

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΝΕΡΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (WATERJET)



Επιβλέπων Καθηγητής
Ν.Μπιλάλης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	2
2. WATER-JET	3
2.1 Ιστορία του Water-Jet Machining	3
2.2 Μέθοδος – Εφαρμογές	4
2.3 Πλεονεκτήματα Water-Jet Machining	5
2.4 Συνθήκες κατεργασίας με Water-Jet Machining	7
2.5 Συναγωνισμός	8
2.6 Στοιχεία κόστους	8
2.7 Τεχνολογία της Κατεργασίας WJM	9
2.8 Εφαρμογές της Κατεργασίας WJM	10
2.9 Διεθνής έρευνα στο Water-Jet Machining	12
2.10 Έρευνα στο Εργαστήριο Σχεδιομελέτης με Η/Υ του Πολυτεχνείου Κρήτης	25
3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	28
3.1 Διαδικασία προσομοίωσης	28
3.1.1 LS-DYNA3D	28
3.1.2 Μέθοδος Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)	28
3.2 Ιδιότητες υλικών (Material Models)	31
3.2.1 Υλικό στόχου (Υπόστρωμα και επικάλυψη)	31
3.2.2 Υλικό ρευστών (αέρας και water-jet)	32
3.3 Οριακές συνθήκες (Boundary Conditions)	32
4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ	34
4.1 Δημιουργία γεωμετρίας	34
4.1.1 Δημιουργία ακροφυσίου	34
4.1.2 Δημιουργία χώρου κατεργασίας	37
4.1.3 Δημιουργία στόχου	40
4.2 Διακριτοποίηση	44
4.2.1 Διακριτοποίηση ακροφυσίου	44
4.2.2 Διακριτοποίηση χώρου κατεργασίας	54
4.2.3 Διακριτοποίηση στόχου	60
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	64
5.1 Μελέτη Ακροφυσίου	64
5.2 Κατανομή τάσεων Von-Mises κατά την διαδικασία αφαίρεσης της επικάλυψης	66
5.3 Σύγκριση kerf για διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης	71
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	74
7.1 Keyword Input File για την μελέτη του ακροφυσίου	74
7.2 Keyword Input File για την μελέτη αλληλεπίδρασης waterjet-στόχου	76
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μοντελοποιήθηκε η συμπεριφορά της πρόωσης στην κατεργασία αφαίρεσης επικάλυψης (decoating) από υπόστρωμα. Η όλη εργασία στηρίχθηκε σε ήδη ανεπτυγμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που προσομοιώνει τη διαδικασία της κοπής με νερό υψηλής πίεσης και το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Σχεδιομελέτης με Η/Υ του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Κατά την διάρκεια της ζωής τους, οι επικαλυμμένες επιφάνειες εκτίθενται σε πολλές συνθήκες οι οποίες προκαλούν φθορά (καιρός, θερμοκρασία, τριβή, κτλ). Για την επαναφορά των φθαρμένων επιφανειών είναι απαραίτητη μια κατεργασία αφαίρεσης επικάλυψης. Η Βιομηχανία όμως έχει ανάγκη από νέες τεχνολογίες για να αντικαταστήσει τις υπάρχουσες μεθόδους αφαίρεσης επικάλυψης. Πράγματι, οι υπάρχουσες μέθοδοι είτε είναι πολύ δαπανηρές, είτε σταδιακά περιορίζονται από νέους περιβαλλοντικούς κανόνες. Ένα παράδειγμα συμβατικής μεθόδου είναι η χημική κατεργασία, η οποία σταδιακά εγκαταλείπεται λόγω της επιβλαβούς δράσης των χημικών που χρησιμοποιούνται. Η κατεργασία αφαίρεσης επικάλυψης με χρήση νερού υψηλής πίεσης φαίνεται να είναι μια ανταγωνιστική εναλλακτική πρόταση η οποία αντιμετωπίζει επιτυχώς τα ευαίσθητα περιβαλλοντικά θέματα. Η κατεργασία χρησιμοποιείται πλέον ευρέως στη Βιομηχανία και ιδιαίτερα στην Αεροπορική βιομηχανία.

Η μοντελοποίηση της κατεργασίας σε συνάρτηση με τον έλεγχο της επίδρασης της πρόωσης δίνει τη δυνατότητα στη συνέχεια, για βελτιστοποίηση των συνθηκών κατεργασίας καθώς και τη δημιουργία σχετικής βάσης τεχνολογικών πληροφοριών.

Για το σκοπό αυτό στην παρούσα εργασία μελετήθηκε με τη χρήση ενός μη-γραμμικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων βασισμένο στον κώδικα LS-DYNA3D. Ο προεπεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία και τη διακριτοποίηση της γεωμετρίας είναι το ANSYS ICFD. Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης waterjet – κινούμενου στόχου μελετήθηκε με χρήση της μεθόδου Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE).

2. WATER-JET

2.1 Ιστορία του Water-Jet Machining

Η δύναμη του νερού υπηρετεί τη φύση απ' το ξεκίνημα του χρόνου σκαλίζοντας, φιλοτεχνώντας και διαμορφώνοντας την επιφάνεια της γης. Τον περασμένο αιώνα η φυσική του νερού κατανοήθηκε καλύτερα και αναπτύχθηκε περισσότερο. Η τεχνολογία του Water-Jet χρησιμοποιήθηκε αρχικά για καθαρισμό κυρίως για να απομακρύνει υπολείμματα αργίλου και πέτρας. Το 1930 οι Ρώσοι και οι Αμερικανοί έκαναν τις πρώτες προσπάθειες να εφαρμόσουν υψηλή ταχύτητα δέσμης νερού σε εξορύξεις για να μετακινήσουν πέτρες και κάρβουνο. Στα τέλη του 1960 μία αμερικανική διαστημική εταιρεία αντιμετώπισε την πρόκληση κοπής ενισχυμένης ίνας και μιας σειράς άλλων σκληρών υλικών που ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες και μηχανικές καταπονήσεις και τα οποία οι συμβατικές μέθοδοι κοπής τα κατάστρεφαν κατά τη διάρκεια της κοπής. Τότε κλήθηκε το Water-Jet Machining να επιλύσει αυτά τα προβλήματα.

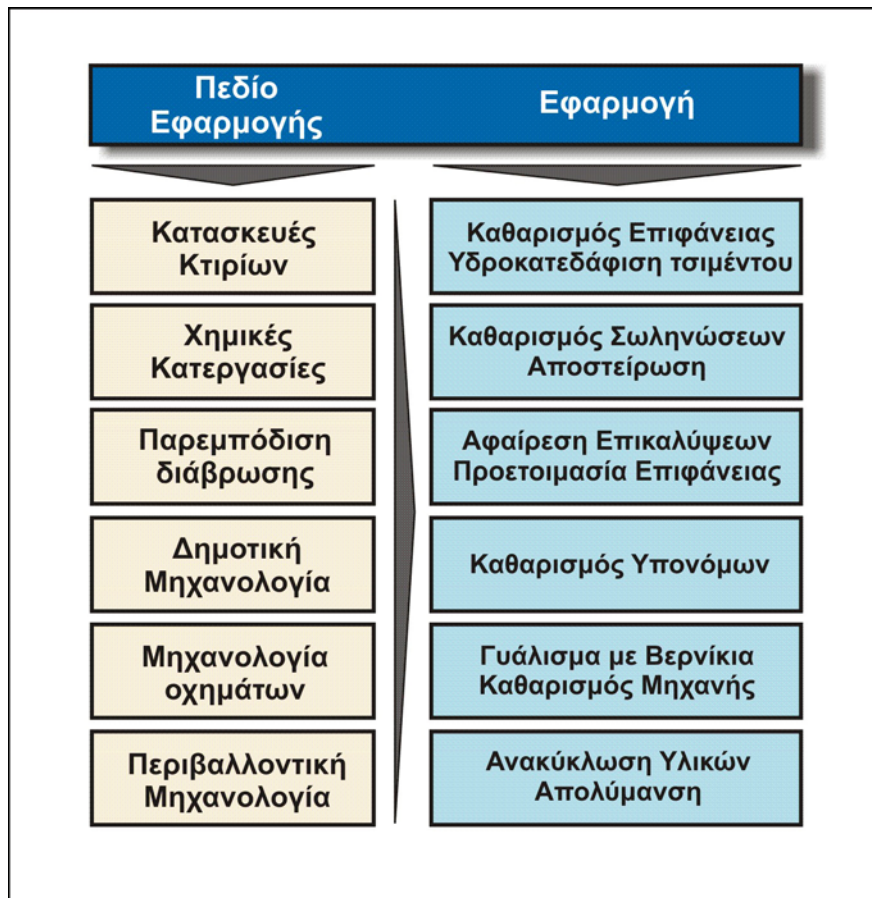
Η νέα μέθοδος τελικά κατάφερε να υποστηρίξει συνεχή πρόοδο ακόμα και στη βιομηχανία του διαστήματος. Σε ανάδραση, οι διαστημικές εφαρμογές οδήγησαν στη δημιουργία κραμάτων υλικών, τα οποία έδωσαν σημαντική προώθηση στην ανάπτυξη της τεχνικής του Water-Jet. Πρωτοπόρος στην επαγγελματική χρήση του Water-Jet η εταιρία Ingersoll – Rand κατασκεύασε την πρώτη εργαλειομηχανή μόλις το 1971, ενώ το Abrasive Water-Jet, δηλαδή η προσθήκη ειδικής σκόνης στη δέσμη νερού, γεννήθηκε από την ίδια αρχική ιδέα, μετά από μια δεκαετία.

Όταν τα οφέλη της χρήσης της τεχνολογίας του Water-Jet άρχισαν να γίνονται εμφανή, ανακαλύφθηκαν περισσότερες εφαρμογές. Το αποτέλεσμα ήταν να επιτευχθεί η κοπή διαφόρων υλικών που μέχρι τότε ήταν αδύνατο να κοπούν με τις συμβατικές μεθόδους. Από τότε, οι νέες δυνατότητες για αυτή την τεχνική κοπής καθώς και νέες βιομηχανικές εφαρμογές, άρχισαν να αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας την ικανότητα του Water-Jet για να κόψουν περίπλοκα σχήματα από υλικά διάφορων παχών, διατηρώντας ταυτόχρονα την καλή ποιότητα επιφάνειας. Αν πριν μερικά χρόνια έλεγαν σε κάποιον μηχανουργό ότι μπορεί να κόψει τιτάνιο ή ακόμα και χάλυβα μεγάλης σκληρότητας με νερό, θα του φαινόταν αδιανόητο. Σήμερα το Water-Jet αποτελεί πραγματικότητα.

Το WJM χρησιμοποιείται σε όλους σχεδόν τους χώρους της σύγχρονης βιομηχανίας, ιδιαίτερα στην βιομηχανία αυτοκινήτων, στη διαστημική βιομηχανία, σε ποικιλία άλλων μηχανολογικών εφαρμογών, στην τεχνολογία περιβάλλοντος κ.λπ.. Στον πίνακα του σχήματος 2.1 παρουσιάζονται μερικές από τις βιομηχανικές εφαρμογές της τεχνικής αυτής.

Γενικά το Water-Jet χρησιμοποιείται για :

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



Σχήμα 2.1 : Βιομηχανικές εφαρμογές της κοπής, με δέσμη νερού υψηλής πίεσης

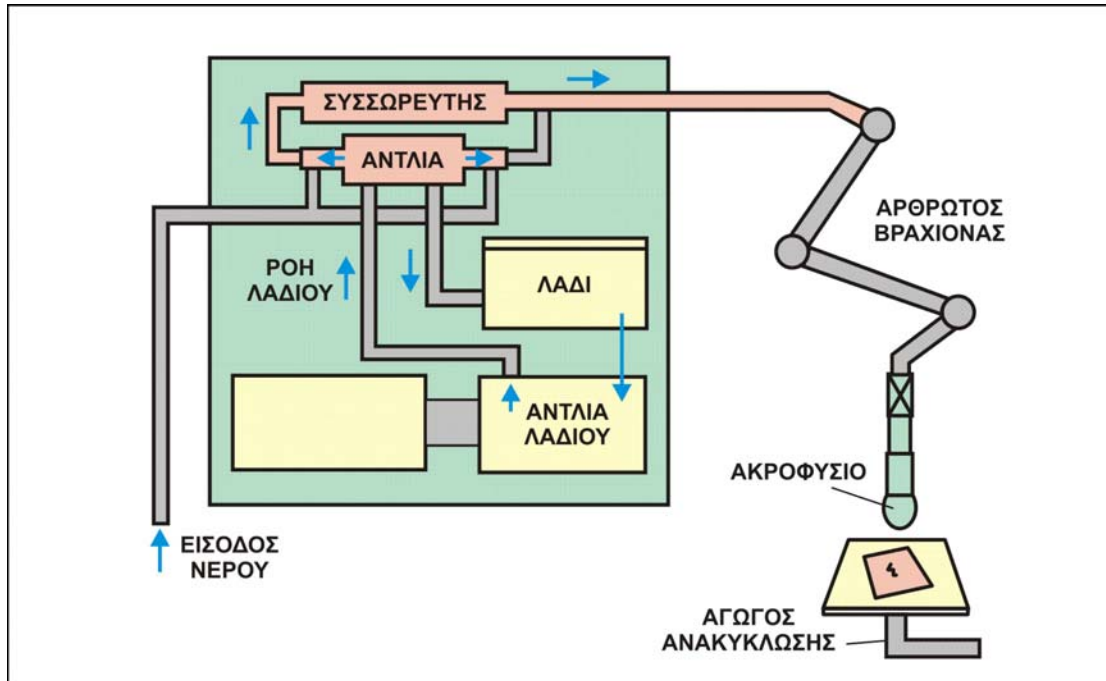
Ενώ ειδικότερα στην μηχανουργική τεχνολογία χρησιμοποιείται για :

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

2.2 Μέθοδος – Εφαρμογές

Βασική ιδέα της μεθόδου κοπής με δέσμη νερού, είναι η εκτόξευση καθαρού νερού ή νερού με σωματίδια λειαντικής ουσίας, μέσα από μια μικρή οπή με μεγάλη πίεση πάνω στο υλικό που πρόκειται να κατεργαστεί. Το αποτέλεσμα είναι μια γρήγορη, ευέλικτη και αποτελεσματική μέθοδος κοπής μιας μεγάλης ποικιλίας υλικών, που σήμερα έχει γίνει ιδιαίτερα ανταγωνιστική. Η δέσμη νερού εκτοξεύεται με ταχύτητα 900 m/sec ή 3 mach. Όταν η δέσμη χτυπήσει την κατεργασμένη επιφάνεια, τα μόρια του υλικού απομακρύνονται ταχύτατα λόγω της διαβρωτικής ιδιότητας του νερού.

Η υψηλή πίεση που απαιτείται για την κοπή παράγεται σε μια αντλία πίεσης. Το νερό που συμμετέχει στη διαδικασία φιλτράρεται ώστε να αποτρέπεται η στόμωση του ακροφυσίου. Το σχήμα 2.2 δείχνει σχηματικά ένα σύστημα Water-Jet.



Σχήμα 2.2 : Σύστημα κοπής με δέσμη νερού Water-jet

Η λειτουργία του αγωγού ανακύκλωσης είναι να παραλαμβάνει το νερό αλλά και να διασκορπίζει την ενέργεια της δέσμης σε λογικά επίπεδα θορύβου (80-90db). Η ταχύτητα της δέσμης (u), σύμφωνα με τη σχέση Bernoulli είναι κατά προσέγγιση :

$$u = \sqrt{2 * p / \rho} \quad \text{όπου } p \text{ είναι η πίεση και } \rho \text{ η μέση πυκνότητα του νερού.}$$

Η παροχή (Q) θα είναι : $Q = C_D * A * u$

Και η δύναμη ρευστού που απαιτείται (P), θα είναι : $P = p * Q = C_D A * \sqrt{\frac{2}{\rho}} p^{1.5}$

όπου C_D είναι ο συντελεστής του ακροφυσίου (περίπου ίσος με 0.7) και A είναι το εμβαδόν επιφάνειας της δέσμης.

Η απόσταση του ακροφυσίου από την τράπεζα κατεργασίας, δεν είναι σημαντική παράμετρος εφόσον είναι μικρότερη από 25 mm. Το βάθος διείσδυσης της δέσμης εξαρτάται από το είδος του υλικού που πρόκειται να κοπεί καθώς και από την ταχύτητα (u) της δέσμης ύδατος.

2.3 Πλεονεκτήματα Water-Jet Machining

Η κοπή με δέσμη νερού προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κοπής. Πιο συγκεκριμένα η κοπή με δέσμη ύδατος έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

- Δεν αναπτύσσεται ζώνη θερμότητας και δεν προκαλείται σκλήρυνση ή αλλαγή ιδιοτήτων στο κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά τη διάρκεια της κατεργασίας.
- Κατεργάζεται οποιοδήποτε υλικό με δυνατότητα κοπής περίπλοκων σχημάτων.
- Έχει την ικανότητα να κόβει σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.
- Μπορεί να κατεργαστεί τα περισσότερα υλικά χωρίς προδιάτρηση οπής.
- Δεν απαιτείται δευτερεύουσα επεξεργασία μετά την κύρια κατεργασία.
- Παρουσιάζει μεγάλη εξοικονόμηση ακατέργαστης ύλης και είναι ταχύτερη συγκρινόμενη 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.

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα και χαρακτηριστικά του Water jet είναι η ποιότητα της κοπής στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό επιτρέπει να κόβονται υλικά τα οποία θα καίγονταν, έλιωναν ή ράγιζαν με τις συμβατικές μεθόδους κοπής. Οι θερμικές κατεργασίες προκαλούν σκλήρυνση της επιφάνειας, παραμορφώσεις και εκπομπή επικίνδυνων αερίων. Αντίθετα στα υλικά που κόβονται με την τεχνική αυτή δεν υφίσταται καμία θερμική καταπόνηση, αποκλείοντας τέτοια ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημα είναι η ικανότητα να κόβει υλικά ενισχυμένης ίνας, ανακλαστικά υλικά με ανώμαλες επιφάνειες και τεμάχια κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά. Παρά την υψηλή κινητική ενέργεια στην κοπή με δέσμη νερού, αποφεύγονται οι παραμορφώσεις και η μεγάλη ακρίβεια κοπής επιτυγχάνεται χωρίς να δημιουργούνται τριμμένες άκρες ή σπασίματα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας που στις περισσότερες περιπτώσεις αποκλείει την ανάγκη για περαιτέρω επεξεργασία φινιρίσματος.

Η κοπή με δέσμη νερού είναι ιδιαίτερα πλεονεκτική στην κοπή περίπλοκων σχημάτων. Μπορεί να κατεργαστεί πληθώρα υλικών σχεδόν σε οποιοδήποτε σχήμα. Μυτερές γωνίες, διάτρητες τρύπες και σχήματα με ελάχιστη εσωτερική ακτίνα, είναι μερικές από τις ελάχιστες δυνατότητες της κατεργασίας. Αντίστοιχα μειώνεται σημαντικά ο χρόνος κοπής ενός τεμαχίου γιατί δεν χρειάζεται προδιάτρηση ή οποιαδήποτε άλλη προεργασία πριν από την κοπή. Η κοπή με δέσμη νερού είναι ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας η κατεργασία είναι καθαρή και δεν δημιουργεί τριβές, ρινίσματα, ή επικίνδυνα αέρια που είναι ιδιαίτερα βλαβερά για τον ανθρώπινο οργανισμό. Λιπαντικά κοπής ή γαλακτώματα δεν χρειάζονται και δεν χρησιμοποιούνται.

Στην εποχή των υπερτιμημένων πρώτων υλών και των περιορισμένων πόρων, η τεχνική Water-Jet εκμεταλλεύεται όσο το δυνατόν περισσότερο υλικό με λιγότερη φύρα. Χρησιμοποιώντας καθαρό νερό, είναι δυνατόν να κοπούν υφάσματα, ελαστικά, λεπτά πλαστικά, τρόφιμα, και πολλά άλλα προϊόντα. Αυτά τα υλικά μπορούν να κοπούν σε υψηλές ταχύτητες που φτάνουν τις μερικές εκατοντάδες μέτρα το λεπτό.

Ειδικότερα το AWJM έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους κατεργασίας και μπορεί να αντικαταστήσει αρκετές συμβατικές μεθόδους ακόμα και σε

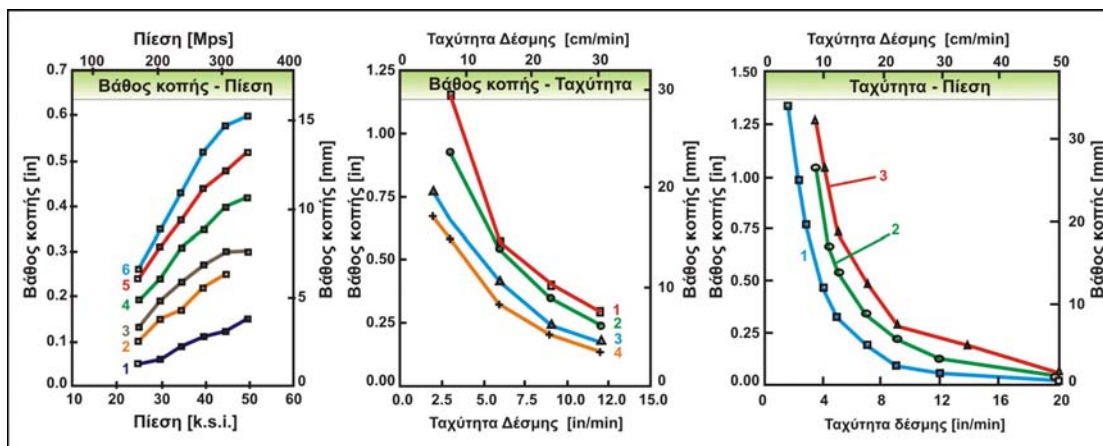
πολύπλοκες κατεργασίες όπως η κοπή γραναζιών. Ίσως το πιο σημαντικό πλεονέκτημα του Abrasive jet είναι το χαμηλό επίπεδο μηχανικής τάσεως που δέχεται το κατεργαζόμενο τεμάχιο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην καταπονείται το τεμάχιο και έτσι να μη μειώνεται η μηχανική αντοχή του. Μετά το τέλος της κατεργασίας η επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι καθαρή και λεία και η οποία απαιτεί λιγότερη ή και μηδενική περαιτέρω επεξεργασία. Έτσι μπορεί να εξαιρεθούν ολόκληρα βήματα στην διαδικασία της παραγωγής, μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό το κόστος και το χρόνο της κατεργασίας.

Αν η κοπή με δέσμη νερού με λειαντικά σωματίδια έχει τόσα πλεονεκτήματα γιατί δεν την χρησιμοποιούν όλοι ; Η απάντηση δεν βασίζεται στην καθ' αυτή κατεργασία αλλά στον έλεγχό της. Μέχρι τώρα η χρήση αυτής της τεχνικής απαιτούσε ένα συνδυασμό περίπλοκων προγραμματισμών και έμπειρους χειρίστες.

Η γραμμική ταχύτητα του ακροφυσίου του abrasive jet πρέπει να έχει μια ποικιλία από αλλαγές στις γωνίες και στις διάτρητες τρύπες των κατεργαζόμενων τεμαχίων αφού η υπερβολική ταχύτητα έχει σαν αποτέλεσμα τη χαμηλή ποιότητα κοπής. Στο παρελθόν η χρήση του abrasive jet απαιτούσε έμπειρο χειριστή να ελέγχει την ταχύτητα της δέσμης. Αν η ταχύτητα ήταν πολύ μεγάλη η ποιότητα στην άκρη και η ακρίβεια ήταν χαμηλή σε σχέση με το υπόλοιπο τεμάχιο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη μείωση της μηχανικής αντοχής του τεμαχίου λόγω ύπαρξης ατελειών. Από την άλλη μεριά αν η ταχύτητα ήταν πολύ μικρή τότε χάνονταν χρόνος και ακρίβεια στην κοπή. Αν το ακροφύσιο διαπερνούσε μια γωνία πολύ γρήγορα, το αποτέλεσμα θα ήταν κακή διαμόρφωση και μη ολοκληρωμένη κοπή. Όμως αυτές οι δυσκολίες εξαλείφθηκαν αφού ήδη κάποιες κατασκευαστικές εταιρείες εργαλειομηχανών Water-Jet έκαναν πολύ μεγάλες προόδους στην βελτίωση της κοπής και πολύ ευκολότερο τον έλεγχο.

2.4 Συνθήκες κατεργασίας με Water-Jet Machining

Σημαντικές μεταβλητές που επηρεάζουν την κατεργασία είναι το βάθος κοπής, η πίεση, ο ρυθμός δεισδυσσης, ο ρυθμός ροής του λειαντικού, ο τύπος και το μέγεθος του κόκκου και η διάμετρος της δέσμης νερού. Το σχήμα 2.3α δείχνει τις μεταβολές του βάθους κοπής, ανάλογα με την πίεση του υγρού για έξι διαφορετικές τιμές ροής του λειαντικού μέσου (1, 2, 3, 4, 5, 6). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα αυτό, το βάθος κοπής αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με την πίεση μέχρι η πίεση να φτάσει την τιμή 40 k.s.i. ή 0,28 MPa. Αντίστοιχα στο σχήμα 2.3β φαίνεται η μεταβολή του βάθους κοπής σε σχέση με την ταχύτητα, έχοντας ως σταθερές την πίεση, το μέγεθος κόκκου και ως μεταβλητές τη διάμετρο της δέσμης του νερού και το ρυθμό ροής του AWJ. Παρατηρείται ότι το βάθος κοπής μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής και αυτό οφείλεται στο ότι η πίεση μειώνεται καθώς η δέσμη νερού προχωρά στο βάθος του τεμαχίου, λόγω ανάπτυξης δυνάμεων αντίστασης. Στο σχήμα 2.3γ παρουσιάζονται αντίστοιχα αποτελέσματα αλλά στην προκειμένη περίπτωση η κοπή γίνεται με μεταβλητή πίεση ενώ η διάμετρος του ακροφυσίου και ο ρυθμός ροής του abrasive παραμένουν σταθερά. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται η μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με την μεταβολή της πίεσης της δέσμης του νερού και του βάθους κοπής.



Σχήμα 2.3 : Αλληλεπίδραση παραμέτρων της κατεργασίας όπως η ταχύτητα της δέσμης, το βάθος κοπής και η πίεση

2.5 Συναγωνισμός

Η κοπή με νερό με λειαντικά σωματίδια μπορεί να κατεργαστεί πολλά υλικά τα οποία το Laser δεν μπορεί, όπως το αλουμίνιο και ο χαλκός. Δεν καταπονεί το κομμάτι και κατά συνέπεια δεν προκαλεί θερμική διάχυση ή σκλήρυνση του υλικού. Οι μηχανές ακρίβειας με νερό και λειαντικά σωματίδια, μπορούν να εξασφαλίσουν ίδιες ή και μεγαλύτερες ανοχές από την κοπή με Laser, ενώ οι τιμές αγοράς αυτών των μηχανών είναι πολύ μικρότερες. Η χρήση μιας τέτοιας μηχανής είναι πολύ πιο ασφαλής σε σχέση με αυτής της κοπής με Laser, όπου μπορεί να υπάρξουν προβλήματα με καμένα δάκτυλα, επιβλαβή αέρια ή φωτιές. Η κοπή με νερό και λειαντικά σωματίδια, ενώ εμφανίζει τα ίδια αποτελέσματα με το Laser στα λεπτά τεμάχια, στα τεμάχια με μεγαλύτερο πάχος εμφανίζει ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης δεν χάνει την εστίαση της δέσμης ύδατος σε τραχείς επιφάνειες, ενώ επιτρέπει το στοίβαγμα στην τοποθέτηση των κομματιών, κάτι που τα Laser λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών δεν το επιτρέπουν. Σε σχέση με την ηλεκτροδιάβρωση (EDM), η κοπή με δέσμη ύδατος και λειαντικά σωματίδια είναι πιο γρήγορη, μπορεί να επεξεργαστεί σχεδόν οποιοδήποτε υλικό, δε χρειάζεται αρχικές τρύπες για να ξεκινήσει, δε θερμαίνει την επιφάνεια που κατεργάζεται, αγνοεί τις ανωμαλίες των επιφανειών των υλικών οι οποίες προκαλούν βραχυκύκλωμα στην ηλεκτρική εκκένωση, δεν προκαλεί την εμφάνιση ζωνών επηρεασμένων από θερμοκρασιακές αλλαγές και επεξεργάζεται μεγαλύτερα σε διάσταση κομμάτια. Σε σχέση με τις παραδοσιακές μηχανουργικές κατεργασίες, στη μέθοδο κοπής με δέσμη ύδατος η εγκατάσταση και η τοποθέτηση των κατεργαζόμενων τεμαχίων, καθώς επίσης και το καθάρισμα όταν τελειώσει η κατεργασία είναι πολύ γρηγορότερα, ενώ πιο εύκολος είναι ο προγραμματισμός της καθοδήγησής της. Στην κατεργασία με νερό δε χρειάζεται να γίνει αλλαγή εργαλείων ενώ το κοπτικό εργαλείο δε φθείρεται τόσο πολύ όσο στις παραδοσιακές μηχανουργικές κατεργασίες, ιδιαίτερα όσον αφορά την κατεργασία πολύ σκληρών υλικών.

2.6 Στοιχεία κόστους

Το κόστος ενός τυπικού συστήματος Abrasive jet με όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό, κυμαίνεται από 20 ως 50 εκατομμύρια δρχ. περίπου. Οι τιμές όμως κυμαίνονται ανάλογα στις εταιρίες που χρησιμοποιούν το σύστημα κοπής με δέσμη ύδατος με λειαντικό μέσο. Η εργασία αντίστοιχα κοστολογείται ανάλογα με το χρόνο κατεργασίας του κομματιού και ανάλογα με το πόσο θα κόστιζε το κομμάτι αν γινόταν με συμβατική κατεργασία. Συνήθως το κόστος κυμαίνεται από 25000 ως 35000 δρχ. την ώρα.

2.7 Τεχνολογία της Κατεργασίας WJM

Η κατεργασία κοπής με δέσμη νερού μπορεί να κόψει οποιοδήποτε υλικό το οποίο μπορεί να έχει μικρή σκληρότητα, σε αντίθεση με τη δέσμη νερού που εμπλουτίζεται με λειαντικό η οποία αντιμετωπίζει δυσκολία στην κοπή μαλακών υλικών. Όλα τα μέταλλα, πλαστικά, συνθετικά, μάρμαρα, γρανίτης κ.λπ. μπορούν να κοπούν. Το πάχος των κατεργαζόμενων τεμαχίων περιορίζεται μόνο από το μέγεθος της μηχανής. Για ορισμένα υλικά και για κάποιο πάχος, μπορεί μια άλλη μέθοδος κοπής (συμβατική ή μη) να είναι πιο οικονομική. Επιλογή της καταλληλότερης μεθόδου γίνεται σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν κοινά πλεονεκτήματα της κοπής με δέσμη ύδατος με τις υπόλοιπες μεθόδους, όπως καλύτερη ποιότητα επιφάνειας, μη σκλήρυνση του μετάλλου, μη παραμόρφωση ή παραποίηση και δυνατότητα κοπής εύθραυστων υλικών, όπως το γυαλί και η πέτρα χωρίς τη δημιουργία θρυμμάτων.

Επειδή το σύστημα κοπής με δέσμη ύδατος είναι ένα «ελαστικό εργαλείο» είναι παράξενο πως μπορεί να έχει τόσο έντονη δράση. Σε κόψιμο ευθείας γραμμής αυτό μεταφράζεται σε «χάσιμο χρόνου», ή αλλιώς καθυστέρηση. Αυτή η καθυστέρηση συνήθως αγνοείται, όμως είναι σημαντική όταν το κόψιμο φτάνει σε γωνία. Όσο η δέσμη πλησιάζει τη γωνία τότε κρίνεται απαραίτητο να χαμηλώνει ο ρυθμός, έτσι ώστε ο πάτος της δέσμης να μπορέσει να πιάσει την κορυφή και να είναι κάθετη στο υλικό. Αν δεν κατέβει ο ρυθμός θα δημιουργηθεί στην πραγματικότητα μια άσχημη γωνία. Αν επιταχυνθεί η δέσμη γρήγορα όταν εξέρχεται από την γωνία, τότε η δέσμη θα "κλωστήσει" πίσω και θα καταστραφεί το τεμάχιο. Εξελιγμένα συστήματα αντισταθμίζουν αυτή την συμπεριφορά αυτόματα, για αυτό και λέμε ότι ο προγραμματισμός αυτών των συστημάτων είναι εύκολος.

