Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Συστήματα Αυτοματισμού»

# Σχεδιασμός αισθητήρα πλήρωσης για σιλό κοκκωδών υλικών στην αλευροβιομηχανία

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δανιήλ Ζ. Έξαρχος

Επιβλέπων : Βασίλειος Σπιτάς
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2012

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω ορισμένα πρόσωπα τα οποία με βοήθησαν και συνέβαλαν καθοριστικά στην πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.
Κατ' αρχήν, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή και δάσκαλο μου, λέκτορα στη σχολή μηχανολόγων μηχανικών ΕΜΠ, Δρ. Βασίλειο Σπιτά. Τον ευχαριστώ για την βοήθεια που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια της εργασίας αυτής, αλλά κυρίως για τις συμβουλές που μου πρόσφερε, τόσο σε θέματα που αφορούν το επάγγελμα του μηχανικού, όσο και γενικότερα.
Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μανώλη Γκιθώνα για την καθοδήγση στα υπολογιστικά προγράμματα και τον Νικόλα Παρασκευόπουλο για την βοήθειά του στην εκτέλεση του πειράματος.
Παράλληλα θέλω να ευχαριστήσω την εταιρεία 'ΜΥΛΟΙ ΜΑΡΡΑ' η οποία μου έδωσε την ευκαιρία να συμμετάσχω στην επίλυση ενός προβλήματος στην αλευροβιομηχανία. Ευχαριστώ τους μηχανικούς βάρδειας και τον αρχιμηχανικό για το πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσαν και την προθυμία τους να με βοηθήσουν σχετικά με την εργασία μου.
.
Τέλος, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στην επίλυση ενός προβλήματος της διαδικασίας παραγωγής σε μια βιομηχανία, και συγκεκριμένα στην εύρεση της ποσότητας του υλικού που είναι αποθηκευμένη στα σιλό μιας αλευροβιομηχανίας. Αρχικά, γίνεται μια έρευνα για την αλευροβιομηχανίες, τις πρώτες ύλες τους, τις διαδικασίες παραγωγής, τα Β.Δ.Τ. (Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αλευροβιομηχανία που επισκεφθήκαμε και οι διαδικασίες παραγωγής που χρησιμοποιεί. Αναλύεται η θεωρία των κοκκωδών υλικών στην οποία βασίστηκε η μελέτη. Έπειτα, περιγράφεται το πρόβλημα της πλήρωσης των σιλό και παρουσιάζεται η προτεινόμενη λύση. Περιγράφονται οι τιμές που προέκυψαν από την υπολογιστική διαδικασία με πεπερασμένα στοιχεία στο πρόγραμμα SAP2000. Τα αριθμητικά αποτελέσματα επαληθεύονται από πειράματα που έγιναν υπό κλίμακα, με την χρήση άμμου ως κοκκώδες υλικό. Τέλος, ακολουθεί η πρόταση για την ολοκλήρωση της κατασκευής του αισθητήρα πλήρωσης σιλό με κοκκώδη υλικά.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:**
Κοκκώδη υλικά, αλευροβιομηχανία, σιλό, αισθητήρες, LVDT αισθητήρες, ημισφαιρικά κελύφη

# ABSTRACT

This thesis refers to solving a problem of the production process in an industry, and specifically in finding the amount of material stored in typical flour silos flour. Initially, there is a review for the milling, the raw materials, the production processes and BAT (Best Available Techniques) in flour industry. Then, it is presented the visited flour mill and the manufacturing processes used. It is analyzed the theory of granular materials in which the study was based. Then, it is described the problem of filling the silo and the proposed solution. After that, it is presented the values obtained from the computational process with the program SAP2000. The obtained numerical results are verified against experimental data on downscale tests, using sand as the granular material. Finally, there is the proposal to complete the construction of the sensor filling silos with granular materials.

**KEY WORDS:**
Granular materials, wheat industry, silo, sensors, LVDT sensors, hemisphere shells

Κεφάλαιο 1$^{ο}$ – Περιγραφή κλάδου αλευροβιομηχανιών ..... 1
Εισαγωγή ..... 1
1.1. Περιγραφή κλάδου αλευροβιομηχανιών ..... 1
1.1.1. Γενικά Στοιχεία για τον Κλάδο ..... 1
1.1.2. Εγχώρια Αγορά Αλευροβιομηχανίας ..... 2
1.1.3. Οι σημαντικότερες Εταιρίες στον Κλάδο ..... 3
1.2. Διαδικασίες παραγωγής προϊόντων αλευρόμυλων ..... 3
1.3. Καταναλώσεις και εκπομπές της παραγωγής προϊόντων αλευρόμυλων ..... 4
1.3.1. Καταναλώσεις ..... 4
- Νερό ..... 4
- Ενέργεια ..... 4
1.3.2. Εκπομπές ..... 5
- Αέριες εκπομπές ..... 5
- Αέριες εκπομπές από διεργασίες καύσης ..... 5
- Αέριες εκπομπές από την παραγωγική διαδικασία ..... 5
- Υγρά απόβλητα ..... 5
1.3.3. Στερεά απόβλητα ..... 6
- Στερεά απόβλητα από διεργασίες αντιρρύπανσης αερίων εκπομπών ..... 6
- Στερεά απόβλητα από παραγωγικές διαδικασίες ..... 6
- Στερεά απόβλητα (ιλύς) από διεργασίες βιολογικών καθαρισμών ..... 6
Στερεά απορρίμματα από επιστροφές προϊόντων ..... 7
1.4. Παρουσίαση προτεινόμενων Β.Δ.Τ. ..... 7
1.4.1. Πρόληψη της ρύπανσης ..... 7
- Τεχνικές μείωσης όγκου και βελτίωσης της ποιότητας αερίων εκπομπών ..... 7
1.4.2. Περιορισμός της ρύπανσης ..... 8
- Επεξεργασία και διάθεση αερίων εκπομπών ..... 8
- Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων ..... 8
- Συνοπτική παρουσίαση των ΒΔΤ ..... 8
Κεφάλαιο 2$^{0}$ – Μύλοι Μάρρα ..... 12
Εισαγωγή ..... 12
2.1. Παρουσίαση μύλων Μάρρα ..... 12
2.2. Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής των μύλων ..... 13

2.2.1. Καθαρισμός ..... 14
α) Μαγνητικός διαχωριστής ..... 14
β) Διαχωριστής ..... 14
γ) Αναρροφητήρας ..... 14
δ) Απομακρυντής πετρών ..... 14
ε) Κυλινδρικός διαχωριστής ..... 14
στ) Τριβείο ..... 14
2.2.2. Προετοιμασία / Σκλήρυνση ..... 15
2.2.3. Σαρωτής ..... 15
2.2.4. Άλεσμα ..... 15
Εικόνα 2.7. Böhler Grinding machine ..... 16
2.2.5. Κοσκίνισμα ..... 16
2.2.6. Καθαριστές ..... 17
Εικόνα 2.9. Purifier Polaris MQRG ..... 17
Κεφάλαιο 3 – Παρουσίαση θέματος ..... 18
3.1. Παρουσίαση προβλήματος ..... 18
3.2. Παρουσίαση των δεδομένων ..... 20
3.2.1. Υλικό πλήρωσης ..... 20
3.2.2. Υλικό σιλό ..... 20
3.2.3. Ροή υλικού ..... 20
3.3. Παρουσίαση προτεινόμενης λύσης ..... 21
3.3.1. Συνοπτικά ..... 21
3.3.2. Αιτιολόγηση επιλογής ..... 21
Κεφάλαιο 4$^{ο}$ – Θεωρητικό υπόβαθρο για τα κοκκώδη υλικά ..... 24
Εισαγωγή ..... 24
4.1. Υπολογισμός τάσεων ..... 24
4.1.1. Συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών στα σιλό ..... 24
4.1.2. Απαιτήσεις πειραμάτων ..... 25
4.1.3. Τάσεις στα σιλό ..... 26
4.2. Επίδραση της υγρασία στον συντελεστή τριβής σε κοκκώδη υλικά ..... 29
4.2.1. Αναφορά πειραμάτων προσδιορισμού του συντελεστή τριβής μs ..... 29
4.2.2. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων του Lawton ..... 30
Α) Υλικά και μέθοδοι ..... 30
Β) Συμπεράσματα ..... 33

4.2.3. Πίνακας γωνιών τριβής ... 33
Κεφάλαιο 5ο – Υπολογιστική διαδικασία ... 34
Εισαγωγή ... 34
5.1. Υπολογιστική διαδικασία ... 34
5.1.1. Περιγραφή στοιχείων εισαγωγής ... 34
α) Δεδομένα προβλήματος ... 35
β) Υλικά ... 35
γ) Τιμές που προκύπτουν από τον προηγούμενο πίνακα ... 36
δ) Στοιχεία σιλό και ημισφαιρίου ... 37
5.1.2. Επαλήθευση υπολογιστικού πίνακα με το πρόγραμμα Silo Stress Tool ... 38
Κεφάλαιο 6 – Πείραμα υπό κλίμακα ... 49
6.1. Υλικά ... 49
6.2. Πειραματική Διαδικασία ... 50
6.2.1. Κατασκευή πειράματος ... 50
6.2.2. Δοκιμή με βάρη χωρίς την μετρητική συσκευή ... 50
6.2.3. Τοποθέτηση μετρητικής συσκευής ... 51
6.2.4. Φορτίσεις με βάρη για την εύρεση της παραμόρφωσης ... 51
1ο Πείραμα – Παραμόρφωση στη βάση ... 52
2ο Πείραμα – Παραμόρφωση σε όλο το σύστημα ... 52
3ο Πείραμα – Παραμόρφωση πειραματικού σιλό ... 52
4ο Πείραμα – Παραμόρφωση σε όλο το σύστημα ... 53
5ο Πείραμα – Παραμόρφωση στη βάση ... 53
6ο Πείραμα – Παραμόρφωση στη βάση ... 54
Τελικά αποτελέσματα ... 54
6.2.5. Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων ... 55
Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα – Επιλογή αισθητήρα LVDT ... 57
7.1. Περιγραφή αισθητήρα LVDT ... 57
7.2. Συμπεράσματα ... 59
7.3. Προτάσεις για την ολοκλήρωση της κατασκευής του αισθητήρα ... 60
Παράρτημα σχεδίων ... 61
Βιβλιογραφία ... 62

**Κεφάλαιο 1ο – Περιγραφή κλάδου αλευροβιομηχανιών**

# Εισαγωγή

Αρχικά, γίνεται η περιγραφή του κλάδου, και η θέση του στην ελληνική αγορά. Έπειτα περιγράφονται οι διαδικασίες παραγωγής και τα παράγωγα της επεξεργασίας του σιταριού. Στη συνέχεια, γίνεται μια ανάλυση των καταναλώσεων και των εκπομπών μιας αλευροβιομηχανίας, όπου σε συνδυασμό με τις προτεινόμενες Β.Δ.Τ., δίνουν μια εικόνα με πιθανά προβλήματα και λύσεις που μπορούν να προταθούν στην αλευροβιομηχανία που θα μελετήσουμε.

## 1.1. Περιγραφή κλάδου αλευροβιομηχανιών

### 1.1.1. Γενικά Στοιχεία για τον Κλάδο

Ο **κλάδος της αλευροβιομηχανίας** αποτέλεσε και εξακολουθεί να αποτελεί, παρά τα προβλήματα τα οποία αντιμετωπίζει, έναν από τους σημαντικότερους τομείς της βιομηχανίας τροφίμων και γενικότερα της Ελληνικής Βιομηχανίας. Η σημαντική ανάπτυξη, την οποία παρουσίασε ο κλάδος κατά την διάρκεια της δεκαετίας του '70 κυρίως λόγω των εξαγωγών της χώρας μας, ( κατείχε διεθνώς την δεύτερη θέση) δε συνεχίσθηκε και κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '80.

Με την ένταξη της χώρας μας στην **Ευρωπαϊκή Ένωση** και την αλλαγή του εξαγωγικού καθεστώτος σημειώθηκε σημαντική μείωση των εξαγωγών επιδρώντας στην πορεία του κλάδου. Η προσφερόμενη υψηλότερη τιμή σκληρού σίτου από το κοινοτικό καθεστώς, σε σχέση με την τιμή μαλακού σίτου, έστρεψε τους Έλληνες παραγωγούς στην καλλιέργεια σκληρού σίτου δημιουργώντας έλλειψη μαλακού σίτου, με αποτέλεσμα η κάλυψη των αναγκών των ελληνικών αλευροβιομηχανιών να γίνεται μέσω εισαγωγών.

Αποτέλεσμα των μεταβολών αυτών ήταν η **ένταση του ανταγωνισμού** στην εγχώρια αγορά ειδικά μετά την απελευθέρωση των τιμών των αλεύρων, το 1991 και με την κατάργηση του καθεστώτος διατίμησης, το οποίο επέβαλε συγκεκριμένα όρια αγοραπωλησιών (quotas).

Ο ανταγωνισμός εντάθηκε περαιτέρω με φαινόμενα οξύτατου πολέμου τιμών μεταξύ των δραστηριοποιούμενων εταιριών του κλάδου. Κύριο χαρακτηριστικό του κλάδου είναι η ύπαρξη μεγάλου αριθμού μικρών μονάδων με μικρή παραγωγική δυναμικότητα και παλαιό μηχανολογικό εξοπλισμό οι οποίες όμως εκτοπίζονται από την αγορά, μη ανταποκρινόμενες στις απαιτήσεις της.

Οι μεγάλες βιομηχανικές μονάδες του κλάδου καλύπτουν μικρό ποσοστό του συνόλου των δραστηριοποιούμενων μονάδων, διαθέτουν σύγχρονες εγκαταστάσεις και είναι εγκαταστημένες κοντά σε λιμάνια και περιοχές παραγωγής σίτου.

### 1.1.2. Εγχώρια Αγορά Αλευροβιομηχανίας

Οι αλλαγές οι οποίες σημειώθηκαν στον κλάδο των αλευροβιομηχανιών από τις αρχές της δεκαετίας του '80 και η μείωση των εξαγόμενων ποσοτήτων αλεύρων, έστρεψε τις εγχώριες μονάδες αναγκαστικά προς την εσωτερική αγορά, η οποία όμως διέθετε περιορισμένη δυνατότητα απορρόφησης των προϊόντων του κλάδου.

**Τα προϊόντα του κλάδου της αλευροβιομηχανίας περιλαμβάνουν:**

- άλευρα από μαλακό σιτάρι, το οποίο χρησιμοποιείται στην αρτοποιία και την ζαχαροπλαστική.
- σιμιγδάλι από σκληρό σιτάρι, το οποίο χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ζυμαρικών.
- υποπροϊόντα άλεσης σίτου όπως κτηνάλευρων πίτυρα, βήτες κλπ τα οποία χρησιμοποιούνται για ζωοτροφές.

Η **συνολική παραγωγή αλεύρων** κατά τη διάρκεια των τελευταίων πέντε ετών κυμαίνεται μεταξύ 750 - 890 χιλ. τόννους περίπου. Η κυριότερη κατηγορία παραγόμενων αλεύρων είναι του τύπου 70% τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου ποσοστό 60% της συνολικής παραγωγής.

Σε σταθερά επίπεδα κυμαίνεται κατά τη διάρκεια της τελευταίας πενταετίας η φαινομενική κατανάλωση αλεύρων, ανερχόμενη σε 690 - 695 χιλ. τόνους περίπου ετησίως.

Το μεγαλύτερο τμήμα της **κατανάλωσης αλεύρων** αφορά την παρασκευή ψωμιού (περίπου ποσοστό 78%) η κατανάλωση του οποίου παρουσιάζει την τελευταία δεκαετία στασιμότητα, η οποία αποδίδεται στην αλλαγή των διατροφικών συνηθειών και στην έλλειψη περαιτέρω περιθωρίων ανόδου.

Παράλληλα πρέπει να σημειωθεί ότι παρατηρείται αύξηση της κατανάλωσης **αρτοσκευασμάτων** και ετοίμων προϊόντων ζύμης, όπως επίσης και της αγοράς κρουασάν. Σημειώνεται ότι η πραγματική κατανάλωση αλεύρων θεωρείται πως είναι σημαντικά μεγαλύτερη της παρουσιαζόμενης, επειδή εκτιμάται ότι υφίσταται διακίνηση αλεύρων χωρίς παραστατικά, κυρίως από μικρούς μύλους.

Οι **εξαγωγές αλεύρων** της χώρας μας κυμαίνονται σε 20 - 30 χιλ. τόννους ετησίως καλύπτοντας ποσοστό 4% περίπου, της συνολικής εγχώριας παραγωγής. Οι εξαγωγές σιμιγδαλιού, οι οποίες εμφανίζονται τελευταία ανοδικές ανέρχονται σε 15 χιλ. τόννους ετησίως, καλύπτοντας περίπου το 12% - 15% της συνολικής εγχώριας παραγωγής σιμιγδαλιού.

Σημειώνεται ότι η εγχώρια παραγωγή σιμιγδαλιού κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών παρουσιάζει ανοδική πορεία, η οποία αποδίδεται στην αυξανόμενη εγχώρια ποσότητα σκληρού σίτου.

Οι εισαγόμενες ποσότητες σιμιγδαλιού είναι πολυ μικρές όπως και των άλλων αλεύρων. Σημειώνεται ότι η χώρα μας είναι πλεονασματική σε σκληρό σίτο, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου εξάγεται, χωρίς να μεταποιείται για την παραγωγή σιμιγδαλιού.

### 1.1.3. Οι σημαντικότερες Εταιρίες στον Κλάδο

Στον κλάδο της αλευροβιομηχανίας δραστηριοποιούνται σήμερα σημαντικός αριθμός μικρού μεγέθους επιχειρήσεων που συνεχώς εκτοπίζονται από την αγορά και ένας μικρός αριθμός μεγάλων βιομηχανικών μονάδων, που καταλαμβάνουν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς.

Οι κυριότερες **αλευροβιομηχανίες** με σημαντικά μερίδια στην εγχώρια αγορά είναι οι εξής: Μύλοι Αγίου Γεωργίου Α.Ε., Κυλινδρόμυλοι Λούλης Α.Ε., Αλλατίνη Α.Ε. και Κυλινδρόμυλοι Σαραντόπουλος Α.Ε. οι οποίες και είναι εισηγμένες στην Κύρια Αγορά του Χρηματιστηρίου Αξιών Αθηνών, η εταιρία Κυλινδρόμυλοι Παπαφίλη Α.Ε. και οι Μύλοι Κεπένου η οποία εισήχθη στην Παράλληλη αγορά του Χ.Α.Α. , οι Κυλινδρόμυλοι Κρήτης και οι Μύλοι Χατζηκρανιώτη στον Τύρναβο.

## 1.2. Διαδικασίες παραγωγής προϊόντων αλευρόμυλων

Για την παρασκευή των αλεύρων κατά βάση χρησιμοποιείται το σιτάρι, και μόνο δευτερευόντως γίνεται χρήση μικρών ποσοτήτων σικάλεως ή ακόμα σπανιότερα καλαμποκιού. Τα τελικά προϊόντα είναι αλεύρι, σιμιγδάλι, πίτουρα, βίττες και πτηνάλευρα και λοιπά απορρίμματα αλέσεως. Τα κύρια στάδια της παραγωγική διαδικασίας αλευροβιομηχανιών είναι:

- Μεταφορά στο εργοστάσιο, προκαθαρισμός και αποθήκευση: Το σιτάρι μεταφέρεται στο εργοστάσιο, είτε με βαρέα οχήματα είτε με πλοία, προκαθορίζεται σε σίτες, και με χρήση εξαερισμού καθαρίζεται από την τυχόν σκόνη που έχει και οδηγείται στις κατάλληλες εγκαταστάσεις αποθηκεύσεως.
- Καθαρισμός των κόκκων: Με την κατεργασία αυτή επιτυγχάνεται ο αποχωρισμός των διαφόρων προσμίξεων, όπως σκόνης, τμημάτων άχυρου, μικρών λίθων, ξένων κόκκων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κόσκινα, αεριστήρες, μαγνητικοί διαχωριστήρες, διαλογείς κόκκων, βούρτσες, πλυντήρια, στραγγιστήρια. Παλαιότερα χρησιμοποιείτο και υγρός καθαρισμός των κόκκων που παρήγαγε και μικρή ποσότητα υγρών αποβλήτων. Σήμερα όμως ο καθαρισμός γίνεται με ξηρό τρόπο και κατά την διεργασία αυτή δεν παράγονται καθόλου υγρά απόβλητα.
- Κλιματισμός- Ξήρανση: Στο στάδιο αυτό το αλεύρι οδηγείται σε ειδικές εγκαταστάσεις όπου με προσθήκη νερού ρυθμίζεται η υγρασία του υπό κατάλληλη θερμοκρασία (από 11.5% πηγαίνει σε 15.5%), ώστε να γίνεται ευκολότερη η άλεση του, αλλά και να προκληθούν ως ένα βαθμό ορισμένες μεταβολές των χαρακτηριστικών των συστατικών του σιταριού.
- Άλεση: Η άλεση γίνεται με την βοήθεια κυλινδρόμυλων, με διαδοχική διέλευσή του από πολλά ζεύγη χαραγμένων κυλίνδρων. Μετά από κάθε διέλευση από ένα ζεύγος κυλίνδρων ακολουθεί κοσκίνισμα και τα συγκρατούμενα από τα κόσκινα τμήματα διαβιβάζονται στο επόμενο ζεύγος κυλίνδρων. Με τις επεξεργασίες αυτές επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός του προϊόντος της αλέσεως σε αλεύρι, σιμιγδάλι, πίτουρα και απορρίμματα αλέσεως. Σημειώνεται ότι η διεργασία της άλεσης είναι στενά δεμένη με

σύστημα κατακράτησης αλευριού σε κυκλώνες και σύστημα κατακράτησης και ταξινόμησης κόκκων (φίλτρα μεταξιού / τελάρα- Plasister) . Σε μοντέρνα εργοστάσια όπως είναι το σύνολο των μεγάλων μονάδων αλευροποιίας στη χώρα μας υπάρχει και κυκλωνικό σακκόφιλτρο / μανικόφιλτρο. Το φίλτρο αυτό το οποίο τοποθετείται για οικονομικούς κυρίως λόγους κατακρατά το σύνολο του αλευριού, το οποίο βεβαίως ανακυκλώνεται στη μονάδα.

- Αποθήκευση αλεύρου: Στα σύγχρονα εργοστάσια η αποθήκευση των αλεύρων γίνεται χύμα σε ειδικά σιλό με διάμετρο 2.5 – 3m. Ο πυθμένας κλίνει προς το κέντρο, ώστε να διευκολύνεται η γρήγορη εκκένωση. Εάν τα σιλό είναι εγκαταστημένα στο ύπαιθρο, το ύψος τους μπορεί να φτάσει τα 20 m. Η αποθηκευτική δυναμικότητά τους υπερβαίνει συνήθως τους 50 τόνους. Η κατασκευή τους είναι συνήθως από μαλακό χάλυβα.

## 1.3. Καταναλώσεις και εκπομπές της παραγωγής προϊόντων αλευρόμυλων

### 1.3.1. Καταναλώσεις

- **Νερό**

Οι μοντέρνες αλευροβιομηχανίες καταναλώνουν νερό μόνο στο στάδιο της ρύθμισης υγρασίας του σιταριού (από 11,5% σε 15,5%) και είναι της τάξεως του 3-4% της πρώτης ύλης.

- **Ενέργεια**

Οι πιο συνηθισμένες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται στις εγκαταστάσεις του κλάδου είναι η θερμική και η ηλεκτρική ενέργεια. Θερμική ενέργεια κυρίως για την παραγωγή ατμού. Οι μοντέρνες αλευροβιομηχανίες καταναλώνουν ενέργεια μόνο με μορφή ηλεκτρισμού. Εξαίρεση αποτελούν οι αλευροβιομηχανίες που παράγουν ζωοτροφές και μάλιστα υπό την μορφή σφαιριδίων (pellets). Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται και μικρή ποσότητα ατμού για την θέρμανση / ομογενοποίηση των pellets πριν πάνε στην καλουπιέρα. Κάθε τέτοια αλευροβιομηχανία διαθέτει το δικό της λέβητα παραγωγής ατμού χρησιμοποιώντας ως καύσιμο είτε βαρύ πετρέλαιο, είτε μαζούτ 1500’ και σπανιότερα τύπου 3.500 ή το φυσικό αέριο ή υγραέριο. Η κατανάλωση θερμικής ενέργειας στη προαναφερόμενες διεργασίες είναι μικρής ποσότητας και ανάλογη της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου νερού, των απαιτούμενων θερμοκρασιών και της χρονικής διάρκειας της διαδικασίας. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι η κύρια μορφή ενέργειας που χρησιμοποιεί η αλευροβιομηχανία και χρησιμοποιείται κυρίως για την κίνηση των διαφόρων κινητήρων του μηχανικού εξοπλισμού. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από την ισχύ του εγκατεστημένου εξοπλισμού που είναι συνήθως ανάλογη της δυναμικότητας των μονάδων.

