ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΦΙΛΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ ΜΕ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗ ΥΓΡΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων απόκτησης διδακτορικού διπλώματος

Υπό την

ΚΥΡΙΑΚΗ Γ. ΜΑΝΙΑΔΑΚΗ

ΧΑΝΙΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2009

Η διατριβή της Κυριακής Μανιαδάκη εγκρίνεται:

Όνομα	**Υπογραφή**
1. Μπιλάλης Νικόλαος	
2. Μήτση Σεβαστή	
3. Αντωνιάδης Αριστομένης	
4. Ρόβας Δημήτριος	
5. Σταυρουλάκης Γεώργιος	
6. Τσομπανάκης Ιωάννης	
7. Τσιάφης Ιωάννης	

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Φτάνοντας στο τέλος της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μπιλάλη Νικόλαο, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την ανάθεση της διατριβής και την αμέριστη υποστήριξή του κατά την εκπόνησή της.

Νιώθω την ανάγκη επίσης, να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Αντωνιάδη Αριστομένη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, για τη συνεχή καθοδήγησή του σε όλο το διάστημα εκπόνησης της διατριβής. Σε εκείνον οφείλω το συστηματικό και μεθοδικό τρόπο εργασίας που ανέπτυξα τα τελευταία χρόνια.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το τρίτο μέλος της τριμελούς επιτροπής κ. Μήτση Σεβαστή, Καθηγήτρια του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, για την καθοδήγηση και τις κριτικές παρατηρήσεις της.

Σημαντική συμβολή κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής είχε ο φίλος και συνεργάτης Κέστης Θωμάς, Διπλ. Μηχανικός Παραγωγής και Διοίκησης, M.Sc. Η βοήθεια που μου προσέφερε ο φίλος και συνεργάτης Δημητρίου Βασίλης, Καθηγητής Εφαρμογών του ΤΕΙ Κρήτης, σχετικά με υπολογιστικά συστήματα παράλληλης επεξεργασίας, είναι ανεκτίμητη.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καλλιοντζή Φάνη, Διευθυντή της Ελληνικής Εταιρείας Υδροκοπής (Hydrocut), για την πρόθυμη βοήθεια που μου παρείχε κατά τις επισκέψεις μου στις εγκαταστάσεις της εταιρείας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συνεργάτες Μαραβελάκη Εμμανουήλ, Διευθυντή του Εργαστηρίου Σχεδιομελέτης και Κατεργασιών του ΤΕΙ Κρήτης, Σηφαλάκη Αντιγόνη, Διπλ. Μηχανικό Παραγωγής και Διοίκησης, M.Sc, και Γαρεδάκη Αντρέα Τεχνολόγο Μηχανολόγο, Διδάσκοντα του ΤΕΙ Κρήτης, για τη συνεργασία και τη βοήθειά τους.

Τέλος, για την αγάπη και τη συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλο το διάστημα εκπόνησης της διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Δήμητρα και Γιώργο Μανιαδάκη, τα αδέρφια μου Μαρία και Δημήτρη Μανιαδάκη, καθώς επίσης και το σύζυγό μου Δρ. Γεώργιο Νικολάου Φουσκιτάκη.

ΣΥΝΤΟΜΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Η Κυριακή Μανιαδάκη γεννήθηκε το 1977 στα Χανιά Κρήτης. Το 1995 ξεκίνησε τις σπουδές της στο τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης (Ηράκλειο), από όπου αποφοίτησε τον Ιούνιο του 1999 με βαθμό πτυχίου 7,31. Συνέχισε και ολοκλήρωσε επιτυχώς (2002) τις σπουδές της στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Γενικής Φυσικής (M.Sc.), με ειδίκευση στην Ατομική και Μοριακή Φυσική (Laser) του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης (Ηράκλειο).

Κατά το διάστημα 2001-2002 συμμετείχε ερευνητικά στη θεωρητική μελέτη ατόμων, στα πλαίσια των Προγραμμάτων Έρευνας και Ανάπτυξης του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (Ι.Τ.Ε.), με υποτροφία από το Ινστιτούτο Ηλεκτρονικής Δομής και Laser του Ι.Τ.Ε

Από το 2002 έως σήμερα, εργάζεται ως εργαστηριακός συνεργάτης στο ΤΕΙ Κρήτης όπου διδάσκει τα μαθήματα: "Ηλεκτρικά Κυκλώματα", "Τεχνική Θερμοδυναμική" και "Φαινόμενα Μεταφοράς". Από το 2004 έως σήμερα, έχει εργαστεί με συμβάσεις έργου σε εθνικά ερευνητικά προγράμματα όπως: "Υποστρώματα Τεχνητών Ιστών με ταχεία Πρωτοτυποποίηση και Ηλεκτρόκλωση Νανοϊνών NANO-SPIN", "E-papermaker: Ενορχήστρωση Βασικών Επιχειρηματικών Διαδικασιών για τον Τομέα της Χαρτοβιομηχανίας μέσω Προηγμένων Τεχνολογιών Ηλεκτρονικού Επιχειρείν", έργο που εκτελέστηκε στο Πολυτεχνείο Κρήτης στα πλαίσια του E-Bussiness της ΓΓΕΤ και "Αρχιμήδης-Ι: Ενίσχυση ερευνητικών ομάδων στα ΤΕΙ (ΕΕΟΤ)" - Φιλικές προς το περιβάλλον κατεργασίες με χρήση δέσμης νερού υψηλής πίεσης WaterJet, ερευνητικό πρόγραμμα το οποίο αποτέλεσε την αφορμή εκπόνησης της διδακτορικής της διατριβής.

Έχει ήδη δύο δημοσιευμένες εργασίες σε διεθνή περιοδικά με κριτές, η μια σχετική με την Μεταπτυχιακή της εργασία (2002) /1/ και η άλλη /2/ σχετική με τη διδακτορική της διατριβή (2007), ενώ επίκειται μία ακόμη δημοσίευση /3/ σε διεθνές περιοδικό (2009), επίσης σχετική με τη διδακτορική διατριβή. Έχει συμμετάσχει στο διεθνές συνέδριο (2006) με τίτλο: "From Scientific Computing to Computational Engineering", με παρουσίαση εργασίας /4/ σχετική με τη διδακτορική της διατριβή.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο της Διατριβής

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη και η έρευνα της κατεργασίας με δέσμη νερού υψηλής πίεσης, εξερχόμενη από κατάλληλα διαμορφωμένο ακροφύσιο (Water-Jet Machining). Η κατεργασία αυτή είναι ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον και παρουσιάζει πολύ μεγάλες δυνατότητες ως προς την επεξεργασία μεγάλης ποικιλίας υλικών, εξασφαλίζοντας τη διατήρηση των ιδιοτήτων τους καθώς και αυξημένη ποιότητα στην τελική κατεργασμένη επιφάνεια. Οι εφαρμογές που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι οι κατεργασίες κοπής και καθαρισμού με χρήση του Water-Jet Machining (WJM) και του Abrasive Water-Jet Machining (AWJM) και συγκεκριμένα η επακριβής μοντελοποίηση και προσομοίωση αυτών, μέσω της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων [Finite Element Method (FEM)].

1.2 Στόχοι της Διατριβής

Συνοπτικά, οι πρωτότυπες ερευνητικές δραστηριότητες που αναπτύχθηκαν είχαν τους παρακάτω στόχους :

- Ανάπτυξη μοντέλων Πεπερασμένων Στοιχείων για την ακριβή και ρεαλιστική προσομοίωση των κατεργασιών Water-Jet Machining και Abrasive Water-Jet Machining και
- Σύγκριση των αναπτυχθέντων μοντέλων προσομοίωσης και των αποτελεσμάτων τους με:
  (α) εναλλακτικά μοντέλα της διεθνούς βιβλιογραφίας,
  (β) πειραματικά αποτελέσματα προερχόμενα από τη βιβλιογραφία και από πειράματα που διεξήχθησαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

1.3 Δομή της Διατριβής

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται αναλυτικά η στάθμη των γνώσεων (state of the art). Η πλειονότητα της σχετιζόμενης με το Water-Jet και Abrasive Water-Jet Machining βιβλιογραφίας, ασχολείται με εμπειρικές μεθόδους βασισμένες σε πειραματικά αποτελέσματα. Παρουσιάζονται επίσης οι πλέον πρόσφατες ερευνητικές μελέτες σχετιζόμενες με αριθμητικές μεθόδους αναπαράστασης και μοντελοποίησης των διαδικασιών WJM και AWJM, από τις οποίες, πολύ λίγες βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η συστηματική μαθηματική προσέγγιση των διαδικασιών WJM και AWJM χαρακτηρίζεται από αυξημένη πολυπλοκότητα, καθώς εμπλέκονται η στερεά (κατεργαζόμενο τεμάχιο), η υγρή (δέσμη νερού) και η αέρια (χώρος κατεργασίας) κατάσταση της ύλης. Η μαθηματική αναπαράσταση του προβλήματος καθιστά τη χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes απαραίτητη. Η επίλυση του συστήματος μερικών διαφορικών εξισώσεων Navier-Stokes είναι σήμερα εφικτή μόνο με αριθμητικό τρόπο. Με στόχο λοιπόν την αποτελεσματική και κατά το δυνατόν ακριβέστερη μαθηματική προσέγγιση των διαδικασιών WJM και AWJM, που ταυτόχρονα θα ξεπερνούν τις αδυναμίες των μέχρι σήμερα αναπτυχθέντων μοντέλων και ταυτόχρονα θα παραμετροποιούν ακριβέστερα το πρόβλημα, αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης και μαθηματικής αναπαράστασης των διαδικασιών κοπής, βασισμένα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 3** και είναι τα εξής:

(α) Μοντέλο προσομοίωσης των διαδικασιών κοπής και καθαρισμού με δέσμη καθαρού νερού επί ακίνητου στόχου,

(β) Μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας κοπής με δέσμη καθαρού νερού επί κινούμενου στόχου,

(γ) Μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας κοπής με πρόσκρουση λειαντικών κόκκων σε ακίνητο στόχο.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των παραπάνω μοντέλων, παρουσιάζονται στο **Κεφάλαιο 4** όπου και συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά:

- Έως και σήμερα, θεωρείται προσεγγιστικά ότι το προφίλ ταχύτητας της προσπίπτουσας δέσμης νερού στο κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι ομοιόμορφο, μη λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του ακροφυσίου και του περιβάλλοντος αέρα. Το μοντέλο (α), έχει ως στόχο τη βελτιστοποίηση του υπάρχοντος μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της βιβλιογραφίας, μέσω της επακριβούς μοντελοποίησης της ροής εντός του ακροφυσίου, ώστε να υπολογιστεί επακριβώς το προφίλ ταχύτητας της εξερχόμενης ροής από το ακροφύσιο. Τα αποτελέσματα του αναπτυχθέντος μοντέλου εξετάζονται και συγκρίνονται με αυτά της βιβλιογραφίας, τόσο στο τμήμα που αφορά τη μοντελοποίηση της ροής εντός του ακροφυσίου, όσο και της συνολικής επιτυγχανόμενης ακρίβειας κοπής.

- Το μοντέλο (β), αφορά στην επέκταση του ήδη αναπτυχθέντος μοντέλου (α), στην περίπτωση κινούμενου στόχου (πρόωση κατεργαζόμενου τεμαχίου). Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της διαδικασίας κοπής μέσω μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για δέσμη νερού προσπίπτουσα σε κινούμενο στόχο, που έχουν παρουσιαστεί έως σήμερα, χαρακτηρίζονται από μειωμένη ακρίβεια και δεν παρέχουν ουσιαστική πληροφορία για τη διαδικασία. Η ανάπτυξη ενός ακριβούς μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων κρίθηκε αναγκαία, καθώς προσεγγίζει με αυξημένη ακρίβεια τις πραγματικές συνθήκες κοπής. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα της προσομοιωμένης διαδικασίας κοπής, μπορούν να συγκριθούν απευθείας με υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα με στόχο την επαλήθευση του μοντέλου αλλά και τη βελτιστοποίηση της παραμετροποίησής του.

- Το μοντέλο (γ) αφορά στην ανάπτυξη μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας AWJM (κοπή με χρήση λειαντικών κόκκων) επί ακίνητου στόχου. Η σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με αυτά πειραματικών διαδικασιών της βιβλιογραφίας, επαληθεύει την ορθότητα του αναπτυχθέντος μοντέλου προσομοίωσης. Η αυξημένη ακρίβεια αναπαράστασης της διαδικασίας κοπής που το χαρακτηρίζει, οφείλεται στο γεγονός ότι χρησιμοποιεί ικανό αριθμό λειαντικών κόκκων έως τη σταθεροποίηση της κοπής (η χρήση επιπλέον κόκκων δε μεταβάλλει τη γεωμετρία της), σε αντίθεση με υπάρχοντα μοντέλα που χρησιμοποιούν το πολύ έως τρεις (3) κόκκους.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην Ελληνική Εταιρεία Υδροκοπής (Hydrocut) που εδρεύει στην Αθήνα, με σκοπό την επαλήθευση του μοντέλου (β) (Κεφάλαιο 3). Η πραγματοποίηση των πειραμάτων αυτών κρίθηκε απαραίτητη για τον καθορισμό των παραμέτρων και των συνθηκών κοπής με σκοπό τη δημιουργία ενός ακριβούς και κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστικού μοντέλου προσομοίωσης. Βασικός στόχος των πειραμάτων είναι η μέτρηση του πλάτους κοπής της δέσμης νερού και η μελέτη της μεταβολής του πλάτους αυτού συναρτήσει της ταχύτητας κοπής, της απόστασης του ακροφυσίου από το στόχο και του κατεργαζόμενου υλικού.

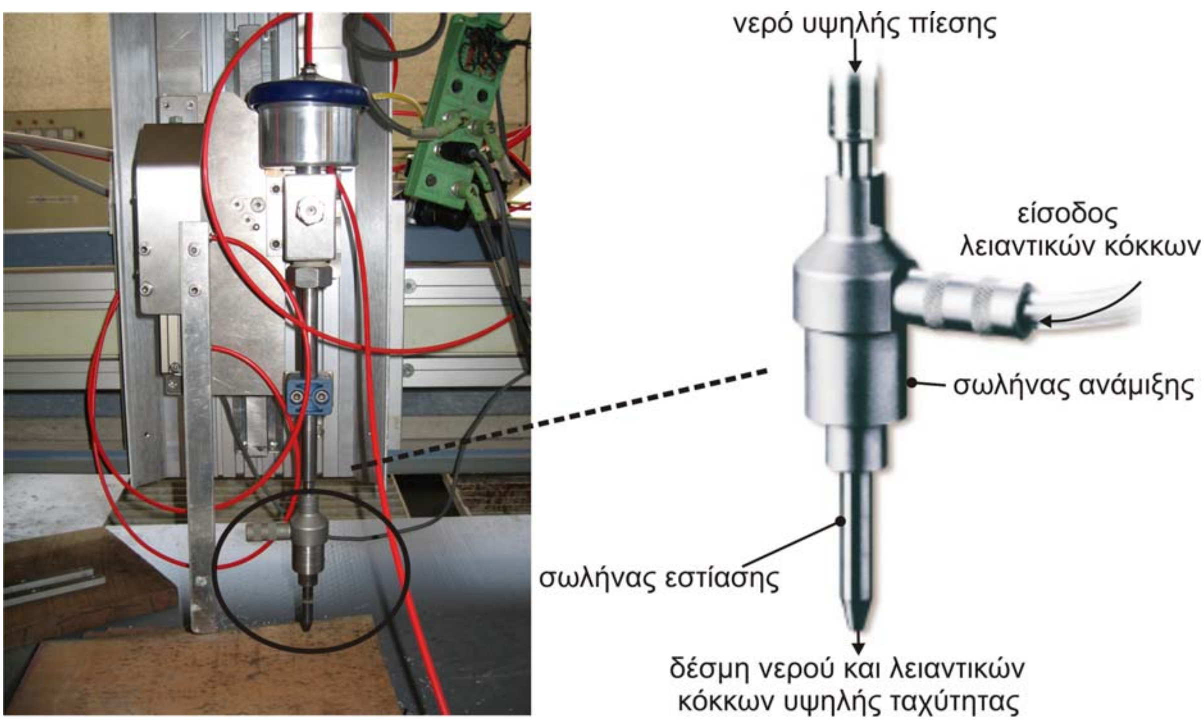
Τέλος, στα **Κεφάλαιο 6** και **7** παρουσιάζονται αντίστοιχα τα συμπεράσματα της διατριβής και η βιβλιογραφία.

2. ΣΤΑΘΜΗ ΤΩΝ ΓΝΩΣΕΩΝ

Οι μηχανουργικές κατεργασίες Water-Jet Machining (WJM) και Abrasive Water-Jet Machining (AWJM) αποτελούν μη-συμβατικές διαδικασίες κοπής υλικών, κατά τις οποίες νερό υψηλής ταχύτητας (με παρουσία λειαντικών κόκκων που εισχωρούν στη δέσμη νερού - περίπτωση Abrasive WJM), προσπίπτει στο κατεργαζόμενο κομμάτι και το διαβρώνει. Οι πρώτες θεωρητικές προσεγγίσεις-μελέτες της διαδικασίας κοπής με Water-Jet παρουσιάστηκαν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, ενώ οι βιομηχανικές εφαρμογές της, στα μέσα της δεκαετίας του ΄80. Από τα τέλη της δεκαετίας του ΄90 και έπειτα, η κατεργασία με Water-Jet γνωρίζει μεγάλη εξάπλωση και χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, καθώς μια τέτοια κατεργασία ήταν κοστολογικά απρόσιτη στο παρελθόν. Λόγω των ιδιαιτεροτήτων των κατεργασιών WJM και AWJM, και εξαιτίας του σύγχρονου χαρακτήρα τους, στη συνέχεια περιγράφονται διεξοδικά, αναλύονται οι ιδιαιτερότητές τους και παρουσιάζεται η σχετική διεθνής ερευνητική δραστηριότητα.

2.1 Συνοπτική Περιγραφή των Μεθόδων WJM και AWJM

Βασική ιδέα της μεθόδου κοπής με δέσμη νερού είναι η εκτόξευση – με μεγάλη πίεση – καθαρού νερού (WJM) ή νερού με σωματίδια λειαντικής ουσίας (AWJM), μέσα από κατάλληλα διαμορφωμένη διατομή (ακροφύσιο), πάνω στο υλικό που πρόκειται να κατεργαστεί (Σχήμα 2.1). Το αποτέλεσμα είναι μια γρήγορη, ευέλικτη και αποτελεσματική μέθοδος κοπής μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών, που σήμερα έχει γίνει ιδιαίτερα ανταγωνιστική. Η δέσμη νερού εκτοξεύεται από το ακροφύσιο Water-Jet με ταχύτητα που προσεγγίζει τα 900 m/sec. Όταν η δέσμη νερού έρθει σε επαφή με την επιφάνεια κατεργασίας, τα μόρια του κατεργαζόμενου υλικού απομακρύνονται ταχύτατα λόγω της διαβρωτικής ιδιότητας του νερού.



Σχήμα 2.1: Ακροφύσιο Water-Jet

Η απαιτούμενη πίεση κοπής (4,000-6,000 Atm), παράγεται από αντλία υψηλής πίεσης. Σύμφωνα με τη σχέση Bernoulli, η ταχύτητα της δέσμης (υ), είναι (κατά προσέγγιση):

$$\upsilon = \sqrt{2 \quad p/\rho} \qquad (2.1)$$

όπου p είναι η πίεση και ρ η μέση πυκνότητα του νερού. Το βάθος διείσδυσης της δέσμης εξαρτάται από το είδος του υλικού που πρόκειται να κοπεί, από την ταχύτητα (υ) της δέσμης νερού και από την απόσταση μεταξύ ακροφυσίου και κατεργαζόμενου τεμαχίου.

2.3 Πλεονεκτήματα των Κατεργασιών WJM και AWJM

Η κατεργασία με δέσμη νερού προσφέρει πλήθος πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κοπής. Πιο συγκεκριμένα:

- Δεν αναπτύσσεται ζώνη θερμότητας και δεν προκαλείται σκλήρυνση ή αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του κατεργαζόμενου τεμαχίου κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Είναι δυνατή η κατεργασία οποιουδήποτε υλικού με ταυτόχρονη δυνατότητα κοπής και δημιουργίας περίπλοκων σχηματισμών.
- Έχει την ικανότητα να κόβει στις τρεις διαστάσεις.
- Μπορεί να γίνει κατεργασία των περισσότερων υλικών χωρίς προδιάτρηση οπής.
- Δεν απαιτείται δευτερεύουσα επεξεργασία μετά την κύρια κατεργασία.
- Χαρακτηρίζεται από μεγάλη εξοικονόμηση ακατέργαστης ύλης και είναι ταχύτερη σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κοπής.
- Κατά τη διάρκεια της κατεργασίας το περιβάλλον εργασίας είναι καθαρό και αβλαβές για τον άνθρωπο, ενώ είναι φιλική προς το περιβάλλον.

2.4 Στοιχεία Κόστους

Το κόστος ενός τυπικού συστήματος Abrasive Jet με όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό, κυμαίνεται από 50.000 ως 150.000 € περίπου, αναλόγως των δυνατοτήτων του (ισχύς, αριθμός αξόνων κοπής, αυτοματισμοί, κ.λπ.). Το κόστος εργασιών κυμαίνεται ανάλογα με το χρόνο κατεργασίας και το αντίστοιχο κόστος συμβατικής κατεργασίας. Συνήθως όμως, το κόστος κυμαίνεται από 6 ως 30 € την ώρα.

2.5 Τεχνολογία των Κατεργασιών WJM και AWJM

Η κατεργασία κοπής με δέσμη νερού συνίσταται στις περιπτώσεις υλικών που χαρακτηρίζονται από μικρή σκληρότητα, σε αντίθεση με την περίπτωση χρήσης λειαντικών κόκκων, όπου χρησιμοποιείται κυρίως στις περιπτώσεις υλικών με αυξημένη σκληρότητα. Σε κάθε περίπτωση, όλκιμα αλλά και ψαθυρά υλικά, όπως μέταλλα, πλαστικά, συνθετικά, μάρμαρα, γρανίτης, κεραμικά κ.λπ., μπορούν να κατεργαστούν. Το πάχος των κατεργαζόμενων τεμαχίων περιορίζεται μόνο από το μέγεθος της χρησιμοποιούμενης εργαλειομηχανής WJM ή AWJM.

Σε περιπτώσεις όπου το κόστος κατεργασίας με χρήση συμβατικής μεθόδου είναι μικρότερο, πρέπει να συνυπολογίζονται και οι παράγοντες της προκύπτουσας ποιότητας επιφάνειας, της σκλήρυνσης του μετάλλου, της παραμόρφωσης και της δημιουργίας θραυσμάτων, ειδικά στην περίπτωση επεξεργασίας εύθραυστων υλικών, όπως πέτρα, γυαλί, κ.λπ..

Τα ακροφύσια και ο σωλήνας ανάμιξης, αποτελούν τα κρισιμότερα στοιχεία της εργαλειομηχανής και είναι αυτά που φθείρονται γρηγορότερα. Το τμήμα του ακροφυσίου του συστήματος δέσμης ύδατος από όπου εξέρχεται το νερό, είναι κατασκευασμένο από διαμάντι στο οποίο συχνά προκαλούνται ρωγμές.

2.6 Εφαρμογές του WJM

Η τεχνολογία του Water Jet χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε εργασίες καθαρισμού και συγκεκριμένα στην απομάκρυνση αργίλου και πέτρας. Σήμερα το Water-Jet χρησιμοποιείται για:

- Βιομηχανικό καθαρισμό και προετοιμασία επιφάνειας
- Χρωματισμό, γυάλισμα και επικαλύψεις επιφανειών
- Υδροκατεδάφιση τσιμέντου και θρυμματισμό βράχων
- Απολύμανση και ανακύκλωση υλικών

Ειδικότερα, στη μηχανουργική τεχνολογία χρησιμοποιείται για:

- Κοπή υλικών με απλή δέσμη νερού (πλαστικά, λεπτά φύλλα μετάλλων, υφάσματα)
- Κοπή υλικών που είναι δύσκολο να κατεργαστούν (σύνθετα υλικά)
- Τόρνευση, διάτρηση και κατεργασία τρισδιάστατων επιφανειών
- Καθαρισμό

Η κατεργασία κοπής με νερό, με ή χωρίς λειαντικά σωματίδια, βρίσκει σήμερα πολλές εφαρμογές, ιδιαίτερα στη βιομηχανία τροφίμων, την αυτοκινητοβιομηχανία, όπως και γενικά στη βιομηχανία κατασκευών, στις βιομηχανίες αεροσκαφών, στην κοπή λίθων και πλακιδίων. Αξιοσημείωτη είναι η χρήση του Water Jet σε ιατρικές επεμβάσεις. Οι μικρές διαστάσεις της δέσμης, η ακρίβεια κοπής, η λειτουργικότητά του (καθώς είναι μικρό και ευέλικτο ως εργαλείο), το γεγονός ότι δε μολύνει, αφήνει καθαρούς και δεν προξενεί αύξηση της θερμοκρασίας στους περιβάλλοντες ιστούς, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι μειώνει την απώλεια αίματος, καθιστούν το Water Jet το πλέον κατάλληλο εργαλείο για επεμβάσεις σε ζωτικά όργανα όπως συκώτι, νεφρά και εγκέφαλο. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης Water Jet έναντι της χρήσης laser σε περιπτώσεις ιατρικών επεμβάσεων, είναι το γεγονός ότι το τελευταίο βοηθά μεν στον έλεγχο της απώλειας αίματος, αλλά μπορεί να προξενήσει φθορές στους περιβάλλοντες ιστούς λόγω ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών /5,6/.

2.7 Διεθνής έρευνα στην κατεργασία Water Jet Machining

Η βασική έρευνα στη θεματική περιοχή της κατεργασίας AWJM, αναπτύχθηκε κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες και έχει προαχθεί ιδιαίτερα από πέντε (5) Πανεπιστημιακά Εργαστήρια: University of Kentucky, University of Washington, University of Rhode Island, New Jersey Institute of Technology και University of Missouri-Rolla, καθώς και από μία βιομηχανία, την Quest Integrated Inc..

Διεθνείς οργανισμοί όπως η Boeing, η NASA, η Pratt & Whitney, η U.S. Air Force και άλλοι κατασκευαστές, διεξάγουν επίσης αυτοδύναμη έρευνα σε αυτή τη γνωστική περιοχή, αξιοποιώντας τα παραγόμενα αποτελέσματα, κυρίως για την κάλυψη των εσωτερικών τους αναγκών. Από τα προαναφερθέντα Πανεπιστήμια, το University of Missouri-Rolla διεξάγει έρευνα κυρίως στην περιοχή της εξόρυξης μεταλλευμάτων και της κοπής βράχων, ενώ τα υπόλοιπα Πανεπιστήμια ασχολούνται κυρίως με την εφαρμογή της κατεργασίας AWJM στη διαμόρφωση υλικών. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφορες ερευνητικές δραστηριότητες των παραπάνω Πανεπιστημίων.

Φυσική της διεργασίας	Μηχανισμοί κόπωσης Μοντελοποίηση διάβρωσης	University of Kentucky University of Washington University of Rhode Island Quest Integrated Inc.
	Φαινόμενα απώλειας ενέργειας	University of Kentucky University of Washington
	Χαρακτηρισμός επιφάνειας από κατεργασία με AWJ	University of Kentucky Quest Integrated Inc. University of Washington New Jersey Institute of Technology
Λειτουργίες	Διάτρηση με AWJ	University of Kentucky Quest Integrated Inc. University of Washington
	Τόρνευση και σπειρωτόμηση με AWJ	University of Rhode Island Quest Integrated Inc.
	Κατεργασία σε τρεις διαστάσεις	University of Kentucky Quest Integrated Inc. University of Rhode Island University of Washington New Jersey Institute of Technology
Συστήματα και αισθητήρες	Συστήματα εξαιρετικά μεγάλης πίεσης	Quest Integrated Inc.
	Αισθητήρες θερμοκρασίας στην κοπή με AWJ	University of Kentucky Quest Integrated Inc.
	Μελέτες στην φθορά του ακροφυσίου σε AWJ και	University of Kentucky University of Rhode Island Quest Integrated Inc.
	Έξυπνα ακροφύσια	Quest Integrated Inc.
Νέες εφαρμογές	Ice Jet Machining	New Jersey Institute of Technology
	Cryogenic Jet Machining	Quest Integrated Inc.
	Υβριδικά συστήματα κατεργασιών	University of Kentucky University of Missouri - Rolla Cleveland State University
	Στίλβωση και καθαρισμός με Water-Jet	University of Rhode Island New Jersey Institute of Technology

Σχήμα 2.2 : Περιοχές και φορείς έρευνας στην κατεργασία AWJ

Εκτός των Πανεπιστημίων της Αμερικής, αρκετά Ευρωπαϊκά Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Ινστιτούτα, κυρίως στη Γερμανία αλλά και Πανεπιστήμια της Αυστραλίας, ασχολούνται σήμερα ερευνητικά με την κατεργασία κοπής με χρήση ύδατος. Ένα από αυτά είναι το Πανεπιστήμιο Swinburne της Αυστραλίας και το Ερευνητικό Ινστιτούτο I.R.I.S..

Η βασική έρευνα στην περιοχή του AWJM αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1990 στις Η.Π.Α. και είχε διαφορετικές κατευθύνσεις:

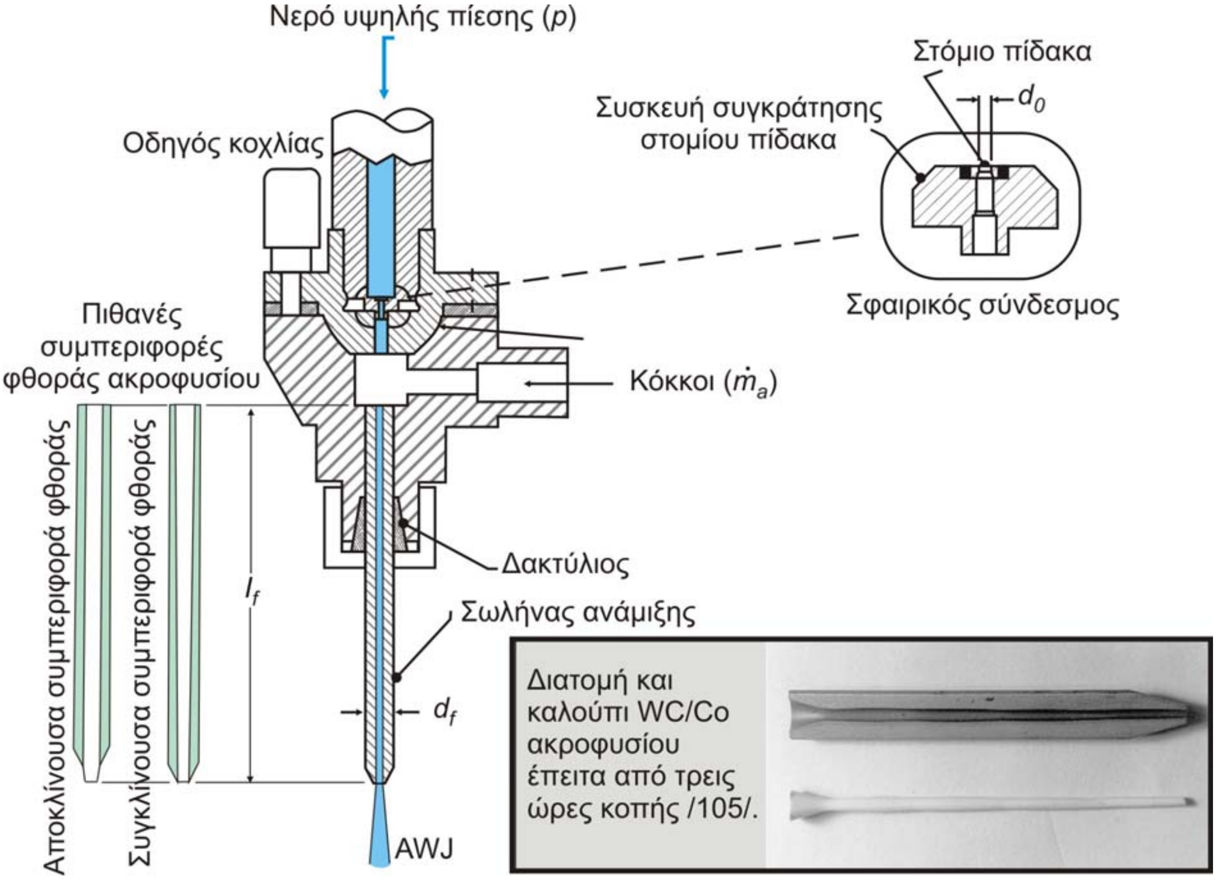
- Έρευνα για την κατανόηση του μηχανισμού της κατεργασίας, μελέτη του ρυθμού διάβρωσης /7-30/,
- Έρευνα προσανατολισμένη στα συστήματα, την ευαισθησία, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της κατεργασίας /30-39/,
- Έρευνα με στόχο την μελέτη του ρυθμού φθοράς του ακροφυσίου /40-50/,
- Έρευνα με στόχο τον χαρακτηρισμό των επιφανειών (φθορά, τραχύτητα, εναπομένουσες τάσεις, σχηματισμός ραβδώσεων) /51-62/,
- Έρευνα σχετική με τις εφαρμογές της κατεργασίας abrasive waterjet /63-84/,
- Εφαρμογές σε κεραμικά υλικά /81-85/, και σε σύνθετα υλικά /90-94/,
- Ανάπτυξη νέων εφαρμογών και επεκτάσεων των μεθόδων WJM και AWJM /95-102/,
- Ανάπτυξη νέων τεχνικών, όπως κοπή με χρήση ταλάντωσης /103-106/,
- Ακρίβεια της δέσμης – σύγκριση με τεχνική laser /107,108/

2.7.1 Δομή WJ – Παράμετροι

Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η δομή του ακροφυσίου που χρησιμοποιείται στην κατεργασία Abrasive Water-Jet, όπου διακρίνονται τα επιμέρους εξαρτήματά του. Η διάμετρος της δέσμης νερού (στην έξοδο του ακροφυσίου) κυμαίνεται από 0.1 έως 0.5 mm (τυπικές τιμές), ενώ για την επαρκή ανάμιξη νερού-κόκκων η διάμετρος του σωλήνα ανάμιξης είναι περίπου από 2.5 έως 5 φορές μεγαλύτερη. Συνεπώς, ο λόγος της διαμέτρου δέσμης κοπής προς τη διάμετρο του σωλήνα ανάμιξης, απαιτείται να είναι κατά το δυνατόν μικρότερος ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη εστίαση της δέσμης κοπής. Η ταχύτητα των σωματιδίων του λειαντικού μέσου εξαρτάται από τους ρυθμούς ροής του νερού και του λειαντικού και μπορεί να φτάσει το 80% της ταχύτητας του νερού. Η ταχύτητα αυτή που αναπτύσσεται εντός του στενού χώρου του σωλήνα ανάμιξης, έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία έντονου διαβρωτικού περιβάλλοντος που συχνά οδηγεί σε αστοχία το σωλήνα ανάμιξης.

Σε ένα σύστημα Abrasive Water-Jet, η δέσμη νερού αναμιγνύεται με τη λειαντική ουσία και παράγεται η δέσμη κατεργασίας, στο άκρο της οποίας η ταχύτητα προσεγγίζει την τιμή των 900 m/s. Συνεπώς, ο σωλήνας ανάμιξης σε μια διάταξη Abrasive Water-Jet, αποτελεί το κρισιμότερο εξάρτημα. Για την περιγραφή της αξιοπιστίας του ή/και της πιθανής του αστοχίας, έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα /41-50/.

Οι δύο μορφές αστοχίας που διαμορφώνουν την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα ανάμιξης σε αποκλίνουσα ή συγκλίνουσα μορφή, παρουσιάζονται στο σχήμα 2.3. Η αποκλίνουσα μορφή παρουσιάζεται όταν το λειαντικό μέσο είναι πολύ σκληρότερο από το υλικό του σωλήνα ανάμιξης ενώ η συγκλίνουσα μορφή παρουσιάζεται στην αντίστροφη περίπτωση. Σε κάθε περίπτωση, η αστοχία του σωλήνα ανάμιξης έχει επίπτωση στα χαρακτηριστικά και την αποδοτικότητα της δέσμης κοπής. Η μελέτη συμπεριφοράς και ο έλεγχος της αστοχίας του σωλήνα ανάμιξης /42,43,48/ καθώς και η εξάρτησή της από τις κατασκευαστικές παραμέτρους του ακροφυσίου και των συνθηκών κοπής /41,44,45,46,47,49,50/, πραγματοποιήθηκε σε εργασίες που στόχο είχαν τη βελτιστοποίηση της κατεργασίας.

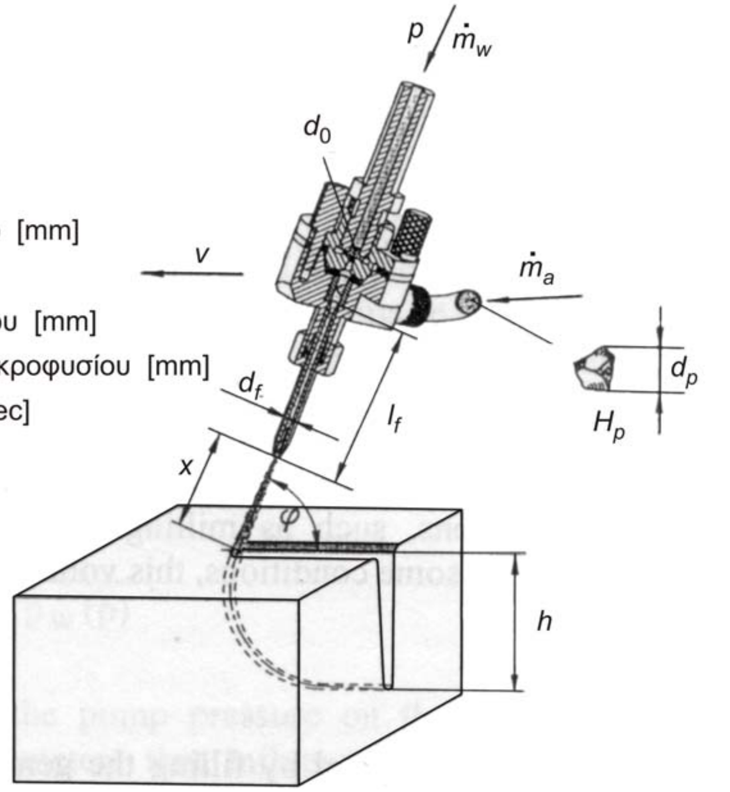


Σχήμα 2.3: Δομή και Φθορά του Ακροφυσίου στο Abrasive Water-Jet Machining

Η βελτιστοποίηση της κατεργασίας εξαρτάται από μεγάλο αριθμό παραμέτρων που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα, την οικονομία και την ποιότητα της διαδικασίας. Γενικά, οι παράμετροι αυτοί στην κοπή με Abrasive Water-Jet, κατηγοριοποιούνται ως εξής (σχήμα 2.4, 2.5) :

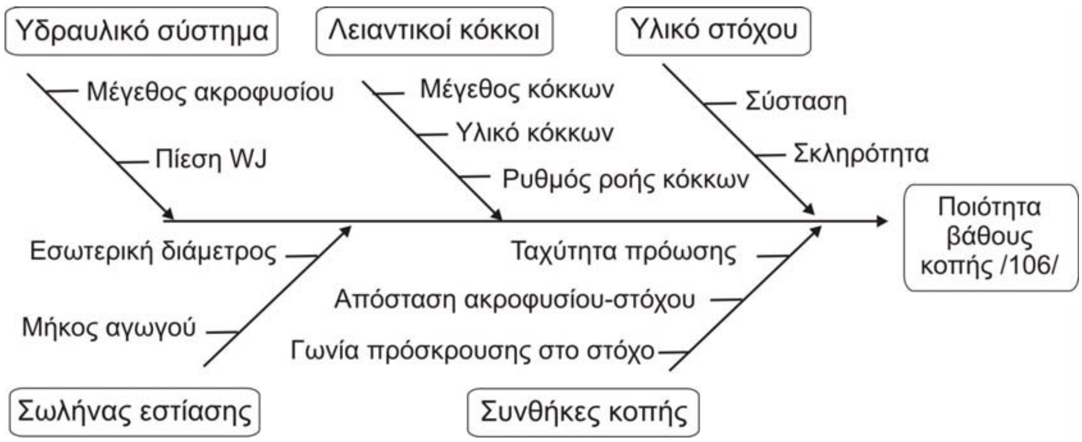
Υδραυλικοί παράμετροι :	Πίεση αντλίας (p) Διάμετρος στομίου νερού (d_0)
Παράμετροι κοπής :	Ταχύτητα πρόωσης (u) Αριθμός περασμάτων (n_P) Απόσταση στομίου από τεμάχιο (s) Γωνία κρούσης (φ)
Παράμετροι μίξης :	Εξωτερική διάμετρος ακροφυσίου (d_f) Μήκος τμήματος εστίασης του ακροφυσίου (l_f)
Παράμετροι λείανσης :	Παροχή λειαντικού μέσου (m_a) Διάμετρος κόκκου (d_P) Κατανομή μεγέθους κόκκων [$f(d_P)$] Σχήμα λειαντικού μέσου Σκληρότητα λειαντικού μέσου (H_P) Δυνατότητα ανακύκλωσης λειαντικού

p : πίεση αντλίας [kPa]
d_0 : διάμετρος στομίου [mm]
v : ταχύτητα πρόωσης [mm/min]
x : απόσταση στομίου από τεμάχιο [mm]
φ : γωνία κρούσης [^{0}]
d_f : εξωτερική διάμετρος ακροφυσίου [mm]
l_f : μήκος τμήματος εστίασης του ακροφυσίου [mm]
$\dot{m}_a$: παροχή λειαντικού μέσου [gr/sec]
$\dot{m}_w$: παροχή νερού [gr/sec]
d_p : διάμετρος κόκκου [mm]
H_p : σκληρότητα λειαντικού μέσου
h : βάθος κοπής [mm]



Σχήμα 2.4: Παράμετροι Abrasive Water-Jet

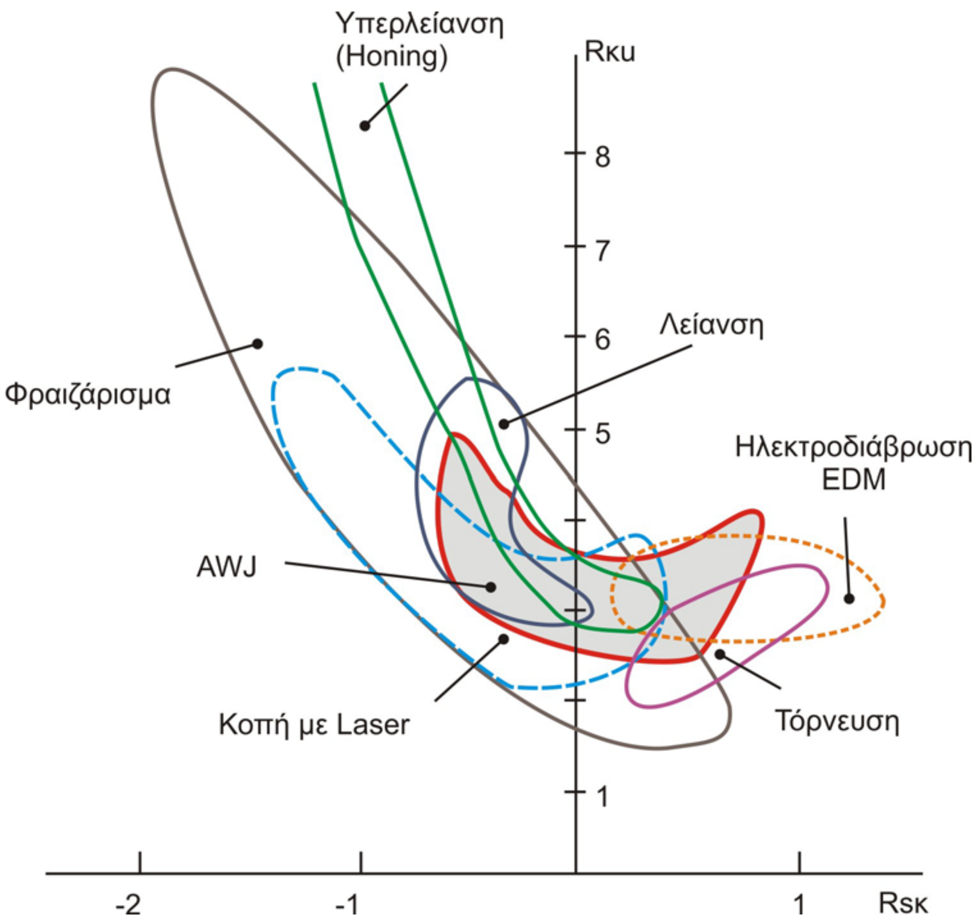
Η διαδικασία επιλογής βέλτιστων τιμών για τις παραπάνω παραμέτρους κοπής, έχει ως αποτέλεσμα το βασικότερο πλεονέκτημα της κατεργασίας Water-Jet, την ποιότητα της προκύπτουσας επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Οι μέχρι σήμερα μελέτες που είναι σχετικές με την ποιότητα της παραγόμενης επιφάνειας, στηρίζονται κυρίως σε πειραματικές διαπιστώσεις.



Σχήμα 2.5: Παράμετροι Abrasive Water Jet

Η κατεργασία AWJ βρίσκει εφαρμογές σε μεγάλη ποικιλία μεταλλικών και μη υλικών, όπως ο χυτοσίδηρος, ο ανοξείδωτος χάλυβας, το αλουμίνιο, ο χαλκός, το τιτάνιο και τα κράματά του, οι ενανθρακωμένοι χάλυβες, οι χάλυβες εργαλείων, τα κεραμικά υλικά, τα σύνθετα υλικά κ.λπ.. Οι υψηλές ταχύτητες κοπής και η δυνατότητα κατεργασίας σε πολλές κατευθύνσεις, παρέχουν τη δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων διαμορφώσεων, με προκαθορισμένες ανοχές, χωρίς τη δημιουργία θερμοκρασιακών τάσεων ούτε μηχανικής παραμόρφωσης στα κατεργαζόμενα τεμάχια. Η προσαρμοστικότητα της κατεργασίας αυτής, την καθιστά ικανή να επιτύχει διεργασίες ανάλογες αυτών των παραδοσιακών μεθόδων, όπως η διάτρηση, το φρεζάρισμα, η τόρνευση, η σπειρωτόμηση, ο καθαρισμός κ.λπ..

Οι βασικές παράμετροι ποιότητας κοπής είναι η ασυμμετρία και η κύρτωση. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται το διάγραμμα ασυμμετρίας - κύρτωσης για διάφορες μηχανουργικές κατεργασίες. Η αποτελεσματικότητα της κατεργασίας AWJ είναι σχεδόν ταυτόσημη με αυτήν της ηλεκτροδιάβρωσης και της λείανσης.



Σχήμα 2.6: Διάγραμμα κύρτωσης για διάφορες κατεργασίες

2.7.2 *Μηχανισμός φθοράς κατεργαζόμενου τεμαχίου*

Ο μηχανισμός φθοράς του κατεργαζόμενου τεμαχίου στην κατεργασία AWJM επιτυγχάνεται μέσω διάβρωσης και περιγράφεται από διάφορες προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό του βάθους κοπής, που φαίνονται στο σχήμα 2.7.

Hashish	$h = \frac{c d_j}{2.5}\left(\frac{14 \dot{m}_a}{\pi u d_j^2 \rho_a}\right)^{2.5} \frac{V_a}{V_i}$	Ελατά υλικά (SCR)
Hashish	$h = \dfrac{1}{\dfrac{\pi d_j \sigma_f}{2(1-c) m_a (V_a - V_c)} + \dfrac{C_f}{d_f}\dfrac{V_a}{V_a - V_c}}$	Ελατά υλικά (RCR)
Kovacevic Mohan & Hirscher	$h = \frac{1.3545 \cdot p^{0.7903} \cdot \dot{m}_a^{0.1844}}{s^{0.0068} \cdot u^{0.5671}}$	Μοντέλο σταθερής παλινδρόμισης για σκυρόδεμα
Zeng and Kim	$h = \frac{N_m \cdot p^{1.25} \cdot \dot{m}_w^{0.687} \cdot \dot{m}_a^{0.343}}{8,800 \cdot d_f^{0.618} \cdot u^{0.866}}$	Ασταθή υλικά
Chung, Geskin & Singh	$h = \frac{(p - p_c) \cdot \dot{m}_a^{0.6}}{u \cdot b_k}$	Ελατά υλικά
Momber and Kovacevic	$h = p \cdot \frac{d_f \cdot \dot{m}_a^n}{u} \cdot \int_{E_A}^{E_P} \frac{e^{-\frac{(E_p - \bar{E}_p)^2}{2\sigma_{E_p}^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{E_p}} dE_p$	Ελατά και ασταθή υλικά

ρ_a	πυκνότητα λειαντικού κόκκου	σ_f	ροή τάσης υλικού στόχου
d_j	διάμετρος δέσμης	C_f	συντελεστής τριβής
c	παράμετρος εξαρτώμενη από γωνία πρόσκρουσης κόκκου	V_c	οριακή ταχύτητας πρόωσης
		p_c	οριακή πίεση υλικού
V_a	ταχύτητα κόκκου	b_k	πλάτος κοπής
V_i	χαρακτηριστική ταχύτητα κόκκου	E_p	κινητική ενέργεια κόκκου

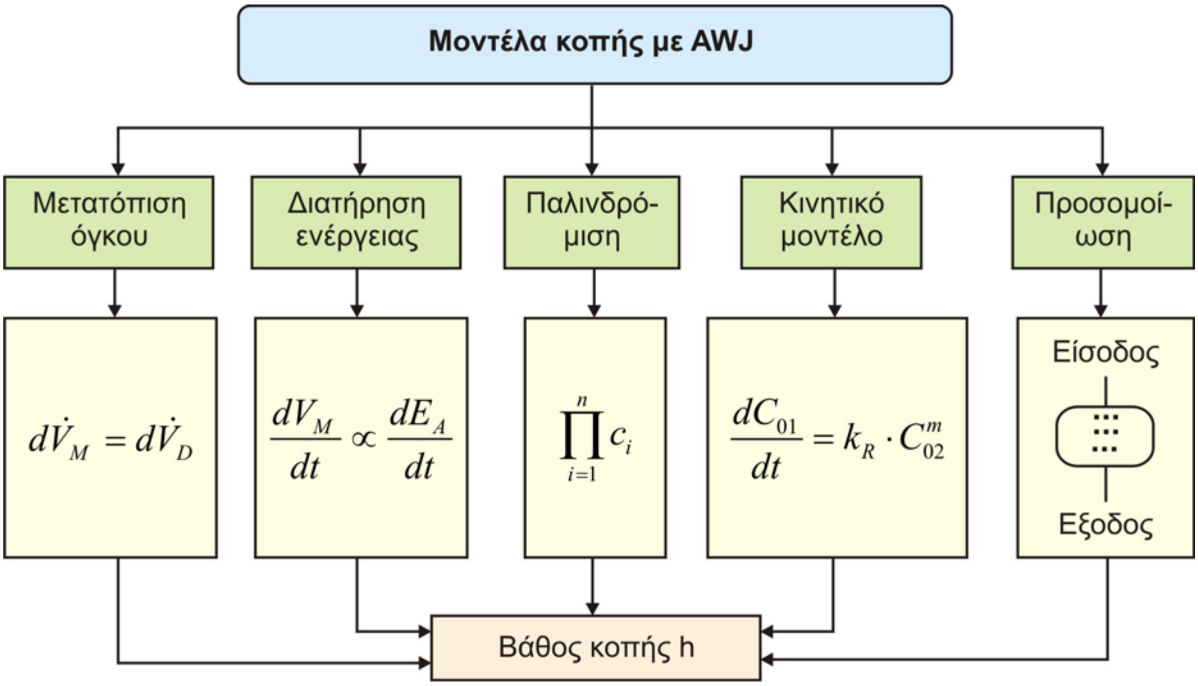
Σχήμα 2.7: Μοντέλα υπολογισμού του βάθους κοπής της κατεργασίας AWJ

Οι προσπάθειες που κατεβλήθησαν στις ανωτέρω προσεγγίσεις για την επακριβή περιγραφή του μηχανισμού διάβρωσης της κατεργασίας AWJ, οδήγησαν στην ανάπτυξη καινοτόμων μεθοδολογιών κοπής με δέσμη νερού, όπως το Ice-Jet Machining, το Cryogenic Jet machining, τα υβριδικά συστήματα κατεργασιών και τις μεθόδους στίλβωσης και καθαρισμού με χρήση δέσμης νερού.

Έως και σήμερα σημαντικότερη παράμετρος της κατεργασίας AWJM θεωρείται το βάθος κοπής. Ο υπολογισμός του βασίζεται σε συνδυασμό αναλυτικών και εμπειρικών σχέσεων, ενώ έχουν αναπτυχθεί πέντε (5) κύριες κατηγορίες μεθόδων υπολογισμού του βάθους κοπής που παρουσιάζονται στο σχήμα 2.8 και είναι:

- Μοντέλα μετατόπισης όγκου
- Μοντέλα διατήρησης ενέργειας
- Μοντέλα παλινδρόμησης
- Κινητικά μοντέλα
- Αριθμητικές προσομοιώσεις

Από τα μοντέλα αυτά μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατηγορία των μεθόδων που βασίζονται σε αριθμητικές προσομοιώσεις.



Σχήμα 2.8: Μοντέλα υπολογισμού του βάθους κοπής της κατεργασίας Water-Jet

2.7.3 Αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης του μηχανισμού διάβρωσης

Από το σύνολο των ερευνητικών εργασιών που σχετίζονται με την ανάλυση του μηχανισμού διάβρωσης, ένα πολύ μικρό τμήμα προσεγγίζει το φαινόμενο επί τη βάσει αριθμητικών μεθόδων, ενώ το πλέον πρόσφατο εξ' αυτών βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

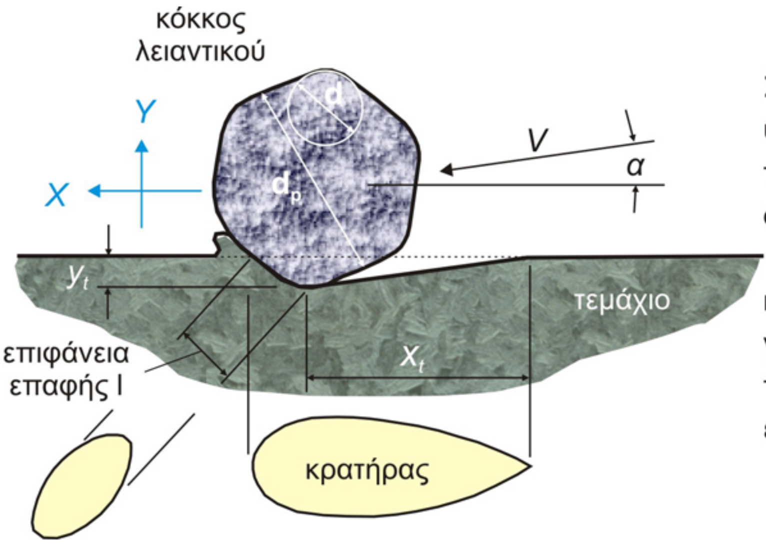
Ο **Finnie** /13,109/ (1958) ήταν ο πρώτος που παρουσίασε τις βασικές ιδέες και προϋποθέσεις για την ανάπτυξη και δημιουργία ενός μοντέλου διάβρωσης. Το μοντέλο που παρουσίασε θέτει τις βασικές αρχές για τα συνακόλουθα μοντέλα διάβρωσης. Συγκεκριμένα, το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι ένα σωματίδιο μάζας *m* με υψηλή ταχύτητα *V*, προσκρούει στην κατεργαζόμενη επιφάνεια υπό γωνία *α*. Το υλικό της επιφάνειας υποτίθεται ότι έχει πλαστική συμπεριφορά, η οποία ορίζεται από τη ροή τάσης του υλικού. Η τελική έκφραση και οι οριακές συνθήκες για τον όγκο του υλικού που αφαιρείται από το κατεργαζόμενο τεμάχιο λόγω της πρόσκρουσης ενός σωματιδίου, δίνονται από την εξίσωση:

$$W = \begin{cases} \dfrac{mV^2}{\Psi pk}\left[sin(2\alpha) \quad \dfrac{6}{k} sin^2(\alpha) \right] & tan\,\alpha \le \dfrac{k}{6} \\ \dfrac{mV^2}{\Psi pk}\left[\dfrac{k\,cos^2(\alpha)}{6} \right] & tan\,\alpha > \dfrac{k}{6} \end{cases} \tag{2.2}$$

όπου

- *k* είναι ο λόγος των κάθετων προς τις οριζόντιες συνιστώσες της δύναμης,

- Ψ είναι ο λόγος της επιφάνειας επαφής l προς το βάθος κοπής y_t όπως φαίνεται στο σχήμα 2.9,
- p είναι η ροή τάσης (flow stress) του κατεργαζόμενου υλικού και
- W είναι ο συνολικός όγκος του υλικού του στόχου που αφαιρείται.



Σύμφωνα με τον Finnie για τον υπολογισμό του όγκου του υλικού που αφαιρείται από ένα σωματίδιο μάζας m, με υψηλή ταχύτητα V που προσκρούει σε κατεργαζόμενη επιφάνεια υπό γωνία α, απαιτείται ο προσδιορισμός της επιφάνειας επαφής l και του βάθους κοπής y_t

Σχήμα 2.9: Μοντέλο διάβρωσης κατά Finnie

Ο συνολικός όγκος που αφαιρείται μετά από πολλαπλές κρούσεις σωματιδίων που έχουν συνολική μάζα M ορίζεται ως:

$$W = \begin{cases} c\dfrac{MV^2}{\Psi pk}\left[\sin(2\alpha) - \dfrac{6}{k}\sin^2(\alpha)\right] & \tan\alpha \le \dfrac{k}{6} \\ c\dfrac{MV^2}{\Psi pk}\left[\dfrac{k\cos^2(\alpha)}{6}\right] & \tan\alpha > \dfrac{k}{6} \end{cases} \tag{2.3}$$

Η σταθερά c χρησιμοποιείται σαν αντισταθμιστικός παράγοντας καθώς δεν ακολουθούν όλα τα σωματίδια το ιδανικό μοντέλο (κάποια σωματίδια συγκρούονται μεταξύ τους ή θρυμματίζονται κατά τη διάρκεια της διάβρωσης).

Παρόλο που το μοντέλο του Finnie είναι υπεραπλουστευμένο και σχετικά παλιό, θεωρείται σαν ο θεμέλιος λίθος στη μοντελοποίηση της διαδικασίας διάβρωσης και παρέχει τη βάση για τις μέλλουσες μοντελοποιήσεις της διαδικασίας. Το μοντέλο αυτό ισχύει μόνο για ελατά υλικά και δεν περιλαμβάνει την όποια συμπεριφορά θραύσης του υλικού.

Αργότερα (1963) ο **Bitter** /14,110/, πρότεινε ότι η απώλεια υλικού πρέπει να υπολογίζεται ως το άθροισμα του αφαιρούμενου υλικού που χάνεται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης W_D (θεωρώντας ότι το επιφανειακό στρώμα του τεμαχίου καταστρέφεται και αρχίζουν και αφαιρούνται τμήματά του, όταν κατά την πρόσκρουση υπερβαίνεται το όριο ελαστικότητας) και του αφαιρούμενου υλικού που χάνεται λόγω κοπής W_C (θεωρώντας ότι το σωματίδιο χτυπά το στόχο προκαλώντας εκδορές στην επιφάνεια του υλικού του στόχου). Ο Bitter χρησιμοποίησε μια προσέγγιση βασισμένη στην θεωρία επιφανειακών τάσεων κατά Hertz σε συνδυασμό με την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας. Υπέθεσε ότι η διάβρωση λόγω πλαστικής παραμόρφωσης και η διάβρωση λόγω κοπής συμβαίνουν ταυτόχρονα και τα αποτελέσματά τους μπορούν να υπερτεθούν. Ο Bitter εισήγαγε επίσης την έννοια του κατωφλίου ταχύτητας, σύμφωνα με την οποία ένα σωματίδιο δεν μπορεί να διαβρώσει την κατεργαζόμενη επιφάνεια, αν η ταχύτητά του είναι μικρότερη από την ταχύτητα κατωφλίου V_{el}.

Η ταχύτητα του σωματιδίου V μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, μία κάθετη στην επιφάνεια του σώματος στο οποίο προσπίπτει και μία εφαπτόμενη στην επιφάνειά του σώματος αυτού. Η κάθετη συνιστώσα είναι υπεύθυνη για την εισχώρηση του σωματιδίου στην επιφάνεια του σώματος ενώ η εφαπτόμενη συνιστώσα προκαλεί τις εκδορές σε αυτήν. Ανάλογα με το αν η εφαπτόμενη συνιστώσα της ταχύτητας μηδενίζεται ή όχι κατά τη διάρκεια της κρούσης, μπορούν να αναπτυχθούν δύο εκφράσεις για τον υπολογισμό του αφαιρούμενου όγκου. Έτσι, η συνολική φθορά είναι το άθροισμα της φθοράς λόγω συμπεριφοράς θραύσης (brittle wear - deformation wear) και της φθοράς λόγω συμπεριφοράς σύμφωνα με αυτήν των όλκιμων υλικών (ductile wear - cutting wear).

Η φθορά λόγω συμπεριφοράς θραύσης, δηλαδή η φθορά λόγω παραμόρφωσης (**deformation wear**) υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$W_d = \begin{cases} \dfrac{M\left[V \sin a - V_{el}\right]^2}{2\varepsilon_b} & V \sin a > V_{el} \\ 0 & V \sin a < V_{el} \end{cases} \tag{2.4}$$

όπου

- a είναι η γωνία πρόσκρουσης,
- ε_b είναι ένας παράγοντας της φθοράς λόγω παραμόρφωσης (η εύρεσή του γίνεται με πειραματικό τρόπο) και
- V_{el} είναι η ταχύτητα κατωφλίου (ταχύτητα κατά την κρούση η οποία μόλις αγγίζει το όριο ελαστικότητας του υλικού).

Η V_{el} μπορεί να υπολογιστεί από τη θεωρία επιφανειακών τάσεων κατά Hertz χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$V_{el} = \frac{1.54\sigma_y^{5/2}}{\sqrt{\rho_p}}\left[\frac{1-v_p^2}{E_p} + \frac{1-v_t^2}{E_t}\right] \tag{2.5}$$

όπου

- σ_y είναι το όριο ελαστικού φορτίου,
- ρ_p είναι η πυκνότητα του σωματιδίου,
- v_p και v_t είναι οι λόγοι Poisson, και
- E_p και E_t είναι τα όρια ελαστικότητας του υλικού του σωματιδίου και του στόχου αντίστοιχα.

Η ταχύτητα κατωφλίου μπορεί να υπολογιστεί από την προσεγγιστική ταχύτητα V και την ταχύτητα αναπήδησης V_2 όπως φαίνεται στην εξίσωση:

$$V_2 = \sqrt{2 \cdot V \cdot V_{el} - V_{el}^2} \tag{2.6}$$

Για τη φθορά λόγω συμπεριφοράς σύμφωνα με αυτήν των όλκιμων υλικών (**ductile wear - cutting wear mode**), ο Bitter υπολογίζει τον αφαιρούμενο όγκο όπως περιγράφεται στην εξίσωση:

$$W_c = \begin{cases} \dfrac{2MC'[V\sin\alpha - V_{el}]^2}{\sqrt{V\sin\alpha}} \times \left[V\cos\alpha - \dfrac{C'[V\sin\alpha - V_{el}]^2}{\sqrt{V\sin\alpha}}\varphi_c\right] & \alpha \le \alpha_0 \\ \dfrac{M\left\{V^2\cos^2\alpha - K_1[V\sin a - V_{el}]^{3/2}\right\}}{2\varphi_c} & \alpha \ge \alpha_0 \end{cases} \tag{2.7}$$

όπου φ_c είναι ένας συντελεστής φθοράς που εξαρτάται από το υλικό και βρίσκεται με πειραματικό τρόπο και C', K_1 είναι σταθερές που ορίζονται από τις εξισώσεις:

$$C' = \frac{0.288}{\sigma_y}\sqrt[4]{\frac{\rho_p}{\sigma_y}} \tag{2.8}$$

$$K_1 = 0.82\sigma_y^2\sqrt[4]{\frac{\sigma_y}{p_p}}\left[\frac{1-v_p^2}{E_p} + \frac{1-v_t^2}{E_t}\right] \tag{2.9}$$

η γωνία α υπολογίζεται από την εξίσωση (2.3).

Η εφαρμογή του μοντέλου Bitter απαιτεί τη γνώση των δύο συντελεστών φθοράς φ_c και ε_b οι οποίοι ορίζονται πειραματικά. Όμως αυτοί οι δύο συντελεστές εξαρτώνται από άλλες παραμέτρους όπως ταχύτητα σωματιδίου, μέγεθος και υλικό σωματιδίου, οπότε απαιτείται πειραματικός προσδιορισμός των συντελεστών αυτών για κάθε ομάδα παραμέτρων. Ο Bitter ήταν ο πρώτος που εξέτασε την συμπεριφορά λόγω θραύσης και στη συνέχεια διάφορα μοντέλα ακολούθησαν τις αρχές που έθεσε ο Bitter.