Το πάχος του κατεργαζόμενου υλικού επηρεάζει την κατεργασία μια και όσο μεγαλώνει το πάχος του υλικού, τόσο πιο δύσκολος είναι ο έλεγχος της δέσμης που εξέρχεται. Τα σκληρότερα υλικά εκτίθενται περισσότερο σε κωνοποίηση η οποία συμβάλλει σημαντικά στο να καθοριστεί το είδος των ανοχών που μπορεί να επιτευχθεί στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Επειδή σαν κοπτικό εργαλείο που δρα στο κατεργαζόμενο τεμάχιο είναι βασικά η διάμετρος της δέσμης ύδατος, η οποία λειτουργεί σαν ένα «ελαστικό εργαλείο», η δέσμη έχει μια καθυστέρηση από τη στιγμή που αρχικά εισδύει στο υλικό μέχρι τη στιγμή που εξέρχεται από το υλικό. Προφανώς, όσο πιο ακριβέστερα γίνει η τοποθέτηση της δέσμης τόσο με πιο μεγάλη ακρίβεια θα κατεργαστεί το κομμάτι και σε αυτό παίζει πού σημαντικό ρόλο η ακρίβεια της τράπεζας του συστήματος. Οποιαδήποτε ξαφνική κίνηση (όπως αλλαγή στο ρυθμό τροφοδοσίας) θα προκαλέσει κάποιο μικρό σφάλμα. Έτσι, για υψηλότερη ακρίβεια είναι απαραίτητος ο έλεγχος της επιτάχυνσης καθώς επίσης και του ρυθμού τροφοδοσίας.

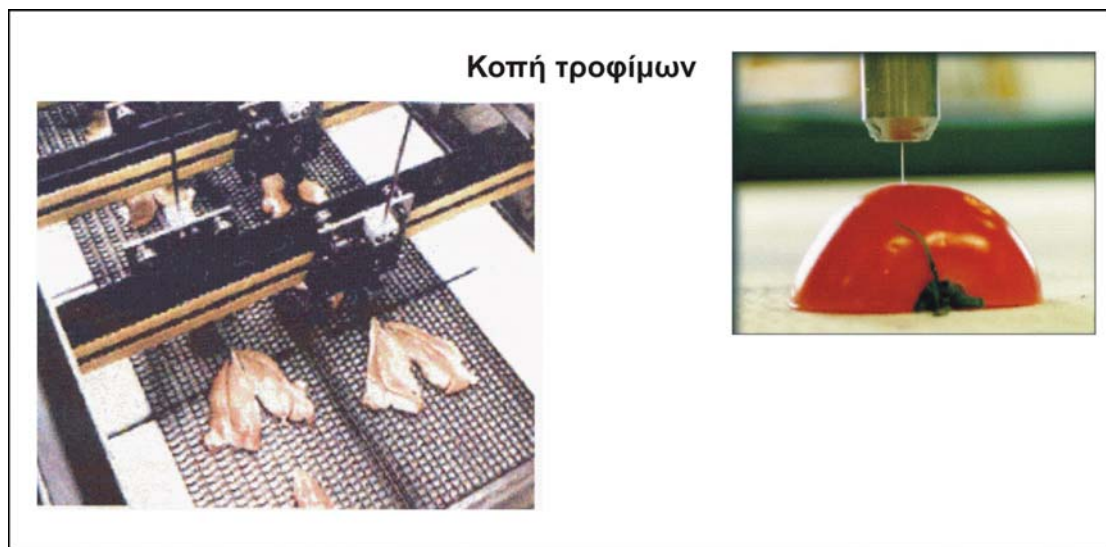
Τα ακροφύσια και ο σωλήνας ανάμιξης αποτελούν τα κρίσιμότερα στοιχεία της εργαλειομηχανής WJM και αυτά που φθείρονται γρηγορότερα. Τα ακροφύσια του συστήματος δέσμης ύδατος είναι συνήθως από διαμάντι. Το διαμάντι μπορεί να ραγίσει

ή να βουλώσει. Αν συμβούν αυτά θα είναι εξ' αιτίας της εισόδου βρώμικου νερού στο ακροφύσιο. Αυτό εύκολα μπορεί να αποφθεχθεί με την χρήση φίλτρου. Το διαμάντι μπορεί εύκολα να αντικατασταθεί σε 2 με 10 λεπτά περίπου και δεν έχει μεγάλο κόστος. Παρά τον απλό σχεδιασμό τους, τα ακροφύσια αυτά μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα. Το κυρίως πρόβλημα δεν είναι η ζωή του στομίου, αλλά η διάρκεια ζωής του σωλήνα ανάμιξης. Τα στόμια είναι φτηνά και διαρκούν πολύ περισσότερο (3 έως 5 φορές) από ότι οι σωλήνες ανάμιξης. Επιπλέον το στόμιο τυπικά αποτυγχάνει όταν έχουν συσσωρευτεί ψήγματα ορυκτών (τα οποία απομακρύνονται εύκολα) ή από βρομιά. Είναι δύσκολο να πούμε πότε ένας σωλήνας έχει φθαρεί τελείως, αλλά όσο φθείρεται γίνεται ένα κοπτικό εργαλείο λιγότερο αποτελεσματικό (και αν αρχίσει να φθείρεται, ο ρυθμός φθοράς επιταχύνεται). Για ακριβή εργασία ένας καινούργιος σωλήνας αποδίδει καλύτερα από ένα χρησιμοποιημένο. Η διάρκεια ζωής του εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η εσωτερική διάμετρος του σωλήνα ανάμιξης καθορίζει πόσο γρήγορα θα φθαρεί, τι ακρίβεια κοπής μπορεί να επιτύχει καθώς και πόσο γρήγορα μπορούμε να κόψουμε. Επίσης σχετίζεται και με την διάμετρο του πλάτους κοπής. Το μήκος του σωλήνα επιδρά στην ικανότητα εστίασης του ακροφυσίου. Γενικά, μεγάλο μήκος σωλήνα έχει καλύτερη εστίαση, όποτε και επιτρέπει ελαφρώς μεγαλύτερη ακρίβεια.

2.8 Εφαρμογές της Κατεργασίας WJM

Η κατεργασία κοπής με νερό, με ή χωρίς λειαντικά σωματίδια, βρίσκει σήμερα πολλές εφαρμογές, ιδιαίτερα στην βιομηχανία τροφίμων, την αυτοκινητοβιομηχανία, όπως και γενικά στην βιομηχανία κατασκευών.

Η τεχνολογία της κοπής με υψηλή πίεση χρησιμοποιείται κυρίως στο τεμάχισμα και το μοίρασμα του φαγητού, που είναι και μια από τις παλιότερες εφαρμογές (βλ. [σχήμα 2.4](#)) στην τεχνολογία τροφίμων. Κρέατα, πουλερικά, ψάρια, πίτες, κατεψυγμένα, ακόμα και σοκολάτες, κόβονται σήμερα με υψηλής πίεσης water jet. Όταν τεμαχίζεται το αντικείμενο με water jet, δε λαμβάνει χώρα καμία μετάδοση βακτηριδίων ούτε νεκρός χρόνος για ακόνισμα, όπως συμβαίνει με τα μαχαίρια. Η δέσμη του water jet κόβει μια πολύ λεπτή τομή σε απίστευτη ταχύτητα.



Σχήμα 2.4 : Water-jet στη βιομηχανία τροφίμων

Η κοπή με νερό στη βιομηχανία αυτοκινήτων χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του εβδομήντα. Η κοπή με νερό χρησιμοποιείται για να κοπεί μια ευρεία γκάμα από εσωτερικά και εξωτερικά μέρη φινιρίσματος αυτοκινήτων. Χρησιμοποιούμενη με ρομπότ με αρθρώσεις η κοπή με νερό μπορεί να χρησιμεύσει ως μια πολλαπλών αξόνων, ευέλικτη και συμφέρουσα διαδικασία για το κόψιμο ποικίλων υλικών στη βιομηχανία αυτοκινήτων, μια και τα συστήματα κοπής με νερό με αρθρώσεις μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα στην παραγωγική διαδικασία. Επιπρόσθετα τα συστήματα αυτά παρέχουν ευκολίες και ευελιξία στη χρήση τους που άλλες ανταγωνιστικές διαδικασίες δεν παρέχουν. Τέτοια συστήματα κοπής με νερό αυξάνουν την παραγωγικότητα με μια πιο καθαρή, πιο ασφαλή και πιο εύστοχη λύση για κοπή χωρίς ανάπτυξη θερμοκρασιών.

Εκτός από την κοπή, η αυτοκινητοβιομηχανία χρησιμοποιεί το water-jet για καθαρισμό επιφανειών. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα καθαρισμού κοπής με νερό χρησιμοποιεί τεχνολογία άντλησης δέσμη ύδατος σε πίεση 40000 psi η οποία είναι πίεση από τις υψηλότερες στην βιομηχανία. Η χαμηλή ποσότητα του νερού παράγει λιγότερη δύναμη αντίδρασης από αλλά συμβατικά συστήματα καθαρισμού με νερό. Ένα πρωταρχικό πλεονέκτημα καθαρισμού με water jet, συγκρινόμενο με εναλλακτικές μεθόδους όπως η αμμοβολή, το σμίλευμα και η καύση, είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον. Τα υπολείμματα μπογιάς απομακρύνονται εύκολα από το νερό για πέταμα, ενώ το νερό μπορεί να στραγγιστεί χωρίς επιπρόσθετη επεξεργασία.

Οι βιομηχανίες αεροσκαφών χρησιμοποιούν εργαλειομηχανές πολλαπλών διαδικασιών, που μπορούν με τη χρήση της κοπής με νερό να κόψουν, να τρυπήσουν, να χαράξουν ή να καθαρίσουν ένα τεμάχιο. Πολλά από τα μέρη επιβατικών αεροσκαφών μπορούν να κοπούν μέσω της κοπής με νερό (βλ. [σχήμα 2.5](#)). Τα εργαλεία κοπής με νερό πραγματοποιούν μια ποικιλία εργασιών που περιλαμβάνει κοπή, χάραγμα, φινίρισμα των άκρων και τρύπημα, κόβοντας σε οποιαδήποτε διεύθυνση, γύρω από μικρές γωνίες, έτσι ώστε το τελικό τεμάχιο να παράγεται με ελάχιστο ή καθόλου φινίρισμα με το χέρι.



Σχήμα 2.5 : Water-jet στην αεροπορική βιομηχανία

Η κοπή με νερό απομακρύνει τα σπρέι, τα σύνθετα υλικά και αλλά καλύμματα από εξαρτήματα μηχανών αεροπλάνων. Η κοπή με νερό σε υψηλή πίεση απομακρύνει τα στρώματα βρωμιάς χωρίς να καταστρέφει το βασικό υλικό ή να καταπονεί τα τεμάχια.

Η κοπή με νερό με σωματίδια τριβής χρησιμοποιείται επίσης και για την κοπή λίθων και πλακιδίων σε όλο τον κόσμο. Η μεγαλύτερη χρήση μηχανημάτων κοπής λίθων και πλακιδίων μπορεί να βρεθεί γύρω από τη Μεσόγειο, τη Βόρειο Αφρική, τη Νότια Ευρώπη όπως επίσης και στη Βόρεια Αμερική. Η κοπή με νερό με λειαντικά σωματίδια, κόβει περίτεχνα ή απλά σχήματα για ψηφιδωτά. Αυτό συμβαίνει γιατί δίνεται η δυνατότητα να κοπούν περίπλοκα σχέδια σε λίθους και πλακίδια σε υψηλές ταχύτητες χωρίς το ρίσκο θραύσης. Το abrasive water jet κόβει οποιαδήποτε πέτρα ή πλακάκι χωρίς αλλαγή εργαλείου, ενώ μπορεί να τρυπήσει τη δική του τρύπα εκκίνησης. Το abrasive water jet δε μεταδίδει θερμότητα ή επιφανειακές δυνάμεις στην πέτρα ή στο πλακάκι και έτσι το υλικό διατηρεί την αρχική του εμφάνιση και δύναμη, ενώ μπορεί να κοπεί σε οποιοδήποτε σχέδιο.

2.9 Διεθνής έρευνα στο Water-Jet Machining

Με το πέρασμα στον 21^ο αιώνα, η κατάσταση στις μηχανουργικές κατεργασίες και γενικά στις κατεργασίες διαμόρφωσης προϊόντων άλλαξε ριζικά. Νέες τεχνολογίες δημιουργήθηκαν αντικαθιστώντας σε πολλές περιπτώσεις τις παραδοσιακές τεχνικές. Μία από αυτές τις τεχνολογίες, είναι και η κοπή με νερό υψηλής πίεσης με ή χωρίς λειαντικά μέσα.

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

Σχήμα 2.6 : Περιοχές και φορείς έρευνας στην κατεργασία AWJ

Σήμερα, η κατεργασία AWJ βρίσκει εφαρμογές σε κατεργασίες ευρέως φάσματος 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, τα σύνθετα υλικά κ.λπ.. Οι υψηλές ταχύτητες και η δυνατότητα κατεργασίας σε πολλές κατευθύνσεις παρέχουν τη δυνατότητα κοπής σύνθετων μορφών ακόμη και μη επίπεδων επιφανειών, σε καθορισμένες ανοχές χωρίς δημιουργία θερμοκρασιακών τάσεων ούτε μηχανικής παραμόρφωσης των κατεργαζόμενων τεμαχίων. Η προσαρμοστικότητα της κατεργασίας αυτής, την κάνει ικανή εκτός από απλή κατεργασία κοπής τροχιάς, να είναι ικανή να κατεργαστεί τεμάχια σαν τις παραδοσιακές μεθόδους, όπως η διάτρηση, το φραιζάρισμα, η τόρνευση, η σπειρωτόμηση, ο καθαρισμός κ.λπ..

Η βασική έρευνα και ανάπτυξη στην περιοχή της κατεργασίας AWJ αναπτύχθηκε κυρίως στις Ηνωμένες Πολιτείες και έχει προαχθεί ιδιαίτερα από 5 Πανεπιστημιακά Εργαστήρια και αναλυτικά από το 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 η οποία είναι η Quest Integrated Inc.

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 αποτελέσματά της κυρίως για κάλυψη εσωτερικών αναγκών. Από τα παραπάνω αναφερόμενα Πανεπιστήμια, το University of Missouri-Rolla διεξάγει έρευνα κυρίως για την περιοχή της εξόρυξης μεταλλευμάτων και της κοπής βράχων, ενώ τα υπόλοιπα Πανεπιστήμια ασχολούνται κυρίως με την εφαρμογή της κατεργασίας AWJ στις διεργασίες διαμόρφωσης υλικών. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζονται οι διαφορετικές ερευνητικές δραστηριότητες που αναπτύσσονται στα Πανεπιστήμια αυτά.

Εκτός φυσικά από τα παραπάνω Πανεπιστήμια της Αμερικής, σήμερα αρκετά Ευρωπαϊκά Πανεπιστήμια και Ερευνητικά Ινστιτούτα, όπως και Πανεπιστήμια της Αυστραλίας ασχολούνται ερευνητικά με το Water-Jet. Ένα από αυτά είναι και το Πανεπιστήμιο Swinburne της Αυστραλίας και το Ερευνητικό Ινστιτούτο I.R.I.S.. Παρ' όλα αυτά η βασική έρευνα στην περιοχή του AWJM αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1990 στις Η.Π.Α. και είχε τέσσερις διαφορετικές κατευθύνσεις :

Έρευνα για την κατανόηση του μηχανισμού της κατεργασίας
Έρευνα προσανατολισμένη άμεσα στις εφαρμογές στις κατεργασίες
Έρευνα προσανατολισμένη στα συστήματα, ευαισθησία, παρακολούθηση και έλεγχο της κατεργασίας
Ανάπτυξη νέων εφαρμογών – παραλλαγών για κάλυψη μεγαλύτερου φάσματος εφαρμογών της μεθόδου

Η έρευνα και ανάπτυξη με στόχο την κατανόηση του μηχανισμού της κατεργασίας περιέχει επιμέρους στόχους, όπως η διερεύνηση του μηχανισμού της φθοράς και το μοντέλο διάβρωσης, το φαινόμενο απώλειας ενέργειας και το χαρακτηρισμό των επιφανειών.

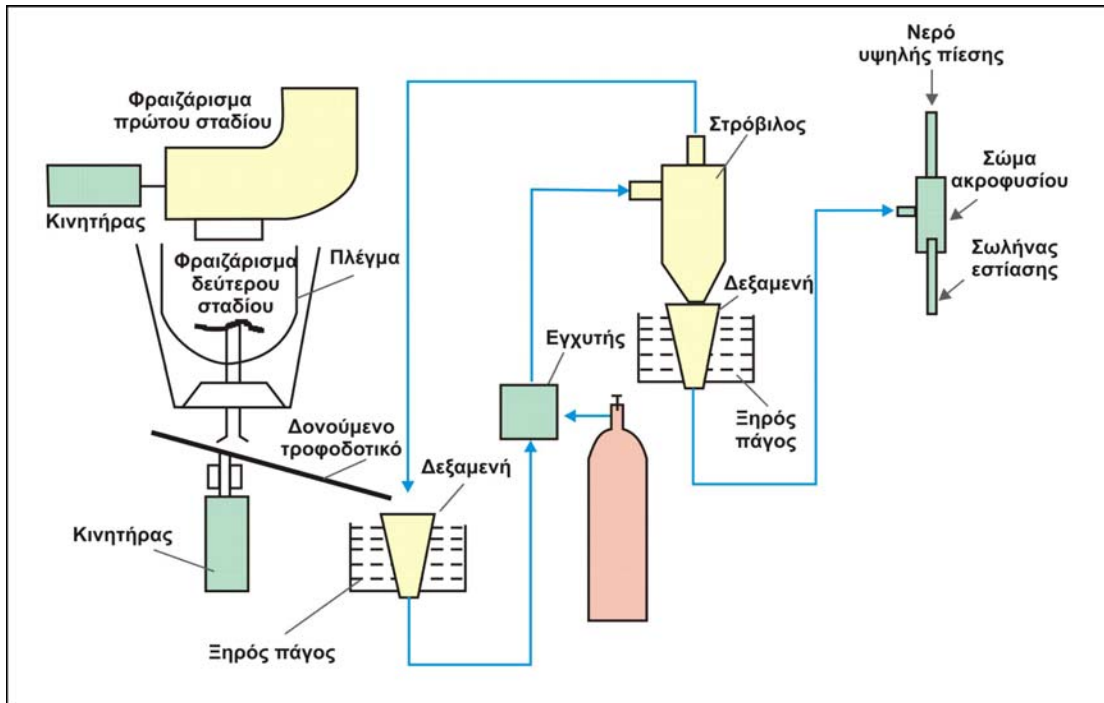
Η εξέταση και η έρευνα του μηχανισμού της φθοράς με διάβρωση λόγω του AWJM έχει επικεντρωθεί σε αναλυτικά μοντέλα, σε μοντέλα οπτικοποίησης αλλά και στατιστικής ανάλυσης. Τα αναλυτικά μοντέλα έχουν παραδοσιακά αναπτυχθεί με βάση τα μοντέλα του Finnie και του Bitter για την διάβρωση. Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζονται κλασσικά τέτοια μοντέλα που επικεντρώνονται στον προσδιορισμό του βάθους της τομής με AWJ.

Hashish	$\frac{cd_j}{2.5} \left(\frac{14m_a}{\pi u d_j^2 \rho_a} \right)^{2.5} \frac{V_a}{V_i}$	Ελατά υλικά (SCR)
Hashish	$\frac{1}{\frac{\pi d_f \sigma_f}{2(1-c)m_a(V_a - V_c)} + \frac{C_f}{d_f} \frac{V_a}{V_a - V_c}}$	Ελατά υλικά (RCR)
Kovacevic Mohan & Hirscher	$\frac{C \cdot p^{0.79} \cdot s^{0.0068} \cdot m_p^{0.1844}}{u^{0.5671}}$	Μοντέλο σταθερής παλινδρόμησης
Zeng and Kim	$\frac{N_m P_w^{1.25} m_w^{0.687} m^{0.343}}{CD_{0.618} u^{0.866}}$	Ασταθή υλικά
Chung, Geskin & Singh	$\frac{(p - p_c) \cdot m_p^{0.6}}{u \cdot b_k}$	Ελατά υλικά
Momber and Kovacevic	$p^\Phi \cdot \frac{d_f}{u} \cdot \int_{E_A}^{E_P} g(E_p) dE_p \cdot m_p^n$	Ελατά και ασταθή υλικά

Σχήμα 2.7 : Μοντέλα για την πρόβλεψη του βάθους διεύδυσης στην κοπή AWJ.

Συνολικά αναφέρεται πως η μελέτη του μηχανισμού της κατεργασίας περιλαμβάνει μέχρι σήμερα διαφορετικές προσεγγίσεις, όπως είναι η μοντελοποίηση της διάβρωσης, της αστοχίας του υλικού και το φαινόμενο απώλειας ενέργειας.

Η μελέτη αυτή έδωσε τη δυνατότητα στη συνέχεια, της έρευνας και προσέγγισης νέων καινοτόμων μεθοδολογιών εφαρμογής της τεχνολογίας κοπής με δέσμη νερού, όπως το Ice-Jet Machining, το Cryogenic Jet machining, τα υβριδικά συστήματα κατεργασιών και η στίλβωση και ο καθαρισμός με χρήση δέσμης νερού. Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται η δομή μίας μονάδας Ice Jet Machining που περιλαμβάνει και έγχυση των σωματιδίων πάγου.

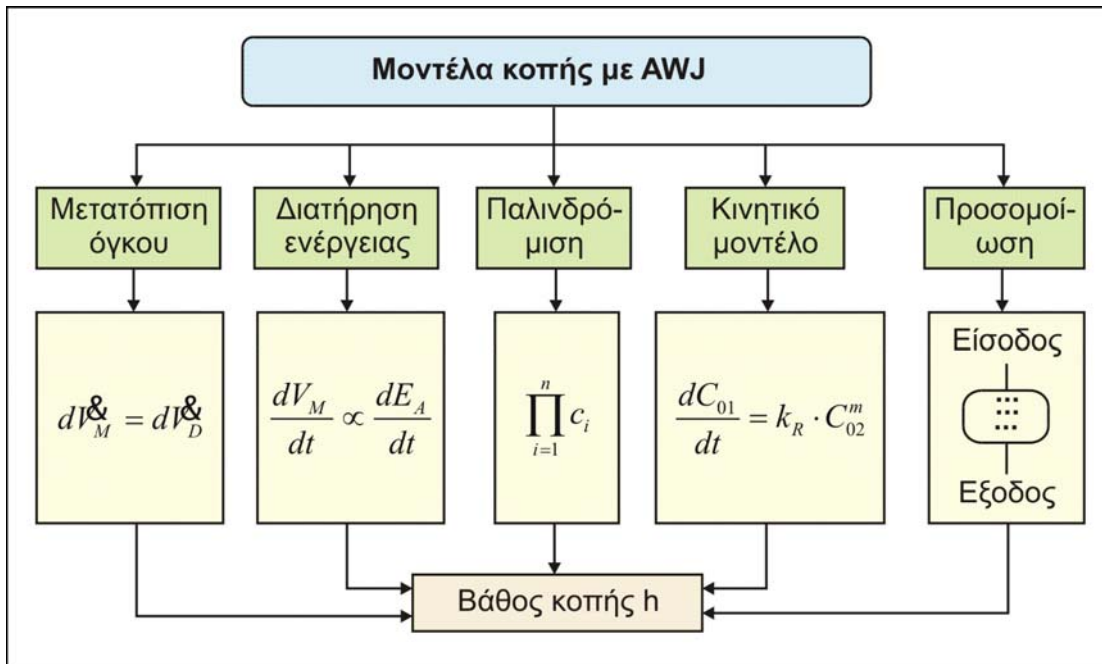


Σχήμα 2.8 : Ice-jet Machining

Με το πέρασμα των χρόνων διάφορα μοντέλα αναπτύχθηκαν για να περιγράψουν την διαδικασία κατεργασίας με τη χρήση δέσμης νερού σε υψηλή πίεση. Γενικά, αυτά τα μοντέλα ήταν κυρίως προσπάθειες να εκτιμηθεί το βάθος της τομής που μπορεί να επιτευχθεί σε διαφορετικά υλικά κάτω από διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας.

Τέτοια μοντέλα για τον υπολογισμό του βάθους της τομής σε κατεργαζόμενα υλικά ομαδοποιούνται κυρίως σε τέσσερις κατηγορίες που φαίνονται παρακάτω στο σχήμα 2.9 και που είναι :

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



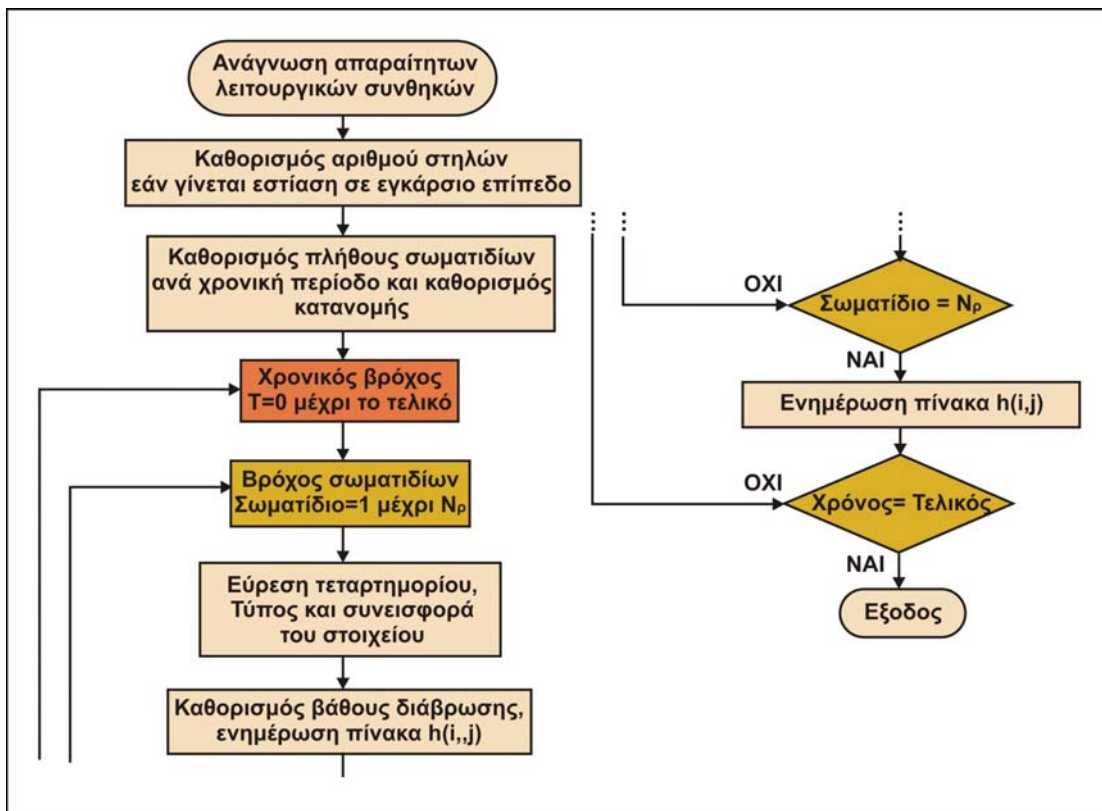
Σχήμα 2.9 : Μοντέλα για την προσομοίωση κοπής με δέσμη νερού υψηλής πίεσης (Water-jet)

Τα πρώτα τέσσερα μοντέλα χρησιμοποιούν μαθηματικές σχέσεις περιλαμβάνοντας επίσης διάφορες εμπειρικές σχέσεις και τελικά προσεγγίζουν το φαινόμενο. Τελευταίες ερευνητικές δραστηριότητες, περιλαμβάνουν αριθμητικές μεθόδους χωρίς όμως να υπάρχει προσέγγιση με πεπερασμένα στοιχεία, κάτι που αποτελεί και την καινοτομία της παρούσας πρότασης.

Στα αριθμητικά μοντέλα, ο **Mazuriewicz** αναπτύσσει μία μέθοδο βήμα προς βήμα υπολογισμού για να εκτιμήσει τον όγκο του υλικού που εκτοπίζεται από έναν απλό λειαντικό κόκκο στο Abrasive Water-Jet. Η δέσμη νερού χωρίζεται σε διάφορες στήλες και το υλικό “κόβεται” κατά στήλη.

Ο **Corcoran** (και άλλοι) ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο μοντέλο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για να εξομοιώσουν το μηχανισμό κοπής με AWJ. Η ταχύτητα του Abrasive Water-jet θεωρείται ότι ακολουθεί ένα έξι βαθμών πολώνυμο κατά τη διάμετρο της δέσμης ενώ ο ρυθμός παροχής της λειαντικής ουσίας θεωρείται ότι είναι σταθερός. Ο αλγόριθμος αυτός επιτρέπει διαφοροποιήσεις στο μέγεθος του λειαντικού κόκκου εξαιτίας της ανάμειξης που λαμβάνει χώρα. Το μοντέλο αυτό δίνει επιλογές για τη κατανομή του λειαντικού μέσου μέσα στη δέσμη ενώ για την προσομοίωση της κατεργασίας χρησιμοποιείται το μοντέλο διάβρωσης του **Finnie**. Η περιοχή κρούσης στο κατεργαζόμενο τεμάχιο διακριτοποιείται σε τέσσερα τετράγωνα και από πλήθος σειρών και στηλών.

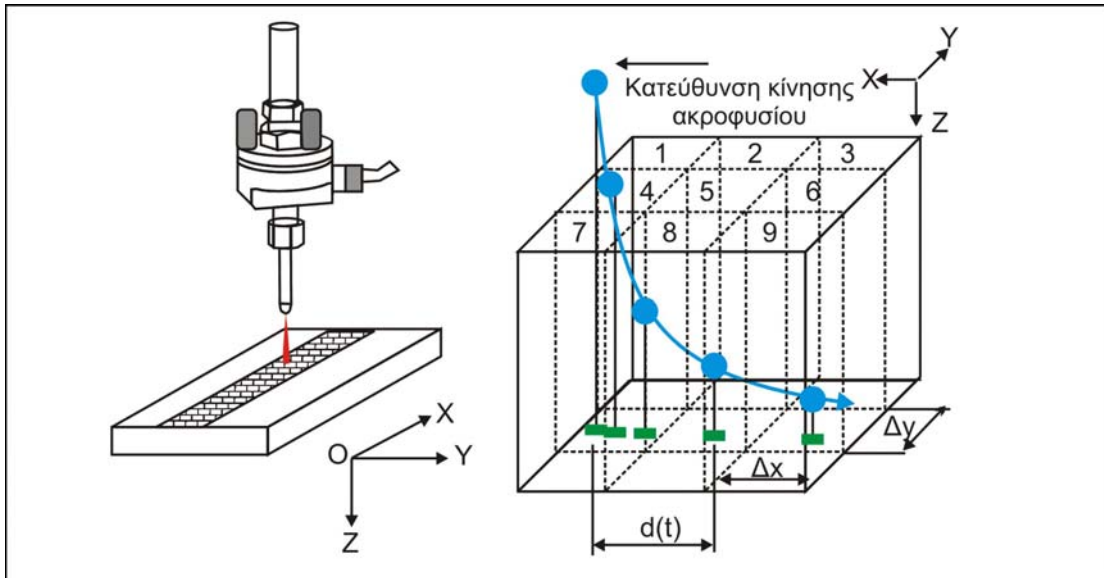
Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζεται η δομή του προγράμματος Fortran για τους υπολογισμούς του μοντέλου αυτού. Το πρόγραμμα αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ποιοτική εκτίμηση της επίδραση του ρυθμού ροής του λειαντικού μέσου, το χρόνο διεύδυσης της δέσμης κ.λπ.. Παρ’ όλα αυτά ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμών είναι πολύ μεγάλος ακόμη και για έναν χαμηλό πλήθος διακριτοποίησης.



Σχήμα 2.10 : Λογικό διάγραμμα προγράμματος FORTRAN για την προσομοίωση κατεργασίας AWJ

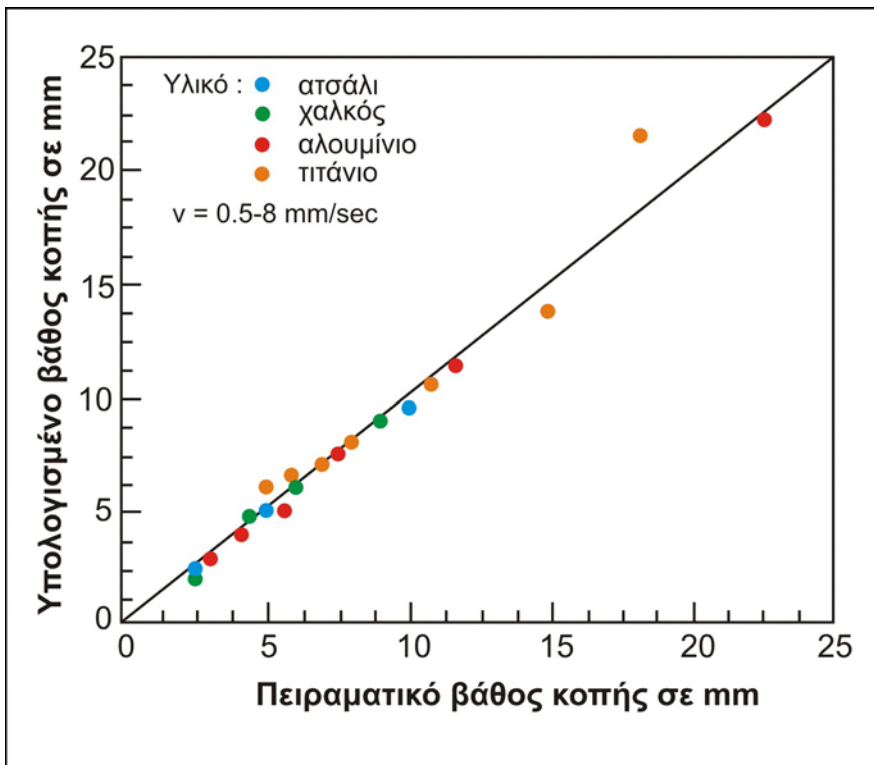
Οι **Yong** και **Kovacevic** ανέπτυξαν ένα αριθμητικό μοντέλο για το μηχανισμό του Abrasive Water-Jet που καλύπτει αρκετές από τις σημαντικές παραμέτρους της κατεργασίας. Στο μοντέλο αυτό τρία καρτεσιανά συστήματα συντεταγμένων συνδέονται με εξισώσεις μετασχηματισμού και περιγράφουν την κινηματική των λειαντικών κόκκων της δέσμης.