### 1.3.2. Εκπομπές

- **Αέριες εκπομπές**

Το πιο σημαντικό περιβαλλοντικό θέμα που σχετίζεται με την βιομηχανία αλεύρων είναι η εκπομπή σωματιδίων (σκόνης) από την μεταφορά και την υποδοχή στην εγκατάσταση των πρώτων υλών, καθώς και τα διάφορα σημεία της παραγωγικής διαδικασίας. Αν χρησιμοποιείται σύστημα εξαερισμού στην εγκατάσταση, τότε η σκόνη συλλέγεται σε συλλεκτήρες (φίλτρα), που διαχωρίζουν τη σκόνη του αλεύρου από τον αέρα του αερορευματικού συστήματος πριν από την έξοδο του τελευταίου στην ατμόσφαιρα.

Η ποιότητα της σκόνης διαφέρει από στάδιο σε στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Για παράδειγμα, κατά την υποδοχή του σιτηρού (ξεφόρτωμα από το φορτηγό, μεταφορά στα σιλό αποθήκευσης, πρώτο καθάρισμα) παρατηρείται μεγάλη περιεκτικότητα σε χώμα, καθώς και σε άλλα ξένα σώματα τα οποία αναμειγνύονται κατά την συγκομιδή του σιτηρού. Έτσι η σκόνη που εκπέμπεται από τα πρώτα στάδια της άλεσης έχει περιεκτικότητα 70% σε οργανικό υλικό.

Οι συντελεστές εκπομπής της σκόνης είναι χονδρικά για το στάδιο της υποδοχής του σιτηρού 0.009 kg/τόνο και για την άλεση 35 kg/τόνο. Το μέγεθος των κόκκων της σκόνης μεταβάλλεται χονδρικά από 1 έως 300 μm. Έχει βρεθεί ότι περίπου 95% της σκόνης έχει μέγεθος πάνω από 150 μm.

- **Αέριες εκπομπές από διεργασίες καύσης**

Μόνο οι αλευροβιομηχανίες που παράγουν ζωοτροφές σε pellets χρειάζονται και μικρή ποσότητα ατμού για την θέρμανση/ομογενοποίηση των pellets πριν πάνε στην καλουπιέρα. Οι υπόλοιπες αλευροβιομηχανίες δεν χρειάζονται ατμό και δεν χρειάζεται να έχουν βιομηχανικούς λέβητες (χρησιμοποιούν μόνο ηλεκτρική ενέργεια για τις βιομηχανικές τους ανάγκες).

- **Αέριες εκπομπές από την παραγωγική διαδικασία**

Οι αέριες εκπομπές από παραγωγικές διαδικασίες της βιομηχανίας παραγωγής αλεύρου είναι κυρίως εκπομπές αιωρουμένων στερεών οι οποίες οφείλονται κυρίως στις διεργασίες του προκαθαρισμού, του καθαρισμού των κόκκων της άλεσης και της τελικής συσκευασίας. Τα αιωρούμενα αυτά σωματίδια σε μοντέρνες αλευροβιομηχανίες συνήθως δεσμεύονται σε συσκευές κυκλώνων και σακκόφιλτρων. Οι συσκευές της άλεσης είναι άμεσα δεμένες και μέρος της παραγωγικής διαδικασίας. Οι υπόλοιπες συσκευές αφενός είναι συνδεδεμένες στην παραγωγική διαδικασία διότι μεγαλώνουν τις αποδόσεις άρα και την παραγωγική ικανότητα και βιωσιμότητα της επιχείρησης, βελτιώνουν την ποιότητα των προϊόντων και αφετέρου επιτυγχάνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό και την δέσμευση / επαναχρησιμοποίηση υλικών και εν δυνάμει ρύπων.

- **Υγρά απόβλητα**

Η φύση και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων από τη βιομηχανίας παραγωγής αλεύρων προέρχονται (εκτός των λυμάτων) από διεργασίες καθαρισμού μηχανολογικού εξοπλισμού και δαπέδων και εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τυπικά βιομηχανικά λύματα από

καθαρισμούς, και για το λόγο αυτό επεξεργάζονται με παρόμοιο τρόπο. Υπάρχουν βεβαίως ακόμα ελάχιστες βιομηχανίες οι οποίες χρησιμοποιούν νερό στον καθαρισμό του σιταριού, οι οποίες εκπέμπουν μικρές ποσότητες υγρών αποβλήτων. Γενικά ο υπό ανάλυση κλάδος δεν εμφανίζει υψηλά υδραυλικά και βιολογικά φορτία στην παραγωγή υγρών αποβλήτων του και ως εκ τούτου η ανάγκη ύπαρξης ή μη μονάδας επεξεργασίας / προεπεξεργασίας υγρών αποβλήτων έγκειται κυρίως στην αξιολόγηση μεταξύ των άλλων των λυμάτων από το προσωπικό και στις απαιτήσεις και διαδικασίες πλυσιμάτων.

### 1.3.3. Στερεά απόβλητα

- **Στερεά απόβλητα από διεργασίες αντιρρύπανσης αερίων εκπομπών**

Όπως προαναφέρθηκε οι αέριες εκπομπές από παραγωγικές διαδικασίες της βιομηχανίας παραγωγής αλεύρου είναι κυρίως εκπομπές αιωρουμένων στερεών οι οποίες οφείλονται κυρίως στις διεργασίες του προκαθαρισμού, του καθαρισμού των κόκκων της άλεσης και της τελικής συσκευασίας. Στα στάδια αυτά συνήθως υπάρχουν κυκλώνες και σακκόφιλτρα αφενός για την δέσμευση / επαναχρησιμοποίηση χρήσιμων υλών και αφετέρου για την απομάκρυνση ξένων μη επιθυμητών ουσιών, οι οποίες απομακρύνονται υπό μορφή στερεών υλικών.

- **Στερεά απόβλητα από παραγωγικές διαδικασίες**

Οι μοντέρνες αλευροβιομηχανίες παράγουν μικρή ποσότητα στερεών αποβλήτων από την παραγωγική διαδικασία τα οποία έγκεινται κυρίως σε στερεά σωματίδια αγροτικής προέλευσης τα οποία είναι δυνατόν αν χρησιμοποιηθούν σαν κτηνοτροφές (της τάξεως του ένα τοις χιλίοις εκπεφρασμένο σε πρώτη ύλη) αλλά και χώμα και άγανα (άλλες αδρανείς ύλες αγροτικής προέλευσης- επίσης της τάξεως του ένα τοις χιλίοις εκπεφρασμένο σε πρώτη ύλη), λόγω της συνδυασμένης δράσης κυκλώνων και επιπλέον φίλτρων όπως προαναφέρθηκε.

- **Στερεά απόβλητα (ιλύς) από διεργασίες βιολογικών καθαρισμών**

Σημαντική ποσότητα στερεών αποβλήτων αποτελούν και τα ιζήματα (λάσπες) που προέρχονται από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα στερεά υπολείμματα του εσχαρισμού, τα ιζήματα ή ο επίπαγος από τις διατάξεις θρόμβωσης-διαύγασης, το πλεόνασμα της βιομάζας από τους διαυγαστήρες των εγκαταστάσεων βιολογικής επεξεργασίας, ενώ μικρότερες ποσότητες στερεών προέρχονται από μονάδες διύλισης των υγρών. Τα ιζήματα που προέρχονται από τη φυσικοχημική και βιολογική επεξεργασία περιέχουν κυρίως οργανικό φορτίο και ενδεχομένως ανόργανα άλατα, υπολείμματα κροκιδωτικών, κ.λπ.

Η ποσότητα των ιζημάτων βιολογικής ή/και χημικής προέλευσης εξαρτάται άμεσα από το σύστημα επεξεργασίας και τις δόσεις του κροκιδωτικού. Για συστήματα αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας σε συνθήκες χαμηλής φόρτισης της βιομάζας που δεν αποτελούν μεταγενέστερο στάδιο φυσικοχημικής επεξεργασίας, η παραγωγή των ιζημάτων από το πλεόνασμα της βιομάζας είναι περιορισμένη και κυμαίνεται από 0,3-0,4 kg SS/kg$BOD_5$ που απομακρύνεται. Σε συστήματα μέσης και υψηλής φόρτισης της βιομάζας η ποσότητα του πλεονάσματος είναι της τάξης των 0,5-0,7 kg SS/kg$BOD_5$.

Η ποσότητα των ιζημάτων χημικής προέλευσης είναι ανάλογη της προστιθέμενης ποσότητας θρομβωτικών παραγόντων, του περιεχομένου των αποβλήτων σε εναιωρούμενα στερεά καθώς και του περιεχομένου των οργανικών ενώσεων των απόβλητων σε κολλοειδείς διασπορές, οι οποίες συσσωματώνονται.

**Στερεά απορρίμματα από επιστροφές προϊόντων**

Τα στερεά απόβλητα της βιομηχανίας παραγωγής αλεύρου λόγω επιστροφής προϊόντων είναι ένα μικρό ποσοστό (τάξεως του 1% της παραγωγής). Τα επιστρεφόμενα υλικά αυτά συνήθως απεντομώνονται και διατίθενται σε ζωοτροφές.

## 1.4. Παρουσίαση προτεινόμενων Β.Δ.Τ.

Με βάση την οδηγία 96/61/ΕΚ παρουσιάζονται οι ελληνικές προτάσεις για της βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές στην αλευροβιομηχανία [1].

### 1.4.1. Πρόληψη της ρύπανσης

- **Τεχνικές μείωσης όγκου και βελτίωσης της ποιότητας αερίων εκπομπών**

Τα μέτρα που αφορούν την πρόληψη της εκπομπής σωματιδίων από τα στάδια μεταφοράς και επεξεργασίας των σιτηρών διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- τροποποίηση της παραγωγικής διαδικασίας ώστε να μειωθεί η εκπομπή σκόνης,
- χρησιμοποίηση συστημάτων παγίδευσης / συλλογής της σκόνης, και
- χρησιμοποίηση συστημάτων καταστολής της σκόνης με έλαια.

Τα συστήματα παγίδευσης / συλλογής της σκόνης που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στην αλευροβιομηχανία είναι κυκλώνες και φίλτρα.

Η υιοθέτηση στρατηγικής για την μείωση των εκπομπών βασισμένη σε τροποποίηση των διεργασιών ή των εγκαταστάσεων, ώστε να περιοριστούν οι παράγοντες που προκαλούν την εκπομπή, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μειώσεις εκπομπών στερεών. Τα σημαντικότερα μέτρα πρόληψης είναι η κατασκευή αεροστεγών χώρων γύρω από τα διάφορα σημεία της επεξεργασίας, καθώς και η μείωση των αποστάσεων ελεύθερης πτώσης και η μείωση της ταχύτητας μεταφοράς των σιτηρών. Στον ακόλουθο Πίνακα 1.1. αναφέρονται οι τεχνικές μείωσης των αερίων εκπομπών που μπορούν να εφαρμοστούν κατά τον χειρισμό και την επεξεργασία των σιτηρών.

**Πίνακας 1.1.: Τεχνικές μείωσης αερίων ρύπων κατά τον χειρισμό και επεξεργασία σιτηρών**

| | |
|---|---|
| Υποδοχή | Έλεγχος της ροής του σιτηρού<br>Κατακράτηση / συλλογή<br>Ολική / μερική περίφραξη |
| Μεταφορικές ταινίες | Περίφραξη<br>Έλεγχος ροής |

| | |
|---|---|
| | Κατακράτηση / συλλογή<br>Καταστολή με έλαια |
| Αναβατόρια | Κατακράτηση / συλλογή<br>Καταστολή με έλαια<br>Ολική / μερική περίφραξη |
| Κατανεμητές | Κατακράτηση / συλλογή<br>Ολική / μερική περίφραξη |
| Συστήματα καθαρισμού | Περίφραξη / εξαερισμός |
| Βαθμίδες | Περίφραξη / εξαερισμός |
| Ξηραντές | Ολική / μερική περίφραξη |
| Σφυρόμυλοι | Κατακράτηση / συλλογή<br>Ολική / μερική περίφραξη |
| Κυλινδρόμυλοι | Κατακράτηση / συλλογή<br>Ολική / μερική περίφραξη |
| Αναμίκτες | Κατακράτηση / συλλογή<br>Ολική / μερική περίφραξη |
| Φόρτωση σε φορτηγά/τρένα | Καταστολή σκόνης<br>Κατακράτηση / συλλογή<br>Καταστολή με έλαια<br>Ολική / μερική περίφραξη |
| Φόρτωση σε πλοία | Καταστολή σκόνης<br>Κατακράτηση / συλλογή<br>Καταστολή με έλαια<br>Ολική / μερική περίφραξη |

### 1.4.2. Περιορισμός της ρύπανσης

- **Επεξεργασία και διάθεση αερίων εκπομπών**

Οι συσκευές ελέγχου των εκπομπών της σκόνης, που χρησιμοποιούνται συνήθως στην βιομηχανία αλεύρων, οι κυκλώνες και τα σακκόφιλτρα. Οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικρές εγκαταστάσεις, οι οποίες βρίσκονται μακριά από πυκνοκατοικημένες περιοχές. Στις υπόλοιπες των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται πιο συχνά τα σακκόφιλτρα, ως πιο αποτελεσματικές συσκευές κατακράτησης της σκόνης.

- **Επεξεργασία και διάθεση υγρών αποβλήτων**

Τα υγρά απόβλητα κατά την παραγωγική διαδικασία των μοντέρνων αλευροβιομηχανιών συνήθως δεν χρειάζονται περαιτέρω επεξεργασία για να τηρηθούν τα θεσπισμένα από την πολιτεία όρια.

- **Συνοπτική παρουσίαση των ΒΔΤ**

Στον Πίνακα 1.2. παρουσιάζονται συνοπτικά οι προτεινόμενες Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές του υποκλάδου.

**Πίνακας 1.2.: Προτεινόμενες Β.Δ.Τ.**

| ΤΕΧΝΙΚΗ | ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΑΛΕΥΡΟΜΥΛΟΥ |
|---|---|
| Υιοθέτηση πρακτικών καλής λειτουργίας | ❖ Εκπαίδευση του Προσωπικού σε θέματα Πρόληψης και Ελέγχου Ρύπανσης και Εξοικονόμηση Νερού και Ενέργειας<br>❖ Αυστηρή τήρηση των κανόνων υγιεινής στις εγκαταστάσεις της μονάδας<br>❖ Έλεγχος και συντήρηση του εξοπλισμού<br>❖ Ανίχνευση και πρόληψη διαρροών<br>❖ Χρήση μόνο της απαιτούμενης ποσότητας νερού για τον καθαρισμό πατωμάτων και μηχανημάτων<br>❖ Μονώσεις δικτύων θερμού νερού ή ατμών για τον περιορισμό απωλειών θερμότητας. (Όταν γίνεται χρήση θερμικής ενέργειας).<br>❖ Επαναχρησιμοποίηση των συμπυκνωμάτων των ατμών για εξοικονόμηση νερού (Όταν γίνεται χρήση θερμικής ενέργειας).<br>❖ Ανάκτηση Θερμότητας από Καυσαέρια (Όταν γίνεται χρήση θερμικής ενέργειας).<br>❖ Αντικατάσταση μαζούτ με φυσικό αέριο (θα επέλθει σημαντική μείωση της αέριας ρύπανσης, ιδιαιτέρως σε αιθάλη και διοξείδιο του θείου) . (Όταν γίνεται χρήση θερμικής ενέργειας). |
| Οργάνωση, προγραμματισμός έλεγχος και επιλογή πρώτων υλών | ❖ Έλεγχος Προμηθευτών για την βελτίωση της ποιότητας των προμηθευόμενων σιταριών και των υπόλοιπων ουσιών που χρησιμοποιούνται, έτσι ώστε αφενός να τηρούνται οι απαιτήσεις ποιότητας / υγιεινής και αφετέρου να μειώνεται η παραγωγή αποβλήτων. |
| Βελτίωση απογραφής και αποθήκευσης | ❖ Ελαχιστοποίηση Χημικών Ουσιών που χρησιμοποιούνται σαν συντηρητικά σιταριού κατά την αποθήκευσή του<br>❖ Απογραφή Διακινούμενων Ουσιών και Υλικών σε τακτά χρονικά διαστήματα<br>❖ Χρήση αποθηκευτικών χώρων επαρκούς χωρητικότητας. |
| Βελτιστοποίηση – | ❖ Κατασκευή αεροστεγών χώρων γύρω από τα διάφορα σημεία |

| ΤΕΧΝΙΚΗ | ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΑΛΕΥΡΟΜΥΛΟΥ |
|---|---|
| τροποποίηση διεργασιών | της επεξεργασίας, όπου γίνεται διακίνηση κόνεων<br>❖ Κάλυψη του χώρου όπου γίνεται η υποδοχή της πρώτης ύλης,<br>❖ Τοποθέτηση πορτών ή κουρτινών σε χώρους όπου παρατηρείται έντονη εκπομπή σκόνης, ώστε να απομονώνονται από τους υπόλοιπους χώρους,<br>❖ Κάλυψη των ιμάντων μεταφοράς μέσα σε αγωγούς.<br>❖ Μείωση των αποστάσεων ελεύθερης πτώσης<br>❖ Μείωση της ταχύτητας μεταφοράς των σιτηρών<br>❖ Συστήματα μεταφοράς χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης. |
| Βελτιστοποίηση συστημάτων καθαρισμού | Χρήση ακροφύσιου υπό πίεση με αυτόματο κλείσιμο της παροχής στους ελαστικούς σωλήνες που χρησιμοποιούνται για το πλύσιμο των χώρων. |
| Ανακύκλωση, ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση | ❖ Εξέταση ανακυκλωσιμότητας υλικών συσκευασίας<br>❖ Προσπάθεια για διαχωρισμό ξύλου, χαρτιού, και πλαστικών ώστε να μεγιστοποιηθεί η δυνατότητα ανακύκλωσής τους. |
| Χρήση αποβλήτων (υγρών και στερεών) σαν χρήσιμες πρώτες ύλες σε άλλες βιομηχανίες. Έρευνα για την πρόληψη της ρύπανσης και την χρήση παραπροϊόντων | Ανάγκη για εξέταση χρήσης παραπροϊόντων για ζωοτροφές. |
| Τροποποίηση προϊόντος | Τροποποίηση Τελικών Προϊόντων Ζωοτροφών με εμπλουτισμό τους με επαναχρησιμοποιημένα προϊόντα. |
| Διαχωρισμός ρευμάτων αποβλήτων | Να μην γίνεται ανάμιξη των νερών της βροχής με τα υγρά απόβλητα πλυσίματος των χώρων. |
| Σωστή επιλογή σχήματος επεξεργασίας αερίων εκπομπών, ορθός σχεδιασμός, έλεγχος και λειτουργία μονάδων | Σε περίπτωση που ο υπάρχων εξοπλισμός δεν καλύπτει τα θεσπισμένα από την πολιτεία όρια, πρέπει να γίνει Επιλογή και Σχεδιασμός Τελικού Σχήματος Επεξεργασίας Αερίων εκπομπών (Κυκλώνες και Σακκόφιλτρα για την κατακράτηση Σωματιδίων στον κλάδο 156.1) και προσπάθεια για επαναχρησιμοποίηση τους. |

| **ΤΕΧΝΙΚΗ** | **ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΑΛΕΥΡΟΜΥΛΟΥ** |
|---|---|
| κατεργασίας αερίων εκπομπών | |

# Κεφάλαιο 2$^0$ – Μύλοι Μάρρα

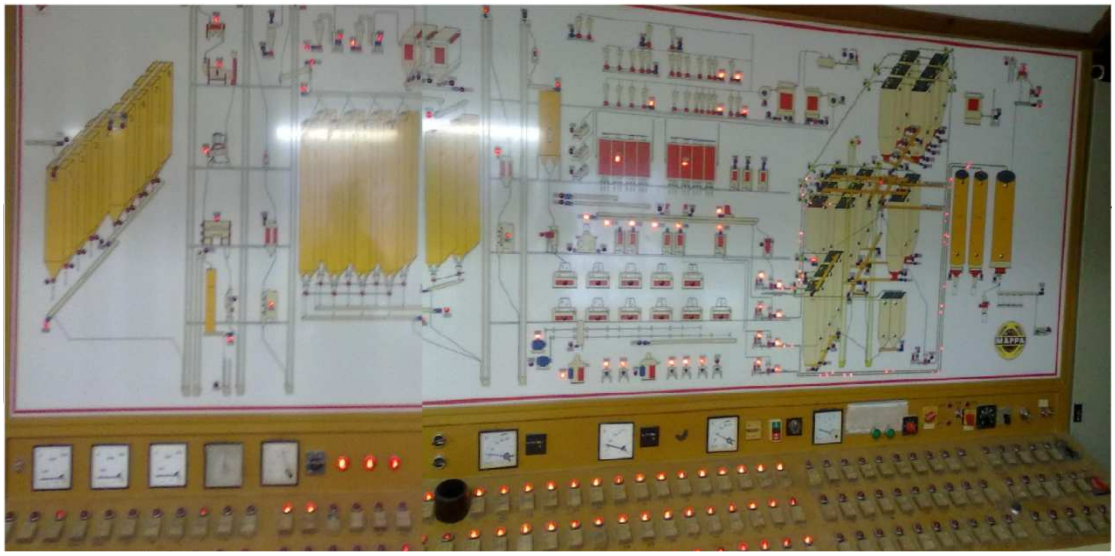
## Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάζονται οι Μύλοι Μάρρα [4] και έπειτα αναλύεται η διαδικασία παραγωγής τους. Χρειάστηκαν αρκετές επισκέψεις για την καταγραφή των παρακάτω στοιχείων, όπου σε συνδυασμό με τον μηχανικό παραγωγής, προτάθηκαν σημεία της παραγωγής για μελλοντικές βελτιώσεις.

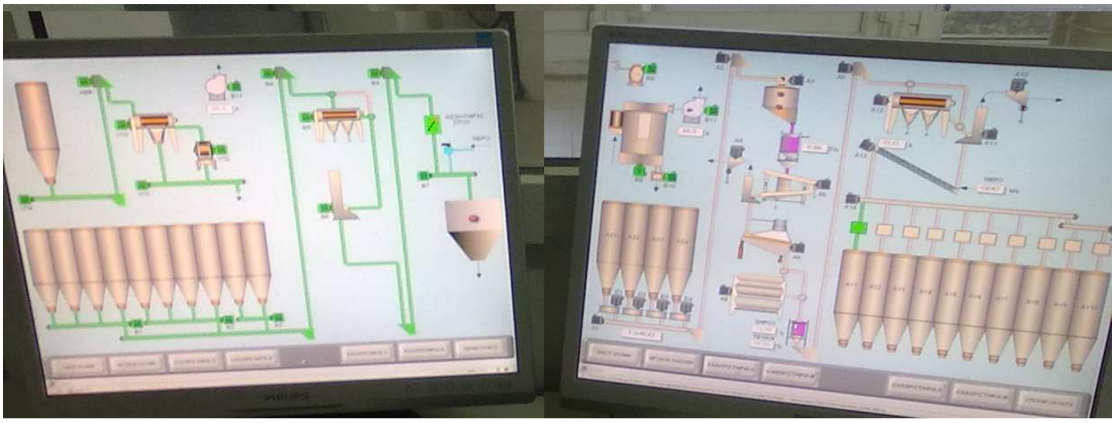
## 2.1. Παρουσίαση μύλων Μάρρα

**Εικόνα 2.1. Αεροφωτογραφία των μύλων Μάρρα**

Οι μύλοι Μάρρα ξεκίνησαν το 1928, στο Αγγελόκαστρο Κορινθίας χρησιμοποιώντας τον πρώτο πετρόμυλο. Έπειτα πέρασαν στον κυλινδρόμυλο και ακολουθώντας τις εξελίξεις του κλάδου την τελευταία πενταετία λειτούργησαν το μύλο νέας γενιάς, ο οποίος ελέγχεται ηλεκτρονικά σε όλα τα στάδια παραγωγής, εξασφαλίζοντας εξαιρετικά σταθερή ποιότητα στο τελικό προϊόν.
Διαθέτουν συνολική χωρητικότητα 35.000 τόνων σε 19 μικρά και μεγάλα σιλό.



