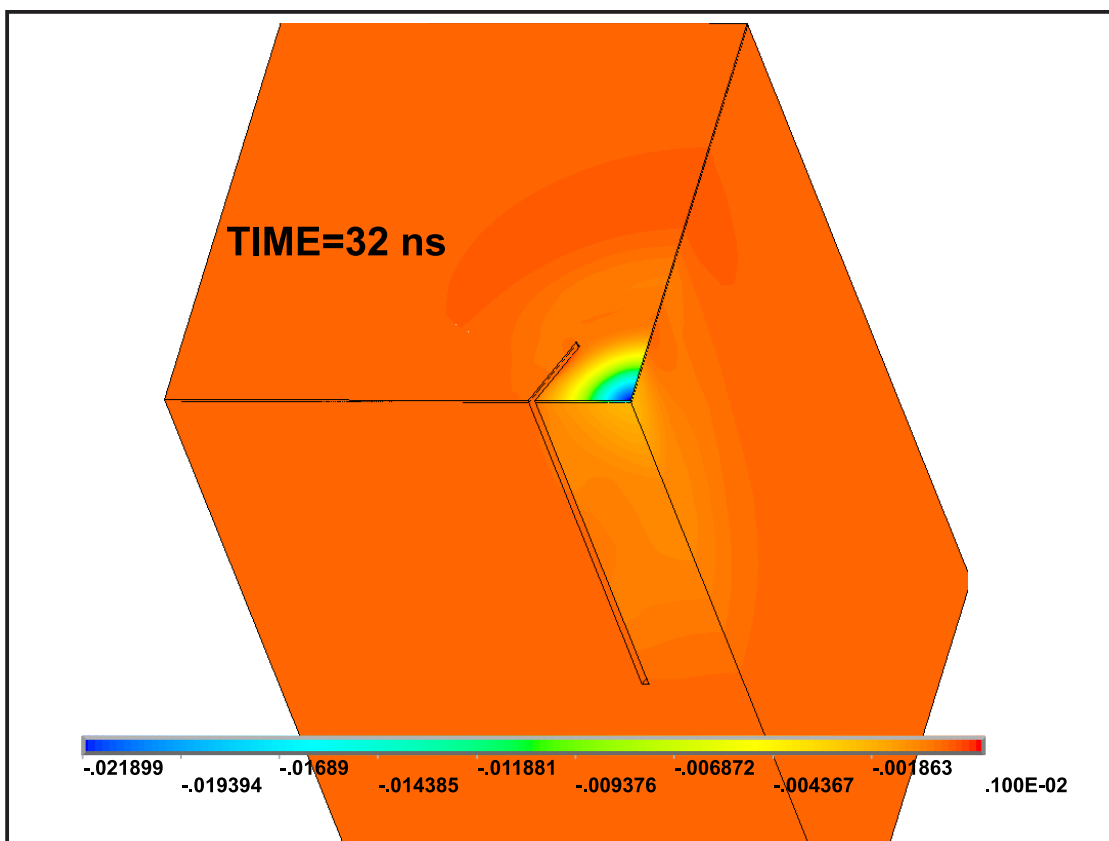
Σχήμα 5.71 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t = 12$ ns.



Σχήμα 5.72 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t = 16$ ns.



Σχήμα 5.73 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=26$ ns.