Στο σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η διακριτοποίηση της επιφάνειας που κατεργάζεται. Στο σχήμα επίσης παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο κάθε τμήμα της διακριτοποίησης λειτουργεί ως ‘κελί μνήμης’ για την καταγραφή των δεδομένων για την πρόβλεψη του βάθους τομής.



Σχήμα 2.11 : Μοντέλο των Yong - Konacevic

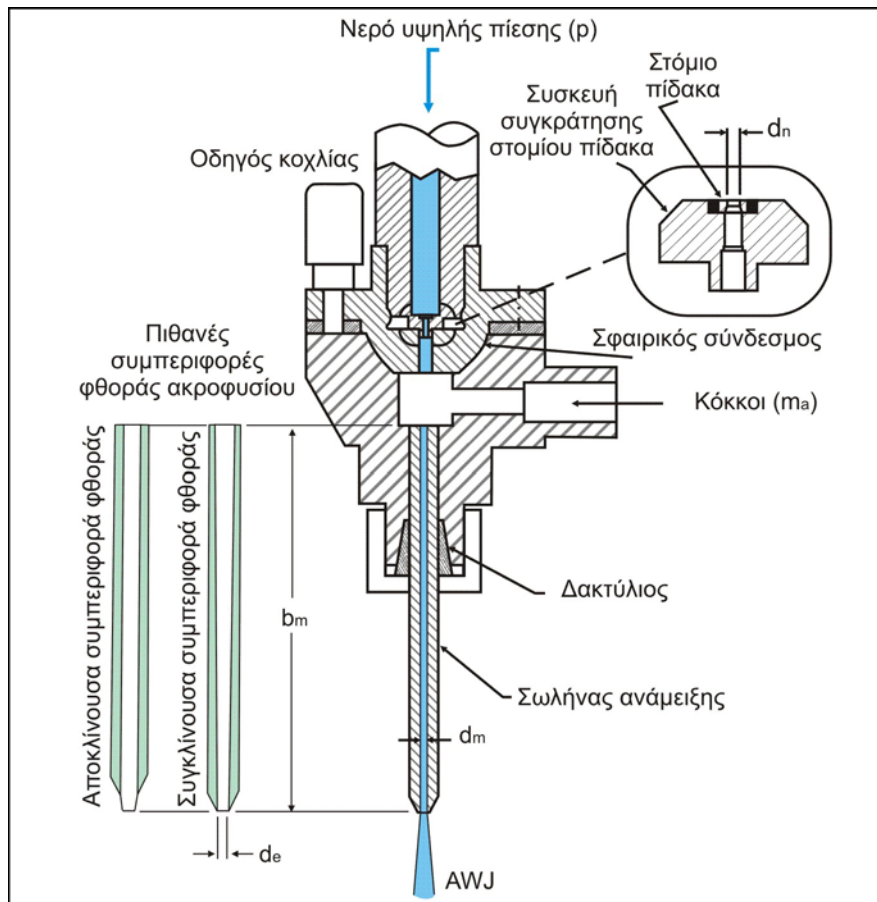
Το σχήμα 2.12 αντίστοιχα παρουσιάζει τη σύγκριση ανάμεσα στα θεωρητικά αποτελέσματα και τις πειραματικές μετρήσεις, που όπως παρουσιάζονται δείχνουν πολύ ικανοποιητική προσέγγιση.



Σχήμα 2.12

Εκτός από την προσομοίωση της κατεργασίας έχουν αναπτυχθεί μοντέλα και για την **αστοχία** εξαρτημάτων της εργαλειομηχανής που υποστηρίζει την κατεργασία και ειδικά για τον σωλήνα ανάμιξης μια και ο σωλήνας ανάμιξης σε ένα σύστημα Water-Jet αποτελεί το πιο κρίσιμο από άποψη αστοχίας εξάρτημα. Σε ένα σύστημα Abrasive Water-Jet η δέσμη ύδατος αναμιγνύεται με τη λειαντική ουσία και παράγει την δέσμη κατεργασίας η οποία προσεγγίζει σε ταχύτητα τα 900m/s.

Στο σχήμα 2.13 φαίνεται η δομή του ακροφυσίου για Abrasive Water-Jet, όπου διακρίνονται τα επιμέρους εξαρτήματά του. Τυπικά, η διάμετρος της δέσμης είναι περίπου 0.1 έως 0.5mm ενώ η διάμετρος του σωλήνα ανάμιξης είναι περίπου 2.5 έως 5 φορές μεγαλύτερη. Συνήθως για να είναι αποτελεσματική η δέσμη, πρέπει ο λόγος της διαμέτρου της προς την διάμετρο του σωλήνα ανάμιξης να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Η ταχύτητα αντίστοιχα των σωματιδίων του λειαντικού εξαρτάται από τους ρυθμούς ροής του νερού και του λειαντικού, και μπορεί να φτάσει το 80% από την ταχύτητα του νερού. Αυτή η πολύ υψηλή ταχύτητα που αναπτύσσεται μέσα στο στενό χώρο του σωλήνα ανάμιξης, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία έντονου διαβρωτικού περιβάλλοντος που οδηγεί σε αστοχία τον σωλήνα ανάμιξης.



Σχήμα 2.13 : Φθορά του ακροφυσίου στο Abrasive Water-jet Machining

Στο σχήμα 2.13 φαίνονται οι δύο μορφές αστοχίας που παρουσιάζονται και που διαμορφώνουν την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα σε αποκλίνουσα ή συγκλίνουσα μορφή. Η αποκλίνουσα

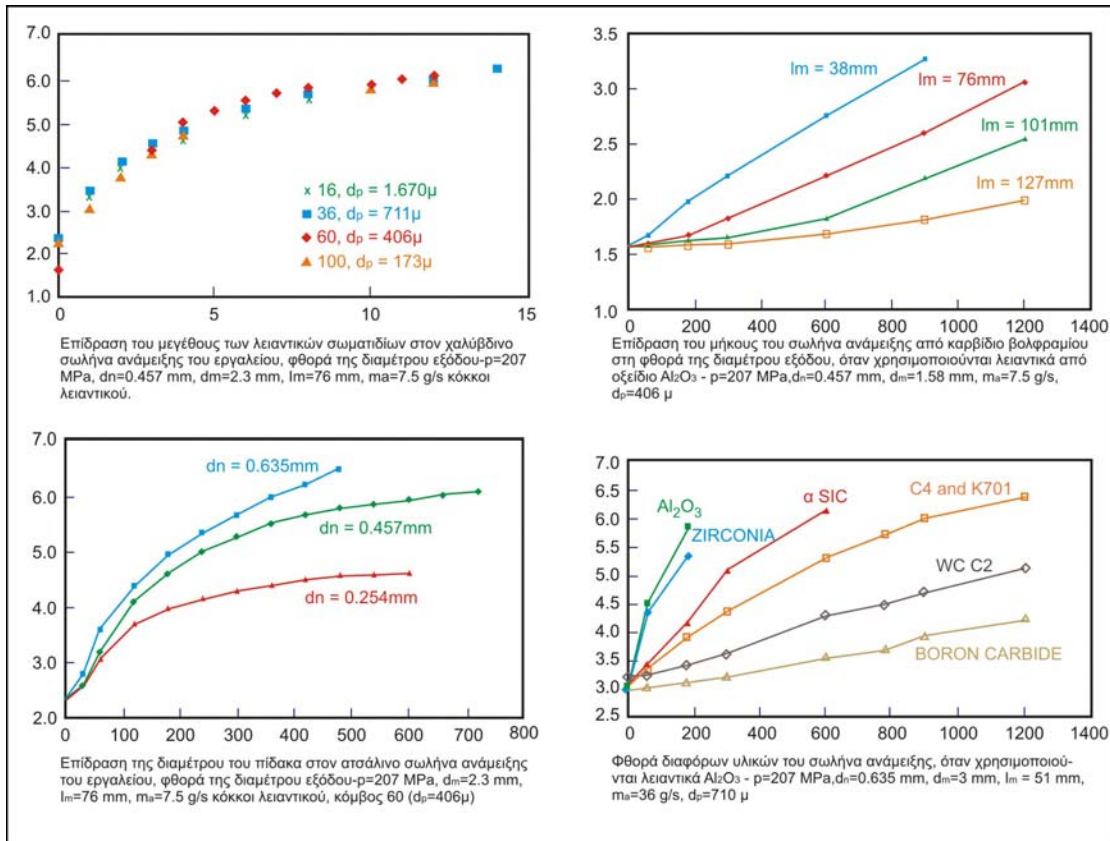
μορφή παρουσιάζεται όταν το λειαντικό μέσο είναι πολύ σκληρότερο από το υλικό του σωλήνα ανάμιξης ενώ η συγκλίνουσα μορφή παρουσιάζεται στην αντίστροφη περίπτωση. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η αστοχία αυτή του σωλήνα ανάμιξης, έχει επίπτωση στα χαρακτηριστικά και την αποδοτικότητα της κοπτικής δέσμης.

Όπως διαφάνηκε, ο ρόλος του σωλήνα ανάμιξης στο AWJ, είναι παρόμοιος με τον ρόλο των κοπτικών εργαλείων στις παραδοσιακές μηχανουργικές κατεργασίες. Η μόνη διαφορά είναι ότι στο AWJ δεν υφίσταται επαφή του «εργαλείου» με το κατεργαζόμενο τεμάχιο, κάτι που συμβαίνει στις συμβατικές κατεργασίες. Η σοβαρότητα λοιπόν της συμπεριφοράς και της αστοχίας του σωλήνα ανάμιξης, οδήγησε στην έρευνα μεθόδων ανίχνευσης της αστοχίας αυτής που οι κυριότερες από αυτές παρουσιάζονται στο σχήμα 2.14.

Μέθοδοι άμεσης ανίχνευσης		
Υπερηχητική μέτρηση Εξέταση της φθοράς του ακροφυσίου στην κοπή AWJ	Λειτουργεί με τεχνική υπέρυθρων παλμών - αποκρίσεων Ενσωματωμένος ανιχνευτής κόπωσης στη μύτη του ακροφυσίου, κατασκευασμένος από αγώγιμο πηνία σε κεραμικό υπόστρωμα.	Kovacevic & Eviz [48] Kovacevic [49]
Μέθοδοι έμμεσης ανίχνευσης		
Οπτο-ηλεκτρική ανί- χνευση της διαμέτρου δέσμης του AWJ	Με χρήση συστήματος μηχανικής όρασης το οποίο αποτελείται από κάμερα CCD και πηγή φωτός λείζερ.	Kovacevic [50]
Οπτική παρακολούθη- ση του πλάτους kerf	Παρακολούθηση του πλάτους του kerf (γεωμετρικό σφάλμα) με κάμερα CCD.	Kovacevic & Eviz [48]
Παρακολούθηση ταλαντώσεων	Ανίχνευση της αλλαγής στην ταλάντωση του ακροφυσίου με χρήση επιταχυνσιόμετρου.	Kovacevic & Eviz [48]
Παρακολούθηση δυνάμεων	Προσδιορισμός της αντίδρασης στην περιστροφή του AWJ, η οποία οφείλεται στη στατική αντίδραση του κομματιού που υφίσταται κατεργασία.	Kovacevic & Eviz [48]
Ακουστική ανάλυση	Ο ήχος που παράχθηκε κατά τη ροή του WJ και του AWJ ήταν ανάλογος προς το εκάστοτε ακροφυσίου.	Kovacevic, Wang & Zhang [51]
Τεχνική υπέρυθρης ανίχνευσης	Φθορά του ακροφυσίου του AWJ, με βάση την τιμή της	Kovacevic, Mohan & Beardsley [47]
Στρατηγικές ελέγχου πραγματικού χρόνου		
Ανάλυση χρονικών σειρών	Μοντελοποίηση ARMA της δύναμης κατά την κοπή AWJ.	Kovacevic [50]
Ασαφής αναγνώριση	Αλγόριθμος βασισμένος στη θεωρία των ασαφών συνόλων με χρήση στατικής δύναμης.	Kovacevic & Zhang [52]
Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	Βασίζεται σε αλγόριθμο με χρήση ανάλυσης συχνοτήτων ηχητικών σημάτων.	Mohan, Kovacevic & Damarla [53]

Σχήμα 2.14 : Έρευνα στη φθορά του ακροφυσίου στην κατεργασία AWJ

Με τη βοήθεια των παραπάνω μεθόδων κατέστη δυνατός ο έλεγχος της συμπεριφοράς της αστοχίας του σωλήνα ανάμιξης και στη συνέχεια η έρευνα σχετικά με την επίδραση των διαφόρων κατασκευαστικών παραμέτρων του ακροφυσίου αλλά και των συνθηκών κοπής, πάνω στην αστοχία αυτή. Στο σχήμα 2.15 παρουσιάζεται η επίδραση τέτοιων χαρακτηριστικών, όπως είναι το μέγεθος των κόκκων της λειαντικής ουσίας, η διάμετρος του στομίου του ακροφυσίου κ.λ.π.



Σχήμα 2.15 : Επίδραση χαρακτηριστικών κατεργασίας στη φθορά του ακροφυσίου στην κατεργασία AWJ

Τέτοιες προσεγγίσεις στις μηχανουργικές κατεργασίες, έχουν τελικό στόχο την βελτιστοποίηση της κατεργασίας. Η βελτιστοποίηση αυτή χαρακτηρίζεται από έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων που καθορίζουν την αποτελεσματικότητα, την οικονομία και την ποιότητα της όλης διαδικασίας. Γενικά, οι παράμετροι αυτοί στην κοπή με Abrasive Water-jet κατηγοριοποιούνται ως εξής (βλέπε [σχήμα 2.16](#)) :

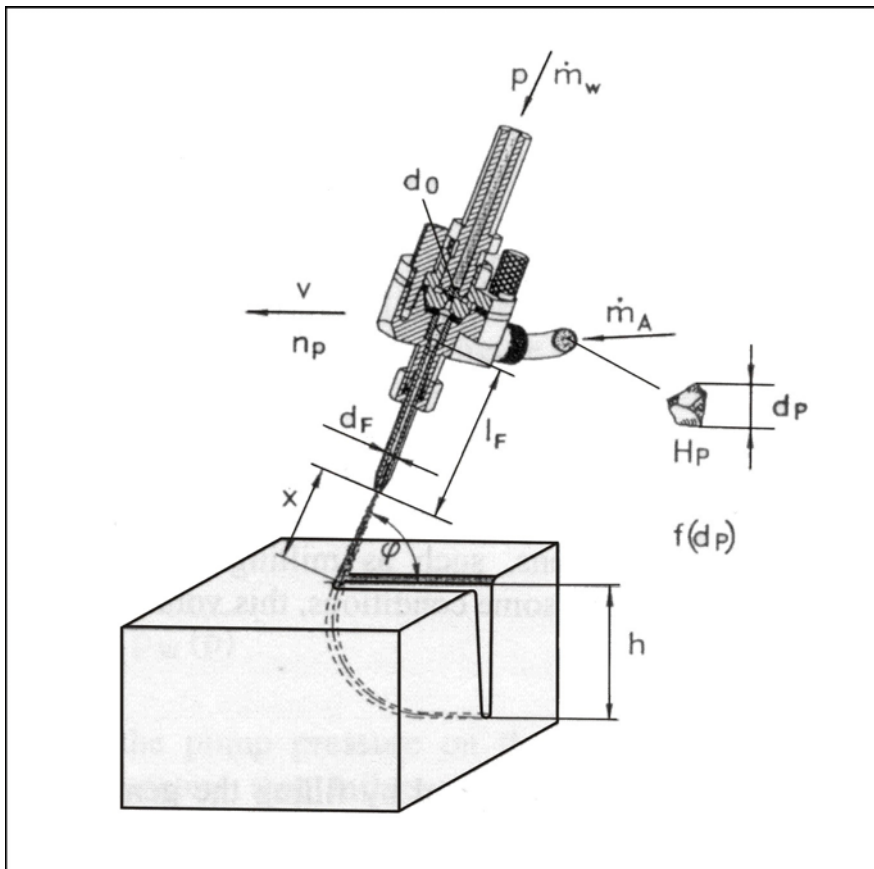
Υδραυλικοί παράμετροι : Πίεση αντλίας (p)
Διάμετρος στομίου ύδατος (d_0)

Παράμετροι κοπής : Ταχύτητα (v)
Αριθμός περασμάτων (n_p)
Απόσταση στομίου από τεμάχιο (x)
Γωνία κρούσης (ϕ)

Παράμετροι μίξης : Εξ. Διάμετρος σωλήνα ανάμειξης (d_F)
Μήκος σωλήνα ανάμειξης (l_F)

Παράμετροι λείανσης : Παροχή λειαντικού μέσου (m_A)
Διάμετρος κόκκου (d_p)
Κατανομή μεγέθους των κόκκων ($f d_p$)
Σχήμα του λειαντικού μέσου

Σκληρότητα λειαντικού μέσου
Δυνατότητα ανακύκλωσης του λειαντικού



Σχήμα 2.16 : Παράμετροι στο Abrasive Water-jet

Ένα από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης και βασικό κριτήριο επιτυχίας της κατεργασίας με Water-Jet αποτελεί η ποιότητα της επιφάνειας που κατεργάζεται. Οι μέχρι τώρα μελέτες γύρω από το θέμα της ποιότητας της παραγόμενης επιφάνειας, στηρίζονται σε πειραματικές κυρίως διαπιστώσεις.

Οι διαπιστώσεις αυτές δείχνουν μία πολύ σοβαρή υπεροχή της κατεργασίας του Water-Jet συγκριτικά με άλλες παραδοσιακές και μη μεθόδους. Ο παρακάτω Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τιμές τραχύτητας, μετρημένες μετά από κατεργασία με διαφορετικές μεθόδους σε κατεργαζόμενο τεμάχιο από κράμα τιτανίου.

Μέθοδος	Βάθος κοπής	Ra	Ry	Rq	Διασπορά
AWJ*	0,8	3,0	18,8	3,9	-0,5
	3,5	4,6	33,9	5,8	
Μετωπικό Φραιζάρισμα	0,8	0,4	2,3	0,6	-0,6
	3,5	0,7	4,5	0,9	

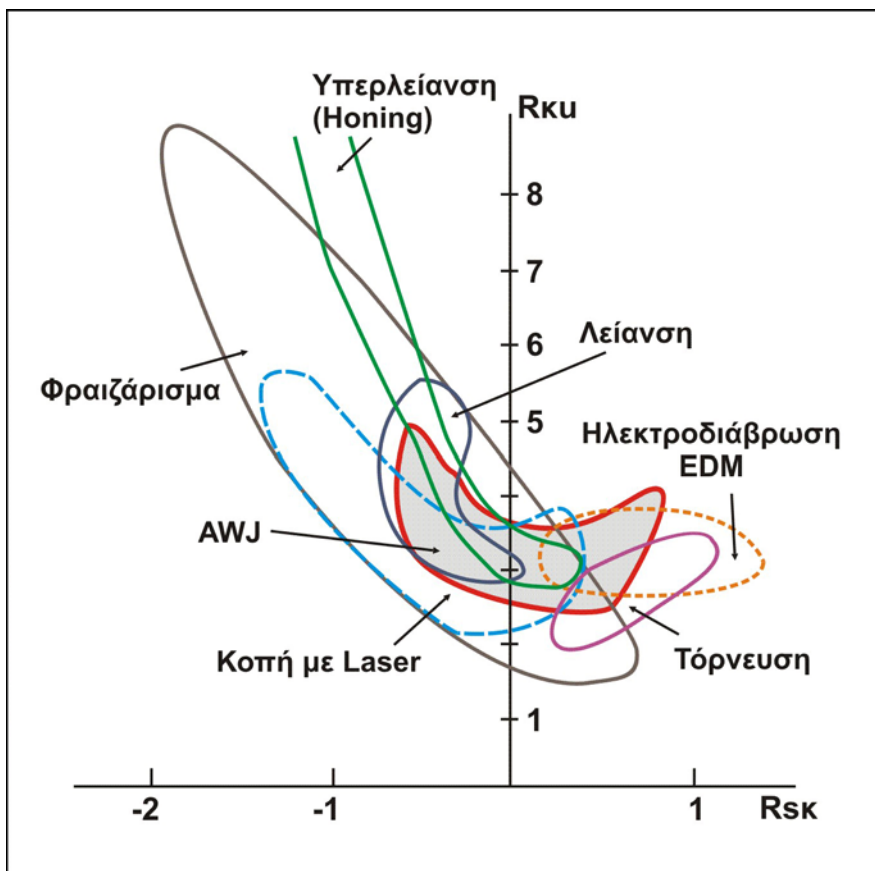
Λείανση	0,8	0,7	4,9	1,0	-0,3
	3,5	0,1	9,5	1,5	

* Abrasive Water-Jet : $p=207\text{Mpa}$, $x=2.5\text{mm}$, $v=0.7\text{mm/s}$, $m_A=10\text{g/s}$

Πίνακας 2.1 : Τιμές τραχύτητας για κατεργασία κραμάτων τιτανίου με διάφορες μεθόδους

Από τον Πίνακα 2.1, γίνεται φανερό πως ενώ οι τιμές τραχύτητας παρουσιάζονται πολύ μεγαλύτερες στο AWJ σε σχέση με τις άλλες δύο κατεργασίες αλλά για την αξιολόγησή τους πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το Water-Jet χρησιμοποιείται ταυτόχρονα και για εκχόνδριση και φινίρισμα.

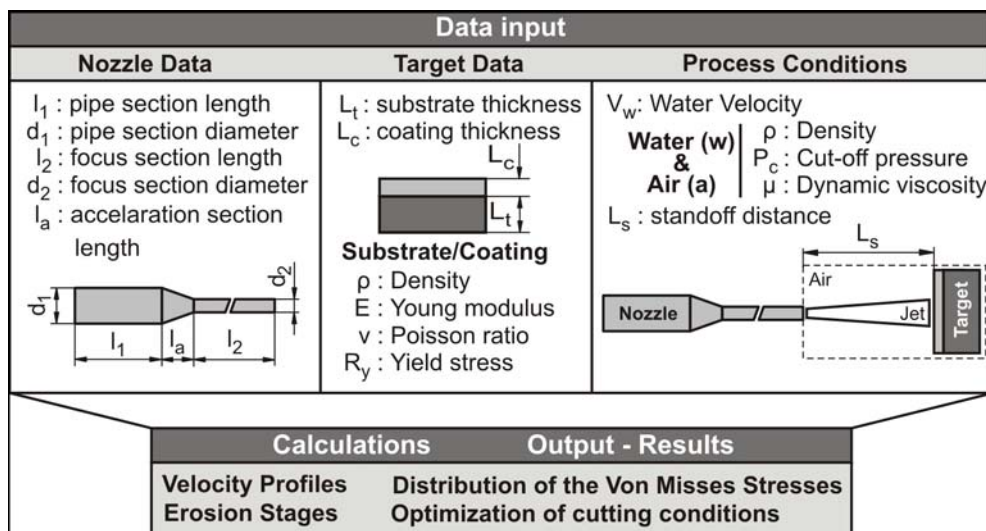
Για καλύτερη σύγκριση παρουσιάζεται στο σχήμα 2.17 το διάγραμμα ασυμμετρίας - κύρτωσης για διάφορες μηχανουργικές κατεργασίες. Το διάγραμμα συγκρίνει τις κατεργασμένες επιφάνειες από AWJ με αντίστοιχες κατεργασμένες από άλλες μηχανουργικές κατεργασίες, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η ασυμμετρία, η κύρτωση κ.λ.π.



Σχήμα 2.17 : Διάγραμμα κύρτωσης για διάφορες κατεργασίες

Από το παραπάνω διάγραμμα μπορεί κανείς να εκτιμήσει την σχεδόν ταύτιση της καμπύλης του AWJ με την λείανση και την ηλεκτροδιάβρωση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κατεργασία AWJ είναι ικανή να παράγει επιφάνειες με ποιότητα αντίστοιχη των δύο αυτών κατεργασιών.

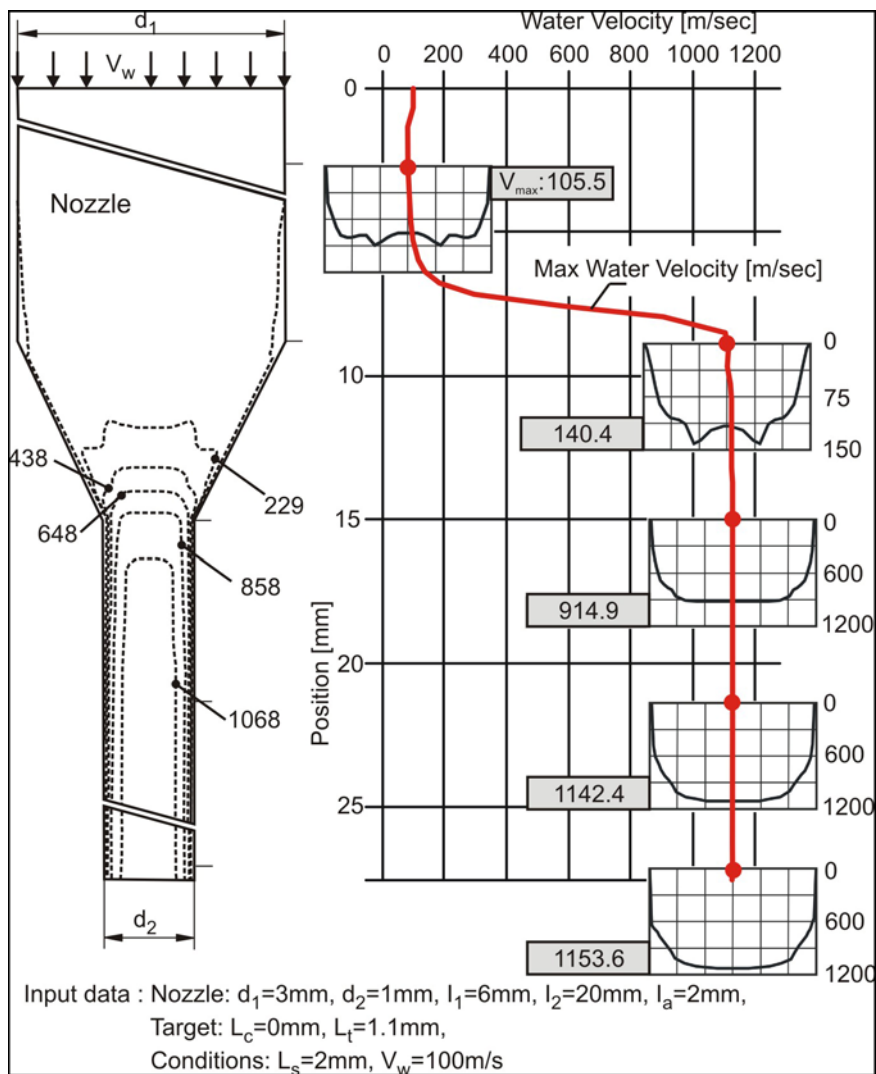
2.10 Έρευνα στο Εργαστήριο Σχεδιομελέτης με Η/Υ του Πολυτεχνείου Κρήτης
 Στο Πολυτεχνείο Κρήτης αναπτύχθηκε ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της κατεργασίας απλού water-jet από την Κ. Μανιαδάκη. Η λειτουργία του μοντέλου απεικονίζεται συνοπτικά στο σχήμα 2.18



Σχήμα 2.18 : Δεδομένα προβλήματος, συνθήκες κατεργασίας και αποτελέσματα

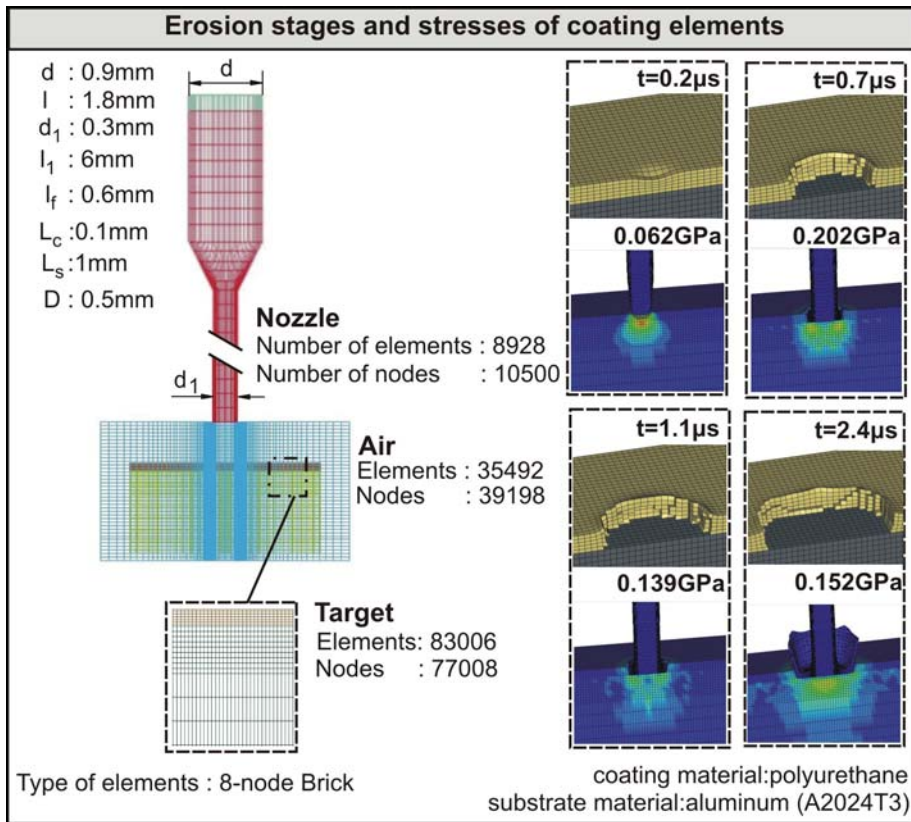
Σκοπός του μοντέλου ήταν η ακριβής προσομοίωση της κατεργασίας με απλό water-jet. Το πρόβλημα χωρίστηκε σε τρία τμήματα : μελετήθηκε η ροή του νερού μέσα στο ακροφύσιο, η ροή του νερού στον αέρα και η κρούση του water-jet σε σταθερό στόχο. Η βασική διαφοροποίηση αυτού του μοντέλου σε σχέση με προηγούμενα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι η διαδικασία του water-jet μελετήθηκε στο σύνολο της, συμπεριλαμβανομένης και της ροής του νερού στο ακροφύσιο. Σε αυτό το τμήμα, υπολογίστηκε το προφίλ της ταχύτητας του water-jet σε διαφορετικά σημεία μέσα στο ακροφύσιο και η εξέλιξη του σε σχέση με το χρόνο, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.19. Ο βασικός στόχος της εργασίας ήταν η ανάλυση σε βάθος της συμπεριφοράς του στόχου κατά την πρόσκρουση του water-jet.

Για την μοντελοποίηση της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε ένα μη-γραμμικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση του κώδικα LS-DYNA3D.



Σχήμα 2.19 : Προφίλ ταχύτητας water-jet για διαφορετικές θέσεις μέσα στο ακροφύσιο

Η ανάλυση της αλληλεπίδρασης water-jet – στόχου μελετήθηκε με χρήση της μεθόδου Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE). Η κατεργασία του υλικού του στόχου προσομοιώθηκε με την εισαγωγή ενός κατωφλίου παραμόρφωσης, πάνω από το οποίο τα elements του πλέγματος αφαιρούνται. Το μοντέλο υπολογίζει το προφίλ της ταχύτητας του water-jet, την κατανομή των τάσεων Von-Mises στο στόχο και τα στάδια της διάβρωσης της επικάλυψης του στόχου, όπως φαίνεται στο [σχήμα 2.20](#).



Σχήμα 2.20 : Στάδια διάβρωσης επικάλυψης και κατανομή τάσεων

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1 Διαδικασία προσομοίωσης

Η μελέτη της επίδρασης της πρόωσης στην κατεργασία με χρήση νερού υψηλής πίεσης μελετήθηκε με τη χρήση ενός μη-γραμμικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων βασισμένο στον κώδικα LS-DYNA3D. Το πρόβλημα χωρίστηκε σε δυο τμήματα : στο πρώτο τμήμα μελετήθηκε η ροή του νερού μέσα στο ακροφύσιο και το προφίλ που δημιουργείται στην έξοδο του ακροφυσίου και στο δεύτερο τμήμα, με βάση το αποτέλεσμα του πρώτου, η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο water-jet και τον κινούμενο στόχο. Η τμηματοποίηση αυτή έγινε για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου.