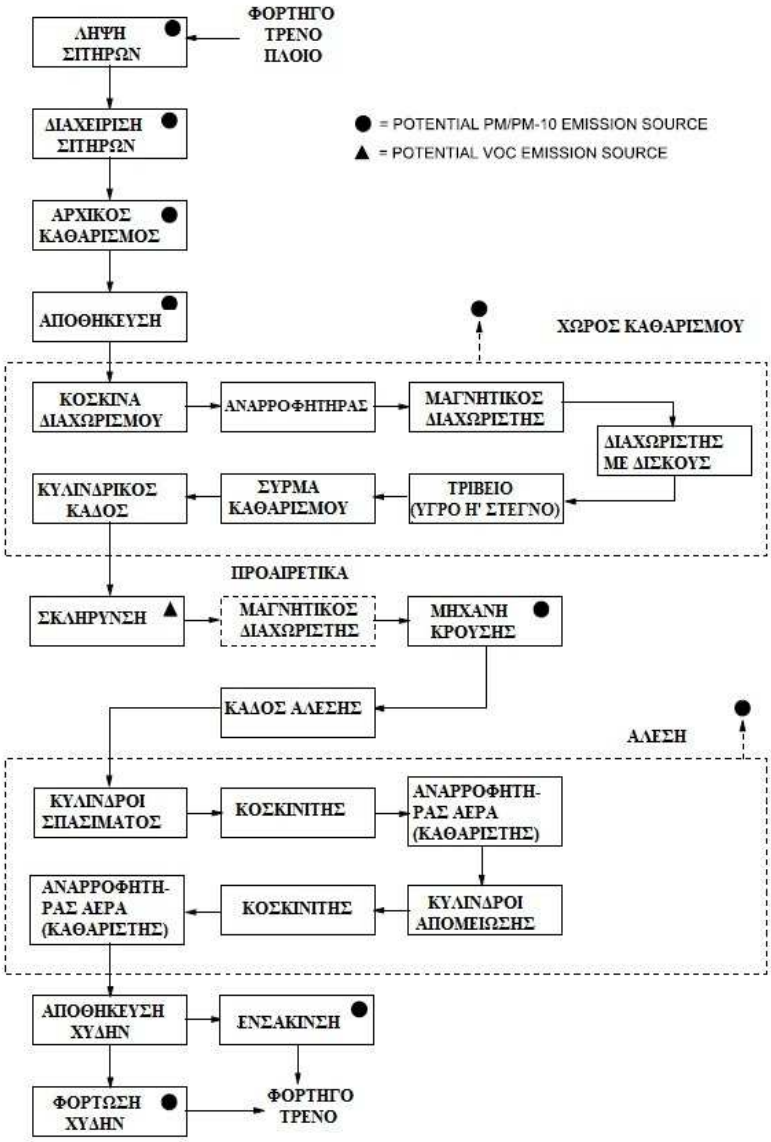
**Εικόνα 2.2. Πίνακας χειροκίνητων αλλαγών μαλακού μύλου (Αντίστοιχα υπάρχει και στον σκληρό)**



Εικόνα 2.3. Πίνακας PLC μαλακού μύλου

## 2.2. Περιγραφή διαδικασίας παραγωγής των μύλων

Η διαδικασία παραγωγής περιγράφεται με το παρακάτω απλό διάγραμμα.



### 2.2.1. Καθαρισμός

Περιλαμβάνει τα μηχανήματα τα οποία διαχωρίζουν το σιτάρι από διάφορα άλλα πρόσμικτα, απομακρύνουν εξωτερικά υλικά όπως μεταλλικά στοιχεία, πέτρες, και καθαρίζουν τον πυρήνα του σιταριού. Αυτό γίνεται στα ακόλουθα 6 βήματα:

**α) Μαγνητικός διαχωριστής**, που απομακρύνει μεταλλικά αντικείμενα

**β) Διαχωριστής**, που απομακρύνει άχυρα, ξύλα και οτιδήποτε διαφορετικού μεγέθους από το σιτάρι

**γ) Αναρροφητήρας**, ο οποίος δημιουργεί ένα είδος κενού για να απομακρύνει σκόνες και ελαφρύτερες ακαθαρσίες

**δ) Απομακρυντής πετρών**, με την βοήθεια της βαρύτητας απομακρύνει τις πέτρες που μπορεί να έχει το ίδιο μέγεθος με τον πυρήνα του σιταριού

**ε) Κυλινδρικός διαχωριστής**, από τον οποίο περνάει το σιτάρι και αναγνωρίζεται το μέγεθος των πυρήνων πιο προσεκτικά. Απομακρύνονται οτιδήποτε είναι μεγαλύτερο, μικρότερο, πιο γωνιώδες, πιο σφαιρικό ή έχει διαφορετικό σχήμα

**στ) Τριβείο**, όπου απομακρύνονται εξωτερικοί φλοιοί, βρωμιές και λειαίνετε η εξωτερική επιφάνεια με έντονη τριβή. Με τη δράση του αέρα όλα αυτά απομακρύνονται

**Εικόνα 2.4. Μηχανήματα της φάσης του καθαρισμού**

### 2.2.2. Προετοιμασία / Σκλήρυνση

- Το σιτάρι προετοιμάζεται για άλεση. Προστίθεται υγρασία με συγκεκριμένη ποσότητα για σκληρύνει το πίτουρο και να μαλακώσει το εσωτερικό του ενδοσπερμίου. Αυτό βοηθά τα κομμάτια του πυρήνα να διαχωρίζονται εύκολα και καθαρά.
- Το σκληρυμένο σιτάρι φυλάσσεται από 8 – 24 ώρες, ανάλογα τον τύπο του σιταριού –μαλακό, μέτριο ή σκληρό

Εικόνα 2.5. Μηχάνημα ελέγχου σκλήρυνσης

### 2.2.3. Σαρωτής

- Το σιτάρι σκανάρεται και διαχωρίζονται οι ξεβαμμένοι πυρήνες

Εικόνα 2.6. Satake Alpha Scan II

### 2.2.4. Άλεσμα

- Η διαδικασία αλέσματος είναι μια βαθμιαία μείωση των πυρήνων του σιταριού για την παραγωγή σωματιδίων του ενδοσπέρματος τα οποία διαβαθμίζονται και διαχωρίζονται από το πίτουρο από κόσκινα και καθαριστές
- Κάθε μέγεθος επιστρέφει στα αντίστοιχα ρολά και η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να αποκτηθεί το επιθυμητό αλεύρι
- Τα ρολά είναι σε ζεύγη και περιστρέφονται προς τα μέσα αντίθετα το ένα με το άλλο, κινούμενα σε διαφορετικές γωνίες
- Με το ένα πέρασμα από το κυματοειδές ‘πρώτο σπάσιμο’, οι κύλινδροι ξεκινούν τον διαχωρισμό του πίτουρο, ενδοσπέρματος και της φύτρας

Εικόνα 2.7. Böhler Grinding machine

### 2.2.5. Κοσκίνισμα

- Τα θραυσμένα κομμάτια του σιταριού εισάγονται μέσα σε μεγάλα, περιστρεφόμενα κόσκινα, σε σχήμα κιβωτίου, τα οποία δονούνται ώστε να διαχωριστούν τα μεγαλύτερα από τα μικρότερα σωματίδια

Εικόνα 2.8. Böhler Square Plansifter MPAP

### 2.2.6. Καθαριστές

- Μέσα σ' αυτούς μια κατευθυνόμενη ροή από αέρα ανεβάζει τα σωματίδια του πίτουρου, ενώ ταυτόχρονα με πλέγμα κοσκινίσματος διαχωρίζονται και διαβαθμίζονται τα χοντρόκοκκα σε μέγεθος και ποιότητα

Εικόνα 2.9. Purifier Polaris MQRG

## 2.3. Προτάσεις θεμάτων

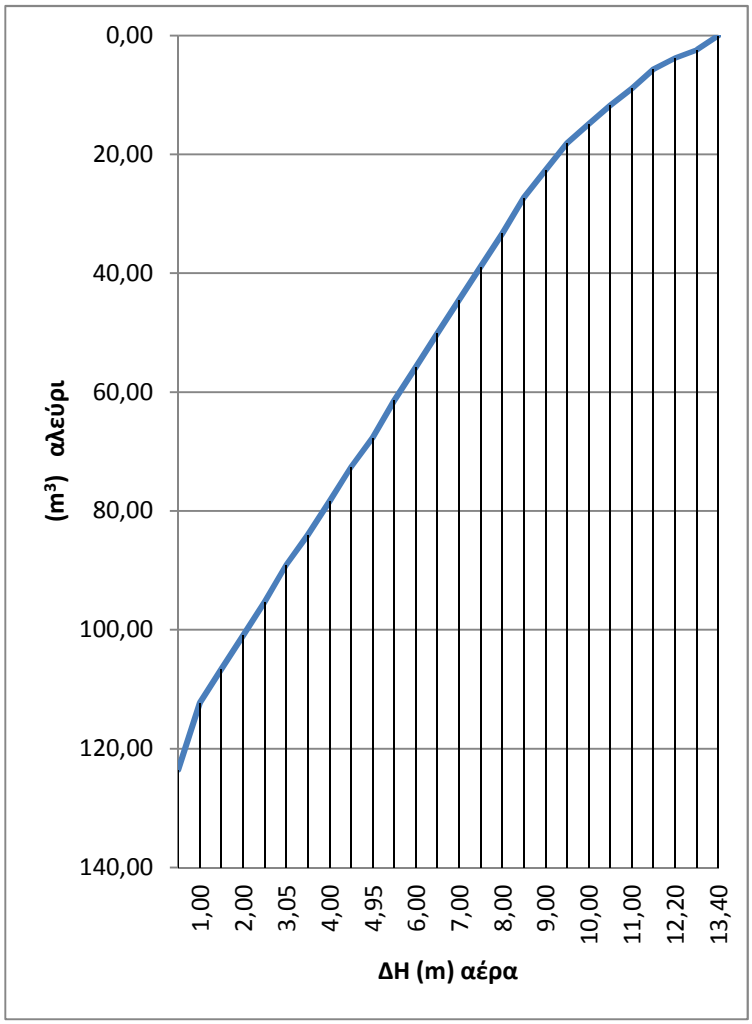
Ύστερα από περιήγηση στους χώρους της αλευροβιομηχανίας και τις συζητήσεις με τον μηχανικό του εργοστασίου, μερικά προβλήματα που αναφέρθηκαν είναι τα ακόλουθα:

- Αυτοματισμό κυλίνδρων και βούρτσας στην επιλογή του έτοιμου σιταριού για το που θα κατευθυνθεί.
- Αυτοματισμός στην επιλογή από τα εξωτερικά σιλό προς τα εσωτερικά αμπάρια.
- Αυτοματισμούς στα αμπάρια του σιταριού και στην χαρμανιέρα του αλευριού.
- Αυτοματισμοί στον σκληρό μύλο όπως στον μαλακό.
- Αυτοματοποίηση της διαδικασίας μέτρησης της στάθμης και του περιεχόμενου υλικού των σιλό.

# Κεφάλαιο 3 – Παρουσίαση θέματος

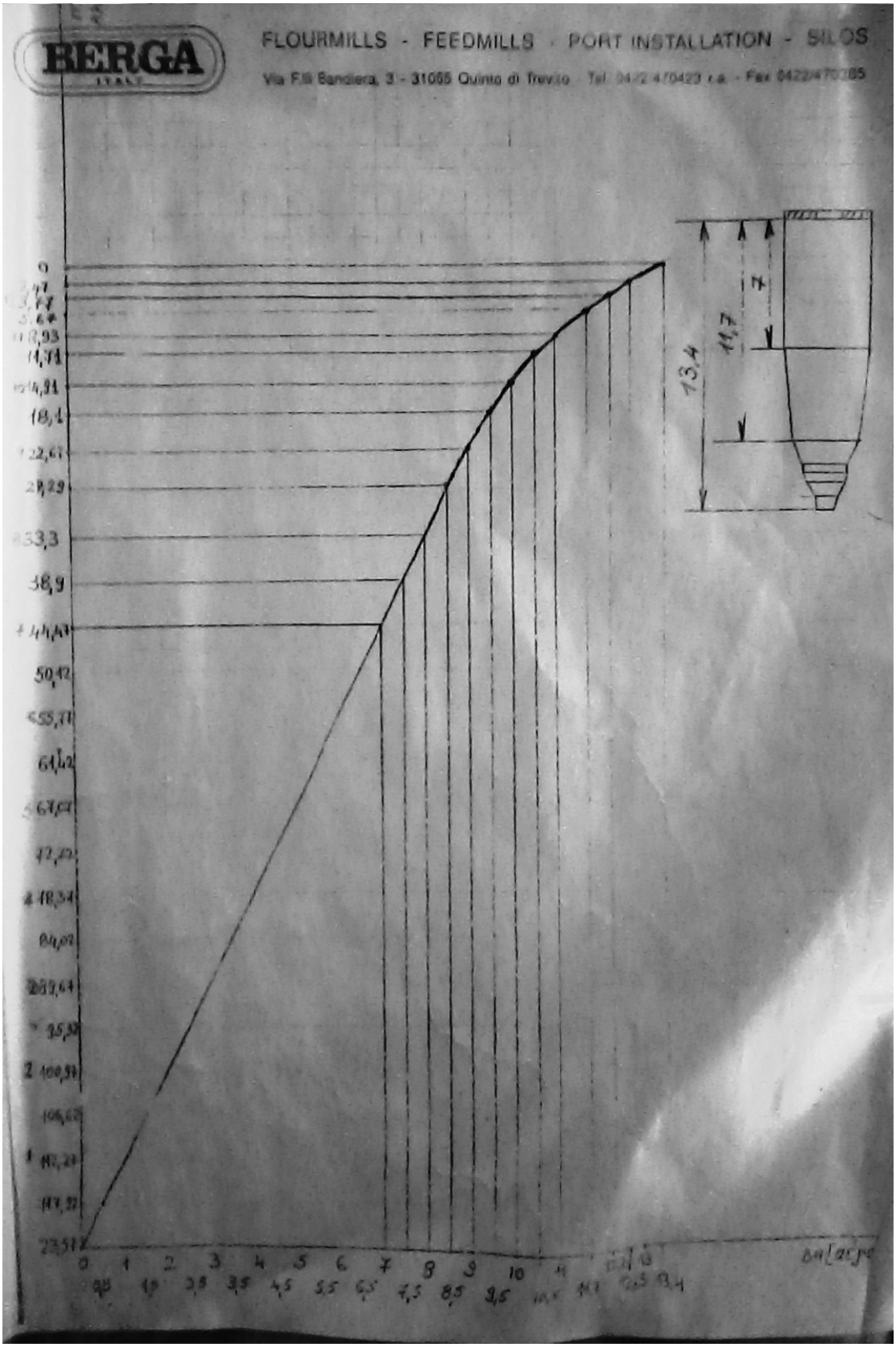
## 3.1. Παρουσίαση προβλήματος

Ύστερα από ανάλυση των διαδικασιών παραγωγής της αλευροβιομηχανίας που επισκεφτήκαμε, επιλέξαμε να αντιμετωπίσουμε το παρακάτω πρόβλημα.
Την αυτοματοποίηση της διαδικασίας μέτρησης της στάθμης και του περιεχόμενου υλικού των σιλό.
Η μέθοδος που ακολουθούν στον μύλο είναι με την χρήση μετρητικών ταινιών για την εύρεση της στάθμης σε συνδυασμό νομογραφήματα που έχει σχεδιάσει ο αρχιμηχανικός του μύλου για κάθε σιλό ξεχωριστά, όπως το παρακάτω.




| (m³) αλεύρι | ΔΗ (m) αέρα |
|---|---|
| 0,00 | 13,40 |
| 2,47 | 12,80 |
| 3,77 | 12,20 |
| 5,67 | 11,70 |
| 8,93 | 11,00 |
| 11,77 | 10,50 |
| 14,91 | 10,00 |
| 18,10 | 9,50 |
| 22,67 | 9,00 |
| 27,29 | 8,50 |
| 33,30 | 8,00 |
| 38,90 | 7,50 |
| 44,47 | 7,00 |
| 50,12 | 6,50 |
| 55,77 | 6,00 |
| 61,42 | 5,50 |
| 67,67 | 4,95 |
| 72,62 | 4,51 |
| 78,37 | 4,00 |
| 84,07 | 3,50 |
| 89,07 | 3,05 |
| 95,37 | 2,50 |
| 100,97 | 2,00 |
| 106,62 | 1,50 |
| 112,27 | 1,00 |
| 123,57 | 0,00 |

**Εικόνα 3.1. Διάγραμμα της σχέσης ύψους και όγκου πλήρωσης του αρχιμηχανικού της εταιρείας**




**Εικόνα 3.2. Νομογράφημα σχέσης ύψους και όγκου πλήρωσης του αρχιμηχανικού της εταιρείας**

## 3.2. Παρουσίαση των δεδομένων

### 3.2.1. Υλικό πλήρωσης

Τα υλικά πλήρωσης του σιλό είναι κοκκώδη: Σιτάρι μαλακό, σιτάρι σκληρό, αλεύρι και πίτουρο. Τα χαρακτηριστικά του υλικού πλήρωσης είναι:

| Υλικό | Ειδικό βάρος (Kg/100lt) | Υγρασία (%w/w) | Εσωτερική γωνία τριβής (°) | Ενεργή γωνία εσωτερική τριβής (°) | Συντελεστής τριβής με σκυρόδεμα | Συντελεστής τριβής με χαλυβα |
|---|---|---|---|---|---|---|
| πίτουρο | 30-40 | 14 - 17 | 40 | 35-45 | n/a | 0,4 |
| σιτάρι μαλακό | 70-76 | 10 - 16,5 | 20 | 23-30 | 0,44-0,61 | 0,38-0,58 |
| σιτάρι σκληρό | 78-81 | 9 - 15 | 20 | 23-30 | 0,48-0,65 | 0,32-0,58 |
| αλεύρι | 60-65 | 13 - 15,5 | 20 | 26-32 | n/a | 0,3 |

Λόγω της ιδιότητας των παραπάνω υλικών, μέσα στο σιλό αφενός σχηματίζεται στην επιφάνεια πλήρωσης, γωνία πρανούς, η οποία εξαρτάται και από το είδος του υλικού. Επίσης, κατά την διάρκεια της πλήρωσης του σιλό, έχουμε συνέχεια αιωρούμενα σωματίδια.
Για τους δύο παραπάνω λόγους, δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την μέτρηση της στάθμης πλήρωσης του σιλό, αισθητήρα laser.

### 3.2.2. Υλικό σιλό

Τα υλικά κατασκευής ενός σιλό μπορεί να είναι από ανοξείδωτο χάλυβα και από οπλισμένο σκυρόδεμα ή ξύλο με ειδική επένδυση.
Στην περίπτωση του χάλυβα θα μπορούσαν να τοποθετηθούν αισθητήρες παραμόρφωσης στις μεταλλικές βάσεις στήριξης. Αυτό όμως δεν γίνεται στην περίπτωση που το υλικό είναι οπλισμένο σκυρόδεμα.

### 3.2.3. Ροή υλικού

Με βάση τα στοιχεία που συλλέξαμε, κατά την διάρκεια αδειάσματος του σιλό, αν υποθέσουμε ότι δεν γίνεται ταυτόχρονο γέμισμα, η παροχή εξόδου είναι:

| Υλικό σιλό | tn/hr | m/hr | cm/min |
|---|---|---|---|
| αλεύρι | 15-20 | 2 | 3,5 |
| σιτάρι | 30-35 | 2,5 | 4 |

Αυτό σημαίνει ότι η ακρίβεια του αισθητήρα θα πρέπει να είναι +-5 cm καθ’ ύψος του σιλό.

## 3.3. Παρουσίαση προτεινόμενης λύσης

### 3.3.1. Συνοπτικά

Θα τοποθετηθεί στο ύψος του κωνικού τμήματος του σιλό και στο κέντρο του, ημισφαιρικό στοιχείο που θα περιέχει στην βάση του LDVT αισθητήρα για την μέτρηση της παραμόρφωσης-βύθισης της κορυφής του.

### 3.3.2. Αιτιολόγηση επιλογής

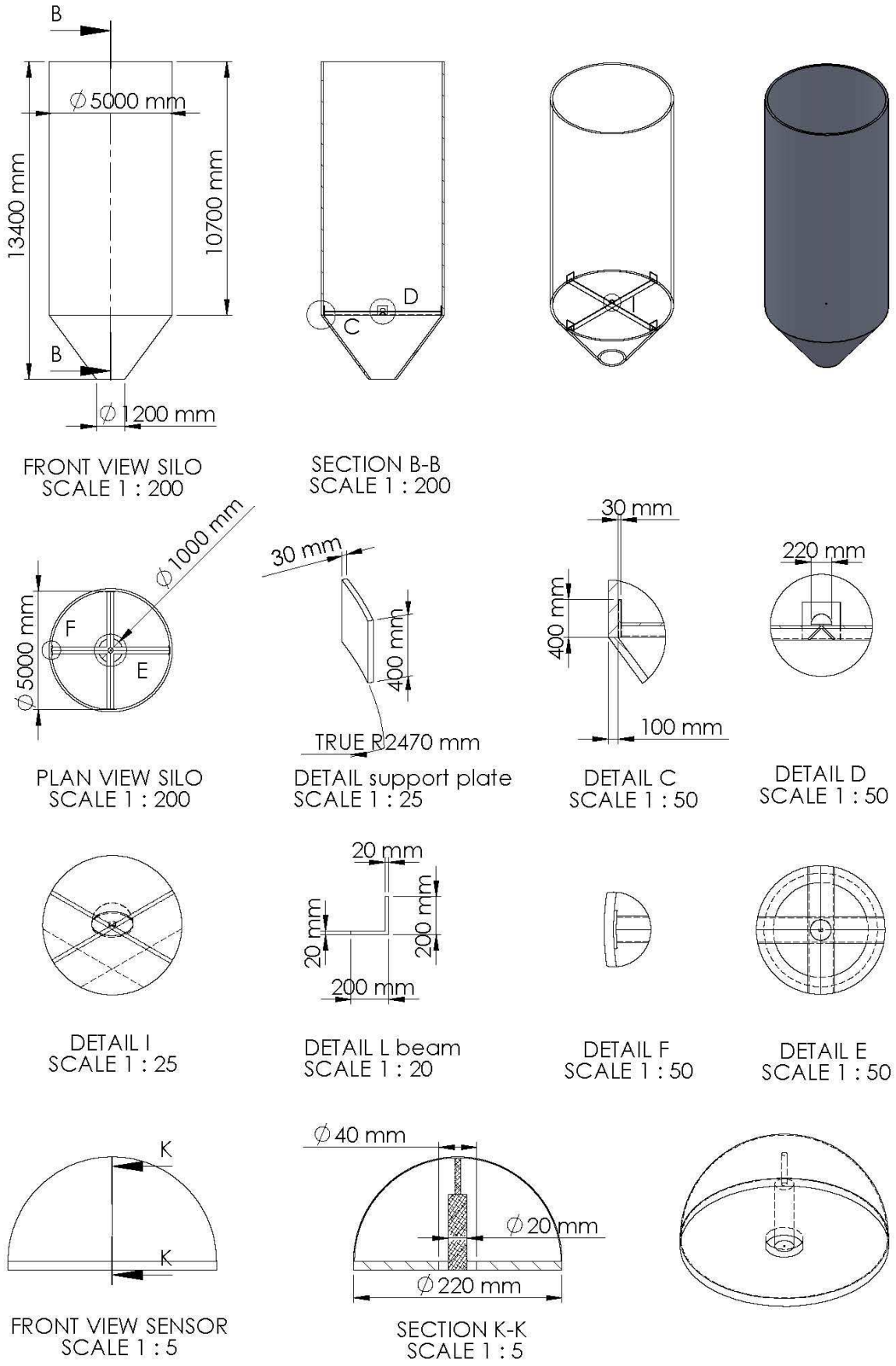
α) Επιλέχθηκε αυτό το ύψος τοποθέτησης, ώστε να ανεξαρτητοποιηθούμε από την κλίση του κωνικού τμήματος, η οποία επηρεάζει την θεωρία του **Janssen** [13]. Η ποσότητα που δεν λαμβάνουμε υπόψη είναι:
Βάση γεωμετρίας του hopper και του νομογραφήματος που έχουμε στην εικόνα 3.1., στο κόλουρο κώνο του hopper αντιστοιχούν 5,57 $m^3$ υλικού. Αν λάβουμε υπόψη ότι το ειδικό βάρος των υλικών που μελετάμε κυμαίνεται από 600-800 $kg/m^3$ , για μια τιμή των 750 $kg/m^3$ έχουμε υλικό περίπου 4tn.
β) Το ημισφαιρικό σχήμα επιλέχθηκε ώστε να μην εμποδίζετε η ροή του υλικού και να υπάρχει ισοκατανομή των τάσεων λόγω συμμετρίας.
γ) Το είδος του αισθητήρα επιλέχθηκε με βάση την ακρίβεια.