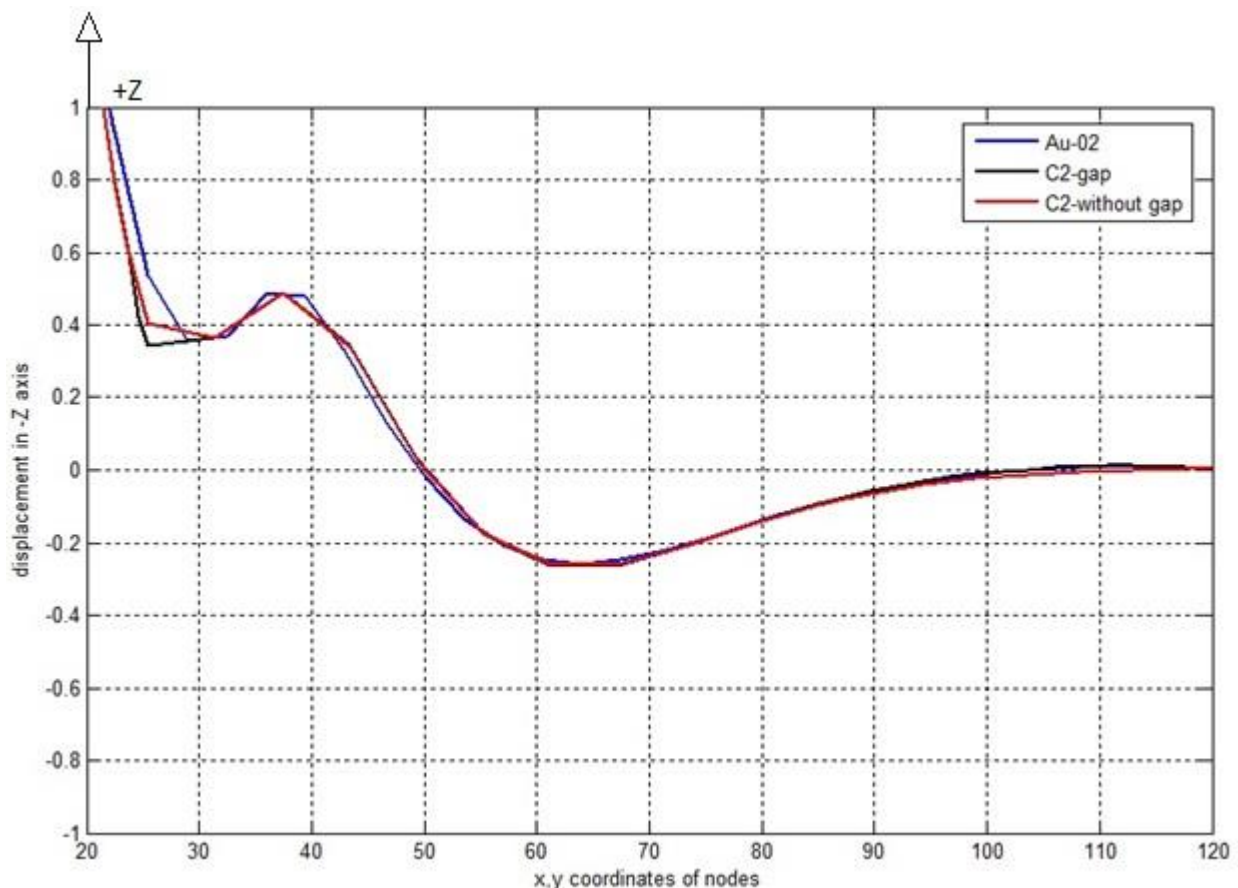


Σχήμα 5.74 Εγκάρσια μετατόπιση στον -Z άξονα (μm) την χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns.

Στο Σχήμα 5.71 για χρονική στιγμή 12 ns μετά την ακτινοβολήση του δείγματος παρατηρείται ότι δεν έχει περάσει ο υπέρηχος από το gap. Έπειτα στο Σχήμα 5.72 τείνει να περάσει την ατέλεια, ενώ στα Σχήματα 5.73-5.74 φαίνεται η διάδοση του υπερήχου αφού έχει περάσει από την ατέλεια, στις χρονικές στιγμές $\Delta t=26$ και 32 ns αντίστοιχα. Παρατηρώντας το πεδίο μετατοπίσεων στα Σχήματα 5.71-5.74 γίνεται αντιληπτή η σημαντική επίδραση του gap στη διάδοση του υπερήχου. Συγκρινόμενη η περίπτωση αυτή μελέτης σε σχέση με τις περιπτώσεις C1-C2 και C9-C10 παρατηρείται ότι μικρότερο ποσοστό του υπέρηχου διέρχεται από το gap, καθώς υπάρχουν μεγαλύτερες ανακλάσεις, ενώ γίνεται αντιληπτό ότι η επέκταση του gap στο γυαλί επηρεάζει πολύ τη διάδοση των SAWs. Η μηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου με ατέλεια C11, που ακτινοβολείται από παλμικό laser, είναι παρόμοια με αυτή των περιπτώσεων C3-C6.