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

3.1.1 LS-DYNA3D

Το LS-DYNA3D είναι ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση και ανάλυση ισχυρά μη γραμμικών φαινομένων τα οποία προκύπτουν στην πραγματικότητα. Πολλά από τα φαινόμενα αυτά υπόκεινται σε μεγάλες παραμορφώσεις μέσα σε μικρά χρονικά διαστήματα, όπως π.χ. προσομοίωση πρόσκρουσης αυτοκινήτου.

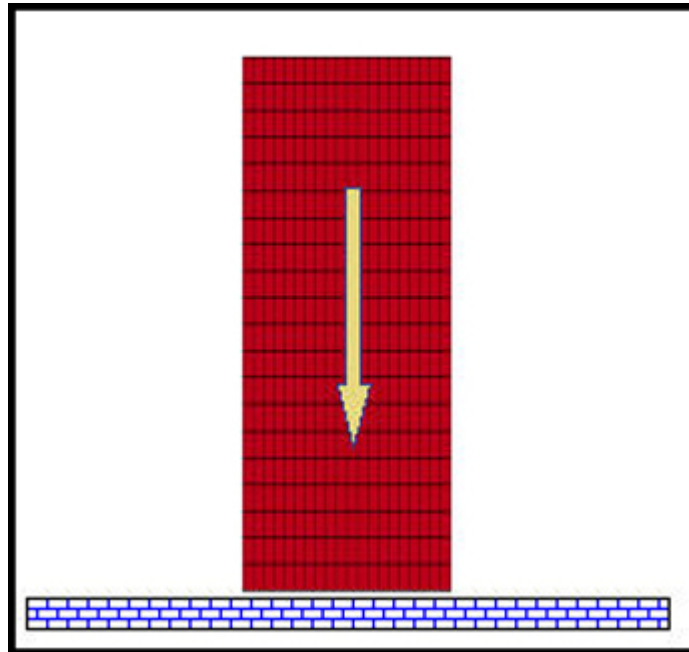
Για την αντιμετώπιση προβλημάτων στα οποία παρατηρούνται μεγάλες παραμορφώσεις και προβλημάτων αλληλεπίδρασης μεταξύ στερεών και ρευστών το LS-DYNA3D κάνει χρήση της μεθόδου η οποία είναι γνωστή ως Arbitrary Eulerian Lagrangian (ALE).

3.1.2 Μέθοδος Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE)

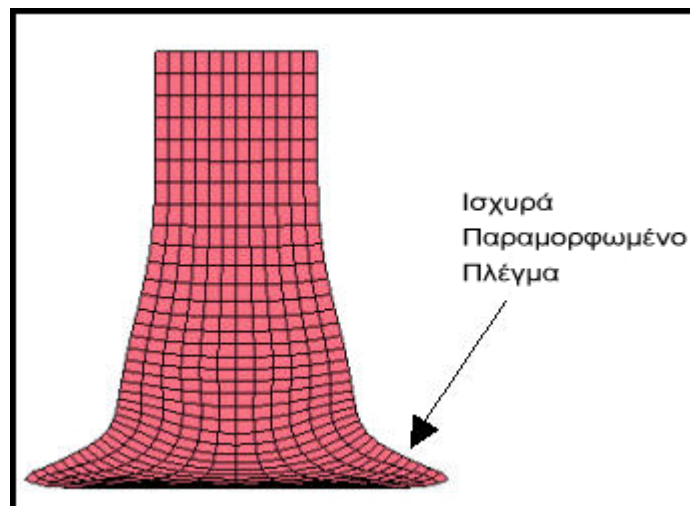
Η μέθοδος ALE είναι μια τυπική αριθμητική μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων στα οποία παρατηρούνται μεγάλες παραμορφώσεις. Τέτοια προβλήματα συναντώνται συνήθως σε εφαρμογές μορφοποίησης μετάλλων και εφαρμογές κρούσης με μεγάλη ταχύτητα. Η βασική αρχή της μεθόδου ALE είναι ότι ορίζεται ένα αυθαίρετο αναφορικό σύστημα για την περιγραφή της κίνησης η οποία είναι ανεξάρτητη ανάμεσα στα συστήματα υλικού (Lagrange) και στα συστήματα χώρου (Euler).

Σε ένα σύστημα αμιγώς Lagrange, το υλικό μοντελοποιείται και παραμορφώνεται έτσι ώστε να μην υπάρχει ροή υλικού ανάμεσα στα elements. Η μέθοδος Lagrange ενδείκνεται για μέτρια προβλήματα παραμόρφωσης στα οποία η διαστρέβλωση του πλέγματος και η περιπλοκή των elements δεν αποτελούν σημαντικό πρόβλημα. Το πλεονέκτημα της μεθόδου Lagrange είναι ότι η ελεύθερη επιφάνεια του υλικού αυτομάτως καταλαμβάνεται από το πλέγμα. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι πολλά προβλήματα που προκύπτουν σε πραγματικές περιστάσεις περιλαμβάνουν επιφάνειες οι οποίες υπόκεινται σε μεγάλη παραμόρφωση. Παρατείνεται το πρόβλημα κρούσης μεταλλικής ράβδου με υψηλή ταχύτητα (σχήμα 3.1). Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, η μέθοδος Lagrange αρχίζει να αστοχεί κατά μήκος της επιφάνειας ανάμεσα στη ράβδο και στο τοίχωμα. Το πλέγμα σε αυτή την περιοχή παραμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων φθίνει. Η καλύτερη λύση για αύξηση της ακρίβειας στη μέθοδο Lagrange είναι η χρήση τεχνικής προσαρμοστικής διακριτοποίησης στην περιοχή που παρατηρείται έντονη παραμόρφωση. Η προσαρμοστική μέθοδος, ωστόσο, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και δεν έχει αναπτυχθεί πλήρως για προβλήματα σε τρεις διαστάσεις. Άλλα μειονεκτήματα της μεθόδου Lagrange είναι ότι μόνο ένα υλικό μπορεί

να αποδοθεί σε κάθε element και ότι καινούργιες (μετά από φθορά) επιφάνειες δεν μπορούν να δημιουργηθούν.



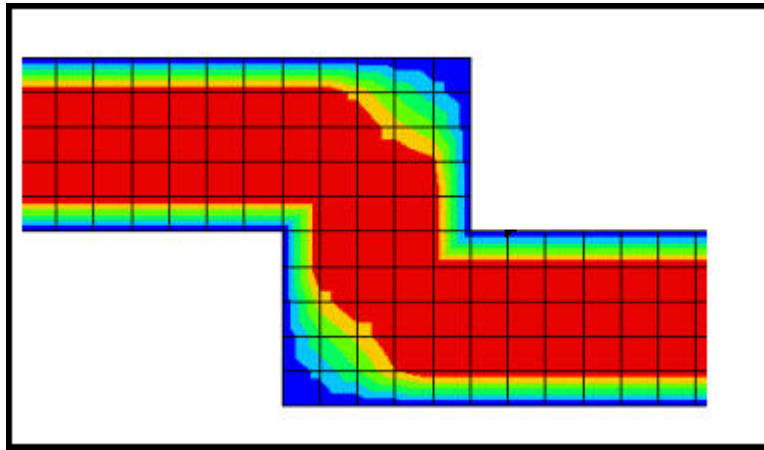
Σχήμα 3.1 : Κρούση μεταλλικής ράβδου με μεγάλη ταχύτητα



Σχήμα 3.2 : Επίλυση προβλήματος κρούσης με τη μέθοδο Lagrange

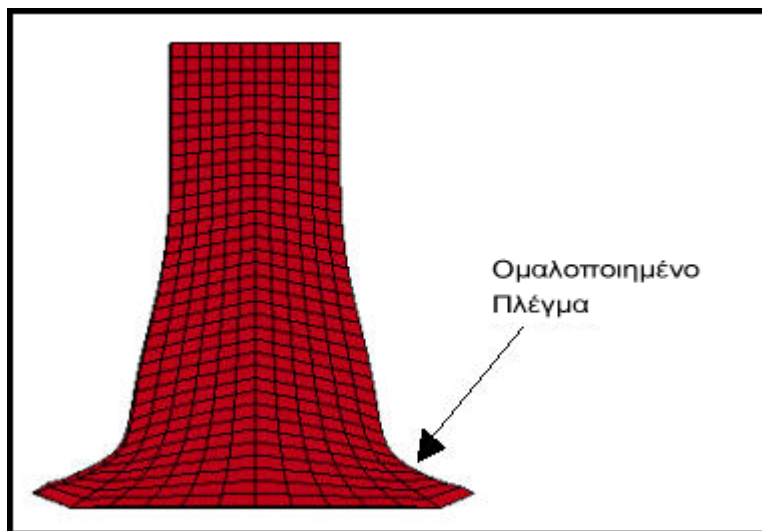
Σε μια μοντελοποίηση τύπου Euler, το πλέγμα είναι στατικό και το υλικό ρέει μέσα από το πλέγμα. Η μέθοδος Euler προέρχεται από το πεδίο της ρευστομηχανικής και ενδείκνεται για προβλήματα που περιλαμβάνουν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις, όπως το πρόβλημα ροής σε αγωγό που φαίνεται στο [σχήμα 3.3](#). Στη μέθοδο Euler οι καινούργιες επιφάνειες δημιουργούνται αυτόματα. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της μεθόδου Euler είναι ότι απαιτεί πυκνά πλέγματα για να αποδόσει καλύτερα την

συμπεριφορά του υλικού. Με αυτόν το τρόπο όμως η μέθοδος γίνεται υπερβολικά χρονοβόρα.



Σχήμα 3.3 : Επίλυση προβλήματος ροής σε αγωγό με τη χρήση πλέγματος Euler

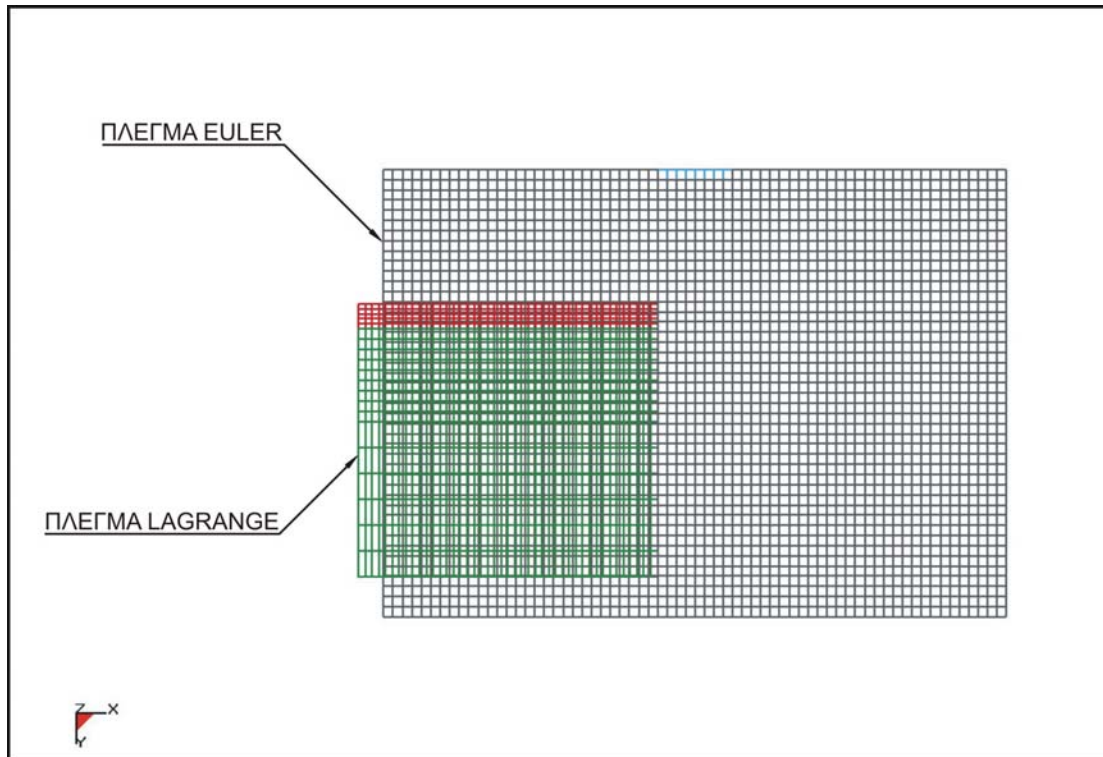
Η μέθοδος Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) είναι μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση για την μοντελοποίηση προβλημάτων που περιλαμβάνουν μεγάλες παραμορφώσεις. Βασικά, η μέθοδος ALE ορίζει ότι η κίνηση του πλέγματος είναι ανεξάρτητη από την κίνηση του υλικού το οποίο αναλύεται. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου ALE είναι ότι επιτρέπει την εξομάλυνση του παραμορφωμένου πλέγματος χωρίς να προβεί σε ολοκληρωτική επαναδιακριτοποίηση. Αυτή η εξομάλυνση επιτρέπει την ελεύθερη επιφάνεια του υλικού να ακολουθήσει τη ροή του υλικού χωρίς να δημιουργηθούν τα προβλήματα διαστέβλωσης της μεθόδου Lagrange.



Σχήμα 3.4 : Επίλυση προβλήματος κρούσης με τη μέθοδο ALE

Στον υπολογισμό μας, χρησιμοποιήθηκε μοντελοποίηση Euler για τα ρευστά (νερό και αέρας) και μοντελοποίηση Lagrange για το στόχο, όπως φαίνεται στο [σχήμα 3.5](#). Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα δυο πλέγματα βασίζεται σε σύζευξη Euler-Lagrange.

Επιπλέον, το πλέγμα Lagrange έχει την δυνατότητα να κινείται μέσα στο πλέγμα Euler.



Σχήμα 3.5

3.2 Ιδιότητες υλικών (Material Models)

3.2.1 Υλικό στόχου (Υπόστρωμα και επικάλυψη)

Το υλικό του υποστρώματος επιλέχθηκε ως κράμα αλουμινίου A2024T3. Το υλικό της επικάλυψης είναι πολυουρεθάνη. Η συμπεριφορά του στόχου (επικάλυψη και υπόστρωμα) λήφθηκε ως ελαστο-πλαστική. Τα χαρακτηριστικά του στόχου αφορούν την πυκνότητα ρ , το συντελεστή ελαστικότητας E (Young Modulus), τον λόγο Poisson ν και το όριο διαρροής R_y . Οι τιμές των χαρακτηριστικών δίνονται στον πίνακα 1.

Η προσομοίωση της κατεργασίας της επικάλυψης του στόχου από το water-jet πραγματοποιήθηκε με την εισαγωγή ενός κριτηρίου που προσδιορίζει την αφαίρεση των στοιχείων Lagrange. Το κριτήριο αυτό ονομάζεται failure strain και αποτελεί το κατώφλι παραμόρφωσης πάνω από το οποίο τα elements αφαιρούνται.

	Density (ρ) (kg/m ³)	Cut-off Pressure (Pc) (Pa)	Dynamic viscosity (μ) (Pa·s)
Water	1000	-10^5	10^{-3}
Air	1.29	-10	$1.67 \cdot 10^{-5}$

	Density (ρ) (kg/m ³)	Young Modulus (E) (Gpa)	Poisson ratio (ν)	Yield Stress (Ry) (Mpa)
A2024T3	2700	73	0.33	345
Polyurethane	1200	0.90	0.25	40

Πίνακας 1 : Ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς

3.2.2 Υλικό ρευστών (αέρας και water-jet)

Τα μοντέλα των υλικών που είναι διαθέσιμα για τους υπολογισμούς Euler είναι ισотροπικά. Επιλέχθηκε μοντέλο υδροδυναμικής συμπεριφοράς για το water-jet και τον αέρα. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται Null-Material και χαρακτηρίζεται από το κινηματικό ιξώδες μ και την πίεση αποκοπής P_c (πίνακας 1). Το μοντέλο υδροδυναμικής συμπεριφοράς είναι απαραίτητο να συσχετιστεί με μια καταστατική εξίσωση, η οποία περιγράφει την αναλογία ανάμεσα στην πίεση, την πυκνότητα και την εσωτερική ενέργεια. Στον υπολογισμό μας χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη πολυωνυμική εξίσωση για κάθε ρευστό :

$$P=K_0+K_1\alpha+K_2\alpha^2+K_3\alpha^3+(K_4+K_5\alpha+K_6\alpha^2)e$$

όπου P είναι η πίεση και e είναι η εσωτερική ενέργεια. Οι συντελεστές K_0, K_1, \dots, K_6 είναι συντελεστές η τιμή των οποίων δίνεται στον πίνακα 2 και ο συντελεστής α είναι μια συνάρτηση του σχετικού όγκου ν :

$$\alpha= 1/\nu -1$$

Για να γίνει δυνατή η ανάμειξη των δύο ρευστών (αέρας και water-jet) μέσα στο ίδιο κελί του πλέγματος Euler χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος αλγόριθμος από το LS-DYNA3D που επιτρέπει την παρουσία πολλαπλού υλικού.

	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
Water	0	2.2	9.54	14.57	0.28	0.28	0
Air	0	0	0	0	0.401	0.401	0

Πίνακας 2 : Οι τιμές των συντελεστών των γραμμικών πολυωνυμικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό

3.3 Οριακές συνθήκες (Boundary Conditions)

Θεωρήθηκαν οι παρακάτω οριακές συνθήκες :

- Για να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος, λόγω συμμετρίας, μελετήθηκε μόνο το μισό μοντέλο.
- Η περιφέρεια του ακροφυσίου θεωρείται στερεή και για την μοντελοποίηση του τοιχώματος περιορίστηκαν και οι έξι βαθμοί ελευθερίας στους περιφερειακούς κόμβους του πλέγματος Euler του ακροφυσίου.
- Στο πλέγμα Euler του αέρα (χώρος κατεργασίας) θεωρήθηκαν ελεύθερες συνθήκες.

- Στο στόμιο εισαγωγής νερού του ακροφυσίου, το νερό έχει ομοιόμορφη ταχύτητα ίση με 55 m/sec.
- Στο στόμιο εισαγωγής νερού του χώρου κατεργασίας, το νερό έχει το σταθερό προφίλ της ταχύτητας που προέκυψε από την μελέτη του ακροφυσίου.
- Στο κατώτερο επίπεδο του στόχου περιορίστηκαν οι βαθμοί ελευθερίας για την μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα.
- Ο στόχος κινείται με σταθερή ταχύτητα ίση με 5.7 m/sec.

4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ

Ο προεπεξεργαστής που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των αρχείων που εισήχθηκαν στο LS-DYNA3D είναι το ANSYS ICEM CFD. Το 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 βασίστηκε σε τρία βασικά διαδοχικά στάδια :

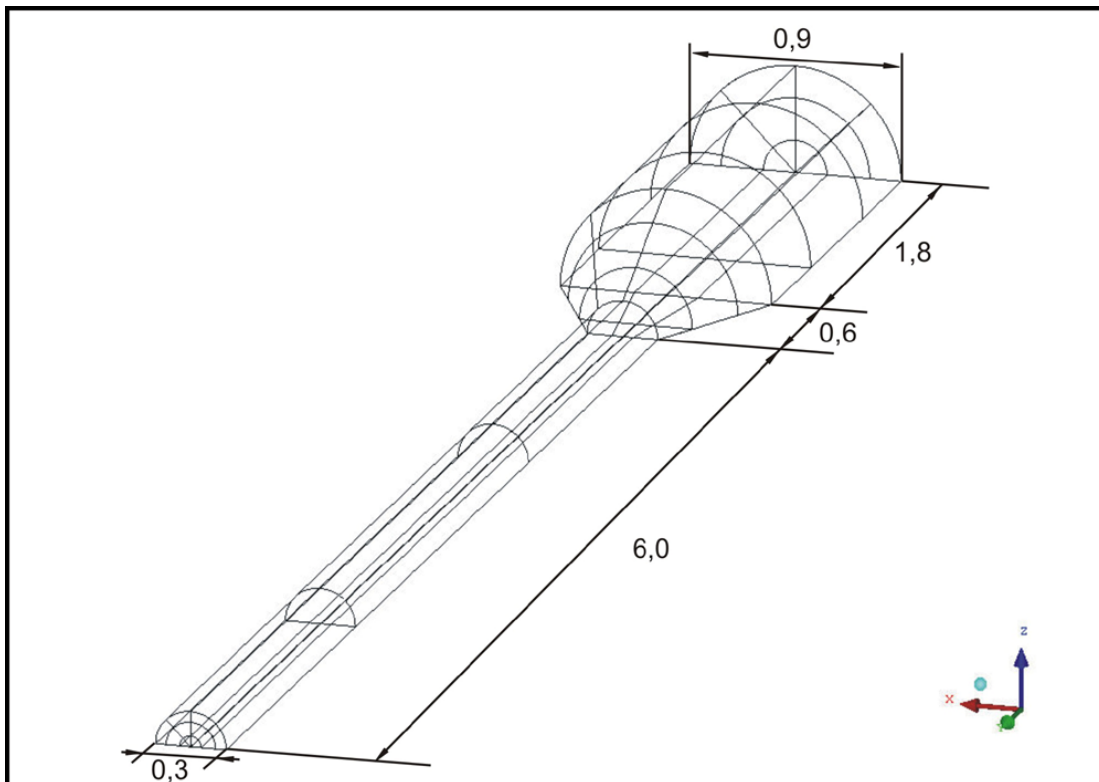
- Δημιουργία σημείων
- Δημιουργία γραμμών
- Δημιουργία επιφανειών

Για την διακριτοποίηση της γεωμετρίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος O-GRID.

4.1 Δημιουργία γεωμετρίας

4.1.1 Δημιουργία ακροφυσίου

Δημιουργείται η γεωμετρία για το ακροφύσιο, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1 : Οι διαστάσεις του ακροφυσίου

A) Δημιουργία σημείων

Geometry> Create points> Explicit Coordinates : Επιλέγεται XYZ (Explicit Coordinates) και με Apply δίνονται τις συντεταγμένες για τα παρακάτω σημεία :

POINTS.0 : (0,0,0)

POINTS.1 : (0.45,0,0)
POINTS.2 : (0,1.8,0)
POINTS.3 : (0.45,1.8,0)
POINTS.4 : (0,2.4,0)
POINTS.5 : (0.15,2.4,0)
POINTS.6 : (0,8.4,0)
POINTS.7 : (0.15,8.4,0)

Τα σημεία απεικονίζονται στο σχήμα 4.2



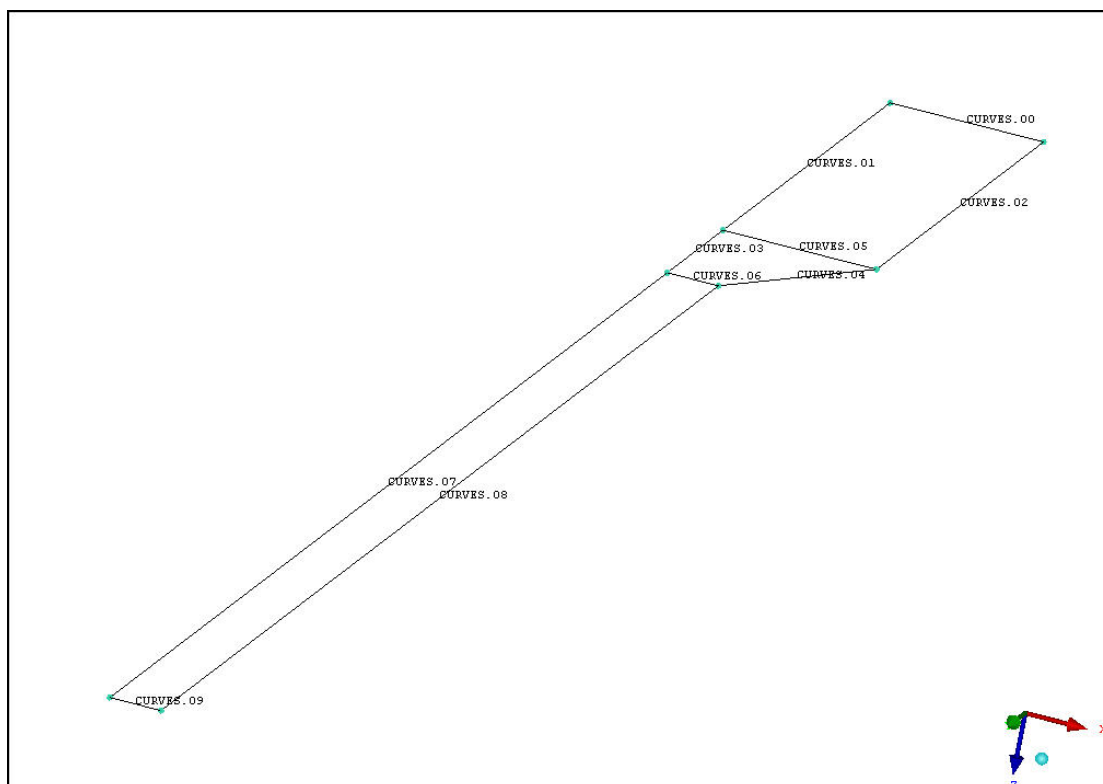
Σχήμα 4.2

B) Δημιουργία γραμμών

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

Η γεωμετρία μετά την δημιουργία των γραμμών φαίνεται στο σχήμα 4.3



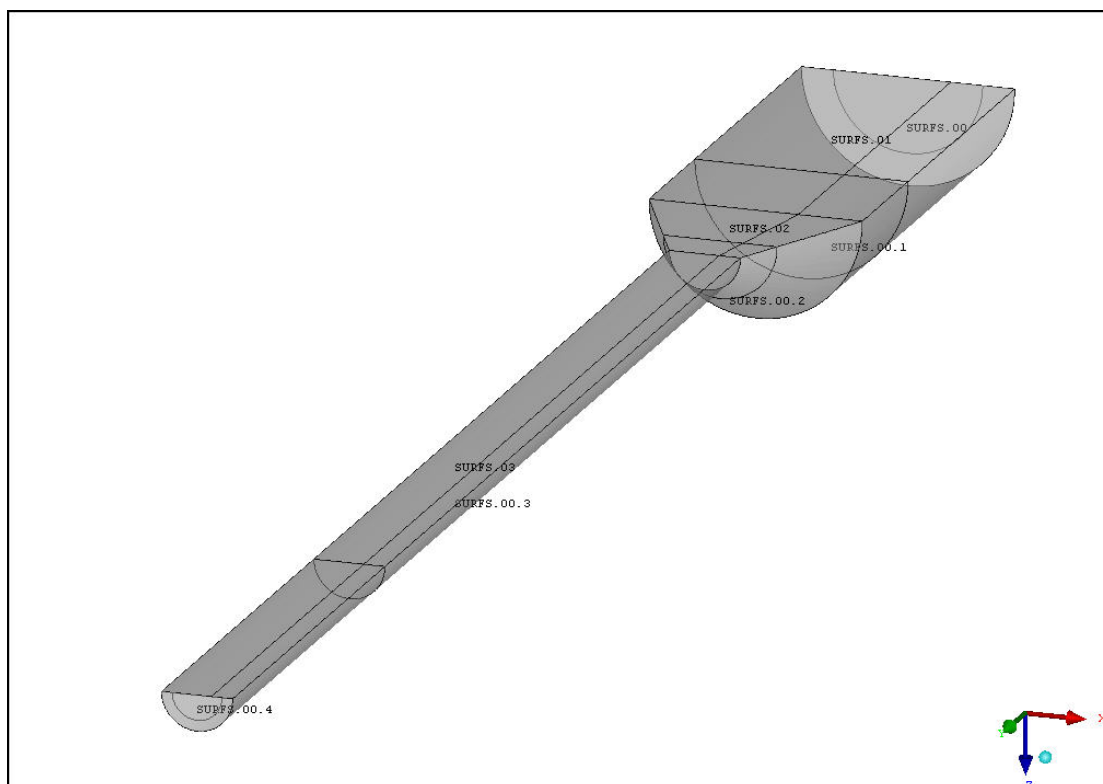
Σχήμα 4.3

Γ) Δημιουργία επιφανειών

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 για Curves τις γραμμές CURVES.00, CURVES.02, CURVES.04 , CURVES.08 και CURVES.09.

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.

Η τελική γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 4.4

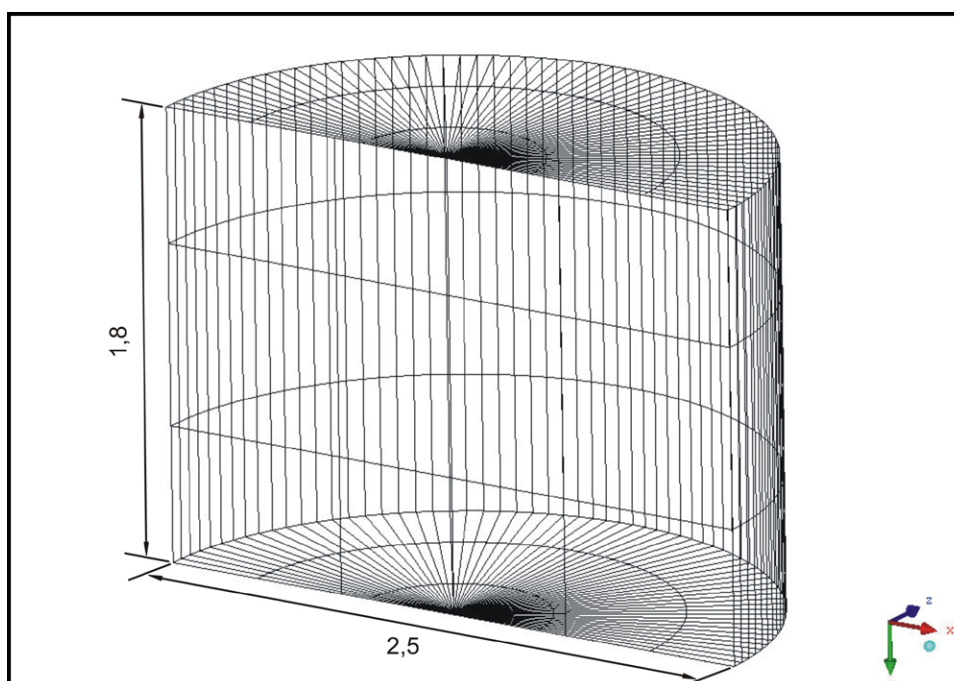


Σχήμα 4.4

Η δημιουργία του χώρου κατεργασίας και του στόχου ακολουθεί αντίστοιχη διαδικασία.