Έτσι, το μοντέλο διάβρωσης των **Neilson και Gilchrist (1968**) /111/ απλοποίησε το μοντέλο του Bitter υποθέτοντας ένα απλοποιημένο μοντέλο διάβρωσης όλκιμων υλικών και διατηρώντας ταυτόχρονα το μοντέλο του Bitter για όλκιμα υλικά:

$$W_c = \begin{cases} \dfrac{2MV^2\cos^2(\alpha)}{2\varphi_c} + \dfrac{M[V\sin(\alpha) - V_{el}]^2}{2\varepsilon_b} & \alpha \ge \alpha_0 \\ \dfrac{MV^2\cos^2(\alpha)\sin(n\alpha)}{2\varphi_c} + \dfrac{M[V\sin(\alpha) - V_{el}]^2}{2\varepsilon_b} & \alpha < \alpha_0 \end{cases} \tag{2.10}$$

Παρόλα αυτά, η προσπάθεια των Neilson και Gilchrist για απλοποίηση του μοντέλου του Bitter δεν παρέχει κανενός είδους ελαχιστοποίηση της πειραματικής εργασίας που απαιτείται για τον καθορισμό των σταθερών φ_c και ε_b.

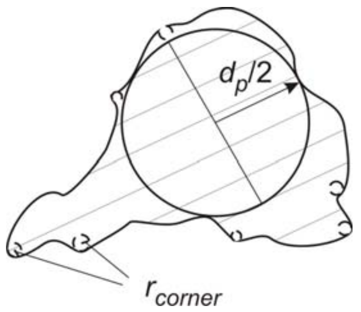
Το πλέον γνωστό μοντέλο προσομοίωσης κοπής εύθραυστων υλικών προτάθηκε από τον **Hashish** (1989) /112/, σύμφωνα με το οποίο τροποποιήθηκε το μοντέλο διάβρωσης του Finnie ώστε να περιλαμβάνει την επίδραση του σχήματος του σωματιδίου που προσκρούει στο στόχο. Συνεπώς, το μοντέλο διάβρωσης του Hashish /112,113/ λαμβάνει υπόψη και τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά των κόκκων. Ο αφαιρούμενος όγκος υλικού για μικρές γωνίες πρόσκρουσης, δίνεται από τη σχέση:

$$W = \frac{7}{\pi}\frac{M}{\rho_p}\left(\frac{V}{C_k}\right)^{2.5} sin(2\alpha)\sqrt{sin\,\alpha} \tag{2.11}$$

Η παράμετρος C_k ορίζεται ως εξής:

$$C_k = \sqrt{\frac{3\sigma_f R_f^{3/5}}{\rho_p}} \tag{2.12}$$

όπου R_f είναι ο συντελεστής σφαιρικότητας του σωματιδίου. Ο συντελεστής σφαιρικότητας ορίζεται ως το πηλίκο της μέσης τιμής της διαμέτρου των γωνιών του σωματιδίου, προς τη διάμετρο του μέγιστου εγγραφόμενου κύκλου, όπως γίνεται φανερό παρακάτω από το σχήμα 2.10.



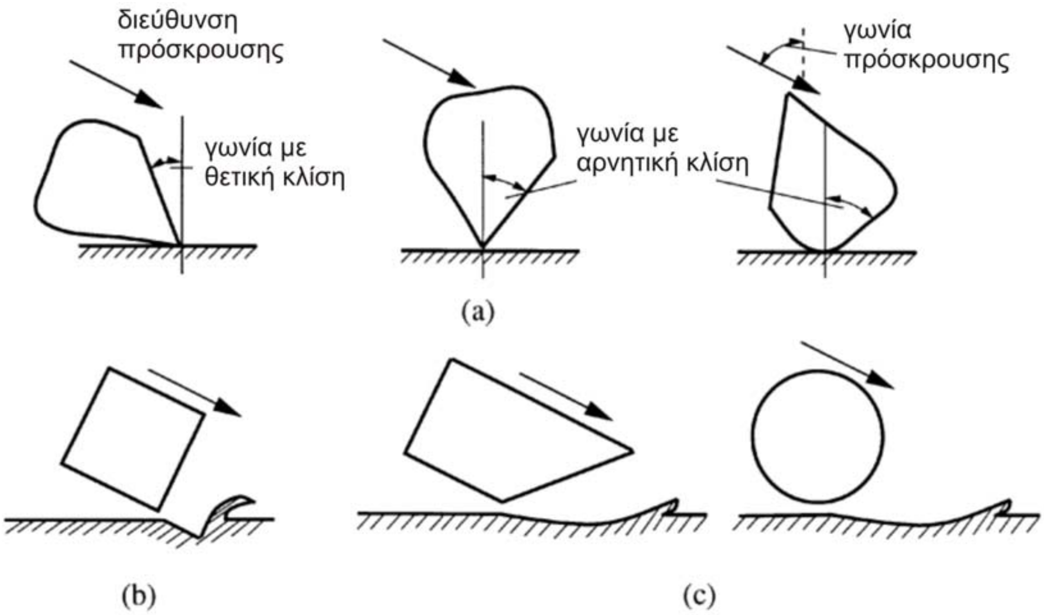
$$R_f = \frac{\sum\left(\frac{2\cdot r_{corner}}{d_p}\right)}{N_{corner}}$$

Σχήμα 2.10: Ορισμός συντελεστή σφαιρικότητας

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του μοντέλου αυτού είναι ότι δεν απαιτεί πειραματικές σταθερές και επιπλέον είναι το μοναδικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του το σχήμα των σωματιδίων. Το μοντέλο αυτό όμως βασίζεται στη συμπεριφορά των όλκιμων υλικών και έτσι είναι κατάλληλο μόνο για μικρές γωνίες πρόσκρουσης και μόνο για όλκιμα υλικά.

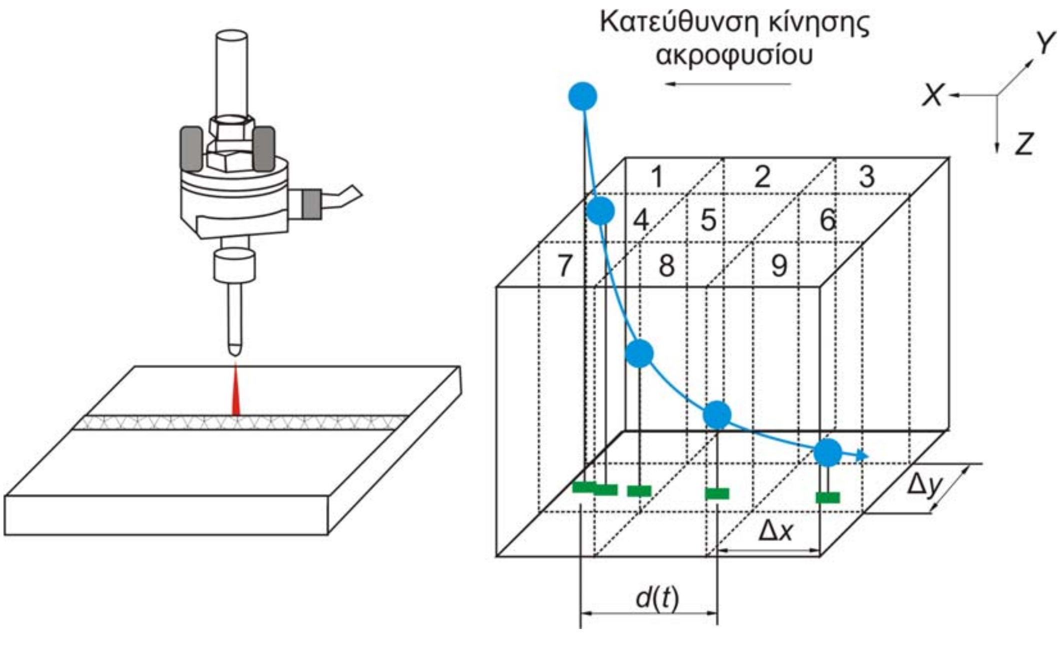
Η ανάπτυξη του μοντέλου του **Hashish** (1995) /114/ αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα εξέλιξης, καθώς διαχώρισε τον υπολογισμό του βάθους κοπής σε δύο περιοχές: τη λεία περιοχή κοπής (cutting wear zone) και την τραχιά περιοχή κοπής (deformation wear zone).

Για πρόσκρουση σφαιρικών σωματιδίων σε όλκιμα υλικά, οι **Hutchings και Winter** /115/ θεώρησαν ότι θα συμβεί αυλάκωμα (ploughing) του υλικού του στόχου δημιουργώντας ταυτόχρονα χείλος στην περιφέρεια του κρατήρα το οποίο διαλύεται με τις επόμενες προσκρούσεις. Επίσης αργότερα απέδειξαν ότι τα σωματίδια με γωνίες (μη σφαιρικά) αφαιρούν υλικό με δύο τρόπους: (1) δημιουργώντας **αυλάκωμα (ploughing)** και (2) εμφανίζοντας **μικρο-κοπή (micro cutting).** Στη μικρο-κοπή το υλικό αφαιρείται διαμέσου της δημιουργίας ρινισμάτων από τις κοφτερές άκρες των μη-σφαιρικών σωματιδίων που προσπίπτουν υπό μικρές γωνίες.



Σχήμα 2.11: (a) Η γωνία με θετική κλίση είναι η γωνία ανάμεσα στην εμπρόσθια επιφάνεια του σωματιδίου και την κατακόρυφη στην επιφάνεια του στόχου. Οι τρόποι παραμόρφωσης που παρατηρήθηκαν από τους Hutchings και Winter: (b) μικρο-κοπή (cutting deformation). (c) αυλάκωμα (ploughing deformation)

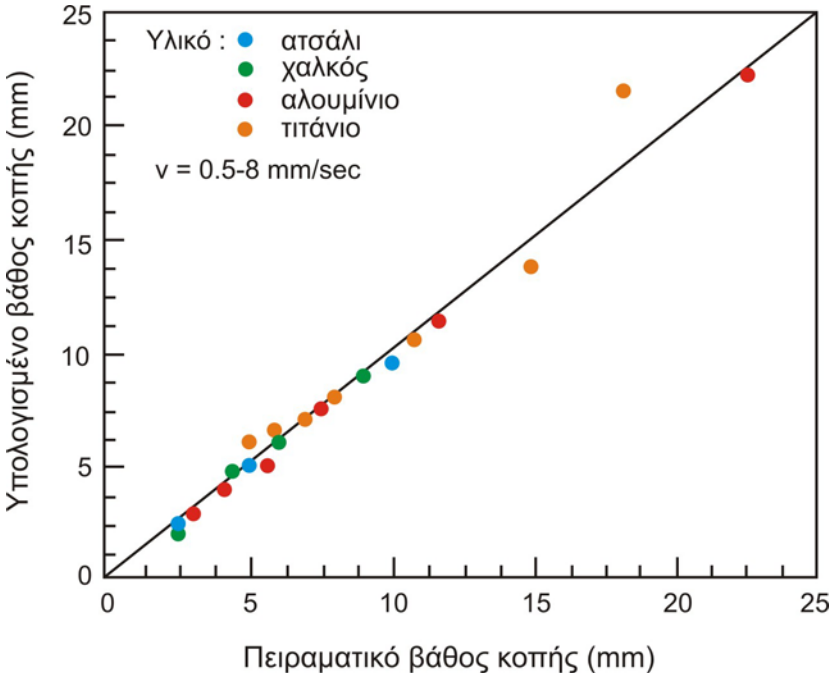
Οι **Yong** και **Kovacevic** /20,73/ ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο για την περίπτωση του Abrasive Water-Jet που καλύπτει αρκετές από τις σημαντικές παραμέτρους της κατεργασίας αυτής.



Σχήμα 2.12: Μοντέλο των Yong και Kovacevic

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, τρία καρτεσιανά συστήματα συντεταγμένων συνδέονται με εξισώσεις μετασχηματισμού και περιγράφουν την κινηματική των λειαντικών κόκκων της δέσμης. Στο σχήμα 2.12 παρουσιάζεται η προτεινόμενη διακριτοποίηση της κατεργαζόμενης επιφάνειας. Κάθε τμήμα της διακριτοποίησης λειτουργεί ως “κελί μνήμης” (δυναμικό φαινόμενο – συσχέτιση με γειτονικά σημεία) για την καταγραφή των δεδομένων της διαδικασίας κοπής με στόχο τον τελικό υπολογισμό του βάθους τομής.

Οι πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν από τους Yong και Kovacevic /20,73/, απέδειξαν αρκετά ικανοποιητική σύγκλιση με τα αντίστοιχα θεωρητικά αποτελέσματα, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2.13 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.13: Επαλήθευση του μοντέλου Yong και Kovacevic

Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η γραφική παράσταση των πειραματικών τιμών και των τιμών του βάθους κοπής που βασίζονται σε θεωρητικές προβλέψεις. Τα υλικά του στόχου που μελετήθηκαν ως προς το βάθος κοπής ήταν ατσάλι, χαλκός, αλουμίνιο και τιτάνιο και η ταχύτητα πρόωσής τους κυμαινόταν από 0.5 έως 8 mm/sec. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα τα περισσότερα σημεία της γραφικής παράστασης βρίσκονται επί της ευθείας ενώ κάποια σημεία αποκλίνουν ελάχιστα από αυτήν, γεγονός το οποίο αποδεικνύει την επαλήθευση του μοντέλου των Yong και Kovacevic.

Ένα απλό μοντέλο θραύσης βασισμένο στις αρχές της μηχανικής, υιοθετήθηκε από τους **Momber** και **Kovacevic** (1994) /116/ με σκοπό να περιγραφεί ακριβέστερα ο δευτερογενής θρυμματισμός εύθραυστων υλικών κατά την κοπή τους με Water Jet.

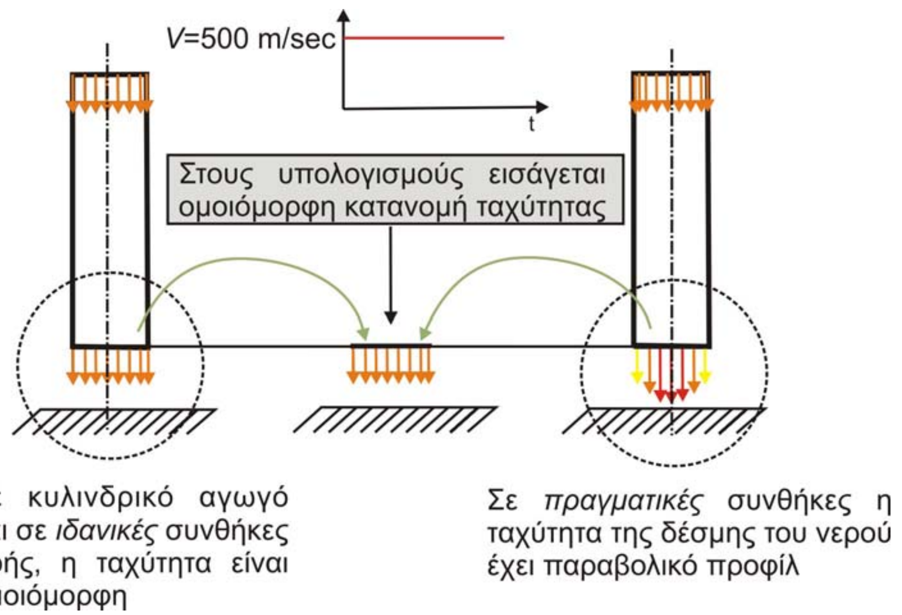
Οι μελέτες των **Zeng** και **Kim** (1996) /8,9/, έδειξαν ότι οι μηχανισμοί διάβρωσης που σχετίζονται με την κοπή και τη διάτρηση με AWJ σε πολυκρυσταλλικά κεραμικά, χαρακτηρίζονται από πλαστική ροή και διασπορά θραύσης στο εσωτερικό του υλικού λόγω των παραγόμενων κυματικών τάσεων που αναπτύσσονται κατά την πρόσκρουση.

Το βασικότερο μειονέκτημα των προαναφερθέντων προσεγγίσεων, είναι ότι αδυνατούν να περιγράψουν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση δέσμης-στόχου. Το θέμα της κατανόησης των φαινομένων αυτών καλούνται να μελετήσουν οι πρόσφατες μελέτες χρησιμοποιώντας εξειδικευμένες αριθμητικές μεθόδους όπως είναι η προσομοίωση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

2.7.4 Προσομοίωση με Πεπερασμένα στοιχεία

Οι **Mabrouki** *et al.* (2000) /117/ πρότειναν τη χρήση της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη της διάβρωσης που προκαλεί η πρόσκρουση της συνεχούς δέσμης Water Jet σε μεταλλικά φύλλα, με ή χωρίς επίστρωση (περίπτωση καθαρισμού με WJ). Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που ανέπτυξαν βασίστηκε στον κώδικα Ls-Dyna3D (version 930) /118/, με σκοπό τη λεπτομερή διερεύνηση της συμπεριφοράς του υλικού που υπόκειται σε πρόσκρουση δέσμης Water Jet. Τα θεωρητικά τους αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν τόσο από αντίστοιχα πειραματικά που διεξήγαγαν οι ίδιοι, όσο και από ήδη δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα.

Στην πρώτη περίπτωση που μελέτησαν προσκρούει δέσμη καθαρού νερού διαμέτρου 0.3 mm με ταχύτητα 500 m/sec από απόσταση 30 mm επί ενός φύλλου αλουμινίου A2024T3 πάχους 1 mm. Κατά την αριθμητική επίλυση του προβλήματος αυτού, θεωρήθηκε προσεγγιστικά ότι για μικρή απόσταση έως 30 mm από το στόχο, το προφίλ ταχύτητας της δέσμης νερού είναι ομοιόμορφο, με τιμή αυτήν του πυρήνα της δέσμης (σχήμα 2.14).



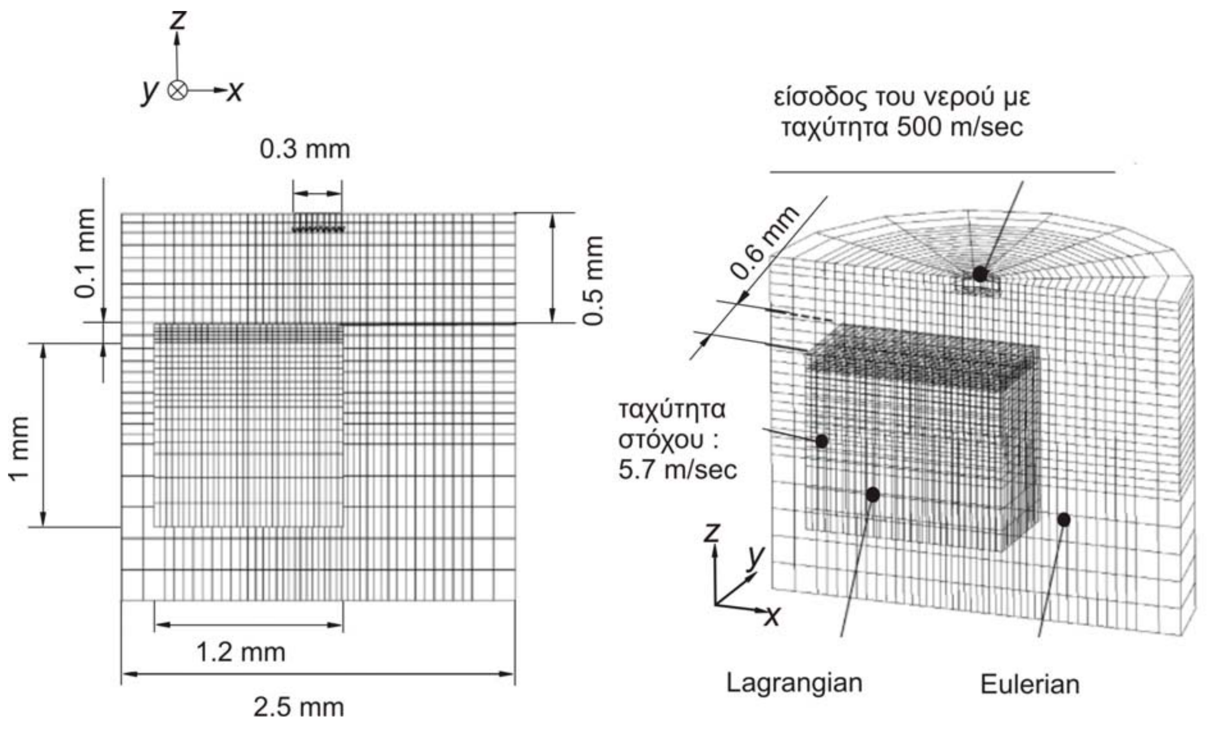
Σχήμα 2.14: Προσέγγιση ομοιόμορφης ταχύτητας στο μοντέλο προσομοίωσης Water Jet των Mabrouki *et al*.

Με στόχο την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους, θεωρήθηκε ότι η απόσταση από την έξοδο του ακροφυσίου έως το στόχο ήταν ίση με 0.5 mm. Η εν λόγω θεώρηση δεν επέφερε σημαντικές επιπτώσεις στη γεωμετρία της δέσμης, καθώς η επίδραση του αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ ακροφυσίου και στόχου ήταν πολύ μικρή. Κατά την αριθμητική επίλυση του προβλήματος υπολογίστηκαν:

(α) η κατανομή της μάζας του νερού στον αέρα (κατά την κίνησή του έως το στόχο),
(β) οι ταχύτητες του νερού στον αέρα, και
(γ) οι αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις στο στόχο.

Στη δεύτερη περίπτωση μελετάται ακριβώς το ίδιο πρόβλημα, με φύλλο αλουμινίου A2024T3 πάχους 1 mm με επίστρωση πολυουρεθάνης πάχους 100 μm. Κατά την αριθμητική επίλυση του προβλήματος υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο στόχο, ενώ η αποκόλληση στοιχείων του στόχου λαμβάνει χώρα όταν οι αντίστοιχες αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις υπερβούν το **όριο παραμόρφωσης**.

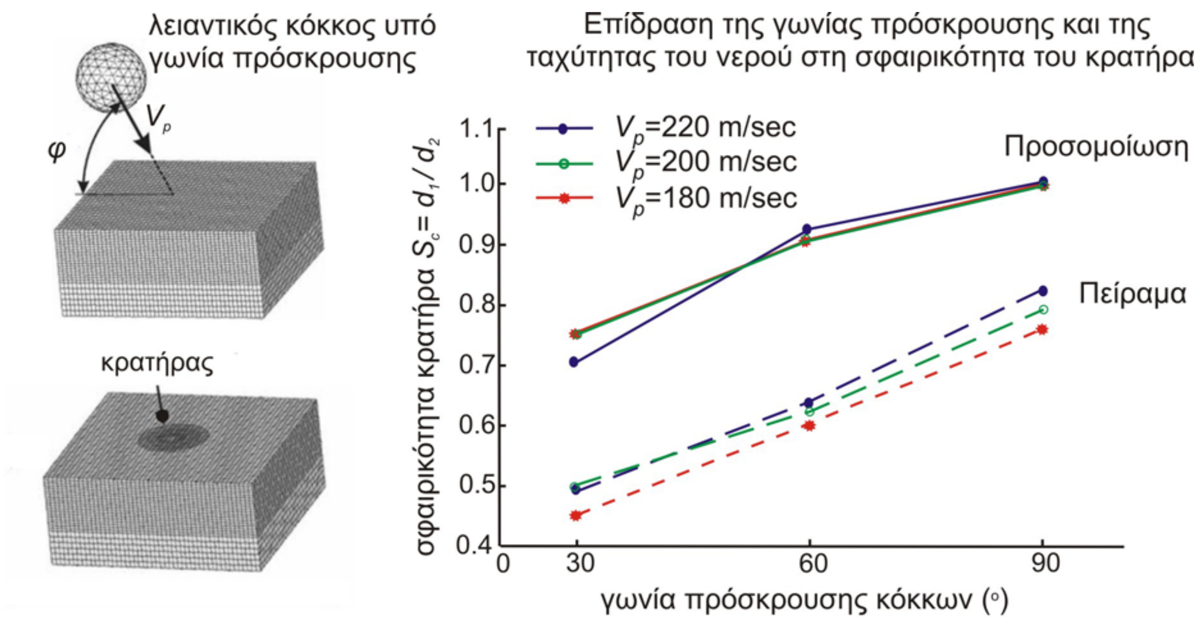
Στην εργασία των **Mabrouki** και **Raissi (2002)** /119/ παρουσιάστηκε ένα αριθμητικό μοντέλο όπως φαίνεται στο σχήμα 2.15 για την επίλυση του οποίου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Ls-Dyna3D, με στόχο τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης δέσμης-στόχου επί κινούμενου και επιστρωμένου στόχου (επίστρωση πολυουρεθάνης). Οι παράμετροι του προβλήματος (γεωμετρία, ταχύτητες, κ.λπ.) ήταν οι ίδιες με αυτές της εργασίας **Mabrouki** *et al.* (1999) /117/ με επιπλέον δεδομένο την ταχύτητα πρόωσης – 5.7 m/sec – του κατεργαζόμενου τεμαχίου.



Σχήμα 2.15: Τρισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης Water Jet των Mabrouki και Raissi

Η σειρά πειραμάτων που διεξήχθη από τους **Wu** και **Kim** (1995) /120/, είχε ως στόχο τη βαθύτερη κατανόηση της συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων της κατεργασίας – WJ επί κινούμενου μεταλλικού στόχου – και του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού. Κατά την έρευνά τους, οι **Wu** και **Kim** κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων στο σύστημα WJ και η βελτιστοποίηση της διαδικασίας, μπορεί να επιτευχθεί μόνον διαμέσου της κατανόησης του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού.

Οι **M. Junkar** *et al.* (2004) /121/ χρησιμοποίησαν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της διαδικασίας Abrasive Water-Jet (AWJ). Κατά την αριθμητική επίλυση του προβλήματος πρόσκρουσης **ενός** λειαντικού κόκκου επί ανοξείδωτου χάλυβα, μελέτησαν την επίδραση της ταχύτητας και της γωνίας πρόσκρουσης του κόκκου στη γεωμετρία του κρατήρα που δημιουργείται. Τα αποτελέσματα (μέτρηση σφαιρικότητας κρατήρα) της αριθμητικής επίλυσης – σύμφωνα με τους ίδιους συγγραφείς – βρίσκονταν σε ικανοποιητική συμφωνία με τα αντίστοιχα πειραματικά για ταχύτητες κόκκου 180, 200 και 220 m/sec και γωνίες πρόσκρουσης 30°, 60° και 90°, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.16 και στον πίνακα 2.1.

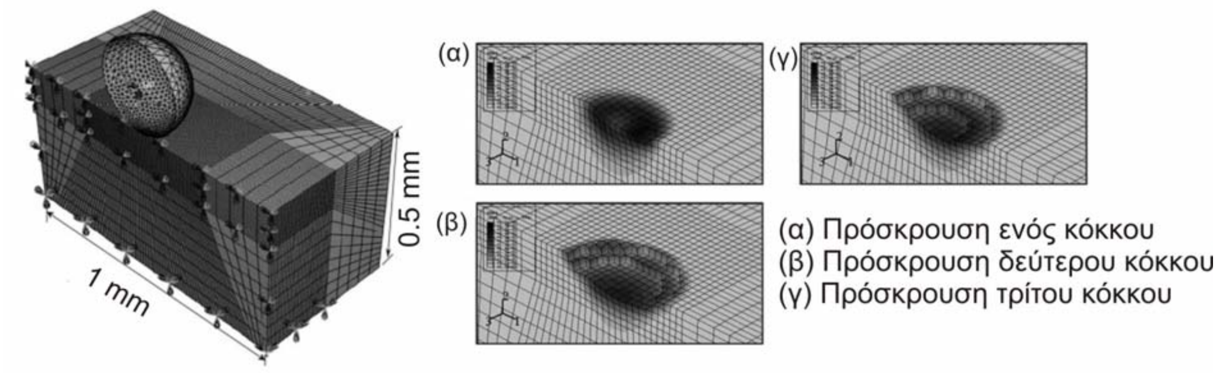


Σχήμα 2.16: Τρισδιάστατο μοντέλο των M. Junkar *et al.* για την προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία της πρόσκρουσης κόκκου σε χάλυβα

	Γωνία (°)	30°	60°	90°
V_p = 180 m/s	Πειραματική σφαιρικότητα (*P*=200 Mpa)	0.4525	0.6034	0.7595
	Σφαιρικότητα από προσομοίωση	0.7530	0.9058	1.0000
V_p = 200 m/s	Πειραματική σφαιρικότητα (*P*=250 Mpa)	0.4984	0.6239	0.7933
	Σφαιρικότητα από προσομοίωση	0.7479	0.9058	1.0000
V_p = 220 m/s	Πειραματική σφαιρικότητα (*P*=300 Mpa)	0.4922	0.6375	0.8254
	Σφαιρικότητα από προσομοίωση	0.7051	0.9242	1.0000

Πίνακας 2.1 : Σύγκριση των τιμών της σφαιρικότητας από προσομοίωση και από πείραμα των **M. Junkar** *et al.* /121/

Οι **M.S. ElTobgy, E. Ng, M.A. Elbestawi (2005)** /122/, ανέπτυξαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση του AWJ και της διαδικασίας διάβρωσης στις τρεις διαστάσεις για την περίπτωση κράματος τιτανίου (Ti-6Al-4V). Η αριθμητική επίλυση βασίστηκε στο λογισμικό Abaqus/Explicit Ver. 6.3. Ο μηχανισμός διάβρωσης που πρότειναν χρησιμοποιεί τρεις **μόνο** κόκκους λειαντικού μέσου. Σύμφωνα με αυτόν, στις αρχικές φάσεις επιτυγχάνεται πλαστική παραμόρφωση στην επιφάνεια του υλικού χωρίς την αφαίρεση στοιχείων, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό υψηλή καταπόνηση (συγκέντρωση τάσεων). Στη συνέχεια, οι κόκκοι που ακολουθούν αφαιρούν στοιχεία από την καταπονημένη κατεργαζόμενη επιφάνεια, ενώ ο ρυθμός διάβρωσης φαίνεται να σταθεροποιείται μετά την πτώση τριών κόκκων, όπως φαίνεται στα σχήματα 2.17, 2.18. Παρά το σχετικά μικρό αριθμό (μόνο τρεις) λειαντικών κόκκων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη αυτή, επιτυγχάνεται βελτίωση σε σχέση με προηγούμενες μελέτες που ελάμβαναν υπόψη μόνο έναν κόκκο.

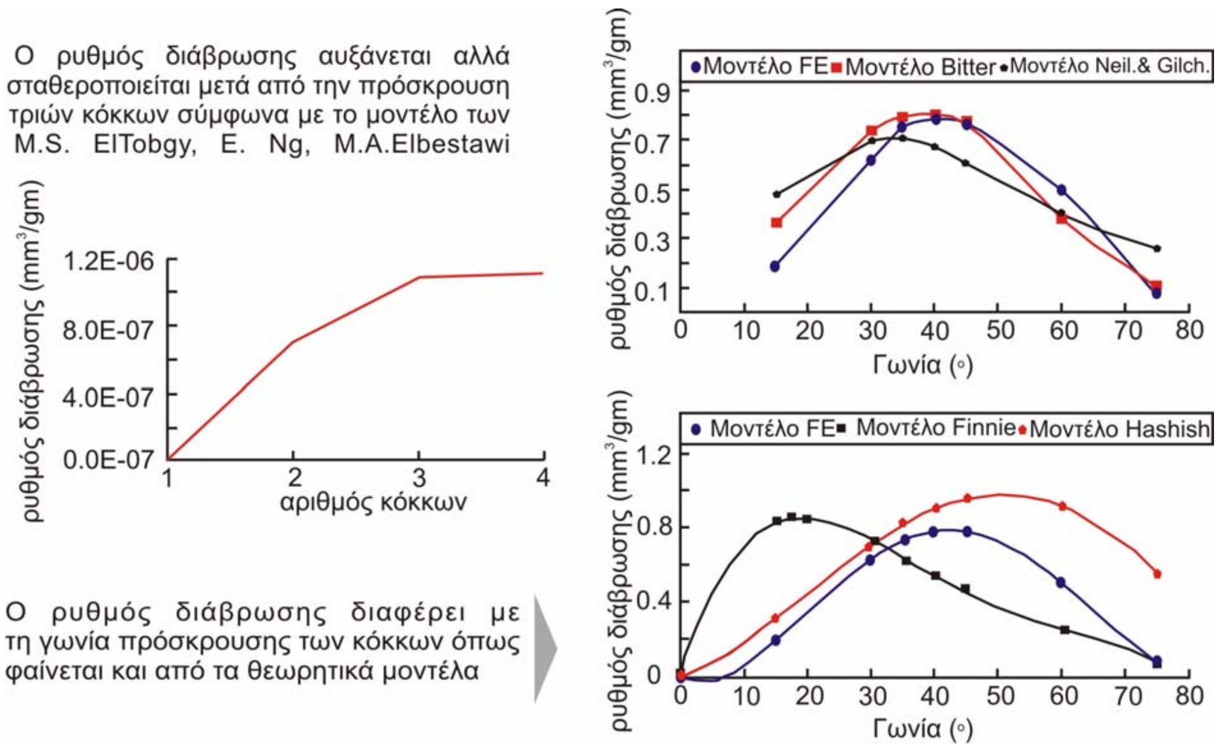


Σχήμα 2.17: Τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων των M.S. ElTobgy, E. Ng, M.A. Elbestawi για την προσομοίωση της πρόσκρουσης κόκκων σε μεταλλικό στόχο

Στο σχήμα 2.18 παρουσιάζεται ο ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει του αριθμού των κόκκων που προσπίπτουν στον στόχο και έχει πολύ μικρές τιμές για κάθετη πρόσκρουση στο στόχο.

Όμως ο ρυθμός διάβρωσης είναι διαφορετικός για διαφορετικές γωνίες πρόσκρουσης των κόκκων. Έτσι, στο δεξιό τμήμα του ίδιου σχήματος παρουσιάζεται ο ρυθμός διάβρωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης των κόκκων, σύμφωνα με το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων των M.S. ElTobgy, E. Ng, M.A. Elbestawi ενώ ταυτόχρονα συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου με τα αντίστοιχα θεωρητικά μοντέλα πρόβλεψης των Bitter, Neilson & Gilchrist, Finnie και Hashish.

Η καμπύλη του ρυθμού διάβρωσης συναρτήσει της γωνίας χαρακτηρίζεται από μια παραβολική τάση (trend) όπως φαίνεται από τις γραφικές παραστάσεις στο σχήμα 2.17. Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων βρίσκεται σε συμφωνία με το μοντέλο του Hashish για μικρές γωνίες ενώ για μεγάλες γωνίες βρίσκεται σε μεγαλύτερη συμφωνία με το μοντέλο του Finnie. Επιπλέον, τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τα μοντέλα πρόβλεψης των Bitter, Neilson & Gilchrist. Πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται, επίσης, σε αρκετά καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα του μοντέλου προσομοίωσης.



Σχήμα 2.18: Τρισδιάστατο μοντέλο των M.S. ElTobgy, E. Ng, M.A. Elbestawi -Σύγκριση του ρυθμού διάβρωσης με θεωρητικά μοντέλα

2.8 Στόχοι και συνεισφορές της διατριβής

Το **πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας**, πραγματεύεται τη διεξοδική μελέτη της διαδικασίας κοπής WJ επί ακίνητου στόχου. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο επιλύθηκε με το λογισμικό Ls-Dyna3D. Η **βασική συμβολή** της εργασίας αυτής στην καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού αφαίρεσης υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, προκύπτει από την **επακριβή μοντελοποίηση** της κατεργασίας η οποία διαχωρίζεται σε τρεις επιμέρους φάσεις:

(α) Μοντελοποίηση της ροής νερού εντός του ακροφυσίου,

(β) Μοντελοποίηση της ροής νερού εντός του αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ εξόδου του ακροφυσίου και του στόχου,

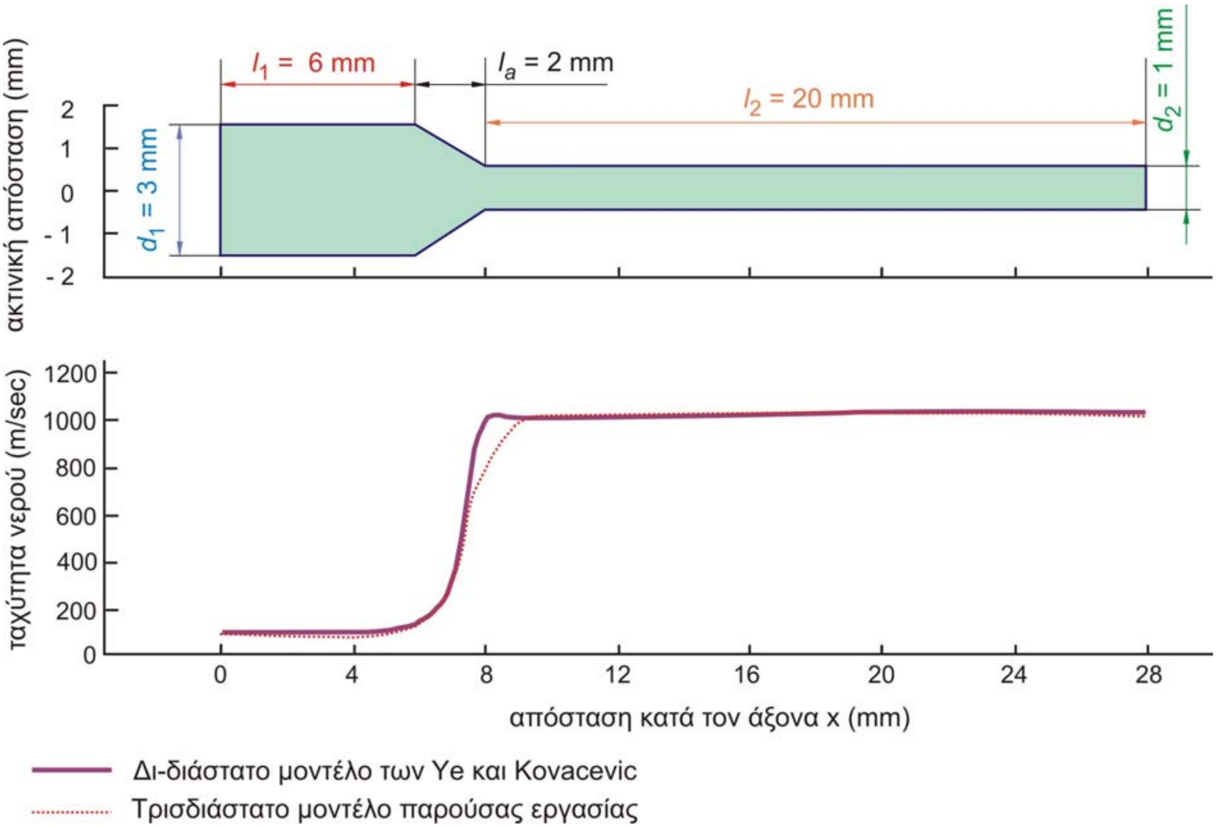
(γ) Μοντελοποίηση της πρόσκρουσης του νερού στο στόχο.

Το αποτέλεσμα της αναπτυχθείσας διαδικασίας μοντελοποίησης, είναι ο επακριβής υπολογισμός του προφίλ ταχυτήτων του νερού καθώς εξέρχεται από το ακροφύσιο, εξαλείφοντας την προσέγγιση των **Mabrouki** *et al.* (1999) /117/ (για ομοιόμορφο προφίλ ταχυτήτων) και η αύξηση της επιτυγχανόμενης ακρίβειας των αποτελεσμάτων της αριθμητικής επίλυσης.

Η γεωμετρία του ακροφυσίου που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της ροής του νερού εντός αυτού, είναι όμοια με αυτήν που προτάθηκε από τους **Ye** και **Kovacevic** (1999) /123/. Συγκεκριμένα, η διάμετρος και το μήκος του αρχικού τμήματος του ακροφυσίου είναι 3 mm και 6 mm αντίστοιχα, το μήκος του τμήματος επιτάχυνσης είναι 2 mm ενώ η διάμετρος και το μήκος του τμήματος εστίασης είναι 1 mm και 20 mm αντίστοιχα όπως φαίνεται στο <u>σχήμα</u>

2.19. Το μοντέλο που πρότειναν οι Ye και Kovacevic είναι δύο διαστάσεων, ενώ τα αποτελέσματά τους επιβεβαίωσαν ότι η επιτάχυνση της ροής συμβαίνει κυρίως στο στενό τμήμα εστίασης του ακροφυσίου, όπως αναφέρεται από τους **Momber** και **Kovacevic** /124/.

Στην γραφική παράσταση του σχήματος 2.19 απεικονίζεται η ταχύτητα συναρτήσει της αξονικής θέσης του ακροφυσίου οπότε και παρατηρείται η αύξηση της ταχύτητας από 100 m/sec σε 1000 m/sec περίπου, κατά την διέλευση του νερού από το τμήμα επιτάχυνσης του ακροφυσίου. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται για λόγους σύγκρισης και η ταχύτητα όπως αυτή υπολογίζεται από το τρισδιάστατο μοντέλο της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 2.19: Δι-διάστατο μοντέλο των Ye και Kovacevic για την προσομοίωση ροής εντός του Water Jet και σύγκριση με το μοντέλο της παρούσας εργασίας

Το **δεύτερο μέρος της παρούσας εργασίας**, συνιστάται στην αριθμητική επίλυση κατάλληλα ανεπτυγμένου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων – μέσω του λογισμικού Ls-Dyna3D – για την περίπτωση της κατεργασίας WJ επί κινούμενου στόχου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ροής εντός του ακροφυσίου που αποκτήθηκαν από το πρώτο μέρος της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιούνται και στο δεύτερο μέρος με στόχο την ακριβέστερη μαθηματική αναπαράσταση της διαδικασίας για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού διάβρωσης. Το πλάτος κοπής, όπως αυτό υπολογίζεται συναρτήσει της απόστασης από τον κινούμενο στόχο (κατεργαζόμενο τεμάχιο), επαληθεύεται ποιοτικά (αύξηση της απόστασης της δέσμης, συνεπάγεται αύξηση του πλάτους κοπής) από τα πειραματικά αποτελέσματα των **Wu** και **Kim** (1995) /120/, αλλά και ποσοτικά, όπως αποδείχτηκε από πειράματα που διεξήχθησαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας στην εταιρεία HYDROCUT και περιγράφονται στο Κεφάλαιο 5).

Στο **τρίτο μέρος της παρούσας εργασίας**, αναπτύσσεται και παρουσιάζεται ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της διαδικασίας AWJ επί ανοξείδωτου χάλυβα. Το παρόν μοντέλο επιλύεται με χρήση του λογισμικού Ls-Dyna3D, ενώ χρησιμοποιεί – για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία – **ικανό** αριθμό λειαντικών κόκκων με στόχο τον κατά το δυνατόν ακριβέστερο προσδιορισμό της μορφής του σχηματιζόμενου κρατήρα. Σε αντίθεση με το μοντέλο των **M.S. ElTobgy, E. Ng, M.A. Elbestawi (2005)** /122/ που χρησιμοποιεί 3 λειαντικούς κόκκους, τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου υποδεικνύουν ότι απαιτούνται τουλάχιστον δεκαπέντε (15) κόκκοι έως τη σταθεροποίηση της γεωμετρίας του κρατήρα.

3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

3.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μελέτη των φυσικών φαινομένων με χρήση σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων, αποτελείται από δύο βασικά στάδια:

α) Τη διατύπωση του φυσικού φαινομένου επί τη βάσει μαθηματικών εξισώσεων,
β) Την επίλυση του ανωτέρω μαθηματικού προβλήματος.

Στο στάδιο της διατύπωσης των μαθηματικών εξισώσεων γίνεται χρήση των όποιων παραδοχών και τυχόν απλοποιήσεων, με στόχο τη μείωση της πολυπλοκότητας του μαθηματικού προβλήματος. Σε πολλές περιπτώσεις, η επίλυση των μαθηματικών εξισώσεων που προκύπτουν χαρακτηρίζεται από αυξημένη δυσκολία, ενώ υπάρχουν και περιπτώσεις όπου η επίτευξη επακριβούς λύσης (λύση “κλειστής μορφής”), είναι αδύνατη. Στις περιπτώσεις αυτές, η διαδικασία της επίλυσης βασίζεται σε αριθμητικές μεθόδους, οι οποίες σε συνδυασμό με τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα οδηγούν στην επίτευξη της λύσης.

Σε προβλήματα μηχανικής, οι πλέον διαδεδομένες αριθμητικές μέθοδοι είναι η μέθοδος Rayleigh-Ritz /125/ και η μέθοδος Galerkin /125/. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων /126/ μπορεί να θεωρηθεί ως μια ειδική διατύπωση των μεθόδων Rayleigh-Ritz και Galerkin, η οποία όμως πλεονεκτεί σαφώς ως προς τις αρχικές διατυπώσεις των μεθόδων αυτών, λόγω των πλεονεκτημάτων που την χαρακτηρίζουν σε περιπτώσεις σύνθετων γεωμετριών, αλλά και της απλούστερης διατύπωσής της σε κώδικα για ηλεκτρονικό υπολογιστή (Η/Υ). Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων συνίσταται στην αντικατάσταση του σύνθετου αρχικού γεωμετρικού προβλήματος από ένα σύνολο απλούστερων δομικών στοιχείων, που ονομάζονται *πεπερασμένα στοιχεία*. Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα δημοφιλής, διότι /127/:

α) Περιγράφει οποιεσδήποτε οριακές συνθήκες,
β) Επιλύει προβλήματα με ασυνέχειες,
γ) Εφαρμόζεται για ισότροπα ή/και ανισότροπα υλικά,
δ) Αναπαριστά ελαστική, πλαστική και βισκοελαστική μηχανική συμπεριφορά,
ε) Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις στατικής ή/και δυναμικής φόρτισης.

Η ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και η χρήση της στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων του μηχανικού, συμβαδίζει άρρηκτα με την τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η εξέλιξη των Η/Υ με τις ολοένα μεγαλύτερες δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας εκτελέσεως αριθμητικών πράξεων, κατέστησε εφικτή την επίλυση – με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων – σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού, η λύση των οποίων θεωρείτο αδύνατη πριν μερικά χρόνια. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, αν και επινοήθηκε και εφαρμόστηκε αρχικά στη στατική ανάλυση φορέων, έχει πλέον σήμερα ευρεία εφαρμογή σε μεγάλο αριθμό προβλημάτων του μηχανικού, όπως για παράδειγμα στη ρευστομηχανική, στη μεταφορά θερμότητας, στην ακουστική, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην εμβιομηχανική, στη μορφική ανάλυση κατασκευών, στη μελέτη σύνθετων υλικών, κλπ.

Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων στη Ρευστομηχανική

Η βασική ιδιότητα που χαρακτηρίζει τα ρευστά είναι ότι προκαλείται σε αυτά κίνηση με την επιβολή – έστω και πολύ μικρών – διατμητικών τάσεων. Η μελέτη αυτής της κίνησης δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μικροσκοπικά, παρατηρώντας δηλαδή την κίνηση κάθε μορίου που απαρτίζει τη μάζα του ρευστού, διότι κάτι τέτοιο οδηγεί σε μεγάλο αριθμό εξισώσεων για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων ποσοτήτων.

Εναλλακτικά, η κίνηση του ρευστού μελετάται μακροσκοπικά επί τη βάσει της υπόθεσης "συνεχούς μέσου", σύμφωνα με την οποία απαιτείται η μελέτη τμημάτων (στοιχείων) ρευστού. Κάθε στοιχείο ρευστού, αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και με γειτονικά στοιχεία. Όλα τα στοιχεία έρχονται σε (απόλυτη) επαφή με τα γειτονικά τους, ώστε να ισχύει η υπόθεση του συνεχούς μέσου. Το σύνολο των στοιχείων του ρευστού συνθέτουν το συνολικό όγκο του ρευστού. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται δυνατή η εισαγωγή μακροσκοπικών μεγεθών για την περιγραφή των ιδιοτήτων του ρευστού, όπως πίεση, θερμοκρασία, πυκνότητα κ.λπ., τα οποία μεταβάλλονται συνεχώς εντός του όγκου του ρευστού. Εισάγεται δηλαδή *η έννοια της απεικόνισης της ροής ως πεδίο*, εξαρτώμενο από τις χωρικές συντεταγμένες και το χρόνο (για μη μόνιμες ροές).

Η μελέτη της κίνησης ενός στοιχείου του ρευστού μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρόπο αντίστοιχο της κίνησης των στερεών σωμάτων, δηλαδή με βάση την ταχύτητα και την επιτάχυνσή του. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο βασικές μέθοδοι απεικόνισης της κίνησης ρευστού, βασιζόμενες (και οι δύο) στην υπόθεση του συνεχούς μέσου.

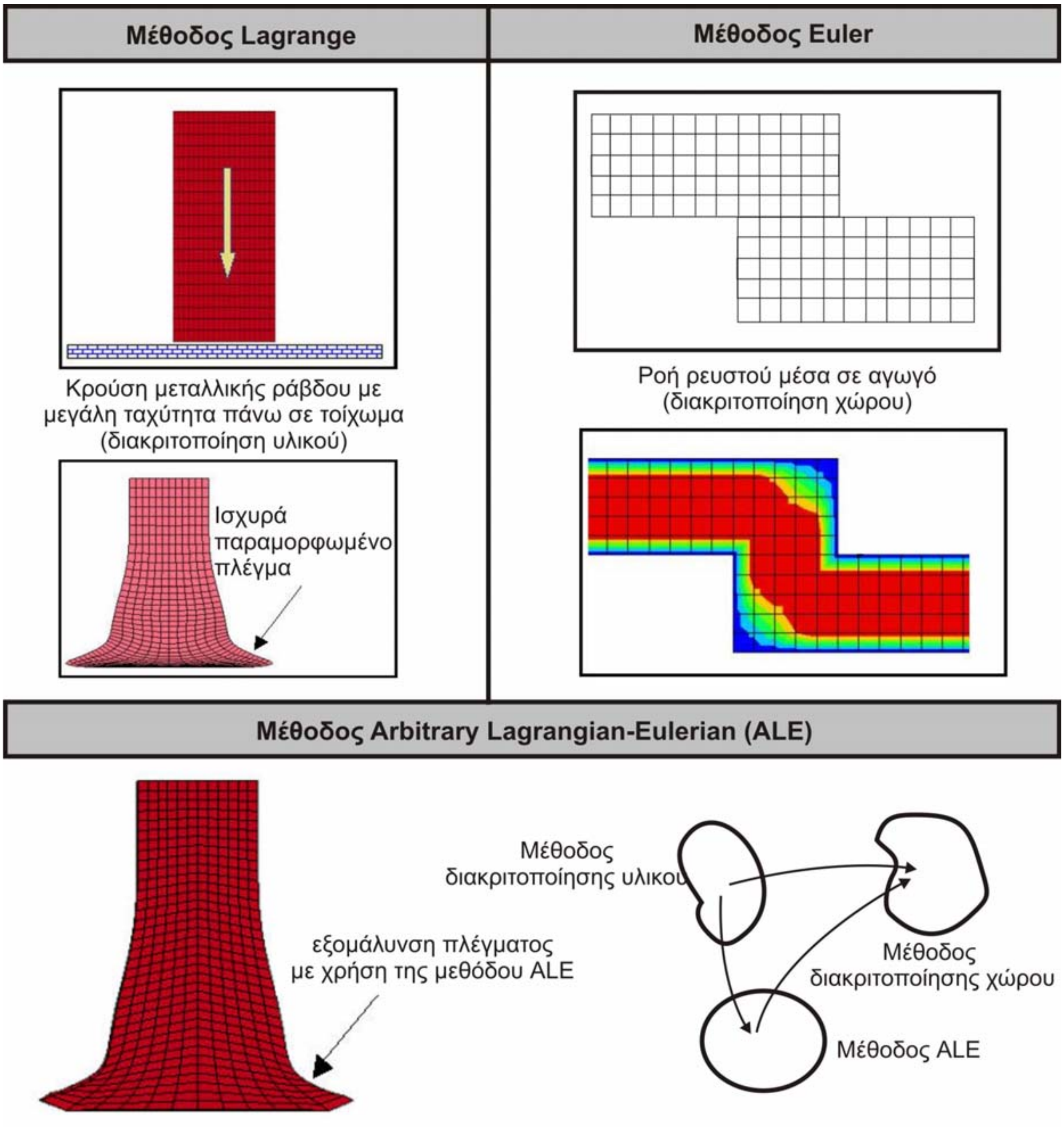
3.1.1 Η Μέθοδος Lagrange

Σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange, η απεικόνιση της κίνησης του ρευστού (υλικού) πραγματοποιείται όπως και στην περίπτωση μελέτης της κίνησης των στερεών σωμάτων στην κλασική μηχανική. Η μελέτη υφίσταται για συγκεκριμένα στοιχεία του υλικού (ρευστού), συνεπώς εξετάζεται η τροχιά που διαγράφουν στο χώρο. Ο παρατηρητής θεωρείται ότι κινείται μαζί με το στοιχείο του ρευστού, το οποίο διαγράφει μία τροχιά στο χώρο και η απεικόνιση του πεδίου ροής επιτυγχάνεται με τη σχεδίαση των τροχιών του (pathlines). Το διάνυσμα θέσης κάθε στοιχείου είναι συνάρτηση του χρόνου t, ενώ παράλληλα εξαρτάται από την αρχική του θέση.

Κατά την μελέτη προβλημάτων μηχανικής στερεού σώματος σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange, το υλικό μοντελοποιείται και παραμορφώνεται έτσι ώστε να μην υπάρχει ροή υλικού ανάμεσα στα στοιχεία. Αυτό συμβαίνει διότι στα πλέγματα Lagrange, οι κόμβοι, τα σημεία και τα στοιχεία κινούνται μαζί με το υλικό *(διακριτοποίηση υλικού)*, σχήμα 3.1.

Με τη μέθοδο Lagrange η διατήρηση της μάζας ισχύει αυτόματα από τη στιγμή που το πλέγμα έχει πάντα την ίδια μάζα. Επίσης, οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος οι οποίες εκφράζονται για τα στοιχεία που βρίσκονται στα εξωτερικά γεωμετρικά όρια του υλικού, παραμένουν αμετάβλητες παρά τις όποιες παραμορφώσεις του πλέγματος, απλοποιώντας σημαντικά την επίτευξη της αριθμητικής λύσης του προβλήματος.

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου Lagrange είναι ότι η ελεύθερη επιφάνεια (γεωμετρικά όρια) του υλικού καταλαμβάνεται αυτομάτως από το πλέγμα, διευκολύνοντας σημαντικά τη διατύπωση των συνοριακών συνθηκών. Για παράδειγμα σε μία ράβδο που υπόκειται σε δύναμη και δημιουργούνται μικρές παραμορφώσεις σε αυτήν, χρησιμοποιείται η μέθοδος Lagrange για την διακριτοποίησή της, οπότε η παραμόρφωση του πλέγματος απεικονίζει την κάμψη της ράβδου.



Σχήμα 3.1: Μέθοδος Lagrange – Μέθοδος Euler – Μέθοδος ALE

Σε περιπτώσεις όμως που το υλικό υπόκειται σε αυξημένες παραμορφώσεις, η ακρίβεια της λύσης μειώνεται σημαντικά καθιστώντας τη μέθοδο αναποτελεσματική. Η αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού επιτυγχάνεται με τη χρήση τεχνικής προσαρμοστικής διακριτοποίησης (πύκνωση πλέγματος, αναδιατύπωση συνοριακών συνθηκών) στην περιοχή που παρατηρούνται έντονες παραμορφώσεις. Η τεχνική αυτή όμως είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα υπολογιστικά διότι όταν το πλέγμα παραμορφώνεται υπερβολικά, το υπολογιστικό βήμα γίνεται ολοένα μικρότερο καθώς βασίζεται στο μέγεθος του μικρότερου στοιχείου του πλέγματος. Επίσης η τεχνική αυτή δεν έχει αναπτυχθεί έως και σήμερα για προβλήματα τριών διαστάσεων. Άλλα μειονεκτήματα της μεθόδου Lagrange είναι ότι σε κάθε (πεπερασμένο) στοιχείο μπορεί να αντιστοιχηθεί ένα μόνο υλικό, ενώ επίσης δεν μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τμήματα του υλικού που αφαιρούνται (φθορά υλικού) καθώς και τις πιθανές τους επιδράσεις.

3.1.2 Η Μέθοδος Euler

Αντίθετα με τη μέθοδο Lagrange που εφαρμόζεται κυρίως στην επίλυση προβλημάτων μηχανικής των στερεών, η μέθοδος **Euler** είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την προσομοίωση κατασκευαστικών κατεργασιών όπου συμβαίνουν μεγάλες παραμορφώσεις, προέρχεται δε από τον κλάδο της ρευστομηχανικής όπου και εφαρμόζεται κατά κόρον, όπως για παράδειγμα στη μοντελοποίηση ροής σε αγωγό, σχήμα 3.1. Ο λόγος είναι ότι τα ρευστά δεν είναι συμπαγή όπως είναι τα στερεά, οπότε τα σωματίδια του ρευστού δεν μπορούν να μείνουν κοντά το ένα στο άλλο. Έτσι, αν το πλέγμα απεικονίζει το ρευστό, σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange, τότε όσο πυκνή και αν είναι η διακριτοποίηση, τα σωματίδια του ρευστού, μετακινούνται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και απομακρύνονται στο χώρο. Μία τέτοια αντιμετώπιση οδηγεί το πλέγμα σε υπερβολική παραμόρφωση και κατά συνέπεια σε δυσκολία επίλυσης του προβλήματος.

Η μέθοδος απεικόνισης κατά Euler δε μελετά την κίνηση συγκεκριμένων στοιχείων ρευστού, αλλά συγκεκριμένα σημεία του χώρου, χωρίς να εξετάζει ποια στοιχεία του ρευστού περνούν από κάθε σημείο του χώρου. Συνεπώς, για το χώρο που μελετάται ορίζεται ένα διανυσματικό πεδίο ταχύτητας, το οποίο μπορεί να είναι σταθερό με το χρόνο (μόνιμο πεδίο ροής) ή χρονικά μεταβαλλόμενο (μη-μόνιμο πεδίο ροής). Τα πεδία ταχύτητας “c”, πυκνότητας “ρ” και πίεσης “p” προσδιορίζονται από τις σχέσεις:

$$\vec{c} = u \cdot \hat{i} + v \cdot \hat{j} + w \cdot \hat{k} = \vec{c}(x, y, z, t) = \vec{c}(\vec{r}, t) \tag{3.1}$$

$$\rho = \rho(x, y, z, t) = \rho(\vec{r}, t) \tag{3.2}$$

$$p = p(x, y, z, t) = p(\vec{r}, t) \tag{3.3}$$

Η ανωτέρω διαδικασία εφαρμόζεται για οποιοδήποτε βαθμωτό ή διανυσματικό μέγεθος, σχετιζόμενο με την κατάσταση του ρευστού.

Σε προβλήματα με υψηλές ταχύτητες ροής, η μελέτη επικεντρώνεται σε τμήμα του χώρου που διακριτοποιείται από πεπερασμένα στοιχεία Euler που παραμένουν σταθερά τοποθετημένα *(διακριτοποίηση χώρου),* ενώ το υλικό επιτρέπεται να “ρέει” εντός των στοιχείων αυτών. Η διατήρηση της μάζας εκφράζεται υπολογίζοντας τη ροή που εισέρχεται και εξέρχεται από κάθε στοιχείο.

Το πλεονέκτημα των πεπερασμένων στοιχείων Euler είναι ότι δεν παραμορφώνονται σύμφωνα με το υλικό, αλλά το πλέγμα (διακριτοποίηση) παραμένει αναλλοίωτο και το υλικό επιτρέπεται να κινείται εντός του πλέγματος. Τα βασικά μειονεκτήματα της προσέγγισης Euler, είναι ότι απαιτεί σχετικά πυκνό πλέγμα προκειμένου να αναπαραστήσει επακριβώς τη συμπεριφορά του υλικού με συνέπεια το υψηλό υπολογιστικό κόστος, και η δυσκολία διατύπωσης και διαχείρισης των κινούμενων συνοριακών συνθηκών.

3.1.3 Η Μέθοδος ALE (Arbitrary Lagrangian –Eulerian formulation)

Η ανάγκη εξάλειψης των μειονεκτημάτων των δύο προηγούμενων μεθόδων, οδήγησε στην ανάπτυξη της υβριδικής μεθόδου **ALE** (Arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation) /126, 127/, η οποία μάλιστα συνδυάζει τα πλεονεκτήματά τους.

Όπως υποδηλώνει το όνομα **ALE** (Arbitrary Lagrangian–Eulerian), η μέθοδος αυτή συνιστάται από έναν "αυθαίρετο" συνδυασμό των μεθόδων Lagrange *(διακριτοποίηση υλικού)* και Euler *(διακριτοποίηση χώρου)*, με σκοπό να περιγραφούν κατάλληλα η κίνηση του πλέγματος και του υλικού όταν συνυπάρχουν σε ένα πρόβλημα, σχήμα 3.1. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη δημιουργία τριών ειδών πλεγμάτων: ένα ευέλικτο πλέγμα για καθένα από τα πλέγματα Euler και Lagrange καθώς και ένα πλέγμα ALE που επιτρέπει την κίνηση του υλικού μέσα από αυτό. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο αυτόματου αναδιαχωρισμού του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων που τον καθιστά ιδανικό για την επίλυση προβλημάτων στα οποία παρατηρούνται μεγάλες παραμορφώσεις και σε προβλήματα αλληλεπίδρασης στερεού-ρευστού. Επιτρέπει στο πλέγμα να προσαρμόζεται και να ακολουθεί το υλικό σε κάποιο βαθμό, αλλά όταν το πλέγμα παραμορφώνεται υπερβολικά σε σημείο που να υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο του λόγου παραμόρφωσης, τότε προσαρμόζεται με το πλέγμα του χώρου και υπολογίζει τη ροή του υλικού κατά την προσαρμογή στο πλέγμα. Η δυσκολία στη χρήση της μεθόδου ALE περιορίζεται στον προσδιορισμό αυτού του ορίου του λόγου παραμόρφωσης, που όταν αυτό ξεπεραστεί τότε το πλέγμα αναδιακριτοποιείται.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου ALE είναι ότι επιτρέπει την εξομάλυνση στην περιοχή του παραμορφωμένου πλέγματος χωρίς να προβεί σε συνολική αναδιακριτοποίηση αυτού. Αυτή η εξομάλυνση επιτρέπει στην ελεύθερη επιφάνεια του υλικού να ακολουθήσει τη ροή του υλικού χωρίς να δημιουργηθούν τα προβλήματα παραμόρφωσης της μεθόδου Lagrange.

Η μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης ρευστού-στερεού αλλά και στερεού-στερεού απαιτεί την χρήση εξισώσεων όπως η εξίσωση διατήρησης της ορμής (μέσω των εξισώσεων Navier Stokes), και η εξίσωση διατήρησης της μάζας που είναι σημαντική όταν πραγματοποιείται αναδιακριτοποίηση. Όταν το πλέγμα παραμένει σταθερό όπως στην προσέγγιση Lagrange, δεν υπάρχει ανάγκη για διατήρηση της μάζας εφόσον η μάζα παραμένει σταθερή και εξ' ορισμού δεν υπάρχει ροή μάζας. Η διατήρηση της ενέργειας είναι επίσης σημαντική.

Η Eulerian μορφή των εξισώσεων διατήρησης της μάζας, της ορμής και της ενέργειας δίνονται από τις σχέσεις:

$$\text{Μάζα:} \quad \frac{d\rho}{dt} = \left.\frac{\partial \rho}{\partial t}\right|_x + u \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot u$$

$$\text{Ορμή:} \quad \rho \frac{du}{dt} = \rho\left(\left.\frac{\partial u}{\partial t}\right|_x + (u \cdot \nabla)u\right) = \nabla \cdot \sigma + \rho b \tag{3.4}$$

$$\text{Ενέργεια:} \quad \rho \frac{dE}{dt} = \rho\left(\left.\frac{\partial E}{\partial t}\right|_x + (u \cdot \nabla)E\right) = \nabla \cdot (\sigma \cdot u) + u \cdot \rho b$$

Όπου ρ είναι η πυκνότητα μάζας, u είναι το διάνυσμα της ταχύτητας του υλικού, σ ο Cauchy τανυστής τάσης, b η αδρανειακή δύναμη ανά μονάδα μάζας και E είναι η συνολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας. Μόνο μηχανική ενέργεια συμπεριλαμβάνεται στην παραπάνω σχέση διατήρησης της ενέργειας.

Η αντίστοιχη ALE μορφή των παραπάνω εξισώσεων διατήρησης είναι :

Μάζα: $$\left.\frac{\partial \rho}{\partial t}\right|_X + c\cdot\nabla\rho = -\rho\nabla\cdot u$$

Ορμή: $$\rho\left(\left.\frac{\partial u}{\partial t}\right|_X + (c\cdot\nabla)u\right) = \nabla\cdot\sigma + \rho b \tag{3.5}$$

Ενέργεια: $$\rho\left(\left.\frac{\partial E}{\partial t}\right|_X + (c\cdot\nabla)E\right) = \nabla\cdot(\sigma\cdot u) + u\cdot\rho b$$

Όπου έχει αντικατασταθεί η ταχύτητα u του υλικού με την σχετική ταχύτητα $c = u - \hat{u}$. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η δεξιά πλευρά της εξίσωσης (3.5) έχει ακριβώς την ίδια μορφή με την μορφή Euler (3.4) ενώ ο αυθαίρετος όρος κίνησης αντανακλάται μόνο στην αριστερή πλευρά της εξίσωσης. Η προέλευση της εξίσωσης (3.5) και η ομοιότητά της με αυτήν της μορφής Euler (3.4), έχει ωθήσει τους συγγραφείς να της δίνουν το όνομα 'ψευδο-Euler' (quasi-Eulerian).

Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος ALE για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος είναι πολύ πιο αποτελεσματικό να μοντελοποιείται μόνο ένα μέρος του προβλήματος με την μέθοδο αυτή ενώ η μέθοδος Euler ή Lagrange θα χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των άλλων μερών. Για παράδειγμα αυτό θα μπορούσε να γίνει σε **προβλήματα αλληλεπίδρασης ρευστού-στερεού**. Το στερεό σε αυτά τα προβλήματα μοντελοποιείται σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange. Το τμήμα του ρευστού που βρίσκεται κοντά στο στερεό θα πρέπει να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ALE, η αλληλεπίδραση ρευστού –στερεού θα πρέπει επίσης να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ALE, όμως για το ρευστό σε απόσταση από το στερεό μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Euler καθώς το πλέγμα δεν παραμορφώνεται, απλά επιτρέπεται η "ροή" του υλικού διαμέσου του.

Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος ALE για τη μοντελοποίηση ενός προβλήματος είναι πολύ σημαντικό το μέγεθος του πλέγματος. Όσο πιο μικρά είναι τα στοιχεία του πλέγματος, τόσο πιο ακριβή είναι τα αποτελέσματα, αλλά και τόσο μεγαλύτερος ο χρόνος υπολογισμού. **Το μεγαλύτερο χρονικό βήμα εξαρτάται από το μέγεθος του μικρότερου στοιχείου**. Έτσι όταν το μέγεθος των στοιχείων είναι πολύ μικρό τότε χρειάζονται πολύ περισσότερα υπολογιστικά βήματα από αυτά που θα χρειαζόταν αν το μέγεθος στοιχείων ήταν μεγαλύτερο. Αυτός είναι άλλωστε και ο λόγος που η μέθοδος Lagrange είναι αναποτελεσματική σε προβλήματα με μεγάλες παραμορφώσεις, καθώς οδηγεί σε στοιχεία με πολύ μικρό μέγεθος. Η μέθοδος ALE προλαμβάνει την κατάσταση αυτή αναδιακριτοποιώντας το πλέγμα κάθε φορά προτού προχωρήσει σε επόμενο υπολογιστικό βήμα.

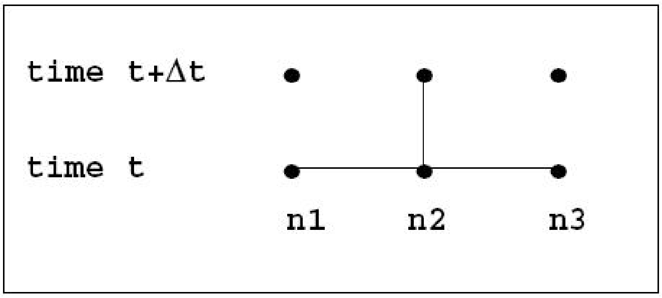
Σύμφωνα με τη μέθοδο ALE, υπάρχει η δυνατότητα σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο (στοιχείο της διακριτοποίησης) να αντιστοιχούν – ταυτόχρονα – περισσότερα του ενός υλικά, η δε αναλογία τους μπορεί να μεταβάλλεται σε κάθε χρονικό βήμα, ενώ στη μέθοδο

Euler, δεδομένου ότι επιτρέπεται η ''ροή'' υλικού στο πλέγμα, μπορεί μεν να υπάρχει η δυνατότητα αντιστοιχίας πολλών υλικών σε κάθε στοιχείο, όχι όμως ταυτόχρονα, αλλά ένα μόνο ανά χρονικό βήμα. Ως εκ τούτου, στη μέθοδο Euler το υλικό κινείται ("ρέει'') σε σχέση με το πλέγμα ενώ χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ALE η κίνηση του πλέγματος είναι ανεξάρτητη από την κίνηση του υλικού.

Σε **προβλήματα αλληλεπίδρασης ρευστού-στερεού** η σύζευξη Eulerian/Lagrangian πλέγματος βασίζεται στη διατήρηση της ορμής που εκφράζεται μέσω των αντίστοιχων εξισώσεων Navier-Stokes. Η δομή Lagrange του στερεού έχει τη δυνατότητα να κινείται διαμέσου του πλέγματος του ρευστού είτε αυτό είναι Euler ή ALE. Στον κώδικα Ls-Dyna3D η μέθοδος ALE δημιουργεί την απαιτούμενη σύζευξη χρησιμοποιώντας περιορισμούς (εντολές που παρέχουν το μηχανισμό σύζευξης της αλληλεπίδρασης) μεταξύ σημείων της δομής Lagrange (που ονομάζονται slave group) και της δομής ALE ή Euler (master group).

3.1.4 Η μέθοδος ενδογενούς (explicit) καθορισμού του βήματος ολοκλήρωσης

Η μέθοδος explicit αναφέρεται στην αριθμητική μέθοδο επίλυσης που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση και την επίλυση των παραγώγων του χρόνου στις εξισώσεις ορμής και ενέργειας. Το επόμενο σχήμα περιγράφει την γραφική αναπαράσταση της explicit ολοκλήρωσης ως προς το χρόνο.



Σχήμα 3.2: Μέθοδος ενδογενούς (explicit) καθορισμού του βήματος ολοκλήρωσης

Η μετατόπιση του κόμβου n_2 στο επίπεδο t+Δt είναι ίση με τις γνωστές τιμές των μετατοπίσεων των κόμβων n_1 n_2 και n_3. στο επίπεδο του χρόνου t. Ένα σύστημα explicit αλγεβρικών εξισώσεων είναι γραμμένο για τους κόμβους του πλέγματος στο χρονικό επίπεδο t+Δt. Κάθε εξίσωση επιλύεται με τη σειρά για κάθε άγνωστη μετατόπιση κόμβου.

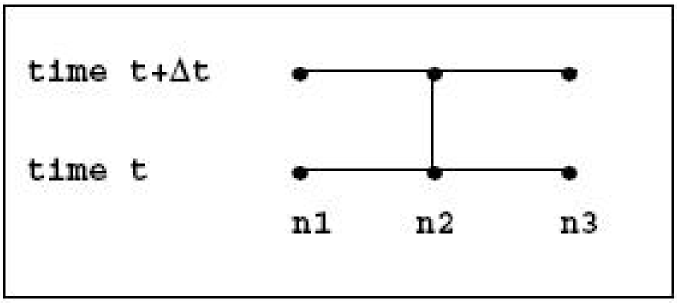
Οι explicit μέθοδοι είναι υπολογιστικά γρήγορες αλλά είναι σταθερές υπό προϋποθέσεις. Το χρονικό βήμα Δt δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει μια κρίσιμη τιμή, καθώς σε αντίθετη περίπτωση τα υπολογιστικά σφάλματα που λειτουργούν αθροιστικά θα έχουν ως αποτέλεσμα μία εσφαλμένη επίλυση. Το χρονικό βήμα πρέπει να είναι μικρότερο από το χρόνο που χρειάζεται το σήμα να ταξιδέψει με την ταχύτητα του ήχου μέσα στο υλικό διανύοντας την απόσταση μεταξύ δύο κόμβων. Συνεπώς το κρίσιμο χρονικό βήμα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} = \frac{\Delta x}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \tag{3.6}$$

Ο χρήστης της μεθόδου explicit συνήθως χρησιμοποιεί ως χρονικό βήμα ένα ποσοστό του κρίσιμου χρονικού βήματος, για λόγους ασφάλειας. Συγκεκριμένα, για παράδειγμα στον κώδικα Ls-Dyna3D η προκαθορισμένη τιμή του χρονικού βήματος είναι 90% της τιμής του κρίσιμου χρονικού βήματος.

3.1.5 Η μέθοδος εξωγενούς (implicit) καθορισμού του βήματος ολοκλήρωσης

Η μέθοδος implicit αναφέρεται επίσης σε μια αριθμητική μέθοδο επίλυσης που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση και την επίλυση των παραγώγων του χρόνου στις εξισώσεις ορμής και ενέργειας. Το επόμενο σχήμα περιγράφει την γραφική αναπαράσταση της implicit ολοκλήρωσης ως προς το χρόνο.



Σχήμα 3.3: Μέθοδος εξωγενούς (implicit) καθορισμού του βήματος ολοκλήρωσης

Η μετατόπιση του κόμβου n_2 στο επίπεδο t+Δt είναι ίση με τις γνωστές τιμές των μετατοπίσεων των κόμβων n_1 n_2 και n_3. στο επίπεδο του χρόνου t, καθώς επίσης και με τις άγνωστες μετατοπίσεις των κόμβων n_1 και n_3. στο επίπεδο του χρόνου t+Δt . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα σύστημα ταυτόχρονων αλγεβρικών εξισώσεων που επιλύονται με ανάλυση πινάκων (π.χ. αντιστροφή πίνακα). Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το μεγάλο υπολογιστικό φορτίο που απαιτείται για τη δημιουργία, την αποθήκευση και τη μετατροπή του συστήματος των εξισώσεων.

Το χρονικό βήμα σε αυτή τη μέθοδο καθορίζεται από το χρήστη και δεν εξαρτάται από κάποια κρίσιμη τιμή του χρόνου που σχετίζεται με τα δεδομένα του προβλήματος (όπως συμβαίνει στην explicit μέθοδο). Οι implicit προσομοιώσεις γενικά περιέχουν σχετικά μικρό αριθμό χρονικών βημάτων που όμως έχουν εξαιρετικά μεγάλο υπολογιστικό φορτίο.

Για μικρά προβλήματα, ο περισσότερος υπολογιστικός χρόνος χρησιμοποιείται σε IO διεργασίες, για το διάβασμα των αρχείων με τα δεδομένα και για την καταγραφή των αρχείων με τα αποτελέσματα. Πολύ μικρός χρόνος CPU καταναλώνεται στην επίλυση ενός τέτοιου μικρού προβλήματος.

Γενικά η ανάλυση explicit εφαρμόζεται πολύ καλά σε δυναμικές προσομοιώσεις όπως σε περιπτώσεις πρόσκρουσης και σπασίματος, αλλά γίνεται απαγορευτική για περιπτώσεις μεγάλης διάρκειας αναλύσεων ή στατικών προβλημάτων εξαιτίας του μεγάλου υπολογιστικού φορτίου σε κάθε χρονικό βήμα. Για τα στατικά προβλήματα, όπως για παράδειγμα σε προβλήματα μορφοποίησης μετάλλων, η κατάλληλη μέθοδος διαχείρισης είναι η ανάλυση implicit.

3.2 Μοντέλο Προσομοίωσης της Διαδικασίας Κοπής με Δέσμη Καθαρού Νερού σε Ακίνητο Στόχο

Για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας κοπής με WJ σε ακίνητο στόχο, αναπτύχθηκαν μη-γραμμικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας **explicit** ανάλυση στον τρισδιάστατο κώδικα της **Ls-Dyna** στην έκδοση 971 (Ls-Dyna3D code version 971) /128-130/. Ο κώδικας Ls-Dyna χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων φυσικής καθώς και προβλημάτων μηχανικής, μεταφοράς θερμότητας και ρευστοδυναμικής. Το πλεονέκτημα του κώδικα Ls-Dyna είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για την επίλυση απλών διακριτών προβλημάτων είτε προβλημάτων σύζευξης όπως προβλήματα ροής θερμότητας ή προβλήματα αλληλεπίδρασης στερεού-ρευστού. Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης water-jet – στόχου μελετήθηκε με χρήση της μεθόδου Arbitrary Lagrangian-Eulerian (**ALE**) σύμφωνα με την οποία αντιμετωπίζονται τα προβλήματα αλληλεπίδρασης στερεού-ρευστού στον κώδικα Ls-Dyna.

Η δημιουργία των αρχείων της σύνθετης γεωμετρίας του προβλήματος, της διακριτοποίησης, η διατύπωση των συνοριακών συνθηκών και των ιδιοτήτων του υλικού πραγματοποιήθηκαν μέσω του περιβάλλοντος εργασίας του προεπεξεργαστή (preprocessor) **ANSYS ICEM CFD** και στη συνέχεια εισήχθησαν προς επίλυση στον επιλύτη Ls-Dyna3D.

Ο προεπεξεργαστής ANSYS ICEM CFD παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία για τη δημιουργία και διακριτοποίηση πολύπλοκης γεωμετρίας. Επιπλέον, οι οριακές συνθήκες του προβλήματος και οι ιδιότητες των υλικών ρυθμίζονται μέσα από το περιβάλλον εργασίας του ICEM CFD.

Η δημιουργία της **γεωμετρίας** βασίζεται σε τρία βασικά διαδοχικά στάδια :

- Δημιουργία σημείων
- Δημιουργία γραμμών
- Δημιουργία επιφανειών

Η στρατηγική της **διακριτοποίησης** στο ANSYS ICEM CFD λειτουργεί με λογική προβολής (projection-based mesh generation). Οι διακριτοποιημένες πλευρές ενός βασικού εξαέδρου (BLOCK), το οποίο υπερκαλύπτει το μοντέλο, προβάλλονται στις πλησιέστερες επιφάνειες CAD. Τα βασικά βήματα για τη δημιουργία ενός εξαεδρικού μοντέλου είναι τα ίδια, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Η τοπολογία της διακριτοποίησης, από την στιγμή που θα οριστεί, μπορεί να τροποποιηθεί χωρίζοντας ή συγχωνεύοντας τα βασικά BLOCKS καθώς και με τη χρήση μιας λειτουργίας η οποία ονομάζεται **O-GRID**.

Η τεχνική O-GRID χρησιμοποιείται για περισσότερο πολύπλοκες γεωμετρίες. Αποτελεί ουσιαστικά την τροποποίηση μιας ή περισσότερων πλευρών του βασικού όγκου (Block) σε μια τοπολογία υποεπιφανειών. Η τεχνική O-GRID χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση γεωμετρίας όταν απαιτείται κυκλικό ή τύπου “O” πλέγμα γύρω από ένα εντοπισμένο γεωμετρικό χαρακτηριστικό ή γενικότερα γύρω από ένα αντικείμενο καθώς εξασφαλίζει ότι το πλέγμα θα έχει ορθογώνιες γραμμές στην περιφέρεια του αντικειμένου. Αποτελεί μια πολύ ισχυρή και γρήγορη τεχνική για την επίτευξη πλέγματος υψηλής ποιότητας

Στην παρούσα εργασία κρίθηκε απαραίτητη η χρήση της τεχνικής O-GRID για τη διακριτοποίηση του ακροφυσίου WJ. Ο λόγος είναι ότι το ακροφύσιο είναι κυλινδρικό και το εσωτερικό του θα πρέπει να διακριτοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία που δεν θα έχουν οξείες γωνίες. Αν τα στοιχεία είναι διαστρεβλωμένα και οι εσωτερικές γωνίες μικρές, η ακρίβεια του αποτελέσματος θα ελαττωθεί.

Το μοντέλο προσομοίωσης περιλαμβάνει την προσομοίωση της ροής του νερού εντός του ακροφυσίου, την προσομοίωση της ροής στον αέρα του περιβάλλοντος μεταξύ ακροφυσίου-στόχου, και την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ρευστού και στερεού στόχου. Για την προσομοίωση της ροής του νερού εντός του ακροφυσίου του WJ και της συμπεριφοράς του περιβάλλοντος αέρα χρησιμοποιήθηκε μοντελοποίηση Euler, ενώ για τη μελέτη της συμπεριφοράς του στόχου (στερεό) χρησιμοποιήθηκε μοντελοποίηση Lagrange.

Λόγω των υψηλών παραμορφώσεων που παρατηρούνται στο συγκεκριμένο πρόβλημα, το λογισμικό επίλυσης Ls-Dyna3D κάνει χρήση της μεθόδου ALE για την αλληλεπίδραση ρευστού-στερεού. Η σύζευξη Eulerian/Lagrangian πλέγματος βασίζεται στη διατήρηση της ορμής που εκφράζεται μέσω των αντίστοιχων εξισώσεων Navier-Stokes. Ως εκ τούτου, η δομή Lagrange έχει τη δυνατότητα να κινείται διαμέσου του πλέγματος Euler. Η μέθοδος ALE δημιουργεί την απαιτούμενη σύζευξη χρησιμοποιώντας περιορισμούς (περιοριστικές μεθόδους) μεταξύ σημείων της δομής Lagrange (που ονομάζονται slave group) και κόμβους Euler (master group).

Για να γίνει επιτρεπτή η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο πλεγμάτων Euler-Lagrange, το πλέγμα Lagrange, θα πρέπει να ενσωματωθεί μέσα στο πλέγμα Euler.

3.2.1 Ανάλυση Μοντέλου Προσομοίωσης

Το μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας κοπής με δέσμη καθαρού νερού σε ακίνητο στόχο διαχωρίζεται σε δύο διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης /2,3/:

α) Σε ένα μοντέλο προσομοίωσης κοπής WJ σε στόχο αλουμινίου

β) Σε ένα μοντέλο προσομοίωσης κοπής WJ σε στόχο αλουμινίου που διαθέτει επίστρωση πολυουρεθάνης.

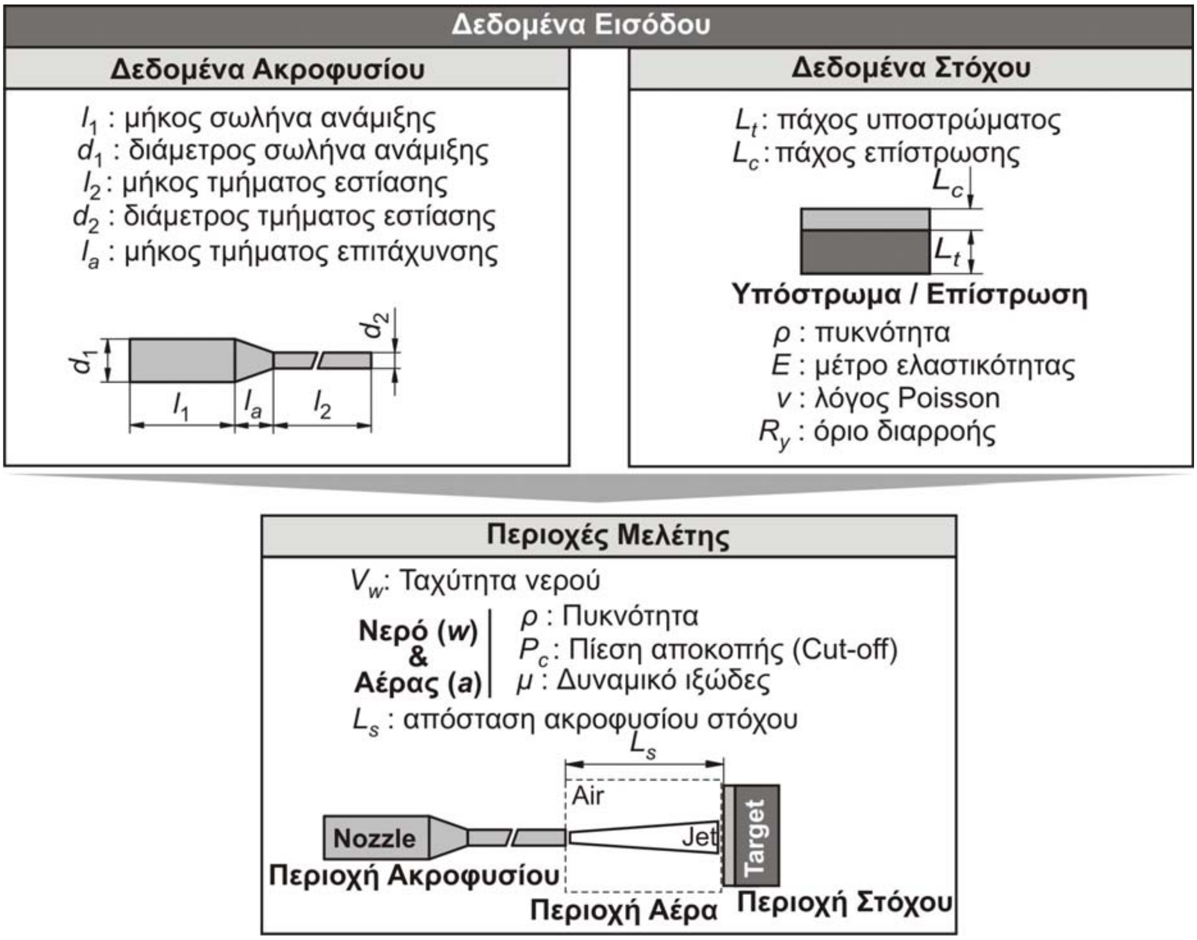
Τα δύο μοντέλα είναι όμοια με διαφορά την επίστρωση ή όχι της πολυουρεθάνης στην επιφάνεια του στόχου αλουμινίου. Το μοντέλο (α) δημιουργήθηκε με σκοπό τη μελέτη των τάσεων και των παραμορφώσεων στην περιοχή του στόχου αλουμινίου ενώ το μοντέλο (β) δημιουργήθηκε με σκοπό τη μελέτη της διάβρωσης της επίστρωσης πολυουρεθάνης στην επιφάνεια του στόχου.

Το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακροφυσίου και του στόχου, τις ιδιότητες του υλικού του στόχου, την ταχύτητα εισόδου του νερού στο ακροφύσιο, την απόσταση του ακροφυσίου από το στόχο, καθώς επίσης και τις ιδιότητες του νερού και του αέρα. Όπως γίνεται φανερό από το πάνω αριστερό τμήμα του σχήματος 3.4, το ακροφύσιο αποτελείται από τρία τμήματα: το πρώτο τμήμα του ακροφυσίου είναι ο σωλήνας ανάμιξης στον οποίο γίνεται η ανάμιξη νερού και των λειαντικών κόκκων εφόσον χρησιμοποιούνται (στην παρούσα μελέτη δεν χρησιμοποιούνται εφόσον πρόκειται για δέσμη καθαρού νερού), το δεύτερο τμήμα του ακροφυσίου αντιστοιχεί στο τμήμα επιτάχυνσης του ακροφυσίου στο οποίο η μείωση της διατομής οδηγεί σε επιτάχυνση του νερού, ενώ το τελευταίο τμήμα αποτελεί το τμήμα εστίασης του ακροφυσίου στο οποίο σταθεροποιείται το προφίλ της ταχύτητας του νερού.

Το πάχος του στόχου είναι ένα γεωμετρικό χαρακτηριστικό, απαραίτητο για την διαδικασία της προσομοίωσης. Στην περίπτωση επίστρωσης του στόχου, λαμβάνεται ως δεδομένο τόσο το πάχος του υποστρώματος όσο και το πάχος της επίστρωσης όπως φαίνεται στο δεξιό τμήμα του σχήματος 3.2. Αντίστοιχα, οι ιδιότητες του υλικού του στόχου – πυκνότητα (ρ), μέτρο ελαστικότητας (E), λόγος Poisson (v), όριο διαρροής (R_y) – θεωρούνται δεδομένες για τη διαδικασία της προσομοίωσης με πεπερασμένα στοιχεία.

Για τη λεπτομερή προσομοίωση της διαδικασίας κοπής με WJ, αυτή χωρίστηκε και μελετήθηκε σε τρεις επιμέρους περιοχές:

1. Περιοχή ροής ρευστού εντός του ακροφυσίου του WJ,
2. Περιοχή ροής ρευστού εντός του περιβάλλοντος αέρα μεταξύ ακροφυσίου-στόχου,
3. Περιοχή πρόσκρουσης του WJ στον ακίνητο στόχο.



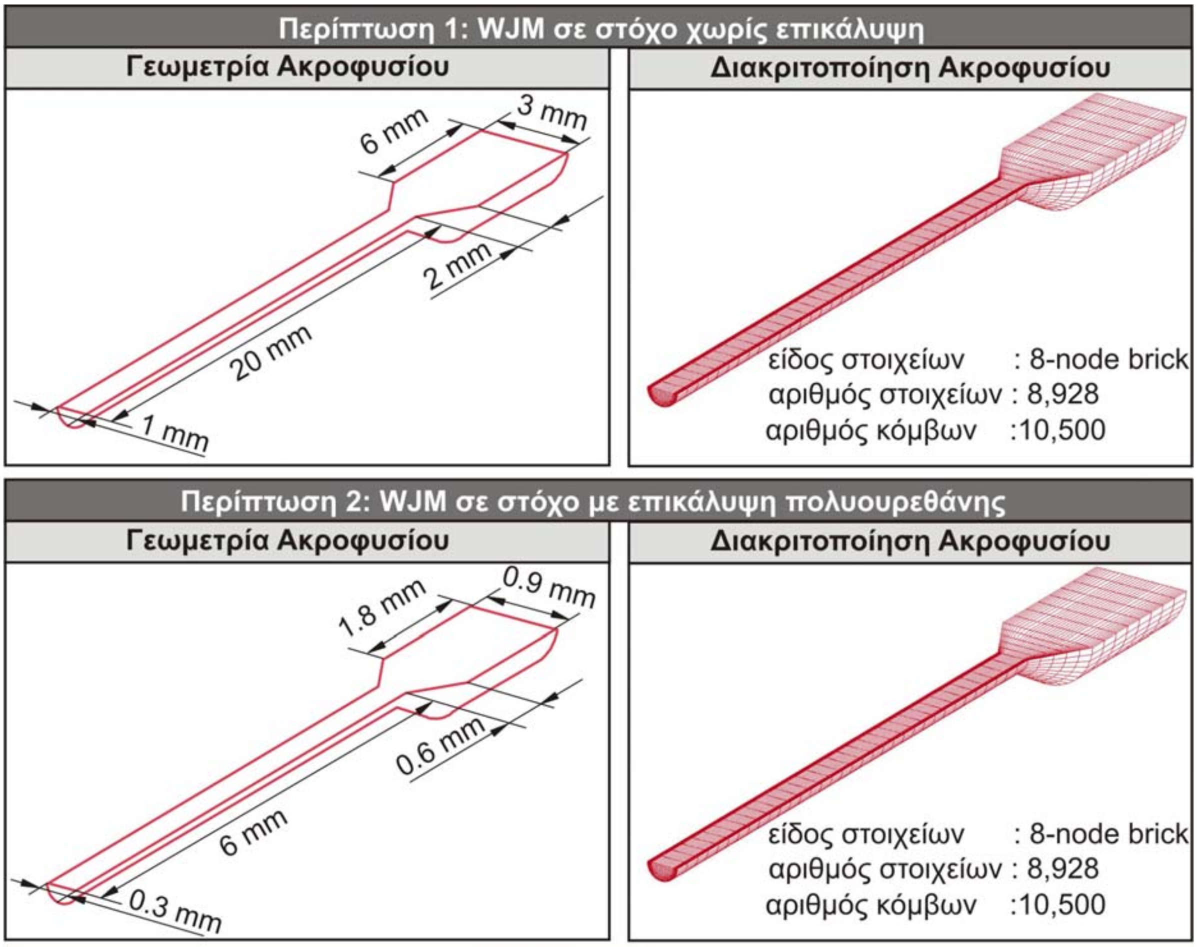
Σχήμα 3.4: Δεδομένα εισόδου στις υπό μελέτη περιοχές

Οι περιοχές αυτές παρουσιάζονται στο κάτω μέρος του σχήματος 3.4 όπου ορίζονται και οι δεδομένες συνθήκες του προβλήματος – ταχύτητα εισόδου του νερού (V_w), απόσταση ακροφυσίου-στόχου (L_s). Όσον αφορά τις ιδιότητες του νερού και του αέρα – πυκνότητα (ρ), πίεση αποκοπής (P_c) και δυναμικό ιξώδες (μ) –αυτές είναι απαραίτητες για τη δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης της διαδικασίας WaterJet.

3.2.1.1 Περιοχή εντός του σωλήνα WJ

A1 Γεωμετρία ακροφυσίου

Η γεωμετρία του ακροφυσίου για την πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5, ενώ οι διαστάσεις του είναι ταυτόσημες με αυτές ενός τυπικού ακροφυσίου όπως περιγράφεται στο βιβλίο των Momber και Kovacevic /120/ όπου παρουσιάζονται τα ερευνητικά αποτελέσματα των Ye και Kovacevic /119/.



Υλικό ρευστών

	Πυκνότητα (ρ) kg/m³	Πίεση αποκοπής (P_c) Pa	Δυναμικό ιξώδες (μ) (Pa s)
Νερό (*w*) &	1000	-10^5	10^{-3}
Αέρας (*a*)	1.29	-10	$1.67\ 10^{-5}$

Σχήμα 3.5: Περιοχή εντός του σωλήνα WJ

Συγκεκριμένα :

Το μήκος του σωλήνα ανάμιξης είναι ίσο με l_1 = 6 mm.
Η διάμετρος του σωλήνα ανάμιξης είναι ίση με d_1 = 3 mm.
Το μήκος του τμήματος επιτάχυνσης είναι ίσο με l_a = 2 mm.
Το μήκος του τμήματος εστίασης είναι ίσο με l_2 = 20 mm.
Η διάμετρος του τμήματος εστίασης είναι ίση με d_2 = 1mm.

Στο ίδιο σχήμα 3.5, παρουσιάζεται και η γεωμετρία και η διακριτοποίηση του ακροφυσίου για τη δεύτερη περίπτωση μοντελοποίησης WJM σε στόχο με επικάλυψη πολυουρεθάνης. Οι διαστάσεις του ακροφυσίου έχουν επιλεγεί με βάση τη διάμετρο της εξόδου του ακροφυσίου που χρησιμοποιείται στην εργασία των Mabrouki και Raissi /119/ για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Επίσης, οι υπόλοιπες διαστάσεις του ακροφυσίου ορίστηκαν σε αναλογία με αυτές του τυπικού ακροφυσίου και χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης. Συγκεκριμένα για τη γεωμετρία του ακροφυσίου ισχύει ότι :

Το μήκος του σωλήνα ανάμιξης είναι ίσο με l_1 = 1.8 mm.
Η διάμετρος του σωλήνα ανάμιξης είναι ίση με d_1 = 0.9 mm.
Το μήκος του τμήματος επιτάχυνσης είναι ίσο με l_a = 0.6 mm.
Το μήκος του τμήματος εστίασης είναι ίσο με l_2 = 6 mm.
Η διάμετρος του τμήματος εστίασης είναι ίση με d_2 =0.3 mm.

Έτσι, στη δεύτερη περίπτωση μοντελοποίησης, το ακροφύσιο είναι όμοιο αλλά τρεις φορές μικρότερο από το ακροφύσιο της πρώτης περίπτωσης όπως γίνεται φανερό από τα δεδομένα.

Η γεωμετρία του ακροφυσίου δημιουργείται με χρήση του προεπεξεργαστή ANSYS ICEM CFD σε τρία βασικά διαδοχικά στάδια που παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στο Παράρτημα Α:

I. Δημιουργία σημείων
II. Δημιουργία γραμμών
III. Δημιουργία επιφανειών

<u>A2 Διακριτοποίηση ακροφυσίου</u>

Το ακροφύσιο θεωρείται ότι αρχικά περιέχει αέρα. Από τη στιγμή που το νερό εισέρχεται από την είσοδο του ακροφυσίου, αρχίζει να καταλαμβάνει το χώρο του ακροφυσίου εκτοπίζοντας τον αέρα που προϋπήρχε εκεί. Οι ταχύτητες του νερού που αναπτύσσονται κατά την κίνηση μέσα στο ακροφύσιο είναι εν γένει μικρότερες στα τοιχώματα του ακροφυσίου από αυτές στο κέντρο του αγωγού, λόγω των αναπόφευκτων τριβών που οφείλονται στο ιξώδες του νερού.

Κατά τη διέλευση του νερού από το τμήμα επιτάχυνσης, τα διανύσματα της ταχύτητας αυξάνονται κατά πολύ, καθώς επίσης αλλάζουν και διευθύνσεις, λόγω της στένωσης του σωλήνα. Για την εξομάλυνση αυτής της ροής, κρίνεται απαραίτητη η είσοδος του νερού τελικά στο τμήμα εστίασης. Το τμήμα εστίασης οφείλει να έχει αρκετό μήκος, ικανό για τον απαιτούμενο χρόνο εξομάλυνσης της ροής. Έτσι η ροή θα αναπτυχθεί πλήρως μέχρι το τέλος του τμήματος εστίασης. Τελικά, το προφίλ ταχύτητας της πλήρως ανεπτυγμένης ροής κατά την έξοδο από το ακροφύσιο θα είναι παραβολικό με μεγάλη ταχύτητα στο κέντρο του αγωγού και πολύ μικρές ταχύτητες στα άκρα του αγωγού.

Η διακριτοποίηση του ακροφυσίου πραγματοποιείται σύμφωνα με το ζητούμενο αποτέλεσμα, που είναι η κατά το δυνατόν ακριβέστερη περιγραφή του προφίλ της ταχύτητας στην πλήρως ανεπτυγμένη ροή του νερού κατά την έξοδό του από το ακροφύσιο. Έτσι, η ανάπτυξη ενός πολύ πυκνού πλέγματος κοντά στα τοιχώματα του ακροφυσίου όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.5, κρίθηκε αναγκαία για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας στο υπολογιζόμενο προφίλ της ταχύτητας του νερού.

Στη διακριτοποίηση του ακροφυσίου που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5, χρησιμοποιήθηκαν 8,928 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements) ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων άγγιξε τους 10,500.

Η διακριτοποίηση του ακροφυσίου δημιουργείται με χρήση του προεπεξεργαστή ANSYS ICEM CFD σε διαδοχικά στάδια που παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στο Παράρτημα Α:

I. Δημιουργία του αρχικού όγκου (Block)
II. Διαίρεση του αρχικού Block
III. Προβολή και μετακίνηση σημείων
IV. Συσχέτιση ακμών των blocks με γραμμές του μοντέλου
V. Ενεργοποίηση του πλέγματος
VI. Έλεγχος ποιότητας του πλέγματος
VII. Δημιουργία πλέγματος τύπου O-GRID

Το πλέγμα επιλέγεται έπειτα από συνεχείς αυξήσεις (διπλασιασμός) των στοιχείων του, έως την επίτευξη σύγκλισης στη λύση.

Α3 Ρευστά Υλικά (αέρας και WJ)

Τα ρευστά υλικά που συμμετέχουν στη διαδικασία κοπής με WJ, είναι προφανώς το νερό και ο αέρας. Κατά την αναπαράσταση της διαδικασίας κοπής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το νερό και ο αέρας περιγράφονται κατά Euler. Τα υλικά αυτά θεωρούνται ισοτροπικά και προσδιορίζονται από τις ιδιότητές τους, ήτοι την πυκνότητα ρ, το ιξώδες μ και την πίεση αποκοπής P_c, σχήμα 3.5, σύμφωνα με το μοντέλο Null-Material που υιοθετεί το λογισμικό Ls-Dyna3D. Για το νερό, η πυκνότητα λαμβάνεται ίση με ρ=1000 kg/m^3, η πίεση αποκοπής ίση με P_c=-10^5 Pa και το δυναμικό ιξώδες ίσο με μ=10^{-3} Pa·s. Για τον αέρα αντίστοιχα, η πυκνότητα λαμβάνεται ίση με ρ=1.29 kg/m^3, η πίεση αποκοπής ίση με P_c=-10 Pa και το δυναμικό ιξώδες ίσο με μ=1.67 ·10^{-5} Pa·s.

Το μοντέλο Null-Material ονομάζεται έτσι καθώς η συμπεριφορά του προσδιορίζεται με ογκομετρικό τρόπο. Χρησιμοποιείται ευρέως σε υπολογισμούς Lagrange για υγρά και αέρια και χαρακτηρίζεται από το δυναμικό ιξώδες και την πίεση αποκοπής. Το μοντέλο υδροδυναμικής συμπεριφοράς Null-Material, εμπεριέχει μια καταστατική εξίσωση πολυωνυμικής μορφής, που ορίζει τη σχέση μεταξύ της πίεσης, της πυκνότητας και της εσωτερικής ενέργειας:

$$P = K_0 + K_1 \cdot \alpha + K_2 \cdot \alpha^2 + K_3 \cdot \alpha^3 + \left(K_4 + K_5 \cdot \alpha + K_6 \cdot \alpha^2\right) \cdot E \qquad (3.6)$$

όπου *P* συμβολίζει την πίεση, *E* την εσωτερική ενέργεια και *α* μια συνάρτηση του σχετικού όγκου:

$$\alpha = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \qquad (3.7)$$

όπου *ρ* συμβολίζει την τρέχουσα πυκνότητα του ρευστού και ρ_0 την αρχική του πυκνότητα. Οι τιμές των συντελεστών K_0, K_1, ..., K_6 κάθε ρευστού παρατίθενται στον Πίνακα 3.1, ενώ οι όροι $K_2 \cdot \alpha^2$ και $K_6 \cdot \alpha^2$ της εξίσωσης (3.6), τίθενται ίσοι με το μηδέν όταν *α<0* (βλέπε εξίσωση 3.7). Η γραμμική πολυωνυμική καταστατική εξίσωση (3.4), μπορεί να συνδυαστεί με την εξίσωση γάμα για τη μοντελοποίηση αερίου. Πράγματι, θέτοντας:

$$K_0 = K_1 = K_3 = K_6 = 0 \qquad K_4 = K_5 = \gamma - 1$$

η πίεση *P* δίνεται από τη σχέση:

$$P = (\gamma - 1) \cdot \frac{\rho \cdot E}{\rho_0} \qquad (3.8)$$

όπου *γ* συμβολίζει το λόγο της ειδικής θερμότητας, c_p / c_v.

	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
Νερό	0.000	2.200	9.540	14.570	0.280	0.280	0.000
Αέρας	0.000	0.000	0.000	0.000	0.401	0.401	0.000

Πίνακας 3.1 : Τιμές των συντελεστών K_i των ρευστών[112].

Η ανάμιξη των δύο ρευστών (αέρας και water-jet) μέσα στο ίδιο κελί (πεπερασμένο στοιχείο) του πλέγματος Euler, κατέστη δυνατή μέσω του αλγόριθμου ALE του λογισμικού Ls-Dyna3D, που ουσιαστικά επιτρέπει την ταυτόχρονη ύπαρξη πολλών υλικών εντός ενός στοιχείου.

3.2.1.2 Περιοχή ροής εντός αέρα μεταξύ ακροφυσίου - στόχου

Καθώς το νερό εξέρχεται από το ακροφύσιο – πριν την πρόσκρουσή του με το στόχο – διέρχεται από τον αέρα του περιβάλλοντος. Η περιοχή του αέρα αρχικά καταλαμβάνεται μόνο από τον αέρα του περιβάλλοντος, μέσα στον οποίο περιέχεται ο στόχος, ενώ από τη στιγμή που η δέσμη του νερού εισέρχεται στην περιοχή αυτή, τότε νερό και αέρας είναι τα ρευστά υλικά που υπάρχουν, κινούνται μέσα στην περιοχή αυτή και αλληλεπιδρούν με το στερεό στόχο. Στο σχήμα 3.6 παρατίθενται οι ιδιότητες του νερού και του αέρα που είναι τα υλικά των ρευστών στην περιοχή αυτή.

Η ύπαρξη του αέρα στις πραγματικές συνθήκες κοπής, καθιστά την μοντελοποίησή του αναγκαία, η οποία γίνεται με τη μέθοδο Euler. Η ανάμιξη του νερού με τον αέρα που λαμβάνει χώρα, επιβάλλει την αντίστοιχη αντιμετώπιση κατά τη διαδικασία της αναπαράστασης της διαδικασίας κοπής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου ALE που επιτρέπει την ταυτόχρονη ύπαρξη δύο διαφορετικών ρευστών εντός του ίδιου “κελιού” (πεπερασμένου στοιχείου).

Για τη γεωμετρία και τη διακριτοποίηση της περιοχής του αέρα γίνεται χρήση του προεπεξεργαστή ANSYS ICEM CFD .
Η γεωμετρία πραγματοποιείται στα τρία βασικά διαδοχικά στάδια:

I. Δημιουργία σημείων
II. Δημιουργία γραμμών
III. Δημιουργία επιφανειών

Κατά τον ίδιο τρόπο με τον οποίο έχουν ήδη παρουσιαστεί για τη δημιουργία της γεωμετρίας του ακροφυσίου.

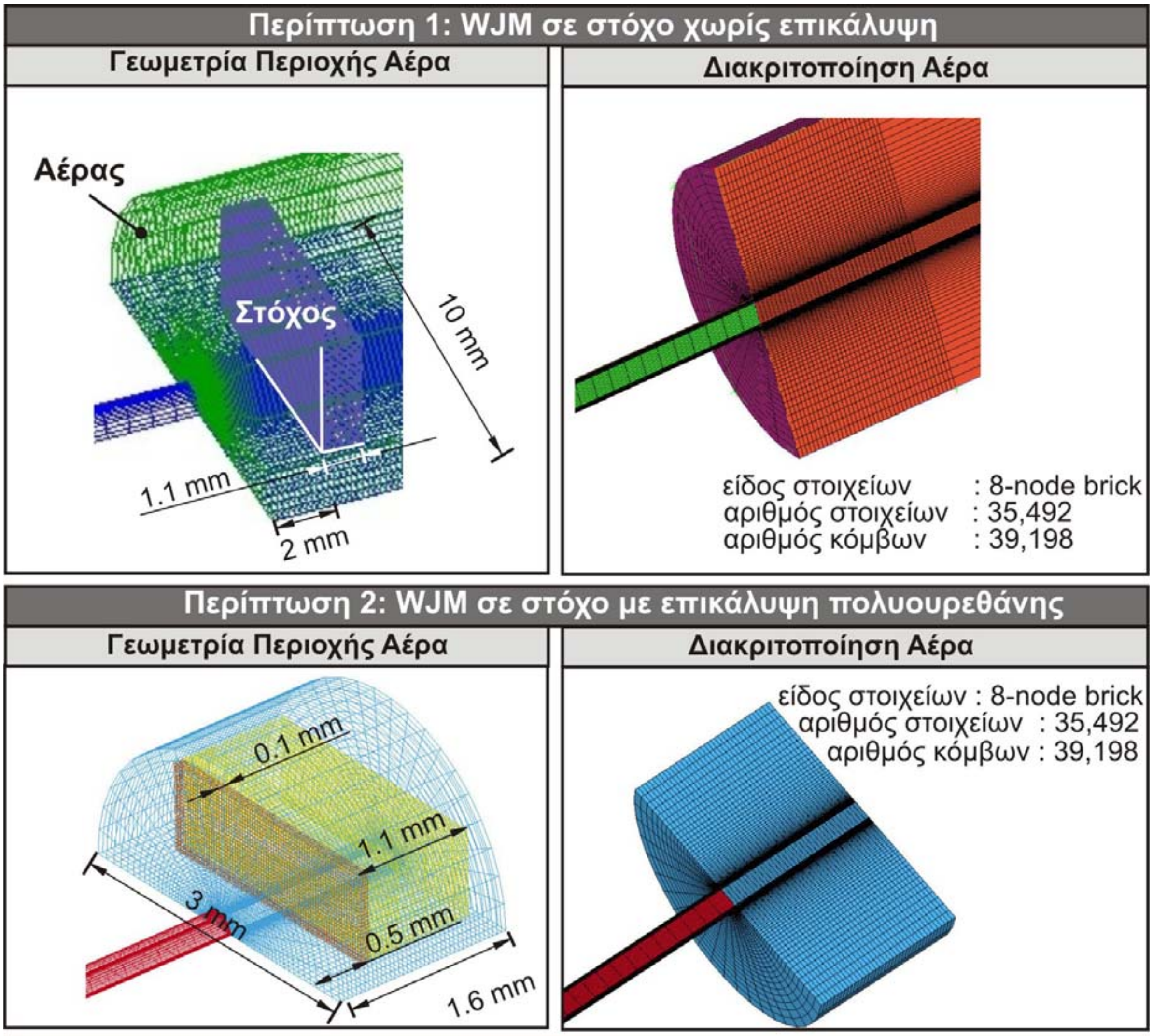
Στη συνέχεια η διακριτοποίηση του περιβάλλοντος αέρα δημιουργείται με χρήση του προεπεξεργαστή ANSYS ICEM CFD στα διαδοχικά στάδια που παρουσιάστηκαν και για το ακροφύσιο:

I. Δημιουργία του αρχικού όγκου (Block)
II. Διαίρεση του αρχικού Block
III. Προβολή και μετακίνηση σημείων
IV. Συσχέτιση ακμών των blocks με γραμμές του μοντέλου
V. Ενεργοποίηση του πλέγματος
VI. Έλεγχος ποιότητας του πλέγματος
VII. Δημιουργία πλέγματος τύπου O-GRID

Η χρήση του πλέγματος τύπου O-GRID θεωρείται και πάλι απαραίτητη καθώς η γεωμετρία του αέρα επιλέχθηκε κυλινδρική για λόγους συσχέτισης με το κυλινδρικό πλέγμα του ακροφυσίου.

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η γεωμετρία και η διακριτοποίηση της περιοχής του αέρα για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις μοντελοποίησης: α) για πρόσκρουση δέσμης WJ σε στόχο χωρίς επικάλυψη και β) για πρόσκρουση δέσμης WJ σε στόχο με επικάλυψη πολυουρεθάνης. Η γεωμετρία της περιοχής του αέρα μεταξύ ακροφυσίου-στόχου, είναι κυλινδρική με ύψος της κυλινδρικής περιοχής που έχει επιλεγεί με σκοπό η γεωμετρία της περιοχής αυτής να ικανοποιεί τη συνθήκη απόστασης ακροφυσίου-στόχου αλλά και να περιβάλλει τη γεωμετρία του στόχου. Βέβαια, η απόσταση ακροφυσίου-στόχου όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.6 είναι διαφορετική για τις δύο περιπτώσεις μοντελοποίησης:

α) για πρόσκρουση δέσμης WJ σε στόχο χωρίς επικάλυψη, η απόσταση ακροφυσίου-στόχου είναι ίση με 2 mm ενώ
β) για πρόσκρουση δέσμης WJ σε στόχο με επικάλυψη πολυουρεθάνης η απόσταση ακροφυσίου-στόχου είναι ίση με 0.5 mm.



Υλικό ρευστών

Νερό (*w*) & Αέρας (*a*)	Πυκνότητα (ρ) kg/m^3	Πίεση αποκοπής (P_c) Pa	Δυναμικό ιξώδες (μ) Pa·s
Νερό (*w*)	1000	-10^5	10^{-3}
Αέρας (*a*)	1.29	-10	$1.67\ 10^{-5}$

Σχήμα 3.6: Περιοχή εντός του περιβάλλοντος αέρα

Επίσης, το πλέγμα (διακριτοποίηση) του αέρα ξεκινά από την άκρη του ακροφυσίου και έχει αρκετά μεγάλη διάμετρο (3 mm), ικανή να περιβάλλει επαρκώς τόσο τη δέσμη νερού (με διάμετρο ίση με 1 mm) όσο και το στόχο που έχει πλάτος 2.3 mm. Η διακριτοποίηση του αέρα αποτελεί επέκταση της διακριτοποίησης του ακροφυσίου όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Το εν λόγω πλέγμα είναι αρκούντως πυκνό στο κεντρικό του τμήμα – τμήμα από το οποίο διέρχεται η εξερχόμενη του ακροφυσίου δέσμη νερού – ενώ είναι περισσότερο αραιό προς τα εξωτερικά του όρια.

Αποτελείται :

α) για πρόσκρουση δέσμης WJ σε στόχο χωρίς επικάλυψη, από 39,198 κόμβους και 35,492 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements), σχήμα 3.6, ενώ

β) για πρόσκρουση δέσμης WJ σε στόχο με επικάλυψη πολυουρεθάνης αποτελείται από 39,198 κόμβους και 35,492 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements), σχήμα 3.6.

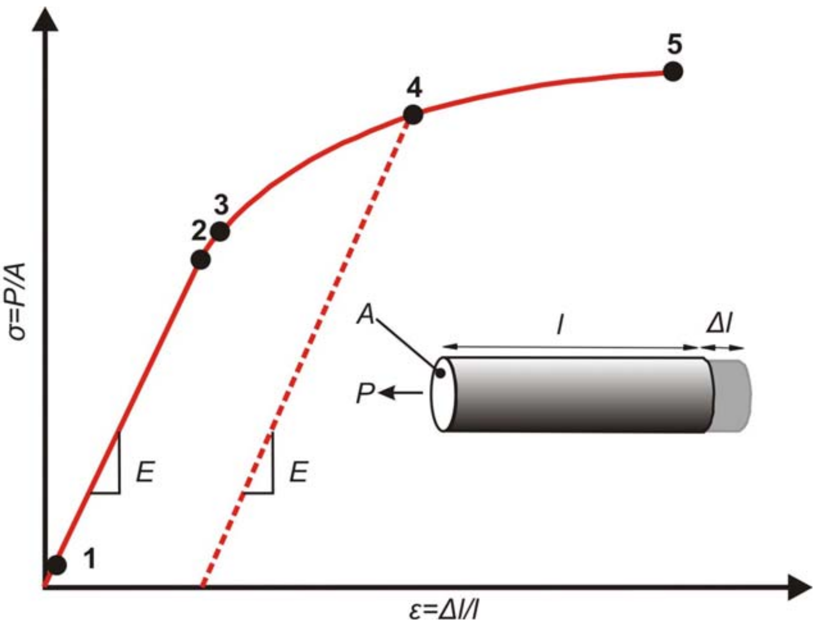
3.2.1.3 Περιοχή πρόσκρουσης του WJ στον ακίνητο στόχο

Η δέσμη του νερού προσπίπτει σε στόχο με σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου διακριτοποιημένου σε δομημένο πλέγμα εξάεδρων στοιχείων με 8 κόμβους (8-node brick element).

Η γεωμετρία και η διακριτοποίηση του στόχου γίνονται με χρήση του προεπεξεργαστή ANSYS ICEM CFD και με τα προκαθορισμένα πλέον διαδοχικά στάδια όπως έχουν ήδη περιγραφεί. Στην περίπτωση του στόχου που η γεωμετρία δεν είναι κυλινδρική, η διακριτοποίηση του στόχου γίνεται πολύ απλά με πλέγμα καρτεσιανού τύπου, χωρίς την πολύπλοκη διαδικασία της μεθόδου O-GRID.

Ο καθορισμός ορισμένων ιδιοτήτων του υλικού είναι απαραίτητος έτσι ώστε να μπορεί να περιγραφεί με ακρίβεια το υλικό. Σε συγκεκριμένα υλικά όπως είναι τα ελαστο-πλαστικά υλικά, που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μοντελοποίηση, είναι αναγκαίο να καθοριστεί η γραμμή τάσης-παραμόρφωσης που είναι συγκεκριμένη για κάθε υλικό. Έτσι, συγκεκριμένες ιδιότητες που καθορίζουν την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (μέτρο ελαστικότητας, όριο διαρροής, όριο θραύσης) ενός ελαστο-πλαστικού υλικού όπως είναι το αλουμίνιο ή η πολυουρεθάνη δίνονται μέσα στον κώδικα Ls-Dyna3D.

Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης και ορίζονται τα σημεία 1-5 στα οποία αντιστοιχούν οι ιδιότητες ενός ελαστο-πλαστικού υλικού.



Σχήμα 3.7: Γραφική παράσταση τάσης - παραμόρφωσης

Σύμφωνα με την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, στο σημείο 1 αντιστοιχεί το πραγματικό όριο ελαστικότητας το οποίο σπάνια χρησιμοποιείται καθώς συμβαίνει σε πολύ μικρές τάσεις. Μέχρι το σημείο 2 αντιστοιχεί η τάση που είναι ανάλογη με την παραμόρφωση σύμφωνα με το νόμο του Hooke, οπότε η σχέση τάσης–παραμόρφωσης αναπαρίσταται από μια ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση είναι ίση με το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Το όριο ελαστικότητας ορίζεται ως το όριο πέραν του οποίου συμβαίνει μόνιμη παραμόρφωση και απεικονίζεται στη γραφική παράσταση τάσης-παραμόρφωσης (σημείο 3). Το όριο διαρροής ενός υλικού αναφέρεται (σημείο 4) στην τάση πέραν της οποίας το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά. Αν το υλικό υπόκειται σε τάση μικρότερη από το όριο διαρροής, τότε παραμορφώνεται ελαστικά και επιστρέφει στο αρχικό του σχήμα μετά από την απομάκρυνση της εφαρμοσμένης τάσης. Το σημείο 5 είναι το σημείο θραύσης (failure strain) του υλικού και ορίζεται σαν το ποσοστό παραμόρφωσης πέρα από το οποίο το υλικό σπάει καθώς δεν δύναται να παραμορφωθεί πια ούτε ελαστικά, ούτε πλαστικά.

Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η γεωμετρία και η διακριτοποίηση του στόχου για κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις μοντελοποίησης καθώς επίσης δίνονται και οι ιδιότητες των ελαστο-πλαστικών υλικών του στόχου.

- Στην πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης όπου ο στόχος δεν έχει επίστρωση, ως υλικό στόχου έχει χρησιμοποιηθεί αλουμίνιο A2024T3 (πυκνότητα ρ = 2700 kg/m^3, μέτρο ελαστικότητας E = 73 GPa, λόγος Poisson, v = 0.33 και όριο διαρροής R_y = 345 MPa).
- Στην δεύτερη περίπτωση μοντελοποίησης ο στόχος αποτελείται από ένα υπόστρωμα αλουμινίου A2024T3 με τις ιδιότητες που προαναφέρθηκαν και επίστρωση πολυουρεθάνης με πυκνότητα ρ = 1200 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας E = 0.9 GPa, λόγος Poisson, v = 0.25 και όριο διαρροής R_y = 40 MPa.

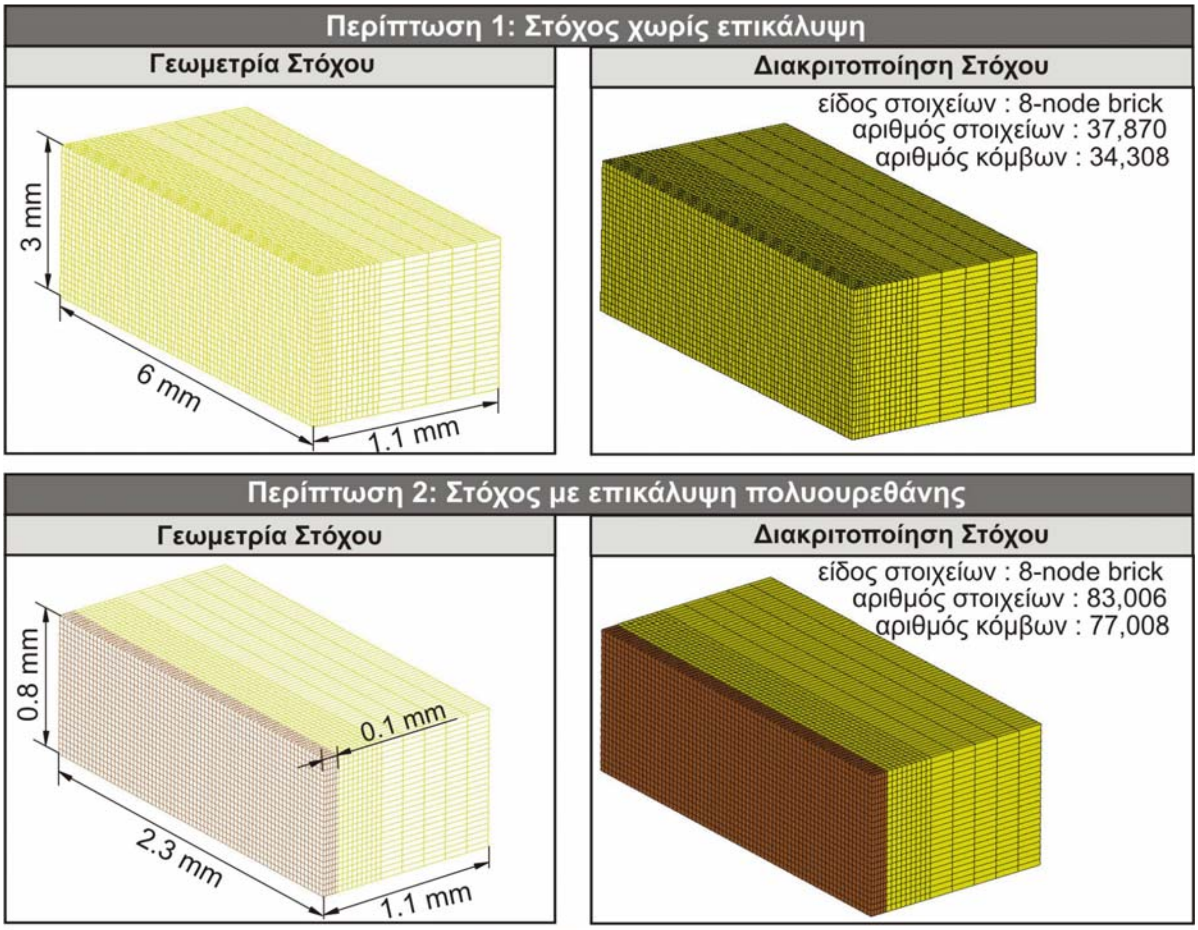
Όσον αφορά τη γεωμετρία του στόχου:

- στην πρώτη περίπτωση του στόχου χωρίς επίστρωση, το πάχος του αλουμινίου είναι 1.1 mm, ενώ
- στη δεύτερη περίπτωση του στόχου με επίστρωση πολυουρεθάνης, το υπόστρωμα αλουμινίου έχει πάχος 1 mm και η επίστρωση έχει πάχος 0.1 mm.

Όσον αφορά τη διακριτοποίηση του πλέγματος του στόχου:

- στην πρώτη περίπτωση του στόχου χωρίς επίστρωση, το πλέγμα αποτελείται από 37,870 εξάεδρα στοιχεία και συνολικά 34,308 κόμβους ενώ
- στη δεύτερη περίπτωση του στόχου με επίστρωση πολυουρεθάνης, το πλέγμα αποτελείται από 83,006 εξάεδρα στοιχεία και συνολικά 77,008 κόμβους.

Η διακριτοποίηση – και στις δύο περιπτώσεις – είναι πολύ πυκνότερη στο επάνω μέρος της επιφάνειας. Το γεγονός αυτό είναι αναγκαίο διότι στη μεν πρώτη περίπτωση μελετώνται οι αναπτυσσόμενες τάσεις παραμόρφωσης από την πρόσπτωση νερού στην επιφάνεια του στόχου, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μελετάται η αποκόλληση της επίστρωσης λόγω διάβρωσης της πολυουρεθάνης.



Υλικό Στόχου

		Πυκνότητα ρ (kg/m^3)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)	Λόγος Poisson v	Όριο Διαρροής R_y (MPa)
Υπόστρωμα (*t*) & Επίστρωση (*c*)	Aluminum (A2024T3)	2700	73	0.33	345
	Polyurethane	1200	0.90	0.25	40

Σχήμα 3.8: Περιοχή στόχου

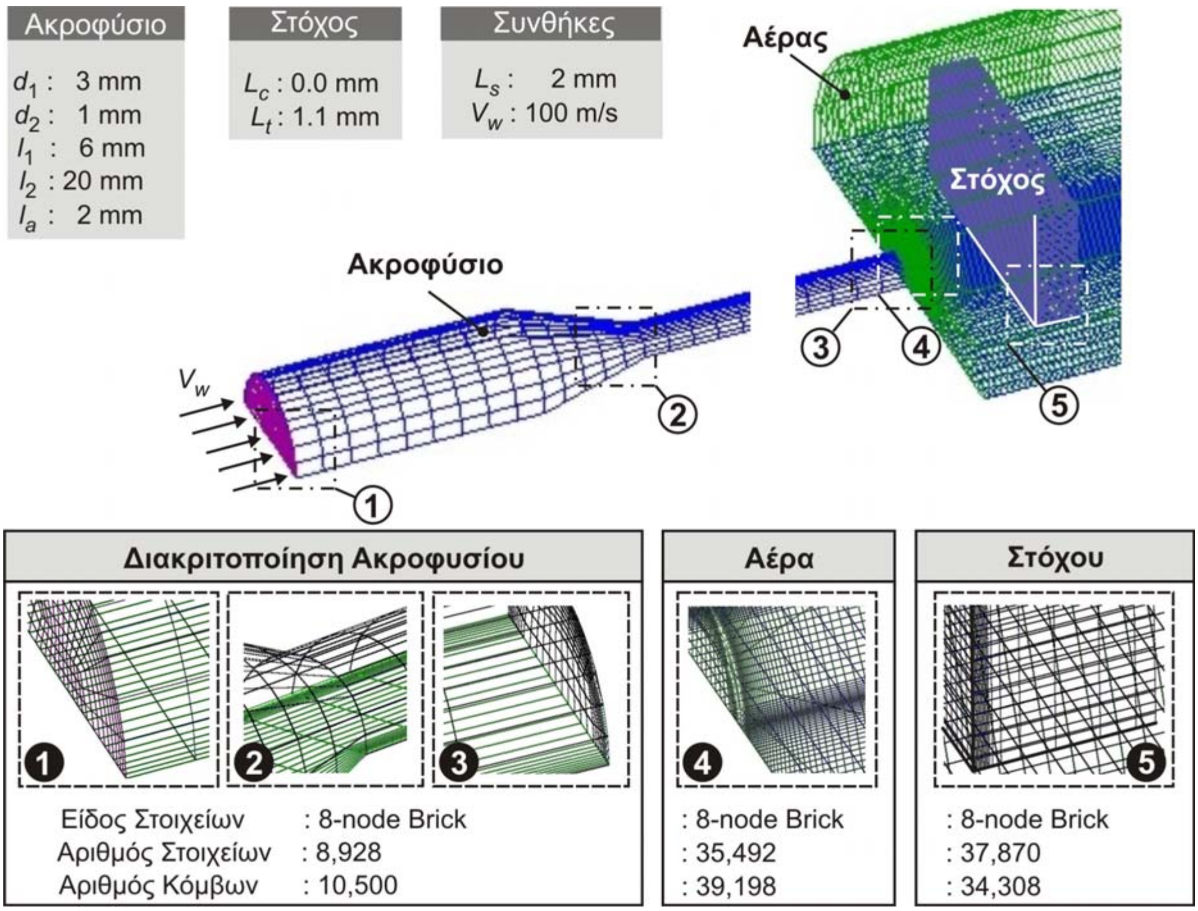
Η διάβρωση αναπαρίσταται μέσω της εισαγωγής ενός κατωφλίου παραμόρφωσης (failure strain), το οποίο όταν ξεπεραστεί (36% για την πολυουρεθάνη), αφαιρούνται τα στοιχεία της επίστρωσης. Στην πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης όπου δεν υπάρχει επίστρωση στο στόχο, η τιμή της ταχύτητας της δέσμης του νερού δεν είναι ικανή να προκαλέσει τόσο μεγάλες παραμορφώσεις που να ξεπερνούν το όριο παραμόρφωσης του αλουμινίου οπότε δεν αφαιρούνται στοιχεία από το στόχο.

3.2.2 Συνολικό Αριθμητικό Μοντέλο

Το συνολικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που επιλύθηκε για την προσομοίωση της διαδικασίας κοπής με WJ, συμπεριλαμβάνει και τις τρεις επιμέρους περιοχές που αναλύθηκαν προηγουμένως. Η επίλυση του συνολικού προβλήματος, δεν έχει πραγματοποιηθεί έως και σήμερα και παρουσιάζεται για πρώτη φορά. Το πλεονέκτημα της συνολικής αντιμετώπισης που πραγματοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας καθίσταται προφανές, εφόσον η προτεινόμενη μοντελοποίηση απαλλάσσεται από την ανάγκη υιοθέτησης διαφόρων παραδοχών και προσεγγίσεων του παρελθόντος που είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιτυγχανόμενης ακρίβειας της λύσης.

Στο <u>σχήμα 3.9</u> παρουσιάζεται το συνολικό μοντέλο προσομοίωσης για την πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης πρόσκρουσης της δέσμης νερού σε στόχο χωρίς επίστρωση.

Σε ορισμένα σημεία (σημεία 1-5) επικεντρώνεται το ενδιαφέρον για τις λεπτομέρειες της διακριτοποίησης, οπότε γίνεται εστίαση στις λεπτομέρειες της διακριτοποίησης του ακροφυσίου (σημεία 1-3), της διακριτοποίησης του περιβάλλοντος αέρα (σημείο 4) και της διακριτοποίησης του στόχου (σημείο 5).



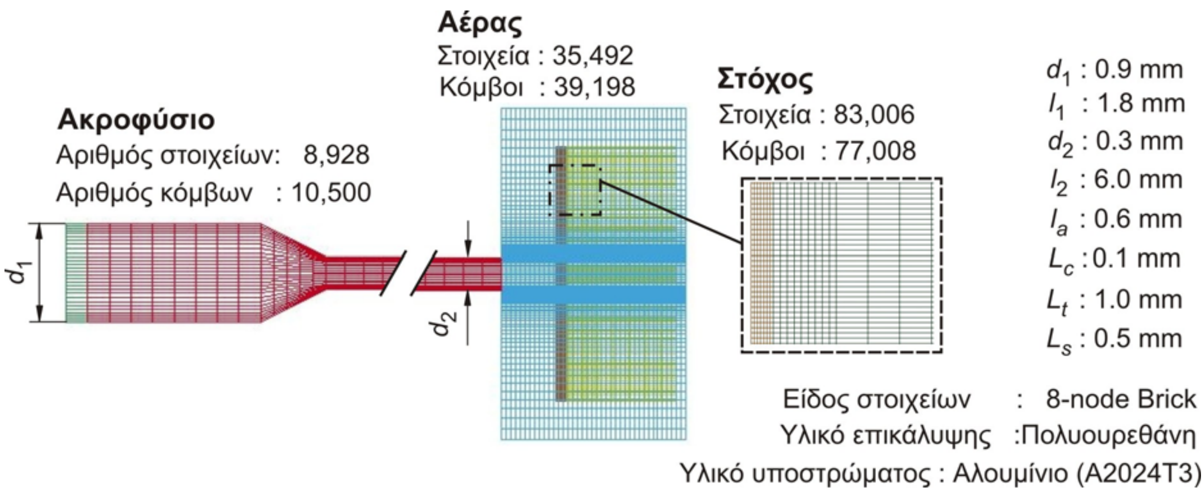
Σχήμα 3.9: Συνολικό Μοντέλο για την πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης με πρόσπτωση WJ σε στόχο χωρίς επικάλυψη

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται συνολικά η διακριτοποίηση των επιμέρους περιοχών του μοντέλου για την πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης : Στη διακριτοποίηση του ακροφυσίου, χρησιμοποιήθηκαν 8,928 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements) ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων άγγιξε τους 10,500. Στη διακριτοποίηση της περιοχής του αέρα, χρησιμοποιήθηκαν 35,492 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements) ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων άγγιξε τους 39,198. Στη διακριτοποίηση του στόχου, χρησιμοποιήθηκαν 37,870 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ

(8) κόμβους (8-node brick elements) ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων άγγιξε τους 34,308.

Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται το συνολικό μοντέλο προσομοίωσης για τη δεύτερη περίπτωση μοντελοποίησης πρόσκρουσης της δέσμης νερού σε στόχο με επίστρωση πολυουρεθάνης. Το συνολικό πάχος του στόχου είναι 1.1 mm όπως και στην πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης και αποτελείται από υπόστρωμα αλουμινίου που έχει πάχος 1mm και είναι επικαλυμμένος με επίστρωση πολυουρεθάνης πάχους 0.1 mm . Η απόσταση μεταξύ ακροφυσίου-στόχου είναι σε αυτή την περίπτωση 0.5 mm, όπως και στην εργασία των Mabrouki και Raissi /119/ για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται συνολικά η διακριτοποίηση των επιμέρους περιοχών του μοντέλου : Στη διακριτοποίηση του ακροφυσίου, χρησιμοποιήθηκαν 8,928 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements) ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων άγγιξε τους 10,500. Στη διακριτοποίηση της περιοχής του αέρα, χρησιμοποιήθηκαν 35,492 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements) ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων άγγιξε τους 39,198. Στη διακριτοποίηση του στόχου, χρησιμοποιήθηκαν 83,006 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements) ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων άγγιξε τους 77,008.



Σχήμα 3.10: Συνολικό Μοντέλο για τη δεύτερη περίπτωση μοντελοποίησης με πρόσπτωση WJ σε στόχο με επικάλυψη πολυουρεθάνης

Όπως γίνεται φανερό από τα σχήματα 3.9 και 3.10, η ταχύτητα του νερού χρησιμοποιείται ως δεδομένο μόνο κατά την είσοδο στο ακροφύσιο. Η ροή του νερού μέσα στο ακροφύσιο καθορίζει το προφίλ της ταχύτητας με το οποίο το νερό εξέρχεται από το ακροφύσιο, διέρχεται από τον περιβάλλοντα αέρα και στη συνέχεια προσπίπτει πάνω στο στόχο. Έτσι η επίλυση του προβλήματος WJM γίνεται αποκλειστικά σύμφωνα με τις δεδομένες συνθήκες, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι παραδοχές και οι υποθέσεις σύμφωνα με τις οποίες αντιμετωπίζονταν το πρόβλημα μέχρι τώρα (Mabrouki *et al* /117/ και Mabrouki και Raissi /119/).

3.2.3 Οριακές Συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος (και για τις δύο περιπτώσεις μοντελοποίησης) ορίστηκαν ως εξής:

- Η ταχύτητα του νερού είναι σταθερή και ίση με 100 m/sec (στην πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης) στην περιοχή εισόδου του ακροφυσίου. Στη συνέχεια, το νερό επιταχύνεται στο τμήμα επιτάχυνσης του ακροφυσίου και αναπτύσσει προφίλ ταχύτητας το οποίο σταδιακά λαμβάνει την τελική μορφή του, καθώς εξέρχεται από το τμήμα εστίασης του ακροφυσίου. Η ταχύτητα εισόδου του νερού στο ακροφύσιο στη δεύτερη περίπτωση μοντελοποίησης είναι ίση με 55 m/sec και ακολουθώντας την ίδια διαδικασία σταδιακά λαμβάνει την τελική μορφή της, η οποία μπορεί να προσεγγιστεί κατά την έξοδο από το ακροφύσιο με ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας με τιμή ίση με 500 m/sec. Αυτή η τιμή της ταχύτητας έχει επιλεγεί για λόγους σύγκρισης με την εργασία των Mabrouki *et al.* /117/, στην οποία χρησιμοποιείται η ίδια τιμή της ταχύτητας στην έξοδο του ακροφυσίου κατά την αντίστοιχη προσομοίωση που διενεργείται.
- Η απόσταση ακροφυσίου-στόχου τίθεται ίση με 2 mm (αυτή είναι η απόσταση ακροφυσίου-στόχου στην πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης όπου η δέσμη του νερού προσκρούει σε στόχο χωρίς επίστρωση). Στη δεύτερη περίπτωση μοντελοποίησης όπου ο στόχος αλουμινίου που χρησιμοποιείται έχει πάχος 1mm και είναι επικαλυμμένος με επίστρωση πολυουρεθάνης πάχους 0.1 mm η απόσταση μεταξύ ακροφυσίου-στόχου είναι 0.5 mm.
- Για λόγους μείωσης του υπολογιστικού φορτίου/χρόνου, επιλύθηκε το μισό (γεωμετρικά) μοντέλο, εφόσον το συνολικό μοντέλο χαρακτηρίζεται από έναν άξονα συμμετρίας.
- Στα τοιχώματα του στόχου αναπτύχθηκαν κατάλληλες οριακές συνθήκες (non-reflecting boundaries) για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα του. Με αυτές τις οριακές συνθήκες, οι διαστάσεις (μήκος, πλάτος) του στόχου λαμβάνονται θεωρητικά ως άπειρες, ενώ στη μοντελοποίηση και στην αριθμητική επίλυση λαμβάνονται κατά το δυνατόν μικρότερες ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό φορτίο.
- Το ακροφύσιο θεωρήθηκε άκαμπτο (rigid) και ακίνητο ως προς τους έξι βαθμούς ελευθερίας κίνησης (τρεις μετατοπίσεις, τρεις στροφές).
- Το κάτω μέρος του στόχου δεν επιδέχεται καμία κίνηση.
- Το πλέγμα σύζευξης νερού-αέρα (διακριτοποίηση ALE) είναι ελεύθερο από περιορισμούς.
- Χρησιμοποιείται μέθοδος αριθμητικής επίλυσης με ενδογενή προσδιορισμό του βήματος ολοκλήρωσης (explicit) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα π.χ. για την δεύτερη περίπτωση μοντελοποίησης η τιμή του χρονικού βήματος να είναι ίση με Δt = 4.23254E-06 msec.

3.3 Μοντέλο Προσομοίωσης της Διαδικασίας Κοπής με Δέσμη Καθαρού Νερού σε Κινούμενο Στόχο

Στόχος αυτού του τμήματος της παρούσας διατριβής, ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (αριθμητικού μοντέλου) για την κατά το δυνατόν ακριβέστερη αναπαράσταση της διαδικασίας κοπής με δέσμη καθαρού νερού σε κινούμενο στόχο (στόχου με πρόωση).

Η δημιουργία των αρχείων της σύνθετης γεωμετρίας του προβλήματος, της διακριτοποίησης, η διατύπωση των συνοριακών συνθηκών και των ιδιοτήτων του υλικού πραγματοποιήθηκαν μέσω του περιβάλλοντος εργασίας του προεπεξεργαστή (preprocessor) ANSYS ICEM CFD και στη συνέχεια εισήχθησαν στον κώδικα (solver) Ls-Dyna3D προς επίλυση.

Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης water-jet – στόχου μελετήθηκε με χρήση της μεθόδου Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE).

Η ακρίβεια του αριθμητικού μοντέλου που αναπτύχθηκε, επιβεβαιώνεται μέσω πειραμάτων που διεξήχθησαν στην εταιρεία Hydrocut (και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5), τα οποία αποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο αριθμητικό μοντέλο αναπαριστά επαρκώς την πραγματική διαδικασία κοπής.

3.3.1 Διακριτοποίηση περιοχών του μοντέλου

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, το αριθμητικό μοντέλο χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές, καθώς σε κάθε μια από αυτές συνυπάρχουν – εκ περιτροπής – το νερό, ο αέρας και ο στόχος. Η ροή λοιπόν του νερού, χωρίστηκε στις εξής τρεις περιοχές:

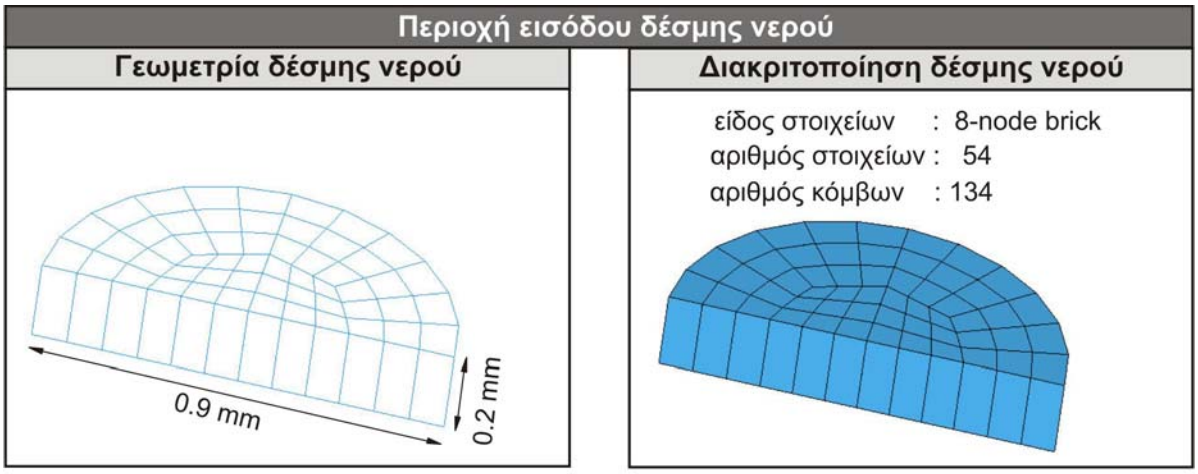
1. Περιοχή εισόδου της δέσμης νερού (εκκίνηση διαδικασίας),
2. Περιοχή ροής νερού εντός του περιβάλλοντος αέρα μεταξύ ακροφυσίου-στόχου,
3. Περιοχή πρόσκρουσης του WJ στον κινούμενο στόχο.

Το παρόν αριθμητικό μοντέλο δε λαμβάνει υπόψη τη ροή νερού εντός του ακροφυσίου (κυρίως για λόγους υπολογιστικού κόστους), συνεπώς δεν τη μοντελοποιεί. Η ροή νερού που συμμετέχει στη διαδικασία, αποτελείται αρχικά από μια στρώση πεπερασμένων στοιχείων, έχει δε, ομοιόμορφο προφίλ ταχύτητας, σχήμα 3.11.

3.3.1.1 Διακριτοποίηση περιοχής εισόδου δέσμης του νερού

Η γεωμετρία και η διακριτοποίηση της περιοχής εισόδου του νερού γίνεται με χρήση του προεπεξεργαστή ANSYS ICEM CFD και με τα προκαθορισμένα πλέον διαδοχικά στάδια όπως έχουν ήδη περιγραφεί. Η γεωμετρία της περιοχής εισόδου του νερού είναι κυλινδρική, οπότε η διακριτοποίηση της γίνεται με πλέγμα τύπου O-GRID.

Η μέθοδος διακριτοποίησης του νερού βασίζεται στη μέθοδο Euler. Η διάμετρος της δέσμης είναι ίση με 0.9 mm, ενώ η τιμή αυτή έχει επιλεγεί έτσι ώστε να ταυτίζεται με την εσωτερική διάμετρο του τμήματος εστίασης του ακροφυσίου της εταιρείας Hydrocut.



Υλικό ρευστού

	Πυκνότητα (ρ) kg/m^3	Πίεση αποκοπής (P_c) Pa	Δυναμικό ιξώδες (μ) Pa·s
Νερό (*w*)	1,000	-10^5	10^{-3}

Σχήμα 3.11: Περιοχή εισόδου δέσμης του νερού

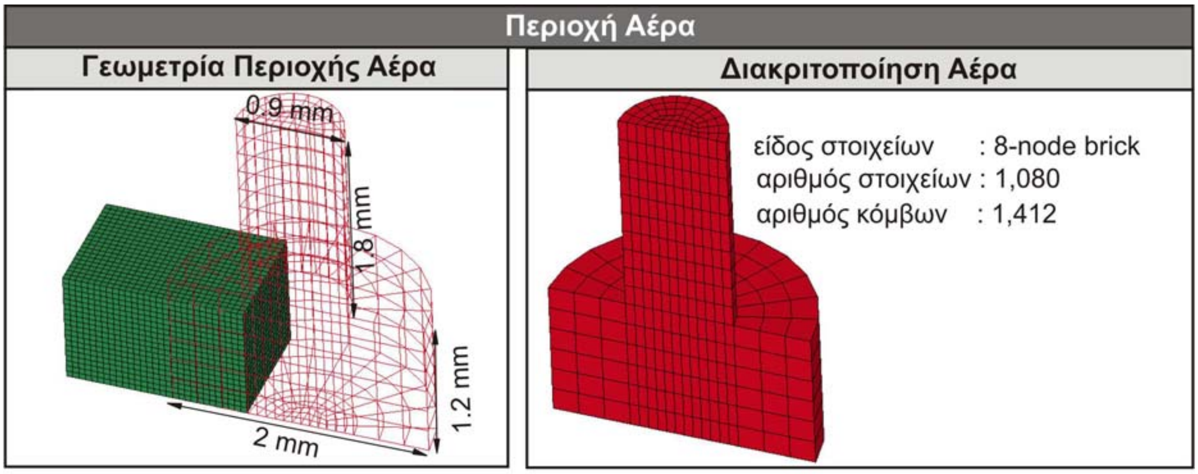
Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11, μία στρώση από 54 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements), αναπαριστά την δέσμη του νερού κατά την έξοδο από το ακροφύσιο. Αντίστοιχα, η ταχύτητα αυτής της δέσμης νερού κατά την έξοδό της από το ακροφύσιο θεωρείται ομοιόμορφη και αναπαρίσταται με σταθερή ταχύτητα ίση με 842 m/sec η οποία ασκείται σε καθέναν από τους συνολικά 134 κόμβους του ακροφυσίου.

Κατά την αναπαράσταση της διαδικασίας κοπής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το νερό περιγράφεται σύμφωνα με τη μέθοδο Euler. Έτσι, σύμφωνα με το μοντέλο Null-Material που υιοθετεί το λογισμικό Ls-Dyna3D, όπως έχει προαναφερθεί, προσδιορίζεται από τις ιδιότητές του, ήτοι την πυκνότητα ρ, το ιξώδες μ και την πίεση αποκοπής P_c, σχήμα 3.11. Για το νερό, η πυκνότητα λαμβάνεται ίση με ρ=1000 kg/m^3, η πίεση αποκοπής ίση με $P_c=-10^5$ Pa και το δυναμικό ιξώδες ίσο με $\mu=10^{-3}$ Pa·s.

3.3.1.2 Διακριτοποίηση περιοχής αέρα

Καθώς το νερό εξέρχεται από το ακροφύσιο – πριν την πρόσκρουσή του με το στόχο – διέρχεται από τον αέρα του περιβάλλοντος. Η περιοχή του αέρα αρχικά καταλαμβάνεται μόνο από τον αέρα του περιβάλλοντος, μέσα στον οποίο περιέχεται ο στόχος, ενώ από τη στιγμή που η δέσμη του νερού εισέρχεται στην περιοχή αυτή, τότε νερό και αέρας είναι τα ρευστά υλικά που υπάρχουν, κινούνται μέσα στην περιοχή αυτή και αλληλεπιδρούν με το στερεό στόχο.

Το πλέγμα του αέρα μοντελοποιείται σύμφωνα με τη μέθοδο Euler όπως συμβαίνει και με τη μοντελοποίηση του νερού. Η ανάμιξη του νερού με τον αέρα που λαμβάνει χώρα στην περιοχή του αέρα, επιβάλλει την αντίστοιχη αντιμετώπιση κατά τη διαδικασία της αναπαράστασης της διαδικασίας κοπής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτό πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου ALE που επιτρέπει την ταυτόχρονη ύπαρξη δύο διαφορετικών ρευστών εντός του ίδιου “κελιού” (πεπερασμένου στοιχείου).



Υλικό ρευστών

	Πυκνότητα (ρ) kg/m^3	Πίεση αποκοπής (P_c) Pa	Δυναμικό ιξώδες (μ) Pa·s
Νερό (*w*)	1,000	-10^5	10^{-3}
Αέρας (*a*)	1.29	-10	$1.67 \cdot 10^{-5}$

Σχήμα 3.12: Περιοχή Αέρα

Το πλέγμα (διακριτοποίηση) – κατά Euler – του αέρα είναι κυκλικής διατομής και ξεκινά αμέσως μετά το πλέγμα του νερού. Όπως και στην περίπτωση της εισόδου του νερού, το η διακριτοποίηση της γεωμετρίας του αέρα γίνεται με πλέγμα τύπου O-GRID.

Η συμμετρία του προβλήματος οδηγεί στη μοντελοποίηση του μισού γεωμετρικά πλέγματος του αέρα, για λόγους μείωσης υπολογιστικού φορτίου όπως έχει ήδη αναφερθεί και στην περίπτωση μοντελοποίησης του ακροφυσίου, χωρίς να επηρεάζεται η λύση. Αρχικά, και για μήκος ίσο με 1.8 mm, έχει την ίδια διάμετρο με το πλέγμα του νερού, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται σημαντικά στην τιμή των 2 mm, για μήκος 1.2 mm, (σχήμα 3.12), ώστε να περιβάλλει την περιοχή κοπής του στόχου. Η μεταβολή στη διάμετρο του πλέγματος αέρα, εφαρμόστηκε για λόγους μείωσης του υπολογιστικού φορτίου.

Στο σχήμα 3.12 παρατίθενται οι ιδιότητες (πυκνότητα ρ, το ιξώδες μ και την πίεση αποκοπής P_c) του νερού και του αέρα που είναι τα υλικά των ρευστών στην περιοχή του αέρα. Αυτές οι ιδιότητες χρησιμοποιούνται στο μοντέλο υδροδυναμικής συμπεριφοράς Null-Material που υιοθετεί το λογισμικό Ls-Dyna3D για την αντιμετώπιση των ρευστών όπως έχει ήδη προαναφερθεί.

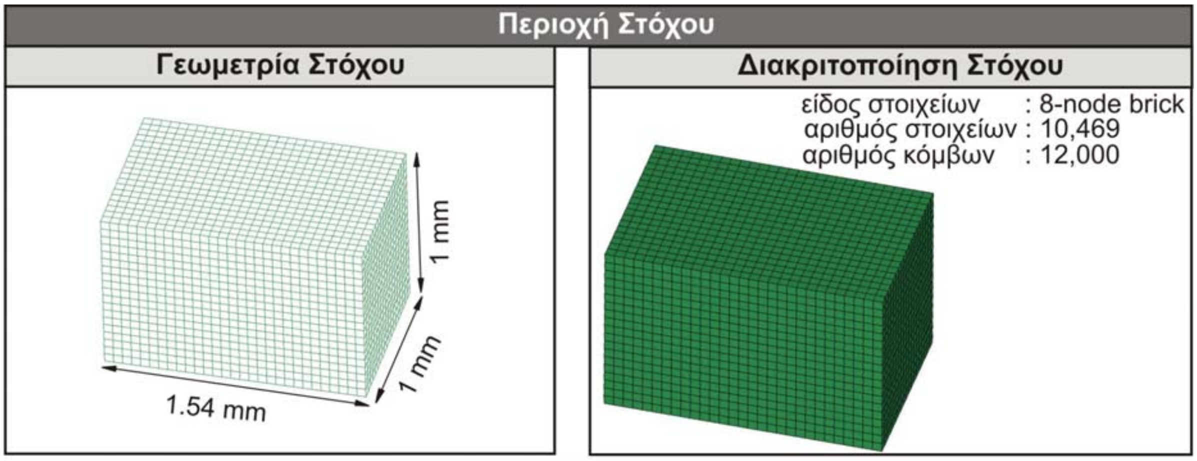
Στη διακριτοποίηση του πλέγματος του περιβάλλοντος αέρα που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.12, χρησιμοποιήθηκαν 1,080 στοιχεία έξι (6) εδρών με οχτώ (8) κόμβους (8-node brick elements) ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων άγγιξε τους 1,412.

3.2.1.3 Διακριτοποίηση περιοχής στόχου

Ο κινούμενος στόχος έχει μορφή ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου, χωρισμένου σε 10,469 εξάεδρα (8-node brick) πεπερασμένα στοιχεία με 12,000 κόμβους. Λεπτομέρειες της γεωμετρίας του στόχου παρουσιάζονται στο σχήμα 3.13.

Το μισό (γεωμετρικά) μοντέλο του στόχου κρίνεται απαραίτητο να δημιουργηθεί όπως και στην περίπτωση μοντελοποίησης του ακροφυσίου και του αέρα για λόγους μείωσης του υπολογιστικού χρόνου.

Το πάχος του στόχου είναι 1 mm ενώ το μήκος και το πλάτος του στόχου έχουν ενδεικτικές (πολύ χαμηλές) τιμές, για λόγους μείωσης του υπολογιστικού χρόνου. Η λύση δεν επηρεάζεται από τις χαμηλές τιμές του μήκους και του πλάτους του στόχου καθώς μέσα από τον κώδικα Ls-dyna δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης κατάλληλων οριακών συνθηκών (non-reflecting boundaries) στα τοιχώματα του στόχου για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα του. Με αυτές τις οριακές συνθήκες, οι διαστάσεις (μήκος, πλάτος) του στόχου λαμβάνονται θεωρητικά ως άπειρες, ενώ στη μοντελοποίηση και στην αριθμητική επίλυση λαμβάνονται κατά το δυνατόν μικρότερες ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό φορτίο.



Υλικό Στόχου

	Πυκνότητα (ρ) kg/m^3	Μέτρο Ελαστικότητας (E) GPa	Λόγος Poisson (v)	Όριο Διαρροής (R_y) MPa	Όριο Παραμόρφωσης
Aluminum (1050-H14)	2,705	69	0.33	103	10%
Aluminum (1050-O)	2,705	69	0.33	28	39%

Σχήμα 3.13: Περιοχή Στόχου

Η προσομοίωση του υλικού του στόχου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange και αφορά δύο διαφορετικά υλικά με ελαστο-πλαστική συμπεριφορά:

(α) Aluminum (1050-H14) με ιδιότητες : πυκνότητα ρ = 2705 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας E = 69 GPa, λόγος Poisson, v = 0.33 και όριο διαρροής R_y = 103 MPa και (β) Aluminum (1050-O) με ιδιότητες : πυκνότητα ρ = 2705 kg/m^3 , μέτρο ελαστικότητας E = 69 GPa, λόγος Poisson, v = 0.33 και όριο διαρροής R_y = 28 MPa.

Η διάβρωση του στόχου επιτυγχάνεται όταν οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο, συγκεκριμένα το όριο παραμόρφωσης (failure strain ή elongation), οπότε στοιχεία του στόχου αποκολλώνται. Η τιμή αυτή εισάγεται στο λογισμικό από το χρήστη:

(α) για την περίπτωση του Aluminum (1050-O) το όριο παραμόρφωσης είναι 39% ενώ

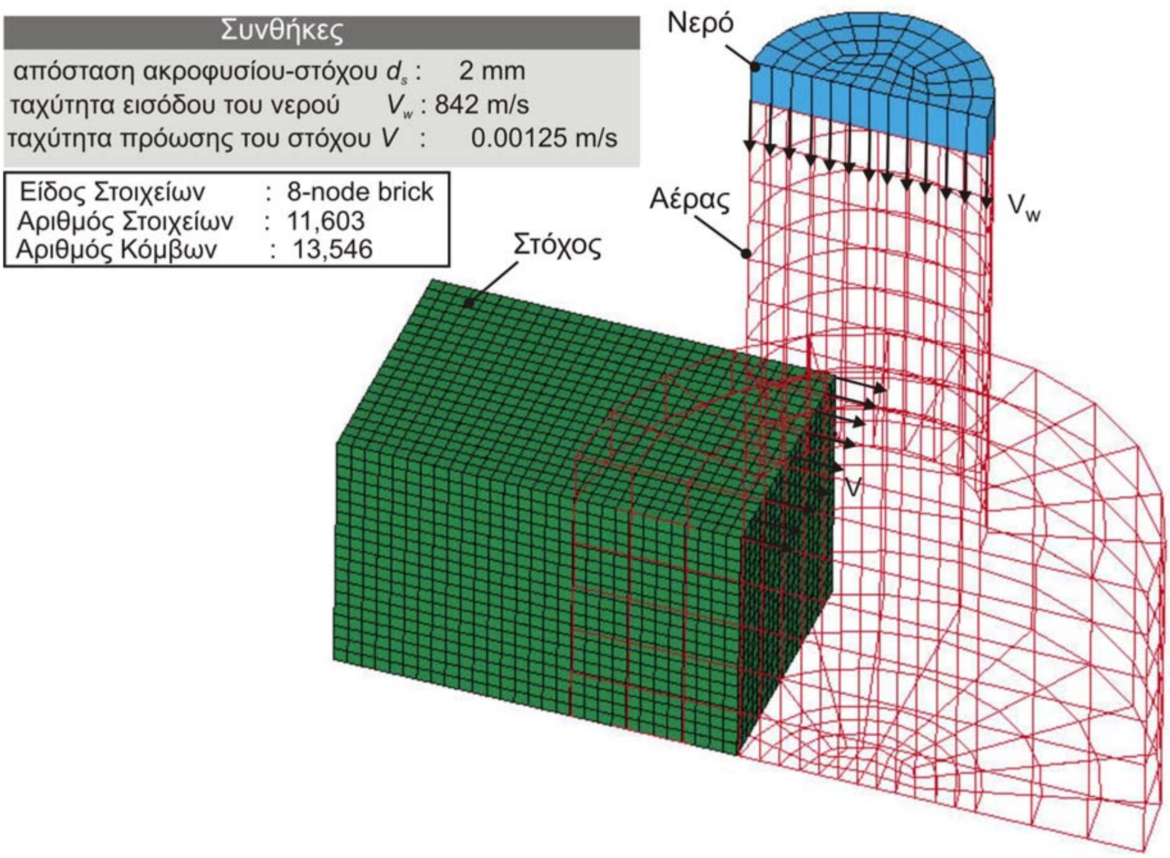
(β) για το Aluminum (1050-H14) το όριο παραμόρφωσης είναι 10%.

3.3.2 Συνολικό Αριθμητικό Μοντέλο

3.3.2.1 Συνολικό Μοντέλο σε κινούμενο στόχο

Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε και επιλύθηκε αριθμητικά μέσω του λογισμικού Ls-Dyna3D (έκδοση mpp971 single precision R3.45855_PGI in linux86-64 with hpmpi) σε ένα σύστημα 64-bit cluster παράλληλης επεξεργασίας οκτώ (8) κόμβων.

Το συνολικό αριθμητικό μοντέλο περιέχει και τις τρεις επιμέρους υπό μελέτη περιοχές οι οποίες συνιστούν το πρόβλημα κοπής με δέσμη καθαρού νερού σε κινούμενο στόχο. Ο αριθμός των συνολικών πεπερασμένων στοιχείων είναι 11,603 και ο αριθμός των κόμβων είναι 13,546.



Σχήμα 3.14: Συνολικό Μοντέλο κινούμενου στόχου.

Όπως παρουσιάζεται στο <u>σχήμα 3.14</u>, η απόσταση ακροφυσίου-στόχου είναι ίση με 2 mm και το πάχος του στόχου είναι επίσης 2 mm. Η ταχύτητα της δέσμης του νερού είναι λαμβάνεται ομοιόμορφη και ίση με V_W = 842 m/sec και η ταχύτητα πρόωσης του κινούμενου στόχου είναι V = 75 mm/min ή 0.00125 m/sec.

Λόγω της ταυτόχρονης ύπαρξης ρευστών (νερό-αέρας) και στερεού (στόχος) στο ίδιο αριθμητικό μοντέλο, και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται η μέθοδος ALE, η μέθοδος αλληλεπίδρασης ρευστού-στερεού.

Για λόγους μείωσης υπολογιστικού χρόνου η διακριτοποίηση του πλέγματος δεν είναι αρκετά πυκνή και ιδιαίτερα για το πλέγμα του αέρα. Αυτό γίνεται φανερό από το σχήμα 3.14 όπου παρατηρείται ότι το μήκος καθενός από τα μεγαλύτερα στοιχεία του αέρα αντιστοιχεί σε τετραπλάσιο μήκος από αυτό των στοιχείων του στόχου. Για μια ακριβή προσέγγιση του φαινομένου, η διακριτοποίηση που θα επιλεγεί θα πρέπει να είναι πολύ πυκνότερη της παρούσας. Σε δι-διάστατα προβλήματα είναι εύκολο το πλέγμα να πυκνώνει αυτόματα στα σημεία που χρειάζεται και μόνο κατά το χρονικό διάστημα που χρειάζεται. Αυτό όμως το προσαρμοστικό πλέγμα (adaptive remeshing), όπως ονομάζεται, δεν έχει αναπτυχθεί για τρισδιάστατα προβλήματα από τον κώδικα Ls-dyna. Έτσι η προσέγγιση που γίνεται μέσω της επιλογής της αραιής διακριτοποίησης για επίλυση σε κάποιο λογικό χρονικό διάστημα στην παρούσα περίπτωση τρισδιάστατου προβλήματος δεν είναι αρκετά ακριβής.

3.3.2.2 Συνολικό Μοντέλο διαδοχικών στατικών προβλημάτων (ακίνητος στόχος)

Η επίλυση της προηγούμενης περίπτωσης μοντελοποίησης WJ σε κινούμενο στόχο, όπου μελετάται μια συγκεκριμένη περίπτωση κοπής με WJ (η απόσταση ακροφυσίου-στόχου είναι ίση με 2 mm και το πάχος του στόχου είναι επίσης 2 mm) είναι μια χρονοβόρα διαδικασία ακόμα και με τη χρήση υπολογιστών παράλληλης επεξεργασίας (cluster system) όπως γίνεται φανερό παρακάτω στο κεφάλαιο 4 (Παράγραφος 4.2). Για το λόγο αυτό, και με βάση το γεγονός ότι τα αποτελέσματα στο πλάτος κοπής με WJ κατά την πρόωση προσεγγίζονται αρκετά καλά μέσω διαδοχικών στατικών προβλημάτων κοπής, κρίνεται σκόπιμη η μοντελοποίηση ενός αριθμητικού μοντέλου κοπής σε ακίνητο στόχο προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος.

Έτσι πραγματοποιούνται έξι (6) διαφορετικές περιπτώσεις μοντελοποίησης κοπής σε ακίνητο στόχο (απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 2 ή 8 mm και το πάχος του στόχου είναι επίσης 1 , 1.5, ή 2 mm) με σκοπό τη σύγκριση με τις αντίστοιχες πειραματικές παρατηρήσεις όπως αυτές παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά δύο (2) από αυτές τις περιπτώσεις:

α) το μοντέλο με απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 2 mm και το πάχος του στόχου ίσο με 2 mm και

β) το μοντέλο με απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 8 mm και το πάχος του στόχου ίσο επίσης με 2 mm.

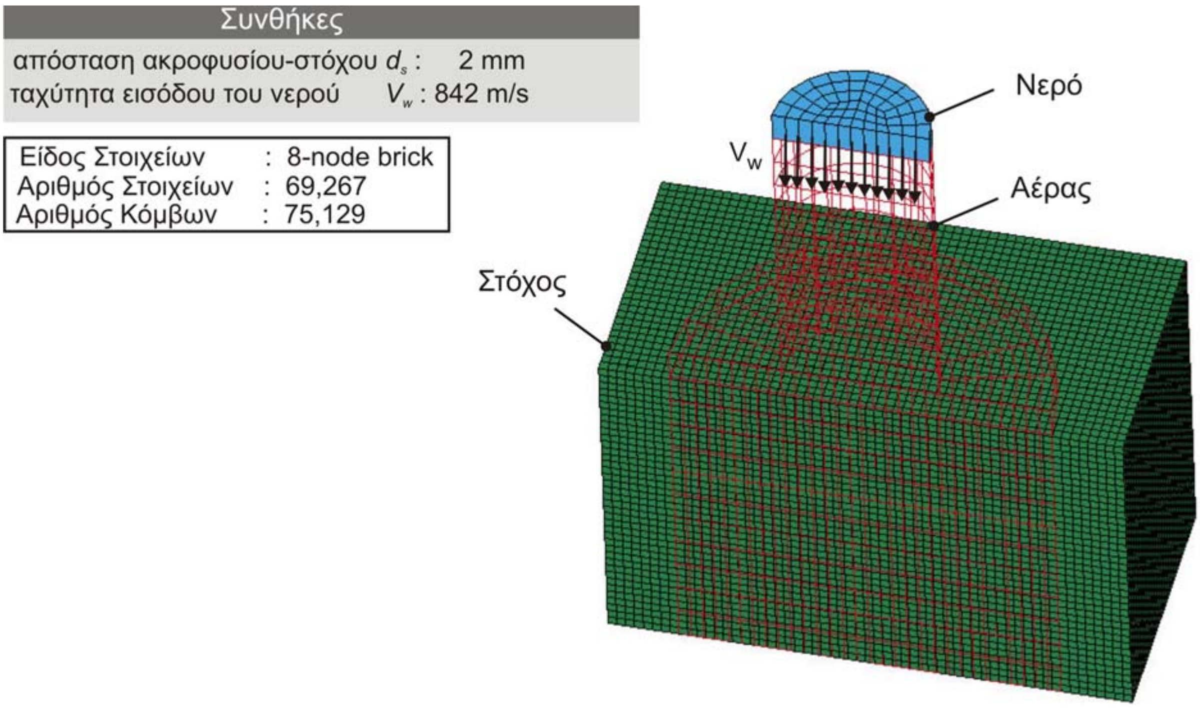
Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι αν συμπεριληφθεί και το γεγονός ότι ο στόχος αφορά δύο διαφορετικά υλικά: Aluminum (1050-O) και Aluminum (1050-H14), τότε οι διαφορετικές περιπτώσεις κοπής που προσομοιώνονται είναι συνολικά δώδεκα (12).

Στις δύο περιπτώσεις μοντελοποίησης που παρουσιάζονται παρακάτω η διακριτοποίηση της περιοχής εισόδου του νερού είναι ίδια με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της μοντελοποίησης κοπής σε κινούμενο στόχο. Όσον αφορά τη διακριτοποίηση της περιοχής του στόχου, η διακριτοποίηση του είναι ίδια για πάχος στόχου=2 mm και ανάλογη για πάχος στόχου=1 mm, 1.5 mm με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της μοντελοποίησης κοπής σε κινούμενο στόχο. Επίσης η διακριτοποίηση της περιοχής του αέρα είναι αρκετά πυκνότερη από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της μοντελοποίησης κοπής σε κινούμενο στόχο, καθώς για επίλυση μοντέλου με ακίνητο στόχο, είναι εφικτή η πύκνωση των πεπερασμένων στοιχείων όπου κρίνεται απαραίτητη χωρίς να αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος επίλυσης. Η πυκνότερη διακριτοποίηση στην περίπτωση ακίνητου στόχου θα έχει σημαντικά αποτελέσματα στην ακρίβεια της μέτρησης του πλάτους κοπής καθώς ένα στοιχείο αέρα-νερού θα δύναται να αποκολλήσει σχεδόν ένα μόνο στοιχείο στόχου σε αντίθεση με την περίπτωση της μοντελοποίησης του κινούμενου στόχου όπου ένα στοιχείο αέρα-νερού μπορούσε να αποκολλήσει σχεδόν τέσσερα στοιχεία στόχου.

Α)Συνολικό Μοντέλο (απόσταση ακροφυσίου-στόχου = 2mm, πάχος ακίνητου στόχου = 2 mm)

Το συνολικό αριθμητικό μοντέλο σε ακίνητο στόχο περιέχει και τις τρεις επιμέρους υπό μελέτη περιοχές οι οποίες συνιστούν το πρόβλημα κοπής με δέσμη καθαρού νερού σε κινούμενο στόχο. Ο αριθμός των συνολικών πεπερασμένων στοιχείων είναι 69,267 και ο αριθμός των κόμβων είναι 75,129.

Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.15, η απόσταση ακροφυσίου-στόχου είναι ίση με 2 mm. Η ταχύτητα της δέσμης του νερού είναι ίση με V_W = 842 m/sec και λαμβάνεται ομοιόμορφη καθώς δε συντρέχει λόγος για ακρίβεια στο προφίλ.



Σχήμα 3.15: Συνολικό μοντέλο ακίνητου στόχου με απόσταση ακροφυσίου - στόχου = 2 mm

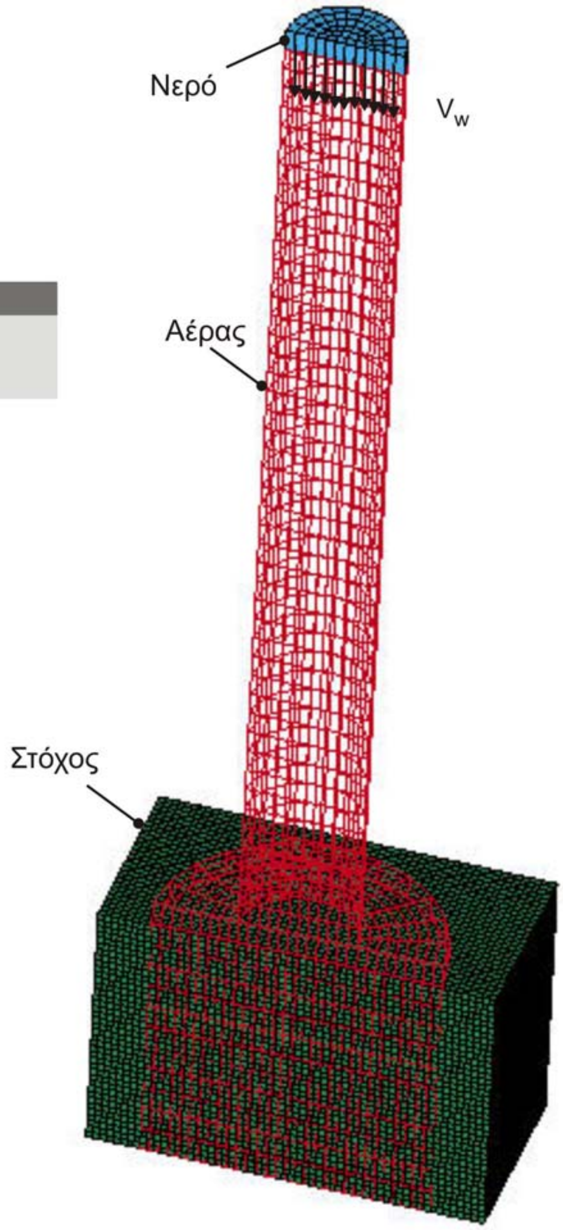
Η διακριτοποίηση του πλέγματος του στόχου είναι πανομοιότυπη με αυτήν της περίπτωσης του μοντέλου με κινούμενο στόχο ενώ η διακριτοποίηση του πλέγματος είναι αρκετά πυκνότερη για το πλέγμα του αέρα σε σχέση με την περίπτωση του μοντέλου με κινούμενο στόχο. Αυτό που γίνεται φανερό από το σχήμα 3.15 είναι ότι το μήκος καθενός από τα μεγαλύτερα στοιχεία του αέρα αντιστοιχεί σε μήκος περίπου ίσο με αυτό των στοιχείων του στόχου.

Β)Συνολικό Μοντέλο (απόσταση ακροφυσίου-στόχου = 8 mm, πάχος ακίνητου στόχου = 2 mm)

Το συνολικό αριθμητικό μοντέλο περιέχει και τις τρεις επιμέρους υπό μελέτη περιοχές οι οποίες συνιστούν το πρόβλημα κοπής με δέσμη καθαρού νερού σε κινούμενο στόχο. Ο αριθμός των συνολικών πεπερασμένων στοιχείων είναι 71,211 και ο αριθμός των κόμβων είναι 77,541. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.16, η απόσταση ακροφυσίου-στόχου είναι ίση με 8 mm. Η ταχύτητα της δέσμης του νερού είναι ίση με V_W = 842 m/sec.

Συνθήκες	
απόσταση ακροφυσίου-στόχου d_s :	8 mm
ταχύτητα εισόδου του νερού	V_w : 842 m/s

Είδος Στοιχείων	: 8-node brick
Αριθμός Στοιχείων	: 71,211
Αριθμός Κόμβων	: 77,541



Σχήμα 3.16: Συνολικό μοντέλο ακίνητου στόχου με απόσταση ακροφυσίου-στόχου=8 mm

Η διακριτοποίηση του πλέγματος του στόχου είναι πανομοιότυπη με αυτήν της περίπτωσης του μοντέλου με κινούμενο στόχο ενώ η διακριτοποίηση του πλέγματος είναι αρκετά πυκνότερη για το πλέγμα του αέρα σε σχέση με την περίπτωση του μοντέλου με κινούμενο στόχο. Αυτό που γίνεται φανερό από το σχήμα 3.16 είναι όπως και στο σχήμα 3.15 το μήκος καθενός από τα μεγαλύτερα στοιχεία του αέρα αντιστοιχεί σε μήκος περίπου ίσο με αυτό των στοιχείων του στόχου.

3.3.3 Οριακές Συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος ορίστηκαν ως εξής:

- Η ταχύτητα του νερού είναι σταθερή και ίση με 842 m/sec.
- Η ταχύτητα πρόωσης του στόχου (εφόσον μελετάται το μοντέλο με τον κινούμενο στόχο) είναι σταθερή και ίση με 0.00125 m/sec.
- Η απόσταση ακροφυσίου-στόχου στην περίπτωση μοντελοποίησης κοπής με WJ σε κινούμενο στόχο είναι ίση με 2 mm. Στην αντίστοιχη περίπτωση μοντελοποίησης σε ακίνητο στόχο η απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 2 mm ή με 8 mm.
- Το πάχος του στόχου στην περίπτωση μοντελοποίησης κοπής με WJ σε κινούμενο στόχο είναι ίσο με 1 mm. Στην αντίστοιχη περίπτωση μοντελοποίησης κοπής σε ακίνητο στόχο, το πάχος του στόχου λαμβάνεται ίσο με 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, μελετώντας έτσι έξι (6) συνολικά περιπτώσεις.
- Για λόγους μείωσης του υπολογιστικού χρόνου, δημιουργήθηκε και επιλύθηκε μόνο το μισό (γεωμετρικά) μοντέλο, λόγω της υφιστάμενης συμμετρίας του.
- Στα τοιχώματα του στόχου αναπτύχθηκαν κατάλληλες οριακές συνθήκες (non-reflecting boundaries) για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα του. Με αυτές τις οριακές συνθήκες, οι διαστάσεις (μήκος, πλάτος) του στόχου λαμβάνονται θεωρητικά ως άπειρες, ενώ στη μοντελοποίηση και στην αριθμητική επίλυση λαμβάνονται κατά το δυνατόν μικρότερες ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό φορτίο.
- Χρησιμοποιείται μέθοδος αριθμητικής επίλυσης με ενδογενή προσδιορισμό του βήματος ολοκλήρωσης (explicit) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η τιμή του χρονικού βήματος να είναι ίση με Δt = 9.8998e-6 msec.

Αυτό το αποτέλεσμα για την περίπτωση μοντελοποίησης κοπής με WJ σε κινούμενο στόχο εξάγεται σύμφωνα με τις ιδιότητες του υλικού που χρησιμοποιείται ως στόχος (E = 69 GPa, ρ = 2.705e-6 kg/mm^3) και σύμφωνα με τις διαστάσεις του μικρότερου στοιχείου Δx = 0.05 mm.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c} = \frac{\Delta x}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} = \frac{0.05}{\sqrt{\frac{69}{2.705 \bullet 10^{-6}}}} = \frac{0.05}{\sqrt{25.508 \bullet 10^{6}}} = \frac{0.05}{5050.576} = 9.8998 \bullet 10^{-6} \text{ msec.}$$

3.4 Μοντέλο Προσομοίωσης της Πρόσκρουσης Λειαντικών Κόκκων σε Ακίνητο Στόχο

Στόχος της ανάπτυξης αυτού του αριθμητικού μοντέλου, ήταν η βαθύτερη κατανόηση του μηχανισμού διάβρωσης της κατεργασίας Abrasive Waterjet (AWJ). Το μοντέλο αναπτύχθηκε επιλύθηκε αριθμητικά μέσω του λογισμικού Ls-Dyna3D (έκδοση mpp971 single precision R3.45855_PGI in linux86-64 with hpmpi) σε ένα σύστημα 64-bit cluster παράλληλης επεξεργασίας οκτώ (8) κόμβων. Το εν λόγω μοντέλο προσομοιώνει την πρόσκρουση λειαντικών κόκκων AWJ σε ακίνητο στόχο και την προκαλούμενη διάβρωση του υλικού του στόχου. Η διάβρωση του στόχου προκαλείται όταν οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στο στόχο υπερβούν το όριο παραμόρφωσης (failure strain), οπότε στοιχεία του στόχου αποκολλώνται.

Στην εργασία των Junkar *et al*. /121/, μοντελοποιήθηκε η διαδικασία πρόσκρουσης ενός μόνο λειαντικού κόκκου του AWJ πάνω σε στόχο από ανοξείδωτο χάλυβα. Η μελέτη διερεύνησε την εξάρτηση της γεωμετρίας του σχηματιζόμενου κρατήρα στην επιφάνεια του στόχου από την ταχύτητα και τη γωνία πρόσκρουσης του κόκκου.

Το παρόν αριθμητικό μοντέλο /4/, αποτελεί μια σημαντική επέκταση και βελτίωση του προηγούμενου, καθώς προσεγγίζει με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια τη διαδικασία διάβρωσης με AWJ, διότι στη διαδικασία διάβρωσης συμμετέχει ικανός αριθμός λειαντικών κόκκων. Συγκεκριμένα, είκοσι (20) κόκκοι προσκρούουν διαδοχικά στο στόχο, και μελετάται η επίδραση της ταχύτητας και της γωνίας πρόσκρουσης (τρεις διαφορετικές ταχύτητες 180, 200, 220 m/sec, και τρεις διαφορετικές γωνίες 30°, 60° και 90°). Η κυκλικότητα του σχηματιζόμενου κρατήρα καταγράφεται μετά την πρόσκρουση κάθε λειαντικού κόκκου και εξάγονται συμπεράσματα για τη σταθεροποίηση του σχήματος και του μεγέθους του.

3.4.1 Διακριτοποίηση

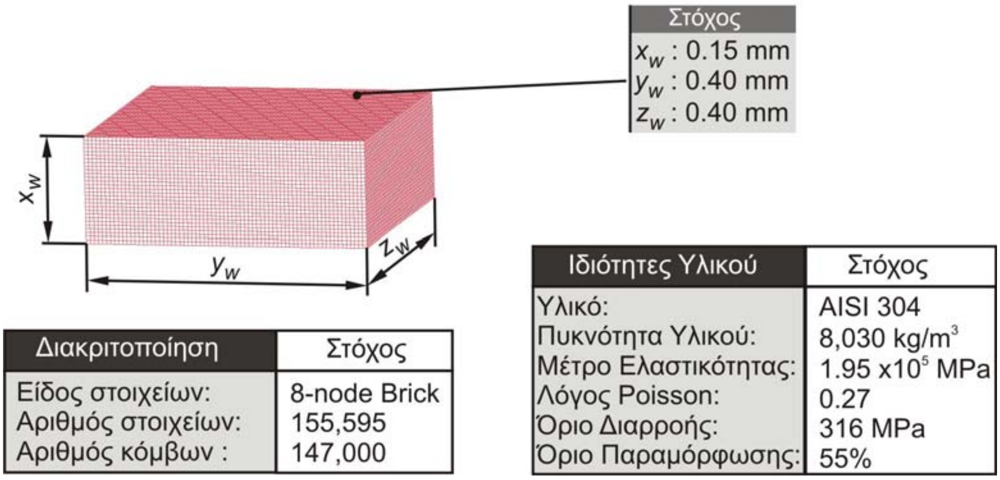
Η δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου, της διακριτοποίησης του στόχου και του συνολικού συστήματος των 20 σωματιδίων που προσκρούουν στον στόχο, πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού ANSYS ICEM CFD advanced meshing.

3.4.1.1 Διακριτοποίηση στόχου

Για τη γεωμετρία του στόχου επιλέγεται ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με διαστάσεις αρκετά μικρές για λόγους μείωσης υπολογιστικού φορτίου αλλά και ικανές για τη μέτρηση της κυκλικότητας του σχηματιζόμενου κρατήρα. Στα τοιχώματα του στόχου επιβάλλονται οριακές συνθήκες (non-reflecting boundaries) που ουσιαστικά λαμβάνουν τις διαστάσεις του στόχου ως άπειρες.

Η γεωμετρία, οι ιδιότητες, και οι λεπτομέρειες της διακριτοποίησης του υλικού, παρουσιάζονται αναλυτικά στο σχήμα 3.17. Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα, για τη διακριτοποίηση του στόχου χρησιμοποιήθηκε η απλή διαδικασία του καρτεσιανού πλέγματος.

Για το υλικό του στόχου υιοθετήθηκε ένα ελαστο-πλαστικό μοντέλο τάσεων-παραμορφώσεων, κατάλληλο για ανοξείδωτο χάλυβα και διακριτοποιήθηκε σε 155,595 τρισδιάστατα στοιχεία 6 εδρών-8 κόμβων. Για τον ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304 με πυκνότητα ρ = 8030 kg/m^3, μέτρο ελαστικότητας E = 195 GPa, λόγο Poisson v = 0.27 και όριο διαρροής R_y = 316 Mpa, το όριο παραμόρφωσης είναι 55%.

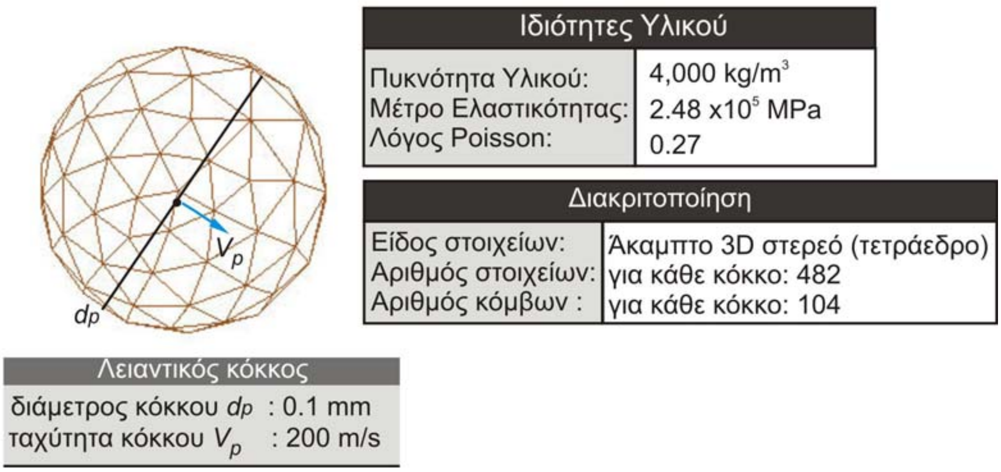


Σχήμα 3.17: Μοντελοποίηση Στόχου

3.4.1.2 Διακριτοποίηση λειαντικών κόκκων

Κάθε κόκκος μοντελοποιείται ως άκαμπτη σφαίρα αποτελούμενη από τετραεδρικά στοιχεία. Η διακριτοποίηση γίνεται με χρήση του προεπεξεργαστή ANSYS ICEM CFD και χρησιμοποιώντας μη-δομημένο πλέγμα. Έτσι στη διακριτοποίηση του κάθε κόκκου, χρησιμοποιήθηκαν 482 στοιχεία τεσσάρων (4) εδρών ενώ ο συνολικός αριθμός των κόμβων για κάθε κόκκο είναι 104.

Η ιδιότητα της ακαμψίας συνεπάγεται μηδενικές τάσεις και παραμορφώσεις για τους κόκκους. Οι ιδιότητες των κόκκων που είναι: πυκνότητα υλικού ρ = 4000 kg/m^3, μέτρο ελαστικότητας E = 248 GPa, και λόγος Poisson v = 0.27, παρουσιάζονται αναλυτικά στο σχήμα 3.18.

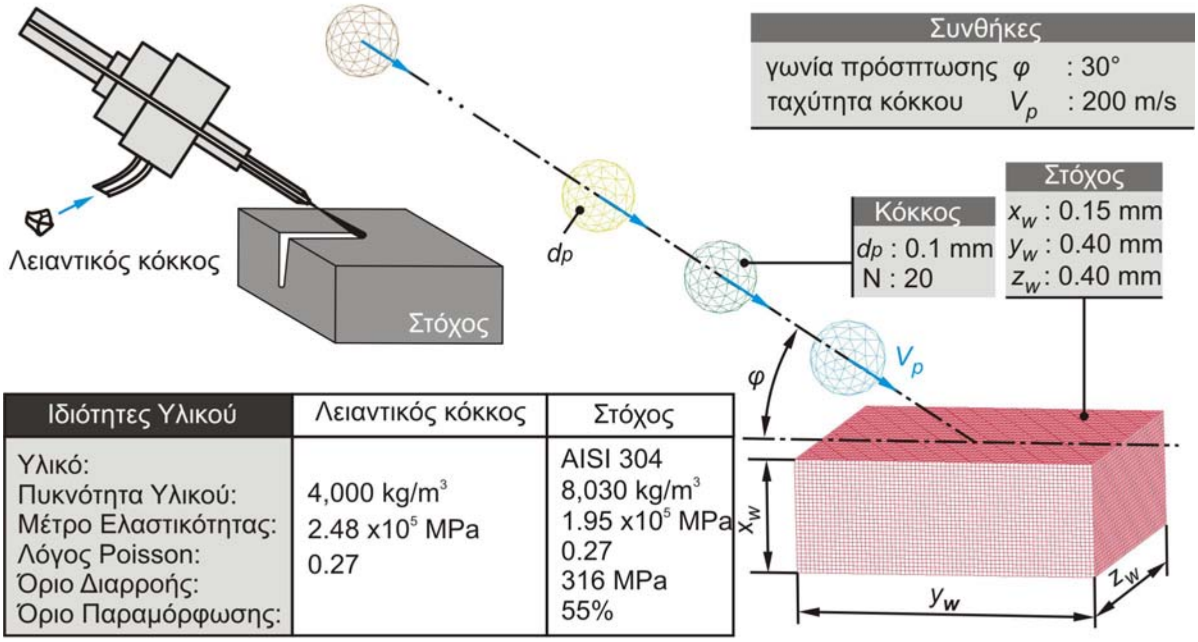


Σχήμα 3.18: Μοντελοποίηση λειαντικού κόκκου

Η επιλογή της μοντελοποίησης του κόκκου ως άκαμπτη σφαίρα πραγματοποιήθηκε καθώς δεν ενδιαφέρει η μελέτη των τάσεων και των παραμορφώσεων του κόκκου, αλλά αυτό που ενδιαφέρει είναι η μελέτη των τάσεων και των παραμορφώσεων του στόχου. Εξάλλου, με τη θεώρηση αυτή του κόκκου ως άκαμπτης σφαίρας, επιτυγχάνεται μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Αν η επιλογή της μοντελοποίησης συμπεριλάβει ένα ελαστο-πλαστικό υλικό αντί της άκαμπτης σφαίρας για τον κόκκο, τότε τα αποτελέσματα αναμένονται διαφορετικά.

3.4.2 Συνολικό Μοντέλο

Το συνολικό αριθμητικό μοντέλο που επιλύθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 3.19, από το οποίο καθίσταται προφανές ότι οι λειαντικοί κόκκοι προσκρούουν υπό γωνία φ και με ταχύτητα V_p επί του στόχου. Η ταχύτητα των κόκκων αποκτάται από το νερό – που ρέει ταυτόχρονα – εντός του ακροφυσίου του AWJ.



Ιδιότητες Υλικού	Λειαντικός κόκκος	Στόχος
Υλικό:		AISI 304
Πυκνότητα Υλικού:	4,000 kg/m^3	8,030 kg/m^3
Μέτρο Ελαστικότητας:	2.48 x10^5 MPa	1.95 x10^5 MPa
Λόγος Poisson:	0.27	0.27
Όριο Διαρροής:		316 MPa
Όριο Παραμόρφωσης:		55%

Διακριτοποίηση	Λειαντικός κόκκος	Στόχος
Είδος στοιχείων:	Άκαμπτο 3D στερεό (τετράεδρο)	8-node Brick
Αριθμός στοιχείων:	για κάθε κόκκο: 482	155,595
Αριθμός κόμβων :	για κάθε κόκκο: 104	147,000

Σχήμα 3.19: Μέθοδος Μοντελοποίησης και Δεδομένα Εισόδου

3.4.3 Οριακές συνθήκες

- Ταχύτητα κόκκων: 180 m/sec, 200 m/sec, 220 m/sec.
- Γωνία πρόσπτωσης κόκκων: 30°, 60° και 90°.
- Στα τοιχώματα του στόχου αναπτύχθηκαν κατάλληλες οριακές συνθήκες (non-reflecting boundaries) για την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στα άκρα του. Με αυτές τις οριακές συνθήκες, οι διαστάσεις (μήκος, πλάτος) του στόχου λαμβάνονται θεωρητικά ως άπειρες, ενώ στη μοντελοποίηση και στην αριθμητική επίλυση λαμβάνονται κατά το δυνατόν μικρότερες ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό φορτίο.
- Κάθε κόκκος θεωρείται άκαμπτος (rigid).
- Το κάτω μέρος του στόχου δεν επιδέχεται καμία κίνηση.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

4.1 Αποτελέσματα Αριθμητικού Μοντέλου Προσομοίωσης της Διαδικασίας Κοπής με Δέσμη Καθαρού Νερού σε Ακίνητο Στόχο

Το ακροφύσιο που μελετάται στην πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη /2,3/, αρχικά θεωρείται ότι είναι κενό, πλην της εισόδου του, που καταλαμβάνεται από νερό, εισερχόμενο με ταχύτητα ίση με 100 m/sec. Κατά την είσοδο του νερού στο ακροφύσιο, η ροή αναπτύσσεται σταδιακά και έχει μηδενική ταχύτητα στα τοιχώματα του ακροφυσίου (λόγω ανάπτυξης οριακού στρώματος). Η ταχύτητα της ροής βαίνει αυξανόμενη προς το κέντρο του ακροφυσίου, ενώ το προφίλ ταχυτήτων – γενικά – μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Με το πέρας του χρόνου, το προφίλ ταχυτήτων της ροής του νερού γίνεται συμμετρικό, ενώ η ταχύτητα έχει ενισχυθεί κατά τουλάχιστον εννέα (9) φορές στο σημείο εξόδου της ροής από το ακροφύσιο.

Η δυναμική πίεση αυξάνεται ενώ η στατική μειώνεται, με τη συνολική πίεση (άθροισμα δυναμικής και στατικής) να παραμένει σταθερή. Στην έξοδο του ακροφυσίου η συνολική πίεση είναι κατά τι μικρότερη, γεγονός που αποδεικνύει ότι πρακτικά υφίστανται απώλειες λόγω συνεκτικότητας (ιξώδους) του νερού.

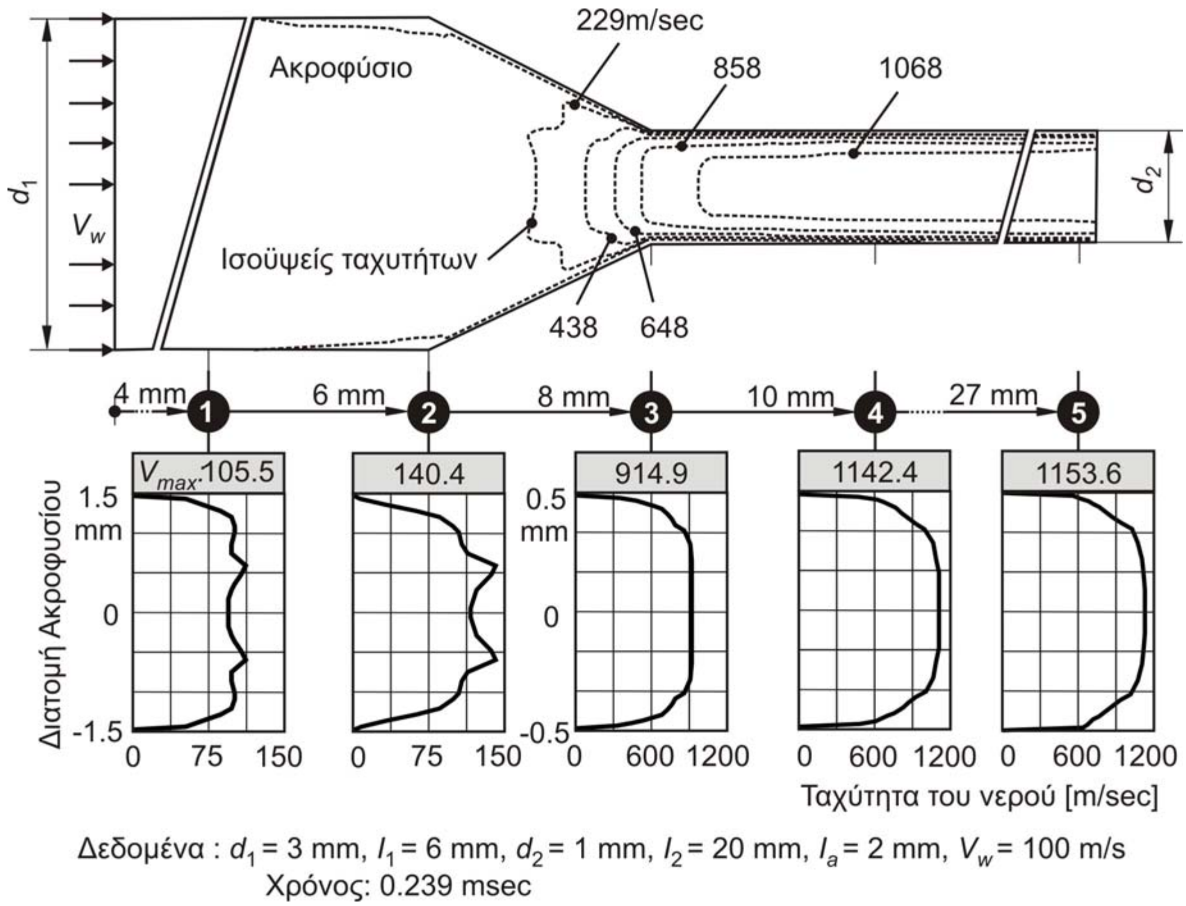
4.1.1 Υπολογισμός προφίλ ταχυτήτων εντός του ακροφυσίου

Η ακριβής αριθμητική προσομοίωση της διαδικασίας κοπής με WJ, απαιτεί τον αναλυτικό υπολογισμό του προφίλ ταχύτητας της ροής του νερού, τη στιγμή που εξέρχεται από το ακροφύσιο.

Στο <u>σχήμα 4.1</u> παρουσιάζεται το ακροφύσιο, οι ισοϋψείς καμπύλες ταχυτήτων εντός αυτού και το προφίλ της ταχύτητας του νερού σε συγκεκριμένες θέσεις κατά μήκος του ακροφυσίου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά την οποία η ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως (0.239 msec μετά την είσοδο του νερού στο ακροφύσιο). Τα αποτελέσματα αυτά έχουν εξαχθεί με βάση τη διακριτοποίηση του ακροφυσίου όπως έχει παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.2.1.1 για την πρώτη περίπτωση ακροφυσίου που αντιστοιχεί σε WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη.

Τα δύο πρώτα προφίλ ταχύτητας του σχήματος 4.1 αντιστοιχούν στην περιοχή εισόδου του ακροφυσίου όπου η διάμετρος είναι 3 mm, ενώ τα επόμενα 3 διαγράμματα αντιστοιχούν στο τμήμα εστίασης του ακροφυσίου, όπου η διάμετρος είναι 1 mm. Οι ισοϋψείς ταχυτήτων δηλώνουν ότι η ροή είναι πρακτικά πλήρως ανεπτυγμένη στο τέλος (10 mm – 28 mm) του τμήματος εστίασης του ακροφυσίου.

Όπως γίνεται φανερό όμως από το σχήμα 4.1 η διακριτοποίηση που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι ικανή να καλύψει με λεπτομέρεια τα αποτελέσματα της ταχύτητας του νερού συναρτήσει της διατομής του ακροφυσίου. Ο αριθμός των κόμβων στους οποίους υπολογίζεται η ταχύτητα αποδεικνύεται μικρός όπως φαίνεται στα δύο πρώτα προφίλ ταχύτητας τα οποία παρουσιάζουν έντονες ‘’κοιλάδες’’ και ‘’κορυφές’’ στο μέσον περίπου της ακτίνας του ακροφυσίου.