5.2.12 Σύγκριση αποτελεσμάτων διαφορετικών περιπτώσεων μελέτης με ατέλεια

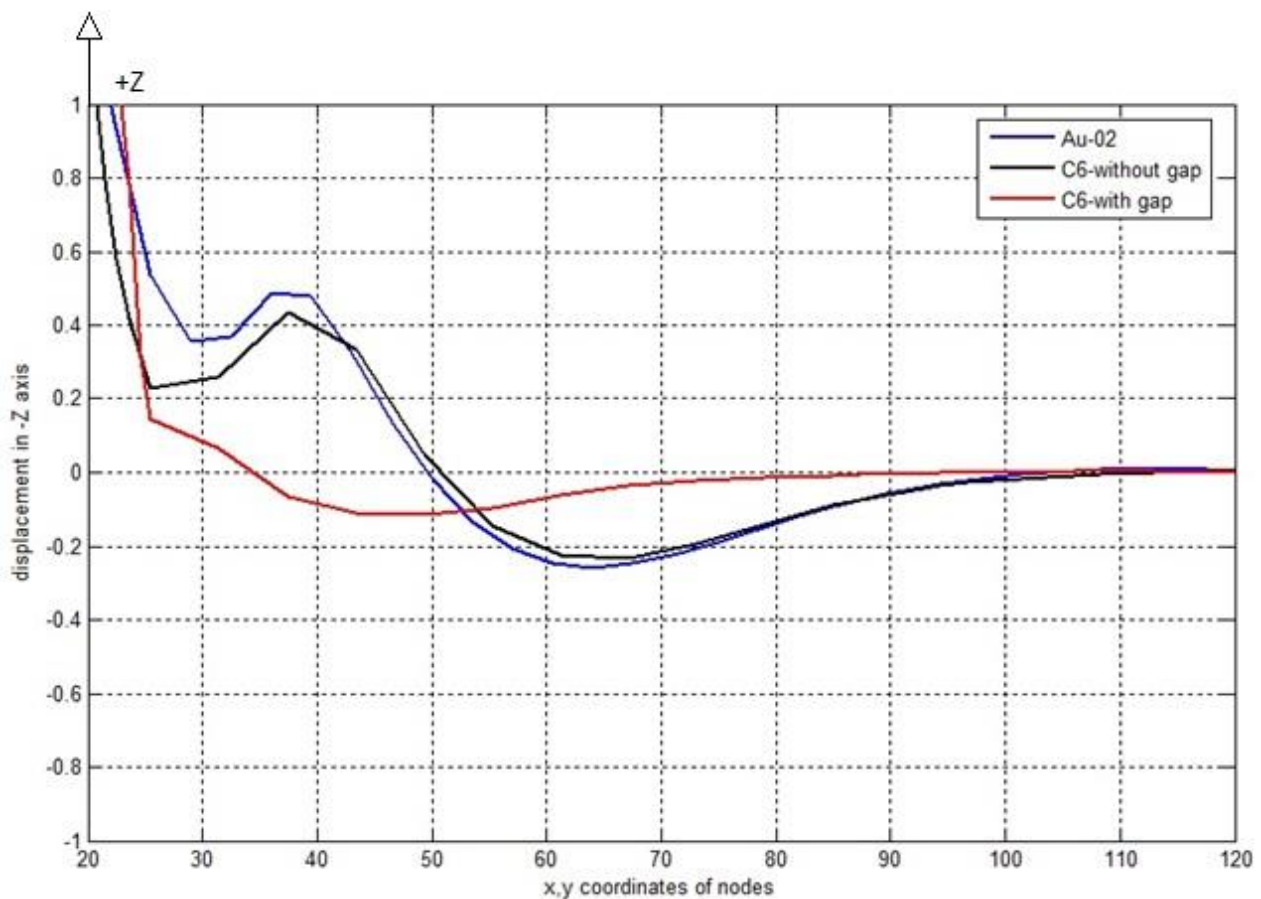
Στη συνέχεια παρατίθεται στο Σχήμα 5.75 η γραφική παράσταση εγκάρσιας μετατόπισης στον $-Z$ άξονα συναρτήσει της ακτινικής απόστασης από το επίκεντρο για την περίπτωση μελέτης με ατέλεια C2. Η καμπύλη C2-gap αναφέρεται στην ακτινική απόσταση των επιφανειακών κόμβων για τους οποίους οι συντεταγμένες είναι $Z=0$ και $Y=0$ και $0 \leq X \leq 120$ μm (πλευρά όπου υπάρχει η ατέλεια), ενώ η καμπύλη C2-without gap αναφέρεται σε επιφανειακούς κόμβους για τους οποίους οι συντεταγμένες είναι $Z=0$ και $X=0$ και $0 \leq Y \leq 120$ μm (πλευρά χωρίς ατέλεια). Οι καμπύλες απεικονίζονται σε σχέση με την καμπύλη του Au-02 όπου δεν υπάρχει gap (τέλειο δείγμα). Και οι τρεις αναφέρονται στη χρονική στιγμή $\Delta t=32$ ns.



Σχήμα 5.75 Εγκάρσια μετατόπιση (nm) στον $-Z$ άξονα συναρτήσει της ακτινικής απόστασης (μm) από το επίκεντρο.

Συγκρίνοντας την περίπτωση Au-02 με την περίπτωση C2 παρατηρούνται ελάχιστες μεταβολές στη δημιουργία και διάδοση των υπερήχων. Παρόμοια συμπεριφορά με τη C2 παρατηρείται και για τις περιπτώσεις C1, C7, C9 και C10. Κοινό χαρακτηριστικό των πέντε αυτών περιπτώσεων ότι το βάθος του gap δεν επεκτείνεται στο γυαλί.

Στο Σχήμα 5.76 παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις εγκάρσιας μετατόπισης στον $-Z$ άξονα συναρτήσει της ακτινικής απόστασης από το επίκεντρο για την περίπτωση μελέτης με ατέλεια C6. Η γραφική παράσταση C6-gap αναφέρεται στην ακτινική απόσταση των επιφανειακών κόμβων για τους οποίους οι συντεταγμένες είναι $Z=0$ και $Y=0$ και $X=0, \dots, 120 \mu\text{m}$ (πλευρά όπου υπάρχει η ατέλεια, ενώ η γραφική παράσταση C6-without gap αναφέρεται σε επιφανειακούς κόμβους για τους οποίους οι συντεταγμένες είναι $Z=0$ και $X=0$ και $Y=0, \dots, 120 \mu\text{m}$ (πλευρά χωρίς ατέλεια). Οι γραφικές αυτές παραστάσεις συγκρίνονται με την Au-02 περίπτωση μελέτης όπου δεν υπάρχει gap. Και οι τρεις αυτές γραφικές αναφέρονται στη χρονική στιγμή 32 ns.