4.1.2 Δημιουργία χώρου κατεργασίας

Η γεωμετρία του χώρου κατεργασίας φαίνεται στο σχήμα 4.5



Σχήμα 4.5

A) Δημιουργία σημείων

Geometry> Create points> Explicit Coordinates : Επιλέγεται XYZ (Explicit Coordinates) και με Apply δίνονται οι συντεταγμένες για τα παρακάτω σημεία :

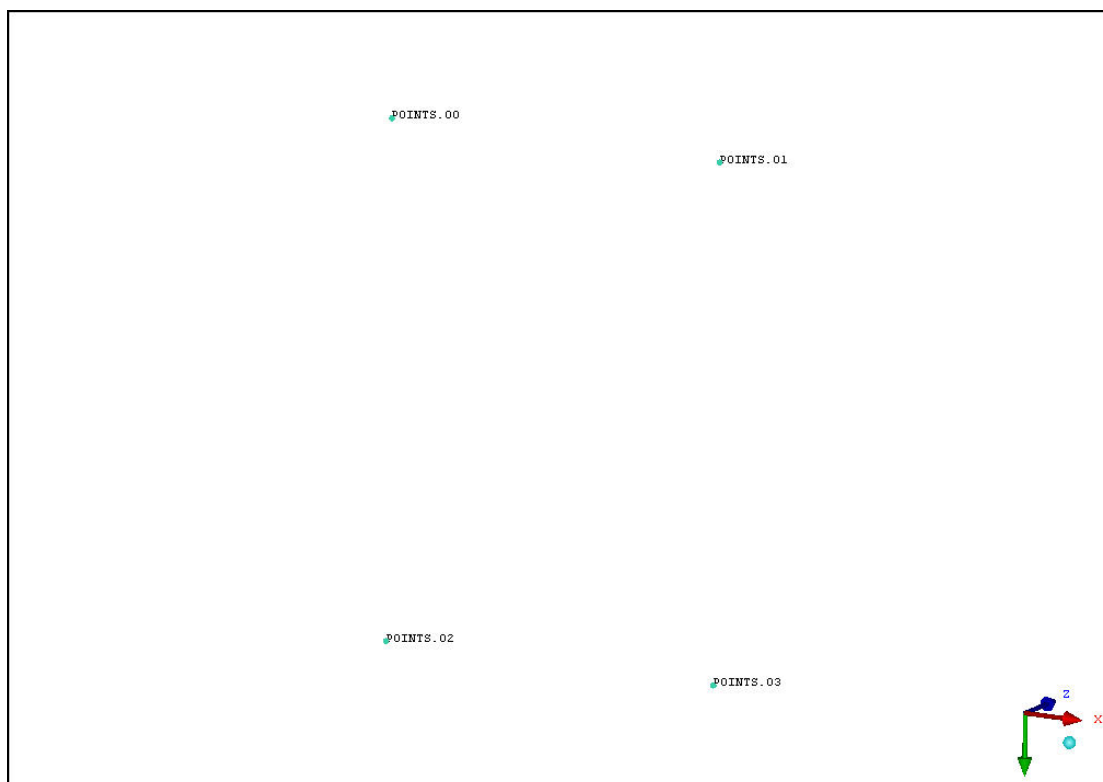
POINTS.0 : (0,0,0)

POINTS.1 : (1.25,0,0)

POINTS.2 : (0,1.8,0)

POINTS.3 : (1.25,1.8,0)

Τα σημεία απεικονίζονται στο σχήμα 4.6



Σχήμα 4.6

B) Δημιουργία γραμμών

Geometry> Create/Modify Curve> From Points : Επιλέγονται κατά ζεύγη τα παρακάτω σημεία και δημιουργούνται οι αντίστοιχες γραμμές :

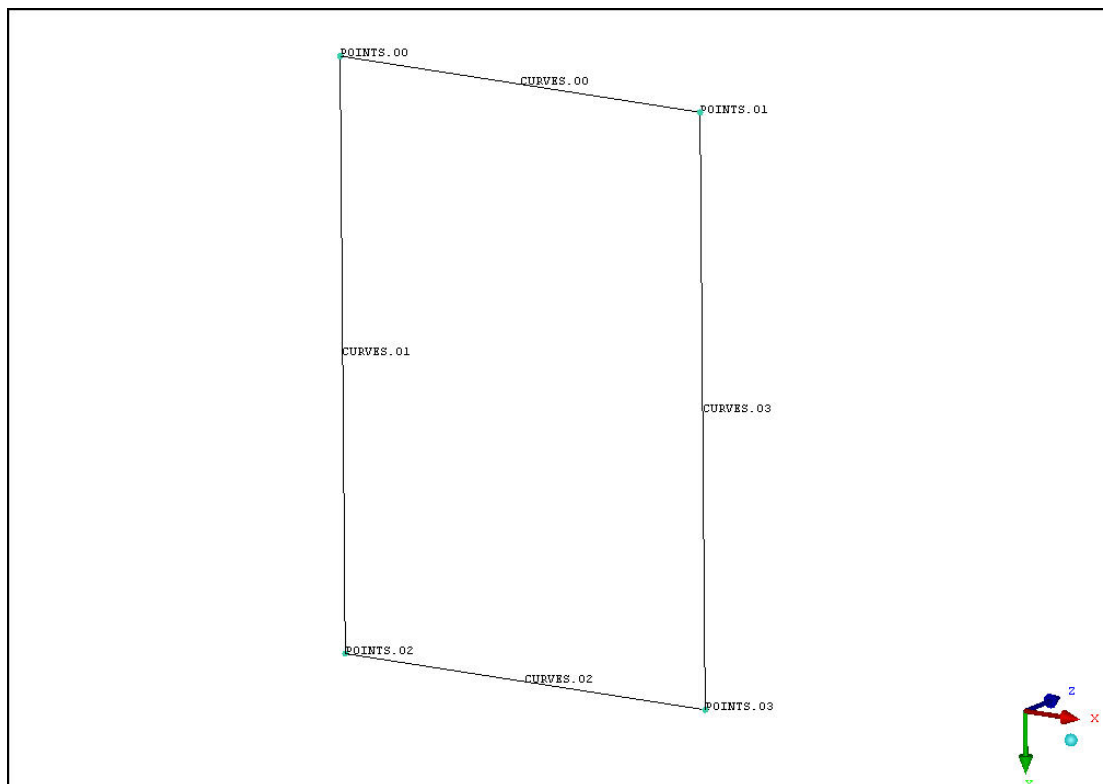
POINTS.00 και POINTS.01 : CURVES.00

POINTS.00 και POINTS.02 : CURVES.01

POINTS.02 και POINTS.03 : CURVES.02

POINTS.01 και POINTS.03 : CURVES.03

Η γεωμετρία μετά την δημιουργία των γραμμών φαίνεται στο σχήμα 4.7



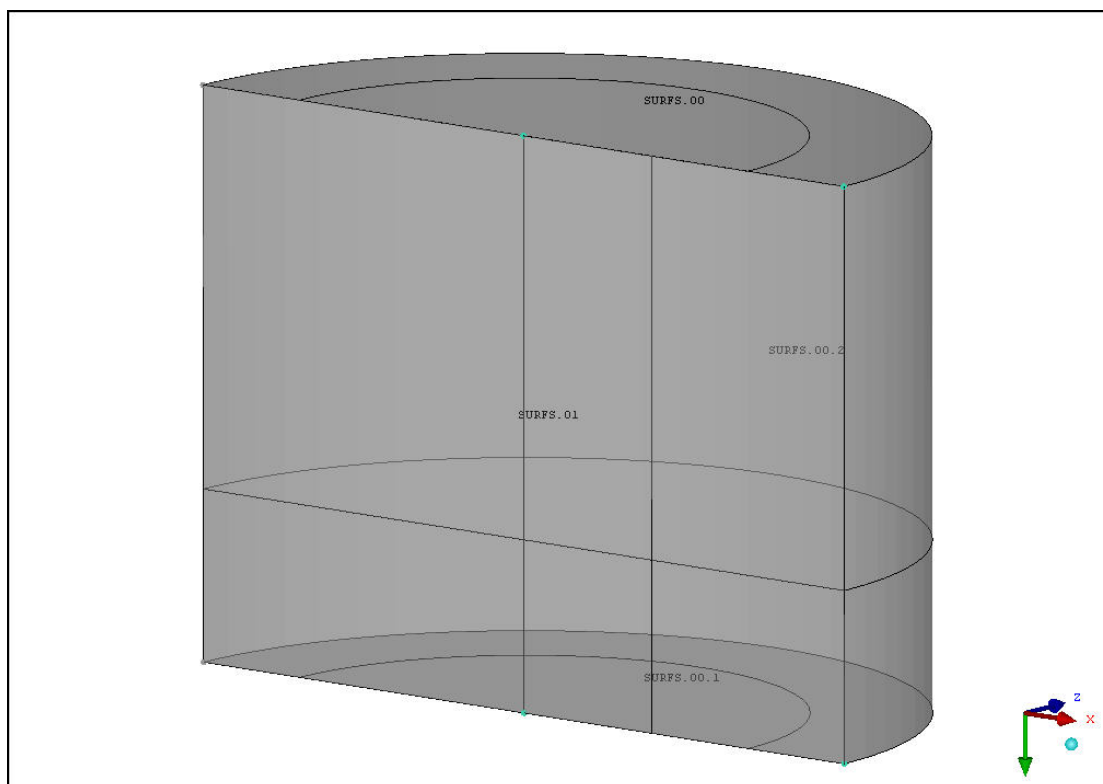
Σχήμα 4.7

Γ) Δημιουργία επιφανειών

Geometry> Create/Modify Surface> Surface of revolution : Δίνεται Start Angle: 0 και End Angle: 180. Προσδιορίζεται ο άξονας περιστροφής επιλέγοντας για Axis Points τα σημεία POINTS.00 και POINTS.02 και για Curves τις γραμμές CURVES.00, CURVES.02 και CURVES.03.

Geometry> Create/Modify Surface> From Curves : Επιλέγεται η γραμμή CURVES.03 και η αντισυμμετρική ακμή της επιφάνειας που δημιουργήθηκε παραπάνω.

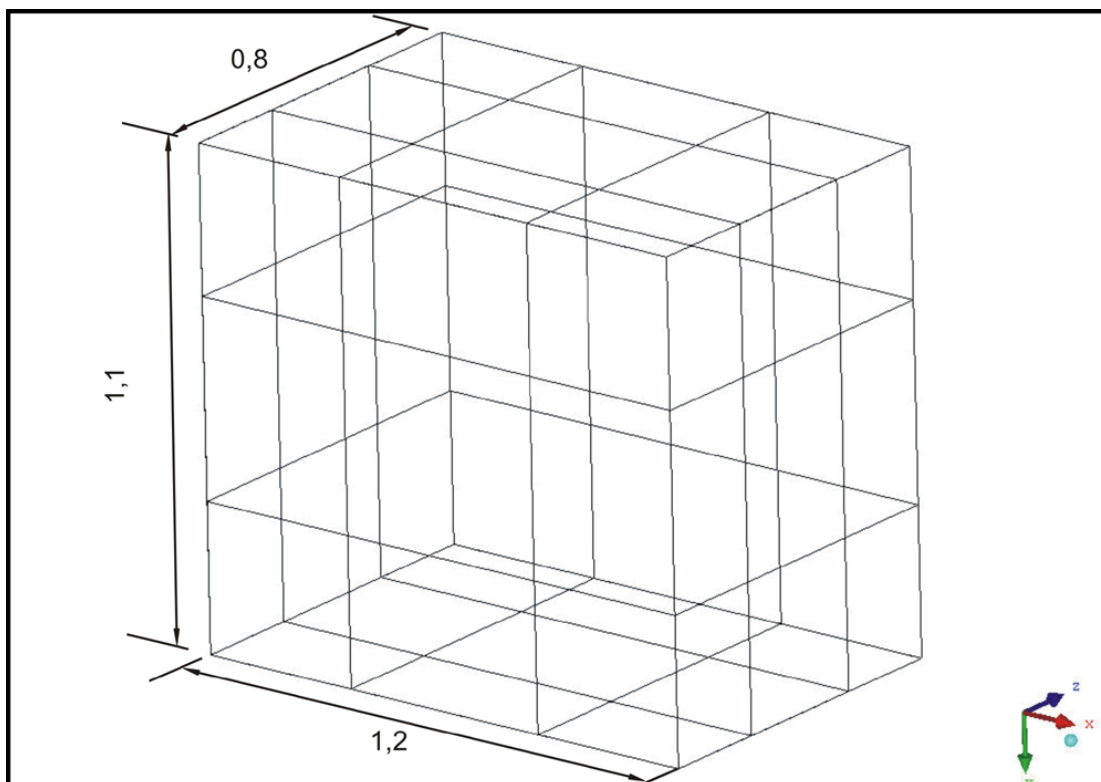
Η τελική γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 4.8



Σχήμα 4.8

4.1.3 Δημιουργία στόχου

Η γεωμετρία του στόχου φαίνεται στο σχήμα 4.9



Σχήμα 4.9

A) Δημιουργία σημείων

Geometry> Create points> Explicit Coordinates : Επιλέγεται XYZ(Explicit Coordinates) και με Apply δίνονται οι συντεταγμένες για τα παρακάτω σημεία :

POINTS.0 : (-1.351,0.54784,0)

POINTS.1 : (-0.151,0.54784,0)

POINTS.2 : (-0.151,1.64784,0)

POINTS.3 : (-1.351,1.64784,0)

POINTS.4 : (-1.351,1.64784,0.8)

POINTS.5 : (-0.151,1.64784,0.8)

POINTS.6 : (-0.151,0.54784,0.8)

POINTS.7 : (-1.351,0.54784,0.8)

Τα σημεία απεικονίζονται στο σχήμα 4.10



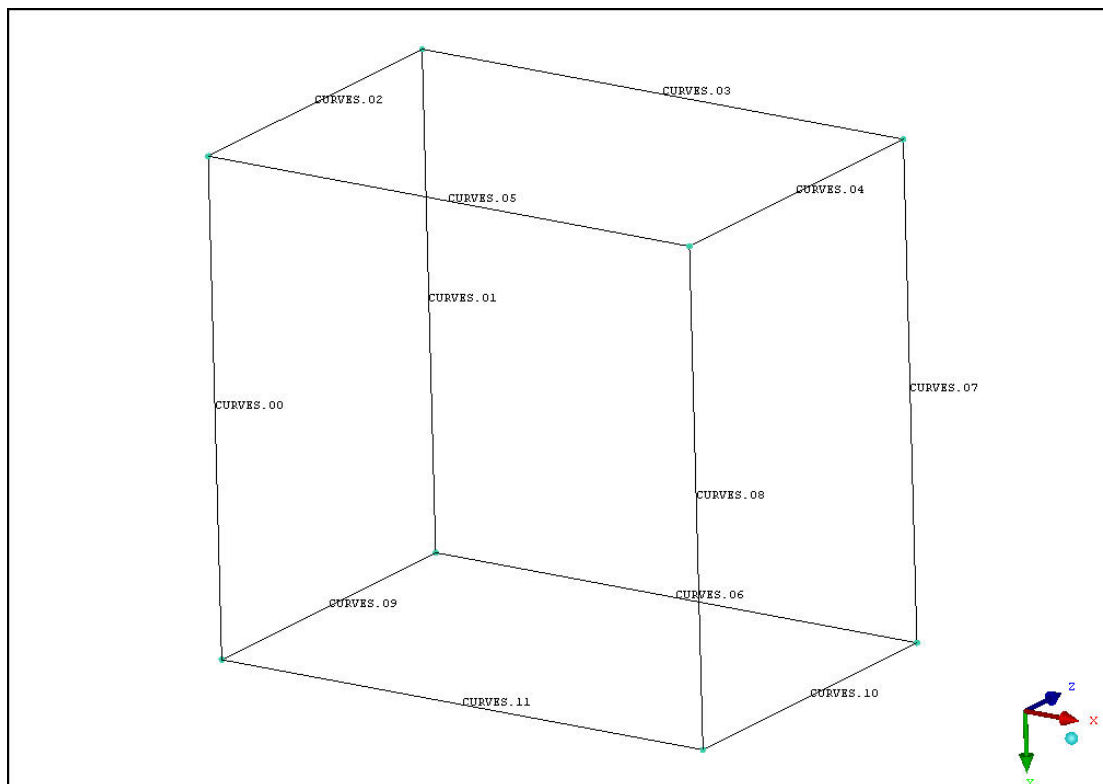
Σχήμα 4.10

B) Δημιουργία γραμμών

Geometry> Create/Modify Curve> From Points : Επιλέγονται κατά ζεύγη τα παρακάτω σημεία και δημιουργούνται οι αντίστοιχες γραμμές :

POINTS.00 και POINTS.03 : CURVES.00
 POINTS.04 και POINTS.07 : CURVES.01
 POINTS.00 και POINTS.07 : CURVES.02
 POINTS.07 και POINTS.06 : CURVES.03
 POINTS.06 και POINTS.01 : CURVES.04
 POINTS.01 και POINTS.00 : CURVES.05
 POINTS.04 και POINTS.05 : CURVES.06
 POINTS.06 και POINTS.05 : CURVES.07
 POINTS.01 και POINTS.02 : CURVES.08
 POINTS.03 και POINTS.04 : CURVES.09
 POINTS.02 και POINTS.05 : CURVES.10
 POINTS.02 και POINTS.03 : CURVES.11

Η γεωμετρία μετά την δημιουργία των γραμμών φαίνεται στο σχήμα 4.11



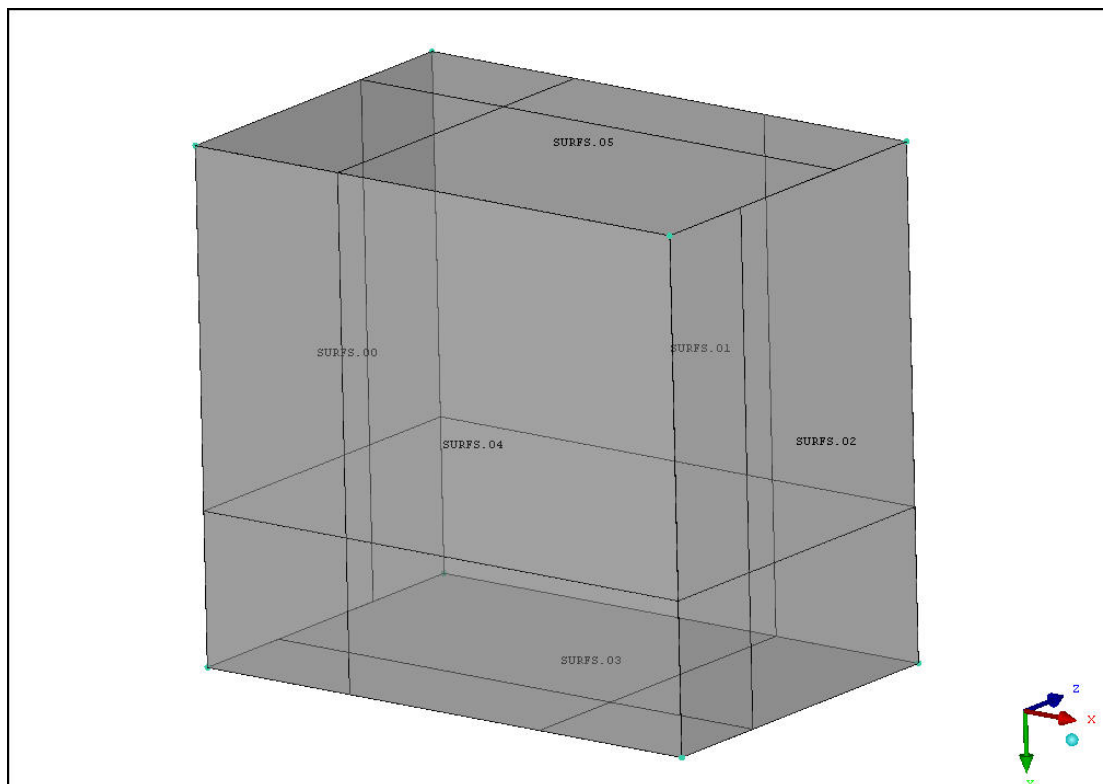
Σχήμα 4.11

Γ) Δημιουργία επιφανειών

Geometry> Create/Modify Surface> From Curves : Επιλέγονται κατά ζεύγη οι παρακάτω γραμμές :

- CURVES.02 και CURVES.04
- CURVES.00 και CURVES.01
- CURVES.11 και CURVES.06
- CURVES.08 και CURVES.07
- CURVES.05 και CURVES.11
- CURVES.03 και CURVES.06

Η τελική γεωμετρία φαίνεται στο σχήμα 4.12



Σχήμα 4.12

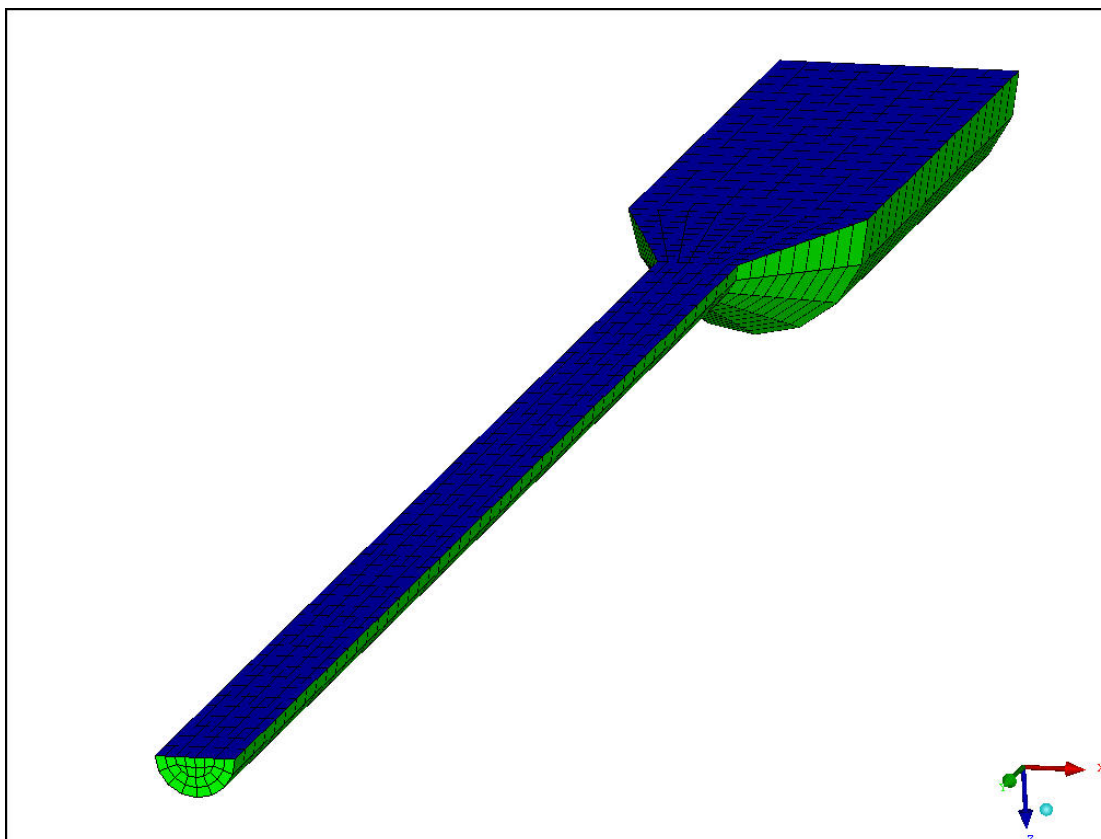
4.2 Διακριτοποίηση

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 BLOCK σε μια τοπολογία 5 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.

4.2.1 Διακριτοποίηση ακροφυσίου

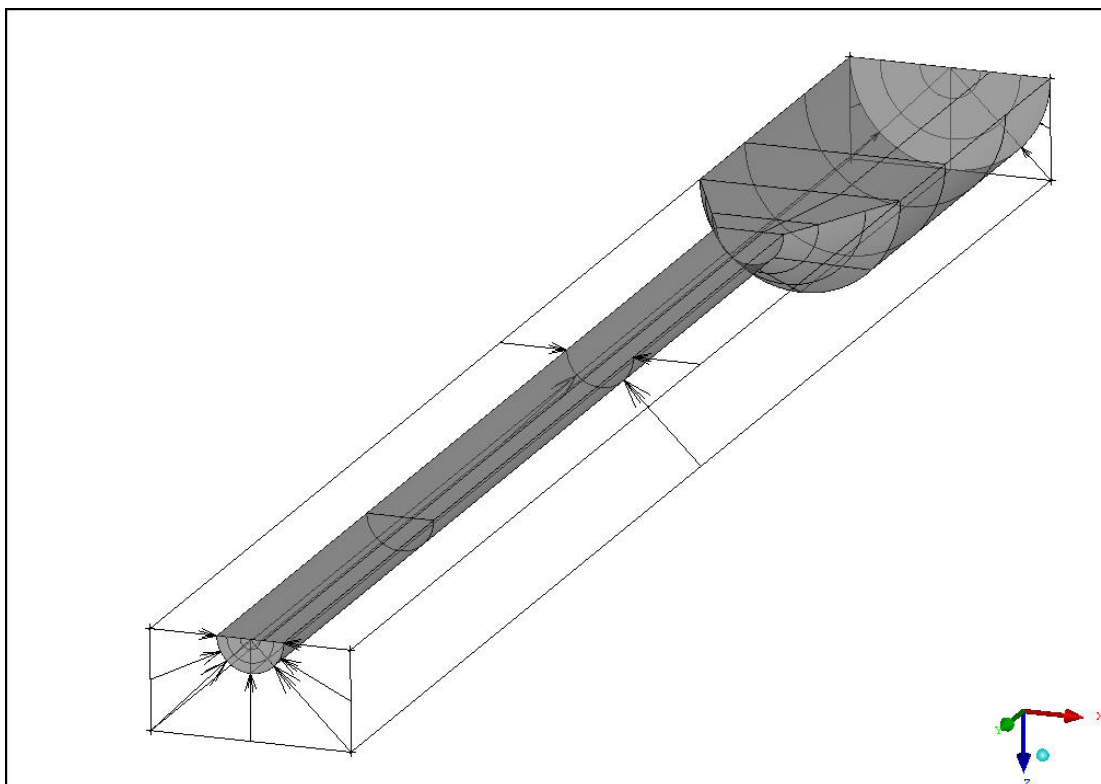
Διακριτοποιείται το ακροφύσιο όπως στο [σχήμα 4.13](#)



Σχήμα 4.13

A) Αρχικοποίηση του BLOCK

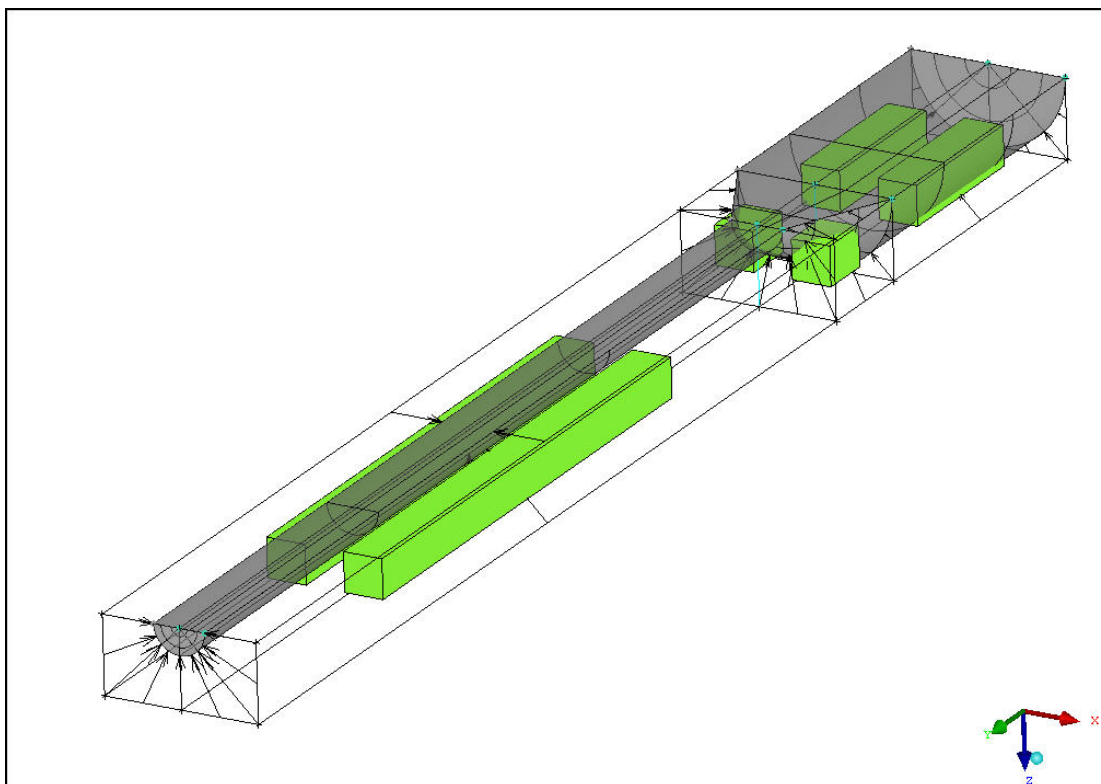
Blocking> Create Block> Initialize Block : Επιλέγεται Type 3D και διαλέγεται το σύνολο της γεωμετρίας. Το αρχικό BLOCK και η συσχέτιση των ακμών του με την επιφάνεια του μοντέλου φαίνεται στο σχήμα 4.14



Σχήμα 4.14

Β) Διαίρεση αρχικού BLOCK

Για να προσεγγιστεί καλύτερα το μοντέλο CAD, το αρχικό block διαιρείται σε sub-blocks. Blocking> Split Block> Split Block : Επιλέγεται ως Split Method : Prescribed Point. Για τον 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 σχήμα 4.15



Σχήμα 4.15

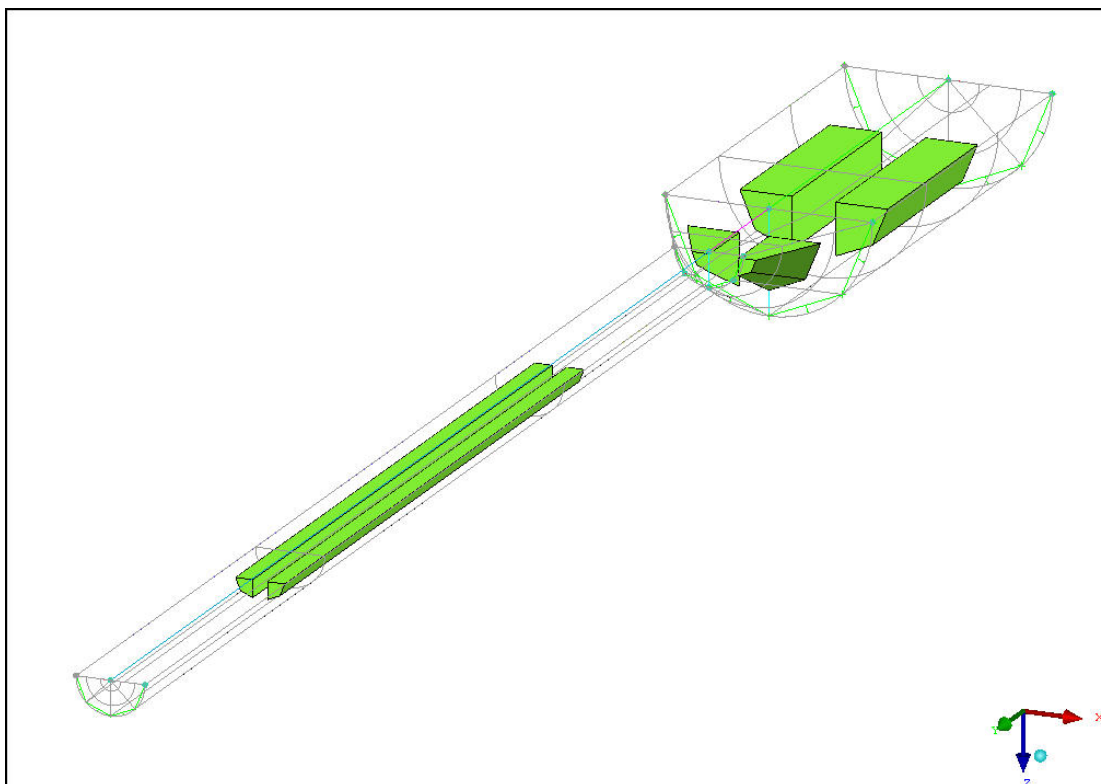
Γ) Προβολή και μετακίνηση σημείων

Blocking> Associate> Snap Project Vertices : Τα σημεία των blocks προβάλλονται πάνω στις επιφάνειες CAD με βάση τις προκαθορισμένες συσχετίσεις. Κάποια σημεία χρειάζονται χειροκίνητη μετακίνηση για να τοποθετηθούν στη σωστή θέση.

Blocking> Associate> Associate Vertex : Επιλέγονται με Vertex τα σημεία των blocks τα οποία δεν βρίσκονται σε σωστή θέση ακολουθώντας με Point τα σημεία του χώρου στα οποία θέλουμε να τα μετακινήσουμε.

Δ) Συσχέτιση ακμών των blocks με γραμμές του μοντέλου

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 4.16



Σχήμα 4.16

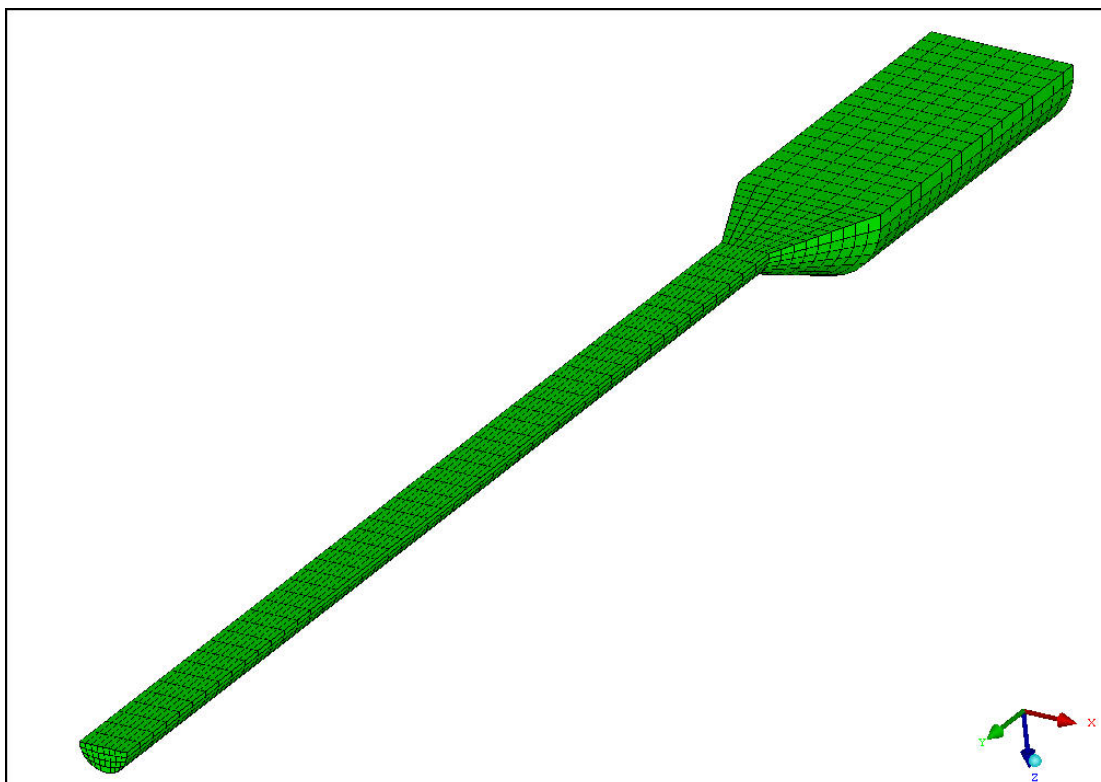
Ε) Ενεργοποίηση του πλέγματος

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. Διαδικασία απαραίτητη καθώς ο solver LS-DYNA3D δεν λειτουργεί με multi-block δομές.