### 3.3.3. Προσχέδια τοποθέτησης

Στην Εικόνα 3.2. φαίνεται το σημείο στο οποίο θα τοποθετηθεί ο αισθητήρας.

Στο ύψος του κωνικού τμήματος του σιλό θα γίνει μία εσχάρα από δύο μεταλλικές δοκούς διατομής L, οι οποίες θα εδράζονται μέσω ελασμάτων στο σιλό. Οι δοκοί θα είναι κάθετες μεταξύ τους και θα έχουν τοποθετηθεί περιστραμμένες κατά $135^o$ ως προς τον άξονα συμμετρίας της διατομής τους.

Στο σημείο τομής των δοκών θα τοποθετηθεί μια ημισφαιρική μεβράνη εδρασμένη πάνω σε μια κυκλική επιφάνεια ίδιας διαμέτρου, της οποίας υπάρχει μια εσωτερική οπή. Από την οπή αυτή, θα προσαρμοστεί ο αισθητήρας LVDT, οποίος θα ακουμπάει στο εσωτερικό της ημισφαιρική επιφάνειας.




**Εικόνα 3.3. Συνολικά σχέδια τοποθέτησης του αισθητήρα στο ύψος του hopper**

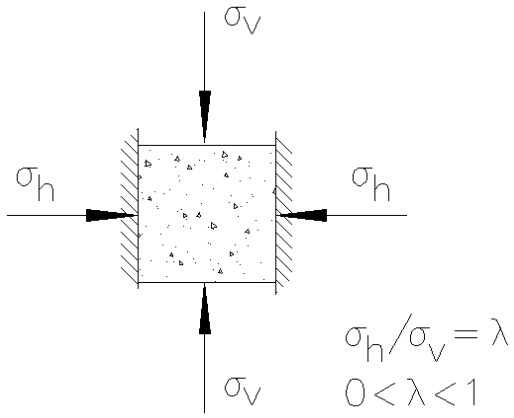
# Κεφάλαιο 4ο – Θεωρητικό υπόβαθρο για τα κοκκώδη υλικά

## Εισαγωγή

Αρχικά, θα αναλύεται η συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών στα σιλό, και η εύρεση του συντελεστή τριβής του. Έπειτα, εξηγούμε την σχέση πίεσης για τα κοκκώδη υλικά και πώς διαφέρει από την υδροστατική πίεση. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εξάρτηση των γωνιών τριβής από την υγρασία και το είδος της επιφάνειας του σιλό. Μαζί παραθέτεται η πειραματική διάταξη με την οποία παίρνουμε τα παραπάνω στοιχεία.

## 4.1. Υπολογισμός τάσεων

### 4.1.1. Συμπεριφορά των κοκκωδών υλικών στα σιλό

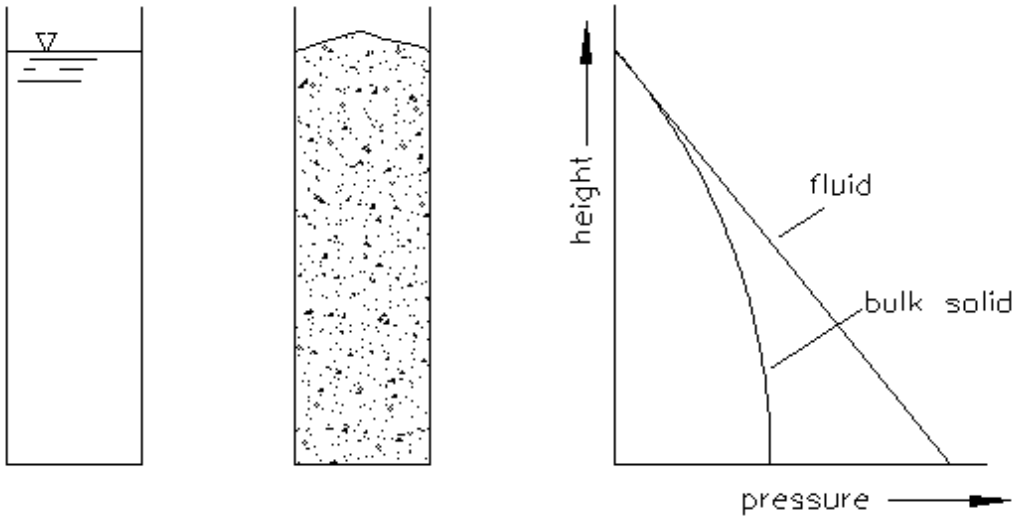



Εικόνα 4.1. Υλικό από κοκκώδες στερεό

Στην εικόνα 4.1. φαίνεται ένα υλικό κοκκώδες σε ένα κύλινδρο με τοίχους χωρίς τριβή. Στο στοιχείο αυτό επιδρά μια κατακόρυφη τάση $\boldsymbol{\sigma_v}$. Ως αποτέλεσμα αυτής, εμφανίζεται η οριζόντια τάση $\boldsymbol{\sigma_h}$. Η σχέση μεταξύ τους ορίζεται για κάθε κοκκώδες υλικό, από ένα συγκεκριμένο λόγο **λ**. Για μη ελαστικά υλικά αυτό λ=0 και για υγρά λ=1. Για τα υπόλοιπα κοκκώδη υλικά, λ = 0,3 - 0,6.

$$\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \tag{4.1.}$$

Σε αντίθεση με τα υγρά, τα κοκκώδη στερεά μεταφέρουν τάσεις σε ηρεμία. Επομένως, ενώ η πίεση σε ένα σιλό γεμάτο από υγρό αυξάνεται γραμμικά με το βάθος, το βάρος ενός κοκκώδους υλικού σε σιλό, μεταφέρει ένα μέρος του στους τοίχους του σιλό μέσα από διατμητικές τάσεις (τριβή στο τοίχο του σιλό), έτσι ώστε να μην αυξάνεται γραμμικά η πίεση όπως στα υγρά (εικόνα 4.2.).




**Εικόνα 4.2. Κ**αθ' ύψος κατανομή τάσεων σε υγρό και κοκκώδες στερεό

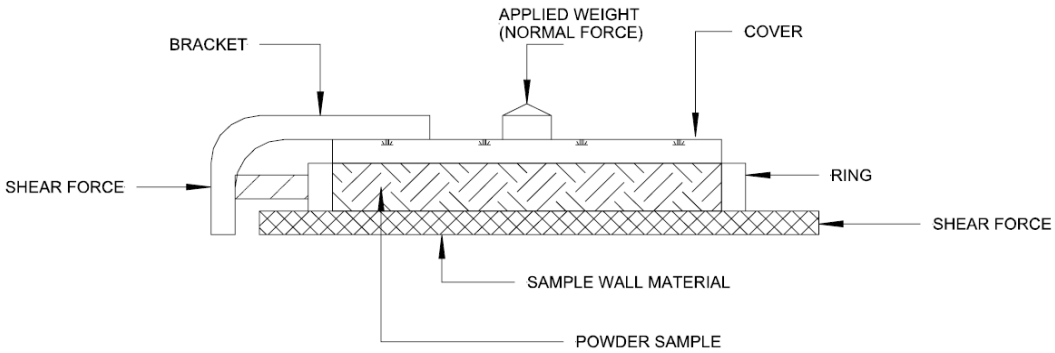
### 4.1.2. Απαιτήσεις πειραμάτων

Για να σχεδιαστούν τα σιλό αποθήκευσης χρειάζονται οι ακόλουθες ιδιότητες των υλικών:

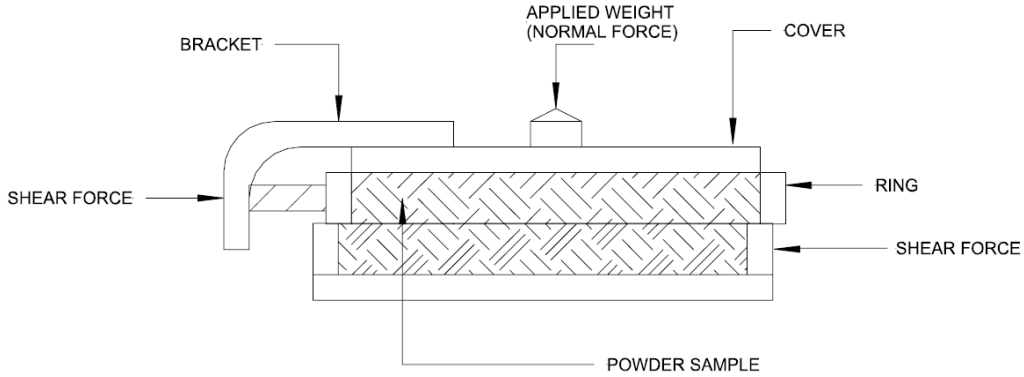
- Συντελεστής εσωτερικής τριβής
- Συντελεστής τριβής του τοίχου
- Διαπερατότητα
- Συμπιεστικότητα

Άλλοι συντελεστές που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η θερμοκρασία και η υγρασία κατά μήκος των διαγραμμάτων που θα συνταχθούν.

- Το πιο συνηθισμένο τεστ είναι το Jenike Shear Tester [13], το οποίο έχει ομοιότητες με το τριαξονικό διατμητικό τεστ. Το δοκίμιο τοποθετείται σε μια συσκευή, όπως φαίνεται στο εικόνα 4.3. Η κίνηση του δοχείου προκαλεί διατμητική τάση ανάμεσα στο δοχείο με το υλικό και ένα δείγμα από τον τοίχο του σιλό για να προσδιοριστεί ο συντελεστής τριβής του τοίχου (εικόνα 4.3.α) Η, με την κίνηση δημιουργείται εσωτερική διάτμηση στο δοκίμιο του υλικού (εικόνα 4.3.β) ώστε να προσδιοριστεί ο συντελεστής εσωτερικής τριβής.




**Εικόνα 4.3.α. Δοκιμή για την εύρεση του συντελεστή τριβής του τοίχου**




**Εικόνα 4.3.β. Δοκιμή για την εύρεση της εσωτερικής γωνίας τριβής.**

Οι δοκιμές για την εύρεση των συντελεστών τριβής **μ** προκύπτουν από την σχέση της διατμητικής τάσης **F** με την κατακόρυφη δύναμη **N**

$$F = \mu \cdot \mathrm{N} \tag{4.2.}$$

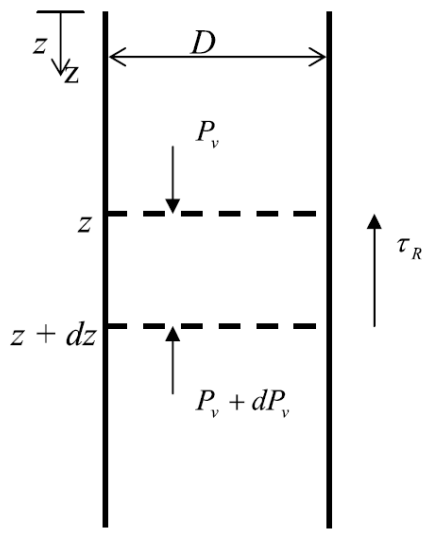
Ο συντελεστής τριβής εκφράζεται ως η 'γωνία' της τριβή του τοίχου, ο οποίος δίνεται από το φ

$$\varphi = \arctan(\mu) \tag{4.3.}$$

### 4.1.3. Τάσεις στα σιλό

Λαμβάνοντας την ισορροπί των δυνάμεων που δρουν σε ένα στοιχειώδης κομμάτι, dz, σε ένα ευθύ κυλινδρικό σιλό (εικόνα 4.4.), σε κατάσταση ισορροπίας έχουμε:

| | |
|---|---|
| Κατακόρυφες τάσεις από το υπερκείμενο υλικό που δρουν προς τα κάτω στον άξονα Z | $P_v A$ |
| Κατακόρυφες τάσεις που δρουν προς τα πάνω στην επιφάνεια z + Δz | $-\left(P_v + dP_v\right)A$ |
| Διατμητικές τάσεις που δρουν στους τοίχους του σιλό προς τα πάνω | $-\tau_R \pi D\, dz$ |
| Δύναμη της βαρύτητας που δρα προς τα κάνω στο στοιχειώδες τμήμα | $\rho^o A\, dz\, g$ |




**Εικόνα 4.4. Ισορροπία τάσεων σε στοιχειώδης τμήμα του υλικού σε κυλινδρικό σιλό**

Σε κατάσταση ηρεμίας (χωρίς επιταχύνσεις, ή αμελώντας τις αδρανειακές καταστάσεις) το σύνολο των δυνάμεων θα πρέπει να είναι ίσο με το μηδέν

$$A\cdot\left(P_v\right)-\mathrm{A}\cdot\left(P_v+dP_v\right)-\tau_R\cdot\pi\cdot D\mathrm{dz}+\rho^o\cdot\mathrm{A}\cdot dz\cdot g=0 \tag{4.4}$$

Το οποίο απλοποιείται στο

$$-\mathrm{A}\cdot\left(dP_v\right)-\tau_R\cdot\pi\cdot D\mathrm{dz}+\rho^o\cdot\mathrm{A}\cdot dz\cdot g=0 \tag{4.5}$$

Η διατμητική τάση στον τοίχο συσχετίζεται με την πλευρική κάθετη τάση που εφαρμόζεται σε ακτινική κατεύθυνση στον τοίχο, **Pw**, με τον συντελεστή τριβής **μ**

$$-\mathrm{A}\cdot\left(dP_v\right)-\mu\cdot P_w\cdot\pi\cdot D\mathrm{dz}+\rho^o\cdot\mathrm{A}\cdot dz\cdot g=0 \tag{4.6}$$

Ο H.A.Janssen [13] επίλυσε αυτή την εξίσωση συνδέοντας την κατακόρυφη κάθετη τάση με την πλευρική κάθετη τάση όπου (K=λ)

$$P_w=K\cdot P_v \tag{4.7}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι

$$\mathrm{A}=\frac{\pi\cdot D^2}{4} \tag{4.8}$$

έχουμε

$$dP_v=\frac{4\cdot\mu\cdot\mathrm{K}}{D}\left(P_v-\frac{\rho^o\cdot g\cdot D}{4\cdot\mu\cdot K}\right)dz \tag{4.9}$$

Ολοκληρώνοντας την σχέση αυτή με αρχικές συνθήκες Pv=0 για z=0 έχουμε

$$P_v=\frac{\rho^o\cdot g\cdot D}{4\cdot\mu\cdot K}\cdot\left(1-\exp\left(\frac{4\cdot\mu\cdot\mathrm{K}\cdot z}{D}\right)\right) \tag{4.10}$$

Όπου gc είναι ο συντελεστής βαρύτητας για να μεταφέρει τα αποτελέσματα από μονάδες μάζας σε μονάδες δύναμης. Αυτή η έκφραση είναι γνωστή ως η **εξίσωση του Janssen** [13].

**Εφαρμογή της εξίσωσης του Janssen**

Έχουμε ένα σιλό από ανοξείδωτο χάλυβα με διάμετρο D = 4m και ύψος z = 20m με επίπεδη βάση. Υπολογίζουμε την πίεση στη βάση του σιλό όταν είναι γεμάτο (α) με σιτάρι και (β) με νερό. Το σιτάρι έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

$\rho^0$ =780 kg/m$^3$
$\varphi = 20^0$

**(α)**

$\mu = \tan(20^0) = 0{,}364$
K = 0,4

Οπότε

$$P_v = \frac{\rho^o \cdot g \cdot D}{4 \cdot \mu \cdot K \cdot g_c} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{4 \cdot \mu \cdot \mathrm{K} \cdot z}{D}\right)\right)$$

$$P_v = \frac{\left(780\, kg/m^3\right) \cdot \left(9{,}807\, m/s^2\right) \cdot \left(4\, m\right)}{4 \cdot \left(0{,}364\right) \cdot \left(0{,}4\right) \cdot (1\, kg \cdot m / N \cdot s^2)} \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{4 \cdot \left(0{,}364\right) \cdot \left(0{,}4\right) \cdot \left(20\, m\right)}{4\, m}\right)\right)$$

$$= 49.681{,}2\ N/m^2$$

$$P_w = K \cdot P_v$$

$$P_w = 0{,}4 \cdot 49.681{,}2 = 19.872{,}48\ N/m^2$$

**(β)**

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{g_c} = \frac{1000\, kg/m^3 \left(9.807\, m/s^2\right) \cdot (20m)}{1\, kg \cdot m / N \cdot s^2} = 196.140\ N/m^2$$

Παρατηρούμε την μεγάλη διαφορά κατακόρυφης πίεσης που εμφανίζεται στο σιλό που περιέχει σιτάρι σε σχέση με αυτό που είναι γεμάτο με νερό.

## 4.2. Επίδραση της υγρασία στον συντελεστή τριβής σε κοκκώδη υλικά

Πριν αναλύσουμε την θεωρία στην οποία βασιστήκαμε θα αναφερθούμε στον τρόπο με τον οποίο συνδέεται η υγρασία με τους δύο συντελεστές τριβής που θα περιγράψουμε παρακάτω. Με βάση αυτή την συσχέτιση και την εξισώσεις που θα προκύψουν από τα νομογραφήματα, δημιουργήθηκε και η φόρμα στο excel που παράγει τα αποτελέσματα ανά περιπτώσεις.

Λόγω της δυσκολίας συγκέντρωσης στοιχείων για όλων των ειδών τα υλικά, στην φόρμα περιλαμβάνονται μόνο τα ακόλουθα υλικά:

| | |
|---|---|
| **Wall Material** | Steel |
| **Granural Material** | Wheat |

**μ – συντελεστής εσωτερικής τριβής**

Εξαρτάται από:

- Είδος κοκκώδους υλικού
- Ποσοστό υγρασίας

**μs - συντελεστής τριβής τοίχου**

Εξαρτάται από:

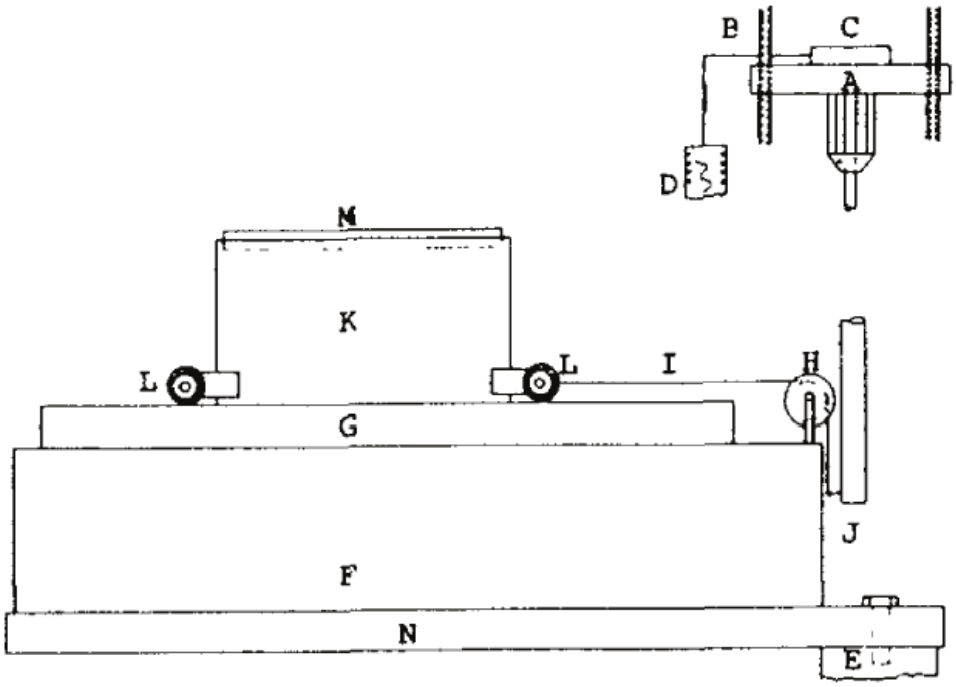
- Είδος κοκκώδους υλικού
- Ποσοστό υγρασίας
- Επιφάνεια τοίχου

### 4.2.1. Αναφορά πειραμάτων προσδιορισμού του συντελεστή τριβής μs

Παρακάτω αναφέρονται τα αποτελέσματα της έρευνας τους του **Lawton** (1980) [12] για ον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής 7 υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή τοίχων σιλό για σιτάρι και κριθάρι σε διαφορετικά επίπεδα υγρασίας. Κατέληξε ότι οι συντελεστές τριβής αυξήθηκαν με την αύξηση της υγρασίας των υλικών και κυμαίνονταν από 0,11 για πλαστικό στο ξηρότερο κριθάρι ως περίπου 0,5 στο σκυρόδεμα για το πιο υγρό σιτάρι. Οι συντελεστές του σιταριού ήταν περίπου πάνω από 0,1 από τους αντίστοιχους του κριθαριού για ίδια υγρασία και υλικό τοίχου. [12]

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής μs χρησιμοποιήθηκε η συσκευή που αναπτύχθηκε από τον **Tosello** (1975) [12] και φαίνεται στην εικόνα 4.5. Βασικά, λαμβάνοντας υπόψη μια οριζόντια στήριξη (F) η οποία βρίσκεται από μια σταθερή πλατφόρμα (N) πάνω στην οποία τοποθετούνται διαφορετικές επιφάνειες υλικών (G). Ένα ορθογώνιο ακρυλικό κουτί (K) χωρίς πάτο με μήκος 0,148 m, πλάτος 0,130 m και ύψος 0,082 m χρησιμοποιείται για να κρατήσει το κοκκώδες υλικό. Για να μειωθεί η τριβή στο σύστημα, το κουτί υποστηρίζεται από 4 τροχούς. Επίσης, οι τροχοί παρέχουν μια σταθερή καθαρή απόσταση μεταξύ του κουτιού και της επιφάνειας, επιτρέποντας μόνο το κοκκώδες υλικό να έρθει σε επαφή με την

επιφάνεια. Ένα μεταλλικό καλώδιο (I) συνδέεται με το κουτί (K) και το σημείο (J) όπου εφαρμόζεται η δύναμη. Χρησιμοποιείται μια τροχαλία (H) για να βεβαιωθεί ότι η δύναμη που θα εφαρμοστεί θα έχει την ίδια κατακόρυφη διεύθυνση με το δυναμόμετρο και επίσης να οριζόντια διεύθυνση με την επιφάνεια τριβής.
Αυτή η συσκευή είναι τοποθετημένη στην βάση (E) της συσκευής Instron Universal Testing Instrument. Μια μεταλλική ράβδος με μήκος 0,1 m πακτωμένη στο χαμηλότερο σημείο του φορτίου (A). Το καλώδιο (I) είναι ενωμένο με την μεταλλική ράβδο με ένα άγκιστρο στο τέλος της ράβδου επιτρέποντας την εφαρμογή δύναμης. Η εφαρμοσμένη δύναμη και μετατόπιση καταγράφονται από ένα αριθμημένο καταγραφέα (D) που είναι συνδεδεμένος με το Instron.
Ένα μεταλλικό κομμάτι (M), με ποικίλο βάρος και μικρότερες διαστάσεις από το ορθογώνιο κουτί, χρησιμοποιείται για να δώσει κάθετη δύναμη μεταξύ της επιφάνειας τριβής και του δοκιμίου.