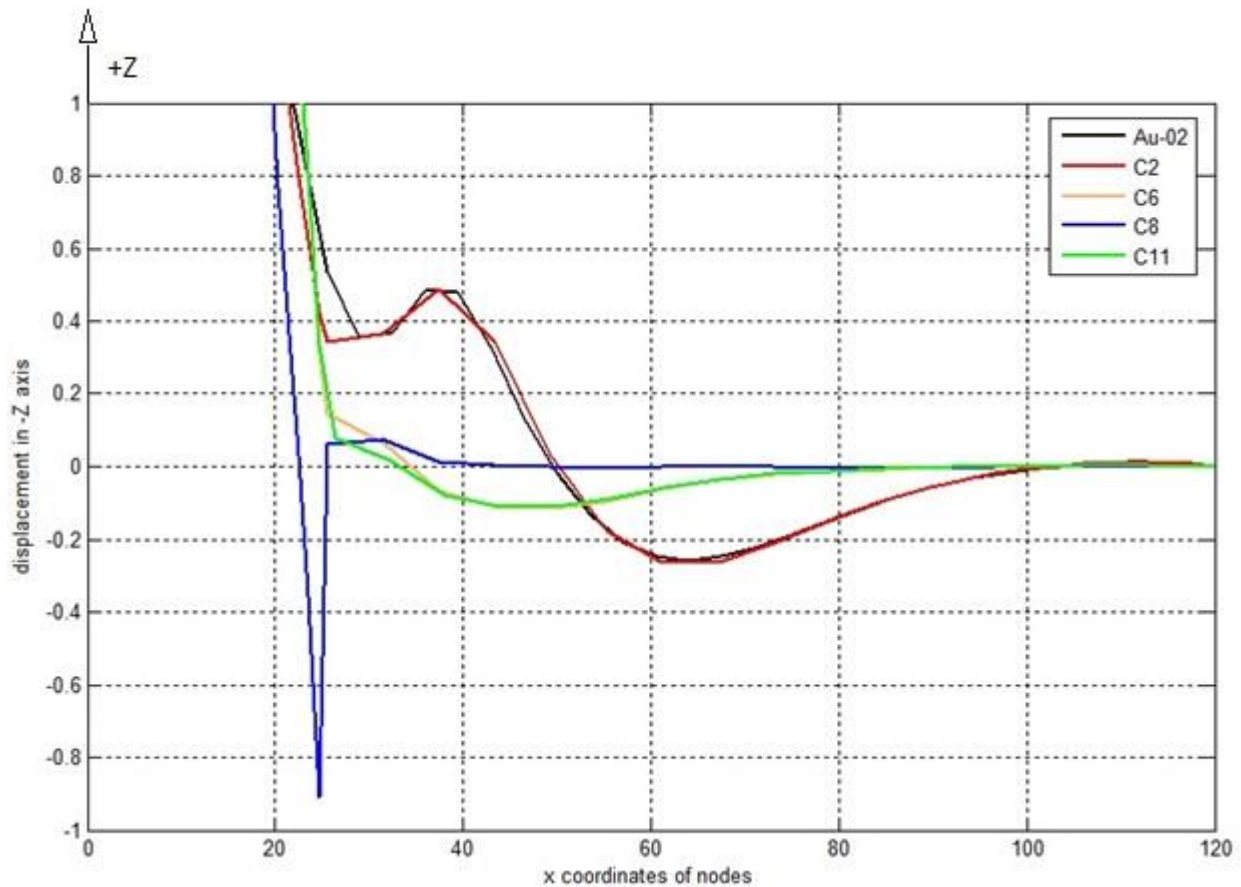


Σχήμα 5.76 Εγκάρσια μετατόπιση (nm) στον $-Z$ άξονα συναρτήσει της ακτινικής απόστασης (μm) από το επίκεντρο.

Συγκρίνοντας την περίπτωση Au-02 με τη γραφική για την περίπτωση C6-without gap παρατηρείται μείωση των μετατοπίσεων για τη δεύτερη περίπτωση. Συγκρίνοντας τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις με τη γραφική C6-gap, παρατηρείται ότι η ατέλεια επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη διάδοση των υπερήχων, μειώνοντας τις μετατοπίσεις σε μεγάλο βαθμό και παράλληλα επιβραδύνοντας το φαινόμενο δημιουργίας και διάδοσης υπερήχου. Για αυτή παρατηρείται ένας υπέρηχος, ενώ στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις αρχίζει να σχηματίζεται και ο δεύτερος. Παρόμοια συμπεριφορά με τη C2 παρατηρείται και για τις περιπτώσεις C3, C4, C5 και C11. Κοινό χαρακτηριστικό των πέντε αυτών περιπτώσεων ότι το βάθος του gap επεκτείνεται στο γυαλί.

Τέλος, στο Σχήμα 5.77, παρατίθενται γραφικές παραστάσεις εγκάρσιας μετατόπισης στον $-Z$ άξονα συναρτήσει της ακτινικής απόστασης από το επίκεντρο για διαφορετικές περιπτώσεις μελέτης με ατέλειες. Η ακτινική απόσταση αναφέρεται στην απόσταση των επιφανειακών κόμβων για τους οποίους οι συντεταγμένες είναι $Z=0$ και $Y=0$ και

$X=0, \dots, 120$ μm από το επίκεντρο (πλευρά με ατέλεια). Οι γραφικές αυτές παραστάσεις συγκρίνονται με την Au-02 περίπτωση μελέτης όπου δεν υπάρχει gap. Όλες οι γραφικές αναφέρονται στη χρονική στιγμή 32 ns.



Σχήμα 5.77 Εγκάρσια μετατόπιση (nm) στον $-Z$ άξονα συναρτήσει της ακτινικής απόστασης (μm) από το επίκεντρο.