Το διακριτοποιημένο ακροφύσιο φαίνεται στο σχήμα 4.17



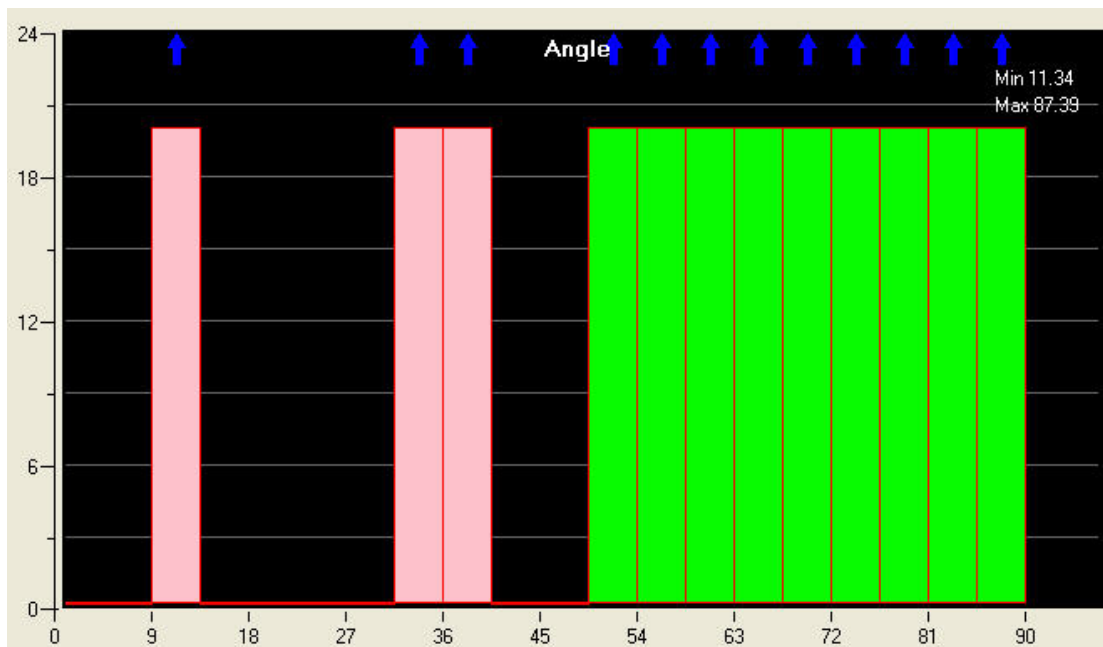
Σχήμα 4.17

ΣΤ) Έλεγχος ποιότητας πλέγματος

Μετά την ενεργοποίηση του πλέγματος είναι απαραίτητο να ελεγχθεί η ποιότητα του. Οι παράμετροι που ελέγχονται είναι οι εξής :

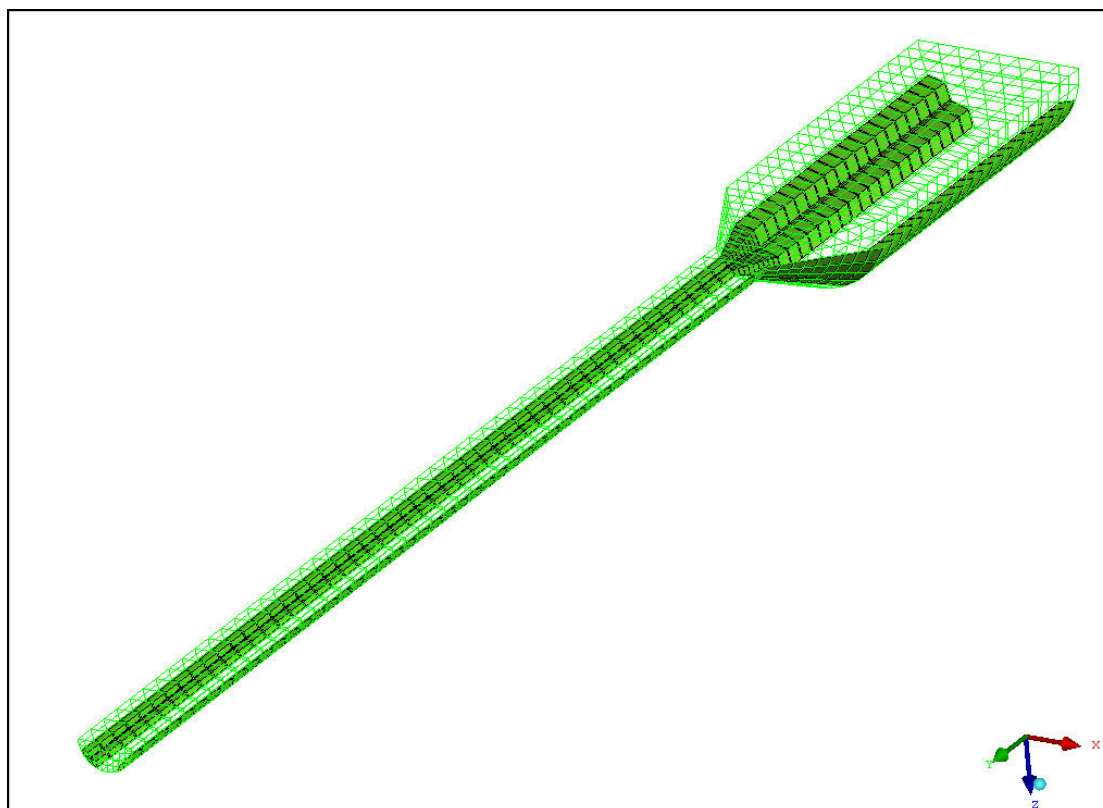
- Γωνία (Angle) : Ελέγχει την μικρότερη εσωτερική γωνία, σε μοίρες για κάθε στοιχείο (element). Κάθε solver μπορεί να έχει διαφορετικό επίπεδο αποδοχής για τον έλεγχο εσωτερικής γωνίας. Αν τα elements είναι διαστρεβλωμένα και οι εσωτερικές γωνίες μικρές, η ακρίβεια του αποτελέσματος θα ελαττωθεί.
- Ορίζουσα (Determinant) : Υπολογίζει την ορίζουσα για όλα τα elements 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.
- Warpage : Πρόκειται για ένα ιστόγραμμα το οποίο απεικονίζει τα επίπεδα της διαστρέβλωσης των elements.

Blocking> Pre-mesh Quality : Επιλέγεται ως κριτήριο η γωνία (Angle). Απεικονίζεται ένα ιστόγραμμα με τις εσωτερικές γωνίες των elements όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18



Σχήμα 4.18

Το σχήμα 4.19 απεικονίζει τα elements του πλέγματος με μικρότερη εσωτερική γωνία κάτω από 45 μοίρες.

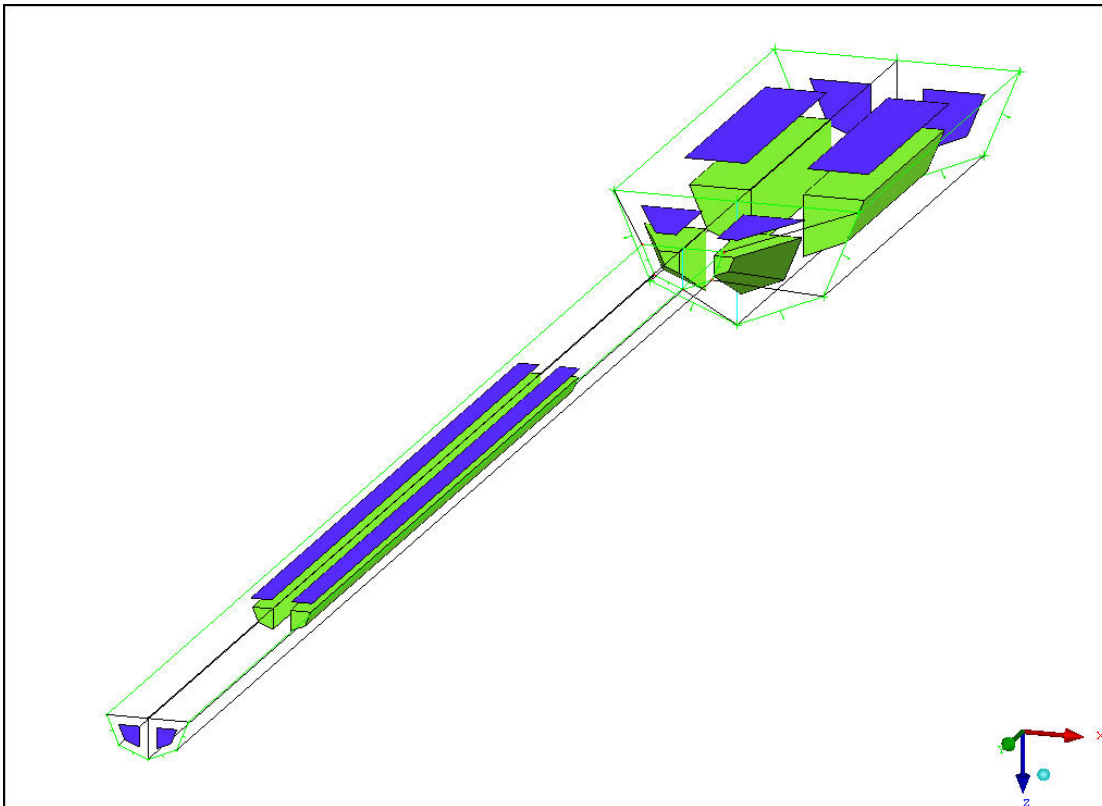


Σχήμα 4.19

Τα elements αυτά είναι κακής ποιότητας. Πρόκειται για το αποτέλεσμα της χρήσης δομής τύπου H-GRID σε κύλινδρο. Με την χρησιμοποίηση της τεχνικής O-GRID στο επόμενο βήμα, η ποιότητα των elements αυξάνεται δραματικά.

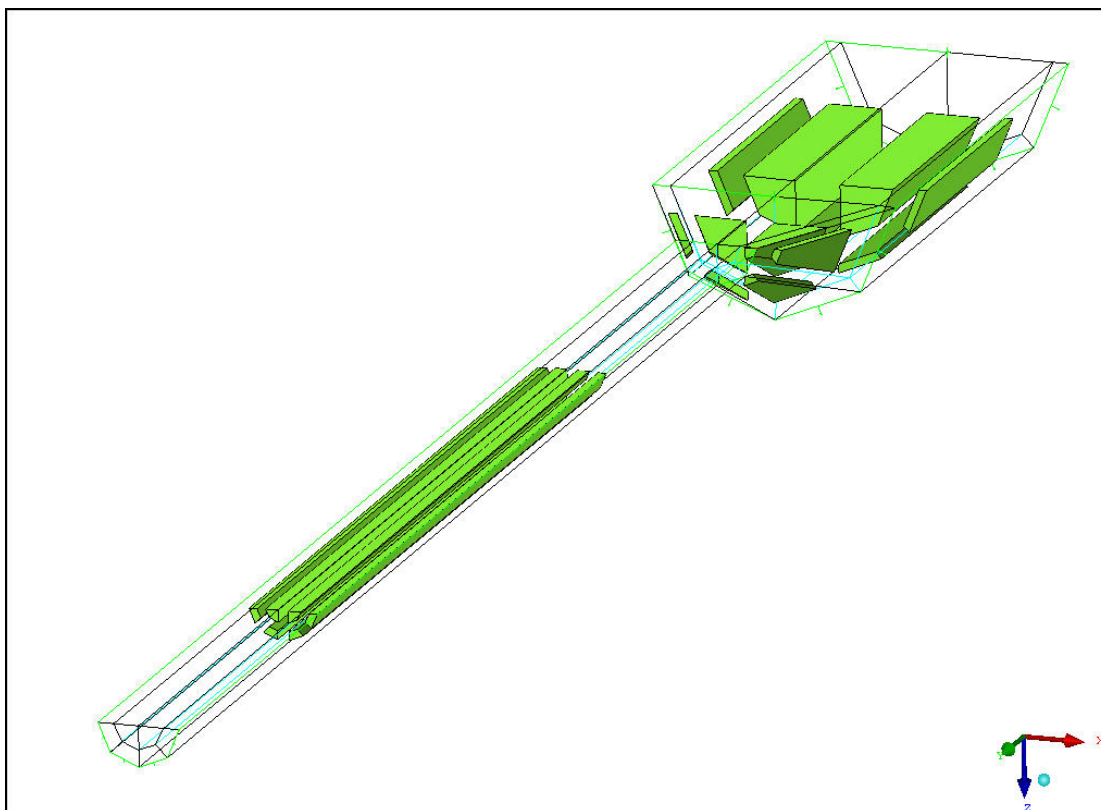
Z) Δημιουργία O-GRID

Blocking> Split Block> O-GRID Blocking : Επιλέγονται τα blocks και τα κατάλληλα faces όπως φαίνεται στο σχήμα 4.20



Σχήμα 4.20

Μόλις ενεργοποιηθεί η παραπάνω επιλογή, η τεχνική O-GRID θα δημιουργήσει τη δομή που φαίνεται στο σχήμα 4.21



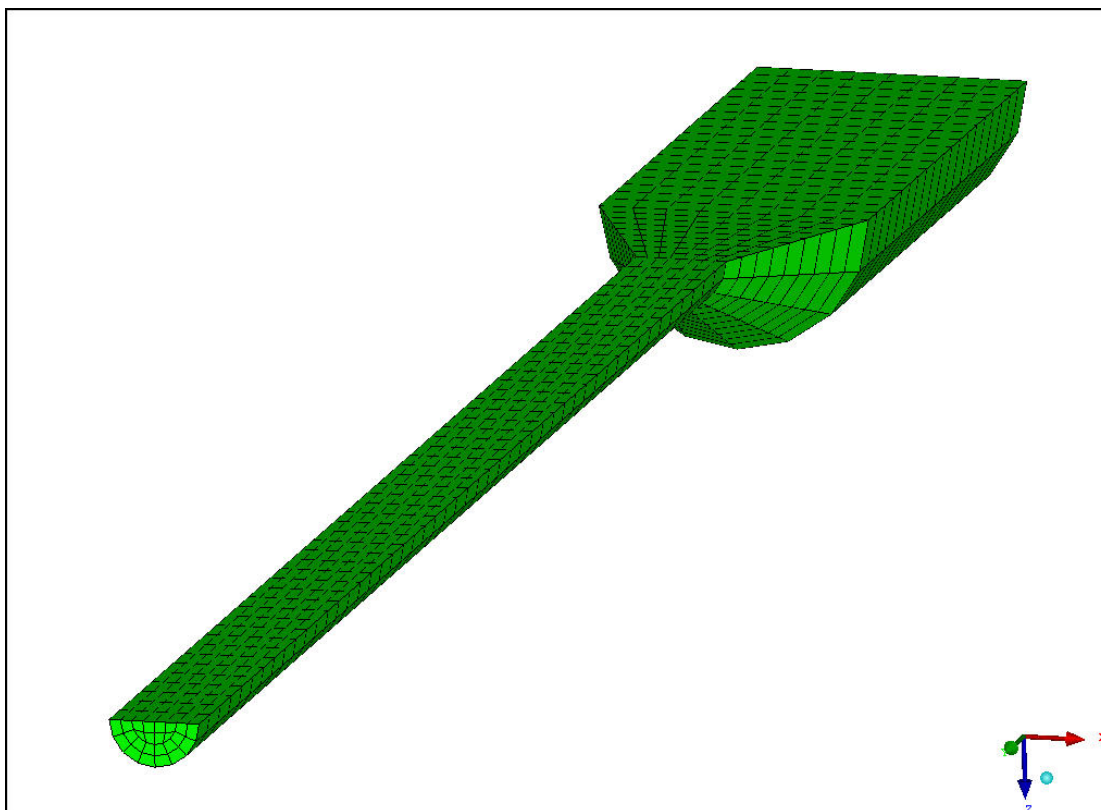
Σχήμα 4.21

Με κατάλληλες επεμβάσεις όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 4.2.1.Γ, τα σημεία των καινούργιων 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.

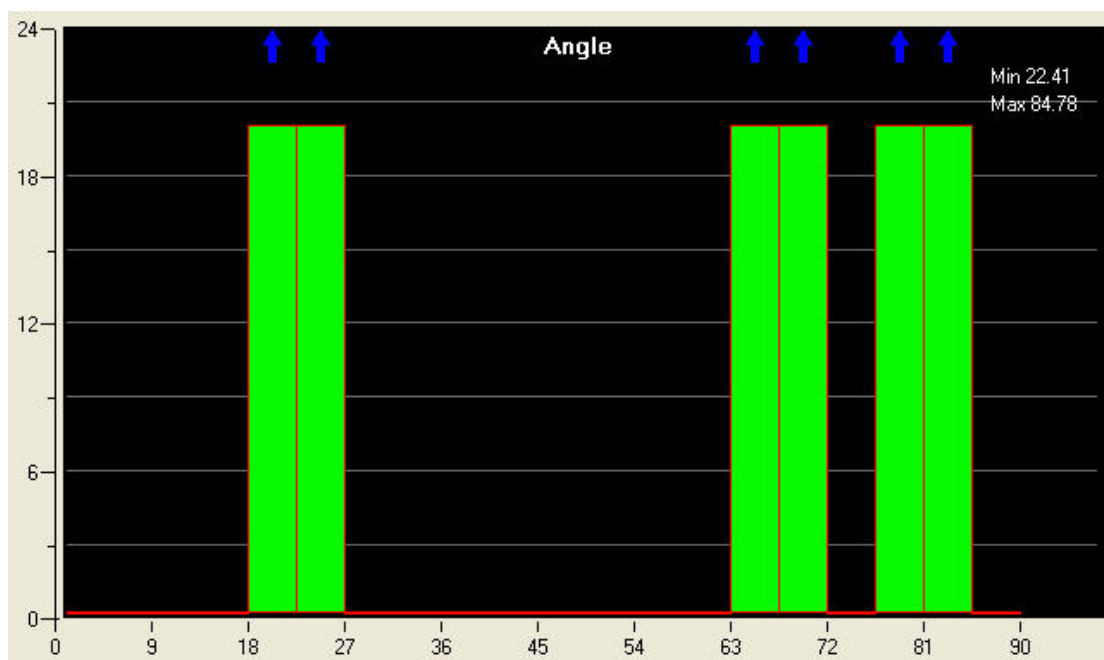
Blocking> Pre-mesh> Convert to unstructured mesh.

Το πλέγμα μετά την δημιουργία του O-GRID φαίνεται στο σχήμα 4.22



Σχήμα 4.22

Όπως φαίνεται από το ιστόγραμμα στο σχήμα 4.23 η ποιότητα των elements βελτιώθηκε σημαντικά.



Σχήμα 4.23

Η) Χωρισμός σε επιμέρους τμήματα (parts)

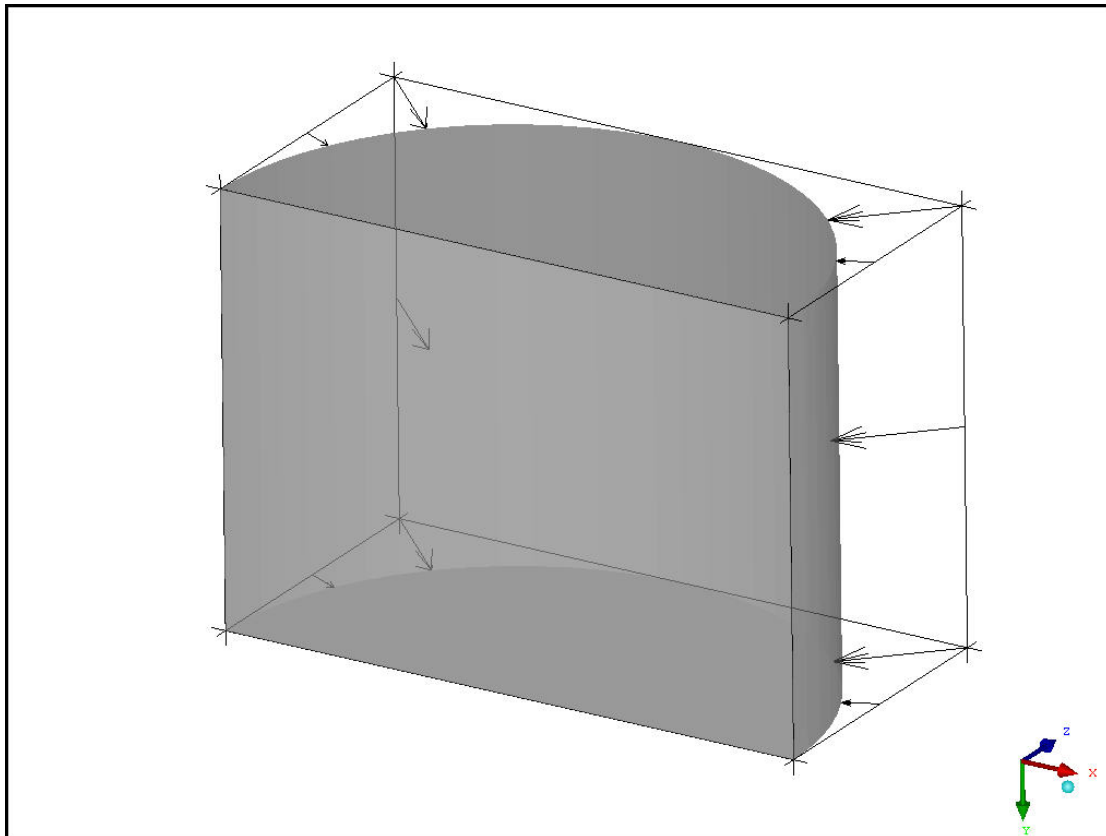
Στο τελικό στάδιο, τα σημεία (nodes) που βρίσκονται στο επίπεδο συμμετρίας αποδίδονται σε καινούργιο part που ονομάζουμε symmetry και η πρώτη σειρά από στοιχεία (elements) σε part που ονομάζουμε water. Το part water θα παίζει το ρόλο του στόμιου εισαγωγής νερού μέσα στο ακροφύσιο.

4.2.2 Διακριτοποίηση χώρου κατεργασίας

Η διακριτοποίηση του χώρου κατεργασίας είναι αντίστοιχη με του ακροφυσίου.

Α) Αρχικοποίηση του BLOCK

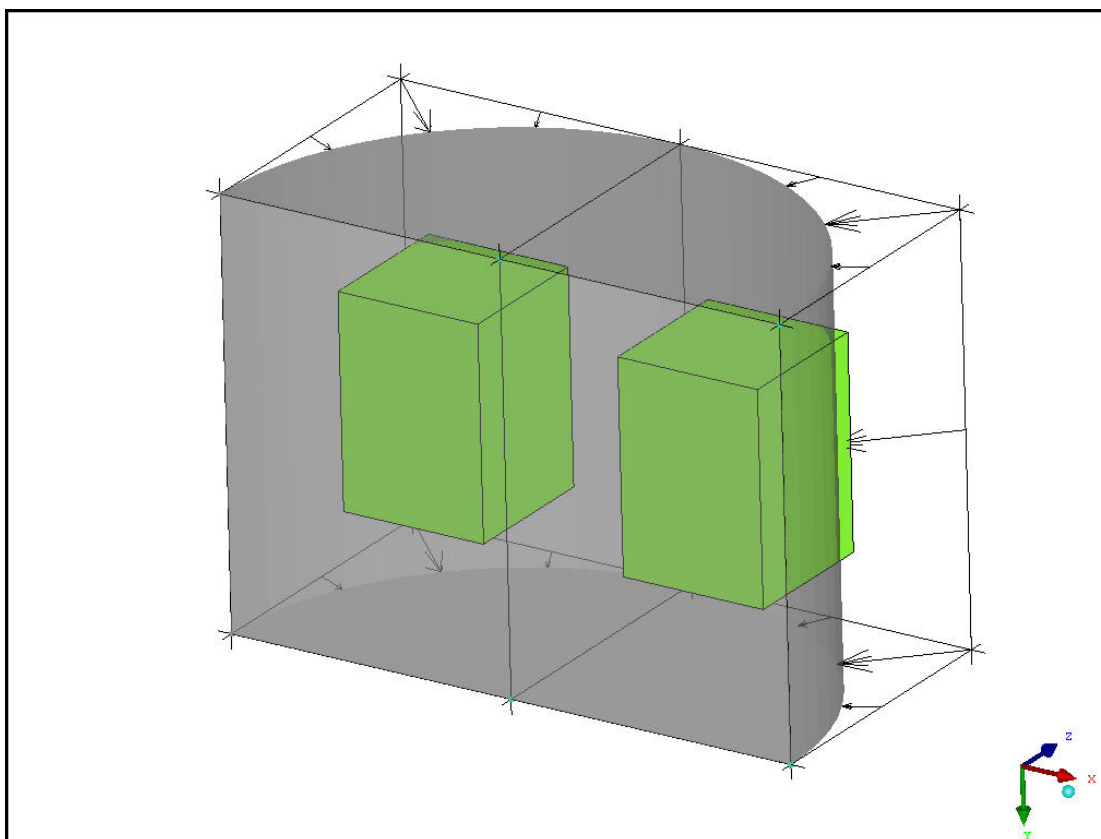
Blocking> Create Block> Initialize Block : Επιλέγεται Type 3D και διαλέγεται το σύνολο της γεωμετρίας. Το αρχικό BLOCK και η συσχέτιση των ακμών του με την επιφάνεια του μοντέλου φαίνεται στο σχήμα 4.24



Σχήμα 4.24

Β) Διαίρεση αρχικού BLOCK

Blocking> Split Block> Split Block : Επιλέγεται ως Split Method : Prescribed Point. Το αρχικό BLOCK χωρίζεται στη μέση ως προς τη διεύθυνση x. Το χωρισμένο BLOCK φαίνεται στο σχήμα 4.25



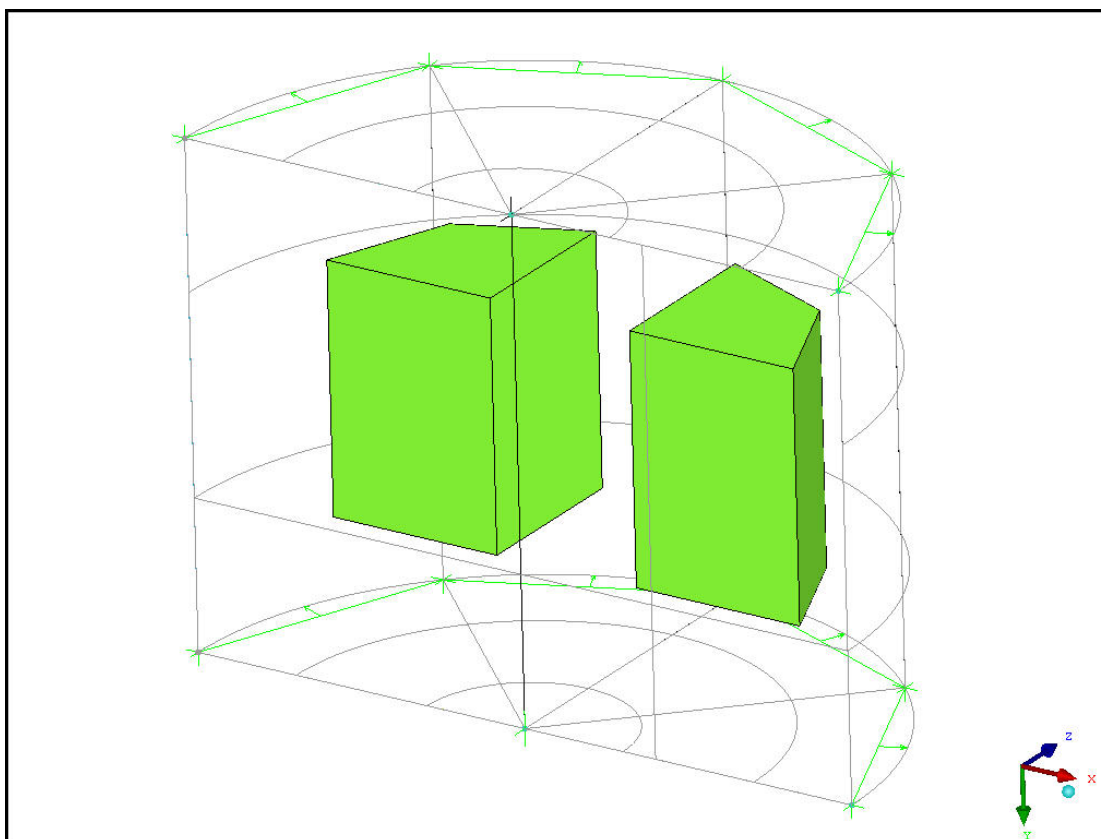
Σχήμα 4.25

Γ) Προβολή σημείων

Blocking> Associate> Snap Project Vertices : Τα σημεία των blocks προβάλλονται πάνω στις επιφάνειες CAD.