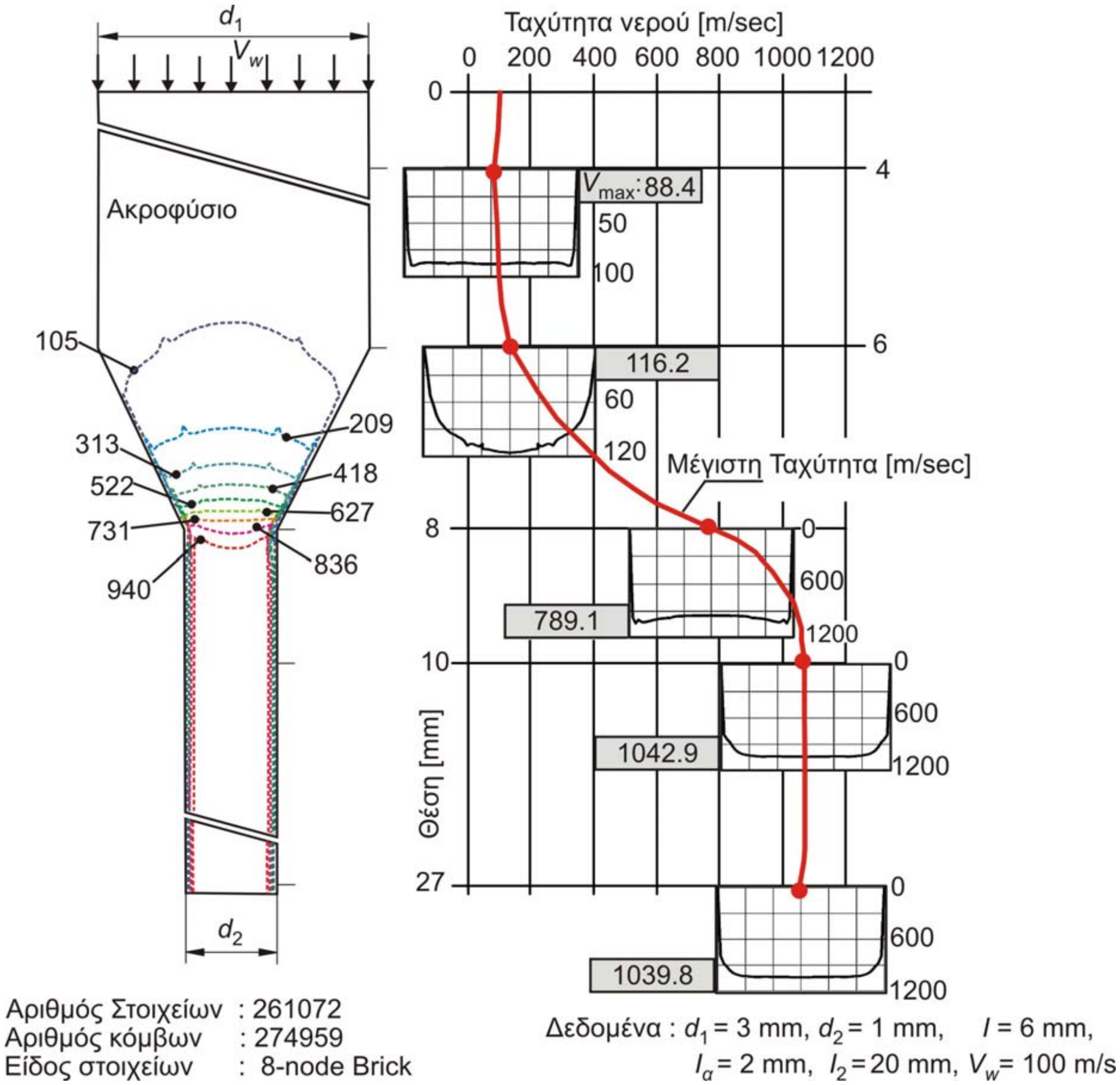
Σχήμα 4.1: Προφίλ ταχύτητας σε θέσεις κατά μήκος του ακροφυσίου (Περίπτωση 1: Ακροφύσιο που χρησιμοποιείται σε WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη)

Για μία ακριβέστερη προσέγγιση, κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί πυκνότερη διακριτοποίηση του ακροφυσίου. Έτσι, στο σχήμα 4.2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (των ισοϋψών καμπυλών ταχυτήτων εντός του ακροφυσίου και το προφίλ της ταχύτητας του νερού σε συγκεκριμένες θέσεις κατά μήκος του ακροφυσίου σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή κατά την οποία η ροή έχει αναπτυχθεί πλήρως) έπειτα από μια πυκνότερη διακριτοποίηση του πλέγματος του ακροφυσίου που περιλαμβάνει συνολικά 261,072 στοιχεία και 274,959 κόμβους.

Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα 4.2 η πυκνότερη διακριτοποίηση του πλέγματος του ακροφυσίου καλύπτει με λεπτομέρεια τα αποτελέσματα της ταχύτητας του νερού συναρτήσει της διατομής του ακροφυσίου. Έτσι το σχήμα που έχουν τα δύο πρώτα προφίλ ταχύτητας είναι αναμενόμενο, χωρίς έντονες ‘’κοιλάδες’’ και ‘’κορυφές’’. Όπως παρατηρείται από τη σύγκριση των σχημάτων 4.1 και 4.2 αυτά τα απρόσμενα χαρακτηριστικά στο προφίλ της ταχύτητας του σχήματος 4.1 (έντονες ‘’κοιλάδες’’ και ‘’κορυφές’’) είναι απλώς αποτέλεσμα της αραιής διακριτοποίησης και το μέσο προφίλ ακολουθεί γενικά τη μορφή που έχει το πυκνότερο πλέγμα.

Στο πρώτο προφίλ ταχύτητας σε απόσταση 4 mm από την είσοδο το ακροφυσίου, η μορφή του προφίλ της ταχύτητας εξηγείται αν θεωρηθεί ότι ισχύει η ‘’συνθήκη μη-ολίσθησης’’ στα τοιχώματα του ακροφυσίου. Το δυναμικό ιξώδες του νερού που είναι ίσο με $\mu = 10^{-3}$ Pa·s καθώς επίσης και το δυναμικό ιξώδες του αέρα που είναι ίσο με $\mu = 1.67 \cdot 10^{-5}$ Pa·s είναι υπεύθυνα για τις τριβές που αναπτύσσονται στα τοιχώματα του ακροφυσίου και αναγκάζουν το νερό να μην ολισθαίνει πάνω στα τοιχώματα, αλλά να έχει φανερά μειωμένη ταχύτητα σε σχέση με την ταχύτητα εισόδου.

Το δεύτερο προφίλ ταχύτητας παρουσιάζεται για απόσταση 6 mm από την είσοδο του νερού και έχει σχήμα παραβολικό. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας εκεί (120 m/sec) είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αρχικά ομοιόμορφη ταχύτητα εισόδου στο ακροφύσιο (100 m/sec) και αυτό προξενείται λόγω της μείωσης της ταχύτητας στα τοιχώματα σε συνδυασμό με την διατήρηση της ενέργειας στο ακροφύσιο.



Σχήμα 4.2: Προφίλ ταχύτητας σε θέσεις κατά μήκος του ακροφυσίου (Περίπτωση 1: Ακροφύσιο που χρησιμοποιείται σε WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη)

Στο τέταρτο και πέμπτο προφίλ της ταχύτητας, ήτοι στα 10 και 27 mm αντίστοιχα μετά την είσοδο του νερού, αντιστοιχεί μέγιστη ταχύτητα δεκαπλάσια της αρχικής ταχύτητας εισόδου του νερού, όπως ήταν αναμενόμενο.

Επίσης, στο διάγραμμα του σχήματος 4.2 σημειώνεται (με κόκκινο χρώμα) η εξέλιξη της τιμής της ταχύτητας στο μέσον του προφίλ. Η τιμή αυτή της ταχύτητας ουσιαστικά δεκαπλασιάζεται, μετά από τη διέλευση από το τμήμα επιτάχυνσης του ακροφυσίου, όπως γίνεται φανερό από το διάγραμμα. Η υπολογισθείσα τιμή της ταχύτητας στο μέσον του προφίλ και η εξέλιξή της κατά μήκος του ακροφυσίου, επαληθεύονται από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο βιβλίο των Momber και Kovacevic /124/ όπου η ταχύτητα εισόδου (100 m/sec) και η γεωμετρία του ακροφυσίου είναι κοινές με την παρούσα μελέτη.

Η ένδειξη σε καθεμιά από τις ισοϋψείς καμπύλες ταχυτήτων εντός του ακροφυσίου, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 4.2, αντιστοιχεί στην τιμή της ταχύτητας της εκάστοτε καμπύλης. Οι ισοϋψείς πυκνώνουν στο τμήμα επιτάχυνσης του ακροφυσίου όπως είναι αναμενόμενο καθώς εκεί συμβαίνει σταδιακή αύξηση της ταχύτητας.

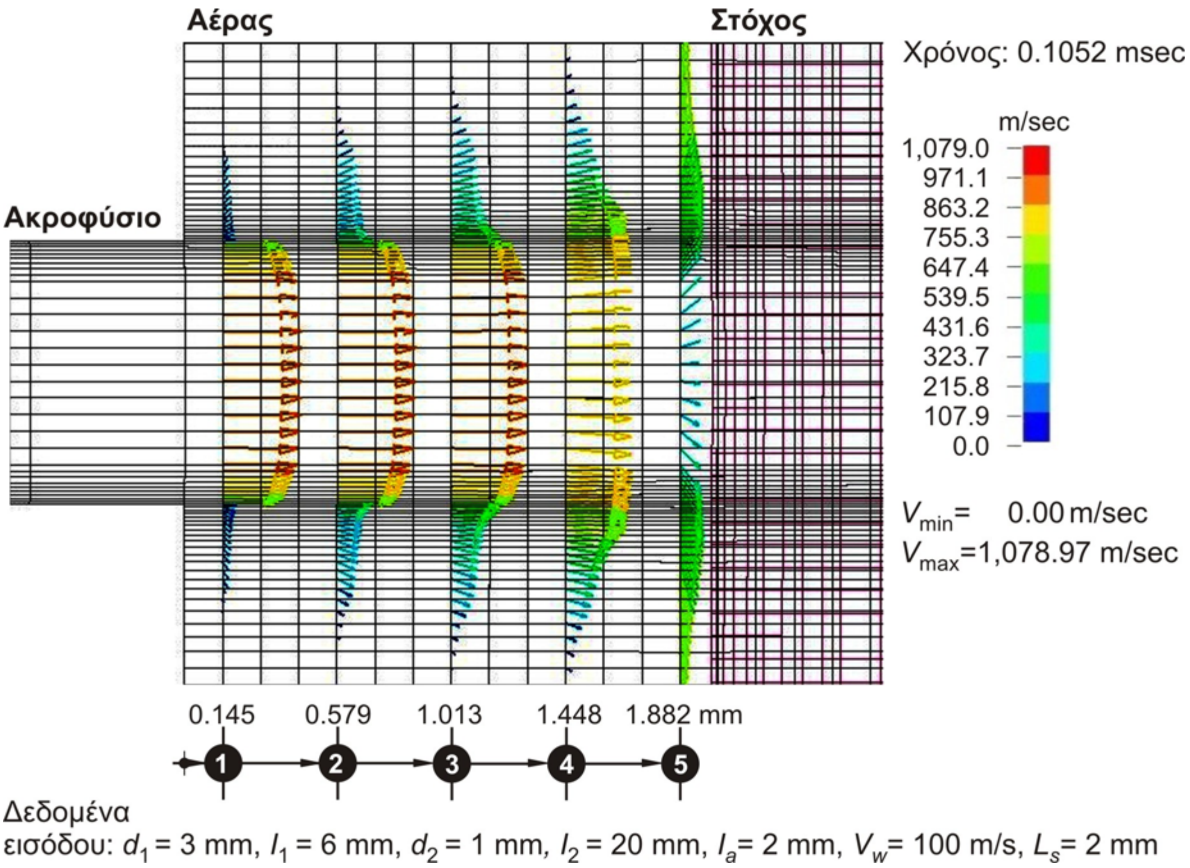
4.1.2 Κατανομή ταχυτήτων νερού στην περιοχή του αέρα

Το προφίλ ταχύτητας του νερού καθώς εξέρχεται από το ακροφύσιο, καθώς και η εξέλιξή του κατά τη διέλευσή του από την περιοχή του αέρα πριν την πρόσκρουσή του στο στόχο, (για την πρώτη περίπτωση όπου η κατεργασία WJ πραγματοποιείται σε στόχο χωρίς επικάλυψη) παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3 για χρόνο 0.1052 msec μετά την είσοδο του νερού στο ακροφύσιο.

Η πρόσκρουση του νερού στο στόχο πραγματοποιείται 0.1 msec μετά την είσοδο του νερού στο ακροφύσιο και επομένως η εικόνα που λαμβάνεται στο σχήμα 4.3 απεικονίζει το προφίλ των ταχυτήτων στην περιοχή του αέρα 5.2 μsec μετά από την πρόσκρουση του νερού στο στόχο.

Η απόσταση μεταξύ ακροφυσίου - στόχου σε αυτή την πρώτη περίπτωση μοντελοποίησης κατεργασίας WJ που πραγματοποιείται σε στόχο χωρίς επικάλυψη είναι ίση με 2 mm. Κατά μήκος αυτής της απόστασης, η δέσμη του νερού παραμένει κυλινδρική μέχρι την πρόσκρουσή της στο στόχο. Από τη στιγμή της πρόσκρουσης, σε χρόνο 0.1052 msec από την εκκίνηση της διαδικασίας προσομοίωσης, τα διανύσματα της ταχύτητας του νερού παρουσιάζονται στο σχήμα 4.3 σε 5 θέσεις κατά μήκος της απόστασης ακροφυσίου – στόχου 0.145, 0.579, 1.013, 1.448 και 1.882 mm αντίστοιχα.

Η μελέτη του σχήματος 4.3, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η δέσμη νερού μετά από 5.2 μsec από την πρόσκρουση του νερού στο στόχο απλώνεται, ενώ η ταχύτητά της μειώνεται στην περιοχή του αέρα μεταξύ ακροφυσίου-στόχου, διότι ο αέρας λειτουργεί ως “στόχος” με πολύ μικρή πυκνότητα.



Σχήμα 4.3: Προφίλ ταχυτήτων στην περιοχή του αέρα μεταξύ ακροφυσίου – στόχου (Περίπτωση 1: WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη)

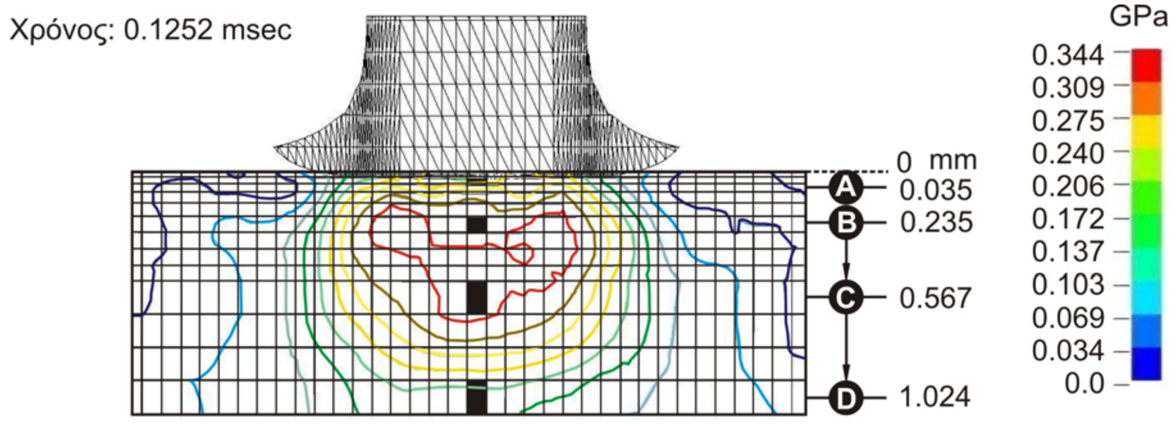
4.1.3 Κατανομή τάσεων von-Mises επί του στόχου

Η κατανομή των αναπτυσσόμενων τάσεων επαφής von-Mises (για την πρώτη περίπτωση όπου η κατεργασία WJ πραγματοποιείται σε στόχο χωρίς επικάλυψη) καθώς και η εξέλιξή τους συναρτήσει του χρόνου, από τη στιγμή που η δέσμη του νερού έρχεται σε επαφή με το στόχο αλουμινίου, παρουσιάζεται στα σχήματα 4.4 και 4.5.

Στο σχήμα 4.4 απεικονίζονται οι τάσεις von-Mises εντός του στόχου 0.0252 msec μετά την πρόσπτωση της δέσμης νερού πάνω στο στόχο, και συνολικά 0.1252 msec μετά την εκκίνηση της διαδικασίας προσομοίωσης, η οποία υπολογίζεται χρονικά, ως τη στιγμή κατά την οποία η δέσμη νερού εισέρχεται στο ακροφύσιο.

Ενδεικτικά ορίζονται τέσσερα (4) σημεία A, B, C και D, τα οποία βρίσκονται κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της δέσμης νερού (στο κέντρο του στόχου δηλαδή), σε απόσταση 0.035, 0.235, 0.567 και 1.024 mm, αντίστοιχα, από την επιφάνεια του στόχου.

Από την κατανομή των τάσεων, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στο εσωτερικό τμήμα του στόχου και σε βάθος από 0.235 έως 0.567 mm (περίπου) από την επιφάνειά του, βλ. σχήμα 4.4. Αντιθέτως, όπως είναι αναμενόμενο, οι τάσεις πολύ κοντά στην επιφάνεια αλλά και σε μεγάλες αποστάσεις από αυτήν, είναι μικρότερες.

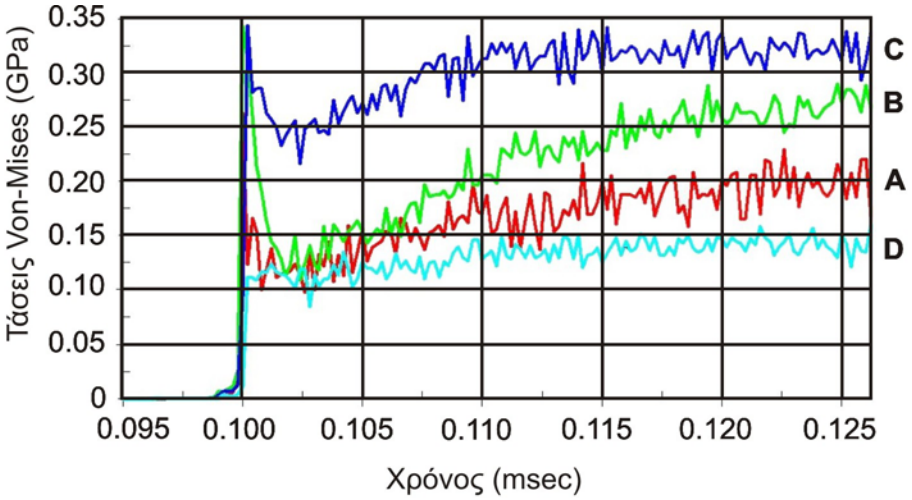


Δεδομένα: d_1 = 3 mm, l_1 = 6 mm, d_2 = 1 mm, l_2 = 20 mm, l_a = 2 mm,
V_w = 100 m/s, L_t = 1.1mm, L_s = 2 mm, Aluminum (A2024T3)

Σχήμα 4.4: Αναπτυσσόμενες τάσεις von-Mises στο στόχο (Περίπτωση 1: WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη)

Η χρονική εξέλιξη των αναπτυσσόμενων τάσεων von-Mises εντός του στόχου, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5, για τα τέσσερα (4) ενδεικτικά σημεία A, B, C και D, τα οποία βρίσκονται κατά μήκος του άξονα συμμετρίας της δέσμης νερού (στο κέντρο του στόχου δηλαδή), σε απόσταση 0.035, 0.235, 0.567 και 1.024 mm, αντίστοιχα, από την επιφάνεια του στόχου.

Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα 4.5, οι τάσεις von-Mises εντός του στόχου, όπως υπολογίζονται και για τα τέσσερα ενδεικτικά σημεία A, B, C και D, παρουσιάζουν μια μέγιστη τιμή την στιγμή της πρόσκρουσης που αμέσως μετά μειώνεται και στη συνέχεια με τη διέλευση του χρόνου, η τιμή αυτή αυξάνεται και αργότερα ταλαντώνεται γύρω από μια τελική τιμή.



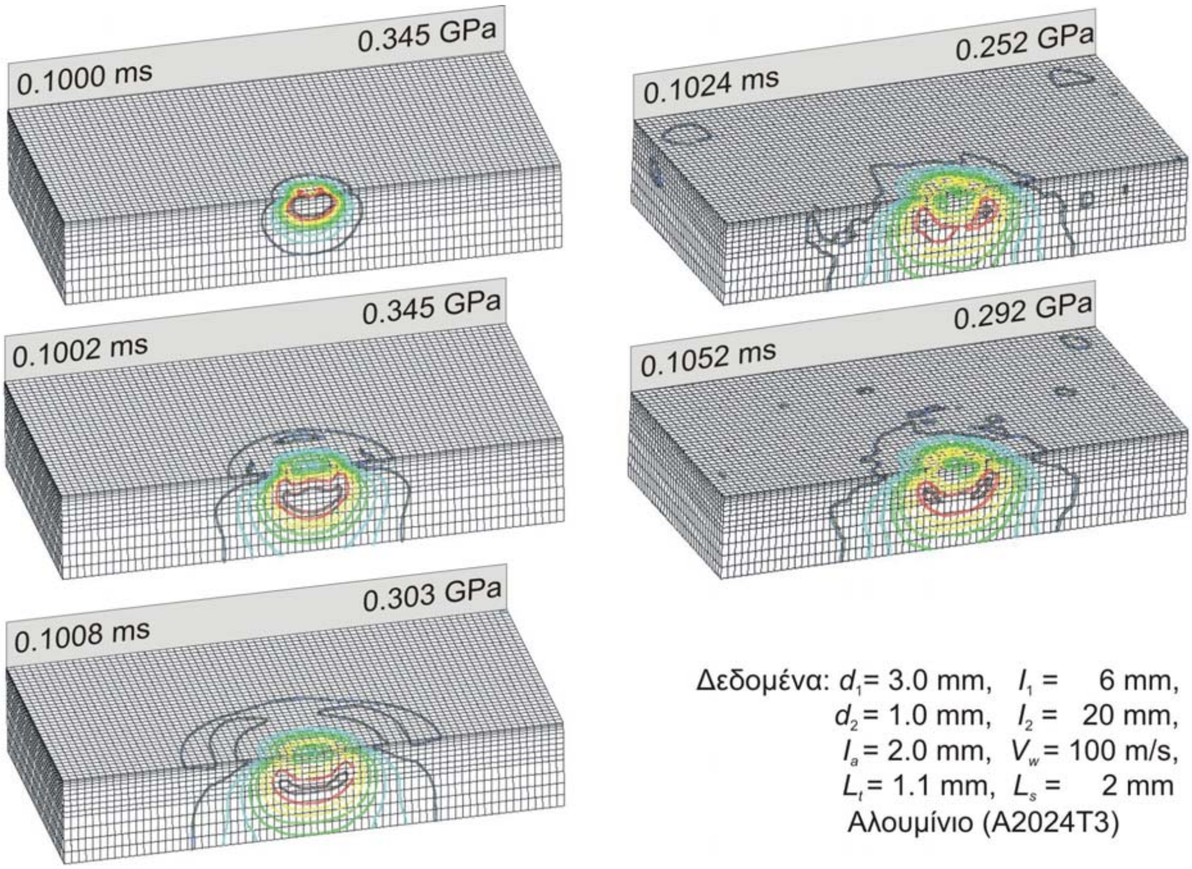
Δεδομένα: d_1 = 3 mm, l_1 = 6 mm, d_2 = 1 mm, l_2 = 20 mm, l_a = 2 mm,
V_w = 100 m/s, L_t = 1.1mm, L_s = 2 mm, Aluminum (A2024T3)

Σχήμα 4.5: Χρονική εξέλιξη αναπτυσσόμενων τάσεων von-Mises στο στόχο (Περίπτωση 1: WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη)

Από το γράφημα αυτό επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στο εσωτερικό του στόχου – ιδιαίτερα στα σημεία B και C – ενώ οι τάσεις στην επιφάνεια αλλά και σε μεγάλες αποστάσεις από αυτήν, είναι μικρότερες.

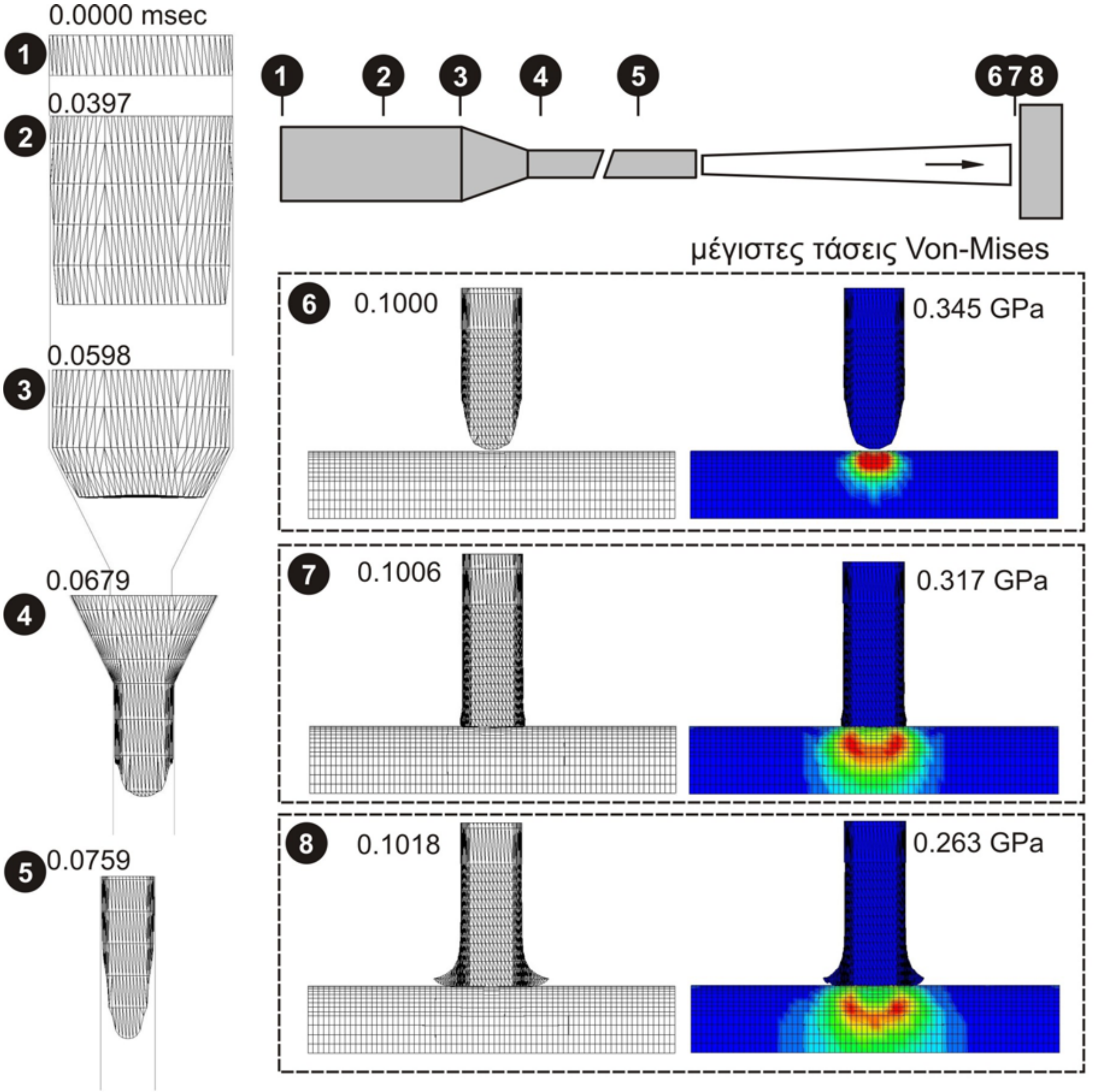
Στο σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της κατανομής των τάσεων von-Mises στο στόχο από τη στιγμή που η δέσμη νερού προσπίπτει σε αυτόν (0.1 msec), έως 0.0052 msec μετά την πρόσκρουση, δηλαδή 0.1024 msec από την εκκίνηση της διαδικασίας προσομοίωσης.

Όπως είναι αναμενόμενο, οι τάσεις von-Mises αναπτύσσονται τη στιγμή που η δέσμη νερού έρχεται σε επαφή με το στόχο (t = 0.1 msec), και τότε παρουσιάζουν τη μέγιστη τιμή που είναι ίση με 0.345 GPa, όπως ήδη έχει καταγραφεί στο γράφημα του σχήματος 4.5. Στη συνέχεια, καθώς οι τάσεις εξαπλώνονται στο στόχο, η μέγιστη τιμή τους μειώνεται (0.303 GPa, 0.252 GPa) όπως φαίνεται τις χρονικές στιγμές 0.1008, 0.1024 msec και έπειτα αυξάνεται και πάλι (0.292 GPa) όπως φαίνεται τη χρονική στιγμή 0.1052 msec, έως την ταλάντωση και τη σταθεροποίηση της γύρω από μια τελική τιμή, όπως γίνεται φανερό από το γράφημα του σχήματος 4.5 για χρόνο 0.110 msec από την εκκίνηση της διαδικασίας προσομοίωσης.



Σχήμα 4.6: Κατανομή τάσεων εντός του στόχου (Περίπτωση 1: WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη)

Τα αποτελέσματα της διαδικασίας παρουσιάζονται συνολικά στο σχήμα 4.7, από τη στιγμή που η δέσμη νερού εισέρχεται στο ακροφύσιο (t = 0 msec), έως την πρόσκρουσή της στο στόχο (t = 0.1 msec).



Σχήμα 4.7: Προφίλ ταχύτητας και μέγιστες τάσεις Von-Mises (Περίπτωση 1: WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη)

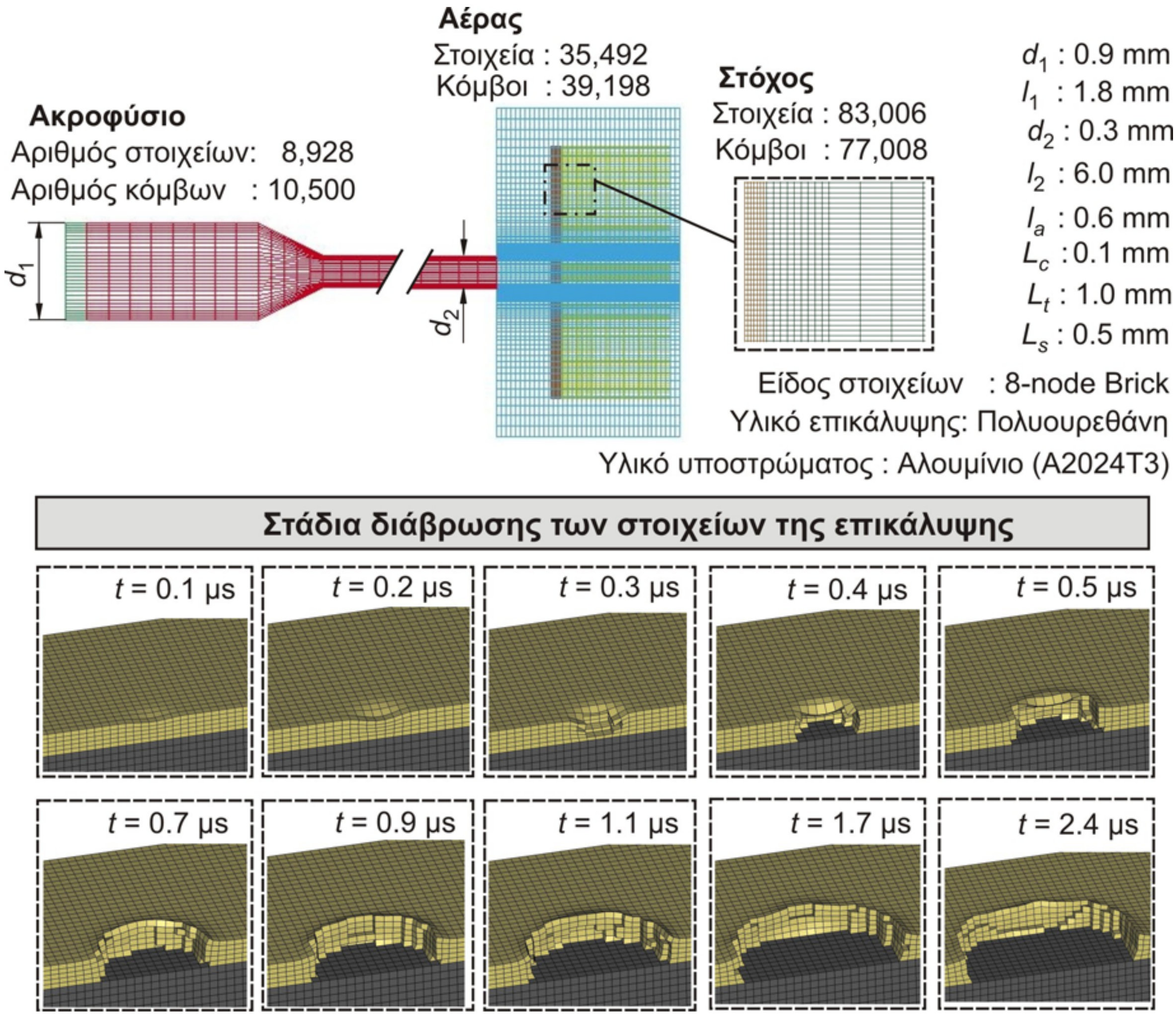
Στο αριστερό τμήμα του σχήματος 4.7 παρουσιάζεται η ανάπτυξη του προφίλ ταχύτητας του νερού κατά μήκος του ακροφυσίου σε 5 ενδεικτικές θέσεις (1-5), σε χρονικές στιγμές 0.0, 0.397, 0.0598, 0.0679, 0.0759 sec, αντίστοιχα. Στο κεντρικό τμήμα του σχήματος 4.7 παρουσιάζεται το σχήμα της δέσμης του νερού έπειτα από τη στιγμή της πρόσκρουσης (0.1 sec) στις επόμενες τρεις ενδεικτικές θέσεις (6-8) σε χρόνους 0.1, 0.1006, 0.1018 sec, αντίστοιχα.

Παράλληλα, στο δεξιό τμήμα του σχήματος 4.7 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων επαφής (von-Mises) για τις τρεις ενδεικτικές θέσεις μετά την πρόσκρουση του νερού στο στόχο (6-8) για τους χρόνους 0.1, 0.1006, 0.1018 sec με ταυτόχρονη ένδειξη της μέγιστης τιμής 0.345, 0.317, 0.263 GPa αντίστοιχα.

Από το σχήμα 4.7 επιβεβαιώνεται για ακόμα μια φορά το συμπέρασμα ότι οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στο εσωτερικό του στόχου ενώ οι τάσεις στην επιφάνεια αλλά και σε μεγάλες αποστάσεις από αυτήν, είναι μικρότερες. Όσον αφορά την χρονική τους εξέλιξη, οι τάσεις εξαπλώνονται στο στόχο και η μέγιστη τιμή τους (0.345 GPa) μειώνεται έως τη σταθεροποίηση της γύρω από μια τελική τιμή.

4.1.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης της διαδικασίας διάβρωσης στόχου με επικάλυψη

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αναπτυχθέντος αριθμητικού μοντέλου της παραγράφου 3.2 (Περίπτωση 2: WJM σε στόχο με επικάλυψη πολυουρεθάνης) για την αναπαράσταση της διαδικασίας διάβρωσης στόχου με επικάλυψη (αφαίρεση επικάλυψης).

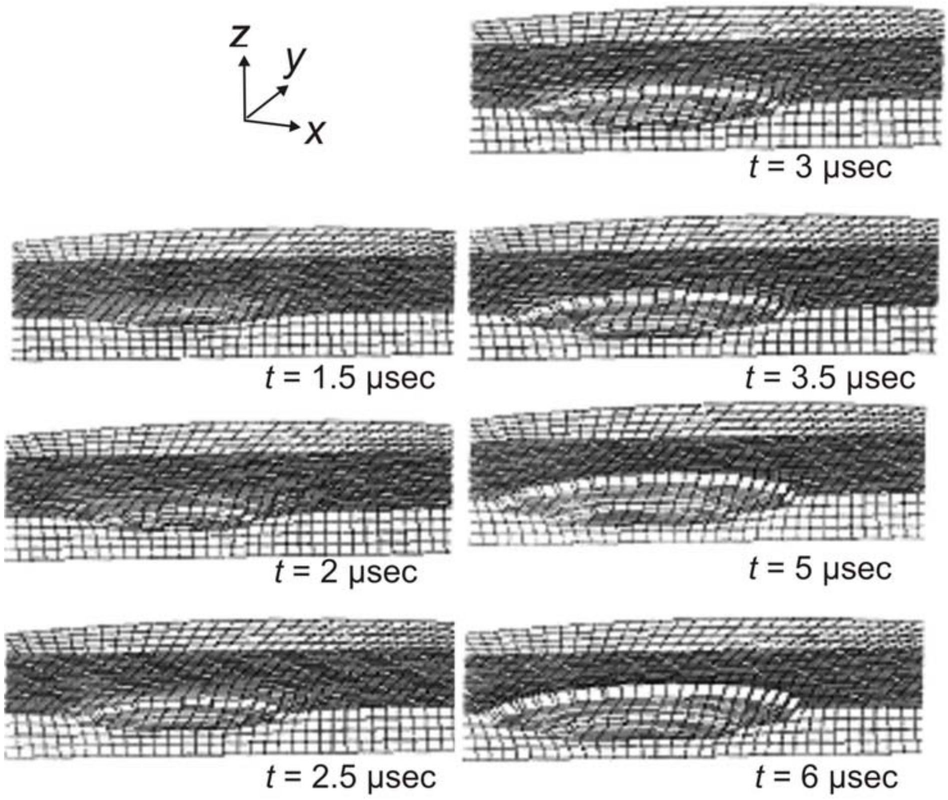


Σχήμα 4.8: Μοντέλο προσομοίωσης διάβρωσης στόχου με επικάλυψη (Περίπτωση 2: WJM σε στόχου με επικάλυψη πολυουρεθάνης)

Στην περίπτωση αυτή το ακροφύσιο είναι μικρότερο από αυτό του μοντέλου της πρώτης περίπτωσης WJM σε στόχο χωρίς επικάλυψη – λεπτομέρειες της γεωμετρίας του παρουσιάζονται στο σχήμα 4.8 – ενώ (η ομοιόμορφου προφίλ) ταχύτητα εισόδου του νερού στο ακροφύσιο είναι ίση με 55 m/sec. Η απόσταση μεταξύ ακροφυσίου-στόχου είναι τώρα 0.5 mm, ο στόχος αλουμινίου που χρησιμοποιείται έχει πάχος 1mm και είναι επικαλυμμένος με επίστρωση πολυουρεθάνης πάχους 0.1 mm.

Στο σχήμα 4.8 παρουσιάζονται δέκα (10) εικόνες από τα στάδια διάβρωσης της επίστρωσης από πολυουρεθάνη σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.7, 2.4 μsec αντίστοιχα μετά την πρόσκρουση της δέσμης στο στόχο. Η δέσμη του νερού έρχεται σε επαφή με το στόχο 50.3 μsec μετά την εισροή της (με ομοιόμορφη ταχύτητα 55 m/sec) στο ακροφύσιο. Αρχικά, 0.1 μsec μετά την πρόσκρουση της δέσμης στο στόχο (50.4 μsec μετά από την είσοδο του νερού στο ακροφύσιο), στην επιφάνεια της επίστρωσης παρατηρούνται μόνο ελαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες είναι σαφώς μεγαλύτερες έπειτα από 0.2 μsec, εξακολουθούν δε να αυξάνονται έως ότου υπερβούν το όριο παραμόρφωσης οπότε στοιχεία της επίστρωσης αρχίζουν να αποκολλώνται από το στόχο όπως φαίνεται από το σχήμα 4.8 για χρόνο t = 0.3 μsec.

Η εξέλιξη των αφαιρούμενων στοιχείων της επίστρωσης παρουσιάζεται στο σχήμα 4.8. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά των Mabrouki *et al* /113/ που φαίνονται στο σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9: Μοντέλο προσομοίωσης διάβρωσης στόχου με επικάλυψη (αποτελέσματα των Mabrouki *et al* /117/

4.2 Αποτελέσματα του Μοντέλου Προσομοίωσης της Διαδικασίας Κοπής με Δέσμη Καθαρού Νερού σε Κινούμενο Στόχο

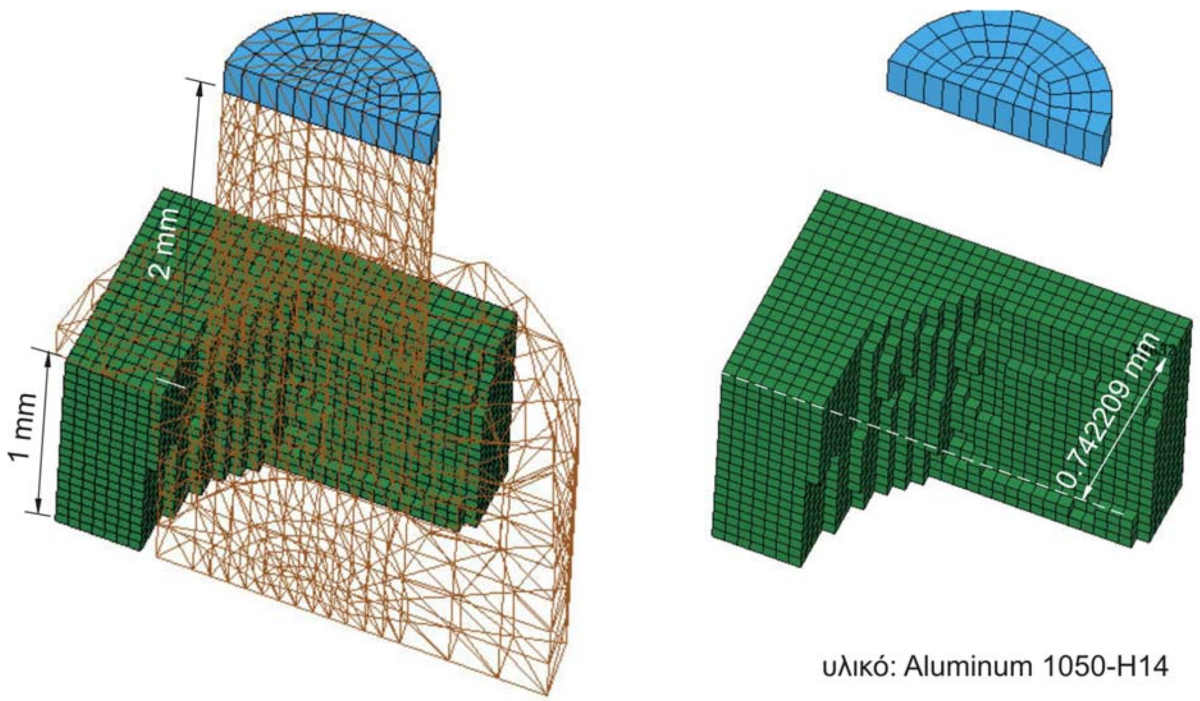
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αναπτυχθέντος μη-γραμμικού αριθμητικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της διαδικασίας κοπής με δέσμη καθαρού νερού που εξέρχεται από ακροφύσιο που έχει συγκεκριμένη ταχύτητα πρόωσης σε σχέση με το στόχο από αλουμίνιο.

Το προτεινόμενο μοντέλο προσομοιώνει επακριβώς τη διαδικασία κοπής και μετά το πέρας της κοπής μπορεί να μετρηθεί το πλάτος κοπής και να συγκριθεί με τα πειραματικά δεδομένα.

4.2.1 Αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης κοπής σε κινούμενο στόχο

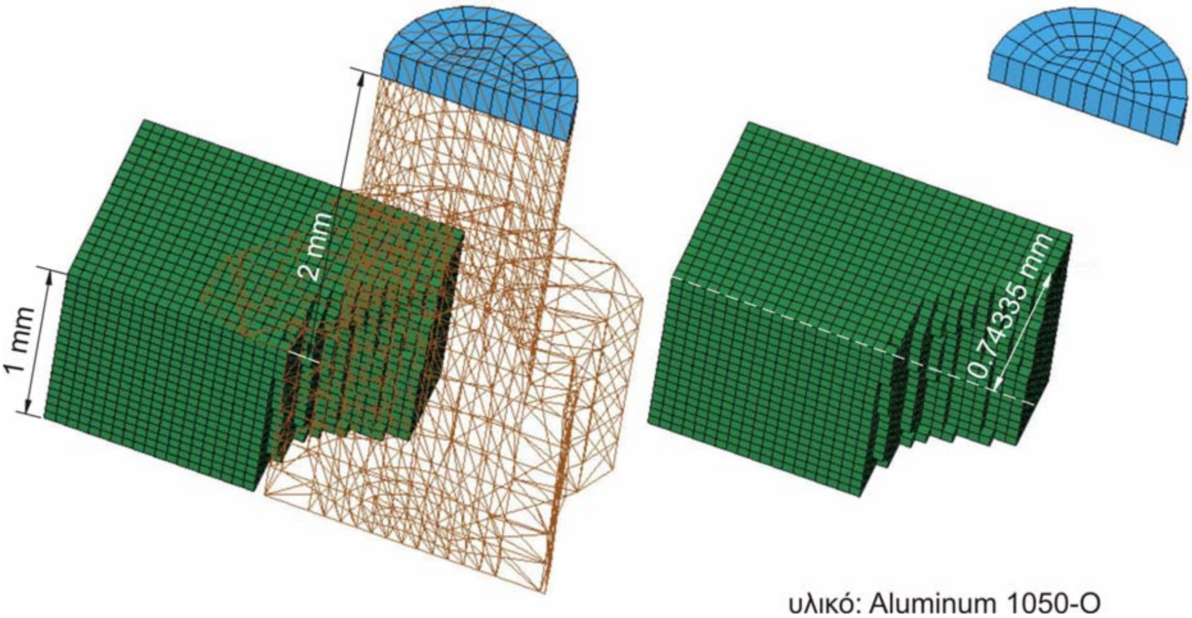
Παρόλο που το μοντέλο αυτό επιλύθηκε αριθμητικά μέσω του λογισμικού Ls-Dyna3D (έκδοση mpp971 single precision R3.45855_PGI in linux86-64 with hpmpi) σε ένα σύστημα 64-bit cluster παράλληλης επεξεργασίας οκτώ (8) κόμβων, η επίλυση του μοντέλου αυτού σε κινούμενο στόχο είναι μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία. Έτσι, στο μοντέλο που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3 μελετάται μόνο μια συγκεκριμένη περίπτωση κοπής με WJ σε κινούμενο στόχο όπου η απόσταση ακροφυσίου-στόχου είναι ίση με 2 mm και το πάχος του στόχου είναι 1 mm.

Στο σχήμα 4.10 απεικονίζεται ο στόχος αλουμινίου 1050-H14 μετά από τη διαδικασία της κοπής του. Επειδή έχει προσομοιωθεί το μισό γεωμετρικά μοντέλο για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου, το πλάτος κοπής θα είναι ίσο με το διπλάσιο της απόστασης του κόμβου υπ’ αριθμόν 12632 από το επίπεδο συμμετρίας του μοντέλου. Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα 4.10, το πλάτος κοπής θα είναι ίσο με 2×0.742209 = 1.484418 mm.



Σχήμα 4.10: Μέτρηση πλάτους κοπής στο μοντέλο προσομοίωσης διάβρωσης στόχου αλουμινίου 1050-H14 με ταχύτητα πρόωσης 75 mm/sec (αποτελέσματα από cluster)

Στο σχήμα 4.11 απεικονίζεται ο στόχος αλουμινίου 1050-O μετά από τη διαδικασία της κοπής του. Το πλάτος κοπής στην περίπτωση του στόχου αλουμινίου 1050-O θα είναι ίσο με το διπλάσιο της απόστασης του κόμβου 13832 από το επίπεδο συμμετρίας του μοντέλου. Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα 4.11 το πλάτος κοπής θα είναι ίσο με 2×0.74335 = 1.4867 mm.



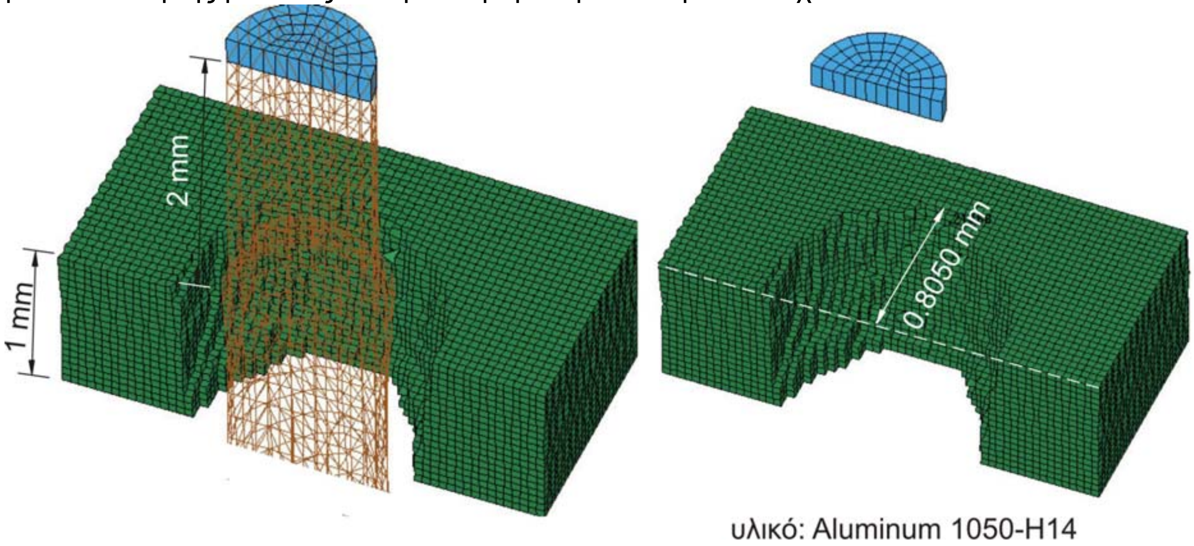
Σχήμα 4.11: Μέτρηση πλάτους κοπής στο μοντέλο προσομοίωσης διάβρωσης στόχου αλουμινίου 1050-O με ταχύτητα πρόωσης 75 mm/sec (αποτελέσματα από cluster)

Γενικά, παρατηρείται ότι κατά την κοπή των δύο διαφορετικών υλικών – με ίδιες συνθήκες κοπής και ίδια ταχύτητα πρόωσης – το πλάτος κοπής δεν παρουσιάζει μεγάλη διαφορά για την μικρή απόσταση ακροφυσίου – στόχου ίση με 2 mm. Παρακάτω στα πειραματικά αποτελέσματα (Κεφάλαιο 5) εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα για τη μικρή απόσταση ακροφυσίου – στόχου ίση με 2 mm αλλά δε συμβαίνει το ίδιο για την περίπτωση της μεγάλης απόστασης ακροφυσίου – στόχου των 8 mm, όπου το πλάτος κοπής αυξάνεται σημαντικά.

4.2.2 Αποτελέσματα μοντέλου προσομοίωσης διαδοχικών στατικών προβλημάτων (ακίνητος στόχος)

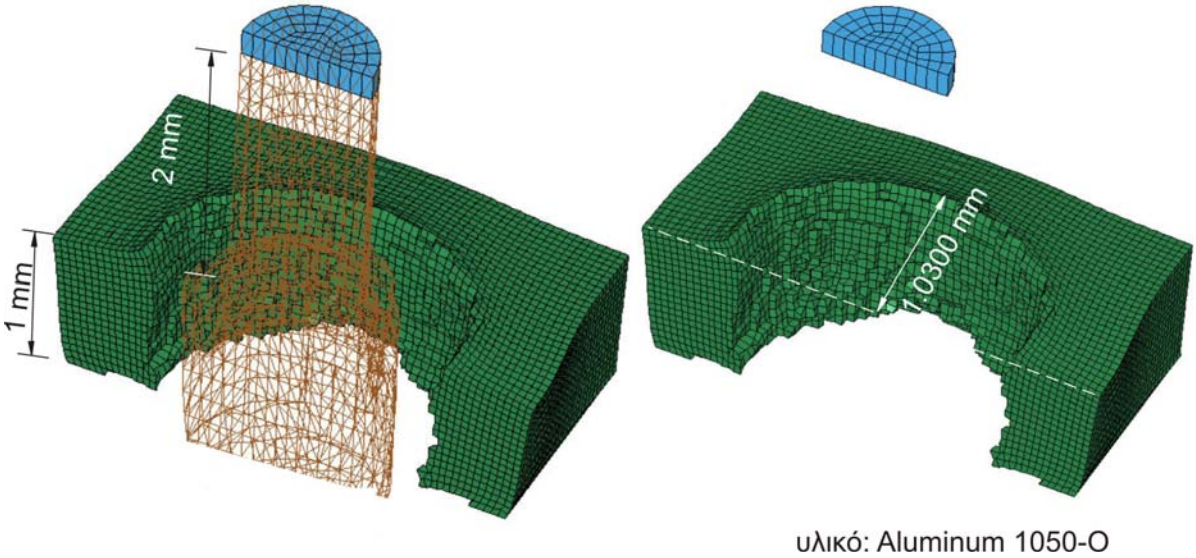
Με βάση το γεγονός ότι τα αποτελέσματα στο πλάτος κοπής με WJ κατά την πρόωση προσεγγίζονται αρκετά καλά μέσω διαδοχικών στατικών προβλημάτων κοπής, κρίνεται σκόπιμη η μοντελοποίηση ενός αριθμητικού μοντέλου κοπής σε ακίνητο στόχο προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Σε αυτό το μοντέλο το πλεονέκτημα είναι ότι ο στόχος έχει αρκετά πιο πυκνή διακριτοποίηση χωρίς ιδιαίτερη επιβάρυνση στον υπολογιστικό χρόνο, όπως έχει ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 3.3.2, και έτσι είναι δυνατόν να παρατηρηθούν ακριβέστερα οι διαφορές στο πλάτος κοπής μεταξύ των διαφορετικών υλικών του στόχου, μεταξύ διαφορετικών αποστάσεων ακροφυσίου-στόχου και μεταξύ διαφορετικών παχών στόχου.

Έτσι στις δώδεκα (12) διαφορετικές περιπτώσεις μοντελοποίησης κοπής σε ακίνητο στόχο (απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 2 ή 8 mm, πάχος του στόχου είναι επίσης 1, 1.5, ή 2 mm, δύο διαφορετικά υλικά στόχου: Aluminum (1050-O) και Aluminum (1050-H14)) που πραγματοποιούνται, είναι δυνατόν να μετρηθούν τα πλάτη κοπής. Στα παρακάτω δύο σχήματα 4.12 και 4.13, παρατίθενται για λόγους σύγκρισης οι αντίστοιχες δύο περιπτώσεις μοντελοποίησης με αυτές που μελετήθηκαν με κινούμενο στόχο.



Σχήμα 4.12: Μέτρηση πλάτους κοπής στο μοντέλο προσομοίωσης διάβρωσης στόχου αλουμινίου 1050-H14 χωρίς ταχύτητα πρόωσης

Στο σχήμα 4.12 απεικονίζεται ο ακίνητος στόχος αλουμινίου 1050-H14 (για απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 2mm και πάχος στόχου ίσο με 1mm) μετά από τη διαδικασία της κοπής του. Το πλάτος κοπής στην περίπτωση του στόχου αλουμινίου 1050-H14 θα είναι ίσο με το διπλάσιο της απόστασης του κόμβου 21768 από το επίπεδο συμμετρίας του μοντέλου. Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα 4.12 το πλάτος κοπής θα είναι ίσο με 2×0.8050 = 1.61 mm.



Σχήμα 4.13: Μέτρηση πλάτους κοπής στο μοντέλο προσομοίωσης διάβρωσης στόχου αλουμινίου 1050-O χωρίς ταχύτητα πρόωσης

Στο σχήμα 4.13 απεικονίζεται ο ακίνητος στόχος αλουμινίου 1050-O (για απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 2mm και πάχος στόχου ίσο με 1mm) μετά από τη διαδικασία της κοπής του. Το πλάτος κοπής στην περίπτωση του στόχου αλουμινίου 1050-O θα είναι ίσο με το διπλάσιο της απόστασης του κόμβου 21768 από το επίπεδο συμμετρίας του μοντέλου. Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα 4.12 το πλάτος κοπής θα είναι ίσο με 2×1.0300 = 2.06 mm.

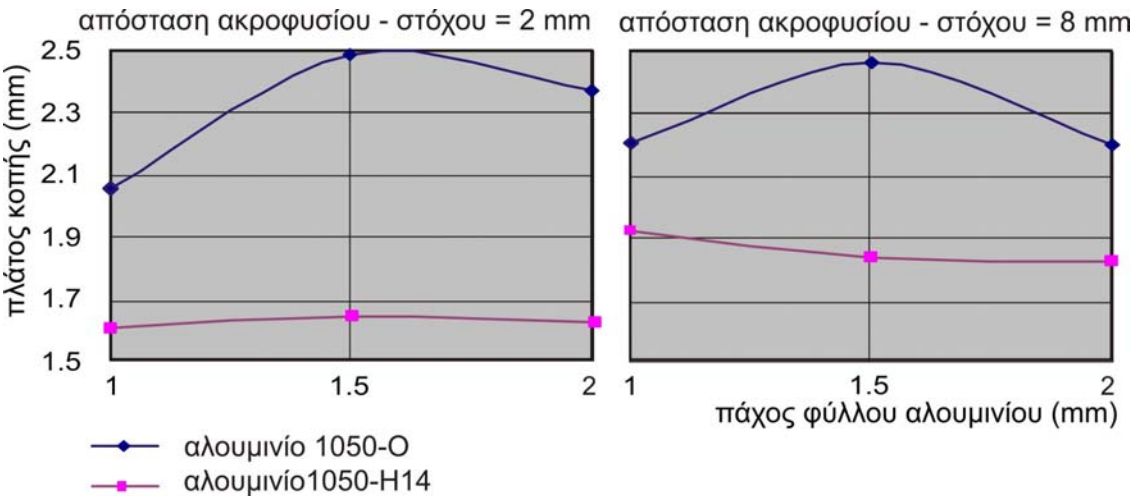
Η σύγκριση των αποτελεσμάτων στα πλάτη κοπής μεταξύ πρόωσης και προσέγγισης μέσω διαδοχικών στατικών προβλημάτων κοπής οδηγεί σε διαφορετικά συμπεράσματα για τα δύο διαφορετικά υλικά που κόβονται με WJ:

- Στο σκληρό υλικό (Aluminum 1050-H14) παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα στο πλάτος κοπής κατά την πρόωση (1.484418 mm) προσεγγίζονται αρκετά καλά μέσω διαδοχικών στατικών προβλημάτων κοπής (πλάτος κοπής = 1.61 mm).

- Αντίθετα στο μαλακό υλικό (Aluminum 1050-O) υπάρχει μια ανασφάλεια (το πλάτος κοπής κατά την πρόωση υπολογίζεται ίσο με 1.4867 mm ενώ πλάτος κοπής κατά την προσέγγιση με διαδοχικά στάδια υπολογίζεται ίσο με 2.06 mm), δικαιολογημένη αν σκεφτούμε ότι ακόμη και στα πειράματα φραιζαρίσματος προτιμόνται σκληρά υλικά.

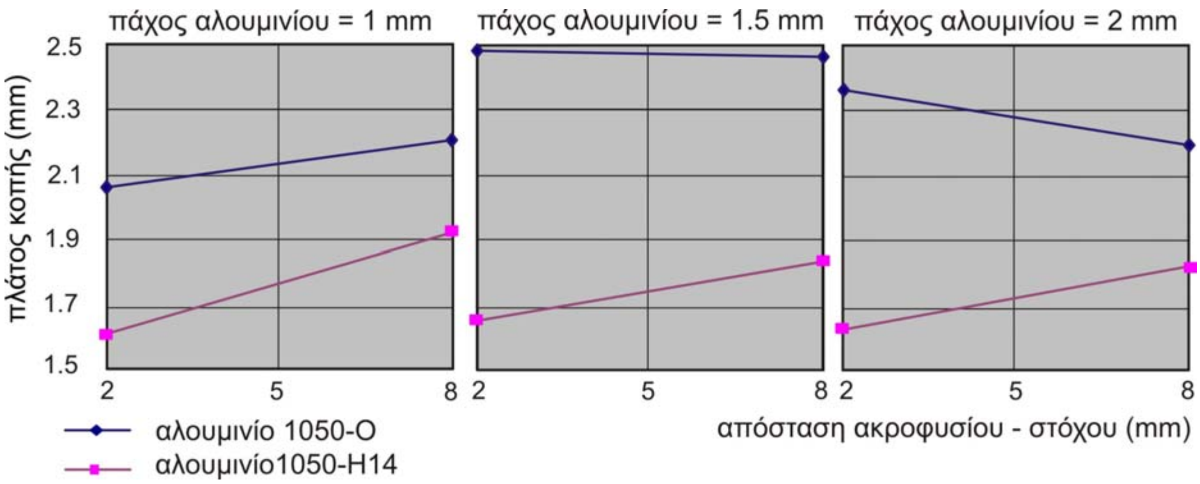
Τα πλάτη κοπής για τις δώδεκα (12) συνολικά περιπτώσεις είναι δυνατόν να αναπαρασταθούν σε γραφικές παραστάσεις έτσι ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά τους σε επικείμενη μεταβολή της απόστασης ακροφυσίου-στόχου ή του πάχους του στόχου ή του υλικού του στόχου. Μια τέτοια προσέγγιση έχει σκοπό την ποιοτική ανάλυση των χαρακτηριστικών του μοντέλου με ακίνητο στόχο ώστε αργότερα να είναι δυνατόν να συγκριθούν τα αποτελέσματα του πλάτους κοπής έστω και ποιοτικά με τις αντίστοιχες πειραματικές παρατηρήσεις (όπου ο στόχος είναι κινούμενος) όπως αυτές παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

Στο σχήμα 4.14 συγκρίνονται τα αποτελέσματα του πλάτους κοπής για τα δύο διαφορετικά υλικά στόχου και για τις δύο αποστάσεις ακροφυσίου-στόχου. Όπως παρατηρείται, για το μαλακότερο υλικό Aluminum (1050-O), τα πλάτη κοπής είναι φανερά μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα πλάτη για το Aluminum (1050-H14), όπως ήταν αναμενόμενο. Επίσης, για απόσταση ακροφυσίου στόχου ίση με 8 mm, τα πλάτη κοπής είναι ως επί το πλείστον μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά που αντιστοιχούν σε απόσταση ακροφυσίου στόχου ίση με 2 mm, όπως ήταν αναμενόμενο. Όσον αφορά τη μεταβολή του πλάτους κοπής σε σχέση με το πάχος του εκάστοτε φύλλου αλουμινίου, παρατηρείται ως επί το πλείστον μια τάση αύξησης του πλάτους κοπής για φύλλα αλουμινίου με μεγαλύτερο πάχος.



Σχήμα 4.14: Σύγκριση μοντέλων προσομοίωσης διάβρωσης ακίνητου στόχου αλουμινίου

Στο <u>σχήμα 4.15</u> συγκρίνονται τα αποτελέσματα του πλάτους κοπής για τα δύο διαφορετικά υλικά στόχου και για τα τρία διαφορετικά πάχη φύλλων αλουμινίου . Όπως παρατηρείται, για το μαλακότερο υλικό Aluminum (1050-O), τα πλάτη κοπής είναι (όπως έχει ήδη παρατηρηθεί και από το προηγούμενο σχήμα) φανερά μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα πλάτη για το Aluminum (1050-H14).



Σχήμα 4.15: Σύγκριση μοντέλων προσομοίωσης διάβρωσης ακίνητου στόχου αλουμινίου

Σύμφωνα με προηγούμενη παρατήρηση, τα αποτελέσματα που αφορούν το σκληρό υλικό (αλουμίνιο 1050-H14) είναι ασφαλή, καθώς η κοπή με πρόωση προσεγγίζεται αρκετά καλά μέσω διαδοχικών στατικών προβλημάτων κοπής για το σκληρό υλικό. Έτσι, εάν η μελέτη του σχήματος 4.15 επικεντρωθεί στα αποτελέσματα του πλάτους κοπής του σκληρού υλικού (αλουμίνιο 1050-H14), οδηγεί στα παρακάτω συμπεράσματα:

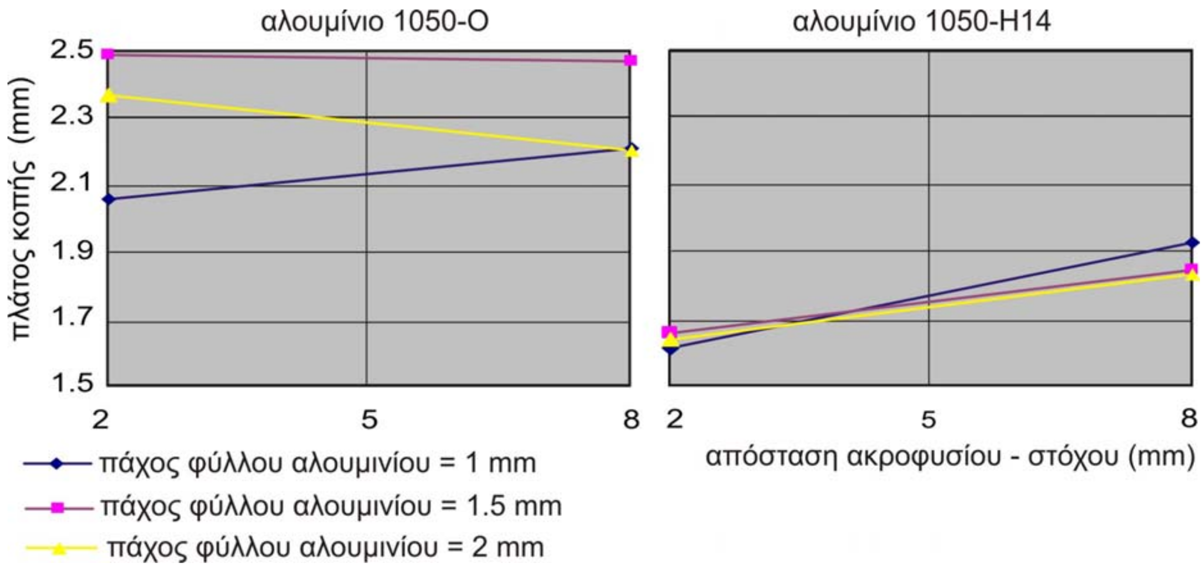
a) Επίδραση της απόστασης ακροφυσίου-στόχου στο πλάτος κοπής:
   - Το πλάτος κοπής αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης ακροφυσίου-στόχου.

b) Επίδραση του πάχους φύλλου αλουμινίου στο πλάτος κοπής:

- Για μικρές τιμές απόστασης ακροφυσίου-στόχου, το πλάτος κοπής δε μεταβάλλεται σημαντικά με την αύξηση του πάχους του φύλλου αλουμινίου.
- Για μεγάλες τιμές απόστασης ακροφυσίου-στόχου, το πλάτος κοπής μειώνεται με την αύξηση του πάχους του φύλλου αλουμινίου.

Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με κινούμενο στόχο όπου για μικρές τιμές απόστασης ακροφυσίου-στόχου, το πλάτος κοπής για το σκληρό υλικό όπως έχει ήδη αναφερθεί δε μεταβάλλεται σημαντικά. Απ' την άλλη, το πείραμα επιβεβαιώνει αργότερα (στο Κεφάλαιο 5) ότι για μεγάλες τιμές απόστασης ακροφυσίου-στόχου το πλάτος μειώνεται με αύξηση του πάχους του στόχου.

Στο σχήμα 4.16 παριστάνεται γραφικά η μεταβολή του πλάτους κοπής συναρτήσει της απόστασης ακροφυσίου –στόχου για τα δύο διαφορετικά υλικά στόχου και για τα τρία διαφορετικά πάχη φύλλων αλουμινίου. Το πλάτος κοπής τείνει να αυξάνεται για μεγαλύτερη απόσταση ακροφυσίου-στόχου όπως αναμένεται και έχει ήδη παρατηρηθεί στα δύο προηγούμενα σχήματα. Όσον αφορά τη μεταβολή του πλάτους κοπής σε σχέση με το πάχος του εκάστοτε φύλλου αλουμινίου, δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, αν και γενικά διαφαίνεται μια τάση αύξησης του πλάτους κοπής για φύλλα αλουμινίου με μεγαλύτερο πάχος, όπως έχει ήδη παρατηρηθεί και από το σχήμα 4.14. Αυτή η συμπεριφορά είναι γενικά αναμενόμενη αλλά δεν είναι δυνατόν να μελετηθεί με ακρίβεια για τόσο μικρές διαφορές στα πάχη μεταξύ των φύλλων.



Σχήμα 4.16: Σύγκριση μοντέλων προσομοίωσης διάβρωσης ακίνητου στόχου αλουμινίου

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα πρόκειται να γίνει αναλυτικά μετά την παρουσίαση των πειραματικών μετρήσεων στο κεφάλαιο 5.

4.3 Αποτελέσματα Αριθμητικού Μοντέλου Προσομοίωσης της Πρόσκρουσης Λειαντικών Κόκκων σε Ακίνητο Στόχο

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αναπτυχθέντος μη-γραμμικού αριθμητικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της διαδικασίας πρόσκρουσης λειαντικών κόκκων σε ακίνητο στόχο από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304.

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε στην εργασία των Junkar *et al.* /121/ μελέτησε – μέσω του ίδιου λογισμικού (Ls-Dyna3D) – την επίδραση ενός μόνο λειαντικού κόκκου. Το παρόν μοντέλο συνιστά μια πολύ σημαντική επέκταση, καθώς μελετά την επίδραση ικανού αριθμού κόκκων, έως την επίτευξη κρατήρα με σταθερή γεωμετρία.

Κατά την πρόσκρουση των πρώτων λειαντικών κόκκων στην επιφάνεια του στόχου, κάποιοι από αυτούς παραμορφώνουν πλαστικά το υλικό της επιφάνειας χωρίς να αφαιρούν υλικό, προκαλώντας αύξηση της αντοχής του υλικού του στόχου, φαινόμενο που είναι γνωστό ως ενδροτράχυνση.

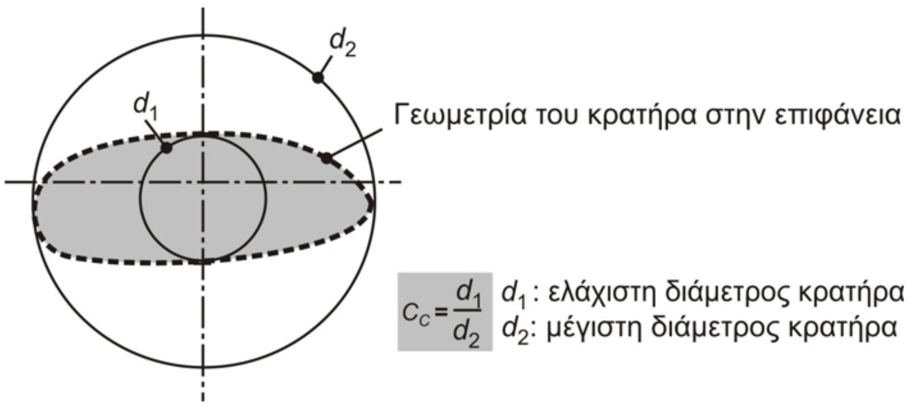
Το προτεινόμενο μοντέλο /4/ προσομοιώνει την πρόσκρουση πολλών σωματιδίων με σκοπό τον υπολογισμό των διαστάσεων και της κυκλικότητας – όπως αυτή ορίζεται στο σχήμα 4.17 – του κρατήρα μετά την πρόσκρουση κάθε ενός σωματιδίου, λαμβάνοντας υπόψη ήδη αναπτυχθείσες πλαστικές παραμορφώσεις. Ο κρατήρας που δημιουργείται μετά την πρόσκρουση του πρώτου σωματιδίου είναι πολύ μικρός, αλλά το μέγεθος του αυξάνεται σημαντικά έως την πρόσκρουση του εικοστού λειαντικού κόκκου.

4.3.1 Ορισμός κυκλικότητας κρατήρα

Ο κρατήρας που σχηματίζεται από την πρόσκρουση των σωματιδίων δεν είναι κυκλικός, αλλά έχει ελλειψοειδή μορφή. Για το λόγο αυτό ορίζεται το μέγεθος της “κυκλικότητας”, ως εξής:

$$C_c = \frac{d_1}{d_2}$$

όπου d_1 είναι η ελάχιστη διάμετρος και d_2 είναι η μέγιστη διάμετρος των κύκλων που ορίζονται από την έλλειψη, σχήμα 4.17. Η κυκλικότητα του κρατήρα μπορεί να μετρηθεί είτε στην ανώτερη επιφάνεια του στόχου, είτε σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια. Η τιμή της κυκλικότητας τείνει στη μονάδα, όσο ο κρατήρας αποκτά κυκλικό σχήμα.

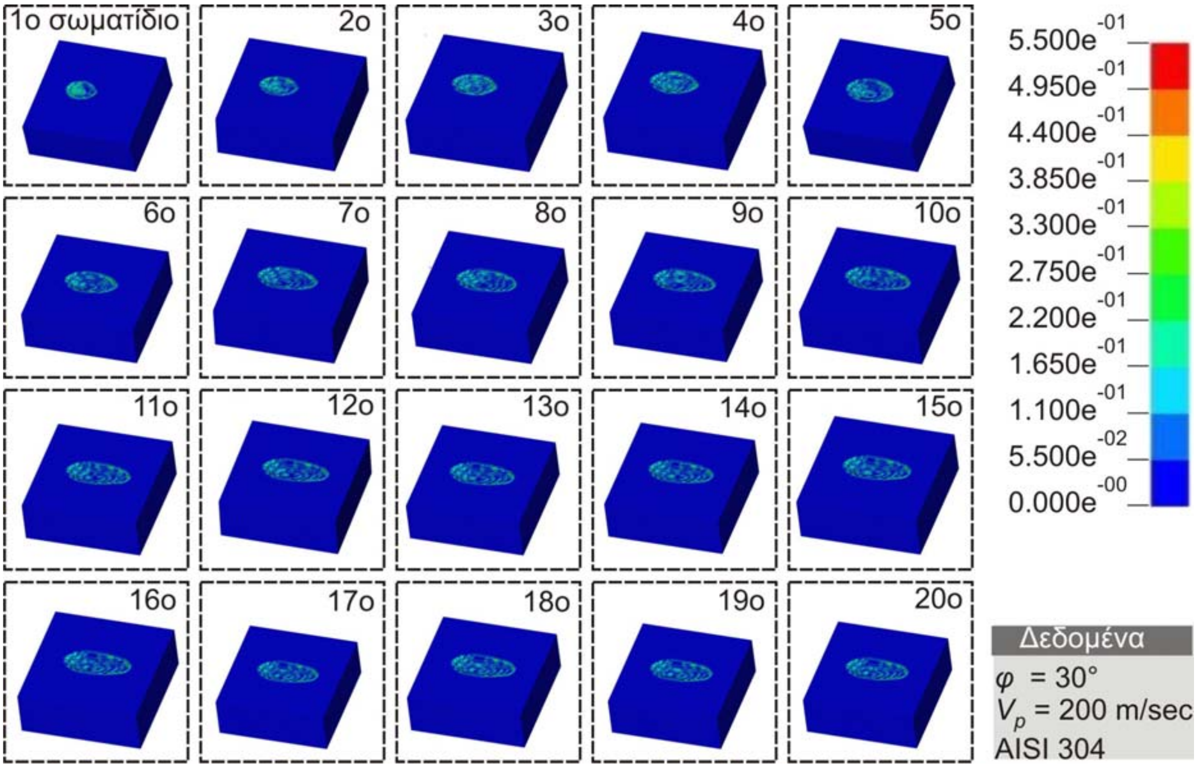


Σχήμα 4.17: Ορισμός της κυκλικότητας του κρατήρα

4.3.2 Στάδια πλαστικής παραμόρφωσης και διάβρωσης

Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται ο κρατήρας και τα στάδια πλαστικής παραμόρφωσης που δημιουργούνται μετά την πρόσκρουση ενός, δύο, τριών έως και είκοσι σωματιδίων αντίστοιχα, για γωνία και ταχύτητα πρόσπτωσης ίσες με 30° και 200 m/sec, αντίστοιχα. Η μέγιστη τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης που αναπτύσσεται είναι ίση με 0.55, τιμή ίση με το όριο παραμόρφωσης του ανοξείδωτου χάλυβα AISI 304.

Ο κρατήρας που σχηματίζεται μετά την πρόσκρουση του πρώτου κόκκου είναι πολύ μικρός, ενώ μεγαλώνει και επιμηκύνεται σταδιακά με την πρόσκρουση των επόμενων κόκκων, σχήμα 4.18. Παρατηρώντας το ίδιο σχήμα, συμπεραίνεται επίσης ότι η προσομοίωση της πρόσπτωσης ενός μόνο σωματιδίου δεν επαρκεί, αλλά απαιτείται η προσομοίωση πρόσκρουσης τουλάχιστον δεκαπέντε σωματιδίων, ώστε να αναπαρασταθεί με ακρίβεια η διαδικασία της διάβρωσης.



Σχήμα 4.18: Στάδια πλαστικής παραμόρφωσης και διάβρωσης του κρατήρα μετά από την πρόσκρουση κάθε κόκκου

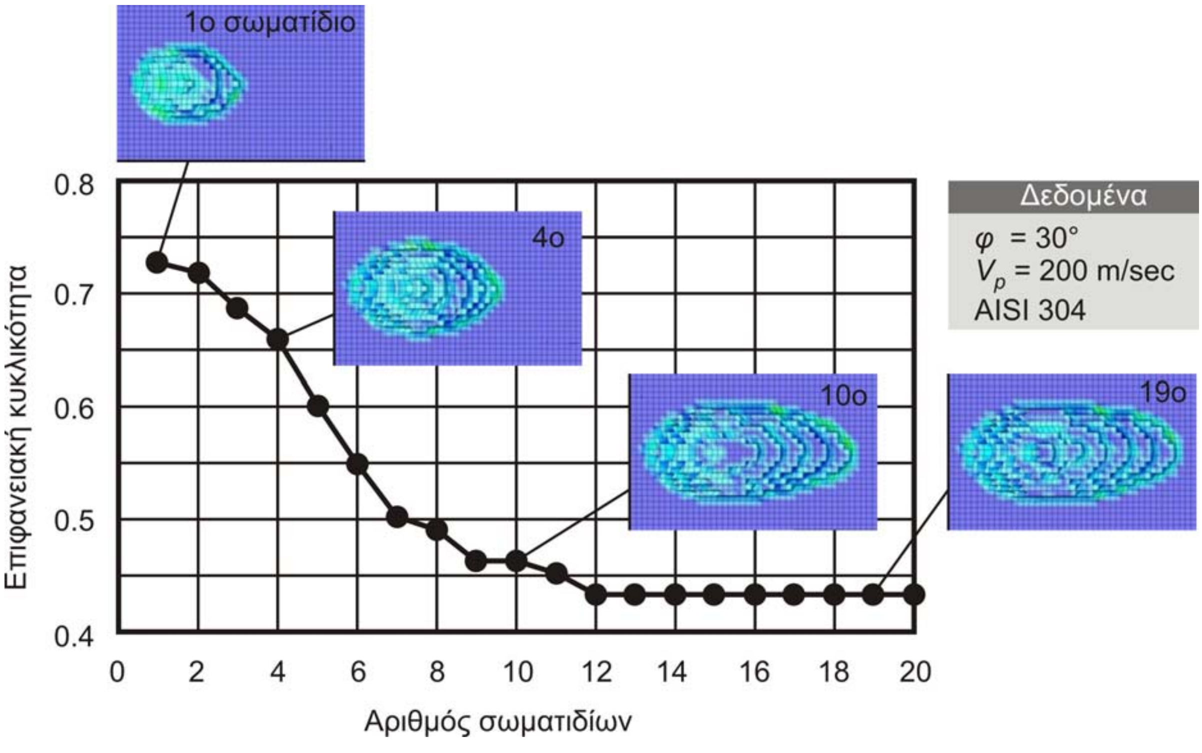
Σκοπός της εργασίας είναι να βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός σωματιδίων που προσπίπτουν στο στόχο μέχρι την επίτευξη της σταθεροποίησης της μορφής του κρατήρα ώστε να μην επιβαρύνεται η λύση με υπολογιστικό κόστος.

Αρχικά επιλύθηκαν δοκιμαστικά μοντέλα με δέκα (10) και δεκαπέντε (15) προσπίπτοντες κόκκους. Επειδή όμως μια πρώτη σταθεροποίηση της μορφής του κρατήρα, που γινόταν ορατή, θα μπορούσε να είναι μόνο μια προσωρινή κατάσταση, έπρεπε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο με παραπάνω κόκκους ώστε να εξασφαλισθεί ότι το μοντέλο φθάνει σε στάδιο μόνιμης σταθερής κατάστασης της μορφής του κρατήρα. Ακολουθώντας αυτό το σκεπτικό, αποφασίστηκε ότι ο αριθμός των 20 σωματιδίων αποτελεί έναν ικανοποιητικό αριθμό για ασφαλή συμπεράσματα.

4.3.3 Επιφανειακή κυκλικότητα

Ως επιφανειακή κυκλικότητα ορίζεται η τιμή της κυκλικότητας στην ανώτερη επιφάνεια του κρατήρα. Η τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας καταγράφεται για τρεις διαφορετικές τιμές ταχύτητας (180, 200 και 220 m/sec) και τρεις διαφορετικές τιμές γωνίας (30, 60 και 90°) πρόσπτωσης.

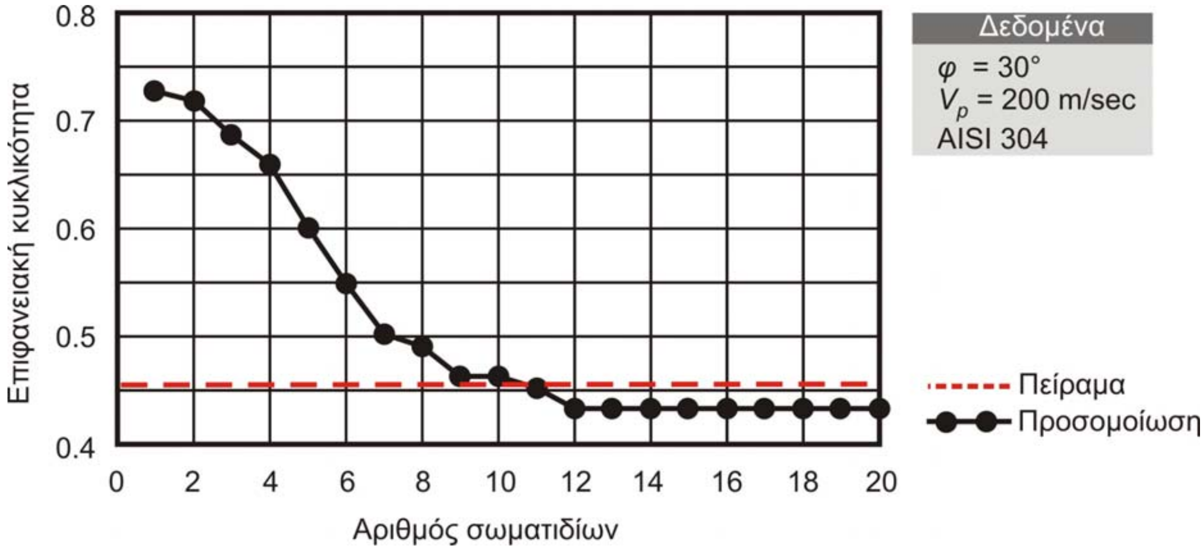
Η επιφανειακή κυκλικότητα για την περίπτωση των αποτελεσμάτων του σχήματος 4.18 (ταχύτητα πρόσπτωσης: 200 m/sec, γωνία πρόσπτωσης: 30^{o}), παρουσιάζεται αναλυτικά στο σχήμα 4.19. Η επιφανειακή κυκλικότητα υπολογίζεται και αναπαρίσταται γραφικά μετά την πτώση κάθε σωματιδίου. Από το σχήμα 4.19 καθίσταται σαφές ότι η επιφανειακή κυκλικότητα μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των σωματιδίων, ενώ σταθεροποιείται έπειτα από την πρόσπτωση του δέκατου κόκκου. Η τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας υπολογίζεται στην τιμή 0.7250 μετά την πρόσκρουση του πρώτου κόκκου και στην τιμή 0.4300 από τον δωδέκατο έως τον εικοστό κόκκο.



Σχήμα 4.19: Επιφανειακή κυκλικότητα ανά πρόσκρουση σωματιδίου και ενδεικτικά στάδια πλαστικής παραμόρφωσης και διάβρωσης του κρατήρα

Από τη μελέτη αυτή είναι προφανές ότι η επιφανειακή κυκλικότητα δεν είναι σταθερή, ιδιαίτερα στα πρώτα στάδια της διαδικασίας. Το γεγονός αυτό αποδεικνύεται επίσης από το σχήμα 4.19, στο οποίο παρουσιάζεται η κάτοψη του κρατήρα σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις (μετά την πτώση ενός, τεσσάρων, δέκα και δεκαεννέα κόκκων). Η παρούσα μελέτη λοιπόν, υπερέχει σημαντικά – ως προς την ακρίβεια υπολογισμού της επιφανειακής κυκλικότητας – σε σχέση με τα αποτελέσματα των Junkar *et al.* /121/ που μελέτησαν την επίδραση ενός μόνο κόκκου και υπολόγισαν (μέσω προσομοίωσης) επιφανειακή κυκλικότητα ίση με 0.7479 ενώ μέτρησαν την ίδια κυκλικότητα (μέσω πειράματος) ίση με 0.4984.

Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση της επιφανειακής κυκλικότητας ανά πρόσκρουση σωματιδίου όπως στο προηγούμενο σχήμα 4.19 (για την περίπτωση των αποτελεσμάτων της ταχύτητας πρόσπτωσης: 200 m/sec και γωνίας πρόσπτωσης: 30^{o}), και για λόγους σύγκρισης στο ίδιο διάγραμμα αναπαρίσταται και η πειραματική τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Junkar *et al.* /121/ , που είναι ίση με 0.4984 όπως έχει ήδη αναφερθεί.



Σχήμα 4.20: Επιφανειακή κυκλικότητα ανά πρόσκρουση σωματιδίου από παρούσα προσομοίωση και από πείραμα των Junkar *et al.* /121/

Στον Πίνακα 4.1 που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παρούσας προσομοίωσης για την σφαιρικότητα του κρατήρα έπειτα από την πρόσκρουση 20 σωματιδίων στο στόχο από ανοξείδωτο χάλυβα, για καθεμιά από τις εννέα συνολικά περιπτώσεις [τρεις διαφορετικές τιμές ταχύτητας (180, 200 και 220 m/sec) και τρεις διαφορετικές τιμές γωνίας (30, 60 και 90°) πρόσπτωσης]. Επίσης, για λόγους σύγκρισης στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προσομοίωσης των Μ. Junkar *et al* /121/ καθώς επίσης και τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα.

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Πίνακα 4.1 οι τιμές της σφαιρικότητας που προκύπτουν από την προσομοίωση των Μ. Junkar *et al* /121/ έχουν μεγάλη απόκλιση από τις τιμές των πειραματικών μετρήσεων ενώ οι τιμές της σφαιρικότητας, που υπολογίζεται από την παρούσα προσομοίωση με το μοντέλο πρόσπτωσης 20 σωματιδίων, προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις τιμές των πειραματικών μετρήσεων. Η παρούσα μελέτη λοιπόν, υπερέχει σημαντικά – ως προς την ακρίβεια υπολογισμού της επιφανειακής κυκλικότητας – σε σχέση με τα αποτελέσματα των Junkar *et al.* /121/ που μελέτησαν την επίδραση ενός μόνο κόκκου και υπολόγισαν μέσω προσομοίωσης την επιφανειακή κυκλικότητα.

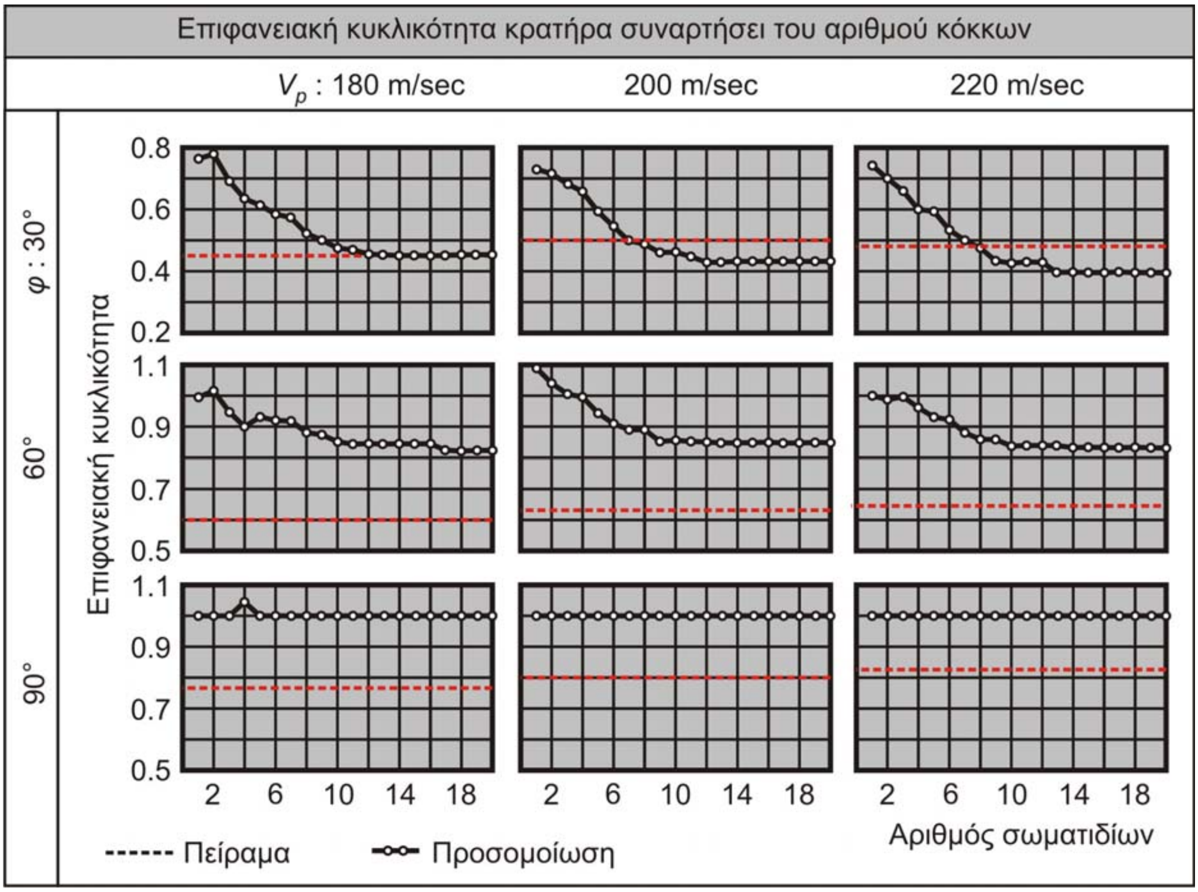
	Γωνία (°)	30°	60°	90°
V_p = 180 m/s	Πειραματική σφαιρικότητα (*P*=200 MPa)	0.4525	0.6034	0.7595
	Σφαιρικότητα από προσομοίωση	0.7530	0.9058	1.0000
	Σφαιρικότητα από παρούσα προσομοίωση	0.4533	0.8256	0.9995
V_p = 200 m/s	Πειραματική σφαιρικότητα (*P*=250 MPa)	0.4984	0.6239	0.7933
	Σφαιρικότητα από προσομοίωση	0.7479	0.9058	1.0000
	Σφαιρικότητα από παρούσα προσομοίωση	0.4300	0.8455	1.0000
V_p = 220 m/s	Πειραματική σφαιρικότητα (*P*=300 MPa)	0.4922	0.6375	0.8254
	Σφαιρικότητα από προσομοίωση	0.7051	0.9242	1.0000
	Σφαιρικότητα από παρούσα προσομοίωση	0.3962	0.832	1.0000

Πίνακας 4.1 : Σύγκριση των τιμών της σφαιρικότητας από προσομοίωση και πείραμα των **M. Junkar** *et al.* /121/ και από παρούσα προσομοίωση.

Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζεται η επιφανειακή κυκλικότητα **συναρτήσει του αριθμού σωματιδίων** που προσκρούουν στο στόχο για τις εννέα συνολικά περιπτώσεις [τρεις διαφορετικές τιμές ταχύτητας (180, 200 και 220 m/sec) και τρεις διαφορετικές τιμές γωνίας (30, 60 και 90°) πρόσπτωσης]. Για λόγους σύγκρισης, σε κάθε γράφημα παρουσιάζεται η τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας όπως αυτή προσδιορίστηκε μέσω πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της μελέτης των Junkar *et al.* /121/ και καταγράφεται στον Πίνακα 4.1. Μέσω του σχήματος 4.21, η σύγκριση των τιμών της επιφανειακής κυκλικότητας από προσομοίωση με αυτές των τιμών της από το πείραμα των **M. Junkar** *et al.* /121/ γίνεται απευθείας συγκρίνοντας την καμπύλη που προκύπτει από τις τιμές της προσομοίωσης με την ευθεία που προκύπτει από την τιμή του πειράματος, αντίστοιχα.

Τα έξι πρώτα διαγράμματα του σχήματος 4.21 αναφέρονται στις περιπτώσεις με τιμές ταχύτητας ίση με 180, 200 και 220 m/sec και δυο διαφορετικές τιμές γωνίας πρόσπτωσης σωματιδίου ίση με 30 και 60 μοίρες. Οι τιμές της παρούσας προσομοίωσης αντιστοιχούν σε αυτές τις περιπτώσεις σε μια καμπύλη που έχει μια φθίνουσα πορεία και στη συνέχεια οι τιμές συγκλίνουν σε μια τελική τιμή έπειτα από συγκεκριμένο αριθμό σωματιδίων πρόσπτωσης ανάλογα με την περίπτωση που μελετάται. Για παράδειγμα, στις περιπτώσεις για γωνία πρόσπτωσης σωματιδίου ίση με 30° και τιμές ταχύτητας ίση με 180 και 200 m/sec, οι τιμές της προσομοίωσης συγκλίνουν σε μια τελική τιμή έπειτα από την πρόσπτωση του 12^{ου} σωματιδίου, ενώ για ταχύτητα ίση με 220 m/sec, οι τιμές της προσομοίωσης συγκλίνουν έπειτα από την πρόσπτωση του 13^{ου} σωματιδίου. Για γωνία πρόσπτωσης σωματιδίου ίση με 60° και τιμές ταχύτητας ίση με 200 και 220 m/sec, οι τιμές της προσομοίωσης συγκλίνουν σε μια τελική τιμή έπειτα από την πρόσπτωση του 10^{ου} σωματιδίου ενώ για ταχύτητα ίση με 180 m/sec, οι τιμές της προσομοίωσης συγκλίνουν έπειτα από την πρόσπτωση του 17^{ου} σωματιδίου.

Η σύγκριση της καμπύλης της επιφανειακής κυκλικότητας που προκύπτει από τις τιμές της προσομοίωσης, με την ευθεία που προκύπτει από την τιμή του πειράματος, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η τελική τιμή στην οποία συγκλίνει η καμπύλη, πλησιάζει την τιμή του πειράματος σε σχέση με την τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας που αντιστοιχεί σε πρόσκρουση ενός μόνο σωματιδίου στο στόχο.

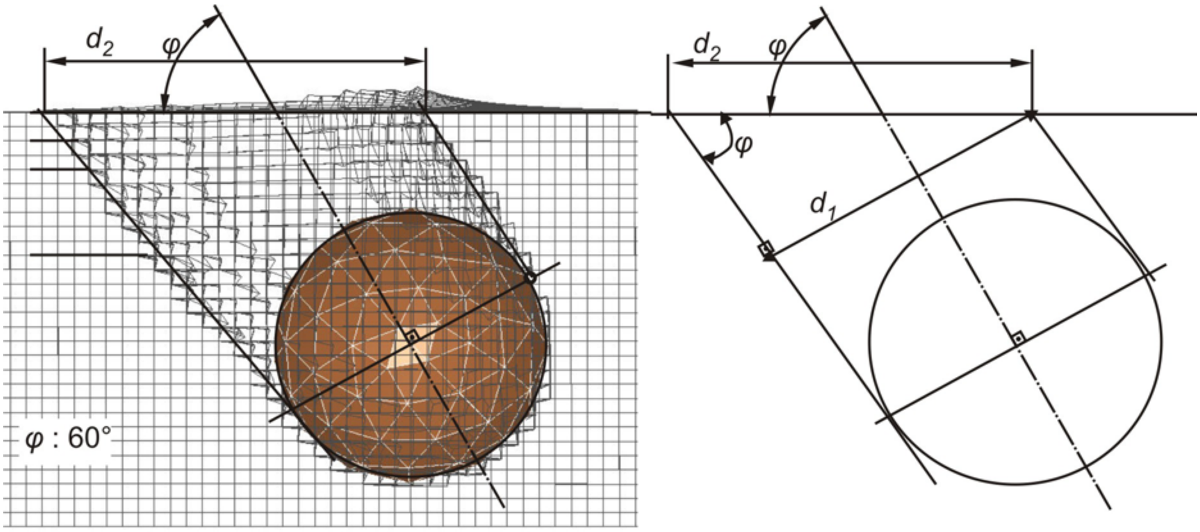


Σχήμα 4.21: Επιφανειακή κυκλικότητα για διάφορες ταχύτητες και γωνίες πρόσκρουσης-Σύγκριση τιμών μεταξύ αριθμητικής επίλυσης και πειράματος

Συγκρίνοντας στο σχήμα 4.21, την επιφανειακή κυκλικότητα (που προκύπτει είτε από την παρούσα προσομοίωση είτε από τις πειραματικές μετρήσεις) για μια συγκεκριμένη γωνία και για διάφορες ταχύτητες συμπεραίνεται ότι η επίδραση της ταχύτητας πρόσκρουσης των σωματιδίων – για συγκεκριμένη γωνία πρόσκρουσης – φαίνεται να μην είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Στην περίπτωση γωνίας πρόσκρουσης ίσης με 90^o (για όλες τις ταχύτητες πρόσκρουσης), η επιφανειακή κυκλικότητα (για το παρόν μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων) προκύπτει ίση με τη μονάδα (σχήμα 4.21), γεγονός που δικαιολογείται από τη συμμετρία του αριθμητικού μοντέλου και της υπόθεσης για απόλυτη σφαιρικότητα του κόκκου. Για γωνίες πρόσπτωσης μικρότερες των 90° η κυκλικότητα αναμένεται να είναι μικρότερη της μονάδας, καθώς η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας (συνεπώς και της ορμής) θα έχει ως αποτέλεσμα την αφαίρεση περισσότερου υλικού από το στόχο στη διεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας.

Για γωνία πρόσπτωσης 60°, τα παρόντα αριθμητικά αποτελέσματα προσεγγίζουν τη θεωρητική τιμή του sin(60°) = 0.8660, ενώ για γωνία πρόσπτωσης 30°, προσεγγίζουν τη θεωρητική τιμή του sin(30°) = 0.5.



Σχήμα 4.22: Σχηματική αναπαράσταση του υπολογισμού της θεωρητικής τιμής επιφανειακής κυκλικότητας για γωνία πρόσκρουσης = 60°

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα 4.22 όπου παρουσιάζεται η εικόνα διείσδυσης του σωματιδίου στο εσωτερικό του στόχου μετά την πρόσπτωση του υπό γωνία πρόσκρουσης ίση με 60°, είναι φανερό ότι η θεωρητική τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας είναι ίση με

$$sin\,\varphi = \frac{d_1}{d_2} \qquad (4.1)$$

όπου d_2 είναι η μεγαλύτερη διάσταση του κρατήρα ενώ d_1 είναι η μικρότερη διάσταση του κρατήρα και θεωρητικά είναι ίση με τη διάμετρο του κόκκου.

Έτσι, οι θεωρητικές τιμές της κυκλικότητας για γωνία 30 και 60 μοιρών είναι sin30 = 0.5, sin60 = 0.866 αντίστοιχα.

Η επιφανειακή κυκλικότητα όπως υπολογίζεται στα πειράματα που διεξήγαγαν οι Junkar *et al.* /121/ προκύπτει σε γενικές γραμμές μικρότερη από αυτήν του προτεινόμενου αριθμητικού μοντέλου (σχήμα 4.21), γεγονός που δικαιολογείται κυρίως λόγω των προσεγγίσεων που αυτό υιοθετεί. Οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να απαλειφθούν σε σημαντικό βαθμό, ώστε το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων να καταστεί πιο ρεαλιστικό, με σημαντική όμως αύξηση τόσο στην πολυπλοκότητά του αλλά και στο υπολογιστικό κόστος.

Οι διαφορές που παρατηρούνται (σχήμα 4.21) μεταξύ των αποτελεσμάτων της παρούσας αριθμητικής επίλυσης και της πειραματικής διαδικασίας των Junkar *et al.* /121/ οφείλεται στους εξής παράγοντες:

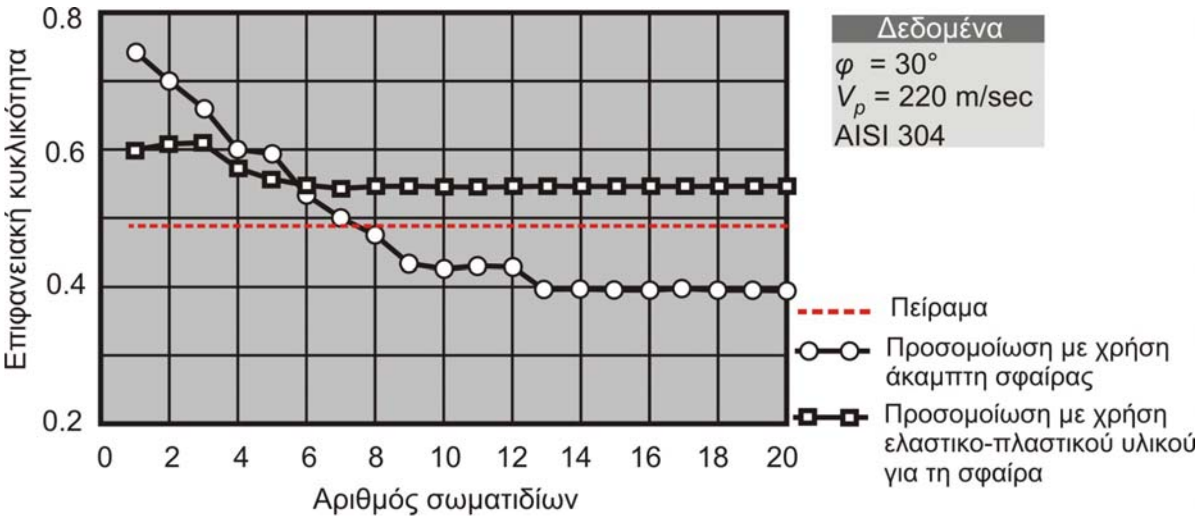
α) Το αριθμητικό μοντέλο δε λαμβάνει υπόψη τη σύγκρουση μεταξύ των κόκκων και τη μείωση της ταχύτητας τους λόγω της σύγκρουσης, την εκτροπή και το θρυμματισμό τους,

β) Το αριθμητικό μοντέλο υποθέτει απόλυτα σφαιρικό σχήμα για τους κόκκους καθώς και άκαμπτη συμπεριφορά, συνθήκες που δεν ισχύουν επακριβώς στην πραγματικότητα,

γ) Οι κόκκοι προσκρούουν όλοι σε ένα συγκεκριμένο σημείο, ενώ στην πραγματικότητα οι λειαντικοί κόκκοι διατηρούν μια κατανομή επί της διατομής του ακροφυσίου από το οποίο εξέρχονται.

Η θεώρηση του κόκκου ως άκαμπτης σφαίρας, έγινε με σκοπό την επίτευξη της μείωσης του υπολογιστικού χρόνου. Η επιλογή της μοντελοποίησης του κόκκου ως άκαμπτη σφαίρα ωστόσο ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί, καθώς δεν ενδιαφέρει η μελέτη των τάσεων και των παραμορφώσεων του κόκκου, αλλά αυτό που ενδιαφέρει είναι η μελέτη των τάσεων και των παραμορφώσεων του στόχου.

Αν η επιλογή της μοντελοποίησης συμπεριλάβει ένα ελαστο-πλαστικό υλικό αντί της άκαμπτης σφαίρας για τον κόκκο που προσπίπτει στο στόχο, τότε τα αποτελέσματα είναι τελείως διαφορετικά. Στο σχήμα 4.23 παριστάνονται γραφικά τα αποτελέσματα της επιφανειακής κυκλικότητας συναρτήσει του αριθμού των κόκκων που προσπίπτουν στο στόχο από χάλυβα, όπως αυτά προκύπτουν μετά από προσομοίωση του κόκκου ως άκαμπτη σφαίρα και ως σφαίρα από ελαστο-πλαστικό υλικό. Η περίπτωση που εξετάζεται στο διάγραμμα 4.23 είναι η περίπτωση πρόσπτωσης κόκκων υπό γωνία 30° και ταχύτητα πρόσκρουσης ίση με 220 m/sec. Στο ίδιο διάγραμμα παριστάνεται γραφικά, για λόγους σύγκρισης, η τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις των M. Junkar *et al.* /121/, για τη συγκεκριμένη περίπτωση πρόσπτωσης.



Σχήμα 4.23: Σύγκριση αποτελεσμάτων της κυκλικότητας μετά από προσομοίωση κόκκου ως άκαμπτη σφαίρα και ως σφαίρα από ελαστο-πλαστικό υλικό.

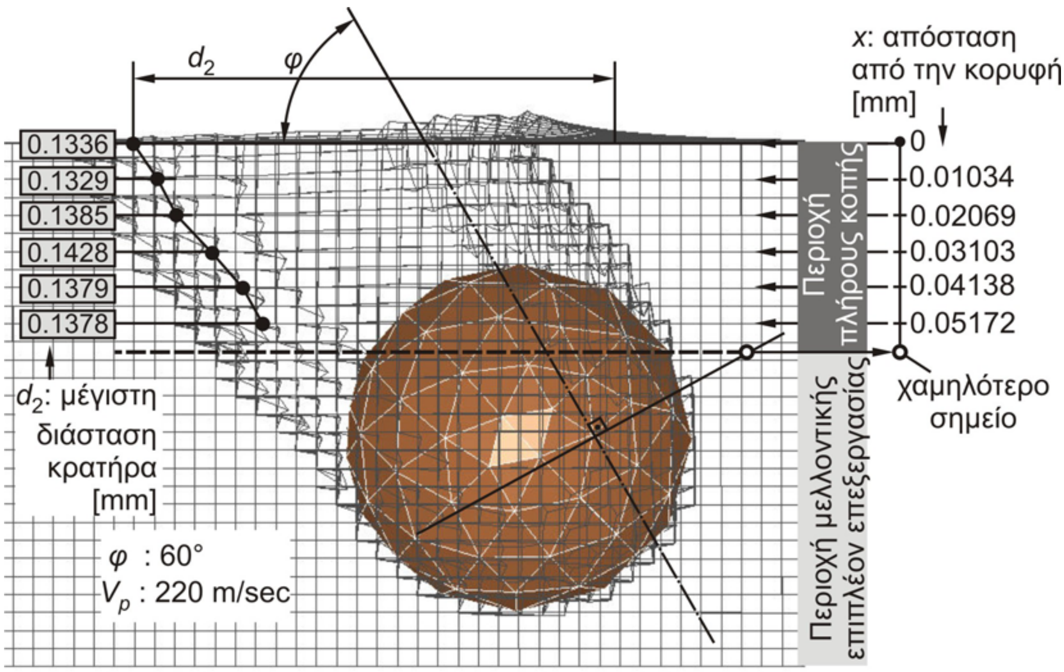
Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα 4.21, η θεώρηση του υλικού του κόκκου ως ελαστο-πλαστικού αντί της άκαμπτης σφαίρας, προσεγγίζει καλύτερα το πειραματικό αποτέλεσμα για την επιφανειακή κυκλικότητα. Πράγματι, στη μεν περίπτωση της προσομοίωσης του κόκκου ως άκαμπτη σφαίρα, η τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας υπολογίζεται στην τιμή 0.3962 μετά την πρόσκρουση του τελευταίου κόκκου ενώ χρησιμοποιώντας στην περίπτωση της προσομοίωσης του κόκκου από ελαστο-πλαστικό υλικό, η τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας υπολογίζεται στην τιμή 0.54484 μετά την πρόσκρουση του τελευταίου κόκκου. Αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το αντίστοιχο πειραματικό αποτέλεσμα για την επιφανειακή κυκλικότητα είναι 0.4922 τότε η θεώρηση του ελαστο-πλαστικού υλικού παρατηρείται πως δίνει αποτέλεσμα που προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το πειραματικό.

Το ενθαρρυντικό για μια τέτοια προσέγγιση είναι ότι από την πρόσπτωση του πρώτου κιόλας κόκκου (αποτελούμενου από ελαστο-πλαστικό υλικό) το αποτέλεσμα της επιφανειακής κυκλικότητας (0.596) είναι ήδη πολύ κοντά στο πειραματικό. Επίσης μετά την πρόσπτωση του πέμπτου και έκτου κόκκου στο στόχο, η τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας (0.555) αρχίζει σταδιακά να προσεγγίζει την τελική τιμή (0.54484). Αξίζει να σημειωθεί ότι η αντίστοιχη προσομοίωση των M. Junkar *et al.* /121/ θεωρεί έναν μόνο προσπίπτον κόκκο μοντελοποιημένο ως άκαμπτη σφαίρα και το αντίστοιχο αποτέλεσμα για την επιφανειακή κυκλικότητα είναι 0.7051 (αρκετά αποκλίνουσα τιμή σε σχέση με την πειραματική) .

Για λόγους σύγκρισης με το ήδη δημοσιευμένο μοντέλο των M. Junkar *et al,* θεωρήθηκε σκόπιμο να μοντελοποιηθούν οι προσπίπτοντες κόκκοι ως άκαμπτα σφαιρίδια, οπότε δεν παρουσιάζονται περαιτέρω αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου των κόκκων από ελαστο-πλαστικό υλικό.

4.3.4 Μέτρηση κυκλικότητας στο εσωτερικό του κρατήρα

Η κυκλικότητα του κρατήρα μετράται τώρα σε συγκεκριμένα επίπεδα σε προκαθορισμένο βάθος από την επιφάνεια του κρατήρα.

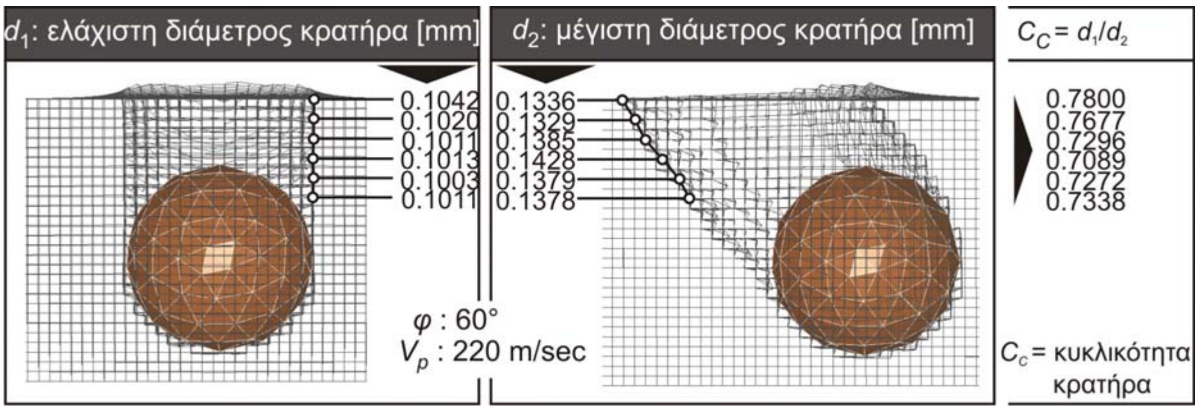


Σχήμα 4.24: Υπολογισμός μέγιστης διάστασης του κρατήρα

Ο υπολογισμός της κυκλικότητας του κρατήρα μετά την πρόσκρουση και του εικοστού σωματιδίου, καθιστά αναγκαία την καταγραφή των διαμέτρων d_1 και d_2 σε συγκεκριμένα επίπεδα κάτω από την ανώτερη επιφάνεια του κρατήρα. Τα επίπεδα στα οποία καταγράφονται οι διάμετροι d_1 και d_2, προσδιορίζονται από σημεία κόμβων του απαραμόρφωτου στόχου (πριν την πρόσκρουση κόκκων).

Οι αποστάσεις των επιπέδων αυτών από την επιφάνεια του στόχου, παρουσιάζονται στο σχήμα 4.24 όπου εμφανίζεται μια πλάγια όψη του στόχου, στο επίπεδο πρόσπτωσης των κόκκων. Επίσης, στο ίδιο σχήμα (γωνίας πρόσπτωσης: 60°, ταχύτητα σωματιδίων: 220 m/sec), παρουσιάζονται οι αντίστοιχες – σε κάθε ένα επίπεδο – μετρήσεις της μέγιστης διαμέτρου κρατήρα d_2. Οι μετρήσεις αυτές λαμβάνονται εκκινώντας από την ανώτερη επιφάνεια του στόχου έως το χαμηλότερο σημείο κοπής (σχήμα 4.24), πριν από το οποίο υπάρχει η περιοχή πλήρους κοπής, ενώ χαμηλότερα από αυτό, εκτείνεται η περιοχή μελλοντικής επεξεργασίας.

Στο σχήμα 4.25 παρουσιάζεται τελικά ο υπολογισμός της κυκλικότητας εντός του κρατήρα για γωνία πρόσπτωσης 60° και ταχύτητα πρόσκρουσης σωματιδίων ίση με 220 m/sec. Η μέτρηση της ελάχιστης διαμέτρου του κρατήρα d_1, παρουσιάζεται στο αριστερό τμήμα του σχήματος 4.25 όπου παρατίθεται η πλάγια όψη του στόχου, κάθετη στο επίπεδο πρόσπτωσης των κόκκων. Η κυκλικότητα στο εσωτερικό του κρατήρα υπολογίζεται ως το πηλίκο d_1/d_2 και παρουσιάζεται στο δεξιό τμήμα του σχήματος 4.25, με τις τιμές της μέγιστης διαμέτρου d_2 να παρουσιάζονται στο κεντρικό τμήμα του σχήματος 4.25 (επίσης βλ. σχήμα 4.24).

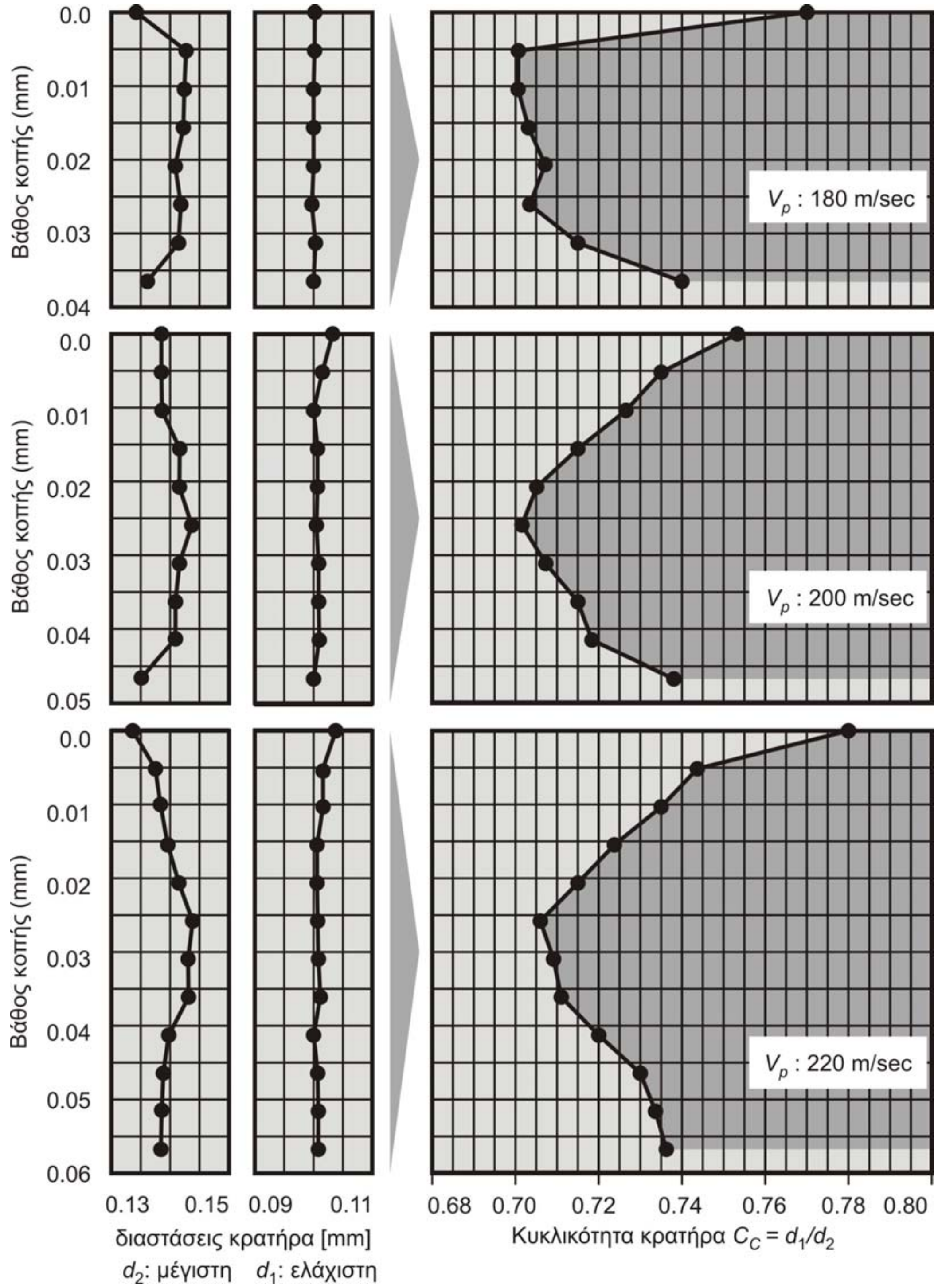


Σχήμα 4.25: Υπολογισμός της κυκλικότητας του κρατήρα

4.3.5 Κυκλικότητα κρατήρα συναρτήσει του βάθους κοπής

Η τιμή της κυκλικότητας του κρατήρα και οι τιμές της ελάχιστης και μέγιστης διαμέτρου d_1, d_2, αντίστοιχα, παρουσιάζονται γραφικά συναρτήσει του βάθους κοπής στο σχήμα 4.26 για όλες τις ταχύτητες πρόσπτωσης (180, 200 και 220 m/sec) των κόκκων, για γωνία πρόσπτωσης ίση με 60°.

Η μελέτη του σχήματος 4.26, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το βάθος κοπής (το χαμηλότερο σημείο έως το οποίο η κοπή είναι πλήρης), αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα πρόσπτωσης των κόκκων. Το συμπέρασμα κρίνεται ως απόλυτα λογικό, ενώ ταυτόχρονα επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα των S.Y.Ahmadi-Broghani *et al.* /131/.



Σχήμα 4.26: Κυκλικότητα του κρατήρα

Η κυκλικότητα του κρατήρα για γωνία πρόσπτωσης ίση με 90° κρίθηκε σκόπιμο να μην παρουσιαστεί γραφικά, καθώς προκύπτει πάντα ίση με τη μονάδα λόγω γεωμετρικής συμμετρίας του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και της υπόθεσης σφαιρικότητας των κόκκων.

Στις περιπτώσεις με γωνία πρόσκρουσης ίση με 30°, παρατηρήθηκε ένας διαφορετικός μηχανισμός αφαίρεσης υλικού από το στόχο. Πράγματι, ενώ ο πρώτος κόκκος αφαιρεί υλικό από το στόχο, μετά την πρόσκρουσή του ανακλάται με μειωμένη ταχύτητα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Οι κόκκοι που ακολουθούν, χτυπούν στην ήδη παραμορφωμένη αλλά όχι επίπεδη επιφάνεια και ανακλώνται με διάφορες γωνίες. Συνεπώς, το βάθος διείσδυσης στο στόχο είναι πάρα πολύ μικρό χωρίς να δημιουργείται περιοχή πλήρους κοπής.

Στην περίπτωση γωνίας πρόσκρουσης ίση με 60^o, ο πρώτος κόκκος αφαιρεί περισσότερο υλικό από το στόχο με αποτέλεσμα οι κόκκοι που έπονται να βυθίζονται στον σταδιακά δημιουργούμενο κρατήρα σχηματίζοντας την περιοχή πλήρους κοπής, σχήμα 4.24.

Οι μηχανισμοί κοπής που προέκυψαν από το προτεινόμενο μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης της διαδικασίας κοπής με λειαντικούς κόκκους [Abrasive Water-Jet (AWJ)], επιβεβαιώνονται από τους Hutchings και Winter /115/ σύμφωνα με τους οποίους η διαδικασία αφαίρεσης υλικού και ο τρόπος παραμόρφωσης που παρατηρείται σε μικρές γωνίες προκύπτει κυρίως λόγω μικρο-κοπής (cutting deformation). ενώ σε μεγαλύτερες γωνίες λόγω αυλακώματος παραμόρφωσης (ploughing deformation) [Κεφάλαιο 2, Σχήμα 2.10].

Βέβαια σύμφωνα με την παρούσα προσέγγιση, η διαδικασία πρόσκρουσης εξετάζεται από μία διαφορετική οπτική γωνία από αυτήν των Hutchings και Winter: γίνεται προσπάθεια να αναπαρασταθεί η διαδικασία πρόσκρουσης μακροσκοπικά σύμφωνα με την κλασσική μηχανική (μηχανική παραμορφωσίμων υλικών) . Κατά αυτό τον τρόπο, δεν εξετάζεται η διαδικασία της πρόσκρουσης σε μικροσκοπική κλίμακα όπως εξετάζεται από θεωρητικά μοντέλα βασισμένα σε πειραματικές μετρήσεις, οπότε και μελετούν φαινόμενα όπως sliding/ rolling/ scratching, ploughing/ rubbing/ cutting κλπ. (Hutchings και Winter /115/). Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό μόνο να προσεγγίσει το φαινόμενο της πρόσκρουσης των κόκκων του AWJ σε στόχο, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Ένα μοντέλο FE δεν μπορεί να περιγράψει διαδικασίες sliding / rolling / scratching. Η μελέτη με FEM είναι μακροσκοπική και βασικό στόχο έχει να εξετάσει κατά πόσο η κλασσική μηχανική μπορεί να αναπαραστήσει με ακρίβεια τη διαδικασία AWJM. Τα αποτελέσματά της δεν προτίθεται να ανταγωνιστούν αυτά μεθόδων που βασίζονται σε πειραματικές παρατηρήσεις και προσεγγίσεις και μάλιστα σκοπεύουν να τις αξιοποιήσουν για τη βελτιστοποίησή της προτεινόμενης μεθόδου FE.

Παρόλα αυτά, το γεγονός ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου της παρούσας προσομοίωσης έχουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτά της μικροσκοπικής θεώρησης, αποδεικνύει ότι δείχνει ότι το μοντέλο οδεύει προς τη σωστή κατεύθυνση.

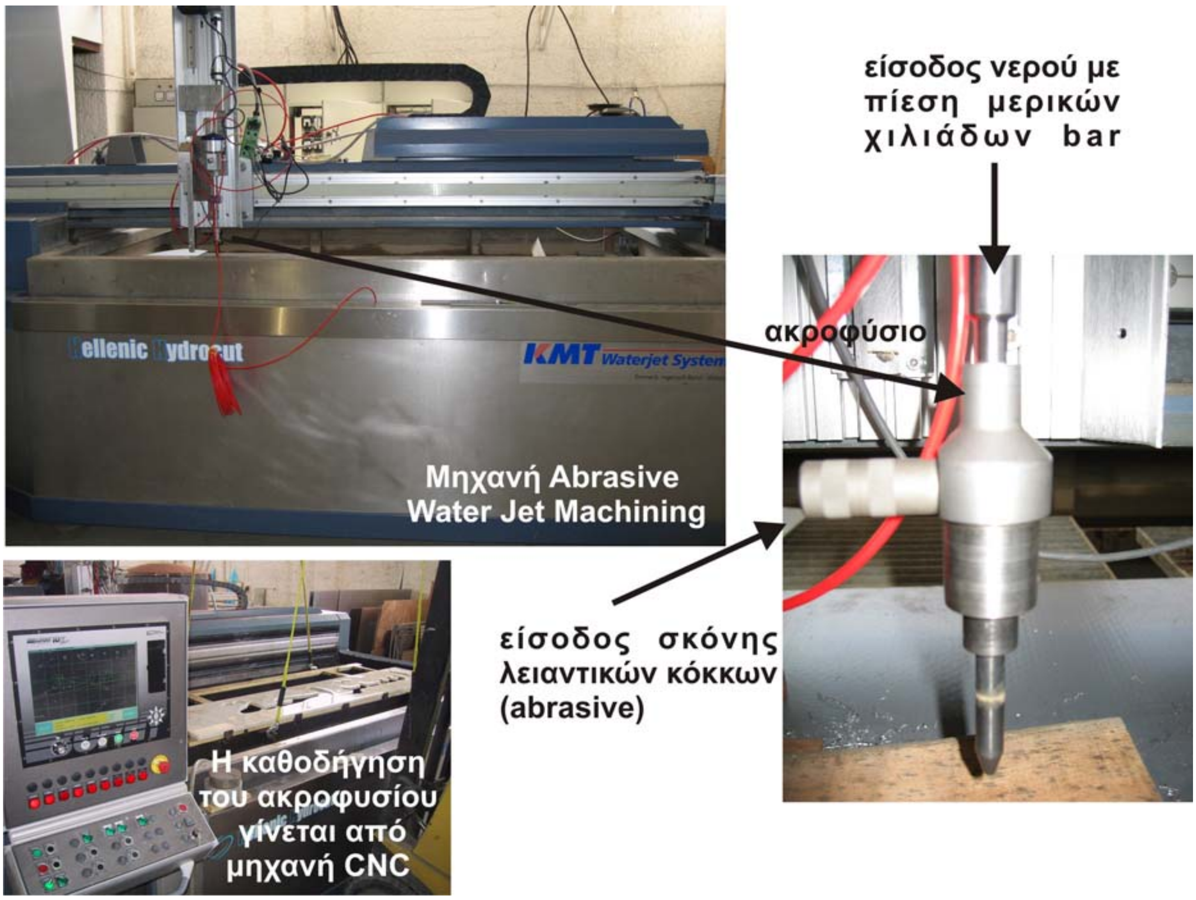
Μια μελλοντικά βελτιωμένη προσέγγιση με πεπερασμένα στοιχεία σε συνδυασμό με τα θεωρητικά μοντέλα και τις πειραματικές παρατηρήσεις είναι δυνατόν να οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου αναπαράστασης της διαδικασίας AWJ.

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

5.1 Περιγραφή Μηχανής Abrasive Water Jet Machining

Μια μηχανή Abrasive Waterjet Machining αποτελείται από το ακροφύσιο που βρίσκεται προσαρμοσμένο σε οδηγούς, τη μηχανή CNC που καθοδηγεί το ακροφύσιο, και τη δεξαμενή ανακύκλωσης. Οι οδηγοί επιτρέπουν την κίνηση του ακροφυσίου σε τρεις διαστάσεις. Στη δεξαμενή ανακύκλωσης καταλήγει το νερό μαζί με τους λειαντικούς κόκκους μετά την έξοδό τους από το ακροφύσιο. Η δεξαμενή περιέχει ένα μεγάλο ύψος νερού που απορροφά την ενέργεια των λειαντικών κόκκων και του νερού που εξέρχονται με μεγάλη ταχύτητα από το ακροφύσιο, αποτρέποντας έτσι το τρύπημα του πάτου της ίδιας της δεξαμενής με χρήση του Abrasive Waterjet Machining.

Σε μια μηχανή Abrasive Waterjet Machining το νερό αποκτά πίεση μερικών χιλιάδων bar και καθοδηγείται προς το ακροφύσιο. Λειαντικοί κόκκοι εισέρχονται στο ακροφύσιο και αναμιγνείονται με το νερό οπότε και επιταχύνονται. Κατά την έξοδο από το ακροφύσιο, το νερό μαζί με τους λειαντικούς κόκκους εξέρχεται με τεράστια ταχύτητα η οποία είναι ικανή να κόψει και γενικά να κατεργαστεί, ακόμα και τα πιο σκληρά υλικά. Το εκάστοτε κατεργαζόμενο τεμάχιο στερεώνεται με στηρίγματα πάνω σε μια μεταλλική σχάρα η οποία βρίσκεται στο πάνω μέρος της δεξαμενής.



Σχήμα 5.1: Μηχανή Abrasive Water Jet Machining

Στο σχήμα 5.2 φαίνεται η σύσταση των λειαντικών κόκκων που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη μηχανή Abrasive Waterjet Machining της Ελληνικής Εταιρείας Υδροκοπής (Hellenic Hydrocut) στην Αθήνα, στην οποία έγινε η επίσκεψη για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

σύσταση λειαντικού κόκκου		
	Al_2O_3	20-25%
	FeO	ca. 31%
	SiO_2	24-36%
	MgO	5-7%
	CaO	ca. 1%
	MnO	ca.1%
	TiO_2	ca.1%

Σχήμα 5.2: Σύσταση λειαντικού κόκκου

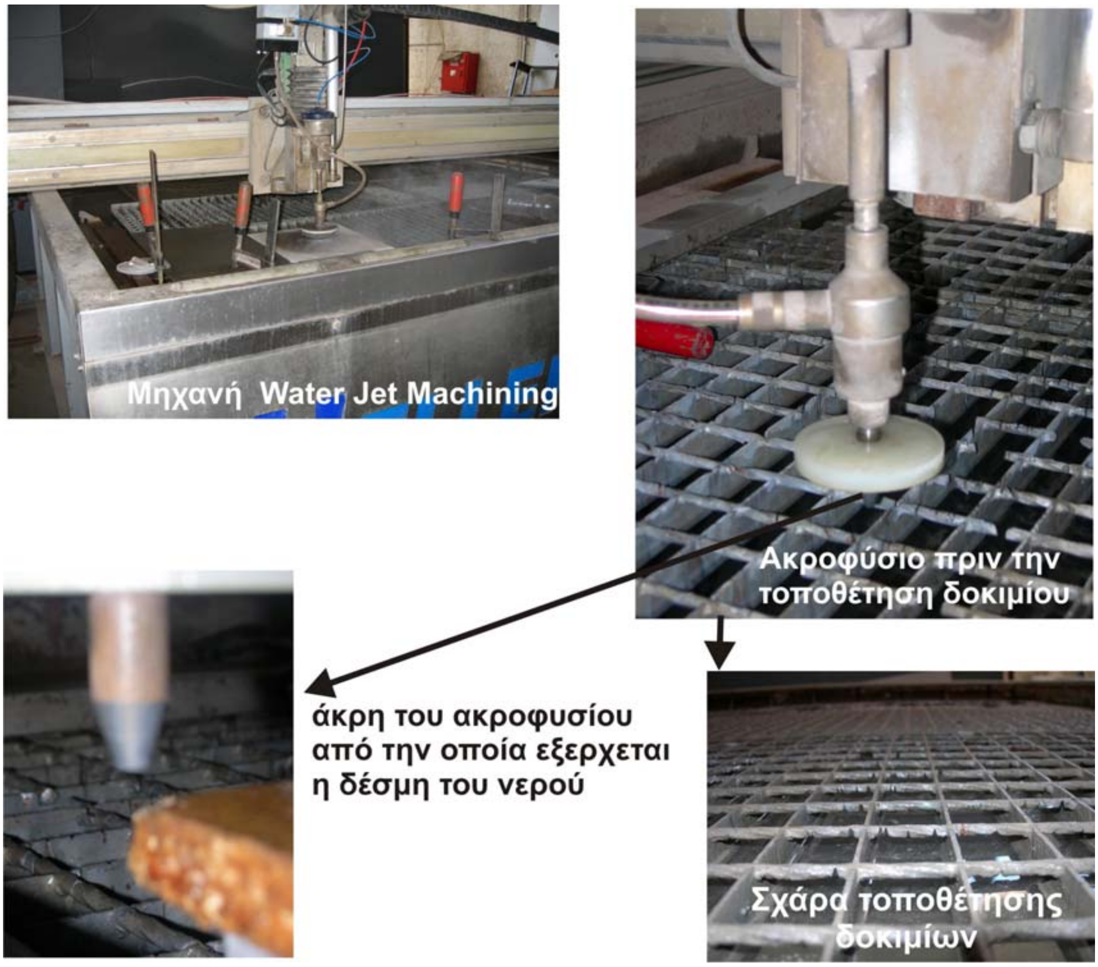
5.2 Πειραματική Διάταξη

Στο σχήμα 5.3 φαίνεται η μηχανή Waterjet Machining της Ελληνικής Εταιρείας Υδροκοπής (Hellenic Hydrocut) στην Αθήνα, στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα.