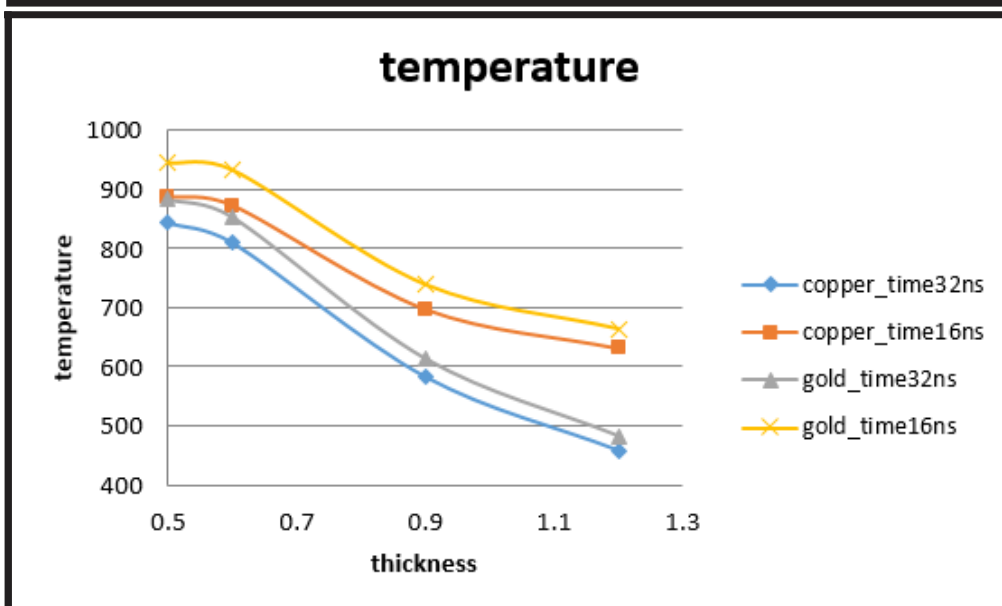
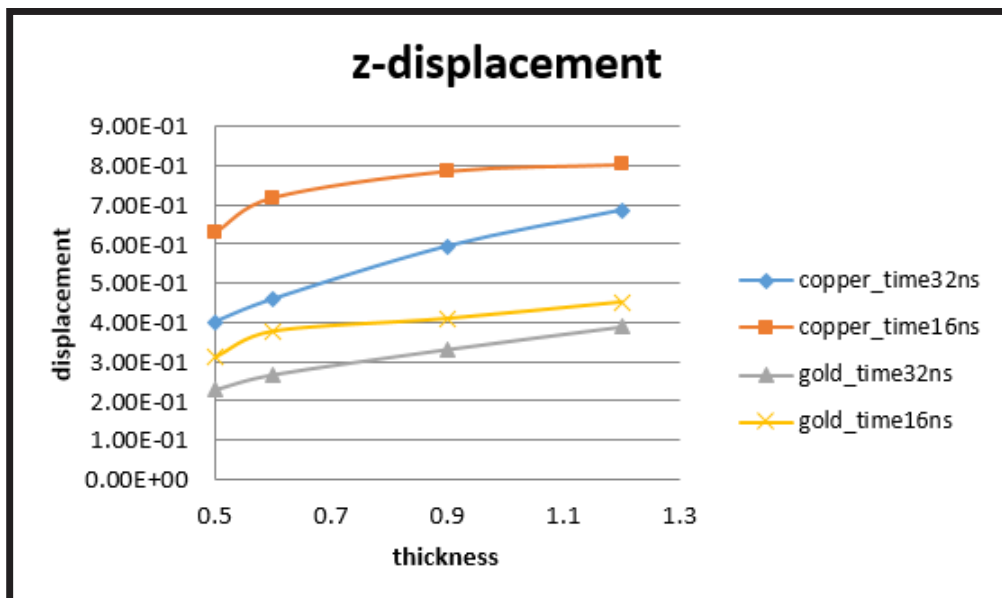
Όπως προαναφέρθηκε και στις προηγούμενες δύο γραφικές παραστάσεις, η περίπτωση μελέτης με ατέλεια C2 έχει ελάχιστες διαφορές στις τιμές της μετατόπισης σε σχέση με την περίπτωση Au-02 όπου δεν υπάρχει gap. Για τις περιπτώσεις μελέτης C6, C11 οι μετατοπίσεις μειώνονται σε μεγάλο βαθμό και παράλληλα επιβραδύνεται το φαινόμενο δημιουργίας και διάδοσης υπερήχου σε σχέση με την περίπτωση Au-02 όπου δεν υπάρχει gap. Τέλος, για την περίπτωση μελέτης C8 δεν παρατηρείται δημιουργία και διάδοση υπερήχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία βασίστηκε σε μοντέλο αναφοράς πεπερασμένων στοιχείων για τη διερεύνηση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς μεταλλικών δειγμάτων με ατέλειες ακτινοβολούμενες από παλμούς laser με τη χρήση προσομοιώσεων. Αρχικά αναλύθηκε η φιλοσοφία των ΜΚΕ και περιγράφηκε η τεχνολογία των λεπτών υμενίων σε σχέση με την αλληλεπίδραση των laser με την ύλη. Καταγράφηκαν τα είδη ατελειών σε δείγματα και τα gaps/cracks επιλέχθηκαν ως τα κρίσιμότερα για μελέτη. Παρουσιάστηκε το μοντέλο αναφοράς πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. Ε. Κασελούρη και χρησιμοποιήθηκε για τους ερευνητικούς σκοπούς της διατριβής.