Δ) Συσχέτιση ακμών των blocks με γραμμές του μοντέλου

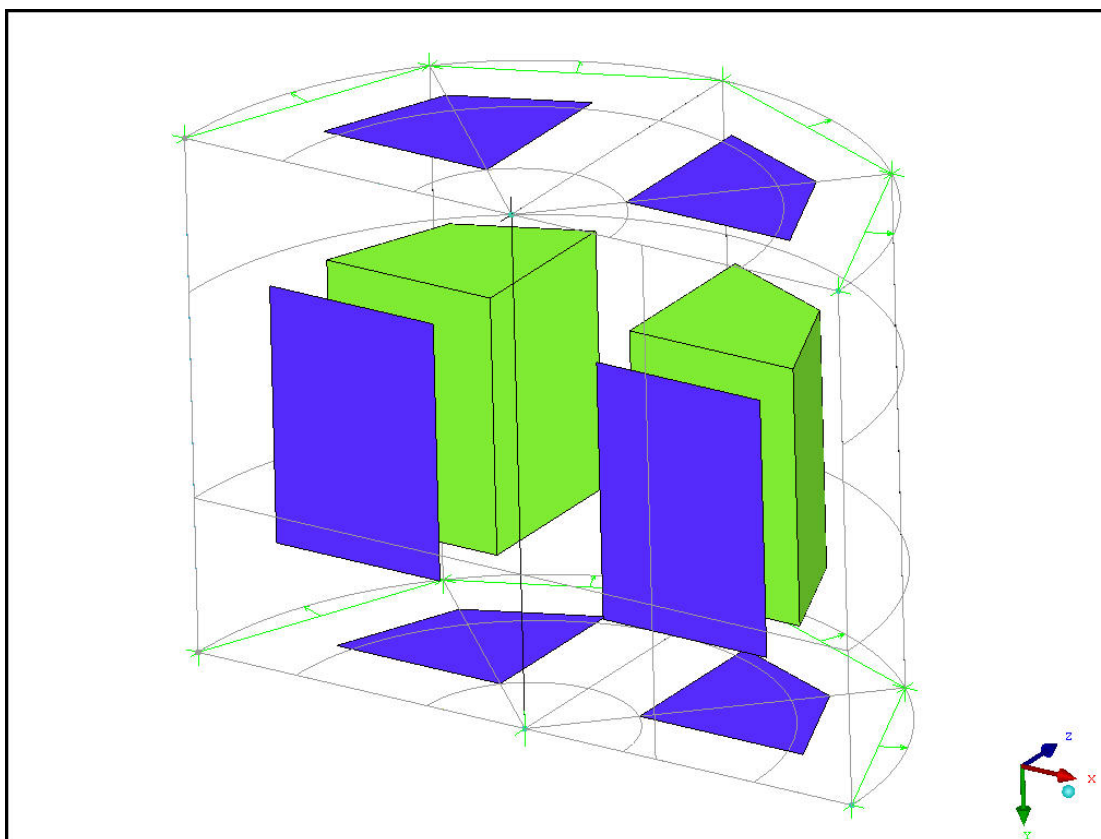
Blocking> Associate> Associate Edge to Curve : Επιλέγονται με Edges οι ακμές των blocks και με Curves οι γραμμές του μοντέλου πάνω στις οποίες πρόκειται να οριστεί η προβολή. Τα blocks μετά την προβολή και την συσχέτιση των ακμών φαίνονται στο σχήμα 4.26



Σχήμα 4.26

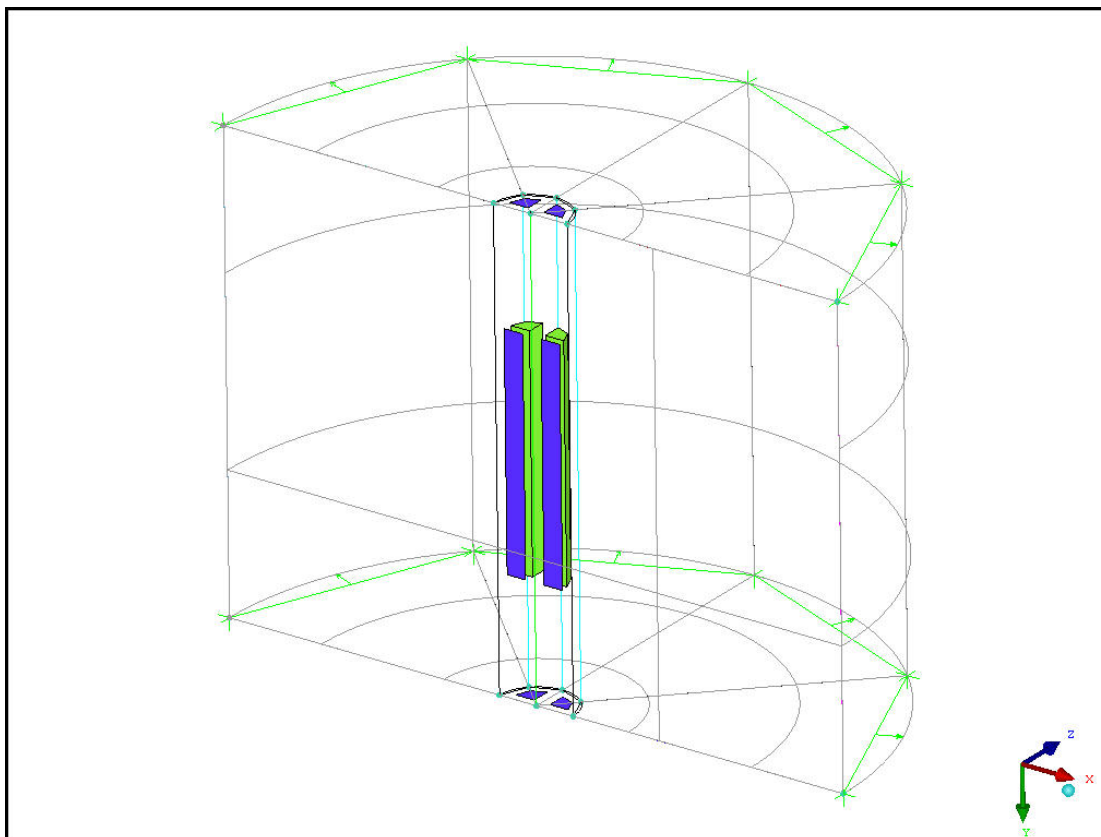
Ε) Δημιουργία O-GRID

Blocking> Split Block> O-GRID Blocking : Επιλέγονται τα blocks και τα κατάλληλα faces όπως φαίνεται στο σχήμα 4.27



Σχήμα 4.27

Με κατάλληλες επεμβάσεις τα σημεία των καινούργιων blocks μετακινούνται στις επιθυμητές θέσεις και γίνονται οι απαραίτητες συσχετίσεις των ακμών των blocks με τις γραμμές του μοντέλου. Για να αντιστοιχίσει πλήρως το στόμιο εισαγωγής νερού στο χώρο κατεργασίας με το στόμιο εξαγωγής του ακροφυσίου είναι απαραίτητη και η δημιουργία ενός δεύτερου O-GRID. Τα blocks και τα faces που επιλέγονται φαίνονται στο σχήμα 4.28

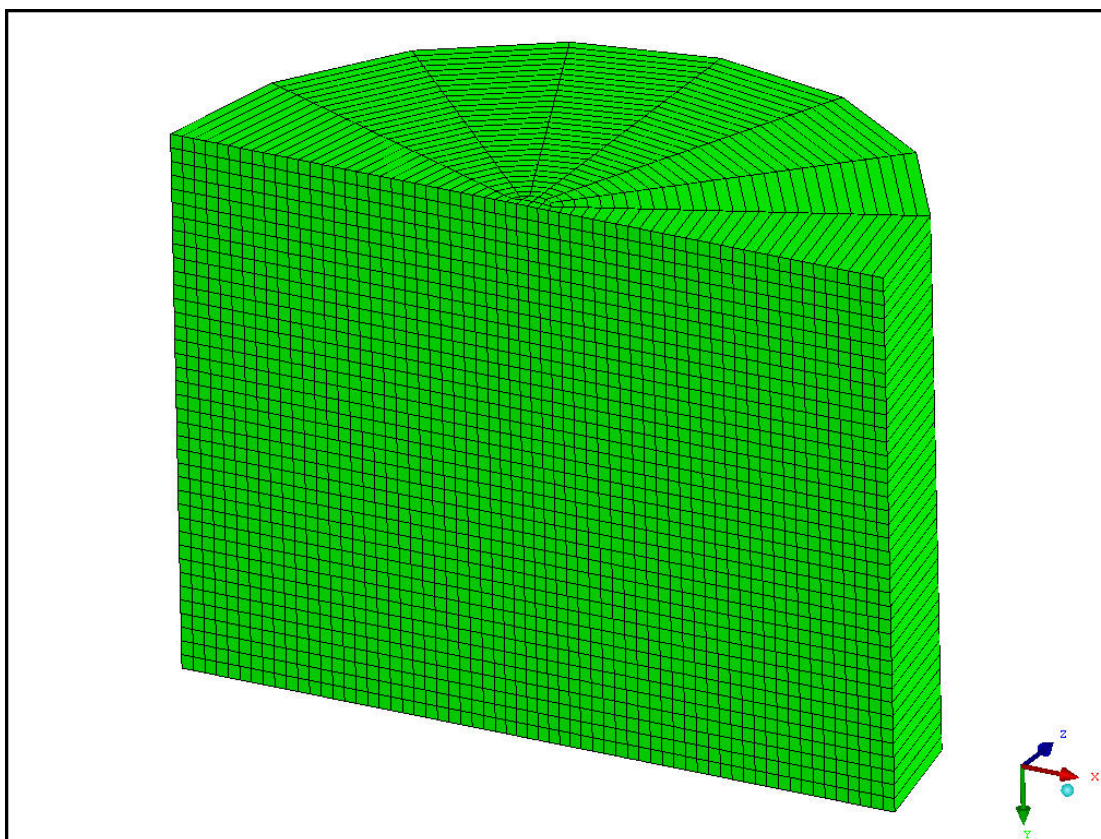


Σχήμα 4.28

Blocking> Pre-mesh Params> Edge Params> Ρυθμίζεται η διαίρεση των ακμών των blocks.

Blocking> Pre-mesh> Convert to unstructured mesh.

Το πλέγμα μετά την δημιουργία και του δεύτερου O-GRID φαίνεται στο σχήμα 4.29

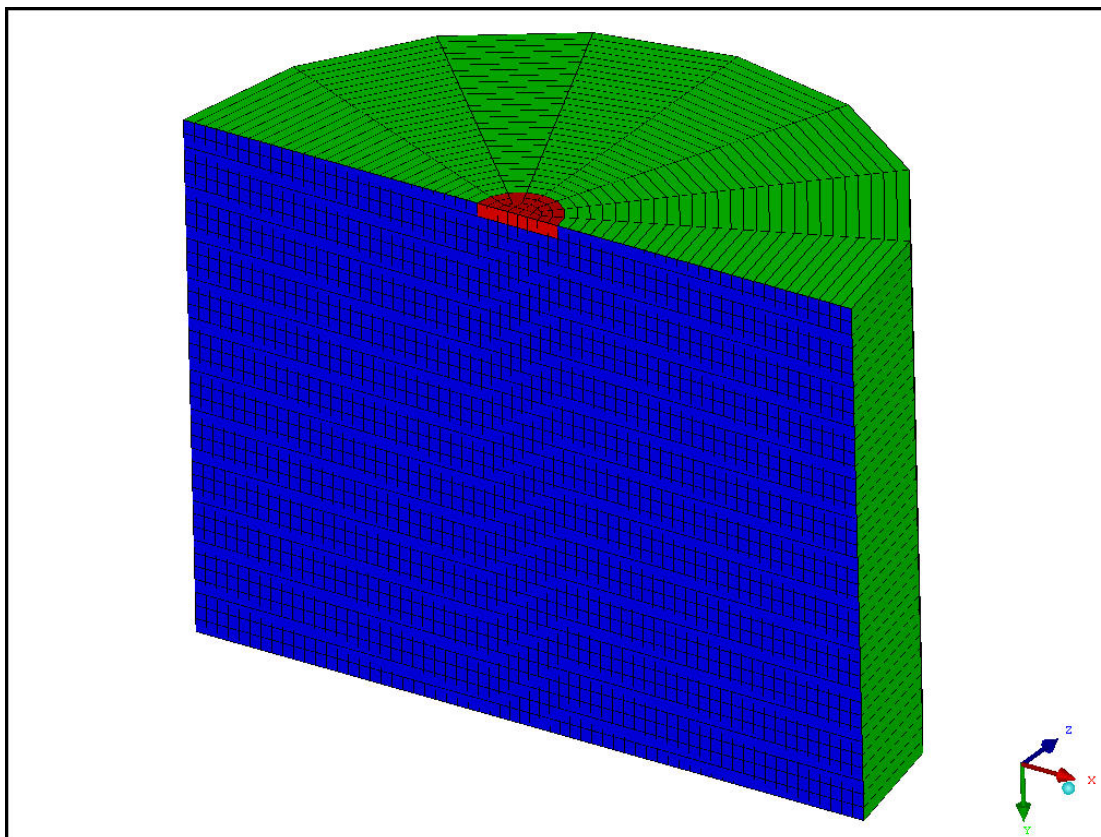


Σχήμα 4.29

ΣΤ) Χωρισμός σε επιμέρους τμήματα (parts)

Όπως και στο ακροφύσιο, τα σημεία (nodes) που βρίσκονται στο επίπεδο συμμετρίας αποδίδονται σε καινούργιο part που ονομάζουμε symmetry και τα elements της πρώτης σειράς που αντιστοιχούν στο στόμιο εξαγωγής του ακροφυσίου σε part που ονομάζουμε inlet. Το part inlet θα παίξει το ρόλο του στόμιου εισαγωγής νερού μέσα στο χώρο κατεργασίας.

Η τελική διακριτοποίηση του χώρου κατεργασίας φαίνεται στο σχήμα 4.30



Σχήμα 4.30

4.2.3 Διακριτοποίηση στόχου

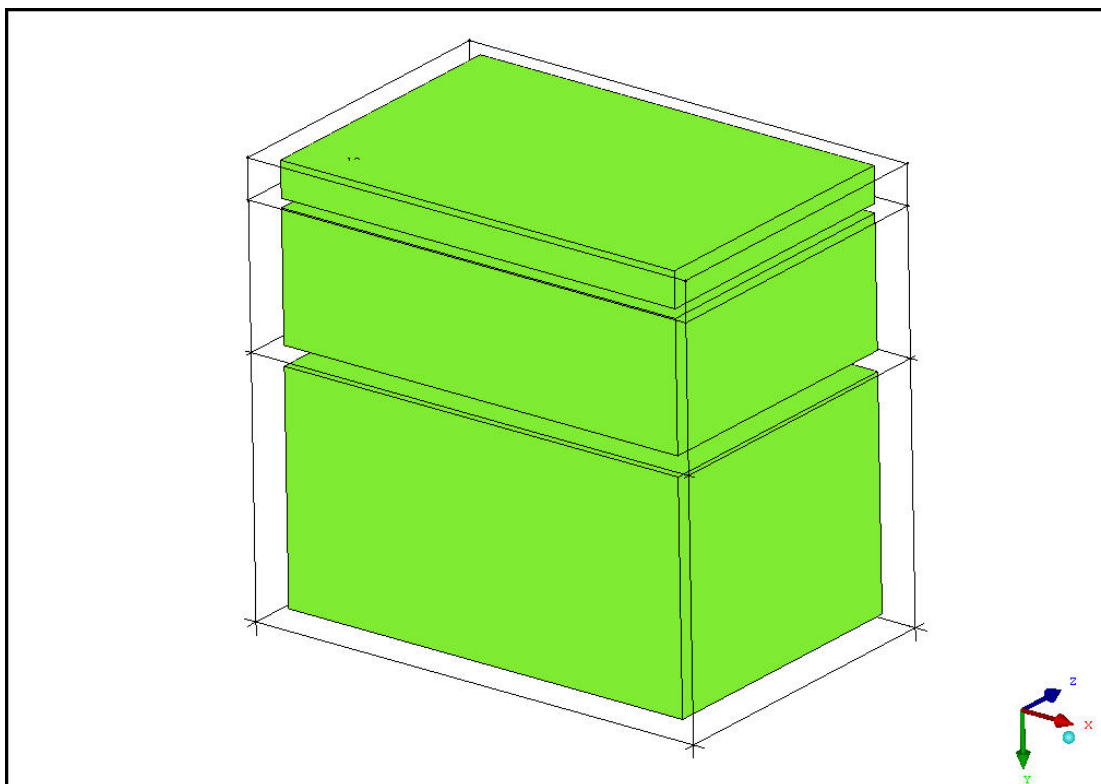
Η διακριτοποίηση του στόχου είναι πιο απλή καθώς το αρχικό BLOCK ταυτίζεται με την γεωμετρία.

A) Αρχικοποίηση του BLOCK

Blocking> Create Block> Initialize Block : Επιλέγεται Type 3D και διαλέγεται το σύνολο της γεωμετρίας.

B) Διαίρεση αρχικού BLOCK

Blocking> Split Block> Split Block : Επιλέγεται ως Split Method : Prescribed Point. Το αρχικό BLOCK χωρίζεται περίπου στη μέση ως προς τη διεύθυνση y, καθώς και 0.1 mm από την επάνω επιφάνεια στην ίδια διεύθυνση. Η διακριτοποίηση του ανώτερου BLOCK που δημιουργείται θα παίξει το ρόλο της επίστρωσης του στόχου. Το χωρισμένο BLOCK φαίνεται στο σχήμα 4.31



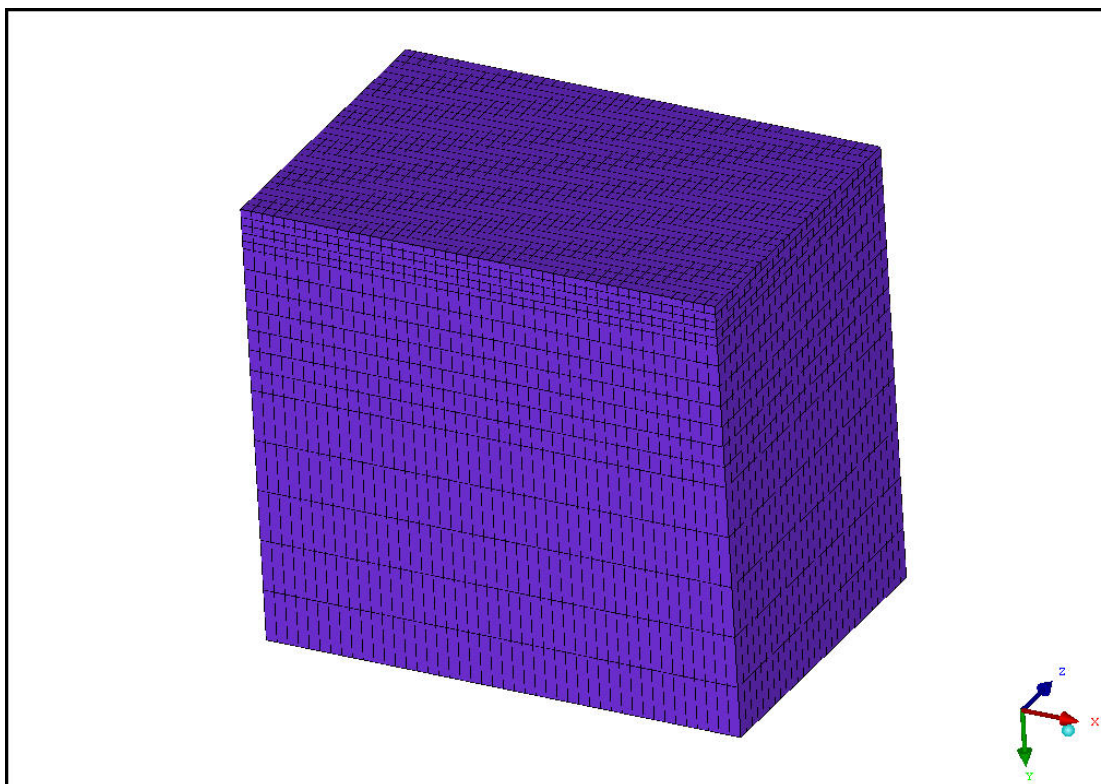
Σχήμα 4.31

Προβολή σημείων δεν απαιτείται και οι ακμές του BLOCK είναι εξ'ορισμού συσχετισμένες με τις γραμμές του μοντέλου.

Blocking> Pre-mesh Params> Edge Params> Ρυθμίζεται η διαίρεση των ακμών των blocks. Η διαίρεση των ακμών του block της επίστρωσης είναι σημαντικά πιο πυκνή. Επίσης, πιο πυκνό είναι και το ανώτερο μέρος του υποστρώματος του στόχου.

Blocking> Pre-mesh> Convert to unstructured mesh.

Το πλέγμα μετά την διαίρεση των ακμών των blocks φαίνεται στο σχήμα 4.32

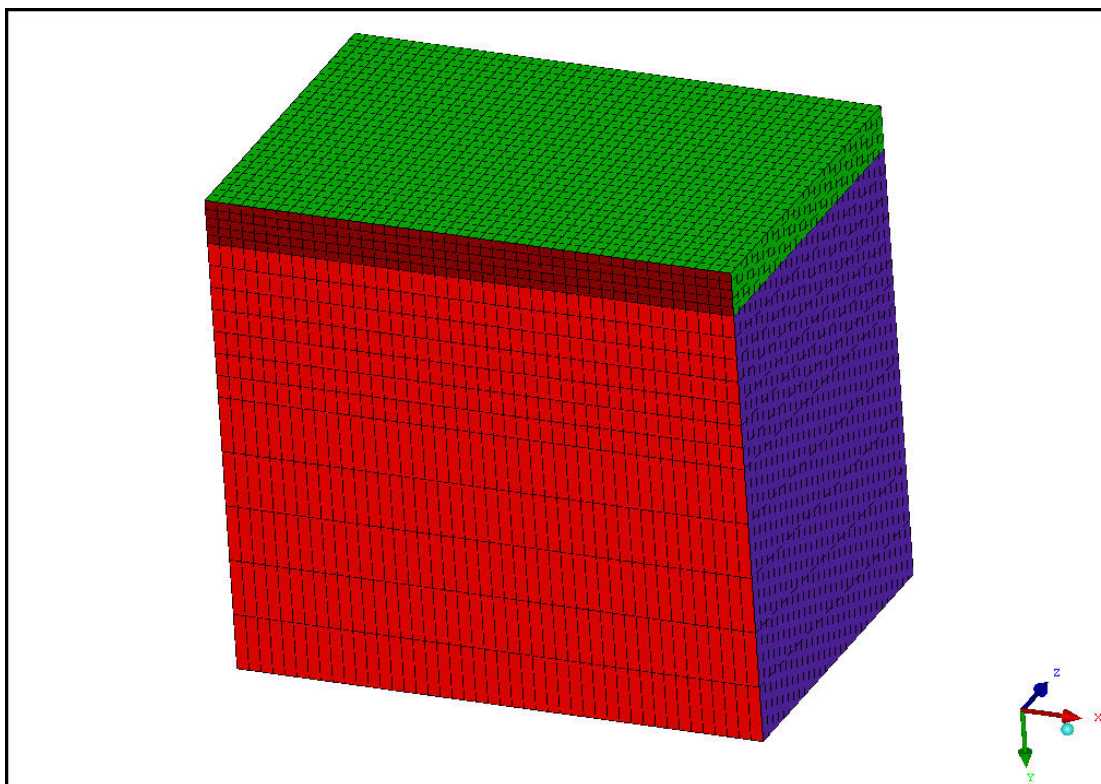


Σχήμα 4.32

Γ) Χωρισμός σε επιμέρους τμήματα (parts)

Όπως και στα υπόλοιπα τμήματα, τα σημεία (nodes) που βρίσκονται στο επίπεδο συμμετρίας αποδίδονται σε καινούργιο part που ονομάζουμε symmetry. Τα elements του ανώτερου block αποδίδονται σε καινούργιο part που θα παίξει το πόλο της επικάλυψης του στόχου. Το part αυτό ονομάζεται coating.

Η τελική διακριτοποίηση του στόχου φαίνεται στο σχήμα 4.33



Σχήμα 4.33

Στο τελικό στάδιο, οι διακριτοποιημένες γεωμετρίες του χώρου κατεργασίας και του στόχου συγχωνεύονται, καθώς θα επεξεργαστούν ταυτόχρονα από το LS-DYNA3D.

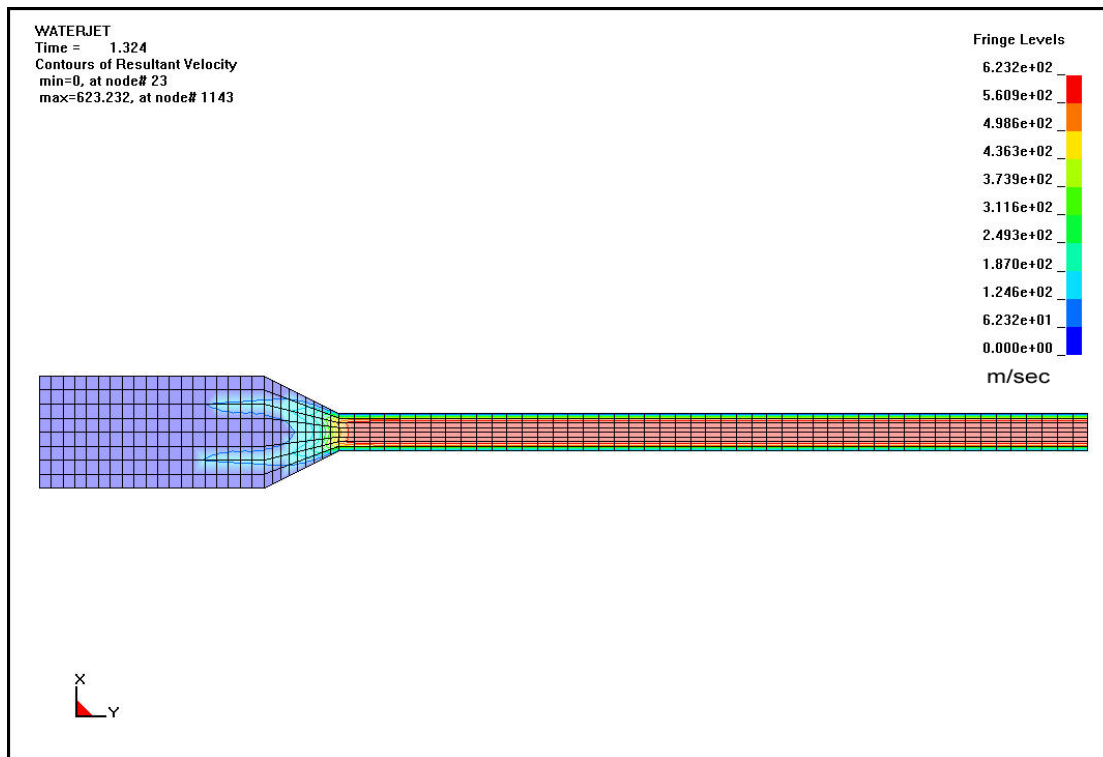
Το αρχείο εισαγωγής (input file) για το LS-DYNA3D δημιουργείται και εξάγεται μέσα από το ICEM CFD. Τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Μελέτη Ακροφυσίου

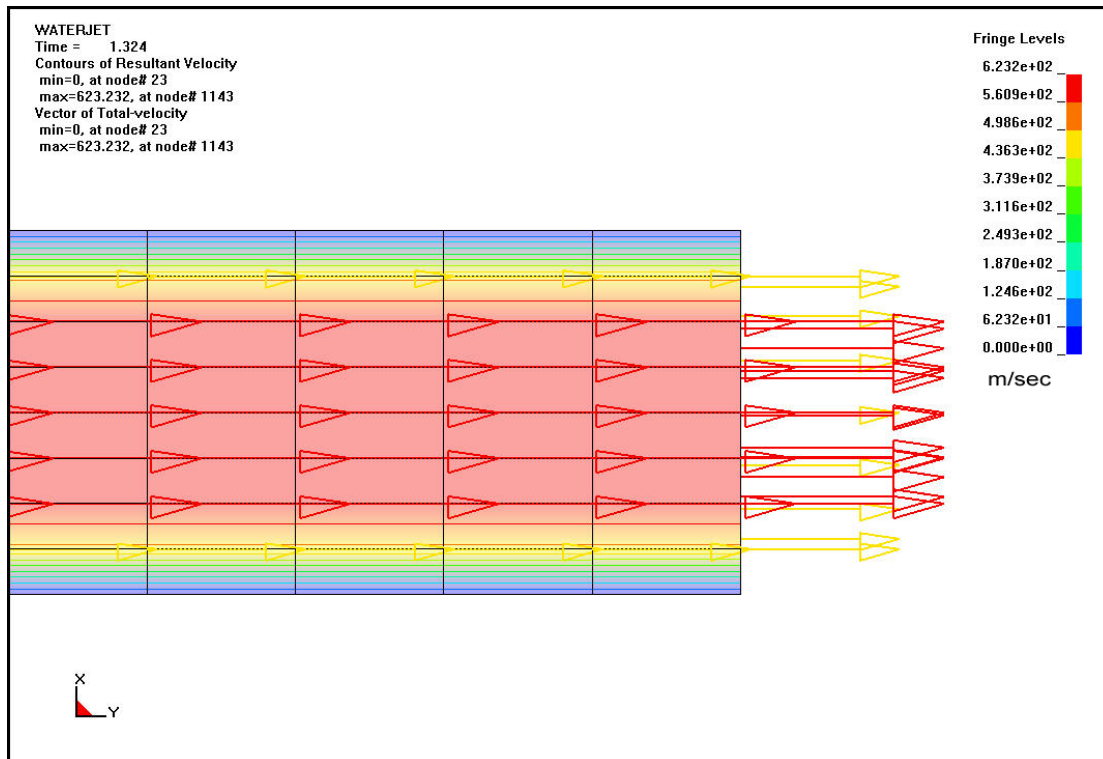
Στην πρώτη φάση του υπολογισμού, μελετήθηκε η ταχύτητα του νερού καθώς κινείται μέσα στο ακροφύσιο.

Το ακροφύσιο, στην αρχή του υπολογισμού, θεωρείται ότι καταλαμβάνεται από αέρα. Το νερό εισέρχεται από το στόμιο εισαγωγής του ακροφυσίου με σταθερή ταχύτητα ίση με 55 m/sec. Το στρώμα του νερού που έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα του ακροφυσίου, λόγω δυνάμεων συνάφειας, έχει ταχύτητα μηδέν. Το φαινόμενο αυτό μοντελοποιήθηκε με τον περιορισμό όλων των βαθμών ελευθερίας στους περιφερειακούς κόμβους του πλέγματος του ακροφυσίου. Όσο απομακρυνόμαστε από τα τοιχώματα του ακροφυσίου, η ταχύτητα του νερού αυξάνει κατά τη διεύθυνση του άξονα των x. Όταν σταθεροποιείται η ροή, η μέση ταχύτητα του νερού που εξέρχεται από το ακροφύσιο είναι περίπου δέκα φορές πιο μεγάλη σε σχέση με αυτή που εισέρχεται. Στο σχήμα 5.1 απεικονίζεται η κατανομή των ταχυτήτων κατά μήκος του ακροφυσίου όταν η ροή έχει σταθεροποιηθεί.



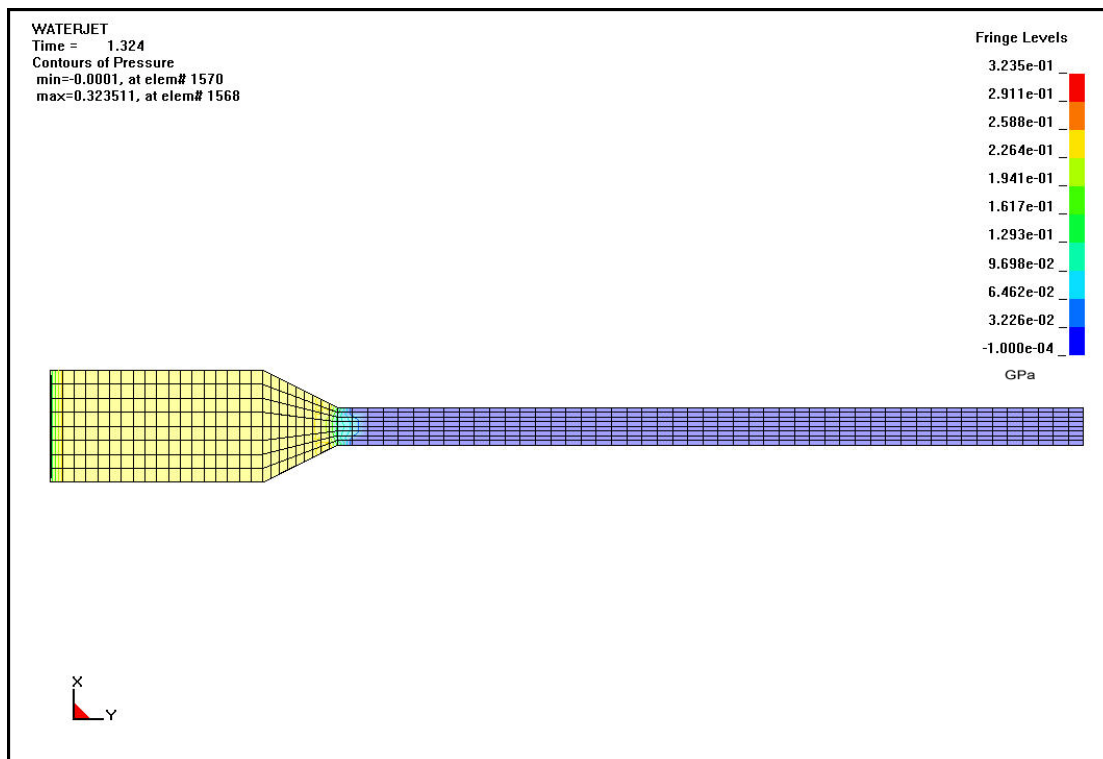
Σχήμα 5.1

Στο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το προφίλ της ταχύτητας με το οποίο το νερό εξέρχεται από το ακροφύσιο.



Σχήμα 5.2

Η δυναμική ενέργεια του νερού αυξάνει απότομα καθώς το ακροφύσιο συστέλλεται και, όπως είναι αναμενόμενο, η στατική πίεση μειώνεται. Η πτώση αυτή της στατικής πίεσης φαίνεται στο σχήμα 5.3



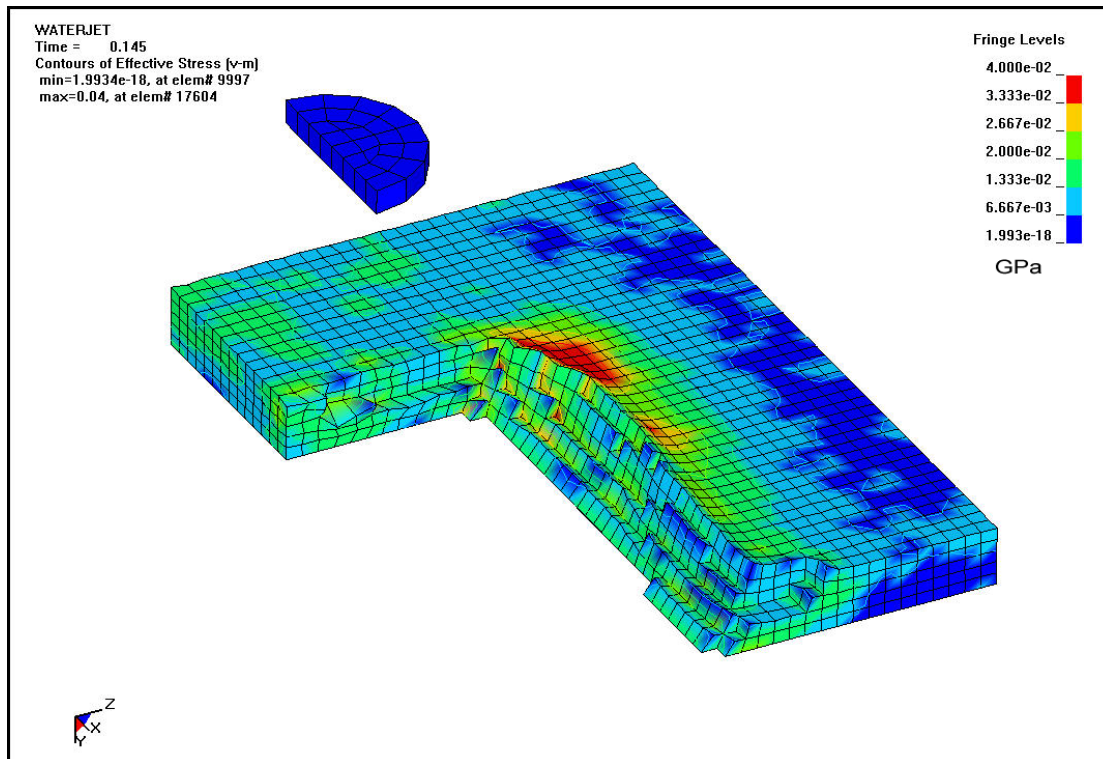
Σχήμα 5.3

Το σταθερό προφίλ της ταχύτητας του νερού, με την οποία εξέρχεται από το ακροφύσιο, χρησιμοποιήθηκε ως το προφίλ της ταχύτητας με την οποία εισέρχεται το νερό στο χώρο κατεργασίας από το αντίστοιχο στόμιο εισαγωγής.