Πάνω στη μεταλλική σχάρα τοποθέτησης των δοκιμίων τοποθετείται και στερεώνεται το εκάστοτε δοκίμιο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, η σχάρα είναι ήδη τρυπημένη και κομμένη σε αρκετά σημεία από τη χρήση του Waterjet Machining.

Τα δοκίμια προσδένονται πάνω στη σχάρα τοποθέτησης και η κοπή γίνεται από τη δέσμη νερού που εξέρχεται από το ακροφύσιο. Η άκρη του ακροφυσίου βρίσκεται σε ορισμένη απόσταση από την επιφάνεια του δοκιμίου. Ανάλογα με την περίπτωση του πειράματος που διεξάγεται, η απόσταση αυτή μπορεί να μεταβληθεί έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση της απόστασης σε σχέση με το πλάτος κοπής του δοκιμίου.

Το ακροφύσιο κινείται πάνω σε μεταλλικούς οδηγούς με καθοδήγηση από μια μηχανή CNC όπως ήδη προαναφέρθηκε. Μπορεί να διαγράψει οποιαδήποτε τροχιά σε τρεις διαστάσεις και να κόψει το δοκίμιο ξεκινώντας από την άκρη του ή από κάποιο σημείο εσωτερικά της επιφάνειάς του.



Σχήμα 5.3: Πείραμα κοπής με Water Jet Machining στην εταιρεία ‘’Hellenic Hydrocut’’

Στο συγκεκριμένο πείραμα, η δέσμη του νερού ξεκινά να κόβει από την άκρη της επιφάνειας του δοκιμίου, και κόβει ένα μικρό ευθύγραμμο τμήμα, με σκοπό τη μελέτη του πλάτους κοπής για συγκεκριμένο υλικό δοκιμίου, για συγκεκριμένη απόσταση ακροφυσίου-επιφάνειας, για συγκεκριμένο πάχος δοκιμίου και για συγκεκριμένη ταχύτητα πρόωσης.

5.2 Σχεδίαση Πειράματος

Κάθε δοκίμιο έχει διαστάσεις 150 mm × 250 mm. Η δέσμη του νερού που ξεκινά να κόβει από την άκρη της επιφάνειας του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4, κόβει ένα μικρό ευθύγραμμο τμήμα ίσο με 20 mm.

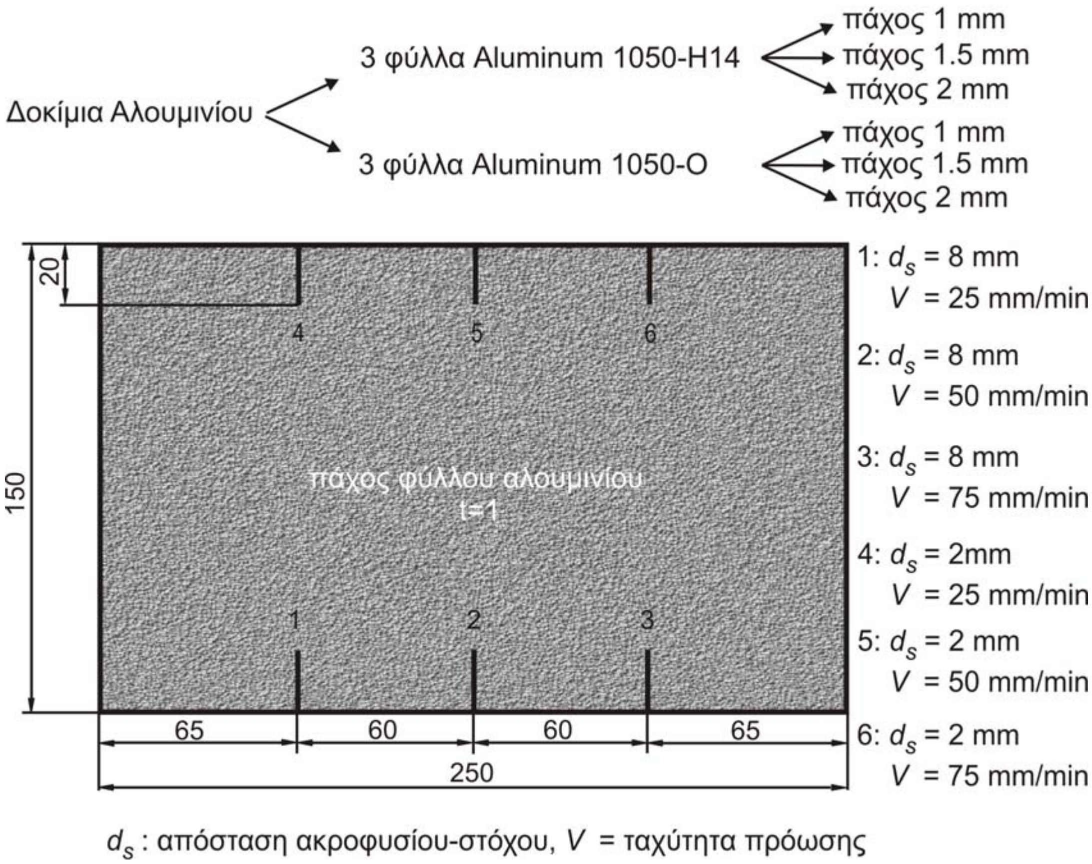
Για τη μελέτη του πλάτους κοπής σε σχέση με το υλικό του δοκιμίου, επιλέχθηκαν δύο τύποι αλουμινίου (Aluminum 1050-H14 και Aluminum 1050-O) με διαφορετικό όριο διαρροής και αρκετά διαφορετικό όριο παραμόρφωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Το αλουμίνιο είναι γενικά ένα μαλακό υλικό που είναι δυνατόν να κοπεί με τη χρήση Water Jet χωρίς τη βοήθεια λειαντικών κόκκων (abrasive).

Για την μελέτη του πλάτους κοπής σε σχέση με το πάχος του δοκιμίου, από τον κάθε τύπο αλουμινίου (Aluminum 1050-H14 ή Aluminum 1050-O), χρησιμοποιήθηκαν τρία φύλλα με πάχος 1 mm, 1.5 mm, και 2 mm το καθένα.

Σε καθένα από αυτά τα έξι φύλλα αλουμινίου, σχεδιάστηκαν να γίνουν έξι εγκοπές προς μελέτη του πλάτους κοπής. Τρεις εγκοπές από τη μια πλευρά του δοκιμίου και τρεις από την άλλη πλευρά, με απόσταση 60 mm μεταξύ τους, όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα 5.4.

- Για τη διερεύνηση σε σχέση με την απόσταση από το στόχο, επιλέχθηκε να γίνει η κοπή με δύο διαφορετικές αποστάσεις του ακροφυσίου από την επιφάνεια του στόχου (2 mm και 8 mm).
- Εξάλλου, για τη διερεύνηση σε σχέση με την πρόωση του στόχου, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν τρεις ταχύτητες πρόωσης (25 mm/min, 50 mm/min και 75 mm/min) για την απόσταση 2 mm από το στόχο και τρεις ταχύτητες για την απόσταση 8 mm από το στόχο.

Ιδιότητες Υλικού	Aluminum 1050-H14	Aluminum 1050-O
πυκνότητα	2.705 gr/cm^3	2.705 gr/cm^3
σκληρότητα (Brinell)	30	21
όριο διαρροής (Yield stress)	103 Mpa	28 Mpa
όριο παραμόρφωσης (elongation break)	10%	39%
μέτρο ελαστικότητας	69 GPa	69 GPa
λόγος Poisson	0.33	0.33



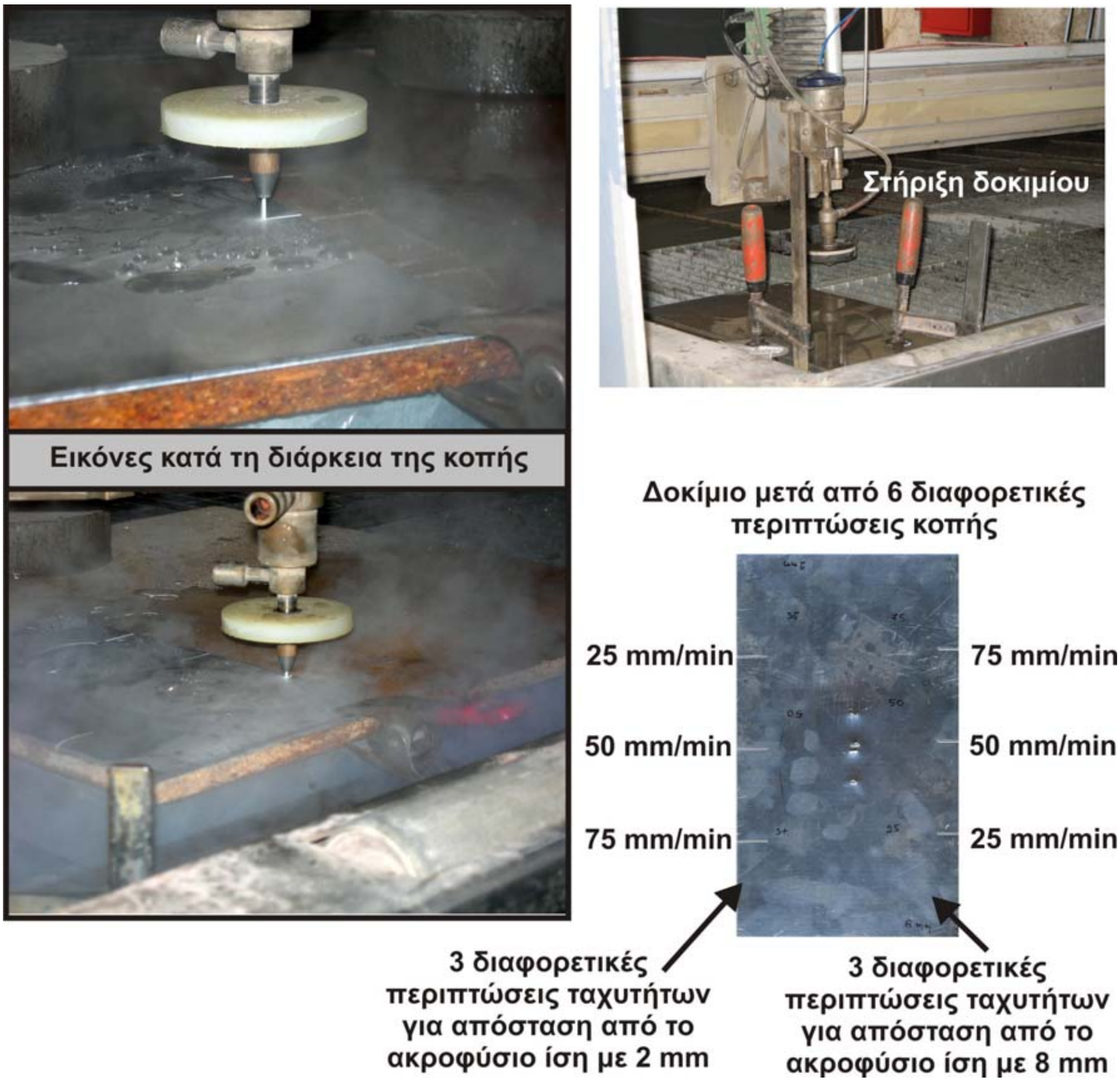
Σχήμα 5.4: Σχεδίαση πειράματος κοπής με Water Jet Machining

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 5.4, στο πείραμα χρησιμοποιούνται έξι φύλλα αλουμινίου στα οποία πραγματοποιούνται έξι εγκοπές στο καθένα με τη χρήση του WJ, οπότε τριανταέξι (36) διαφορετικές περιπτώσεις εγκοπών πρόκειται να μελετηθούν.

5.3 Πειραματική Διαδικασία

Κατά την πειραματική διαδικασία, καθένα δοκίμιο στερεώνεται πάνω στη σχάρα τοποθέτησης και έξι διαφορετικές περιπτώσεις κοπής πραγματοποιούνται σε κάθε φύλλο αλουμινίου. Όπως προαναφέρθηκε, τρία φύλλα αλουμινίου Aluminum 1050-O με πάχη 1 mm, 1.5 mm και 2 mm καθώς και τρία φύλλα αλουμινίου Aluminum 1050-H14 με πάχη 1 mm, 1.5 mm και 2 mm, χρησιμοποιούνται για τις εξι αυτές διαφορετικές περιπτώσεις κοπής.

Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται εικόνες κατά τη διάρκεια της κοπής ενδεικτικά για μία από τις 36 περιπτώσεις κοπής που πραγματοποιούνται με Water Jet Machining στην Hellenic Hydrocut. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται ένα από τα δοκίμια με τις εγκοπές που προκύπτουν μετά από την πειραματική διαδικασία.



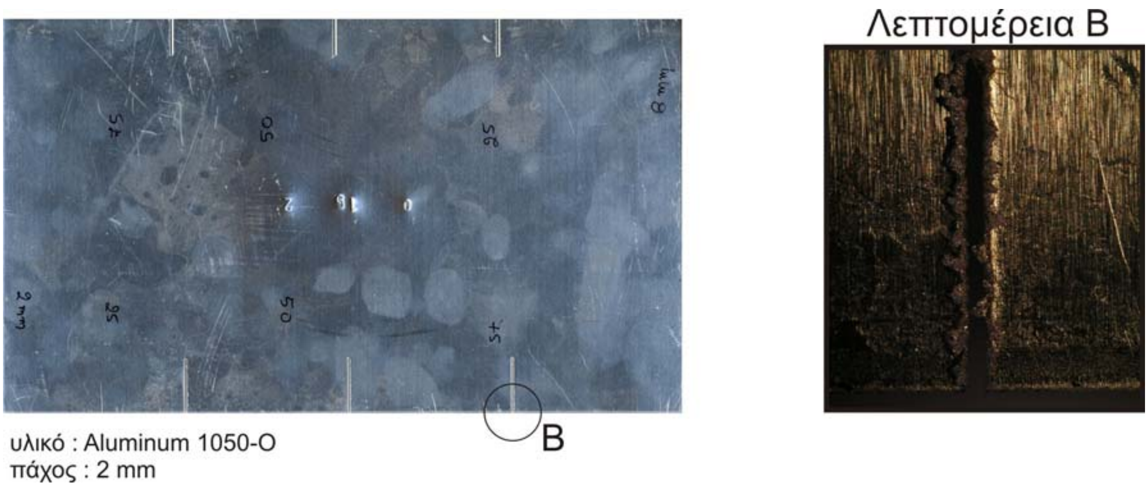
Σχήμα 5.5: Πείραμα κοπής με Water Jet Machining

5.4 Μετρήσεις

Οι μετρήσεις του πλάτους κοπής για τις 36 περιπτώσεις κοπής των δοκιμίων έγιναν με χρήση του στερεοσκοπίου Olympus szx12.

Σχήμα 5.6: Μετρήσεις με στερεοσκόπιο

Με ενεργοποίηση του κατάλληλου φωτισμού όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6 κατέστη δυνατή η μέτρηση του πλάτους κοπής όπως διακρίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Μετρήσεις στο πείραμα κοπής με Water Jet Machining

Η κάθε εγκοπή έχει όπως προαναφέρθηκε μήκος 20 mm. Οι μετρήσεις του πλάτους κοπής περιορίζονται στα πρώτα 3 mm με απόσταση μεταξύ των μετρήσεων 0.3 mm. Στο σχήμα 5.8 έως το σχήμα 5.13 απεικονίζονται αυτές οι μετρήσεις τόσο για το πλάτος κοπής στο πάνω μέρος της επιφάνειας (top kerf width), όσο και για το πλάτος κοπής στο κάτω μέρος της επιφάνειας (bottom kerf width).

Aluminum type	Aluminum sheet width (mm)	Feed Rate (mm/min)	AXIAL DISTANCE	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 63	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 63	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm
H-14	1	25	0	90	1,000	40	0,444	80	1,270	35	0,556
			0,3	87	0,967	39	0,433	82	1,302	33	0,524
			0,6	85	0,944	40	0,444	85	1,349	34	0,540
			0,9	85	0,944	40	0,444	87	1,381	30	0,476
			1,2	88	0,978	42	0,467	88	1,397	30	0,476
			1,5	87	0,967	43	0,478	87	1,381	31	0,492
			1,8	88	0,978	42	0,467	87	1,381	28	0,444
			2,1	87	0,967	40	0,444	87	1,381	28	0,444
			2,4	88	0,978	42	0,467	86	1,365	33	0,524
			2,7	86	0,956	42	0,467	86	1,365	33	0,524
			3	90	1,000	42	0,467	85	1,349	32	0,508
					0,971		**0,457**		**1,356**		**0,501**
		50	0	85	0,944	38	0,422	80	1,270	25	0,397
			0,3	87	0,967	25	0,278	80	1,270	26	0,413
			0,6	87	0,967	30	0,333	82	1,302	20	0,317
			0,9	87	0,967	25	0,278	82	1,302	12	0,190
			1,2	87	0,967	30	0,333	84	1,333	8	0,127
			1,5	88	0,978	21	0,233	84	1,333	10	0,159
			1,8	86	0,956	25	0,278	83	1,317	23	0,365
			2,1	87	0,967	35	0,389	82	1,302	10	0,159
			2,4	87	0,967	22	0,244	82	1,302	13	0,206
			2,7	86	0,956	20	0,222	85	1,349	20	0,317
			3	88	0,978	38	0,422	85	1,349	25	0,397
					0,965		**0,312**		**1,312**		**0,277**
		75	0	85	0,944	43	0,478	83	1,317	20	0,317
			0,3	85	0,944	35	0,389	80	1,270	20	0,317
			0,6	86	0,956	31	0,344	83	1,317	17	0,270
			0,9	87	0,967	35	0,389	83	1,317	15	0,238
			1,2	87	0,967	30	0,333	83	1,317	20	0,317
			1,5	87	0,967	36	0,400	85	1,349	25	0,397
			1,8	87	0,967	38	0,422	83	1,317	20	0,317
			2,1	88	0,978	34	0,378	81	1,286	22	0,349
			2,4	87	0,967	34	0,378	80	1,270	24	0,381
			2,7	84	0,933	35	0,389	80	1,270	24	0,381
			3	84	0,933	30	0,333	82	1,302	25	0,397
					0,957		**0,385**		**1,303**		**0,335**

Σχήμα 5.8: Μετρήσεις για Aluminum 1050-H14 με πάχος 1 mm

Aluminum type	Aluminum sheet width (mm)	Feed Rate (mm/min)	AXIAL DISTANCE	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 63	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm
H-0	1	25	0	93	1,033	50	0,556	85	1,349	70	0,778
			0,3	90	1,000	40	0,444	85	1,349	35	0,389
			0,6	87	0,967	40	0,444	87	1,381	35	0,389
			0,9	88	0,978	50	0,556	88	1,397	45	0,500
			1,2	88	0,978	45	0,500	88	1,397	33	0,367
			1,5	89	0,989	45	0,500	89	1,413	38	0,422
			1,8	91	1,011	45	0,500	90	1,429	45	0,500
			2,1	88	0,978	48	0,533	90	1,429	55	0,611
			2,4	89	0,989	40	0,444	88	1,397	50	0,556
			2,7	87	0,967	45	0,500	88	1,397	50	0,556
			3	88	0,978	45	0,500	89	1,413	50	0,556
					0,988		**0,498**		**1,395**		**0,511**
		50	0	88	0,978	45	0,500	80	1,270	50	0,556
			0,3	87	0,967	42	0,467	80	1,270	45	0,500
			0,6	88	0,978	40	0,444	79	1,254	35	0,389
			0,9	86	0,956	42	0,467	82	1,302	25	0,278
			1,2	85	0,944	45	0,500	83	1,317	40	0,444
			1,5	86	0,956	45	0,500	83	1,317	41	0,456
			1,8	86	0,956	40	0,444	83	1,317	40	0,444
			2,1	87	0,967	40	0,444	83	1,317	45	0,500
			2,4	88	0,978	40	0,444	83	1,317	40	0,444
			2,7	88	0,978	40	0,444	84	1,333	38	0,422
			3	88	0,978	40	0,444	83	1,317	38	0,422
					0,967		**0,464**		**1,303**		**0,441**
		75	0	88	0,978	38	0,422	80	1,270	40	0,444
			0,3	86	0,956	40	0,444	80	1,270	38	0,422
			0,6	80	0,889	38	0,422	80	1,270	37	0,411
			0,9	88	0,978	38	0,422	83	1,317	35	0,389
			1,2	90	1,000	36	0,400	83	1,317	38	0,422
			1,5	90	1,000	36	0,400	83	1,317	35	0,389
			1,8	90	1,000	36	0,400	83	1,317	37	0,411
			2,1	90	1,000	35	0,389	84	1,333	36	0,400
			2,4	88	0,978	37	0,411	84	1,333	36	0,400
			2,7	88	0,978	34	0,378	84	1,333	36	0,400
			3	89	0,989	34	0,378	83	1,317	35	0,389
					0,977		**0,406**		**1,309**		**0,407**

Σχήμα 5.9: Μετρήσεις για Aluminum 1050-O με πάχος 1 mm

Aluminum type	Aluminum sheet width (mm)	Feed Rate (mm/min)	AXIAL DISTANCE	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 63	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm
H-14	1,5	25	0	70	0,778	32	0,356	80	1,270	40	0,444
			0,3	80	0,889	25	0,278	78	1,238	30	0,333
			0,6	95	1,056	35	0,389	81	1,286	20	0,222
			0,9	95	1,056	32	0,356	82	1,302	20	0,222
			1,2	93	1,033	30	0,333	81	1,286	22	0,244
			1,5	93	1,033	25	0,278	81	1,286	20	0,222
			1,8	94	1,044	28	0,311	80	1,270	27	0,300
			2,1	93	1,033	23	0,256	80	1,270	32	0,356
			2,4	93	1,033	30	0,333	80	1,270	20	0,222
			2,7	93	1,033	32	0,356	80	1,270	30	0,333
			3	93	1,033	28	0,311	80	1,270	18	0,200
					1,002		**0,323**		**1,274**		**0,407**
		50	0	60	0,667	34	0,378	80	1,270	25	0,278
			0,3	66	0,733	25	0,278	81	1,286	20	0,222
			0,6	91	1,011	27	0,300	80	1,270	15	0,167
			0,9	92	1,022	28	0,311	78	1,238	22	0,244
			1,2	92	1,022	30	0,333	78	1,238	25	0,278
			1,5	93	1,033	30	0,333	77	1,222	30	0,333
			1,8	90	1,000	27	0,300	77	1,222	30	0,333
			2,1	91	1,011	27	0,300	79	1,254	32	0,356
			2,4	90	1,000	29	0,322	79	1,254	33	0,367
			2,7	90	1,000	27	0,300	79	1,254	15	0,167
			3	90	1,000	29	0,322	78	1,238	23	0,256
					0,955		**0,316**		**1,250**		**0,407**
		75	0	60	0,667	30	0,333	75	1,190	15	0,167
			0,3	80	0,889	30	0,333	74	1,175	20	0,222
			0,6	88	0,978	25	0,278	74	1,175	24	0,267
			0,9	87	0,967	20	0,222	74	1,175	25	0,278
			1,2	90	1,000	15	0,167	74	1,175	27	0,300
			1,5	89	0,989	17	0,189	74	1,175	33	0,367
			1,8	90	1,000	23	0,256	75	1,190	33	0,367
			2,1	90	1,000	30	0,333	75	1,190	30	0,333
			2,4	89	0,989	30	0,333	76	1,206	30	0,333
			2,7	90	1,000	30	0,333	77	1,222	30	0,333
			3	90	1,000	30	0,333	78	1,238	30	0,333
					0,953		**0,283**		**1,192**		**0,407**

Σχήμα 5.10: Μετρήσεις για Aluminum 1050-H14 με πάχος 1.5 mm

Aluminum type	Aluminum sheet width (mm)	Feed Rate (mm/min)	AXIAL DISTANCE	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 63	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm
H-0	1,5	25	0	65	1,032	29	0,322	80	1,270	25	0,278
			0,3	65	1,032	21	0,233	80	1,270	20	0,222
			0,6	65	1,032	20	0,222	80	1,270	31	0,344
			0,9	65	1,032	25	0,278	85	1,349	35	0,389
			1,2	65	1,032	34	0,378	85	1,349	37	0,411
			1,5	65	1,032	35	0,389	85	1,349	35	0,389
			1,8	65	1,032	34	0,378	85	1,349	33	0,367
			2,1	65	1,032	35	0,389	84	1,333	35	0,389
			2,4	65	1,032	34	0,378	84	1,333	33	0,367
			2,7	65	1,032	33	0,367	84	1,333	34	0,378
			3	65	1,032	33	0,367	85	1,349	35	0,389
					1,032		**0,336**		**1,323**		**0,407**
		50	0	90	1,000	40	0,444	82	1,302	20	0,222
			0,3	90	1,000	35	0,389	83	1,317	30	0,333
			0,6	89	0,989	34	0,378	83	1,317	30	0,333
			0,9	89	0,989	33	0,367	80	1,270	31	0,344
			1,2	89	0,989	32	0,356	83	1,317	27	0,300
			1,5	89	0,989	35	0,389	83	1,317	27	0,300
			1,8	90	1,000	32	0,356	83	1,317	26	0,289
			2,1	90	1,000	33	0,367	83	1,317	32	0,356
			2,4	90	1,000	33	0,367	84	1,333	29	0,322
			2,7	89	0,989	37	0,411	84	1,333	33	0,367
			3	84	0,933	35	0,389	82	1,302	30	0,333
					0,989		**0,383**		**1,313**		**0,407**
		75	0	90	1,000	37	0,411	77	1,222	25	0,278
			0,3	90	1,000	39	0,433	79	1,254	35	0,389
			0,6	90	1,000	35	0,389	79	1,254	30	0,333
			0,9	90	1,000	35	0,389	77	1,222	25	0,278
			1,2	90	1,000	32	0,356	77	1,222	35	0,389
			1,5	91	1,011	30	0,333	77	1,222	25	0,278
			1,8	90	1,000	30	0,333	75	1,190	25	0,278
			2,1	91	1,011	30	0,333	77	1,222	20	0,222
			2,4	89	0,989	32	0,356	76	1,206	30	0,333
			2,7	89	0,989	35	0,389	76	1,206	25	0,278
			3	88	0,978	30	0,333	75	1,190	30	0,333
					0,998		**0,369**		**1,219**		**0,407**

Σχήμα 5.11: Μετρήσεις για Aluminum 1050-O με πάχος 1.5 mm

Aluminum type	Aluminum sheet width (mm)	Feed Rate (mm/min)	AXIAL DISTANCE	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 63	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm
H-14	2	25	0	90	1,000	29	0,322	82	1,302	22	0,244
			0,3	90	1,000	33	0,367	83	1,317	25	0,278
			0,6	89	0,989	26	0,289	83	1,317	26	0,289
			0,9	89	0,989	40	0,444	83	1,317	29	0,322
			1,2	89	0,989	38	0,422	84	1,333	28	0,311
			1,5	90	1,000	30	0,333	84	1,333	30	0,333
			1,8	89	0,989	35	0,389	83	1,317	27	0,300
			2,1	89	0,989	26	0,289	83	1,317	28	0,311
			2,4	86	0,956	35	0,389	83	1,317	28	0,311
			2,7	89	0,989	35	0,389	83	1,317	23	0,256
			3	91	1,011	35	0,389	83	1,317	24	0,267
					0,991		**0,366**		**1,319**		**0,293**
		50	0	91	1,011	30	0,333	76	1,206	25	0,278
			0,3	93	1,033	32	0,356	76	1,206	30	0,333
			0,6	90	1,000	25	0,278	76	1,206	30	0,333
			0,9	87	0,967	27	0,300	76	1,206	27	0,300
			1,2	83	0,922	31	0,344	76	1,206	30	0,333
			1,5	87	0,967	25	0,278	77	1,222	30	0,333
			1,8	93	1,033	30	0,333	77	1,222	30	0,333
			2,1	93	1,033	29	0,322	80	1,270	27	0,300
			2,4	94	1,044	31	0,344	78	1,238	27	0,300
			2,7	93	1,033	30	0,333	79	1,254	28	0,311
			3	92	1,022	30	0,333	79	1,254	30	0,333
					1,006		**0,323**		**1,227**		**0,317**
		75	0	87	0,967	35	0,389	75	1,190	33	0,367
			0,3	89	0,989	34	0,378	75	1,190	35	0,389
			0,6	89	0,989	35	0,389	75	1,190	32	0,356
			0,9	90	1,000	38	0,422	72	1,143	35	0,389
			1,2	91	1,011	36	0,400	82	1,302	41	0,456
			1,5	91	1,011	43	0,478	75	1,190	26	0,289
			1,8	90	1,000	41	0,456	75	1,190	30	0,333
			2,1	91	1,011	36	0,400	75	1,190	30	0,333
			2,4	90	1,000	35	0,389	75	1,190	20	0,222
			2,7	91	1,011	35	0,389	75	1,190	30	0,333
			3	93	1,033	35	0,389	75	1,190	25	0,278
					1,002		**0,407**		**1,196**		**0,407**

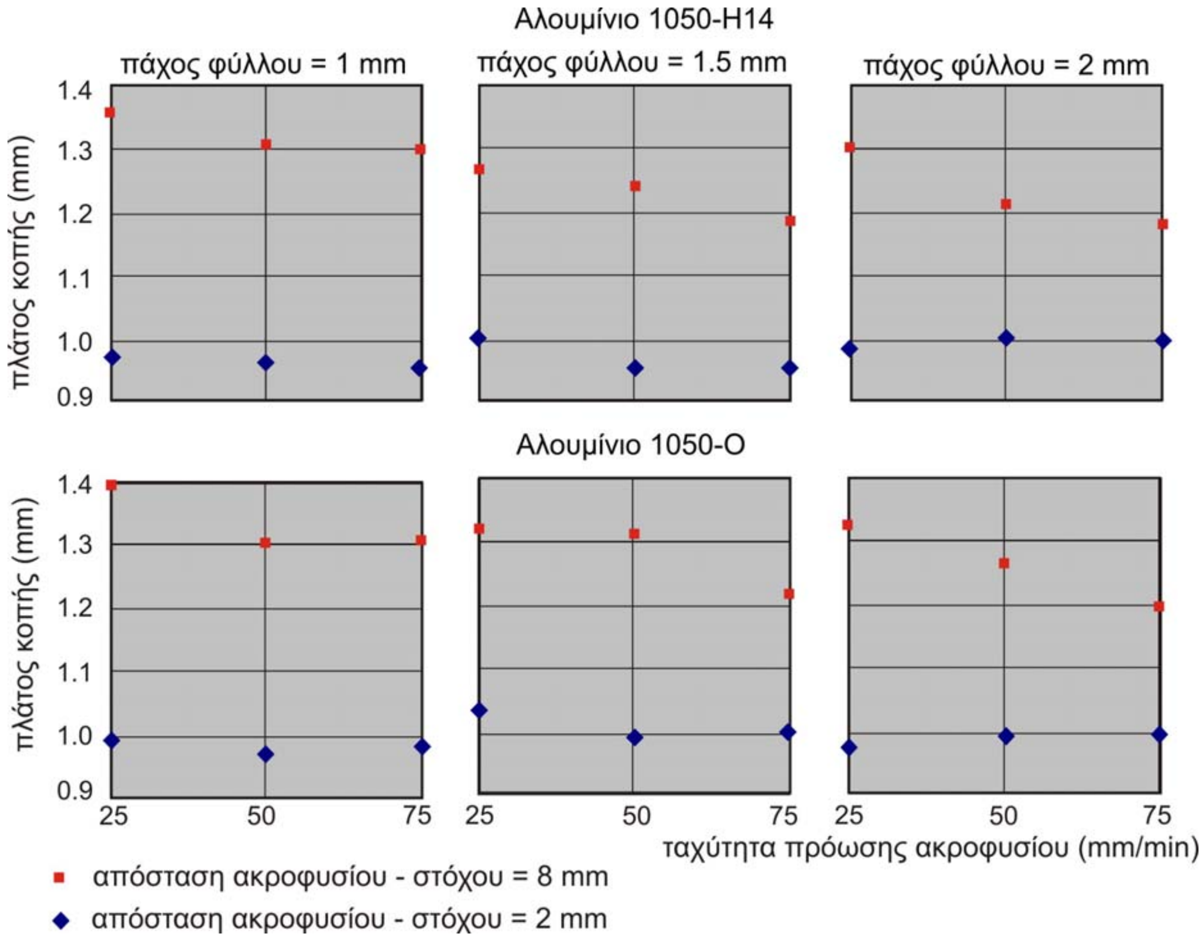
Σχήμα 5.12: Μετρήσεις για Aluminum 1050-H14 με πάχος 2 mm

Aluminum type	Aluminum sheet width (mm)	Feed Rate (mm/min)	AXIAL DISTANCE	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=2mm	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 63	TOP KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm sc 90	BOTTOM KERF WIDTH for Stand-off distance=8mm
H-0	2	25	0	90	1,000	28	0,311	80	1,270	30	0,333
			0,3	90	1,000	28	0,311	85	1,349	3024	33,600
			0,6	88	0,978	24	0,267	85	1,349	25	0,278
			0,9	88	0,978	15	0,167	85	1,349	20	0,222
			1,2	88	0,978	23	0,256	85	1,349	20	0,222
			1,5	88	0,978	22	0,244	81	1,286	20	0,222
			1,8	90	1,000	24	0,267	83	1,317	24	0,267
			2,1	88	0,978	27	0,300	85	1,349	25	0,278
			2,4	87	0,967	24	0,267	83	1,317	27	0,300
			2,7	88	0,978	25	0,278	85	1,349	27	0,300
			3	89	0,989	22	0,244	84	1,333	28	0,311
					0,984		**0,265**		**1,329**		**3,303**
		50	0	90	1,000	35	0,389	70	1,111	15	0,167
			0,3	90	1,000	25	0,278	79	1,254	17	0,189
			0,6	89	0,989	25	0,278	80	1,270	33	0,367
			0,9	90	1,000	25	0,278	80	1,270	32	0,356
			1,2	90	1,000	30	0,333	80	1,270	30	0,333
			1,5	90	1,000	32	0,356	80	1,270	32	0,356
			1,8	90	1,000	25	0,278	80	1,270	31	0,344
			2,1	90	1,000	27	0,300	82	1,302	32	0,356
			2,4	90	1,000	17	0,189	83	1,317	30	0,333
			2,7	90	1,000	28	0,311	82	1,302	25	0,278
			3	91	1,011	35	0,389	82	1,302	27	0,300
					1,000		**0,307**		**1,267**		**0,307**
		75	0	91	1,011	40	0,444	73	1,159	30	0,333
			0,3	90	1,000	43	0,478	74	1,175	25	0,278
			0,6	90	1,000	32	0,356	74	1,175	31	0,344
			0,9	90	1,000	37	0,411	74	1,175	31	0,344
			1,2	90	1,000	37	0,411	74	1,175	33	0,367
			1,5	90	1,000	22	0,244	75	1,190	25	0,278
			1,8	87	0,967	30	0,333	80	1,270	30	0,333
			2,1	90	1,000	40	0,444	79	1,254	25	0,278
			2,4	90	1,000	34	0,378	78	1,238	30	0,333
			2,7	90	1,000	30	0,333	76	1,206	25	0,278
			3	90	1,000	40	0,444	75	1,190	25	0,278
					0,998		**0,389**		**1,201**		**0,313**

Σχήμα 5.13: Μετρήσεις για Aluminum 1050-O με πάχος 2 mm

5.5 Πειραματικά Αποτελέσματα

Τα πειραματικά αποτελέσματα απεικονίζονται στις γραφικές παραστάσεις που ακολουθούν.



Σχήμα 5.14: Επίδραση της απόστασης από το στόχο στο πλάτος κοπής

Στα έξι (6) παραπάνω διαγράμματα του σχήματος 5.14, παρατηρείται η μεταβολή του πλάτους κοπής συναρτήσει της ταχύτητας πρόωσης του ακροφυσίου για τις τρεις περιπτώσεις πάχους φύλλου αλουμινίου και τους δύο διαφορετικούς τύπους αλουμινίου.

Το πλάτος κοπής σύμφωνα με τα σχήμα 5.14:

a) Αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης ακροφυσίου-στόχου (το πλάτος κοπής έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή για απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 8 mm, σε σχέση με την τιμή που έχει για απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 2 mm).

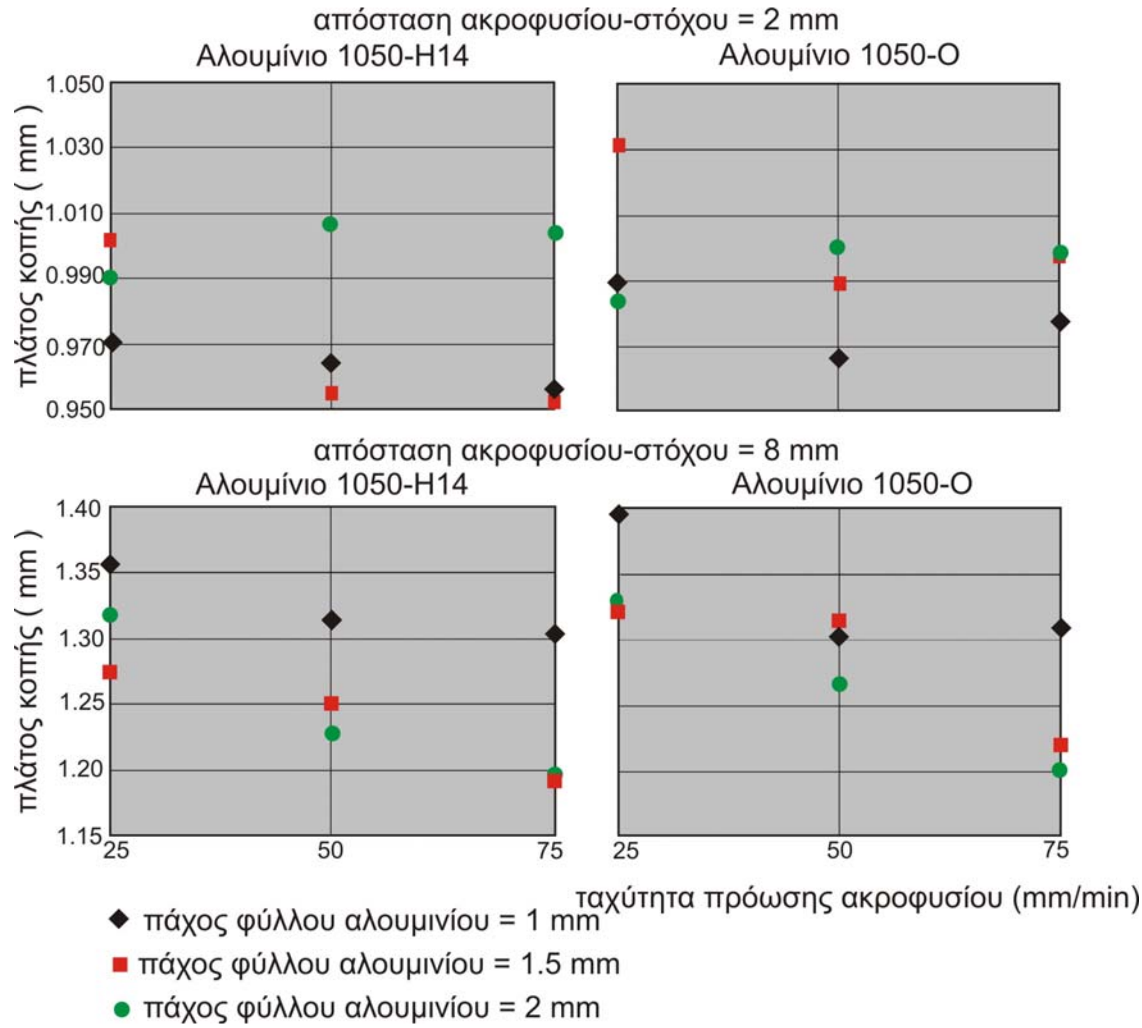
   Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει και η μελέτη των σχημάτων 4.14-4.16 όπως έχει ήδη αναφερθεί στην αντίστοιχη παράγραφο 4.2.2. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα επαληθεύουν έστω ποιοτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κοπής WJ σε ακίνητο στόχο όπως παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.2.2.

b) Μειώνεται με την αύξηση του πάχους του στόχου για μεγάλες τιμές απόστασης ακροφυσίου-στόχου, γεγονός το οποίο επίσης επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης (σχήμα 4.15).

c) Δε μεταβάλλεται για μικρές τιμές απόστασης ακροφυσίου-στόχου, όπως συμβαίνει και στην προσομοίωση με κινούμενο στόχο. Το πείραμα στην περίπτωση αυτή επιβεβαιώνει ότι για μικρές τιμές απόστασης ακροφυσίου-στόχου η πρόωση δεν έχει μεγάλη επίδραση στα αποτελέσματα του πλάτους κοπής και συνεπώς είναι αρκετά ικανή η προσέγγιση της επίλυσης της κοπής μέσω διαδοχικών στατικών προβλημάτων.

d) Αυξάνεται για πιο μαλακό υλικό όπως είναι αναμενόμενο.

Στο πάνω μέρος του σχήματος 5.15 γίνεται αντιληπτή η επίδραση της ταχύτητας πρόωσης του στόχου στο πλάτος κοπής για απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 2 mm. Γενικά το πλάτος κοπής φαίνεται να ακολουθεί φθίνουσα πορεία σε σχέση με την αύξηση της ταχύτητας πρόωσης του ακροφυσίου, με εξαίρεση τις τιμές που αντιστοιχούν στο πάχος φύλλου αλουμινίου ίσο με 2 mm, όπου παρατηρείται μια ελάχιστη αύξηση του πλάτους κοπής. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απόλυτα λογικό και αναμενόμενο εφόσον καθώς αυξάνεται η ταχύτητα πρόωσης στο ακροφύσιο, ο χρόνος κοπής μειώνεται και συνεπώς το πλάτος κοπής του αυλακιού που δημιουργείται δεν προλαβαίνει να αυξηθεί όσο με μικρότερη ταχύτητα πρόωσης.

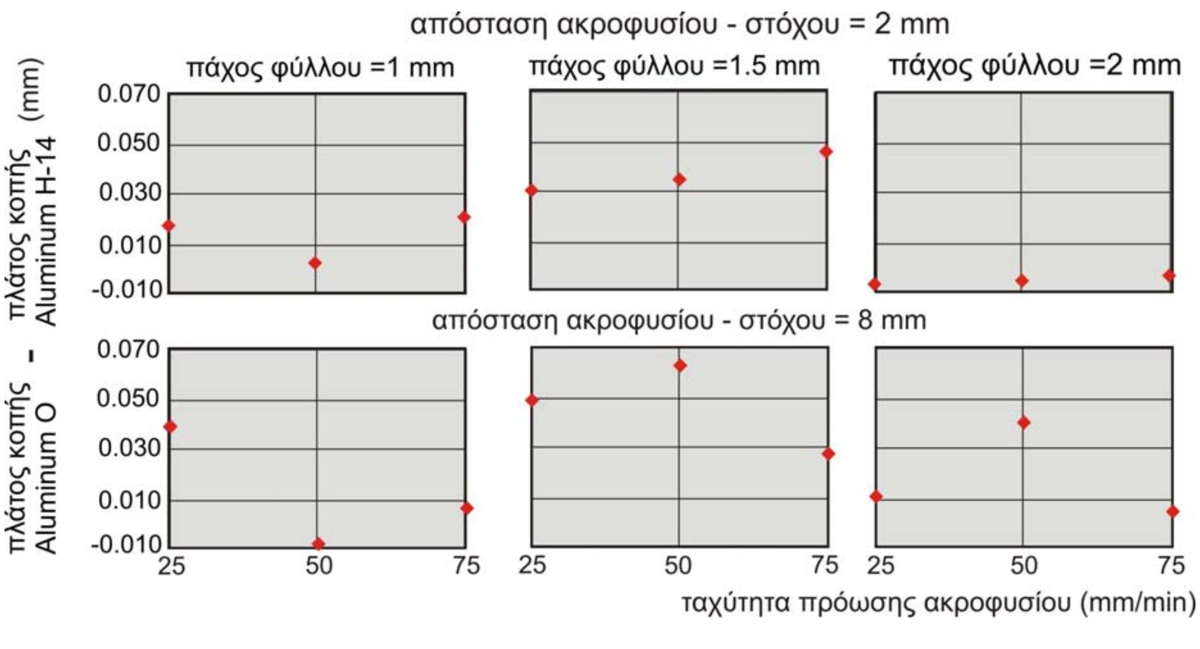


Σχήμα 5.15: Επίδραση της πρόωσης στο πλάτος κοπής για απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 2 mm και με 8 mm

Στο κάτω μέρος του σχήματος 5.15 παριστάνεται η αντίστοιχη επίδραση της ταχύτητας πρόωσης του στόχου στο πλάτος κοπής για απόσταση ακροφυσίου-στόχου ίση με 8 mm. Γενικά, για όλα τα πάχη φύλλου αλουμινίου, το πλάτος κοπής φαίνεται να ακολουθεί μια φθίνουσα πορεία σε σχέση με την αύξηση της ταχύτητας πρόωσης του ακροφυσίου, όπως είναι αναμενόμενο σύμφωνα με την παρατήρηση για το πάνω μέρος του σχήματος 5.15.

Στο σχήμα 5.16 γίνεται αντιληπτή η επίδραση του υλικού του στόχου στο πλάτος κοπής. Στον κατακόρυφο άξονα των διαγραμμάτων στο σχήμα 5.16, έχει επιλεγεί να κατανεμηθούν οι τιμές της διαφοράς του πλάτους κοπής που αντιστοιχεί στο αλουμίνιο 1050-O, μείον το πλάτος κοπής που αντιστοιχεί στο αλουμίνιο 1050-H14. Η μεταβολή της διαφοράς αυτής των πλατών κοπής δεν αναδεικνύει κάποια πιο συγκεκριμένη συμπεριφορά του πλάτους κοπής πέρα από το γεγονός ότι αυτή η διαφορά είναι σχεδόν πάντα θετική. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι στην περίπτωση κοπής με WJ στόχων από δύο διαφορετικούς τύπους αλουμινίου, το πλάτος κοπής θα έχει φανερά μεγαλύτερη τιμή για το στόχο που αποτελείται από το μαλακότερο τύπο υλικού (στην περίπτωση που μελετάται είναι το αλουμίνιο 1050-O).

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει και η μελέτη των σχημάτων 4.14-4.16 όπως έχει ήδη αναφερθεί στην αντίστοιχη παράγραφο 4.2.2. Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι τα πειραματικά αποτελέσματα επαληθεύουν έστω ποιοτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κοπής WJ σε ακίνητο στόχο όπως παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.2.2.



Σχήμα 5.16: Επίδραση του υλικού στο πλάτος κοπής

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

Στη διατριβή αυτή μελετήθηκαν προβλήματα που σχετίζονται με τις διαδικασίες κοπής και καθαρισμού με χρήση δέσμης καθαρού νερού ή με πρόσκρουση λειαντικών κόκκων πάνω σε στόχο. Τα βασικά συμπεράσματα της διατριβής – σε αντιστοιχία με τους στόχους που τέθηκαν στο Κεφάλαιο 2 “Στάθμη των Γνώσεων” – σχετίζονται με τα μοντέλα προσομοίωσης που αναπτύχθηκαν, και είναι:

1. Στο πρώτο μοντέλο προσομοίωσης μελετώνται οι διαδικασίες κοπής και καθαρισμού με χρήση δέσμης καθαρού νερού επί ακίνητου στόχου. Η ταχύτητα του νερού θεωρείται γνωστή και προκαθορισμένη, μόνο κατά τη φάση εισόδου του νερού στο ακροφύσιο. Η ροή του νερού εντός του ακροφυσίου μελετάται διεξοδικά, καθώς το προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης (πεπερασμένων στοιχείων) μοντελοποιεί με αυξημένη ακρίβεια τη ροή του ρευστού (νερού) στο εσωτερικό του ακροφυσίου. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας μοντελοποίησης της προαναφερθείσας ροής, οδηγεί στον επακριβή υπολογισμό της κατανομής ταχυτήτων του νερού κατά την έξοδό του από το ακροφύσιο. Η επίδραση του αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ εξερχόμενης ροής και στόχου, λαμβάνεται επίσης υπόψη στο μοντέλο προσομοίωσης, καθιστώντας την παρεχόμενη επίλυση ιδιαιτέρως ακριβή, παρακάμπτοντας τις όποιες αδυναμίες και προσεγγιστικές παραδοχές προηγούμενων μελετών (Mabrouki *et al* /117/ και Mabrouki και Raissi /119/).

    1α. Το προτεινόμενο μοντέλο προσομοίωσης παρέχει τη δυνατότητα πλήρους μοντελοποίησης της ροής εντός του ακροφυσίου. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης καταδεικνύουν την αναγκαιότητα αναλυτικής μελέτης της αναπτυσσόμενης ροής, καθώς η κατανομή ταχυτήτων μεταβάλλεται σημαντικά κατά την ανάπτυξη της ροής. Στην έξοδο του ακροφυσίου η κατανομή ταχυτήτων υπολογίζεται επακριβώς, σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες που θεωρούσαν ομοιόμορφη κατανομή, Mabrouki *et al* /117/ και Mabrouki και Raissi /119/.

    Η υπολογισθείσα τιμή της ταχύτητας του νερού στο μέσον του προφίλ και η εξέλιξή της κατά μήκος του ακροφυσίου, επαληθεύονται από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο βιβλίο των Momber και Kovacevic /124/ όπου η ταχύτητα εισόδου (100 m/sec) και η γεωμετρία του ακροφυσίου είναι κοινές με την παρούσα μελέτη. Η ταχύτητα αυτή δεκαπλασιάζεται – όπως αναμένετο βάσει της γεωμετρίας – μετά τη διέλευση από το τμήμα επιτάχυνσης του ακροφυσίου.

    1β. Η επακριβής μελέτη της ροής στο τμήμα του αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ ακροφυσίου – στόχου, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η δέσμη νερού μετά την έξοδό της από το ακροφύσιο, επηρεάζεται από τον αέρα. Συγκεκριμένα, η δέσμη νερού παρουσιάζεται να διαχέεται ελαφρώς. Μετά την πρόσκρουση του νερού με το στόχο, η ταχύτητά του μειώνεται καθώς ο αέρας λειτουργεί ως “στόχος” με πολύ χαμηλή πυκνότητα. Η παρούσα προσομοίωση μελετά επακριβώς την εξέλιξη της ροής στο διάστημα μεταξύ ακροφυσίου στόχου, σε αντίθεση με προηγούμενες μελέτες όπου μείωσαν το μεσοδιάστημα – αγνοώντας την επίδρασή του – για λόγους μείωσης του υπολογιστικού φορτίου, Mabrouki *et al* /117/.

1.γ Η μελέτη κατανομής των τάσεων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι μέγιστες τάσεις αναπτύσσονται στο εσωτερικό τμήμα του στόχου. Αντιθέτως, όπως είναι αναμενόμενο, οι τάσεις πολύ κοντά στην επιφάνεια αλλά και σε μεγάλες αποστάσεις από αυτήν, είναι μικρότερες. Από το γράφημα της χρονικής εξέλιξης των αναπτυσσόμενων τάσεων von-Mises, διαφαίνεται ότι οι τάσεις εξαπλώνονται στο στόχο, ενώ η μέγιστη τιμή τους μειώνεται έως τη σταθεροποίησή της γύρω από μια τελική τιμή.

1δ. Κατά τη μοντελοποίηση και προσομοίωση της διαδικασίας διάβρωσης στόχου με επικάλυψη (καθαρισμός – αφαίρεση επικάλυψης), μελετήθηκε η εξέλιξη των αφαιρούμενων στοιχείων της επίστρωσης. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης ευρέθησαν σε πλήρη συμφωνία με αυτά των Mabrouki *et al* /117/.

2. Στο δεύτερο μοντέλο επιχειρήθηκε – για πρώτη φορά στη διεθνή βιβλιογραφία – η προσομοίωση της διαδικασίας κοπής με δέσμη καθαρού νερού επί κινούμενου στόχου υπό πραγματικές συνθήκες κοπής (για λόγους σύγκρισης οι συνθήκες κοπής ελήφθησαν πανομοιότυπες με αυτές των πειραμάτων που διεξήχθησαν στην Ελληνική εταιρεία υδροκοπής «HYDROCUT»). Παρόμοια διαδικασία κοπής έχει επιχειρηθεί στο παρελθόν να προσομοιωθεί (Mabrouki *et al* /117/), με τη διαφορά ότι στη συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν αντισυμβατικές συνθήκες κοπής (πολύ υψηλή ταχύτητα πρόωσης), με στόχο τη μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Αντίθετα, στην παρούσα μελέτη όπου χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές συνθήκες κοπής (ρεαλιστική τιμή ταχύτητας πρόωσης), η διαδικασία επίλυσης απεδείχθη ιδιαιτέρως χρονοβόρα, καθώς για την περίπτωση ενός μοντέλου προσομοίωσης με αρκετά αραιή διακριτοποίηση σε PC με μονό ή με διπλό επεξεργαστή (Pentium στα 2.6 GHz), διήρκεσε μήνες. Η επίλυση του ίδιου μοντέλου σε σύστημα με παράλληλη επεξεργασία διήρκεσε μόνο μερικές ημέρες.

   Το βασικό πρόβλημα που αρχικά εμπόδισε την επίλυση σε σύστημα υπολογιστών με παράλληλη επεξεργασία (cluster system), ήταν το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων το οποίο απεδείχθη ανεπαρκές. Συγκεκριμένα, το λογισμικό LS-Dyna αντιμετώπισε επιτυχώς σε σειριακή επεξεργασία όλα τα προβλήματα στα οποία κρίθηκε αναγκαία η χρήση της μεθόδου ALE, ενώ αντίθετα στην περίπτωση της παράλληλης επεξεργασίας εμφάνισε πολλές σοβαρές δυσλειτουργίες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν επόμενες δοκιμαστικές εκδόσεις του κώδικα LS-Dyna, όπως αυτός διαμορφώθηκε σε συνεργασία με την εταιρεία που προμήθευσε το λογισμικό. Οι περισσότερες από τις εκδόσεις αυτές παρουσίασαν ελαττώματα που δεν επέτρεπαν την επίλυση προβλημάτων που απαιτούσαν τη χρήση της μεθόδου ALE. Έτσι, μετά από αλλεπάλληλες προσπάθειες προτάθηκε από την εταιρεία που προμήθευσε το λογισμικό, η αντικατάσταση της διεπαφής ανταλλαγής μηνυμάτων MPI (Message Passing Interface) που χρησιμοποιούνταν έως τότε (LAM-MPI), με νέα διεπαφή HP-MPI και η χρήση της αντίστοιχης νέας έκδοσης του LS-Dyna. Μετά από αυτές τις τροποποιήσεις, η επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης κατέστη τελικά δυνατή σε σύστημα υπολογιστών με παράλληλη επεξεργασία.

Ακόμα όμως και με τη χρήση υπολογιστών παράλληλης επεξεργασίας (δύο τετραπλοί επεξεργαστές αρχιτεκτονικής AMD Opteron), η επίλυση αποδείχτηκε ιδιαίτερα χρονοβόρα (αρκετές μέρες). Ενδεικτικές προσομοιώσεις (με σχετικά αραιή διακριτοποίηση) σε κινούμενο στόχο αλουμινίου 1050-H14 και 1050-O, έδειξαν ελαφρώς μεγαλύτερο πλάτος κοπής για το πιο μαλακό υλικό (1050-O). Η διεξαγωγή επιπλέον συμπερασμάτων κρίθηκε σχετικά επίφοβη, κυρίως λόγω της αραιής διακριτοποίησης.

Η απαιτούμενη πυκνή διακριτοποίηση για την ακριβή εξαγωγή αποτελεσμάτων, κατέστη πρακτικά αδύνατη λόγω του αναμενόμενου υπερβολικού υπολογιστικού φορτίου. Οι ανωτέρω ενδεικτικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι το πλάτος κοπής δε διαφέρει σημαντικά από την περίπτωση ακίνητου στόχου, η οποία μελετήθηκε στη συνέχεια. Διερευνήθηκαν το πλάτος κοπής συναρτήσει του υλικού, του πάχους και της απόστασης του στόχου. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης επαληθεύονται τουλάχιστον ποιοτικά από τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

2α. Η επιλεγείσα διακριτοποίηση ήταν ιδιαιτέρως πυκνή, χωρίς ταυτόχρονη επιβάρυνση στον υπολογιστικό χρόνο, όπως έχει ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 3.3.2. Η λεπτομερής διερεύνηση της επίδρασης του υλικού, του πάχους και της απόστασης του στόχου, κατέστη δυνατή.

2β. Το πλάτος κοπής παρατηρήθηκε ότι αυξάνεται καθώς:
- Μειώνεται η σκληρότητα του κατεργαζόμενου υλικού
- Αυξάνεται η απόσταση ακροφυσίου στόχου
- Αυξάνεται το πάχος του υλικού-στόχου

Καθώς η τεχνολογία των υπολογιστών παράλληλης επεξεργασίας εξελίσσεται, μια μελλοντική προσέγγιση του προβλήματος κοπής σε κινούμενο στόχο (με αρκετά πυκνή διακριτοποίηση) θα ήταν σκόπιμη εφόσον διατίθενται περισσότερες μονάδες παράλληλης επεξεργασίας (προς το παρόν η διαθεσιμότητα υπολογιστικών πόρων ανέρχεται σε οχτώ μονάδες με τετραπλούς επεξεργαστές).

3. Όσον αφορά το τρίτο μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας κοπής με πρόσκρουση λειαντικών κόκκων σε ακίνητο στόχο, αυτό αποτελεί σημαντική επέκταση και βελτίωση του μοντέλου των M. Junkar *et al,* στο οποίο και βασίζεται. Η διαδικασία διάβρωσης με AWJ προσεγγίζεται με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια στο προτεινόμενο μοντέλο, καθώς σε αυτό συμμετέχει ικανός αριθμός λειαντικών κόκκων.

3α. Σκοπός της μελέτης ήταν να βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός σωματιδίων που προσπίπτουν στο στόχο, έως την επίτευξη της σταθεροποίησης της μορφής του κρατήρα ώστε να μην επιβαρύνεται η λύση με πλεονάζων υπολογιστικό κόστος. Ορίστηκε το μέγεθος της επιφανειακής κυκλικότητας, ως η τιμή της κυκλικότητας στην ανώτερη επιφάνεια του κρατήρα. Από τη γραφική παράσταση της επιφανειακής κυκλικότητας ανά πρόσκρουση σωματιδίου, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η επιφανειακή κυκλικότητα μεταβάλλεται σημαντικά, ιδιαίτερα στα πρώτα στάδια της διαδικασίας. Από τη μελέτη αυτή κατέστη σαφές ότι η επιφανειακή κυκλικότητα μειώνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των σωματιδίων, ενώ σταθεροποιείται έπειτα από την πρόσπτωση του δέκατου πέμπτου κόκκου περίπου.

3β. Η παρούσα μελέτη υπερέχει σημαντικά – ως προς την ακρίβεια υπολογισμού της επιφανειακής κυκλικότητας – σε σχέση με τα αποτελέσματα των Junkar *et al.* /121/ που μελέτησαν την επίδραση ενός μόνο κόκκου και υπολόγισαν (μέσω προσομοίωσης) επιφανειακή κυκλικότητα που παρουσίασε μεγάλη απόκλιση από την τιμή της κυκλικότητας που μέτρησαν οι ίδιοι (μέσω πειράματος). Επίσης, η μελέτη της καμπύλης εξέλιξης της επιφανειακής κυκλικότητας όπως αυτή υπολογίστηκε βάσει του προτεινόμενου μοντέλου, έδειξε ότι συγκλίνει σε τιμή που προσεγγίζει αρκετά την πειραματική τιμή.

3γ. Για πρώτη φορά επιχειρήθηκε η μέτρηση της κυκλικότητας στο εσωτερικό του κρατήρα και η μελέτη της κυκλικότητας σε σχέση με το βάθος κοπής.

Στο παρόν μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων θεωρήθηκε σκόπιμο οι προσπίπτοντες κόκκοι να μοντελοποιηθούν ως άκαμπτα σφαιρίδια (για λόγους σύγκρισης με το ήδη δημοσιευμένο μοντέλο των M. Junkar *et al.* Η ιδιότητα της ακαμψίας συνεπάγεται μηδενικές τάσεις και παραμορφώσεις για τους κόκκους. Έτσι, το μοντέλο επιδέχεται μελλοντικές βελτιώσεις με στόχο να συμπεριληφθεί η πραγματική ελαστοπλαστική συμπεριφορά των κόκκων, η τυχαιότητα της γεωμετρίας τους, η τυχαιότητα της θέσης των κόκκων εντός της διατομής της δέσμης νερού, κ.λπ.. Στην παράγραφο 4.3.3. παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα προσομοίωσης του ίδιου μοντέλου θεωρώντας όμως ελαστοπλαστική συμπεριφορά για τους κόκκους. Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά, καθώς από την πρόσκρουση του πρώτου κιόλας κόκκου (αποτελούμενου από ελαστο-πλαστικό υλικό) η τιμή της επιφανειακής κυκλικότητας φάνηκε να προσεγγίζει ακόμα περισσότερο την αντίστοιχη πειραματική τιμή.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Maniadaki K., Nikolopoulos L.A.A., Lambropoulos P., "One and two –photon detachment cross-sections of Ps−", *European Physical Journal D*, Vol. 20, pp. 205-209, 2002.
2. Maniadaki K., Kestis Th., Bilalis N., Antoniadis A., "A Finite Element based model for Pure Waterjet Process Simulation", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 31, No. 9-10, pp. 933-940(8), 2007.
3. Maniadaki K., Antoniadis A., Bilalis N., "Effect of impact angle and velocity in crater circularity in Abrasive Water Jet Machining", *Int. J. Machining and Machinability of Materials, (submitted for publication, 2009).*
4. Maniadaki K., Kestis Th., Antoniadis A., Bilalis N., Marioli-Riga Z., "Optimization of Pure Water Jet Process Parameters using FE Modelling", *2nd International Conference "From Scientific Computing to Computational Engineering*, Athens, 5-8 July, 2006.
5. Piek J., Wille C., Warzok R. and Gaab M.R., "Waterjet dissection of the brain: experimental and first clinical results", *J Neurosurg,* Vol. 89, No. 5, pp. 861-864, 1998.
6. Oertel J., Gaab M.R., Warzok R. and Piek J., " Waterjet dissection in the brain: review of the experimental and clinical data with special reference to meningioma surgery", *Neurosurg Rev,* Vol. 26, pp. 168-174, 2003.
7. Hashish M., "Prediction Models for AWJ Machining Operations," *Proccedings. of 7th American Waterjet Conference*, pp. 205-216, 1993.
8. Zeng J. and Kim T. J., "An Erosion Model of Polycrystalline Ceramics in Abrasive Waterjet Cutting", *Wear*, Vol. 193, pp. 207–217, 1996.
9. Zeng J. and Kim T. J., "An Erosion Model for Abrasive Waterjet Milling of Polycrystalline Ceramics", *Wear*, Vol. 199, pp. 275–282, 1996.
10. Momber A. W. and Kovacevic R., "Statistical Character of the Failure of Multiphase Materials due to High Pressure Waterjet Impingement", *International Journal of Fracture*, Vol. 71, pp. 1-14, 1995.
11. Momber A. W., Kovacevic R., Pfeiffer D. and Schunemann R., "The Influence of Abrasive Grain Size Distribution Parameters on the Abrasive Waterjet Machining Process," *NAMRIISME Transactions,* NAMRC XXIV, pp. 21-24, 1996.
12. Momber A. W., Kwak, H. and Kovacevic R., "Investigations in Abrasive Waterjet Erosion Based on Wear Particle Analysis", ASME *Journal of Tribology*, Vol. 118, pp. 759-766, 1996.
13. Finnie L, "The Mechanism of Erosion of Ductile Metals", *ASME Proceedings of 3rd National Congress on Applied Mechanics*, 1958.
14. Bitter J. G. A., "A Study of Erosion Phenomena: Part I" *Wear*, Vol.6, pp.5-21, 1963.
15. Hashish, M., "Material Properties in Abrasive Waterjet Machining", *ASME Journal of engineering for industry,* Vol. 17, pp. 578-583, 1995.
16. Raju S. P. and Ramulu, M., "Prediction of Hydro-Abrasive Erosive Wear During Abrasive Waterjet Cutting-Part 1: A Mechanistic Formulation and its Solution", *Manufacturing Science and Engineering, ASME PED,* Vol. 68, 1994.
17. Raju, S. P. and Ramulu M., "Prediction of Hydro-Abrasive Erosive Wear During Abrasive Waterjet Cutting-Part II: An Experimental Study and Model Verification", *Manufacturing Science and Engineering, ASME PED*, Vol. 68, 1994.
18. Momber A. W. and Kovacevic R., "Secondary Fragmentation in Waterjet Cutting of Brittle Multiphase Materials", *Waterjet Cutting Technology, ed. Allen, N. G., Mechanical Engineering Publications Ltd. London, England,* pp. 139-150, 1994.