Αρχικά διερευνήθηκε η επιρροή του πάχους του μεταλλικού φιλμ σε υπόστρωμα γυαλιού, το οποίο ακτινοβολείται από παλμικό laser διάρκειας ns, στη θερμομηχανική συμπεριφορά του υλικού. Για το σκοπό αυτό τροποποιήθηκε το μοντέλο αναφοράς πεπερασμένων στοιχείων κατάλληλα. Μελετήθηκαν μεταλλικά φιλμ Χρυσού και Χαλκού, ενώ το υπόστρωμα, κοινό και για τα δύο δείγματα, είχε τις θερμομηχανικές ιδιότητες γυαλιού -BK7. Ποιοτικά και για τα δύο υλικά, χρυσό και χαλκό, η θερμομηχανική συμπεριφορά του δοκιμίου που ακτινοβολείται είναι παρόμοια. Το αναμενόμενο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι όσο αυξάνεται το πάχος του φιλμ τόσο μειώνονται οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στο δοκίμιο, ενώ όσο αυξάνεται το πάχος τόσο αυξάνονται και οι εγκάρσιες μετατοπίσεις στον Z-άξονα, συνεπώς το πλάτος των αναπτυσσόμενων υπέρηχων. Ποσοτικά οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στο Χρυσό είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στο Χαλκό λόγω των διαφορετικών θερμομηχανικών ιδιοτήτων των δύο μετάλλων. Όσον αφορά τις μετατοπίσεις στον άξονα Z, καταγράφονται μεγαλύτερες τιμές στο μοντέλο με τον Χαλκό παρά στο μοντέλο με τον Χρυσό. Παρακάτω παρουσιάζεται γραφική παράσταση μετατοπίσεων και θερμοκρασιών για Χρυσό και Χαλκό σε δύο χρονικές στιγμές για τα τέσσερα πάχη που αναλύθηκαν.



Γραφική παράσταση Μέγιστες τιμές εγκάρσιας μετατόπισης στον Z-άξονα για χρυσό και χαλκό για μεταβλητό πάχος τις χρονικές στιγμές $\Delta t=16, 32\text{ns}$ και Μέγιστες τιμές θερμοκρασίας για μεταβλητό πάχος σε χρυσό και χαλκό τις χρονικές στιγμές $\Delta t=16, 32\text{ns}$.

Από το μοντέλο αναφοράς με φιλμ Χρυσού, αφαιρέθηκε υλικό, προκειμένου να κατασκευαστεί γεωμετρία ατέλειας –gap/crack στο δοκίμιο που ακτινοβολείται. Μεταβάλλοντας τη γεωμετρία της ατέλειας, εξετάστηκε η επιρροή της μορφής και του μεγέθους στη μετάδοση των SAWs. Τα διαφορετικά είδη ατελειών διαφέρουν σε πάχος, ύψος και πλάτος. Συνολικά μελετήθηκαν 11 περιπτώσεις ατελειών, εκ των οποίων εννέα ανοικτής και δύο κλειστής γεωμετρίας.

Βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι στις περιπτώσεις μελέτης C1, C2, C7, C9, C10 όπου το βάθος του gap/crack επεκτείνεται μόνο στο χρυσό, η επιρροή των ατελειών στη δημιουργία και διάδοση των SAWs είναι πολύ μικρή. Επιπρόσθετα, η αύξηση του πλάτους της ατέλειας επηρεάζει σε μικρό βαθμό τη δημιουργία και διάδοση των SAWs, όπως παρατηρήθηκε στις περιπτώσεις C9 και C10.

Η επέκταση του βάθους του gap στο πάχος του γυαλιού, επηρεάζει σημαντικά τη διάδοση των SAW's (βλ. C3-C6, C11). Λόγω των πολλαπλών ανακλάσεων που πραγματοποιούνται το μέρος του κύματος που διαδίδεται πέραν της ατέλειας είναι μικρότερο και οι πορευμένοι υπέρηχοι έχουν μικρότερο πλάτος. Συνεπώς η παρουσία του γυαλιού φαίνεται ότι διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση των SAWs. Για ατέλειες ανοικτής γεωμετρίας, βλ. C8, με βάθος που επεκτείνεται πέραν του $\frac{1}{2}$ του πάχους του γυαλιού και με τις δεδομένες διαστάσεις δείγματος, παρεμποδίζεται η δημιουργία και διάδοση υπερήχων.

Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι γνωρίζοντας την επιρροή που ασκεί ένα άγνωστο gap στη διάδοση των υπερήχων μέσω πειραματικών μετρήσεων είναι δυνατόν βάση της έρευνας μας να το κατατάξουμε σε μια από τις περιπτώσεις μελέτης που εξετάστηκαν για το αν είναι επιφανειακό ή επεκτείνεται στο υπόστρωμα λόγω χάρη.

Βασική παρατήρηση είναι ότι στους αρχικούς χρόνους δημιουργίας υπερήχων, για τα gap ανοικτής γεωμετρίας, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να προσδώσουν σημαντικές πληροφορίες σε πειραματικές διαγνωστικές τεχνικές οι οποίες δεν έχουν τη δυνατότητα να καταγράψουν παρατηρούμενες ανομοιογένειες των υπερήχων στη περιοχή που βρίσκεται το gap.