5.2 Κατανομή τάσεων Von-Mises κατά την διαδικασία αφαίρεσης της επικάλυψης

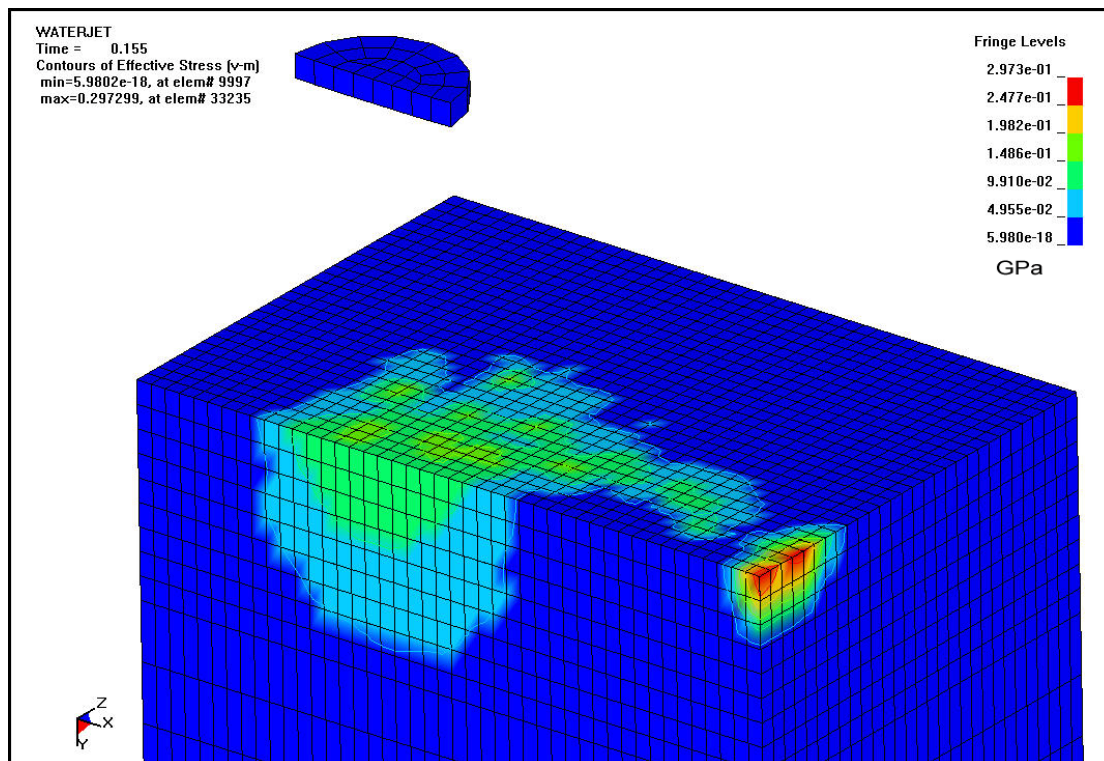
Στη δεύτερη φάση μελετήθηκε η εξέλιξη του πεδίου των τάσεων κατά την αλληλεπίδραση waterjet – στόχου.

Η κατανομή των τάσεων Von-Mises στην επικάλυψη καθώς κατεργάζεται απεικονίζεται στο σχήμα 5.4. Παρατηρείται ότι οι μέγιστες τάσεις που υπολογίζονται συγκεντρώνονται στη διαβρωμένη περιφέρεια της επικάλυψης. Αυτό υποδεικνύει ότι η διαπλάτυνση του κινούμενου waterjet φαίνεται να είναι ένα σημαντικό φαινόμενο το οποίο επηρεάζει την εξέλιξη της μορφολογίας της κατεργασίας.



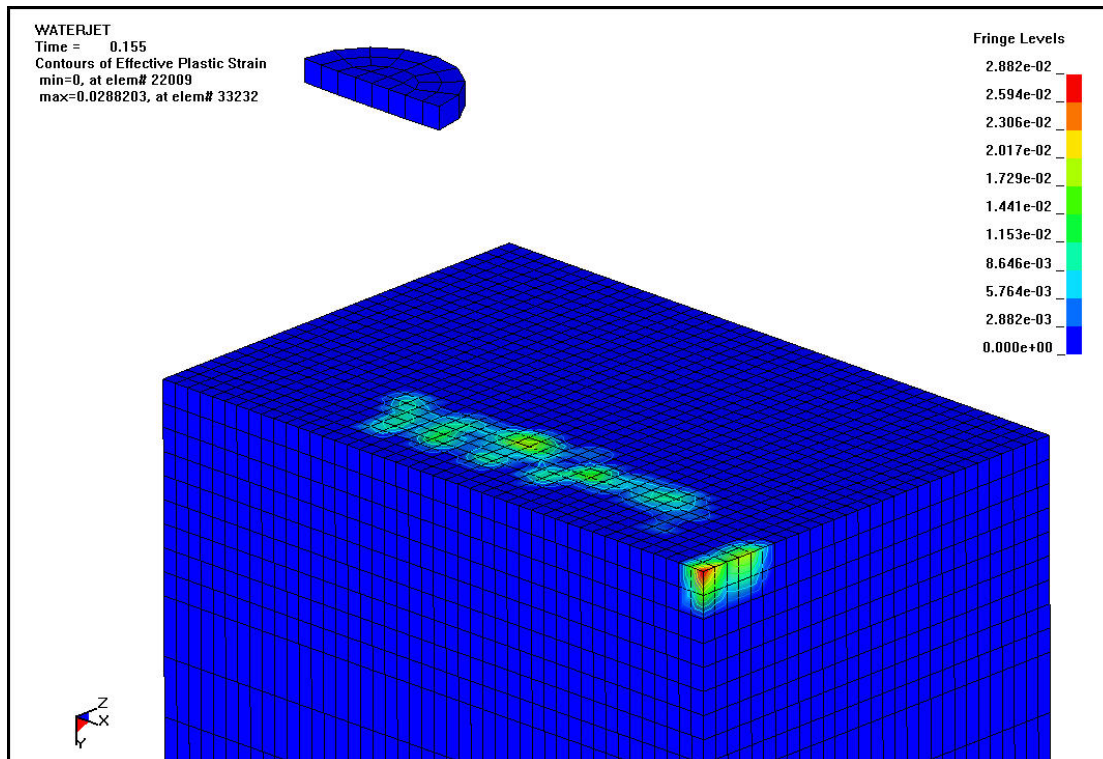
Σχήμα 5.4

Από την παρατήρηση της κατανομής των τάσεων Von-Mises στο ανώτερο τμήμα του υποστρώματος του στόχου, διαπιστώνεται ότι υπάρχουν σημαντικές παραμένουσες τάσεις στη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της εμπρος πλευράς και της πάνω επιφάνειας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5. Οι τάσεις αυτές είναι της τάξης των 0.297 GPa.



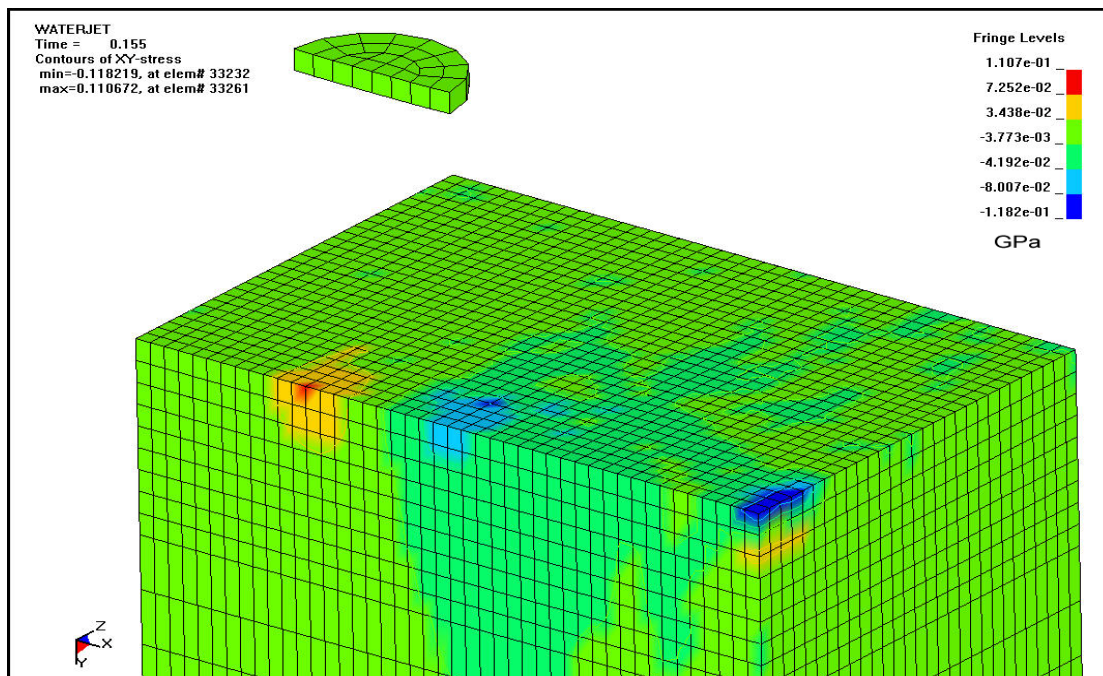
Σχήμα 5.5

Παράλληλα παρατηρείται ότι στην ίδια περιοχή, η πλαστική παραμόρφωση είναι αυξημένη σε σχέση με το υπόλοιπο υπόστρωμα. Τα επίπεδα της πλαστικής παραμόρφωσης του υποστρώματος φαίνονται στο σχήμα 5.6



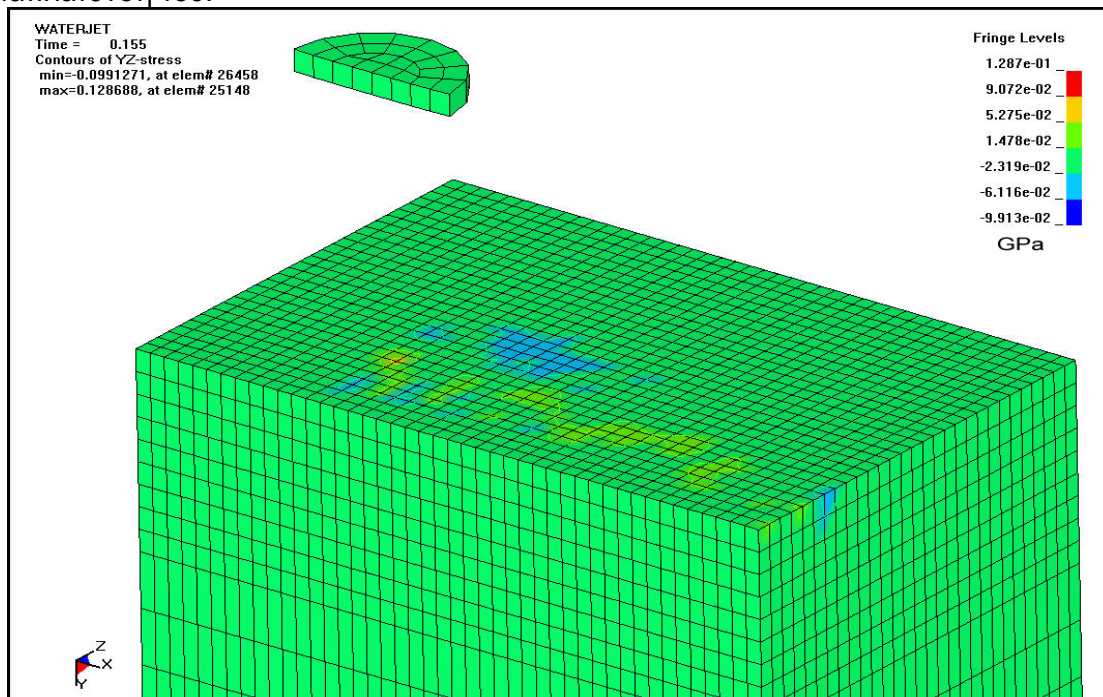
Σχήμα 5.6

Η απεικόνιση της κατανομής των τάσεων x-y φαίνεται στο σχήμα 5.7. Σύμφωνα με το σχήμα, οι τάσεις κατά τη διεύθυνση x είναι μεγαλύτερες στην αριστερή περιοχή σε σχέση με τη δεξιά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του πεδίου του waterjet στη διεύθυνση $-x$ αντιτίθεται στην κίνηση του στόχου που κινείται προς την αντίθετη διεύθυνση. Επομένως, υπάρχει αύξηση της διάτμησης στην αριστερή περιοχή.



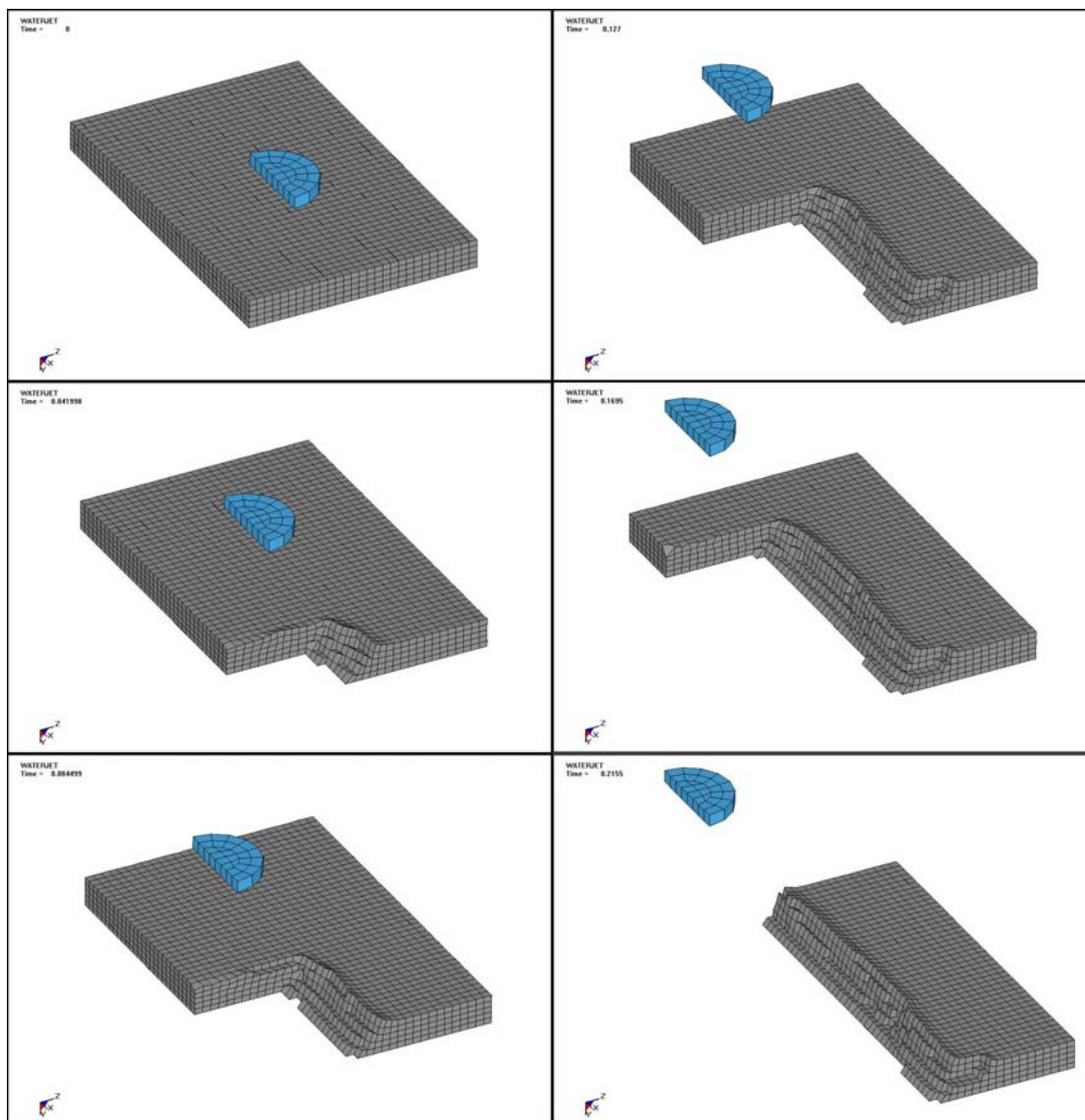
Σχήμα 5.7

Η απεικόνιση της κατανομής των τάσεων y-z φαίνονται στο σχήμα 5.8. Παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες τιμές των τάσεων είναι θετικές. Αυτό είναι αυτονόητο εξαιτίας της κατεύθυνσης της κρούσης του waterjet καθώς έρχεται σε επαφή με τον στόχο και τη διαπλάτυνσή του.



Σχήμα 5.8

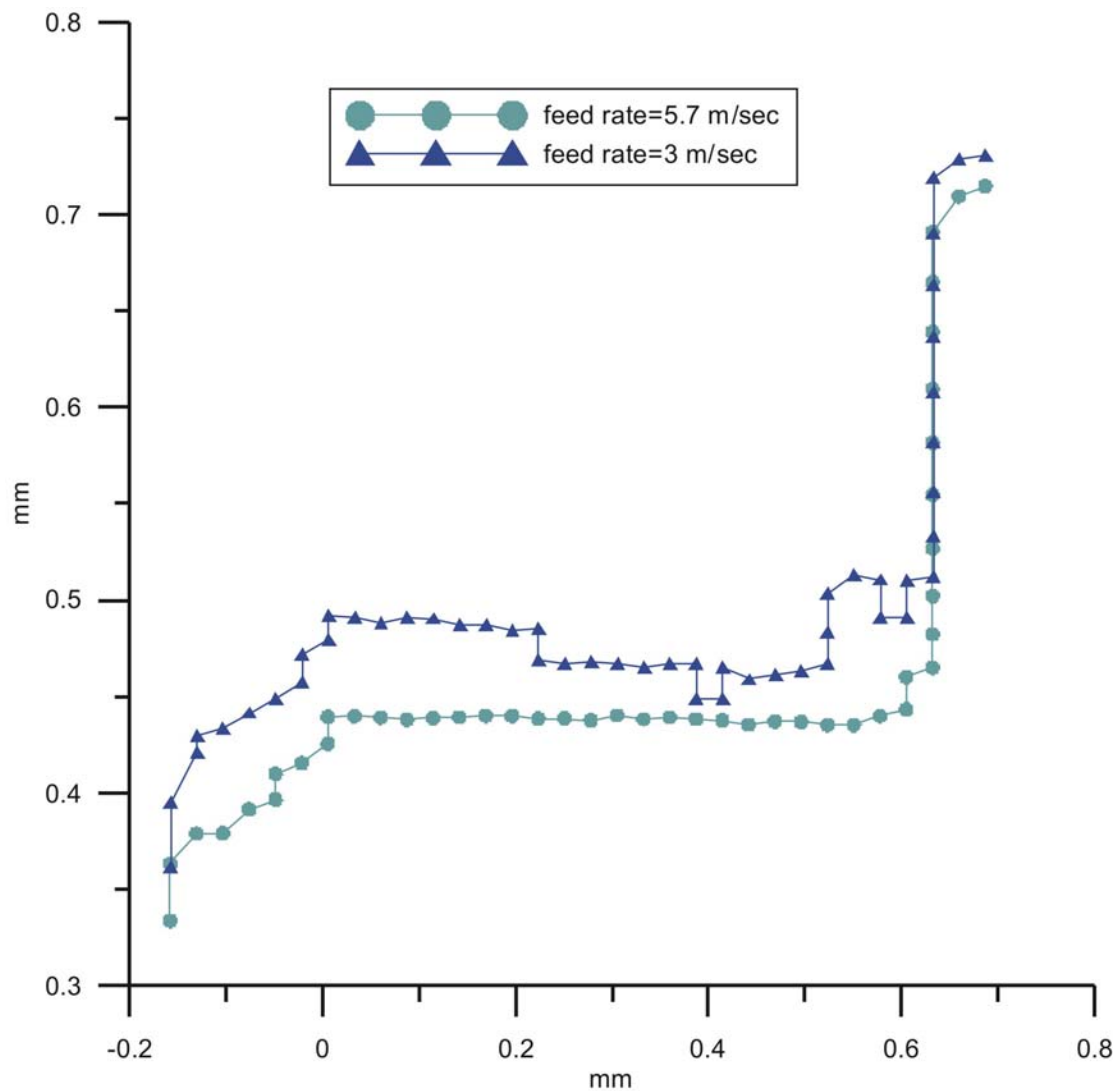
Στο σχήμα 5.9 παρατίθενται τα στάδια της εξέλιξης της αφαίρεσης της επικάλυψης.



Σχήμα 5.9

5.3 Σύγκριση kerk για διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης

Στην τελευταία φάση μελετήθηκε η επίδραση της ταχύτητας στο πλάτος της κατεργασμένης επιφάνειας (kerf). Οι ταχύτητες που επιλέχθηκαν είναι 5.7 m/sec και 3.0 m/sec αντίστοιχα. Το πλάτος των κατεργασμένων επιφανειών, που προέκυψε φαίνεται στο σχήμα 5.10



Σχήμα 5.10

Όπως φαίνεται από το σχήμα, το αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο: για την μικρότερη ταχύτητα πρόωσης (3 m/sec) παρατηρείται μεγαλύτερο πλάτος, δηλαδή αφαιρείται περισσότερο υλικό από την επικάλυψη. Αντίθετα, για την μεγαλύτερη ταχύτητα (5.7 m/sec) παρατηρείται μικρότερο πλάτος, επομένως αφαιρείται λιγότερο υλικό.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ένα μη-γραμμικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε για τη μελέτη της επίδρασης της πρόωσης στην κατεργασία waterjet. Ο υπολογισμός διεξήχθη με χρησιμοποίηση του κώδικα LS-DYNA3D. Ο βασικός σκοπός ήταν να προσομοιωθεί ο μηχανισμός της αφαίρεσης υλικού κατά την πρόσκρουση νερού με υψηλή πίεση σε κινούμενο στόχο. Ειδικότερα, υπολογίστηκαν οι τάσεις Von-Mises στην επικάλυψη κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, η κατανομή των τάσεων Von-Mises και οι τάσεις σε άλλα βασικά επίπεδα στο υπόστρωμα, καθώς και η σύγκριση του kerf για δυο πειράματα με διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης.

Τα πειραματικά αποτελέσματα, που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία, συμφωνούν με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας και αυτό αποδεικνύει την ορθότητα του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Το μοντέλο μπορεί να παρέχει πλήθος αποτελεσμάτων στον χρήστη οπότε και είναι χρήσιμο για την μελέτη της κατεργασίας waterjet συνολικά. Επομένως, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων της κατεργασίας.

Συνέχεια της εργασίας μπορεί να είναι η μοντελοποίηση της κοπής και η σύγκριση των αποτελεσμάτων για διάφορα υλικά σε διαφορετικές ταχύτητες πρόωσης καθώς και με διαφορετικές πιέσεις νερού. Τελικός στόχος είναι η πλήρης παραμετρικοποίηση της διαδικασίας υδροκοπής ώστε οι παράμετροι της κοπής να μην προσδιορίζονται μόνο εμπειρικά όπως συμβαίνει μέχρι σήμερα.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παρατίθενται τα αρχεία εισαγωγής για το LS-DYNA3D (keyword input files) που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας.

7.1 Keyword Input File για την μελέτη του ακροφυσίου

```
*KEYWORD
*TITLE
WATERJET
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
Writing Control Cards
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*CONTROL_TERMINATION
2
*CONTROL_TIMESTEP
0,1
$
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
0.1E-02
$
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
Writing Materials
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*MAT_NULL
1, 1.29E-09, -1.0E-08, 1.67E-17, 0, 0, 0, 0
$
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL
1, 0, 0, 0, 0, 0.401, 0.401, 0
0, 0
$
*MAT_NULL
2, 1.0E-06, -1.0E-04, 1.0E-15, 0, 0, 0, 0
$
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL
2, 0, 2.2, 9.54, 14.6, 0.28, 0.28, 0
0, 0
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
Writing Sections
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*SECTION_SOLID_ALE
1, 11

*SECTION_SOLID_ALE
```

2, 11, 4

```
$
*ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP
1, 1
2, 1
$
*CONTROL_ALE
$   DCT   NADV   METH   AFAC   BFAC   CFAC   DFAC   EFAC
      2       1       1    -1.0    0.0    0.0    0.0
$   START   END   AAFAC   VFACT   PRIT   EBC   PREF   NSIDEB
      0.0    0.0     0.0     0.0
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$           Writing Parts
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*PART
SOLID
$   id   secid   mid   eosid   hgid
      1       1       1       1       0
*PART
WATER
$   id   secid   mid   eosid   hgid
      2       2       2       2       0
$
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
4,2,0,1
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
5,2,0,1
$
*DEFINE_CURVE
1
0.0,55.0
2.0,55.0
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$           Writing Nodes
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*NODE
$   Node          x          y          z          tc          rc
      1 -0.22499999  0.09473684 2.7553643e-017  0  0
      2 -0.22499999  0  2.7553643e-017  0  0
      3 -0.20781432  0.094736839  0.086093817  0  0
      .
      .
      .
2571  0.043043407  8.2775514  0.10391598  0  0
```

```

2572 0.057387087      8.277551  0.13854469  0  0
2573 0.043043406      8.4000003  0.10391598  0  0
2574 0.057387086      8.4  0.13854468  0  0
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
Writing Elements
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*ELEMENT_SOLID
1233 2 1 2 4 3 5 6 8 7
1234 2 5 6 8 7 9 10 12 11
1235 2 3 4 14 13 7 8 16 15
1236 2 7 8 16 15 11 12 18 17
.
.
.
3076 1 2567 2457 2463 2569 2568 2458 2464 2570
3077 1 2029 2176 2179 2032 2569 2463 2469 2571
3078 1 2569 2463 2469 2571 2570 2464 2470 2572
3079 1 2032 2179 2182 2035 2571 2469 2475 2573
3080 1 2571 2469 2475 2573 2572 2470 2476 2574
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
Writing Boundary Conditions
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
$BOUNDARY CONDITIONS
*BOUNDARY_SPC_SET
$SYMMETRY
1 0 0 0 1 1 1 0
*BOUNDARY_SPC_SET
$SYMMETRY-WALL
2 0 1 1 1 1 1 1
*BOUNDARY_SPC_SET
$WALL
3 0 1 1 1 1 1 1
*BOUNDARY_SPC_SET
$SYMMETRY-VELOCITY
4 0 1 0 1 1 1 1
*BOUNDARY_SPC_SET
$VELOCITY
5 0 1 0 1 1 1 1
*END

```

7.2 Keyword Input File για την μελέτη αλληλεπίδρασης waterjet-στόχου

```

*KEYWORD
*TITLE
WATERJET
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$

```

```

$           Writing Control Cards
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*CONTROL_TERMINATION
10.0
*CONTROL_TIMESTEP
0,0.6
$
*DATABASE_BINARY_D3PLOT
0.5E-03
$

$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$           Writing Materials
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*MAT_NULL
1, 1.29E-09, -1.0E-08, 1.67E-17, 0, 0, 0, 0
$
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL
1, 0, 0, 0, 0, 0.401, 0.401, 0
0, 0
$
*MAT_NULL
2, 1.0E-06, -1.0E-04, 1.0E-15, 0, 0, 0, 0
$
*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL
2, 0, 2.2, 9.54, 14.6, 0.28, 0.28, 0
0, 0
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
$  MID      RO      E      PR      SIGY      ETAN      FAIL      TDEL
   3  2.7E-06    73    0.33  345E-03    0.0
$  C      P    LCSS    LCSR      VP

$  EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8

$  ES1      ES2      ES3      ES4      ES5      ES6      ES7      ES8

$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
$  MID      RO      E      PR      SIGY      ETAN      FAIL      TDEL
   4  1.2E-06    0.9    0.25  40E-03    0.0    0.6
$  C      P    LCSS    LCSR      VP

$  EPS1      EPS2      EPS3      EPS4      EPS5      EPS6      EPS7      EPS8

```



```

      3      3      3      0      2
*PART
COATING
$   id   secid   mid   eosid   hgid
      4      3      4      0      2
$
$
*SET_PART_LIST
1
3,4
$
*HOURGLASS
1,1,0.00001
$
*HOURGLASS
2,4,0.05
$

*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
11,2,0,3,446
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
12,2,0,3,446
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
13,2,0,3,635
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
14,2,0,3,635
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
15,2,0,3,636
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
16,2,0,3,636
$
*SET_NODE_GENERAL
50
PART,3,4
$
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
50,1,0,2
$
*BOUNDARY_NON_REFLECTING
1, 1, 1
$
*DEFINE_CURVE
2
0.0,5.7
10.0,5.7
$
*DEFINE_CURVE
3
0.0,1.0
10.0,1.0
$

```



```

*DEFINE_CURVE
4
0.0,1.0
10.0,1.0
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
      Writing Nodes
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*NODE
$ Node      x      y      z      tc      rc
    1      -0.15   0.04090909   0      0      0
    2  -0.15000001   0      0      0      0
    3  -0.13857453   0.04090909   0.057399445   0      0
    .
    .
    .
41577      -0.151   1.6409091   0.71724139   0      0
41578      -0.151   1.6409091   0.7448276   0      0
41579      -0.151   1.6409091   0.7724138   0      0
41580      -0.151   1.6409091   0.80000001   0      0
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
      Writing Elements
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
*ELEMENT_SOLID
4365      1      1      2      4      3      5      6      8      7
4366      1      5      6      8      7      9      10     12     11
4367      1      9      10     12     11     13     14     16     15
    .
    .
    .
41145      3  41366  41546  41576  41396  41367  41547  41577  41397
41146      3  41367  41547  41577  41397  41368  41548  41578  41398
41147      3  41368  41548  41578  41398  41369  41549  41579  41399
41148      3  41369  41549  41579  41399  41370  41550  41580  41400
$
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
      Writing Boundary Conditions
$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$
$
$BOUNDARY CONDITIONS
*BOUNDARY_SPC_SET
$AIR-SYMMETRY
    1      0      0      0      1      1      1      0
*BOUNDARY_SPC_SET
$TARGET-SYMMETRY
    2      0      0      0      1      1      1      0
*BOUNDARY_SPC_SET

```

```

$TRG_SYMM-CONSTRAIN_TRG
  3    0    0    1    1    1    1    1
*BOUNDARY_SPC_SET
$CONSTRAIN-TARGET
  4    0    0    1    1    1    1    1
*BOUNDARY_SPC_SET
 11    0    1    0    1    1    1    1
*BOUNDARY_SPC_SET
 12    0    1    0    1    1    1    1
*BOUNDARY_SPC_SET
 13    0    1    0    1    1    1    1
*BOUNDARY_SPC_SET
 14    0    1    0    1    1    1    1
*BOUNDARY_SPC_SET
 15    0    1    0    1    1    1    1
*BOUNDARY_SPC_SET
 16    0    1    0    1    1    1    1
*BOUNDARY_SPC_SET
 17    0    1    1    1    1    1    1
*BOUNDARY_SPC_SET
 18    0    1    1    1    1    1    1
*END

```

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Lemma E, Chen L, Siores E, Wang J (2002) Optimising the AWJ cutting process of ductile materials using nozzle oscillation technique. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42: 781-789
2. Hashish M (1989) A model for abrasive waterjet (AWJ) machining. *Journal of Engineering Material and Technology* 111: 155-161,
3. Hashish M (1987) 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,
4. Momber A, Kovacevic R (1994) Secondary Fragmentation in Waterjet Cutting of Brittle Multiphase Materials. *Waterjet Cutting Technology*, ed. Allen N, Mechanical Engineering Publications Ltd., London, England, pp 139-150
5. Hashish M (1995) Material Properties in Abrasive Waterjet Machining. *ASME Journal of Engineering for Industry* 117: 578-583
6. Zeng J, Kim T (1996) An Erosion Model of Polycrystalline Ceramics in Abrasive Waterjet Cutting. *Wear* 193: 207-217
7. Zeng J, Kim T (1996) An Erosion Model for Abrasive Waterjet Milling of Polycrystalline Ceramics. *Wear* 199: 275-282.
8. Yong Z, Kovacevic R (1997) Simulation of Effects of Waterjet-Mixture Film on Impact Contact in Abrasive Waterjet Machining. *International Journal of Mechanical Sciences* 39(6): 729-739
9. Mabrouki T, Raissi K, Cornier A (2000) Numerical simulation and experimental study of the interaction between a pure high-velocity waterjet and targets: contribution to investigate the decoating process. *Wear* 239: 260-273
10. Mabrouki T, Raissi K (2002) Stripping process modelling: interaction between a moving waterjet and coated target. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 42: 1247-1258
11. Momber A, Kovacevic R (1998) Generation of Abrasive Water Jets. *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, Springer, Great Britain, pp 73-74
12. Ye J, Kovacevic R (1999) Turbulent solid-liquid flow through the nozzle of premixed abrasive waterjet cutting systems. *Journal of Engineering Manufacture* 213(1): 59-67