Εικόνα 4.5. Συσκευή για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής μs τουTosello

### 4.2.2. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων του Lawton

**Α) Υλικά και μέθοδοι**

Οι ποικιλίες του σιταριού που χρησιμοποιήθηκαν για το πείραμα ήταν Gize 168, Seds1 και Bani suwayf. Οι επιφάνειες των τοιχωμάτων ήταν Galvanized steel, Plywood, Plastic και Rubber. Επίσης, στα υλικά χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα επίπεδα υγρασίας, 9.30 , 10 , 11.11 και 12.5%.
Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων και ότι ακόλουθες μεταβλητές και αλληλεπιδράσεις έχουν σημαντική επιρροή στη στον συντελεστή της τριβής σε 1% επίπεδο πιθανότητας

**the moisture conents and the four surfaces.**

| Varieties* | Moisture * content(w.b) | Surfaces * | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Plywood | G. metal | Plastic | Rubber |
| Bani Suwayf 3 | 9.30 | 0.458 | 0.454 | 0.410 | 0.496 |
| | 10.00 | 0.466 | 0.501 | 0.437 | 0.559 |
| | 11.11 | 0.475 | 0.532 | 0.452 | 0.570 |
| | 12.50 | 0.496 | 0.549 | 0.475 | 0.576 |
| Giza 168 | 9.30 | 0.438 | 0.458 | 0.412 | 0.524 |
| | 10.00 | 0.449 | 0.470 | 0.427 | 0.535 |
| | 11.11 | 0.463 | 0.497 | 0.438 | 0.538 |
| | 12.50 | 0.492 | 0.559 | 0.499 | 0.570 |
| Seds 1 | 9.30 | 0.454 | 0.496 | 0.488 | 0.573 |
| | 10.00 | 0.471 | 0.527 | 0.514 | 0.581 |
| | 11.11 | 0.484 | 0.554 | 0.523 | 0.5 87 |
| | 12.50 | 0.498 | 0.570 | 0.532 | 0.605 |

* Significant at 1 % level

**Εικόνα 4.6. Συντελεστής τριβής 3 ποικιλιών σιταριού σε 4 υγρασίες και 4 επιφάνειες σιλό**

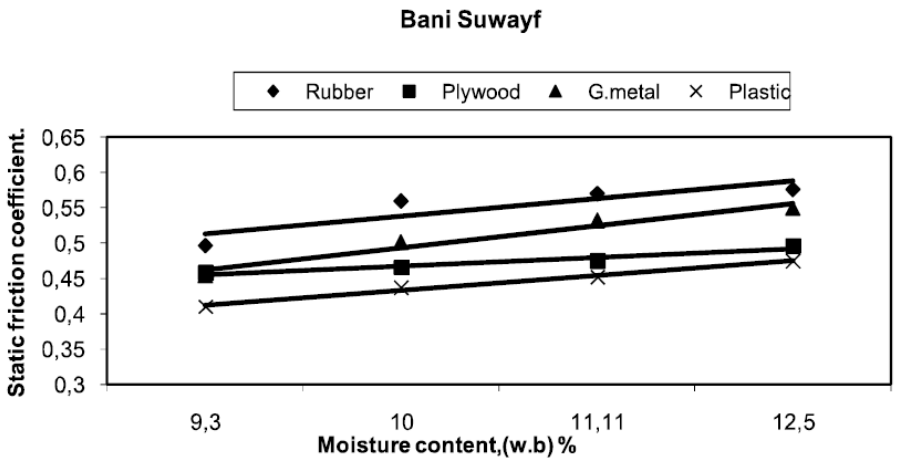
Επειδή οι τρεις ποικιλίες ανήκουν στην ίδια κατηγορία προϊόντος (σιτάρι), τα αποτελέσματα της επίδρασης της υγρασίας, της επιφάνειας και των αλληλεπιδράσεών τους αναλύθηκαν για κάθε ποικιλία.

Model : Friction Coefficient = a + (b x M )

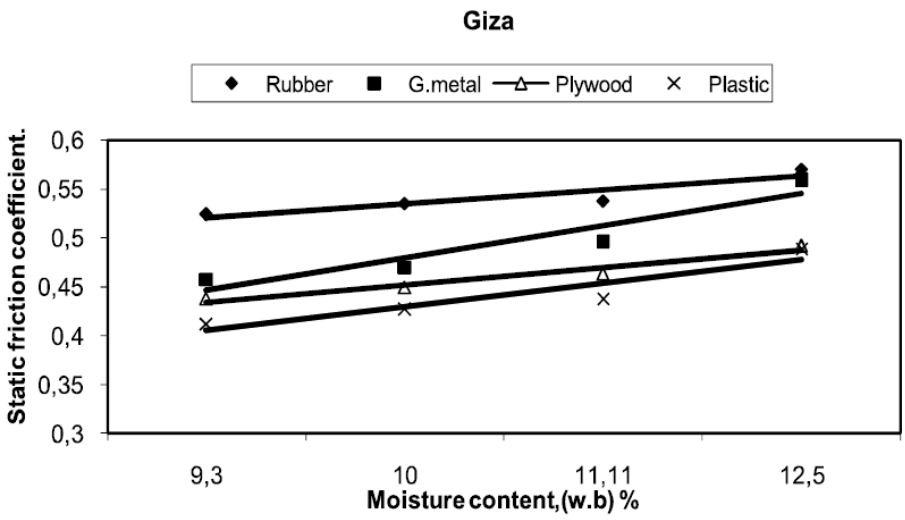
| Varieties | Plywood | | | | | | Galvonized sheet metal | | | Plastic | | Rubber |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | a | b | $R^2$ | A | b | $R^2$ | A | B | $R^2$ | A | B | $R^2$ |
| B.S/3 | 0.44 | 0.012 | 0.94 | 0.43 | 0.03 | 0.95 | 0.39 | **0.02** | 0.99 | 0.49 | 0.03 | 0.77 |
| Giza 168 | 0.43 | 0.015 | 0.84 | 0.41 | 0.03 | 0.89 | 0.37 | 0.03 | 0.83 | 0.51 | 0.01 | 0.84 |
| Seds 1 | 0.48 | 0.014 | 0.91 | 0.47 | 0.02 | 0.98 | 0.44 | 0.01 | 0.99 | 0.56 | 0.01 | 0.93 |

**Εικόνα 4.7. Σχέση μεταξύ συντελεστή τριβής των 3 ποικιλιών σιταριού, της υγρασίας και των 4 επιφανειών**

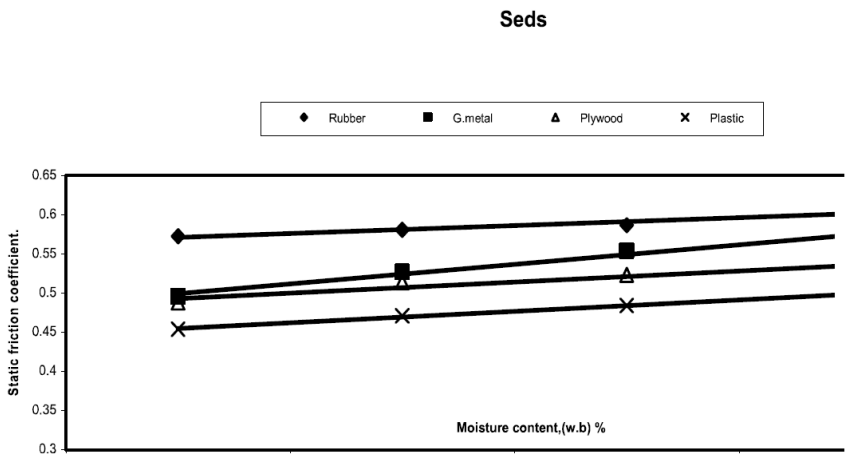
Αναλυτικά για κάθε ποικιλία σιταριού έχουμε:




Εικόνα 4.8. Εξαρτήσεις συντελεστή τριβής για την ποικιλία σιταριού Bani Suwayf




Εικόνα 4.9. Εξαρτήσεις συντελεστή τριβής για την ποικιλία σιταριού Giza




Εικόνα 4.10. Εξαρτήσεις συντελεστή τριβής για την ποικιλία σιταριού Seds

**Β) Συμπεράσματα**

- Ο συντελεστής τριβής γενικά αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η υγρασία των ποικιλιών
- Μεταξύ των επιφανειών των σιλό, το rubber έδειξε τον υψηλότερο συντελεστή τριβής για κάθε ποικιλία σε σχέση με τα υπόλοιπα.
- Η υγρασία των κοκκώδων υλικών είχε περισσότερη επιρροή στον συντελεστή τριβής σε σχέση με τα υλικό της επιφάνειας του σιλό.

### 4.2.3. Πίνακας γωνιών τριβής

Για την δημιουργία του παρακάτω πίνακα, χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τα παραπάνω πειράματα, αλλά και από την βιβλιογραφία [8-19].

| Granural Material | ϕ - internal friction (°) | μs - Concrete Wall coefficient of friction | μs - Steel Wall coefficient of friction |
|---|---|---|---|
| Bran | 20 | 0,53 = O,33+0,02*moisture | 0,55= O,33+0,022*moisture |
| Flour soft | 30 | 0,56= O,36+0,02*moisture | 0,55= O,34+0,021*moisture |
| Flour hard | 35 | 0,58= O,33+0,025*moisture | 0,65= O,35+0,03*moisture |
| Wheat | 32 | 0,63= O,23+0,04*moisture | 0,59= O,34+0,025*moisture |

Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται στο υπολογιστικό φύλλο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.

# Κεφάλαιο 5ο – Υπολογιστική διαδικασία

## Εισαγωγή

Περιγράφετε ο τρόπος υπολογισμού των διαστάσεων του ημισφαιρίου και αναλύονται όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο υπολογιστικό φύλλο που δημιουργήθηκε για την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα SAP2000. Από την διαδικασία αυτή, προκύπτει η εξάρτηση της παραμόρφωσης της κορυφής του ημισφαιρίου σε σχέση με το υπερκείμενο υλικό.
Τέλος, υπολογίζουμε και την παραμόρφωση του σημείου στήριξης του αισθητήρα στο ANSYS Workbench 14.0.

## 5.1. Υπολογιστική διαδικασία

### 5.1.1. Περιγραφή στοιχείων εισαγωγής

Δημιουργήθηκε ένα υπολογιστικό φύλλο στο EXCEL, το οποίο περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους που χρειαζόμαστε για την επίλυση του προβλήματος, καθώς και τους τύπους υπολογισμού που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Οι τιμές του είναι στο SI σύστημα.
Η μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε σε τρία προγράμματα, SAP2000, Solidworks και ANSYS. Τελικά, προτιμήθηκε το SAP2000 λόγω της ευχρηστίας στην εισαγωγή τιμών που διαπιστώθηκε σε σχέση με τα άλλα προγράμματα.
Οι παράμετροι του μοντέλου ήταν το υλικό, η ακτίνα, το πάχος και οι εδράσεις. Το βασικό κριτήριο για την επιλογή των κατάλληλων παραπάνω τιμών ήταν η βύθιση που παρουσίαζε η κορυφή της σφαίρας μετά την επιβολή των φορτίσεων. Στη μέγιστη φόρτιση, θα έπρεπε να μην παρουσιάζει αστοχία το υλικό, ενώ στην ελάχιστη θα έπρεπε να είναι μετρήσιμη η παραμόρφωση που εμφανιζόταν.

Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήσαμε στις εκτελέσεις του προγράμματος βασίζονται στους παρακάτω συνδυασμούς:

| Υλικό σιλό | Ακτίνα (mm) | Πάχος (mm) | Εδράσεις |
|---|---|---|---|
| Steel | 80 | 0,1 | Πακτώσεις |
| PVC Rigid | 90 | 0,3 | Αρθρώσεις |
| | 100 | 0,5 | Κυλίσεις |
| | 110 | 0,8 | |
| | 120 | 1,0 | |
| | 150 | 1,2 | |
| | 200 | 1,5 | |

Τα κριτήρια επιλογής:

| | Κριτήριο |
|---|---|
| Μέγιστη φόρτιση (ΔΗ = 10,7 m) | Ελαστική περιοχή του υλικού |
| Ελάχιστη φόρτιση (ΔΗ = 0,55 m) | Μετρήσιμη παραμόρφωση (τάξης 10 μm) |

Εκτελέστηκαν όλοι οι παραπάνω συνδυασμοί. Τελικά, με βάση τα κριτήρια επιλογής που θέσαμε, καταλήξαμε στην παρακάτω επιλογή.

Τελική επιλογή:

| Υλικό | Ακτίνα (mm) | Πάχος (mm) | Εδράσεις |
|---|---|---|---|
| PVC Rigid | 110 | 1 | Πακτώσεις |

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και αποτελούν και τα δεδομένα του προβλήματος, δηλαδή την περίπτωση που μελετήθηκε.

**α) Δεδομένα προβλήματος**

| DATA | | | |
|---|---|---|---|
| | (m) | **H silo** | 13,4 |
| | (m) | **H hopper** | 2,7 |
| | (m) | **D Diametre silo** | 5 |
| | (m/s^2) | **g** | 9,807 |

**H silo:** Το συνολικό ύψος του σιλό

**H hopper:** Το ύψος της χοάνης

**D Diameter silo:** Η διάμετρος του σιλό

**g :** η επιτάχυνση της βαρύτητας

**β) Υλικά**

| MATERIAL | | | |
|---|---|---|---|
| | | **Wall Material** | Steel |
| | | **Granural Material** | Wheat |
| | (%w/w) | **Moisture** | 10 |
| | (Kg/100lt) | **Weight** | 78 |

Με βάση την επιλογή των υλικών στον πίνακα **Materials**, διαμορφώνονται οι τιμές στον πίνακα **Values.** Με μπλε χρώμα φαίνονται το κελιά εισόδου δεδομένων και με πράσινο οι τιμές που προκύπτουν από υπολογισμούς.

**Wall material**: Το υλικό του τοίχου του σιλό σε συνδυασμό με την επιλογή κοκκώδους υλικού, επηρεάζει τον συντελεστή τριβής του κοκκώδους υλικού και του τοίχου (**μs - wall coefficient of friction**). Λαμβάνει τιμές: **Steel, Concrete**, τα οποία είναι και τα υλικά που συναντήσαμε στην παρούσα αλευροβιομηχανία.

**Granural material**: Το κοκκώδες υλικό επηρεάζει τον συντελεστή εσωτερικής τριβής (**φ - angle of internal friction**), ο οποίος διαμορφώνει τον συντελεστή **K**.

**Moisture:** Η υγρασία του κοκκώδους υλικού θεωρείται και αυτή τιμή εισόδου. Δίδεται συνήθως από το χημείο της αλευροβιομηχανίας

**Weight:** Το βάρος του υλικού δίδεται με την μορφή πυκνότητας σε μονάδες Kg/100lt

**γ) Τιμές που προκύπτουν από τον προηγούμενο πίνακα**

| VALUES | | | |
|---|---|---|---|
| | (kg/m3) | **Bulk density** | 780 |
| | (o) | **Angle of internal friction** | 32 |
| | | **μ - Coefficient of internal friction** | 0,624869352 |
| | | **K** | 0,307258525 |
| | | **μs - Wall coefficient of friction** | 0,59 |

**Bulk density**: Η πυκνότητα του κοκκώδους υλικού τροποποιημένη στο SI (kg/m3).

**Angle of internal friction:** Η γωνία εσωτερική τριβής του υλικού **(φ)** είναι γνωστή από τον παρακάτω πίνακα και εξαρτάται από την επιλογή του υλικού.

**Coefficient of internal friction**: Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής **(μ)** προκύπτει από την **tanφ**

**K**: Ο συντελεστής προκύπτει από την ακόλουθη σχέση, παρμένη από την θεωρία του Janssen

$$K = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \tag{5.1}$$

**Wall coefficient of internal friction**: Ο συντελεστής εσωτερικής τριβής **(μs)** διαμορφώνεται με βάση το υλικό και την υγρασία του

Οι συναρτήσεις εξάρτησης των **μ** και **μs** προκύπτουν από τα

| **Wall Material** | Concrete | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Steel | | | |
| | | | | |
| | | **φ** internal friction (o) | **μs Concrete** Wall coefficient of friction | **μs Steel** Wall coefficient of friction |
| **Granural Material** | Bran | 20 | 0,53 | 0,55 |
| | Flour soft | 30 | 0,56 | 0,55 |
| | Flour hard | 35 | 0,58 | 0,65 |
| | Wheat | 32 | 0,63 | 0,59 |

**δ) Στοιχεία σιλό και ημισφαιρίου**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **SELECT** | | | |
| | **Silo** | | |
| | (m) | **Height** | 10,7 |
| | | | |
| | **Semisphere** | | |
| | | **Semishere material** | pvc rigid |
| | (m) | **r - Semishere radius** | 0,11 |
| | (m) | **t - thickness** | 0,001 |
| | (o) | **Angle** | 17 |
| | (rad) | | 0,296705973 |
| | | **Parts per height of Semisphere** | 45 |

**Height:** Επιλέγουμε το ύψος της στάθμης που βρίσκεται το υλικό στο σιλό.

**Semisphere material**: Ως υλικό ημισφαιρίου επιλέχθηκε ύστερα από δοκιμές το PVC rigid, τα χαρακτηριστικά του οποίου δίνονται σε παρακάτω κεφάλαιο.

**r - Semisphere radius:** Η ακτίνα του ημισφαιρίου.

**t – Thickness:** Το πάχος του ημισφαρίου.

**Angle:** Η γωνία από την κορυφή του ημισφαιρίου στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη συνισταμένη P των τάσεων Pv και Pw.

**Parts per height of semisphere:** ο αριθμός των ζωνών που χωρίζουμε το ημισφαίριο καθ' ύψος για την επιβολή της συνισταμένης δύναμης P.

**ε) Αποτελέσματα τάσεων καθ' ύψος**

Με βάση τις παραπάνω τιμές παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **RESULTS** | | | | | | |
| | **Silo surface** | | | | | |
| | (m^2) | **E Surface of silo** | 19,63495408 | | | |
| | | **Heigh - z** | | **Pv** | **Pw** | **P** |
| | (N/m^2) | 10 | | 40376,13 | 12405,91 | 42239,03 |
| max | (N/m^2) | 10,7 | | 41570,21 | 12772,80 | 43488,19 |
| min | (N/m^2) | 0,55 | | 4043,78 | 1242,48 | 4230,35 |

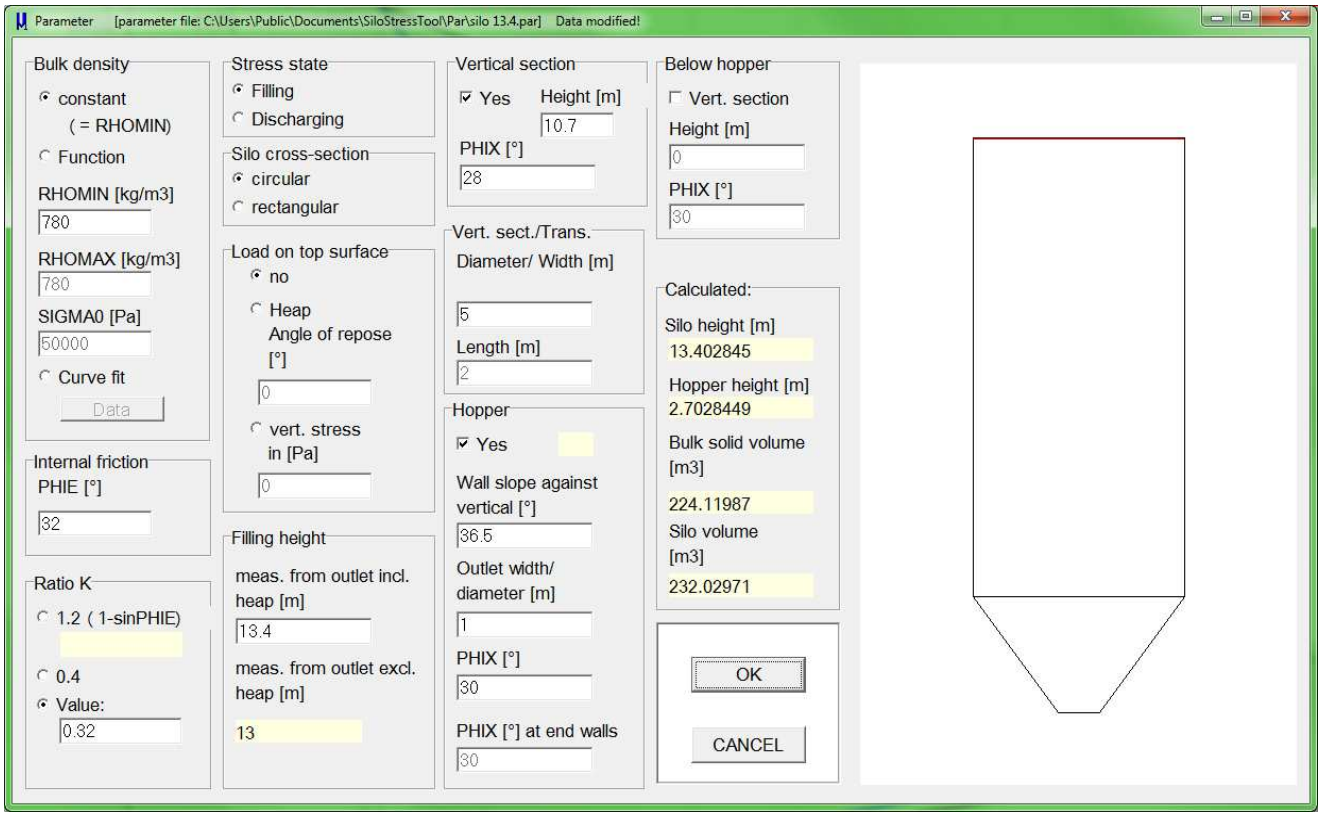
**E Surface of silo:** Το εμβαδό της επιφάνειας του πλήρωσης στο σιλό

**Pv:** Η πίεση κατακόρυφα στο ύψος του hopper του σιλό

**Ph:** Η οριζόντια πίεση στο ύψος του hopper του σιλό

### 5.1.2. Επαλήθευση υπολογιστικού πίνακα με το πρόγραμμα Silo Stress Tool

Για την επαλήθευση του παραπάνω υπολογιστικού φύλλου, χρησιμοποιήθηκε και το πρόγραμμα Silo Stress Tool του Dietmar Schulze [21].