Για περαιτέρω έρευνα, μελλοντικές προσομοιώσεις που θα καθοδηγούν πειραματικές μετρήσεις αλλά και αντίστροφα, δύναται να πραγματοποιηθούν για τη μελέτη της επίδρασης του βάθους, του πλάτους και του μήκους διαφορετικών ειδών ατελειών στην διάδοση των SAW's .

Βιβλιογραφία **B**

- [1] <http://aerialtesting.com/testing-services/aerial-device-testing/nondestructive-tests/52-ultrasonic-inspection> last accessed 24 May 2015
- [2] https://en.wikipedia.org/?title=Nondestructive_testing last accessed 24 May 2015.
- [3] <http://users.auth.gr/paloura/DIAFANEIES1.pdf> last accessed 19 June 2015.
- [4] http://www.physics.ntua.gr/pdf_doc_files/seminario_fysikhs_2011/zafyratou.pdf last accessed 19 June 2015.
- [5] Dewhurst, R.J., Edwards, C., Mckie, A.D.W. and Palmer, S.B., «Estimation of the thickness of thin metal sheet using laser-generated ultrasound» *Applied Physics Letters* 51, pp 1066–1068 (1987).
- [6] Scruby, C.E. and Drain, L.E. *Laser ultrasonics techniques and application* New York: Adam Hilger (1990).
- [7] Orphanos, Y., Dimitriou, V. Kaselouris, E., Brezas, S., Bakarezos, Tatarakis, M. , Vainos, N., and Papadogiannis, N. A. « 3D whole field representation of nano-acoustic waves in metallic and dielectric films using pulsed laser sources» *Acoustics* , pp AK 10_XX,(2012).
- [8] Vasilis Dimitriou , Evaggelos Kaselouris , Yannis Orphanos , Makis Bakarezos , Nikolaos Vainos , Ioannis K. Nikolos , Michael Tatarakis , Nektarios A. Papadogiannis «The thermo-mechanical behavior of thin metal films under nanosecond laser pulse excitation above the thermoelastic regime» *Appl. Phys. A* 118, pp 739–748 (2015).
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_acoustic_wave last accessed 19 May 2015.
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Thin_film last accessed 24 May 2015.
- [11] V. Dimitriou, E. Kaselouris, Y. Orphanos, M. Bakarezos, N. Vainos, M. Tatarakis, and N. A. Papadogiannis « Three dimensional transient behavior of thin films surface under pulsed laser excitation» *Applied Physics Letters* 103, pp. 114104 (2013).
- [12] <http://www.eolss.net/sample-chapters/c05/e6-36-04-01.pdf> last accessed 11 July 2015.
- [13] J.D. Achenbach, R.J. Brind, A. Norris, «Scattering by surface breaking and sub-surface cracks», *Proceedings, DARPA/AFML, Rev. Quant. NDE*, (1980).
- [14] J.D. Achenbach, A.N. Norris, «Interference of corner reflected and edge diffracted signals for a surface-breaking crack» *J. Acoust. Soc. Am.* 70 , pp 165–171 (1981).
- [15] H.S. Taun, C.M. Li, «Rayleigh wave reflection from groove and step discontinuities» *J. Acoust. Soc. Am.* 55 , pp 1212–1217(1974).

- [16] K. Kawasaki, T. Tanaka, «Analysis of propagation characteristic of Bleustein–Gulyaev waves at surface imperfections» Appl. Phys. Lett. 32, pp. 83–85, (1978).
- [17] R.A. Simons, «Reflection of Rayleigh waves by strips, grooves, and periodic array strips or grooves», J. Acoust. Soc. Am. 63 ,pp. 1292–1301 (1978).
- [18] G.S. Kino, «The application of reciprocity theory to scattering of acoustic waves by flaws», J. Appl. Phys. 49 , pp 3190–3199 (1978).
- [19] B.A. Auld, «General electromechanical reciprocity relations applied to the calculation of elastic wave scattering coefficients», Wave Motion 1 , pp 3–10 (1979).
- [20] M.T. Resch, «Non-destructive evaluation of small surface cracks using surface acoustic waves», Ph.D. dissertation, Stanford University, Stanford, CA, (1982).
- [21] M.T. Resch, D.V. Nelson, «An ultrasonic method for the measurement of size and opening behavior of small fatigue cracks», in: Small-Crack Test, ASTM STP, vol. 1149, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 169–196 (1992).
- [22] R.J. Blake, «Numerical models for Rayleigh wave scattering from surface features», Ph.D. dissertation, University College, London, (1988).
- [23] R.J. Blake, L.J. Bond, «A general model for Rayleigh wave scattering from surface features», in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 9, Plenum Press, New York, pp. 77–84 (1990).
- [24] R.J. Blake, L.J. Bond, «Rayleigh wave scattering from three dimensional surface slots and semi-circular depressions», in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 11, Plenum Press, New York, pp. 57–64 (1992).
- [25] M. Hirao, H. Fukukoa, «Scattering of Rayleigh surface waves by edge cracks: Numerical simulation and experiment», J. Acoust. Soc. Am. 72, pp 602–606 (1982).
- [26] S.W. Liu, S.K. Datta, A.H. Shah, «Transient scattering of Rayleigh–Lamb wave by surface-breaking and buried cracks in a plate», in: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 11, Plenum Press, New York, pp. 73–80 (1992).
- [27] I. Imran, S. Nazarian, M. Picornell, Crack detection using time domain wave propagation technique, J. Geotech. Eng. 121 (1995) 198–207.
- [28] I.A. Viktorov, «Rayleigh and Lamb waves-physical theory and applications», Plenum Press , New York, (1967).
- [29] H.W. Reindhardt, J.W. Dally, «Some characteristics of Rayleigh wave interaction with surface flaws» , Mater. Eval. 28 pp 213– 220 (1970).