19. Momber A. W., Eusch L and Kovacevic R., "Cutting Refractory Ceramics with Abrasive Waterjets-A Preliminary Investigation", *Proceedings of 8th American Waterjet Conference,* Houston, pp. 229-244, 1995.
20. Yong Z. and Kovacevic R., "Simulation of Effects of Water-Mixture Film on Impact Contact in Abrasive Waterjet Machining", *The International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 39, No. 6, pp. 729-739, 1997.
21. Momber A. W. and Kovacevic R., "Quantification of Energy Absorption Capability in Abrasive Waterjet Machining", *Proceedings of Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 209, 1995.
22. Momber A. W. and Kovacevic R., "Calculation of Exit Jet Energy in Abrasive Waterjet Cutting", *Manufacturing Science and Engineering, ASME PED,* Vol. 68, pp. 361-366.
23. Momber A. W., Kovacevic R., Kwak H. and Mohan R., "Experimental Estimation of Energy Dissipative Processes in Workpieces During Abrasive Waterjet Cutting", *Proceedings of 8th American Waterjet Conference,* Houston, pp. 187-206*,* 1995.
24. Hashish M., "Characteristics of Surfaces Machined with Abrasive Waterjets", *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 113, pp. 354-362, 1991.
25. Hashish M., "On the Modeling of Surface Waviness Produced by Abrasive Waterjets", *Proceedings of 11th International Conference on Jet Cutting Technology,* St. Andrews, Scotland*,* pp. 17-34, 1992.
26. Chao J., Zhou G., Lxu M.C. and Geskin E., "Characteristics of Abrasive Waterjet Generated Surfaces and Effects of Cutting Parameters and Structure Vibration", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 117, pp. 516-525, 1995.
27. Wood R.J.K., Mellor B.G. and Binfield M.L., "Sand erosion performance of detonation gun applied tungsten carbide/cobalt-chromium coatings", *Wear*, Vol. 211, pp. 70-83, 1997.
28. Raju S. P and Ramulu M., "A Transient Model for Material Removal in the Abrasive Waterjet Machining Process", *Proc. of 7th American Waterjet Conference,* Seattle, pp.141-155*,* 1993.
29. Arola D. and Ramulu M., "Micromechanisms of Material Removal in Abrasive Waterjet Machining", *Processing of Advanced Materials*, Vol. 4, No. I, pp. 37-47, 1994.
30. Yong Z. and Kovacevic R., "Fundamentals of Constructing Particle-Laden Flow by Fractal Point Sets and Predicting 3D Solid Erosion Rates", *The International Journal of Chaos, Solitons, & Fractals*, Vol. 8, No. 2, pp. 207-220, 1997.
31. Kovacevic R., Mohan R. and Zhang Y. M., "Cutting Force Dynamics as a Tool for Surface Profile Monitoring in AWJ", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 117, pp. 340-350, 1995.
32. Kovacevic R. and Beardsley, H. E., "On-Line Monitoring the Quality of the Surface Cut by the Abrasive Waterjet", *MR90-535, Proceedings of 4th International Grinding Conference,* Dearbom, pp. 9-11, 1990.
33. Kwak H., Kovacevic R. and Mohan R., "Monitoring of AWJ Drilling of Ceramics Using AE Sensing Technique", *accepted for 13rh International Conference on Jetting Technology,* Sardinia, Italy, 1996.
34. Yeh H., Wang F. X. and Ramulu M., "An Optical Investigation on the Abrasive Waterjet Penetration Process", *Proceedings. Of the 7th American Water Jet Conference,* Seattle*, WA*, pp. 65-70, 1993.
35. Ramulu M., "Dynamic Photoelastic Investigation on the Mechanics of Waterjet and Abrasive Waterjet Machining", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 43-65, 1993.

36. Kovacevic R., "Monitoring the Depth of Abrasive Waterjet Penetration", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 32, No. 5, pp. 725-736, 1992.
37. Mohan R., Momber A. W. and Kovacevic R., "On-line Monitoring of Depth of AWJ Penetration Using Acoustic Emission Technique", *Waterjet Cutting Technology, N. G. Allen, ed., Mechanical Engineering Publications Ltd., London, England*, pp. 649-664, 1994.
38. Ohadi M. M., Ansari A. L and Hashish M., "Thermal Energy Distributions in the Workpiece During Cutting with an Abrasive Waterjet", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 714, pp. 67-73, 1992.
39. Kovacevic R., Mohan R. and Beardsley H. E., "Monitoring of Thermal Energy Distribution in Abrasive Waterjet Cutting using Infrared Thermography", *ASME Journal of manufacture Science and engineering*, Vol. 118, No. 4, pp. 555-563, 1996.
40. Zibbell R. and Ness E., "Abrasion and erosion of hard materials related to wear in the abrasive waterjet ", *Wear*, Vol. 196, No. 1, pp. 120-125(6), 1996.
41. Hashish M., "Observations of wear of abrasive-waterjet nozzle materials", *Journal of Tribology,* Vol. 116, pp. 439–444, 1994.
42. Kovacevic R., Wang L. Q. and Zhang Y. M., "Identification of abrasive waterjet nozzle wear based on parametric spectrum estimation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 208, pp. 173-181, 1994.
43. Kovacevic R., Wang L. and Zhang Y.M., "Identification of abrasive waterjet nozzle wear based on parametric spectrum estimation of acoustic signal", *Part B, Journal of Engineering Manufacture,* Vol. 208, pp. 173-181.
44. Kovacevic R. and Evizi M., "Nozzle Wear Detection in Abrasive Waterjet Cutting Systems", *Materials Evaluation*, Vol. 48, pp. 348-353, 1990.
45. Kovacevic R., "Sensing the Abrasive Waterjet Nozzle Wear", *International Journal of Waterjet Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-10, 1994.
46. Kovacevic R., "Development of an Opto-Electric Sensing System to Monitor the Abrasive Waterjet Nozzle Wear", *Sensors, Controls, and Quality Issues in Manufacturing*, pp. 73-81, 1991.
47. Kovacevic R., Wang L. and Zhang Y. M., "Detection of Abrasive Waterjet Nozzle Wear Using Acoustic Signature Analysis", *Proceedings of 7th American Waterjet Conference*, Seattle, pp. 217-231, 1993.
48. Kovacevic R. and Zhang Y. M., "On-line Fuzzy Recognition of Abrasive Waterjet Nozzle Wear", *Jet Cutting Technology, ed. A. Lichtarowicz, Kluwer Academic, Boston*, pp. 329-345, 1993.
49. Mohan R., Kovacevic R. and Damarla T. R., "Real-Time Monitoring of AWJ Nozzle Wear Using Artificial Neural Network", *NAMRIISME Transactions, NAMRC XXII*, pp. 253-258, 1994.
50. Kim T. J. and Constantino H., "Effect of Nozzle Length on Performance and Wear in Abrasive Waterjet Systems", *Proceendings of 4th PRIC-WJT*, pp. 491-502, 1995.
51. Kovacevic R., Mohan R. and Zhang Y. M., "Stochastic Modeling of Surface Texture Generated by High-Energy Jets", *Proceedings. of Instn. Mech. Engrs, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 207, pp. 129-140, 1993.
52. Kovacevic R., Mohan R. and Hirscher J., "Rehabilitation of Concrete Pavement Assisted with Abrasive Waterjets", *Jet Cutting Technology, A. Lichtarowicz, ed., Kluwer Academic, Boston*, pp. 425-442, 1992.
53. Arola D. and Ramulu M., "Material removal in abrasive waterjet machining of metals: A residual stress analysis", *Wear,* Vol. 211, No. 2, pp. 302-310, 1997.

54. Arola D. and Ramulu M., "Material removal in abrasive waterjet machining of metals. Surface integrity and texture", Wear, Vol. 210, No. 1, pp. 50-58(9), 1997.
55. Ramulu M. and Arola D., "The influence of abrasive waterjet cutting conditions on the surface quality of graphite/epoxy laminates", *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 34, No. 3, pp. 295, 1994.
56. Kovacevic R., Cherukuthota C. and Mohan R., "Improving milling performance with high pressure waterjet assisted cooling/lubrication", *Journal of engineering for industry*, Vol. 117, No. 3, pp. 331-339, 1995.
57. Zhou G., Leu M. and Blackmore D., "Fractal geometry modelling with applications in surface characterisation and wear prediction", *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 35, No.2, pp. 203-209, 1995.
58. Crafoord R., Kaminski J, Lagerberg S., Ljungkrona O. and Wretland A. "Chip Control in Tube Turning using a High-Pressure Water jet", *Proceedings of the I MECH E, Part B, Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 213, No. 8, pp. 761-767, 1999.
59. Yong Z. and Kovacevic R., "Feedback Control of Chaotic Circular Point Sets with Arbitrary Velocity Profile", *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 8, No. 3, pp.313-326, 1997.
60. Chen F.L. and Siores E., "The effect of cutting jet variation on striation formation in abrasive water jet cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 41, No. 10, pp. 479-1486, 2001.
61. Chen F.L., Wang J., Lemma E. and Siores E., "Striation formation mechanisms on the jet cutting surface", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 141, No. 2, pp. 213-218, 2003.
62. Ruan D., Lu G., Chen F.L. and Siores E., "Compressive behaviour of aluminium foams at low and medium strain rates", *Composite Structures*, Vol. 57, No. 1-4, pp. 331-336, 2002.
63. Hashish M., "Development of an AWJ Deep Hole Drilling System for Metals", *Procceedings of 8th American Waterjet Conference*, Houston, pp. 377-388, 1995.
64. Ansari A.L. and Hashish M., "On the Modelling of Abrasive Waterjet Turning", *Jet Cutting Technology*, *A. Lichtarowicz, ed., Kluwer Academic, Boston*, pp. 555-576, 1992.
65. Sheridan M., Taggart D.G. and Kim T.J., "Screw Thread Machining of Composite Materials Using Abrasive Waterjet Cutting, "*Manufacturing Science and Engineering, ASME PED*, Vol. 68, pp. 421-432, 1994.
66. Sheridan M., Taggart D.G., Kim T.J. and Wen Y., "Microstructural and Mechanical Characterization of Threaded Composite Tubes Machined Using AWJ Cutting," *Proceedings of 8th American Waterjet Conference*, Houston, pp. 245-258, 1995.
67. Zeng J. and Kim T. J., "Development of an Abrasive Waterjet Kerf Cutting Model for Brittle Materials", *Jet Cutting Technology*, *A. Lichtarowicz, ed., Kluwer Academic, Boston*, pp. 483-501, 1992.
68. Zeng J. and Kim T.J., “Machinability of Engineering Materials in Abrasive Waterjet Machining," *International Journal of Waterjet Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 103-110, 1995.
69. Chung Y., Geskin E.S. and Singh P.J., "Prediction of the Geometry of the Kerf Created in the Course of Abrasive Waterjet Machining of Ductile Materials," *Jet Cutting Technology, ed. A. Lichtarowicz, Kluwer Academic, Boston,* pp. 525-535, 1992.
70. Momber A.W. and Kovacevic R., "Fracture of Brittle Multiphase Materials by High Energy Water Jets," *The Journal of Materials Science,* Vol. 31, pp. 1081-1085, 1996.

71. Kovacevic R. and Fang M., "Modeling of the Influence of the Abrasive Waterjet Cutting Parameters on the Depth of Cut Based on Fuzzy Rules," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 34, No. I, pp. 55-72, 1994.
72. Hashish M., "Three-Dimensional Machining with Abrasive Waterjets," *Waterjet Cutting Technology*, *ed. N. G. Allen, Mechanical Engineering Publications Ltd., London, England,* pp. 605-633, 1994.
73. Kovacevic R. and Yong Z., "Modeling of 3D Abrasive Waterjet Machining-Part I Theoretical Basis", *Jetting Technology*, *Institution of Mechanical Engineers, England*, pp. 73-82, 1996.
74. Yong Z. and Kovacevic R., "Modeling of 3D Abrasive Waterjet Machining-Part II Simulation of Machining", *Jetting Technology*, *Institution of Mechanical Engineers, England*, pp. 83-89, 1996.
75. Hashish M., "Advances in Fluid jet Beam Processing", *Proceedings of 8th American Waterjet Conference*, Houston, pp. 487-503, 1995.
76. Nanduri M., Taggart D.G., Kim T.J., Ness E. and Risk E., "Effect of Offset Bores on The Performance and Life of Abrasive Waterjet Mixing Tubes," *Proceedings of 8th American Waterjet Conference*, Houston, TX, pp. 459-472, 1995.
77. Whalen J.M., "Application of Advanced Abrasive Waterjet Machining at GE Aircraft Engines," *Proceedings of 7th American Waterjet Conference*, Seattle, WA, pp. 883-897, 1993.
78. Wang J. and Wong W.C.K., "A study of abrasive waterjet cutting of metallic coated sheet steels", *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 39, No. 6, pp. 855-870, 1999.
79. El-Domiaty A., Shabara M.A., Abdel-Rahman A.A. and Al-Sabeeh A.K.," On the modelling of abrasive waterjet cutting ", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 12, No. 4, pp. 255-265, 1996.
80. Kovacevic R., Hashish M., Mohan R., Ramulu M., Kim T.J. and Geskin E.S., "State of the Art of Research and Development in Abrasive Waterjet Machining", *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 119, No. 4B, pp. 776-785, 1997.
81. Hashish, "Advanced Machining with Abrasive Waterjets ", *ASME*, 1990.
82. Hashish M., "Controlled-Depth Milling of Isogrid Structures With AWJs", *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 120, No. 1, pp. 21-27, 1998.
83. El-Domiaty A.A. and Abdel-Rahman A.A., "Fracture mechanics-based model of abrasive waterjet cutting for brittle materials", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 13, No. 3, pp. 72-181, 1997.
84. Milton C., Shaw *Principles of Abrasive processing,* Oxford University Press, 1996.
85. Chen L., Siores E. and Wong W.C.K., "Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials" *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 36, No. 11, pp. 1201-1206, 1996.
86. Schwetz K.A., Sigl L.S., Greim J. and Knoc H., "Wear of boron carbide ceramics by abrasive waterjets ", *10th International Conference on Wear of Materials, Wear,* Vol. 181-183, No. 1, pp. 148-155, 1995.
87. Chen L., Siores E., Wong W.C.K., "Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials" *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 74, No. 1, pp. 251-254, 1998.
88. Abdel-Rahman A.A. and El-Domiaty A.A., "Maximum depth of cut for ceramics using abrasive waterjet technique", *Wear*, Vol. 218, No. 2, pp. 216-222, 1998.
89. Wang J., "Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics", *International journal of mechanical sciences*, Vol. 49, No. 3, pp. 306-316, 2007.

90. Wang J. and Guo D.M., "A predictive depth of penetration model for abrasive waterjet cutting of polymer matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 121, No. 2-3, pp. 390-394, 2002.
91. Hocheng H., Tsai H.Y., Shiue J.J. and Wang B., "Feasibility study of abrasive-waterjet milling of fiber-reinforced plastics", *Journal of manufacturing science and engineering,* Vol. 119, No. 2, pp. 133-142, 1997.
92. Chelikani S. and Kalpakjian S., "Hydrodynamic machining of fiber-reinforced composites", *Journal of composites technology & research*, Vol. 18, No. 2, pp.118-126 (10 ref.), 1996.
93. Arola D. and Ramulu M., "A study of kerf characteristics in abrasive waterjet machining of graphite/epoxy composite", *Journal of engineering materials and technology*, Vol. 118, No. 2, pp. 256-265, 1996.
94. Wang J., "A machinability study of polymer matrix composites using abrasive waterjet cutting technology", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 94, No. 1, pp. 30-35, 1999.
95. Geskin E. S., Tismenetskiy L. and Li F., "Development of Ice Jet Machining Technology," *Proceedings of 8th American Waterjet Conference*, Houston, TX, pp. 671-680, 1995.
96. Kovacevic R., "Apparatus and Method of High Pressure Waterjet Assisted Cooling/Lubrication in Machining", *U.S. Patent*, No. 5, 288, 186, 1994.
97. Kovacevic R., Cherukuthota, C. and Mohan, R., "Improving Milling Performance with High Pressure Waterjet Assisted Cooling/Lubrication", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 717, pp. 331-339, 1995.
98. Kovacevic R. and Mohan R., "Investigation of Effects of High Speed Coolant on Surface Grinding Performance", MR95-273, *Proceedings of First International Machining and Grinding Conference of SME*, Dearborn, MI., 1995.
99. Mazurkiewicz M., "High Pressure Lubricooling Machining of Metals", *U.S. Patent* No. 5, 148, 728, 1992.
100. Lindeke R.R., Schoenig Jr.F.C., Khan A.K. and Haddad J" Machining of a-Q Titanium with Ultra-high Pressure through the Insert Lubrication) Cooling", *NAMRIISME Transactions,* NAMRC XIX, pp. 154-161, 1991.
101. Savanick G., "Liquid Nitrogen Jets Remove Rocket Propellant," WJTA Jet News, *Waterjet Technology Association*, St. Louis, MO, pp. 1-4, 1994.
102. Hashish M., Steele D.E. and Bothell D.H., "Machining with super-pressure (690 MPa) waterjets", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 4, pp. 465-479, 1997.
103. Chen F.L., Siores E., Patel K. and Momber A.W., "Minimising particle contamination at abrasive waterjet machined surfaces by a nozzle oscillation technique", *International Journal of Machine Tools and Manufacture* , Vol. 42, No. 13, pp. 1385-1390, 2002.
104. Chen F., Siores E. and Patel K., "Improving the cut surface qualities using different controlled nozzle oscillation techniques".*International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 6, pp. 717-722, 2002.
105. Lemma E., Chen L., Siores E. and Wang J. "Optimising the AWJ cutting process of ductile materials using nozzle oscillation technique" *International journal of machine tools & manufacture*, Vol. 42, No. 7, pp. 781-789, 2002.
106. Lemma E., Chen L., Siores E. and Wang J., "Study of Cutting Fiber-Reinforced Composites by Using Abrasive Water-Jet with Cutting Head Oscillation", *Composite Structures,* Vol. 57, No. 1-4, pp. 297-303, 2002.

107. Zheng H.Y., Han Z.Z., Chen Z.D., Chen W.L. and Yeo S., "Quality and cost comparisons between laser and waterjet cutting", *Journal of materials processing technology*, Vol. 62, No. 4, pp. 294-298, 1996.
108. Shanmugam D.K., Chen F.L., Siores E. and Brandt M., “Comparative study of jetting machining technologies over laser machining technology for cutting composite materials”. *Composite Structures,* Vol. 57, pp. 289 – 296, 2002.
109. Finnie I., "Erosion of surfaces by solid particles", *Wear*, Vol. 3, pp. 87–103, 1960.
110. Bitter J., "A study of erosion phenomena", Part 2, *Wear*, Vol. 8, pp. 161–190, 1963.
111. Neilson J. and Gilchrist A., "Erosion by a stream of solid particles", *Wear*, Vol. 11, pp. 111-122, 1968.
112. Hashish M., "Modified model for erosion", *Seventh International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact,* Cambridge, England, pp. 461–480, 1987.
113. Hashish M., "A model for abrasive waterjet (AWJ) machining." *J Eng Mater Technol*ogy, Vol. 111, pp. 155–161, 1989.
114. Hashish M., "An improved model for erosion by solid particle impact", *Proceedings of the Seventh International Conference on Erosion by Liquid and Solid impact,* ELSI.VII, Cambridge, England, pp. 66/1– 66/9, 1987.
115. Hutchings I. M. and Winter R. E., "Particle erosion of ductile metals: a mechanism f material removal", *Wear*, Vol. 27, pp. 121-128, 1974.
116. Momber A and Kovacevic R., "Secondary fragmentation in waterjet cutting of brittle multiphase materials", *In: Allen N (ed) Waterjet cutting technology. Mechanical Engineering Publications, Ltd., London, England*, pp. 139–150, 1994.
117. Mabrouki T., Raissi K. and Cornier A., "Numerical simulation and experimental study of the interaction between a pure high velocity waterjet and targets: contribution to investigate the decoating process", *Wear*, Vol. 239, pp. 260–273, 2000.
118. Hallquist J.O., *LS-Dyna3D theoretical manual,* in Livermore Software Technology, 1997.
119. Mabrouki T. and Raissi K., "Stripping process modelling: interaction between a moving waterjet and coated target", I*nternational Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1247–1258, 2002.
120. Wu S. and Kim T., "An application study of plain waterjet process for coating removal", *Procedings of 8th American Water Jet Conference*, Houston, Texas, Vol. II, pp. 779-792, 1995.
121. Junkar M., Jurisevic B., Fajdiga M. and Grah M., "Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining", *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 32, pp. 1095-1112, 2006.
122. ElTobgy M.S., Ng E. and Elbestawi M.A., "Finite element modeling of erosive wear" *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* Vol. 45, pp. 1337–1346, 2005.
123. Ye J. and Kovacevic R., "Turbulent solid-liquid flow through the nozzle of premixed abrasive waterjet cutting systems", *J Eng Man*, Vol. 213, No. 1, pp. 59–67, 1999.
124. Momber A.W. and Kovacevic R., *Principles of Abrasive Water jet Machining,* Springer-Verlag, 1998.
125. Hoffman Joe D., *Methods for Engineers and Scientists,* McGraw-Hill, Inc., New York, 1992.
126. Παπαδρακάκης Μ., *Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001.
127. Τσαμασφύρος Γ.Ι. και Θεοτοκόγλου, *Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων Ι,* Αθήνα 2000.
128. Hallquist J. O., *LS-Dyna3D theory manual, in Livermore Software Technology*, 2006.

129. *LS-Dyna Keyword user's manual, Version 971, in Livermore Software Technology*, 2007.

130. John D. Reid, *LS-Dyna examples manual, in Livermore Software Technology,* 2001.

131. Ahmadi-Brooghani S.Y, Hassanzadeh H. and Kahhal P., "Modeling of Single-Particle Impact in Abrasive Water Jet Machining", *International Journal of Mechanical Systems Science and Engineering,* Vol. 1, No. 4, 2007.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Δημιουργία Γεωμετρίας

A1 Γεωμετρία ακροφυσίου

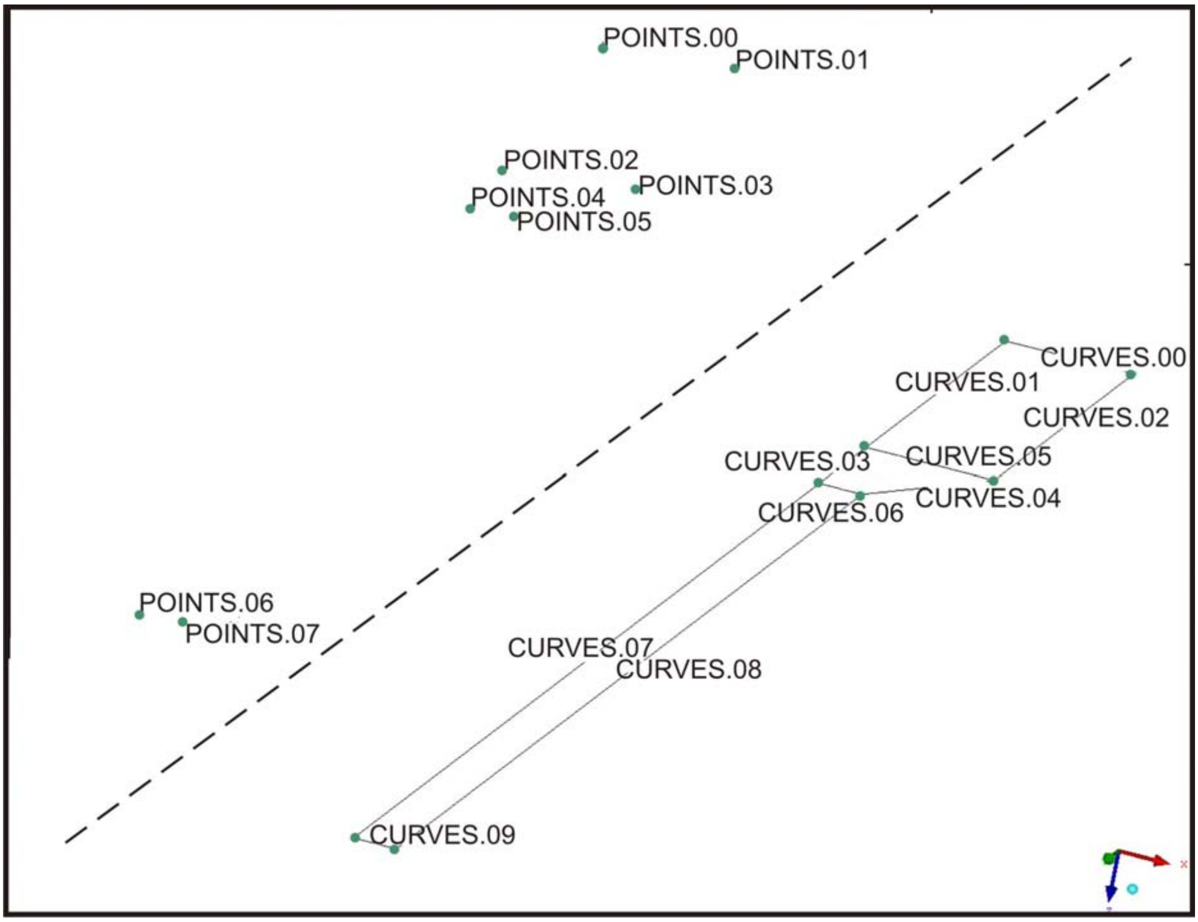
Η γεωμετρία του ακροφυσίου δημιουργείται με χρήση του προεπεξεργαστή ANSYS ICEM CFD σε τρία βασικά διαδοχικά στάδια που παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στη συνέχεια:

I. Δημιουργία σημείων
II. Δημιουργία γραμμών
III. Δημιουργία επιφανειών

I. Δημιουργία σημείων ακροφυσίου

Ακολουθείται η παρακάτω σειρά βημάτων για τη δημιουργία των σημείων του ακροφυσίου: Geometry> Create points> Explicit Locations : Επιλέγεται XYZ (Explicit Coordinates) και με Apply δίνονται οι συντεταγμένες για τα παρακάτω σημεία όπως φαίνονται στο σχήμα Α.1:

POINTS.0 : (0,0,0)
POINTS.1 : (3.0,0,0)
POINTS.2 : (0,6.0,0)
POINTS.3 : (3.0,6.0,0)
POINTS.4 : (0,8.0,0)
POINTS.5 : (1.0,8.0,0)
POINTS.6 : (0,28.0,0)
POINTS.7 : (1.0,28.0,0)



Σχήμα Α.1: Δημιουργία σημείων και γραμμών

Αυτά είναι τα σημεία που ορίζουν τη γεωμετρία του ακροφυσίου της πρώτης περίπτωσης μοντελοποίησης. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία δημιουργείται και το ακροφύσιο της δεύτερης περίπτωσης.

II. <u>Δημιουργία γραμμών</u>

Στο δεξιό τμήμα του ίδιου σχήματος φαίνεται και το αποτέλεσμα μετά τη συνένωση των σημείων για τη δημιουργία των γραμμών που συνθέτουν το σχήμα του ακροφυσίου. Η διαδικασία της συνένωσης των σημείων γίνεται με τα διαδοχικά βήματα: Geometry> Create/Modify Curve> From Points : Επιλέγονται τα σημεία POINTS.00 και POINTS.01 και δημιουργείται η γραμμή CURVES.00. Αντίστοιχα επιλέγονται κατά ζεύγη τα παρακάτω σημεία και δημιουργούνται οι αντίστοιχες γραμμές :

POINTS.00 και POINTS.02 : CURVES.01
POINTS.01 και POINTS.03 : CURVES.02
POINTS.02 και POINTS.04 : CURVES.03
POINTS.03 και POINTS.05 : CURVES.04
POINTS.02 και POINTS.03 : CURVES.05
POINTS.04 και POINTS.05 : CURVES.06
POINTS.04 και POINTS.06 : CURVES.07
POINTS.02 και POINTS.03 : CURVES.08
POINTS.02 και POINTS.03 : CURVES.09

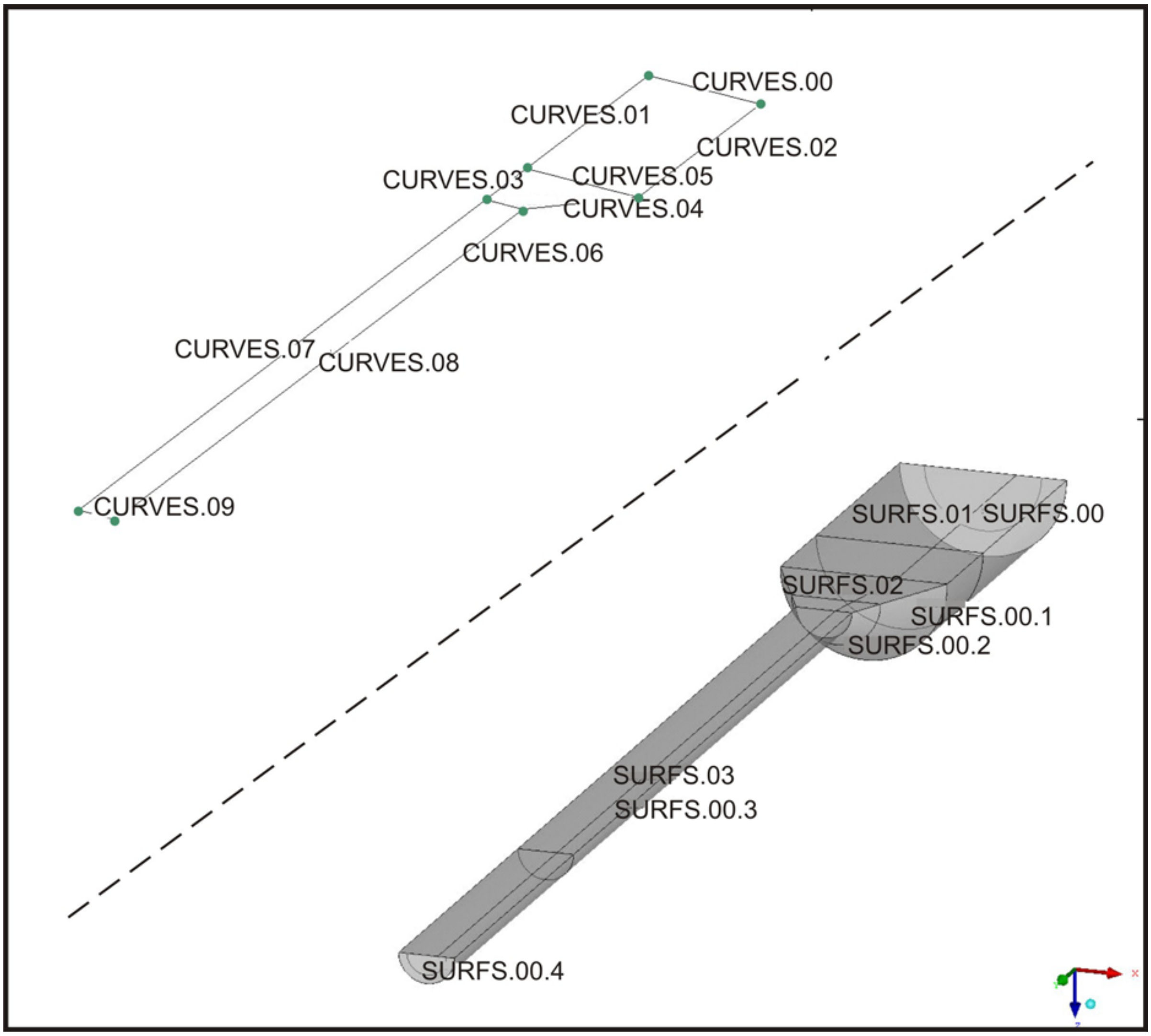
III. <u>Δημιουργία επιφανειών</u>

Στη συνέχεια για τη δημιουργία των επιφανειών του σχήματος του ακροφυσίου κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία των επιφανειών του μισού σχήματος εξαιτίας της συμμετρίας του ακροφυσίου.

Οι επιφάνειες αυτές πρόκειται να δημιουργηθούν εκ περιστροφής με βάση τον άξονα περιστροφής και με οδηγό τις curves (που ορίστηκαν στο αμέσως προηγούμενο βήμα) που θα ορίζουν την επιφάνεια περιστροφής. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι: Geometry> Create/Modify Surface> Surface of revolution : Επειδή λόγω συμμετρίας ενδιαφέρει μόνο το μισό σχήμα, δίνεται Start Angle: 0 και End Angle: 180. Προσδιορίζεται ο άξονας περιστροφής επιλέγοντας για Axis Points τα σημεία POINTS.00 και POINTS.06 και στη συνέχεια επιλέγονται οι γραμμές (curves) που ορίζουν την επιφάνεια περιστροφής κατά 180°, οι οποίες είναι οι CURVES.00, CURVES.02, CURVES.04 , CURVES.08 και CURVES.09.

Στο <u>σχήμα Α.2</u> παρουσιάζονται οι γραμμές της γεωμετρίας και οι προκύπτουσες επιφάνειες για το μισό γεωμετρικά μοντέλο του ακροφυσίου.

Για να δημιουργηθεί η επιφάνεια που περνά από τον άξονα συμμετρίας του ακροφυσίου όπως φαίνεται στο δεύτερο μισό του σχήματος Α.2 τα διαδοχικά βήματα είναι : Geometry> Create/Modify Surface> From Curves : Επιλέγονται κατά ζεύγη οι γραμμές CURVES.02, CURVES.04, CURVES.08 και οι αντισυμμετρικές ακμές της επιφάνειας που δημιουργήθηκε παραπάνω.



Σχήμα Α.2: Δημιουργία επιφανειών

Α2 Διακριτοποίηση ακροφυσίου

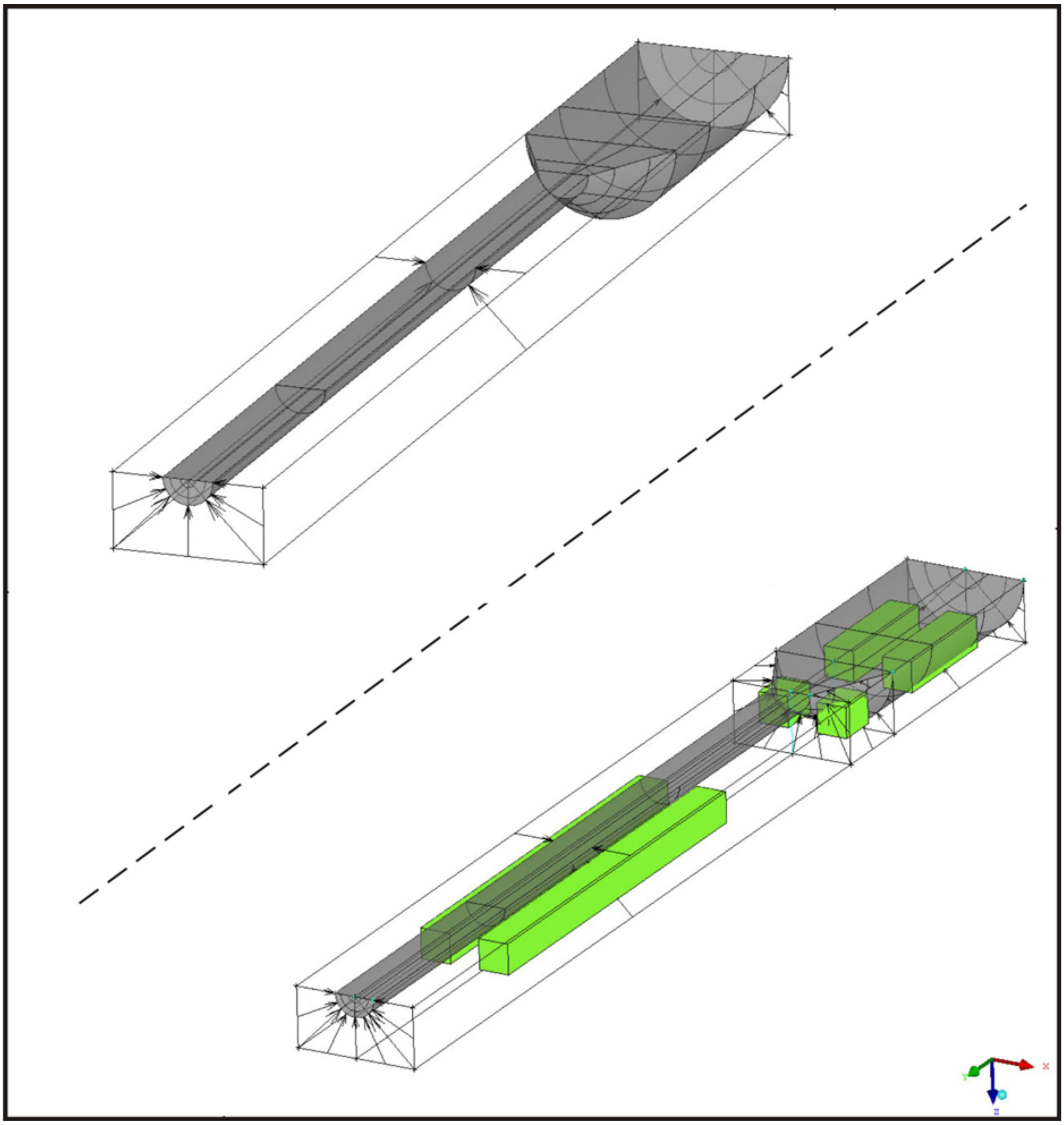
Η διακριτοποίηση του ακροφυσίου δημιουργείται με χρήση του προεπεξεργαστή ANSYS ICEM CFD σε διαδοχικά στάδια που παρουσιάζονται με λεπτομέρεια στη συνέχεια:

VIII. Δημιουργία του αρχικού όγκου (Block)
IX. Διαίρεση του αρχικού Block
X. Προβολή και μετακίνηση σημείων
XI. Συσχέτιση ακμών των blocks με γραμμές του μοντέλου
XII. Ενεργοποίηση του πλέγματος
XIII. Έλεγχος ποιότητας του πλέγματος
XIV. Δημιουργία πλέγματος τύπου O-GRID

I. <u>Δημιουργία του αρχικού όγκου (Block)</u>

Για τη δημιουργία του αρχικού όγκου, που πρόκειται να διακριτοποιηθεί σε πεπερασμένα στοιχεία ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα: Blocking> Create Block> Initialize Block :

Επιλέγεται τρισδιάστατος τύπος όγκου (Type 3D) και στη συνέχεια γίνεται επιλογή του συνόλου της γεωμετρίας. Το αρχικό Block και η συσχέτιση των ακμών του με την επιφάνεια του μοντέλου φαίνεται στο <u>σχήμα Α.3</u>.

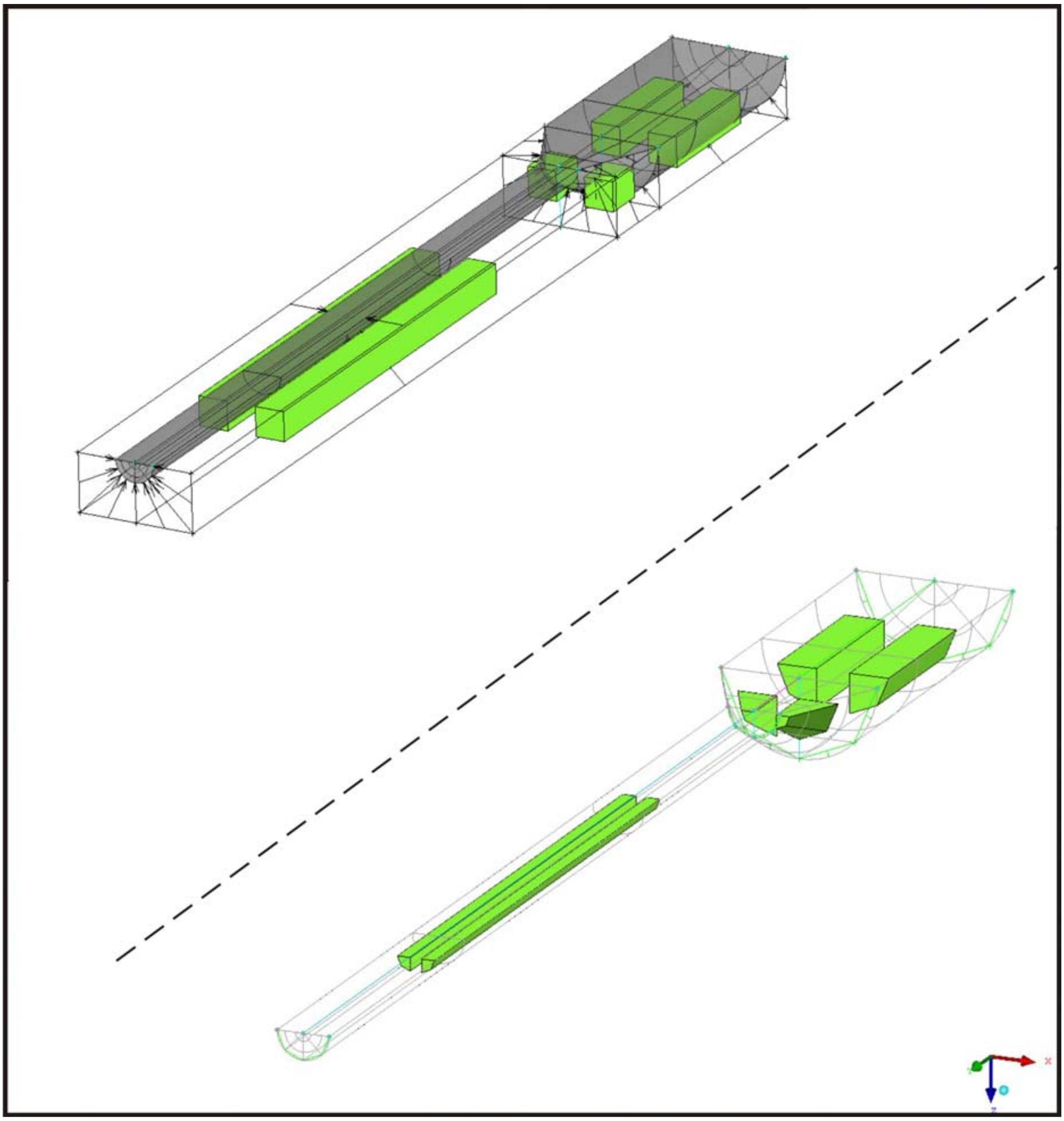


Σχήμα Α.3: Δημιουργία αρχικού όγκου και διαίρεση σε υπο-όγκους

II. <u>Διαίρεση αρχικού Block</u>

Για να προσεγγιστεί καλύτερα το μοντέλο CAD, το αρχικό block διαιρείται σε υπο-όγκους (sub-blocks). Blocking> Split Block> Split Block: Επιλέγεται ως Split Method: Prescribed Point. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν παράλληλα κάποια σημεία τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως οδηγοί.

Χωρίζεται κατά μήκος το αρχικό Block σε τρία μέρη και κατά πλάτος στη μέση. Το χωρισμένο Block φαίνεται στο προηγούμενο <u>σχήμα Α.3</u>.



Σχήμα Α.4: Συσχέτιση ακμών των υπο-όγκων με γραμμές του μοντέλου

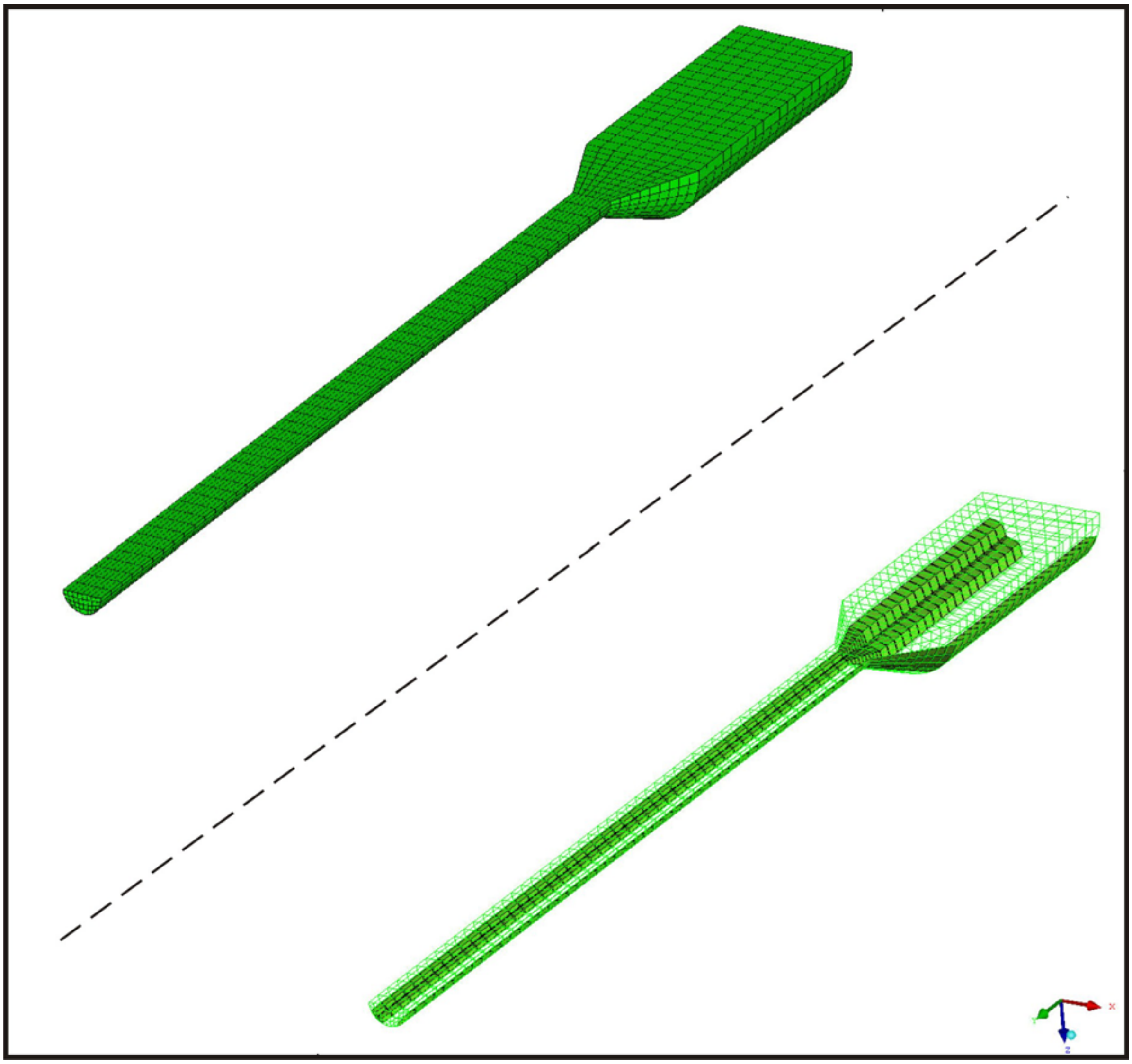
III. *<u>Προβολή και μετακίνηση σημείων</u>*

Blocking> Associate> Snap Project Vertices: Τα σημεία των blocks προβάλλονται πάνω στις επιφάνειες CAD με βάση τις προκαθορισμένες συσχετίσεις. Κάποια σημεία χρειάζονται χειροκίνητη μετακίνηση όπως φαίνεται στο <u>σχήμα Α.4</u> για να τοποθετηθούν στη σωστή θέση (ακριβώς πάνω στα σημεία που ορίζονται από τη γεωμετρία του ακροφυσίου που μοντελοποιείται.

Blocking> Associate> Associate Vertex: Επιλέγονται με Vertex τα σημεία των blocks τα οποία δεν βρίσκονται σε σωστή θέση ακολούθως με Point τα σημεία του χώρου στα οποία πρέπει να μετακινηθούν.

IV. <u>*Συσχέτιση ακμών των blocks με γραμμές του μοντέλου*</u>

Blocking> Associate> Associate Edge to Curve: Επιλέγονται με Edges οι ακμές των blocks και με Curves οι γραμμές του μοντέλου πάνω στις οποίες πρόκειται να οριστεί η προβολή. Τα blocks μετά την προβολή, την μετακίνηση των σημείων και την συσχέτιση των ακμών φαίνονται στο σχήμα Α.4.



Σχήμα Α.5: Το διακριτοποιημένο ακροφύσιο και τα στοιχεία κακής ποιότητας

V. <u>*Ενεργοποίηση του πλέγματος*</u>

Από τη στιγμή που τα blocks έχουν οριστεί και τροποποιηθεί κατάλληλα, μπορούν να οριστούν οι παράμετροι του πλέγματος το οποίο θα προβληθεί στις επιφάνειες του μοντέλου CAD.

Blocking> Pre-mesh Params> Edge Params> Επιλέγονται οι ακμές των blocks και πυκνώνονται κατάλληλα αυξάνοντας τον αριθμό των σημείων (nodes) που τις διαιρούν.

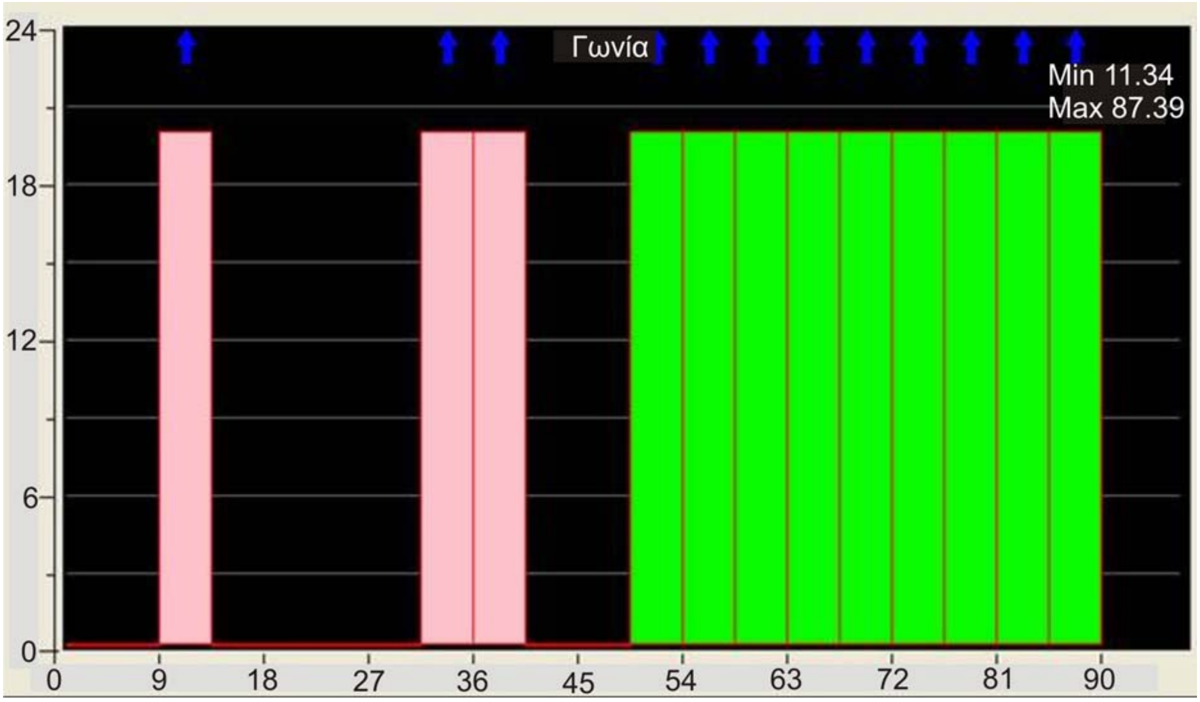
Blocking> Pre-mesh> Convert to unstructured mesh: Η επιλογή αυτή θα δημιουργήσει ένα αρχείο εξόδου στο οποίο στις πληροφορίες του πλέγματος τα κοινά σημεία θα ταυτίζονται, ανεξάρτητα από τον αριθμό των blocks στο μοντέλο. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη καθώς ο κώδικας επίλυσης LS-DYNA3D δεν λειτουργεί με δομές πολλαπλών όγκων (multi-block δομές).

Το διακριτοποιημένο ακροφύσιο φαίνεται στο σχήμα Α.5. Στο σχήμα Α.5, απεικονίζονται τα στοιχεία του πλέγματος με μικρότερη εσωτερική γωνία κάτω από 45 μοίρες. Τα στοιχεία αυτά είναι κακής ποιότητας. Πρόκειται για το αποτέλεσμα της χρήσης δομής καρτεσιανού τύπου ή τύπου H-GRID όπως ονομάζεται, σε κύλινδρο.

Με την χρησιμοποίηση στο παρακάτω βήμα VII της τεχνικής O-GRID, η ποιότητα αυτών των στοιχείων πρόκειται να αυξηθεί δραματικά.

VI. Έλεγχος ποιότητας πλέγματος

Μετά την ενεργοποίηση του πλέγματος είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η ποιότητα του ακολουθώντας τα βήματα: Meshing> Quality check.



Σχήμα Α.6: Έλεγχος ποιότητας πλέγματος

Οι παράμετροι που ελέγχονται είναι οι εξής :

- Γωνία (Angle): Ελέγχει την μικρότερη εσωτερική γωνία, σε μοίρες για κάθε στοιχείο (element). Κάθε επιλύτης (solver) μπορεί να έχει διαφορετικό επίπεδο αποδοχής για τον έλεγχο εσωτερικής γωνίας. Αν τα στοιχεία είναι διαστρεβλωμένα και οι εσωτερικές γωνίες μικρές, η ακρίβεια του αποτελέσματος θα ελαττωθεί.
- Ορίζουσα (Determinant): Υπολογίζει την ορίζουσα για όλα τα στοιχεία στο πλέγμα. Πρόκειται για πληροφορία όγκου η οποία υπολογίζεται από Ιακωβιανό πίνακα. Η τιμή 1 απεικονίζει έναν τέλειο εξαεδρικό κύβο, ενώ η τιμή -1 έναν πλήρως ανεστραμμένο κύβο με αρνητικό όγκο.

- o Ιστόγραμμα (Warpage): Πρόκειται για ένα ιστόγραμμα το οποίο απεικονίζει τα επίπεδα της διαστρέβλωσης των στοιχείων.

Blocking> Pre-mesh Quality: Επιλέγεται ως κριτήριο η γωνία (Angle). Οπότε απεικονίζεται ένα ιστόγραμμα με τις εσωτερικές γωνίες των στοιχείων όπως φαίνεται στο σχήμα Α.6.

Το ιστόγραμμα δίνει τον αριθμό των στοιχείων συναρτήσει της μικρότερης εσωτερικής γωνίας. Τα στοιχεία με ροζ χρώμα είναι στοιχεία κακής ποιότητας καθώς περιέχουν γωνίες μικρότερες των 45°.

VII. Δημιουργία O-GRID

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, η τεχνική O-GRID χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της γεωμετρίας όταν απαιτείται κυκλικό ή τύπου "O" πλέγμα γύρω από ένα εντοπισμένο γεωμετρικό χαρακτηριστικό ή γενικότερα γύρω από ένα αντικείμενο καθώς εξασφαλίζει ότι το πλέγμα θα έχει ορθογώνιες γραμμές στην περιφέρεια του αντικειμένου. Αποτελεί ουσιαστικά την τροποποίηση μιας ή περισσότερων πλευρών του βασικού όγκου (Block) σε μια τοπολογία υποεπιφανειών.

Στον προεπεξεργαστή (preprocessor) ANSYS ICEM CFD, η διαδικασία που απαιτείται για τη δημιουργία του πλέγματος τύπου O-GRID είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και το μόνο που χρειάζεται να επιλέξει ο χρήστης είναι οι απαιτούμενοι όγκοι (blocks) και οι αντίστοιχες κατάλληλες επιφάνειες (faces).

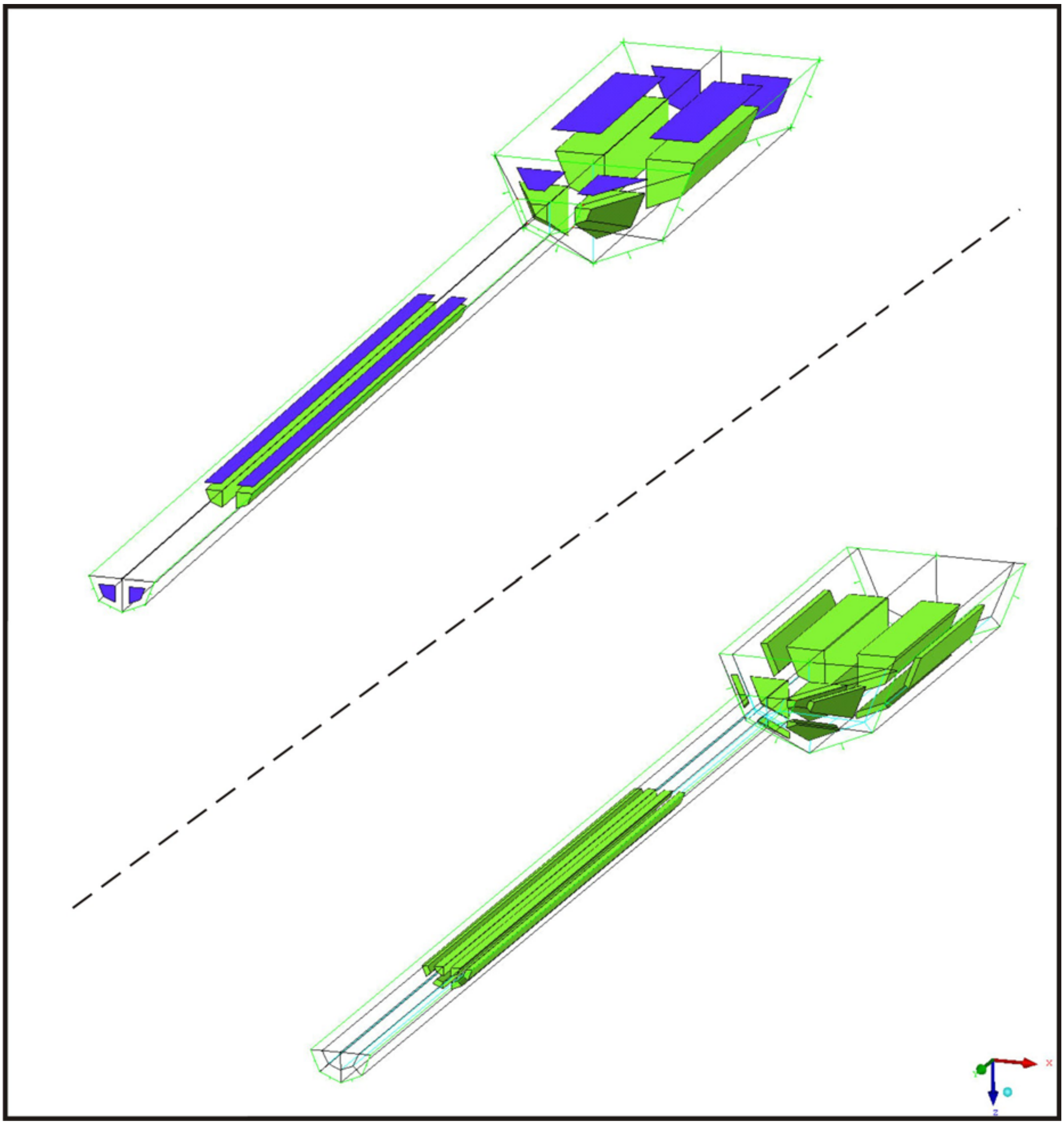
Blocking> Split Block> O-GRID Blocking: Επιλέγονται οι όγκοι (blocks) και οι κατάλληλες επιφάνειες (faces) σύμφωνα με τη μέθοδο O-GRID όπως φαίνεται στο σχήμα Α.7.

Μόλις ενεργοποιηθεί η παραπάνω επιλογή, η τεχνική O-GRID θα δημιουργήσει τη δομή που φαίνεται στο δεύτερο μισό του σχήματος Α.7.

Με κατάλληλες επεμβάσεις όπως έχει ήδη περιγραφεί, τα σημεία των καινούργιων όγκων (blocks) μετακινούνται στις επιθυμητές θέσεις και γίνονται οι απαραίτητες συσχετίσεις των ακμών των blocks με τις γραμμές του μοντέλου.

Blocking> Pre-mesh Params> Edge Params> Ρυθμίζεται εκ νέου η διαίρεση των ακμών των blocks όπου απαιτείται.

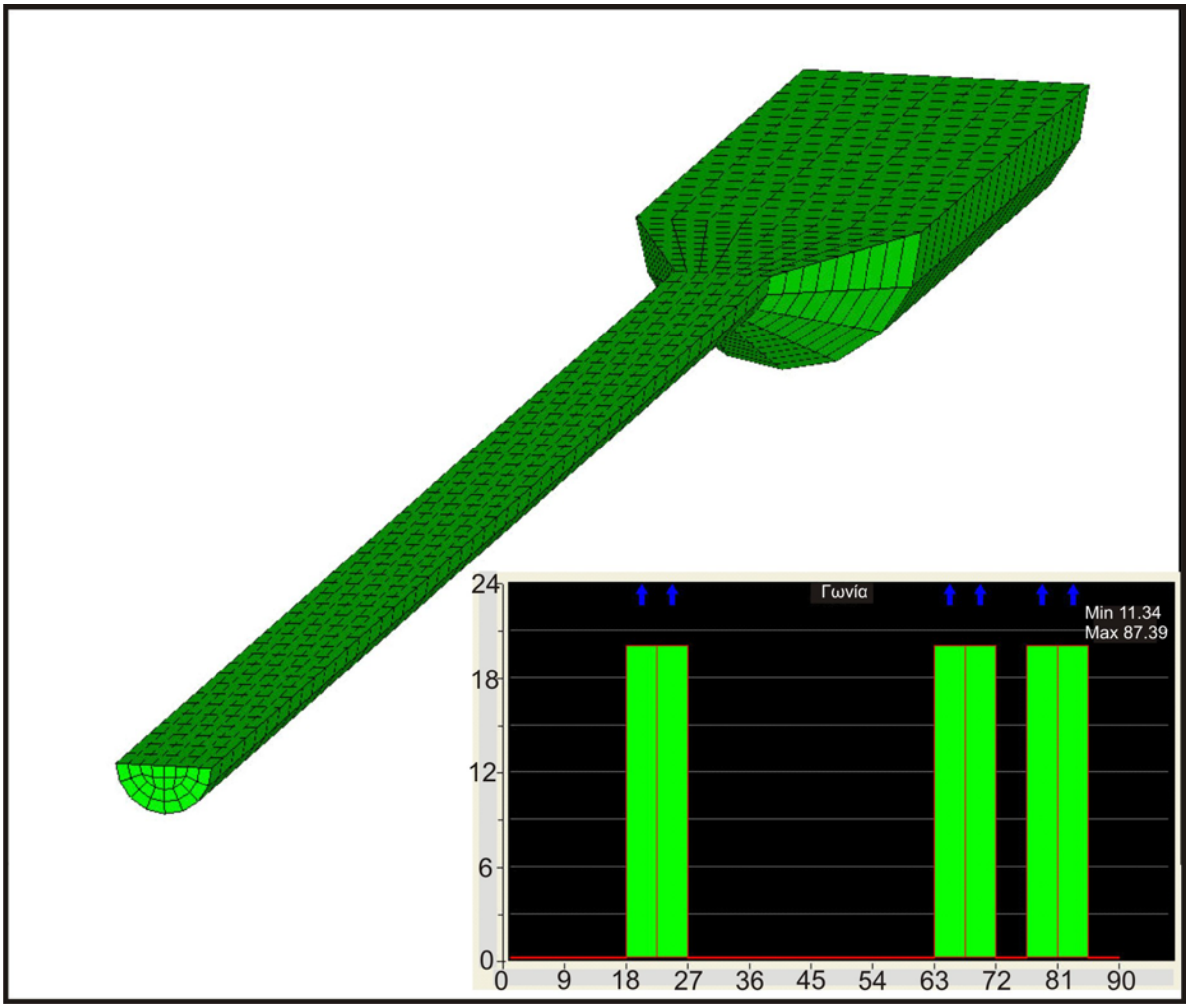
Blocking> Pre-mesh> Convert to unstructured mesh. Δημιουργείται ένα αρχείο εξόδου στο οποίο στις πληροφορίες του πλέγματος τα κοινά σημεία ταυτίζονται, ανεξάρτητα από τον αριθμό των blocks στο μοντέλο.



Σχήμα Α.7: Δημιουργία O-GRID

Το πλέγμα μετά την δημιουργία του O-GRID φαίνεται στο παρακάτω σχήμα Α.8. Όπως φαίνεται από το ιστόγραμμα που παρατίθεται στο ίδιο σχήμα η ποιότητα των στοιχείων βελτιώθηκε σημαντικά.

Ακολουθώντας τη διαδικασία : Blocking> Pre-mesh Params> Edge Params> Ρυθμίζεται εκ νέου η διαίρεση των ακμών των blocks όπου απαιτείται έτσι ώστε το πλέγμα να γίνει πυκνότερο στα τοιχώματα του ακροφυσίου. Έπειτα η τελική διακριτοποίηση του ακροφυσίου επιτυγχάνεται ακολουθώντας τα βήματα: Blocking> Pre-mesh> Convert to unstructured mesh.



Σχήμα Α.8: Πλέγμα O-GRID και έλεγχος ποιότητας πλέγματος.

Το πλέγμα επιλέγεται έπειτα από συνεχείς αυξήσεις (διπλασιασμός) των στοιχείων του, έως την επίτευξη σύγκλισης στη λύση.