Εικόνα 5.1 Παράμετροι του Silo Express Tool

**RHOMIN (kg/m^3) :** πυκνότητα υλικου

**PHIE (o) :** γωνία εσωτερικής τριβής

**Ratio K :** συντελεστής K

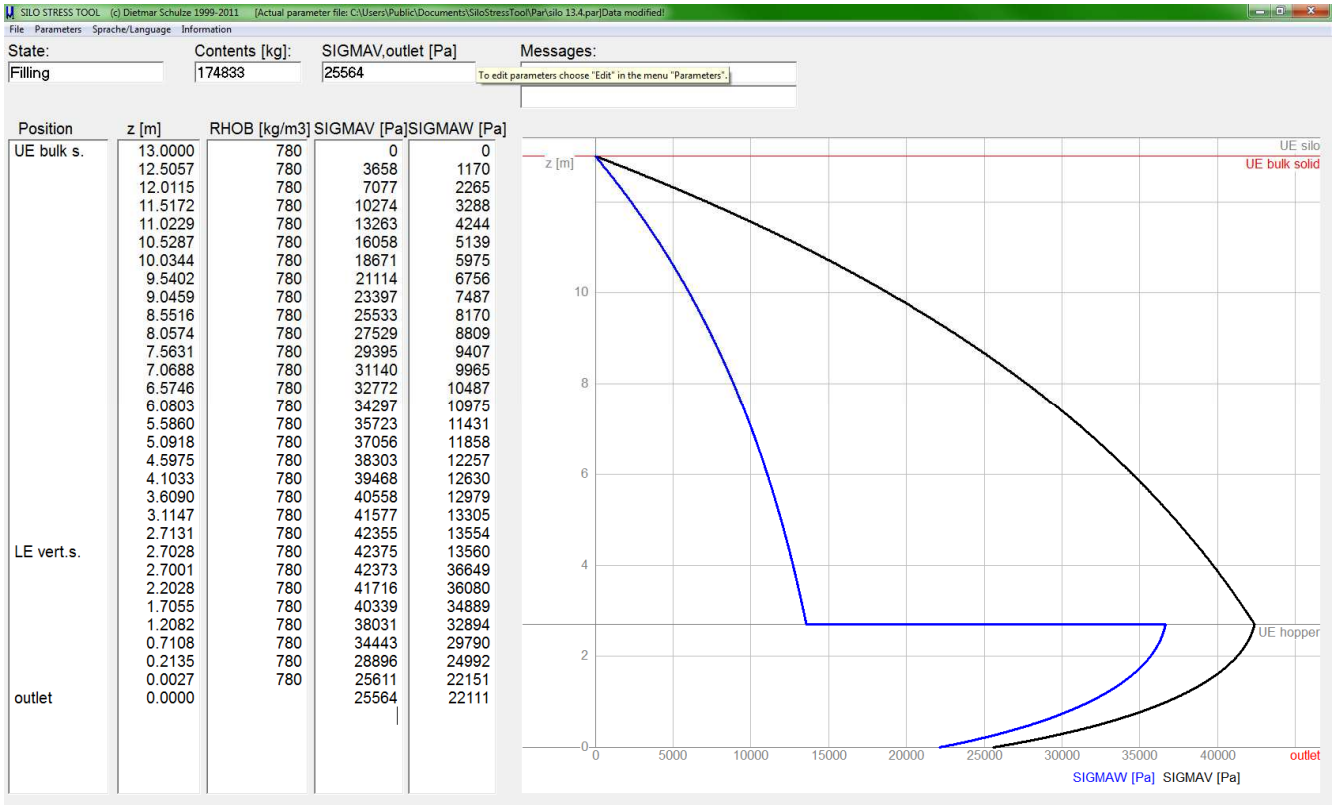
**Filling Height (m) :** μέγιστη στάθμη πλήρωσης

**Vertical section, Height (m) : ύψος σιλό πάνω από το hopper**

**Vertical section, PHIX (o) :** γωνία τριβής επιφάνειας σιλό

**Vert.Sect/Trans., Diameter/width (m):** Διάμετρος σιλό

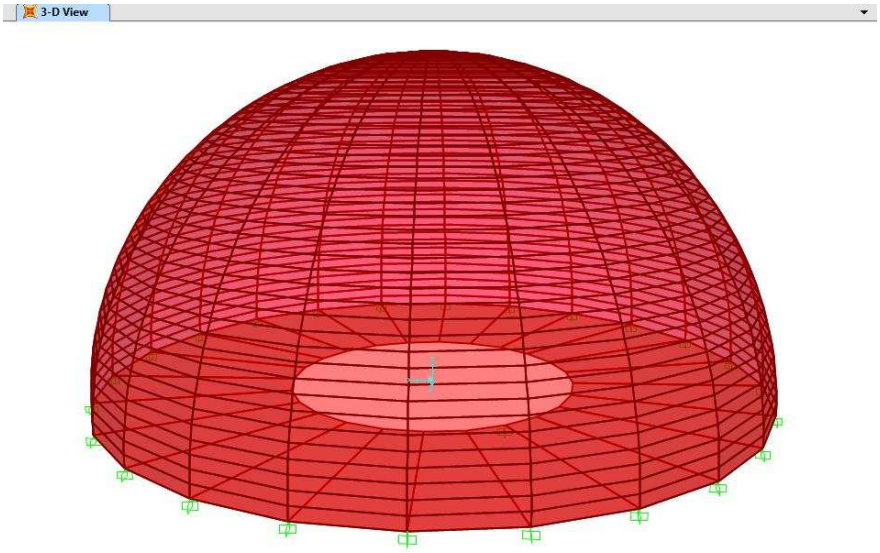
**Hopper, Wall slope against vertical:** γωνία κλίσης του hopper




| Position | z [m] | RHOB [kg/m3] | SIGMAV [Pa] | SIGMAW [Pa] |
|---|---|---|---|---|
| UE bulk s. | 13.0000 | 780 | 0 | 0 |
| | 12.5057 | 780 | 3658 | 1170 |
| | 12.0115 | 780 | 7077 | 2265 |
| | 11.5172 | 780 | 10274 | 3288 |
| | 11.0229 | 780 | 13263 | 4244 |
| | 10.5287 | 780 | 16058 | 5139 |
| | 10.0344 | 780 | 18671 | 5975 |
| | 9.5402 | 780 | 21114 | 6756 |
| | 9.0459 | 780 | 23397 | 7487 |
| | 8.5516 | 780 | 25533 | 8170 |
| | 8.0574 | 780 | 27529 | 8809 |
| | 7.5631 | 780 | 29395 | 9407 |
| | 7.0688 | 780 | 31140 | 9965 |
| | 6.5746 | 780 | 32772 | 10487 |
| | 6.0803 | 780 | 34297 | 10975 |
| | 5.5860 | 780 | 35723 | 11431 |
| | 5.0918 | 780 | 37056 | 11858 |
| | 4.5975 | 780 | 38303 | 12257 |
| | 4.1033 | 780 | 39468 | 12630 |
| | 3.6090 | 780 | 40558 | 12979 |
| | 3.1147 | 780 | 41577 | 13305 |
| | 2.7131 | 780 | 42355 | 13554 |
| LE vert.s. | 2.7028 | 780 | 42375 | 13560 |
| | 2.7001 | 780 | 42373 | 36649 |
| | 2.2028 | 780 | 41716 | 36080 |
| | 1.7055 | 780 | 40339 | 34889 |
| | 1.2082 | 780 | 38031 | 32894 |
| | 0.7108 | 780 | 34443 | 29790 |
| | 0.2135 | 780 | 28896 | 24992 |
| | 0.0027 | 780 | 25611 | 22151 |
| outlet | 0.0000 | | 25564 | 22111 |

**Εικόνα 5.2. Αποτελέσματα πιέσεων του Silo Express Tool**

Το ημισφαιρικό στοιχείο χωρίστηκε καθ' ύψος σε 45 τμήματα (ανά 2,44 mm)και ακτινικά σε 24.

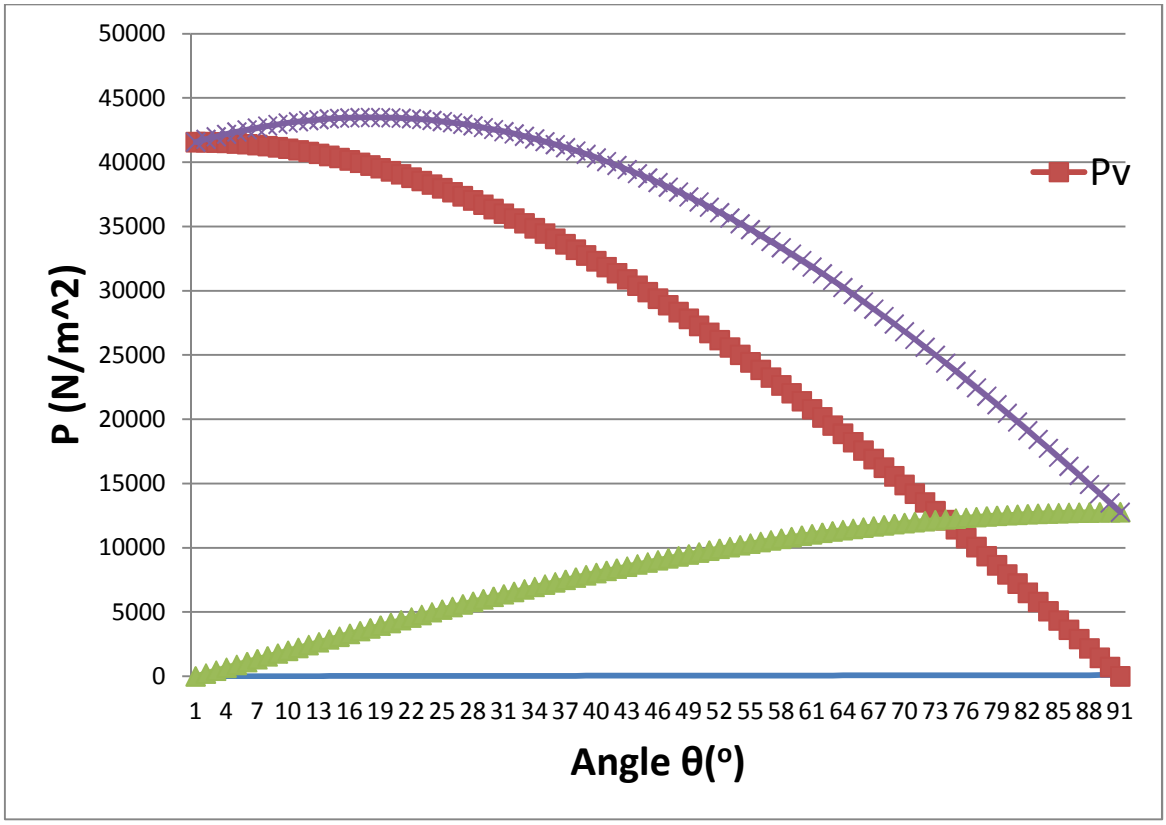



**Εικόνα 5.3. Ημισφαιρικό στοιχείο στο SAP2000**

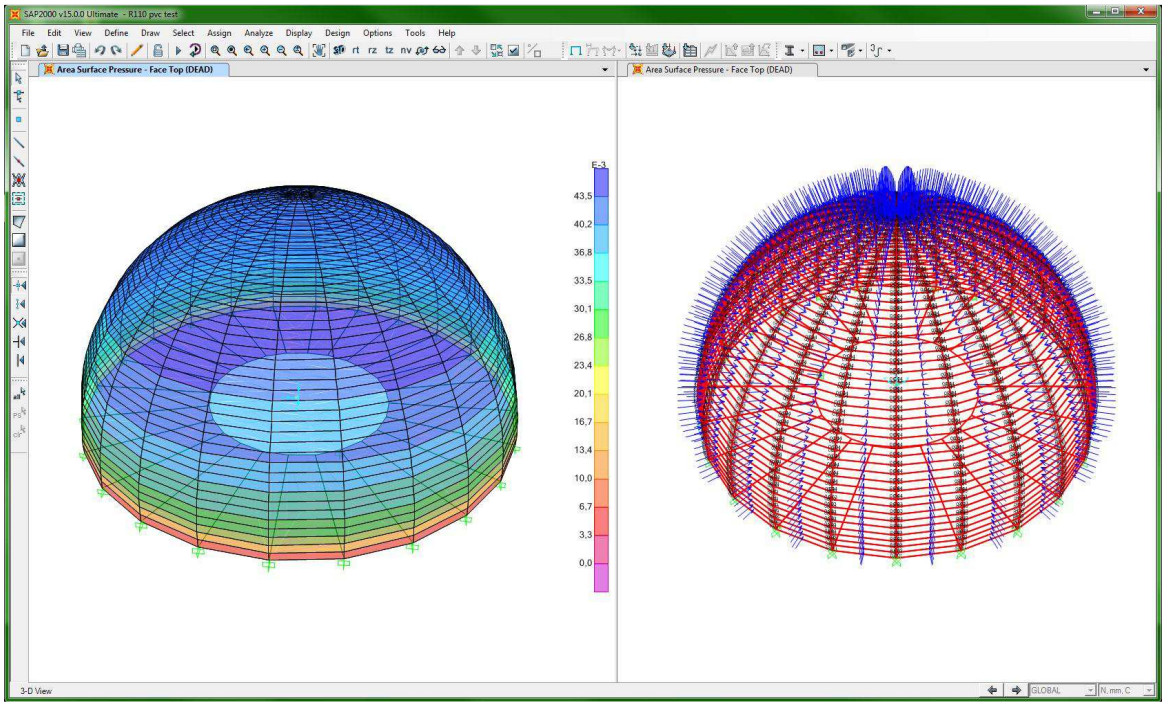
Πριν καταλήξουμε σε αυτή την τμηματοποίηση, διερευνήθηκε η κατανομή των πιέσεων στο ημισφαίριο ανά 1ο. Παρακάτω φαίνονται οι πίνακες με τις πιέσεις που δημιουργούνται από υλικό με ΔΗ = 10,7 m. Στις 17ο έχουμε την μέγιστη συνισταμένη πίεση P.

| Angle | | Zone Height | | | Total Pressure |
|---|---|---|---|---|---|
| θ (o) | θ (rad) | H (m) | Pv | Pw | P (N/m^2) |
| 0 | 0 | 110 | 41570,21 | 0 | 41570,21177 |
| 1 | 0,017453293 | 109,9832465 | 41563,88 | 222,9161 | 41786,79655 |
| 2 | 0,034906585 | 109,932991 | 41544,89 | 445,7644 | 41990,65268 |
| 3 | 0,052359878 | 109,8492488 | 41513,24 | 668,4768 | 42181,71804 |
| 4 | 0,06981317 | 109,7320455 | 41468,95 | 890,9856 | 42359,93444 |
| 5 | 0,087266463 | 109,5814168 | 41412,02 | 1113,223 | 42525,2476 |
| 6 | 0,104719755 | 109,3974085 | 41342,49 | 1335,121 | 42677,60716 |
| 7 | 0,122173048 | 109,1800767 | 41260,35 | 1556,613 | 42816,9667 |
| 8 | 0,13962634 | 108,9294876 | 41165,65 | 1777,63 | 42943,28378 |
| 9 | 0,157079633 | 108,6457175 | 41058,41 | 1998,106 | 43056,51992 |
| 10 | 0,174532925 | 108,3288528 | 40938,67 | 2217,974 | 43156,64062 |
| 11 | 0,191986218 | 107,9789902 | 40806,45 | 2437,166 | 43243,6154 |
| 12 | 0,20943951 | 107,5962361 | 40661,8 | 2655,615 | 43317,41775 |
| 13 | 0,226892803 | 107,1807071 | 40504,77 | 2873,255 | 43378,02519 |
| 14 | 0,244346095 | 106,7325299 | 40335,4 | 3090,02 | 43425,41927 |
| 15 | 0,261799388 | 106,2518409 | 40153,74 | 3305,844 | 43459,58555 |
| 16 | 0,27925268 | 105,7387866 | 39959,85 | 3520,661 | 43480,51361 |
| 17 | 0,296705973 | 105,1935232 | 39753,79 | 3734,406 | 43488,19709 |
| 18 | 0,314159265 | 104,6162168 | 39535,62 | 3947,013 | 43482,63365 |
| 19 | 0,331612558 | 104,0070433 | 39305,41 | 4158,418 | 43463,82497 |
| 20 | 0,34906585 | 103,3661883 | 39063,22 | 4368,556 | 43431,77679 |
| 21 | 0,366519143 | 102,6938469 | 38809,14 | 4577,363 | 43386,49887 |
| 22 | 0,383972435 | 101,990224 | 38543,23 | 4784,776 | 43328,005 |
| 23 | 0,401425728 | 101,2555339 | 38265,58 | 4990,731 | 43256,313 |
| 24 | 0,41887902 | 100,4900003 | 37976,28 | 5195,167 | 43171,44471 |
| 25 | 0,436332313 | 99,69385657 | 37675,41 | 5398,019 | 43073,42598 |
| 26 | 0,453785606 | 98,86734509 | 37363,06 | 5599,228 | 42962,28667 |
| 27 | 0,471238898 | 98,01071766 | 37039,33 | 5798,731 | 42838,06063 |
| 28 | 0,488692191 | 97,12423521 | 36704,32 | 5996,467 | 42700,7857 |
| 29 | 0,506145483 | 96,20816779 | 36358,13 | 6192,377 | 42550,5037 |
| 30 | 0,523598776 | 95,26279442 | 36000,86 | 6386,401 | 42387,2604 |
| 31 | 0,541052068 | 94,28840308 | 35632,63 | 6578,479 | 42211,10553 |
| 32 | 0,558505361 | 93,28529058 | 35253,54 | 6768,554 | 42022,09275 |
| 33 | 0,575958653 | 92,25376247 | 34863,71 | 6956,567 | 41820,27963 |
| 34 | 0,593411946 | 91,19413298 | 34463,27 | 7142,46 | 41605,72765 |
| 35 | 0,610865238 | 90,10672487 | 34052,32 | 7326,178 | 41378,50217 |
| 36 | 0,628318531 | 88,99186938 | 33631,01 | 7507,665 | 41138,67239 |
| 37 | 0,645771823 | 87,84990611 | 33199,45 | 7686,864 | 40886,31137 |
| 38 | 0,663225116 | 86,6811829 | 32757,77 | 7863,722 | 40621,49598 |
| 39 | 0,680678408 | 85,48605576 | 32306,12 | 8038,185 | 40344,3069 |
| 40 | 0,698131701 | 84,26488874 | 31844,63 | 8210,199 | 40054,82855 |
| 41 | 0,715584993 | 83,01805382 | 31373,44 | 8379,712 | 39753,14911 |
| 42 | 0,733038286 | 81,7459308 | 30892,69 | 8546,673 | 39439,36047 |
| 43 | 0,750491578 | 80,44890718 | 30402,53 | 8711,03 | 39113,55822 |
| 44 | 0,767944871 | 79,12737804 | 29903,11 | 8872,734 | 38775,84161 |
| 45 | 0,785398163 | 77,78174593 | 29394,58 | 9031,735 | 38426,3135 |

| Angle | | Zone Height | | | Total Pressure |
|---|---|---|---|---|---|
| θ (o) | θ (rad) | H (m) | Pv | Pw | P (N/m^2) |
| 47 | 0,820304748 | 75,01981961 | 28350,82 | 9341,436 | 37692,25223 |
| 48 | 0,837758041 | 73,6043667 | 27815,9 | 9492,042 | 37307,94267 |
| 49 | 0,855211333 | 72,16649319 | 27272,51 | 9639,756 | 36912,26875 |
| 50 | 0,872664626 | 70,70663707 | 26720,82 | 9784,534 | 36505,351 |
| 51 | 0,890117919 | 69,22524302 | 26160,98 | 9926,331 | 36087,31336 |
| 52 | 0,907571211 | 67,72276229 | 25593,18 | 10065,11 | 35658,28318 |
| 53 | 0,925024504 | 66,19965255 | 25017,58 | 10200,81 | 35218,39114 |
| 54 | 0,942477796 | 64,65637775 | 24434,36 | 10333,41 | 34767,77124 |
| 55 | 0,959931089 | 63,093408 | 23843,69 | 10462,87 | 34306,56074 |
| 56 | 0,977384381 | 61,51121938 | 23245,77 | 10589,13 | 33834,90012 |
| 57 | 0,994837674 | 59,91029385 | 22640,76 | 10712,17 | 33352,93307 |
| 58 | 1,012290966 | 58,29111907 | 22028,86 | 10831,95 | 32860,80639 |
| 59 | 1,029744259 | 56,65418824 | 21410,24 | 10948,43 | 32358,67 |
| 60 | 1,047197551 | 55 | 20785,11 | 11061,57 | 31846,67683 |
| 61 | 1,064650844 | 53,32905823 | 20153,64 | 11171,34 | 31324,98287 |
| 62 | 1,082104136 | 51,64187191 | 19516,03 | 11277,71 | 30793,747 |
| 63 | 1,099557429 | 49,93895497 | 18872,48 | 11380,65 | 30253,13107 |
| 64 | 1,117010721 | 48,22082615 | 18223,18 | 11480,12 | 29703,29974 |
| 65 | 1,134464014 | 46,48800879 | 17568,33 | 11576,09 | 29144,42049 |
| 66 | 1,151917306 | 44,74103074 | 16908,13 | 11668,54 | 28576,66357 |
| 67 | 1,169370599 | 42,98042413 | 16242,78 | 11757,43 | 28000,20193 |
| 68 | 1,186823891 | 41,20672528 | 15572,48 | 11842,74 | 27415,21115 |
| 69 | 1,204277184 | 39,42047445 | 14897,43 | 11924,44 | 26821,86943 |
| 70 | 1,221730476 | 37,62221577 | 14217,85 | 12002,51 | 26220,35751 |
| 71 | 1,239183769 | 35,81249699 | 13533,94 | 12076,92 | 25610,85861 |
| 72 | 1,256637061 | 33,99186938 | 12845,9 | 12147,66 | 24993,5584 |
| 73 | 1,274090354 | 32,16088752 | 12153,95 | 12214,69 | 24368,64491 |
| 74 | 1,291543646 | 30,32010914 | 11458,3 | 12278,01 | 23736,3085 |
| 75 | 1,308996939 | 28,47009496 | 10759,16 | 12337,58 | 23096,74177 |
| 76 | 1,326450232 | 26,61140852 | 10056,74 | 12393,4 | 22450,13956 |
| 77 | 1,343903524 | 24,74461598 | 9351,263 | 12445,44 | 21796,69881 |
| 78 | 1,361356817 | 22,87028599 | 8642,933 | 12493,69 | 21136,61858 |
| 79 | 1,378810109 | 20,98898949 | 7931,97 | 12538,13 | 20470,09993 |
| 80 | 1,396263402 | 19,10129954 | 7218,592 | 12578,75 | 19797,34589 |
| 81 | 1,413716694 | 17,20779115 | 6503,014 | 12615,55 | 19118,56138 |
| 82 | 1,431169987 | 15,30904111 | 5785,455 | 12648,5 | 18433,95318 |
| 83 | 1,448623279 | 13,40562777 | 5066,134 | 12677,6 | 17743,72982 |
| 84 | 1,466076572 | 11,49813096 | 4345,27 | 12702,83 | 17048,10154 |
| 85 | 1,483529864 | 9,587131702 | 3623,083 | 12724,2 | 16347,28025 |
| 86 | 1,500983157 | 7,673212112 | 2899,791 | 12741,69 | 15641,47941 |
| 87 | 1,518436449 | 5,756955187 | 2175,617 | 12755,3 | 14930,91403 |
| 88 | 1,535889742 | 3,838944637 | 1450,779 | 12765,02 | 14215,80055 |
| 89 | 1,553343034 | 1,919764708 | 725,5002 | 12770,86 | 13496,3568 |
| 90 | 1,570796327 | 6,73832E-15 | 2,55E-12 | 12772,8 | 12772,80193 |