- [30] B.R. Tittmann, F. Cohen-Tenoudji, M. de Billy, A. Jungman, G. Quentin, «A simple approach to estimate the size of the small surface cracks with use of acoustical surface waves», *Appl. Phys. Lett.* 33 pp 6–8 (1978).
- [31] B.R. Tittmann, O. Buck, L. Ahlberg, M. de Billy, F. Cohen- Tenoudji, A. Jungman, G. Quentin, «Surface wave scattering from elliptical cracks for failure prediction», *J. Appl. Phys.* 51 pp 142–150 (1980).
- [32] V. Domarkas, B.T. Khuri-Yakub, G.S. Kino, «Length and depths resonances of surface cracks and their use for crack size estimation», *Appl. Phys. Lett.* 33 pp 557-559(1978).
- [33] C.H. Yew, K.G. Chen, D.L. Wang, «An experimental study of the interaction between surface waves and a surface breaking crack», *J Acoust. Soc. Am.* 75 , pp 189–196(1984).
- [34] C.M. Scala, S.J. Bowles, «Laser ultrasonics for surface-crack measurement using transmitted near-field Rayleigh waves», in: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 18, AIP, New York, pp. 327–334 (2000).
- [35] Waled Hassan, William Veronesi «Finite element analysis of Rayleigh wave interaction with finite-size, surface-breaking cracks», *Ultrasonics* 41 ,pp 41–52 (2003).
- [36] X. Jian, S. Dixon, N. Guo, and R. Edwards «Rayleigh wave interaction with surface-breaking cracks» *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* 101, pp 064906 (2007).
- [37] https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method last accessed 19 May 2015.
- [38] http://www.ansys.stuba.sk/html/elem_55/chapter3/ES3-1.htm last accessed 19 May 2015.
- [39] Y. Orphanos, V. Dimitriou, E. Kaselouris, E. Bakarezos, N. Vainos, M. Tatarakis, and N. A. Papadogiannis, «An integrated method for material properties characterization based on pulsed laser generated surface acoustic waves» *Microelectronic Engineering* 112,pp. 249-254 (2013).
- [40] Nikhil A.Vasantgadkar, Upendra V. Bhandarkar, Suhas S. Joshi « A finite element model to predict the ablation depth I pulsed laser ablation» *Thin Solid Films* 519, pp.1421-1430 (2010).
- [41] Wenyang Liu, Jung-Wuk Hong «Modeling of three-dimensional Lamb wave propagation excited by laser pulses» *Ultrasonics* 55, pp.113-122 (2015).
- [42] Jianfei Guan, Zhonghua Shen,Xiaowu Ni, Jijun Wang, Jian Lu and Baiqiang Xu «Numerical simulation of the reflected acoustic wave components in the near field of surface defects» *Appl. Phys.*39, pp.1237-1243,(2006).

- [43] Chenyin Ni, Yifei Shi, Zhonghua Shen , Jian Lu ,Xiaowu Ni «An analysis of angled surface-breaking crack detection by dual-laser source generated ultrasound» NDT&E International 43 ,pp. 4770-475 (2010).
- [44] G.E. Stavroulakis «Impact-echo from a unilateral interlayer crack. LC-BEM modelling and neural identification» Engineering Fracture Mechanics 62, pp. 165-184 (1999).
- [45] V. Dimitriou, A. Kanarachos, D. Koulocheris « An approach to unstructured finite element mesh generation using Coons mapping and smoothing techniques» WSEAS Trans.Circuits Syst. 2, pp.473 (2003).
- [46] Arriaga A, Lazkano JM, Pagaldai R, et al. «Finite-element analysis of quasi-static characterisation tests in thermoplastic materials: Experimental and numerical analysis results correlation with ANSYS» Polymer Testing 26, pp.284–305 (2007).
- [47] Samanta SK «Dynamic deformation of aluminium and copper at elevated temperatures» Journal of the Mechanics and Physics of Solids 19, pp.117–135 (1971).
- [48] Karanjgaokar NJ, Oh CS, Lambros J, et al. «Inelastic deformation of nanocrystalline Au thin films as a function of temperature and strain rate» Acta Materialia 60, pp.5352–5361 (2012).
- [49] E Kaselouris, IK Nikolos, Y Orphanos, M Bakarezos^{1,2}, NA Papadogiannis^{1,2}, M Tatarakis and Vasilis Dimitriou «Elastoplastic study of nanosecond-pulsed laser interaction with metallic films using 3D multiphysics fem modeling» International Journal of Damage Mechanics ,pp.1-14 (2015).
- [50] Incropera FP and DeWitt DP « Introduction to Heat Transfer» New York: Wiley (1986).
- [51] Lide DR «CRC Handbook of Chemistry and Physics» Internet Version Boca Raton, Florida: CRC Press (2005).
- [52] White GK and Collocott SJ «Heat capacity of reference materials: Cu and W» Journal of Physical and Chemical Reference Data 13, pp.1251–1257 (1984).