Εικόνα 5.4. Διάγραμμα Πιέσεων στο Ημισφαίριο ανά μια μοίρα

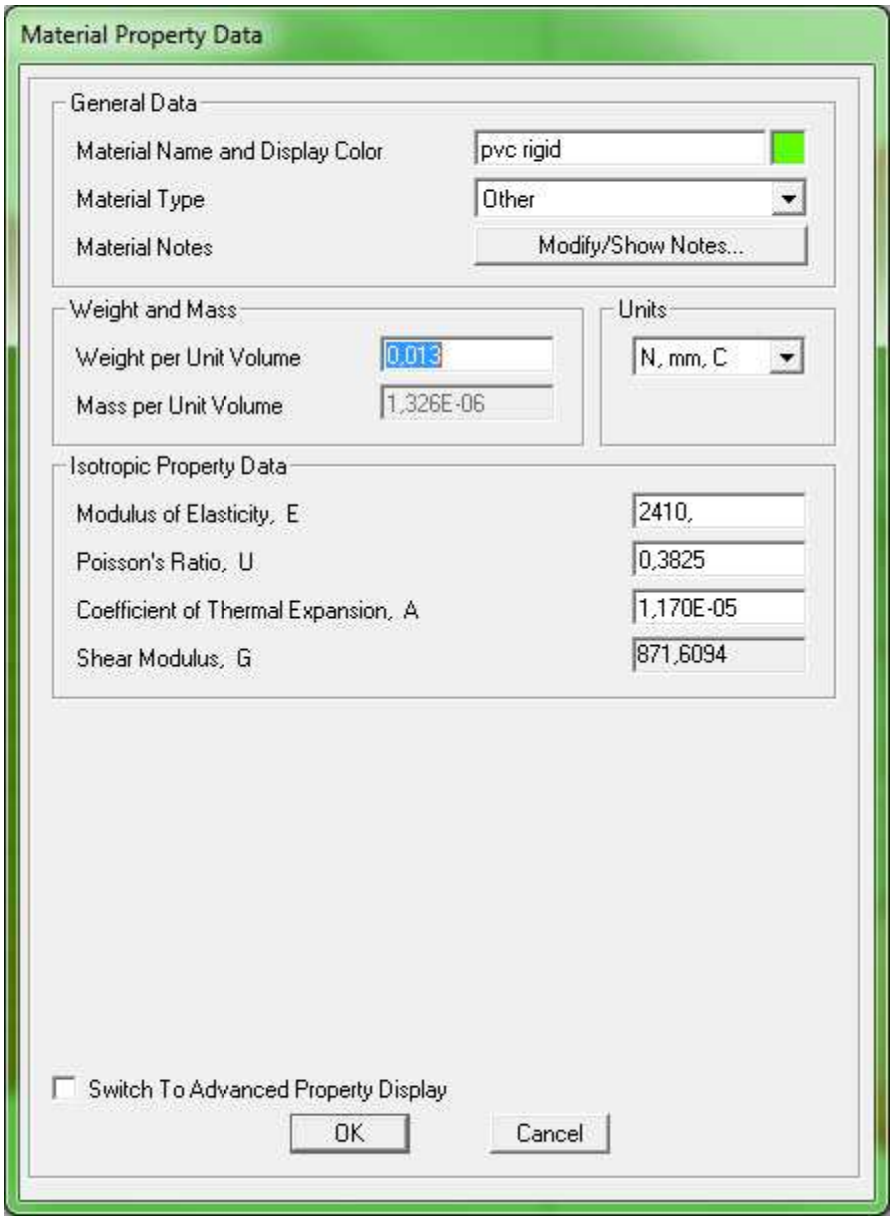



**Εικόνα 5.5.** Φόρτιση καθ' ύψος του ημισφαιρίου

Με βάση την τμηματοποίηση που έγινε, έχουμε την ακόλουθη κατανομή πιέσεων καθ' ύψος. Ο παρακάτω πίνακας είναι για τις πιέσεις που δημιουργούνται από υλικό με ΔΗ = 10,7 m

| | Angle | | Zone Height | | | Total Pressure |
|---|---|---|---|---|---|---|
| θ (rad) | θ (o) | cos θ | H (m) | R (m) | R (mm) | P (N/m^2) |
| 0 | 0 | 0 | 0,0000 | 0,11000 | 110,00 | 12773 |
| 0,022224052 | 1,27334436 | 0,022222222 | 0,0024 | 0,10997 | 109,97 | 13693 |
| 0,044459089 | 2,54731818 | 0,044444444 | 0,0049 | 0,10989 | 109,89 | 14608 |
| 0,066716148 | 3,82255373 | 0,066666667 | 0,0073 | 0,10976 | 109,76 | 15516 |
| 0,089006362 | 5,09968891 | 0,088888889 | 0,0098 | 0,10956 | 109,56 | 16417 |
| 0,111341014 | 6,37937021 | 0,111111111 | 0,0122 | 0,10932 | 109,32 | 17313 |
| 0,133731589 | 7,66225566 | 0,133333333 | 0,0147 | 0,10902 | 109,02 | 18201 |
| 0,15618983 | 8,94901807 | 0,155555556 | 0,0171 | 0,10866 | 108,66 | 19084 |
| 0,178727795 | 10,2403483 | 0,177777778 | 0,0196 | 0,10825 | 108,25 | 19960 |
| 0,201357921 | 11,536959 | 0,2 | 0,0220 | 0,10778 | 107,78 | 20829 |
| 0,224093092 | 12,8395884 | 0,222222222 | 0,0244 | 0,10725 | 107,25 | 21691 |
| 0,246946715 | 14,1490045 | 0,244444444 | 0,0269 | 0,10666 | 106,66 | 22547 |
| 0,269932796 | 15,46601 | 0,266666667 | 0,0293 | 0,10602 | 106,02 | 23396 |
| 0,293066038 | 16,7914471 | 0,288888889 | 0,0318 | 0,10531 | 105,31 | 24237 |
| 0,31636194 | 18,126204 | 0,311111111 | 0,0342 | 0,10454 | 104,54 | 25072 |
| 0,339836909 | 19,4712206 | 0,333333333 | 0,0367 | 0,10371 | 103,71 | 25899 |
| 0,363508396 | 20,8274969 | 0,355555556 | 0,0391 | 0,10281 | 102,81 | 26719 |
| 0,387395041 | 22,1961009 | 0,377777778 | 0,0416 | 0,10185 | 101,85 | 27531 |
| 0,411516846 | 23,5781785 | 0,4 | 0,0440 | 0,10082 | 100,82 | 28335 |
| 0,435895376 | 24,9749654 | 0,422222222 | 0,0464 | 0,09971 | 99,71 | 29130 |
| 0,460553992 | 26,3878 | 0,444444444 | 0,0489 | 0,09854 | 98,54 | 29918 |
| 0,485518122 | 27,8181393 | 0,466666667 | 0,0513 | 0,09729 | 97,29 | 30696 |
| 0,510815593 | 29,2675776 | 0,488888889 | 0,0538 | 0,09596 | 95,96 | 31466 |
| 0,536477013 | 30,7378687 | 0,511111111 | 0,0562 | 0,09455 | 94,55 | 32225 |
| 0,562536245 | 32,2309526 | 0,533333333 | 0,0587 | 0,09305 | 93,05 | 32975 |
| 0,58903097 | 33,7489886 | 0,555555556 | 0,0611 | 0,09146 | 91,46 | 33715 |
| 0,616003395 | 35,2943947 | 0,577777778 | 0,0636 | 0,08978 | 89,78 | 34443 |
| 0,643501109 | 36,8698976 | 0,6 | 0,0660 | 0,08800 | 88,00 | 35160 |
| 0,671578177 | 38,4785951 | 0,622222222 | 0,0684 | 0,08611 | 86,11 | 35865 |
| 0,700296513 | 40,1240346 | 0,644444444 | 0,0709 | 0,08411 | 84,11 | 36556 |
| 0,729727656 | 41,8103149 | 0,666666667 | 0,0733 | 0,08199 | 81,99 | 37234 |
| 0,759955086 | 43,542219 | 0,688888889 | 0,0758 | 0,07974 | 79,74 | 37896 |
| 0,791077298 | 45,3253904 | 0,711111111 | 0,0782 | 0,07734 | 77,34 | 38541 |
| 0,823211977 | 47,1665719 | 0,733333333 | 0,0807 | 0,07479 | 74,79 | 39169 |
| 0,856501772 | 49,0739367 | 0,755555556 | 0,0831 | 0,07206 | 72,06 | 39776 |
| 0,891122508 | 51,0575587 | 0,777777778 | 0,0856 | 0,06914 | 69,14 | 40361 |
| 0,927295218 | 53,1301024 | 0,8 | 0,0880 | 0,06600 | 66,00 | 40920 |
| 0,965304424 | 55,3078694 | 0,822222222 | 0,0904 | 0,06261 | 62,61 | 41450 |
| 1,005527143 | 57,6124615 | 0,844444444 | 0,0929 | 0,05892 | 58,92 | 41945 |
| 1,048481505 | 60,0735651 | 0,866666667 | 0,0953 | 0,05488 | 54,88 | 42400 |
| 1,094914077 | 62,7339555 | 0,888888889 | 0,0978 | 0,05039 | 50,39 | 42803 |
| 1,145971899 | 65,6593533 | 0,911111111 | 0,1002 | 0,04534 | 45,34 | 43140 |
| 1,203588306 | 68,9605302 | 0,933333333 | 0,1027 | 0,03949 | 39,49 | 43384 |
| 1,271538508 | 72,85379 | 0,955555556 | 0,1051 | 0,03243 | 32,43 | 43488 |
| 1,359585446 | 77,898508 | 0,977777778 | 0,1076 | 0,02306 | 23,06 | 43324 |
| 1,570796306 | 90 | 1 | 0,1100 | 0,00000 | 0,00 | 41570 |

Τα χαρακτηριστικά του PVC rigid που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση είναι.




Εικόνα 5.6. Εικόνα ιδιοτήτων υλικού του ημισφαιρίου

Τα αποτελέσματα της φόρτιση με το σιλό σε πληρότητα, δηλαδή με ΔΗ = 10,7 m , φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Μέγιστες τάσεις**

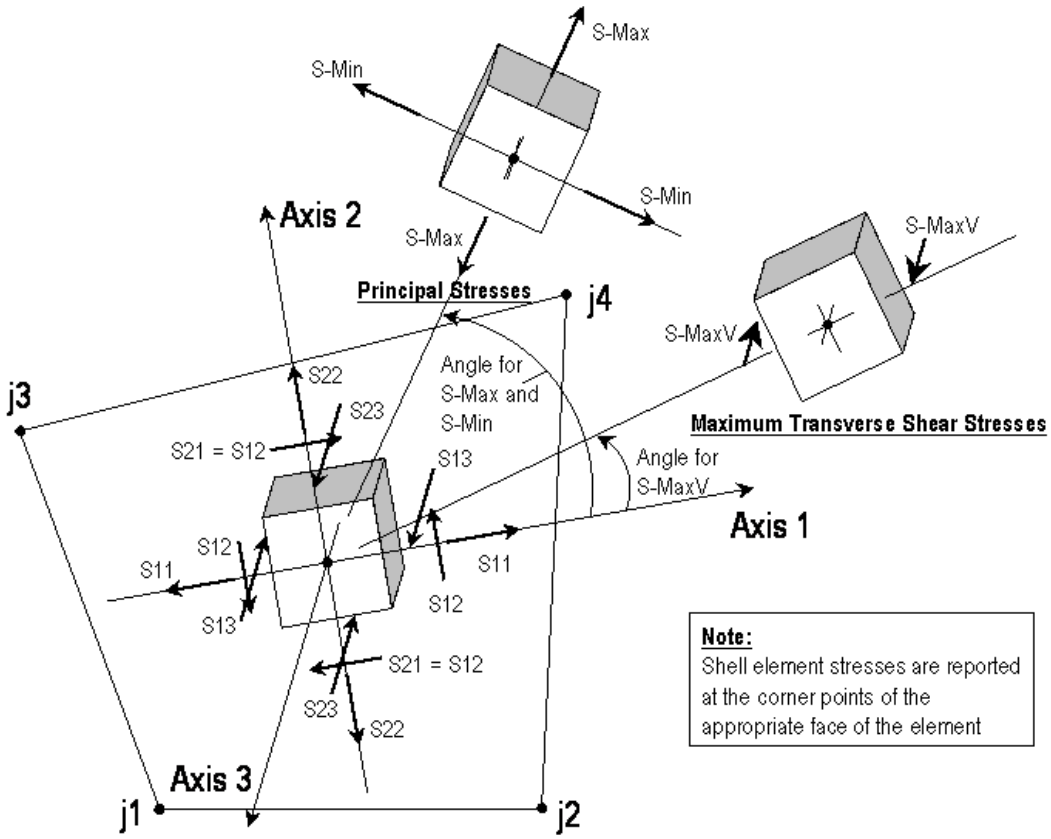
| TABLE: Element Stresses - Area Shells | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Area** | **AreaElem** | **ShellType** | **Joint** | **OutputCase** | **CaseType** | **S11Top** | **S22Top** | **S12Top** | **SMaxTop** | **SMinTop** | **SAngleTop** |
| Text | Text | Text | Text | Text | Text | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | Degrees |
| 1104 | 1104 | Shell-Thin | 1092 | DEAD | LinStatic | -3,087 | -3,032 | 0,007737 | -3,031 | -3,088 | 82,131 |

| TABLE: Element Stresses - Area Shells | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **SVMTop** | **S11Bot** | **S22Bot** | **S12Bot** | **SMaxBot** | **SMinBot** | **SAngleBot** | **SVMBot** | **S13Avg** | **S23Avg** | **SMaxAvg** | **SAngleAvg** |
| N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | Degrees | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | N/mm2 | Degrees |
| 3,06 | -2,914 | -2,982 | -0,00869 | -2,913 | -2,983 | -7,197 | 2,949 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**Βύθιση στη κορυφή του ημισφαιρίου**

| TABLE: Joint Displacements | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Joint** | **OutputCase** | **CaseType** | **U1** | **U2** | **U3** | **R1** | **R2** | **R3** |
| Text | Text | Text | mm | mm | mm | Radians | Radians | Radians |
| 1095 | DEAD | LinStatic | -2E-12 | -6,4E-12 | -0,21346 | 2,99E-12 | -3,5E-13 | -4,4E-10 |

Στην παρακάτω εικόνα εξηγούνται οι μεταβλητές που φαίνονται στον πίνακα με τις μέγιστες τάσεις από το πρόγραμμα SAP2000.

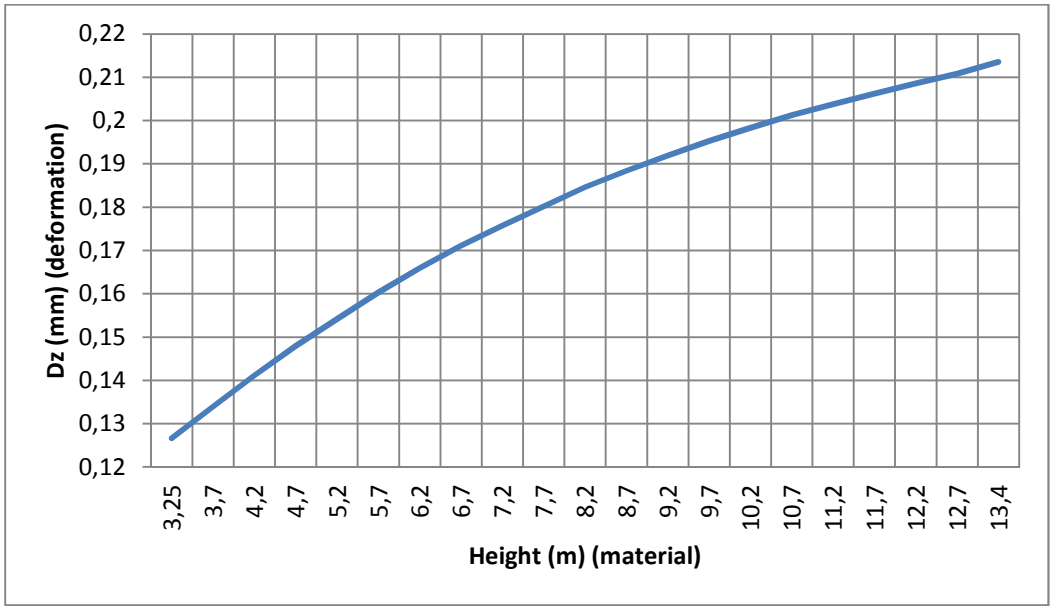



Εικόνα 5.7. Διευθύνσεις τάσεων στο SAP2000

Η προσομοίωση του μοντέλου στο SAP2000 συνεχίστηκε καθ ύψος του σιλό, τοποθετώντας τις νέες πιέσεις για κάθε στάθμη στο πρόγραμμα, ώστε να βρούμε την παραμόρφωση στην κορυφή του ημισφαιρίου σε σχέση με το ποσοστό πληρότητας του σιλό.

| Height - z (m) | Height (m) (material) | Dz (mm) (deformation) |
|---|---|---|
| 10,7 | 13,4 | 0,2135 |
| 10 | 12,7 | 0,2108 |
| 9,5 | 12,2 | 0,2086 |
| 9 | 11,7 | 0,2062 |
| 8,5 | 11,2 | 0,2038 |
| 8 | 10,7 | 0,2013 |
| 7,5 | 10,2 | 0,1983 |
| 7 | 9,7 | 0,1953 |
| 6,5 | 9,2 | 0,1919 |
| 6 | 8,7 | 0,1884 |
| 5,5 | 8,2 | 0,1846 |
| 5 | 7,7 | 0,1802 |
| 4,5 | 7,2 | 0,1758 |
| 4 | 6,7 | 0,1711 |
| 3,5 | 6,2 | 0,1659 |
| 3 | 5,7 | 0,1603 |
| 2,5 | 5,2 | 0,1542 |
| 2 | 4,7 | 0,1480 |
| 1,5 | 4,2 | 0,1412 |
| 1 | 3,7 | 0,1339 |
| 0,55 | 3,25 | 0,1266 |

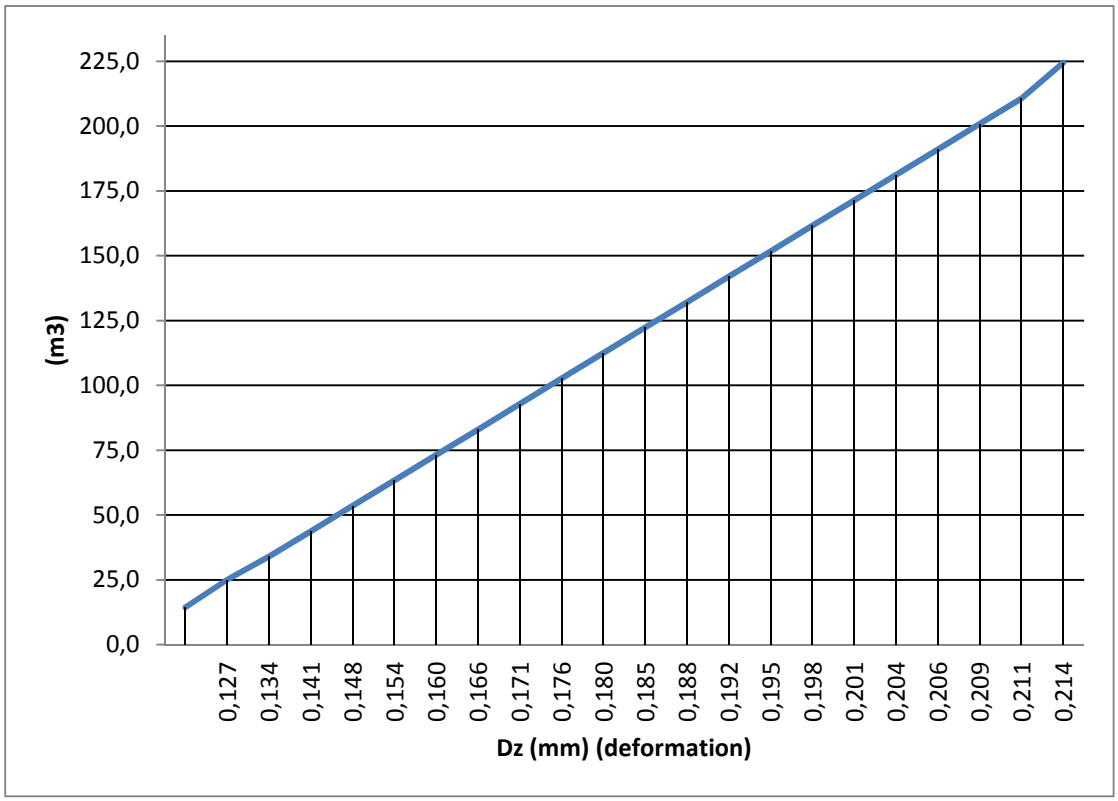
| Heigh - z (m) | Height (m) (material) | Dz (mm) (deformation) | |
|---|---|---|---|
| 10,1 | 12,8 | 0,2116 | 0,0008 |
| 10 | 12,7 | 0,2108 | |
| 9,9 | 12,6 | 0,2104 | 0,0004 |
| 8,1 | 10,8 | 0,2018 | 0,0005 |
| 8 | 10,7 | 0,2013 | |
| 7,9 | 10,6 | 0,2005 | 0,0008 |
| 6,1 | 8,8 | 0,1891 | 0,0007 |
| 6 | 8,7 | 0,1884 | |
| 5,9 | 8,6 | 0,1875 | 0,0009 |
| 4,1 | 6,8 | 0,1720 | 0,0009 |
| 4 | 6,7 | 0,1711 | |
| 3,9 | 6,6 | 0,1701 | 0,001 |
| 2,1 | 4,8 | 0,1493 | 0,0013 |
| 2 | 4,7 | 0,1480 | |
| 1,9 | 4,6 | 0,1468 | 0,0012 |




Εικόνα 5.8. Καμπύλη βαθμονόμησης

Συνδέοντας τις παραμορφώσεις που λάβαμε για δεδομένη πίεση, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας που συνδέει τις παραμορφώσεις που θα εμφανίζει ο αισθητήρας με τον όγκο του υλικού που βρίσκεται στο σιλό.
Επίσης, από τον αρχικό υπολογιστικό φύλλο, ανάλογα το υλικό που θα επιλέξουμε προκύπτει, με την γνώση του ειδικού του βάρους, το συνολικό βάρος του υλικού που βρίσκεται στο σιλό.

| | | | | Πάνω από το hopper | | **Ολόκληρο το σιλό** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Height - z (m)** | **Height (m) (material)** | **Dz (mm) (deformation)** | **P (N/m^2** | **($m^3$)** | **(kg)** | **($m^3$)** | **(kg)** |
| 10,700 | 13,400 | 0,214 | 41570,21 | 210,1 | 163873,3 | 224,4 | 175038,2 |
| 10,000 | 12,700 | 0,211 | 40376,14 | 196,3 | 153152,6 | 210,7 | 164317,5 |
| 9,500 | 12,200 | 0,209 | 39445,88 | 186,5 | 145495,0 | 200,8 | 156659,8 |
| 9,000 | 11,700 | 0,206 | 38445,67 | 176,7 | 137837,4 | 191,0 | 149002,2 |
| 8,500 | 11,200 | 0,204 | 37370,23 | 166,9 | 130179,7 | 181,2 | 141344,6 |
| 8,000 | 10,700 | 0,201 | 36213,91 | 157,1 | 122522,1 | 171,4 | 133686,9 |
| 7,500 | 10,200 | 0,198 | 34970,63 | 147,3 | 114864,5 | 161,6 | 126029,3 |
| 7,000 | 9,700 | 0,195 | 33633,84 | 137,4 | 107206,8 | 151,8 | 118371,7 |
| 6,500 | 9,200 | 0,192 | 32196,52 | 127,6 | 99549,2 | 141,9 | 110714,0 |
| 6,000 | 8,700 | 0,188 | 30651,10 | 117,8 | 91891,6 | 132,1 | 103056,4 |
| 5,500 | 8,200 | 0,185 | 28989,46 | 108,0 | 84234,0 | 122,3 | 95398,8 |
| 5,000 | 7,700 | 0,180 | 27202,85 | 98,2 | 76576,3 | 112,5 | 87741,1 |
| 4,500 | 7,200 | 0,176 | 25281,87 | 88,4 | 68918,7 | 102,7 | 80083,5 |
| 4,000 | 6,700 | 0,171 | 23216,42 | 78,5 | 61261,1 | 92,9 | 72425,9 |
| 3,500 | 6,200 | 0,166 | 20995,64 | 68,7 | 53603,4 | 83,0 | 64768,3 |
| 3,000 | 5,700 | 0,160 | 18607,84 | 58,9 | 45945,8 | 73,2 | 57110,6 |
| 2,500 | 5,200 | 0,154 | 16040,46 | 49,1 | 38288,2 | 63,4 | 49453,0 |
| 2,000 | 4,700 | 0,148 | 13280,00 | 39,3 | 30630,5 | 53,6 | 41795,4 |
| 1,500 | 4,200 | 0,141 | 10311,93 | 29,5 | 22972,9 | 43,8 | 34137,7 |
| 1,000 | 3,700 | 0,134 | 7120,64 | 19,6 | 15315,3 | 33,9 | 26480,1 |
| 0,550 | 3,250 | 0,127 | 4043,78 | 10,8 | 8423,4 | 25,1 | 19588,2 |
| 0,000 | 2,700 | | 0,00 | | | 14,3 | 11164,8 |




**Εικόνα 5.10. Καμπύλη σύνδεσης παραμόρφωσης ημισφαιρίου – όγκου πλήρωσης του σιλό**

# Κεφάλαιο 6 – Πείραμα υπό κλίμακα

Για την επαλήθευση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων, θεωρήθηκε ορθό η επιβεβαίωσή τους με την κατασκευή ενός πειράματος υπό κλίμακα. Λόγω της δυσκολίας κατασκευής ακριβής αναλογίας, τα αποτελέσματα του πειράματος μας έχουν περισσότερη ποιοτική, παρά ποσοτική επαλήθευση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων.

## 6.1. Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του πειράματος περιγράφονται παρακάτω:

- Μεταλλική βάση (Παράρτημα Σχέδιο 6)
- Γλάστρα – Δοκίμιο σιλό (Παράρτημα Σχεδιο 7)
- Πλαστικό ημισφαίριο (Παράρτημα Σχεδιο 8)
    - Διάμετρος Φ46 mm
    - Πάχος t = 1,6
- Σακούλες με άμμο
    - B1 = 21,4 kg
    - B2 = 19,4 kg
    - B1 = 23,2 kg
- Βαρίδια 10 kg
- Βαρίδια 15 kg
- Βαρίδια 5 kg
- Ζυγαριά
- Σιλικόνη συγκόλλησης
- Μετρητικά συστήματα
    - Ψηφιακό Mitutoyo absolute (0,001-200mm)

**Εικόνα 6.3. Mitutoyo absolute (0,001-200mm) με τη βάση μαγνήτη**

## 6.2. Πειραματική Διαδικασία

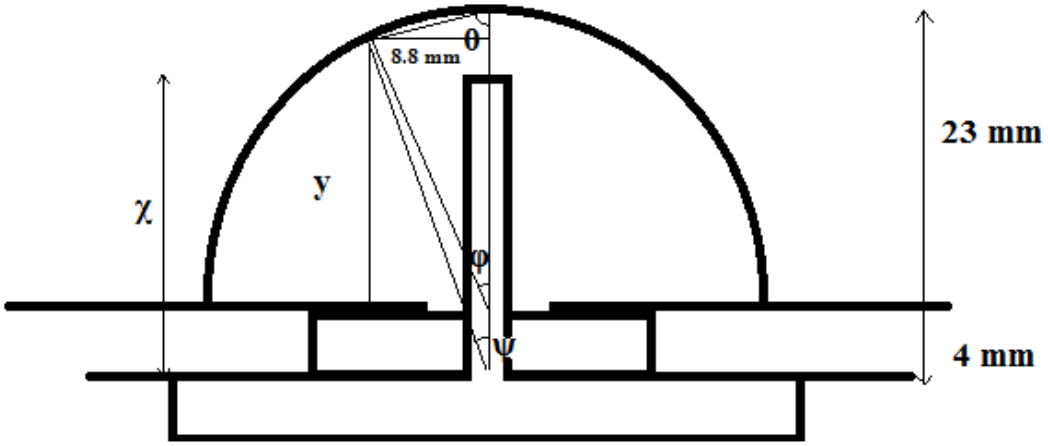
### 6.2.1. Κατασκευή πειράματος

- Δημιουργία οπής στο κέντρο του πάτου του πειραματικού σιλό
    - Επιφανειακή οπή με τρυπάνι Φ8
    - Εύρεση με την μέθοδο των αποστάσεων του ακριβούς κέντρου του πάτου του πειραματικού σιλό
    - Ολοκλήρωση της οπής με τρυπάνι Φ10
    - Διεύρυνση της οπής με λίμα ώστε να αποκτήσει διάμετρο 2,5 mm

- Με πλακίδια και την κόλλα συγκόλλησης κλείστηκαν κάποιες προϋπάρχουσες οπές στον πάτο του πειραματικού σιλό
- Συγκόλληση του ημισφαιρικού δοκιμίου στο κέντρο του πάτου του πειραματικού σιλό

### 6.2.2. Δοκιμή με βάρη χωρίς την μετρητική συσκευή

Για την ασφάλεια της μετρητικής συσκευής θεωρήθηκε ορθό να γίνει ένα πείραμα με την κατασκευή ενός αποστάτη, ο οποίος είχε στην κορυφή του σημαδευτικό μαύρο χρώμα για να δούμε αν τελικά λόγω παραμόρφωσης έχουμε επαφή.




Εικόνα 6.4. Σχεδιάγραμμα αυτοσχέδιου αποστάτη

| Δοκιμή | X (mm) | Φορτίο (kg) | Αποτέλεσμα |
|---|---|---|---|
| 1 | 22,8 | 20 | - |
| 2 | 25,5 | 40 | - |
| 3 | | 60 | - |
| 4 | | 70 | - |
| 5 | | 80 | Ακούμπησε |

Λόγω της πιθανότητας σφάλματος από την έκκεντρη τοποθέτηση του αποστάτη, 8,8 mm, έγινε την παρακάτω τριγωνομετρική ανάλυση:

$$\varphi = \frac{\text{atan}\,(8{,}8)}{23} = 22{,}5^{o} \qquad (6.1)$$

$$y = \tan(90-\varphi)*8{,}8 = 21{,}2 \text{ mm} \qquad (6.2)$$

$$\chi' = y + 4 \text{ mm} = 25{,}2 \text{ mm} \qquad (6.3)$$

Στο έκκεντρο αυτό σημείο $\chi = \sqrt{(8{,}8^2 + 25{,}2^2)} = 26{,}7$ mm

Οπότε το ακούμπησε λόγω της λανθασμένης έκκεντρης τοποθέτησής του.

### 6.2.3. Τοποθέτηση μετρητικής συσκευής

- Αδειάστηκε το πειραματικό σιλό από τα φορτία πλήρως
- Σημαδεύτηκε η περιφέρεια του στο τραπέζι
- Τοποθετήθηκε το μετρητικό ώστε να είναι κάθετα τοποθετημένο στο ημισφαίριο.

### 6.2.4. Φορτίσεις με βάρη για την εύρεση της παραμόρφωσης

Ο τρόπος εργασίας ήταν σταδιακά να βρούμε μεμονωμένα τις παραμορφώσεις του τραπεζιού, της γλάστρας και του συνολικού συστήματος. Σε κάθε από τις τρεις παραπάνω δοκιμές ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε διαφορετική θέση ώστε η προέκτασή του να είναι κάθετη στο τραπέζι, στο σιλό και στην εσωτερική του ημισφαιρίου αντίστοιχα. Η τοποθέτηση των φορτίων γίνεται με την μέθοδο της τοποθέτησης με μηδενικό φορτίο κρούσης. Η τιμή της παραμόρφωσης του ημισφαιρικού δοκιμίου θα υπολογιστεί από την διαφορά των παραπάνω τιμών στην μέγιστη φόρτιση που θα κάνουμε:

$$Def_{δοκιμίου} = Def_{συστήματος} – Def_{βάσης} – Def_{π.σιλό} \quad (6.4)$$

όπου Def: Παραμόρφωση

**1ο Πείραμα – Παραμόρφωση στη βάση**

Τοποθετούμε τον αισθητήρα ώστε να ακουμπάει στην κάτω επιφάνεια της μεταλλικής βάσης, κοντά στην οπή.
Γίνεται φόρτιση ανά 10 kg στη βάση έως τα 90 kg ώστε να δούμε την παραμόρφωση της βάσης.

| 1ο Πείραμα: παραμόρφωση στη βάση | |
|---|---|
| Φόρτιση (kg) | Μετατόπιση (mm) |
| 90 | 0,35 |
| offset | 0 |

**2ο Πείραμα – Παραμόρφωση σε όλο το σύστημα**

Τοποθετούμε τον αισθητήρα ώστε να ακουμπάει εσωτερικά στην κορυφή του ημικυκλικού δοκιμίου. Γίνεται φόρτιση ανά 10 kg. Το αρχικό offset του αισθητήρα είναι 0,357 mm.
Η φόρτιση σταματάει στα 110 kg, λόγω της μεγάλης (αλλά δικαιολογημένης) παραμόρφωσης που εμφανίστηκε.

| 2ο Πείραμα: παραμόρφωση του όλου το συστήματος | | |
|---|---|---|
| Φόρτιση (kg) | Μέτρηση (mm) | Μετατόπιση (mm) |
| 60 | 7,250 | 6,893 |
| 90 | 8,350 | 7,993 |
| 100 | 8,720 | 8,363 |
| 110 | 9,120 | 8,763 |
| offset | 0,357 | |

**3ο Πείραμα – Παραμόρφωση πειραματικού σιλό**

Απομακρύνονται τα φορτία, όπως επίσης αδειάζουμε την γλάστρα. Το δοκίμιο δεν έχει υποστεί κάποια παραμόρφωση.
Φορτίζουμε τη γλάστρα με το βάρος μας, χωρίς να έχουμε προσθέσει τα φορτία (χώμα και βαρίδια), ώστε να πετύχουμε την βάση του πειραματικού σιλό, η οποία λόγω του σχήματος των στηρίξεών της απέχει από την βάση. Αυτός ήταν και ο λόγος της μεγάλης παραμόρφωσης που μετρήσαμε προηγουμένως.

| 3ο Πείραμα: παραμόρφωση πειραματικού σιλό | |
|---|---|
| Φόρτιση (kg) | Μετατόπιση (mm) |
| 120 | 10,500 |
| 150 | 10,770 |

**4$^{ο}$ Πείραμα – Παραμόρφωση σε όλο το σύστημα**

Θέτουμε ως offset 10,77, δηλαδή την τιμή της παραμόρφωσης από το προηγούμενο πείραμα, ώστε να εξαλειφθεί η παραμόρφωση του πάτου του πειραματικού σιλό. Τοποθετούμε τον αισθητήρα ώστε να ακουμπάει εσωτερικά στην κορυφή του ημικυκλικού δοκιμίου. Επανατοποθετούμε τα φορτία (χώμα και βαρίδια) σταδιακά.

| 4ο Πείραμα: παραμόρφωση συστήματος | | |
|---|---|---|
| Φόρτιση (kg) | Μέτρηση (mm) | Μετατόπιση (mm) |
| 150 | 10,770 | 0,000 |
| 165 | 10,910 | 0,140 |
| 180 | 11,072 | 0,302 |
| 185 | 11,090 | 0,320 |
| 190 | 11,120 | 0,350 |
| offset | 10,77 | |

Τελικά, όντως η παραμόρφωση του συστήματος ξεκινάει από φόρτιση μεγαλύτερη των 150 kg που εφαρμόστηκαν στο προηγούμενο πείραμα.

**5$^{ο}$ Πείραμα – Παραμόρφωση στη βάση**

Απομακρύνουμε όλα τα φορτία. Επανατοποθετούμε τον αισθητήρα ώστε να ακουμπάει στην κάτω επιφάνεια της μεταλλικής βάσης, κοντά στην οπή, και τα φορτία (χώμα και βαρίδια) σταδιακά.

| 5ο Πείραμα: παραμόρφωση στη βάση | | |
|---|---|---|
| Φόρτιση (kg) | Μέτρηση (mm) | Μετατόπιση (mm) |
| 190 | 7,437 | 0,718 |
| 240 | 7,562 | 0,843 |
| offset | 6,719 | |

**6$^{ο}$ Πείραμα – Παραμόρφωση στη βάση**

Επαναλαμβάνουμε το προηγούμενο πείραμα για να εξαλείψουμε την πιθανότητα σφάλματος λόγω κρούσεων. Οι τιμές που θα λάβουμε υπόψη είναι μετά τα 150 kg, έως την οποία σταματούσε η παραμόρφωση της βάσης. Απομακρύνουμε όλα τα φορτία. Επανατοποθετούμε τον αισθητήρα ώστε να ακουμπάει στην κάτω επιφάνεια της μεταλλικής βάσης, κοντά στην οπή, και τα φορτία (χώμα και βαρίδια) σταδιακά.

| 6ο Πείραμα: παραμόρφωση στη βάση | | |
|---|---|---|
| Φόρτιση (kg) | Μέτρηση (mm) | Μετατόπιση (mm) |
| 60 | 7,022 | 0,303 |
| 70 | 7,038 | 0,319 |
| 80 | 7,077 | 0,358 |
| 90 | 7,114 | 0,395 |
| 100 | 7,150 | 0,431 |
| 110 | 7,184 | 0,465 |
| 120 | 7,225 | 0,506 |
| 130 | 7,262 | 0,543 |
| 140 | 7,297 | 0,578 |
| 150 | 7,342 | 0,623 |
| 160 | 7,372 | 0,653 |
| 165 | 7,356 | 0,637 |
| 190 | 7,437 | 0,718 |
| 240 | 7,562 | 0,843 |
| offset | 6,719 | |

**Τελικά αποτελέσματα**

Οι τιμές που θα λάβουμε υπόψη είναι μετά τα 150 kg, έως την οποία σταματούσε η παραμόρφωση της βάσης.

| Τελικός Πίνακας | | | |
|---|---|---|---|
| Φόρτιση (kg) | Μετατόπιση (mm) | | παραμόρφωση ημισφαίριου |
| | παραμόρφωση στη βάση | παραμόρφωση συστήματος | |
| 160 | 0,030 | 0,100 | 0,070 |
| 165 | 0,014 | 0,140 | 0,126 |
| 190 | 0,095 | 0,350 | 0,255 |

### 6.2.5. Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών αποτελεσμάτων

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αναλύονται οι μέθοδοι στα στοιχεία που πρέπει να λάβουμε υπόψη για να δημιουργήσουμε τις αναλογίες σύγκρισης.

Χρησιμοποιούμε τύπο πίεσης λυγισμού ημισφαιρικού κελύφους του R.Zoelly και A.Van der Neut [22] , ώστε να μπορέσουμε να συσχετίσουμε τις αναλογίες που δημιουργούνται λόγο ακτίνας και πάχους των ημισφαιρίων

$$P_{cr} = \frac{2*E}{m^2*\sqrt{3*(1-v^2)}} \qquad (6.5)$$

Όπου E: Μέτρο ελαστικότητας , ν: λόγος Poisson , m: λόγος ακτίνας/πάχος (R/t)

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνολικά τα δεδομένα της αναλυτικής λύσης και αυτά της πειραματικής.

| | **Σιλό** | **Πειραματικό σιλό** | **Ημισφαίριο** | **Ημισφαιρικό δοκίμιο** |
|---|---|---|---|---|
| **D (m)** | 5,0000 | 0,5000 | 0,2200 | 0,0460 |
| **H (m)** | 11,0000 | 0,4900 | | |
| **t (m)** | | | 0,0010 | 0,0016 |
| **E ($m^2$)** | 19,6250 | 0,1963 | | |
| **P ($N/m^2$)** | 41570 | 4512 | 237553 | 13910106 |
| **F (N)** | 815811 | 1900 | | |
| **m** | | | 110 | 14,3750 |
| **F (kg)** | 81581 | 190 | | |
| **ν'** | 0,0100 | | 58,5558 | |
| **Freal** | 175038 | | | |
| **ν** | 0,3825 | | | |
| **E (N/m2)** | 2300000000 | | | |

Οι αναλογίες που δημιουργούνται:

- **$v_1$**: Σχέση της πίεσης του σιλό με την πίεση στο πειραματικό σιλό στο ύψος του αισθητήρα
- **$v_2$** : Σχέση πίεσης λυγισμού του ημισφαίριο και της πίεση που δέχεται λόγω της φόρτισης στο σιλό
- **$v_3$** : Σχέση πίεσης λυγισμού του ημισφαιρίου και της πίεσης λυγισμού του ημισφαιρικού δοκιμίου
- **$v_4$** : Σχέση πραγματικού φορτίου στο σιλό ( Freal) με το φορτίου που προκύπτει από τον τύπου πίεσης του Janssen λόγω του κοκκώδους υλικού (που χρησιμοποιείται για την εύρεση της πίεσης στο δοκίμιο)

Συνολικά:

$$v_1 = \frac{\mathrm{P}\sigma\iota\lambda\acute{o}}{\mathrm{P}\pi.\sigma\iota\lambda\acute{o}} \qquad (6.6)$$

$$v_2 = \frac{\mathrm{P}cr\,\eta\mu\iota\sigma\varphi}{\mathrm{P}\sigma\iota\lambda\acute{o}} \qquad (6.7)$$

$$v_3 = \frac{\mathrm{P}cr\,\delta o\kappa}{\mathrm{P}cr\,\eta\mu\iota\sigma\varphi} \qquad (6.8)$$

$$v_4 = \frac{F\,\kappa o\kappa\kappa\acute{\omega}\delta\eta}{Freal} \qquad (6.9)$$

| Αναλογίες | |
|---|---|
| v1 | 9,213 |
| v2 | 5,715 |
| v3 | 58,556 |
| v4 | 2,146 |
| | |
| v | 1,112 |

Άρα $$v_4 = \frac{\mathrm{P}real\,\pi.\sigma\iota\lambda o}{\mathrm{P}\pi.\sigma\iota\lambda o} \qquad (6.7)$$

Οπότε έχουμε:

$$def_{\delta o\kappa} = \frac{v_3}{v_1 \bullet v_2} \bullet def_{\eta\mu\iota\sigma\varphi} = 0,238mm$$

| Αποτελέσματα παραμορφώσεων | |
|---|---|
| def ημισφ (mm) | 0,214 |
| def δοκ (mm) | 0,238 |

Από το πείραμα για την φόρτιση 190 kg είχαμε παραμόρφωση **0,255 mm**, που είναι κοντά στην αναμενόμενη τιμή **0,238 mm**.

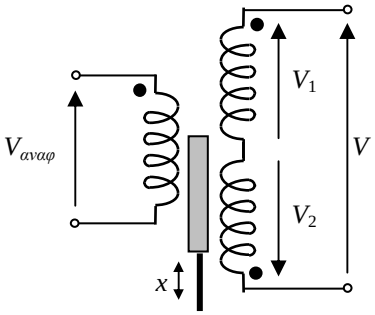
Επομένως, η πειραματική μας διαδικασία επαληθεύει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αναλυτική.

# Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα – Επιλογή αισθητήρα LVDT

## 7.1. Περιγραφή αισθητήρα LVDT

Ο αισθητήρας που επιλέξαμε αφορά μέτρηση μετατόπισης / θέσης. Χρησιμοποιεί τις αρχή Linear Variable Differential Transformer (LVDT), η οποία σημαίνει ότι είναι πιθανώς ο περισσότερος στιβαρός και αξιόπιστος αισθητήρας θέσης που υπάρχει. Το πλεονέκτημα της αρχής λειτουργίας του LVDT αισθητήρα είναι ότι δεν υπάρχει ηλεκτρική επαφή στη διάταξη του αισθητήρα θέσης και του στοιχείου, το οποίο σημαίνει για τον χρήστη καθαρά αποτελέσματα, μεγάλη ανάλυση και διάρκεια ζωής.

Οι επαγωγικοί αισθητήρες μετατόπισης στηρίζονται σε ένα μετασχηματιστή, του οποίου ο πυρήνας σιδήρου συνδέεται στο εξεταζόμενο αντικείμενο. Όταν μετατοπίζεται το αντικείμενο, μετατοπίζεται και ο πυρήνας. Το δευτερεύον του μετασχηματιστή αποτελείται από δύο ίδια πηνία, συνδεδεμένα σε σειρά, τα οποία ευρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη με το πρωτεύον πηνίο του μετασχηματιστή με τη βοήθεια του πυρήνα σιδήρου. Εάν μετατοπιστεί ο πυρήνας προς μία κατεύθυνση, θα εισέλθει περισσότερο στο ένα δευτερεύον πηνίο και επακόλουθα θα αυξηθεί η σύζευξή του με αυτό, με αποτέλεσμα το πηνίο αυτό να εμφανίσει αυξημένη τάση στα άκρα του. Ταυτόχρονα ο πυρήνας απομακρύνεται από το άλλο δευτερεύον πηνίο, με αποτέλεσμα αυτό να εμφανίσει μειωμένη τάση στα άκρα του. Η διαφορά των δύο τάσεων αποτελεί την τάση εξόδου και έχει πλάτος και διαφορά φάσης που είναι ανάλογα της μετατόπισης του πυρήνα σιδήρου (η διαφορά φάσης υπολογίζεται ως προς το εναλλασόμενο σήμα που εφαρμόζουμε στο πρωτεύον πηνίο, το οποίο αποτελεί σήμα αναφοράς). Το πρόσημο της διαφοράς φάσης δεικνύει την κατεύθυνση της μετατόπισης. Η γενική μορφή των σημάτων αναφοράς (στο πρωτεύον) και εξόδου είναι:




Εικόνα 3.4. Γενική μορφή ενός επαγωγικού αισθητήρα γραμμικής μετατόπισης (LVDT)

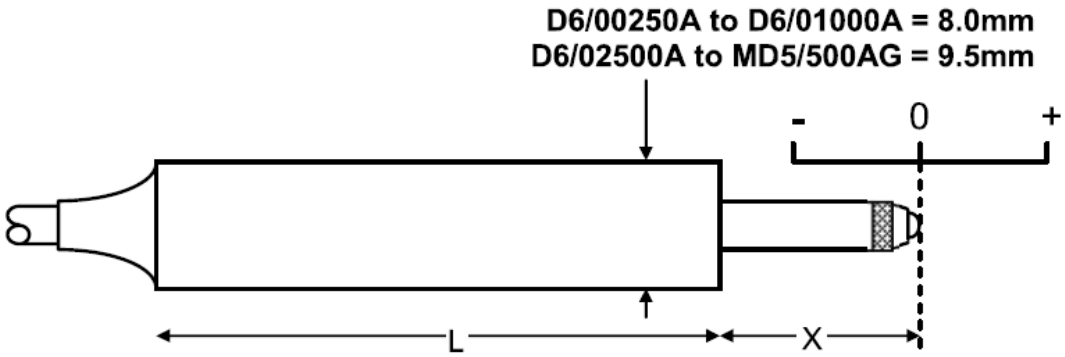
Vαναφ =VI ημ(ωt) και V = V1 – V2 = VO ημ(ωt + φ)

Ο απλούστερος τρόπος σύνδεσης των δύο δευτερευόντων πηνίων μεταξύ τους, ώστε να λαμβάνεται εύκολα η διαφορά των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτά, επιτυγχάνεται εάν αυτά έχουν αντίθετη φορά περιέλιξης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.25.

Εικόνα 3.5. Αισθητήρας LVDT της RDP

| Specification | |
|---|---|
| Excitation/supply (acceptable) | 0.5V to 7V rms, 2kHz to 10kHz (sinusoidal) |
| Excitation/supply (calibrated) | 5V rms, 5kHz (sinusoidal) |
| Output load | 100k Ohms |
| Temperature coefficient (span) | ±0.01% F.S. /°C (typical) |
| Operating temperature range | -20°C to 125°C |
| Electrical termination | 2m (integral cable) Longer available to order. |

Εικόνα 3.6. Γενικά χαρακτηριστικά αισθητήρα




Εικόνα 3.7. LVDT sensor – spring return version

Η έκδοση που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η Spring return version. Ο αισθητήρας έχει ρουλεμάν που οδηγούν το πηνίο μέσα στον αισθητήρα μέτρησης και ένα ελατήριο σπρώχνει το πηνίο στην πλήρη θέση. Αυτού του είδους τα LVDT είναι κατάλληλα όταν δεν είναι δυνατό να συνδεθεί το επαγωγικό στοιχείο του αισθητήρα με το κινούμενο στοιχείο που πρέπει να μετρήσουμε.

| Type | Range | Linearity error (% F.S.) | L | X | Total weight | Spring force at X | Spring rate | Inward over-travel | Outward over-travel | Sensitivity (nom) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| D6/00250A | ±0.25mm | <±0.5/±0.25 | 49mm | 12.2mm | 11g | 0.6N | 1.2N/cm | 0.6mm | 0.6mm | 38mV/V |

Οπότε η διέγερση για 5 Volt και ευαισθησία 38 mVolt/Volt έχω 190 mVolt. Οπότε, με γραμμικότητα 0,5 %, έχω ανάλυση 0,95 mVolt.
Από τον πίνακα ευασθησίας έχουμε

| Height (m) (material) | Dz (mm) (deformation) | | P (N/m^2 | Ολόκληρο το σιλό ($m^3$) | Ολόκληρο το σιλό (kg) | kg ανά 10 cm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12,8 | 0,2116 | 0,0008 | 40554,23 | 198,3 | 154684,2 | |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12,7 | 0,2108 | | 40376,14 | 196,3 | 153152,6 | 1531,5 |
| 12,6 | 0,2104 | 0,0004 | 40195,44 | 194,4 | 151621,1 | 1531,5 |
| 10,8 | 0,2018 | 0,0005 | 36451,93 | 159,0 | 124053,6 | |
| 10,7 | 0,2013 | | 36213,91 | 157,1 | 122522,1 | 1531,5 |
| 10,6 | 0,2005 | 0,0008 | 35972,41 | 155,1 | 120990,6 | 1531,5 |
| 8,8 | 0,1891 | 0,0007 | 30969,21 | 119,8 | 93423,1 | |
| 8,7 | 0,1884 | | 30651,10 | 117,8 | 91891,6 | 1531,5 |
| 8,6 | 0,1875 | 0,0009 | 30328,34 | 115,8 | 90360,1 | 1531,5 |
| 6,8 | 0,1720 | 0,0009 | 23641,58 | 80,5 | 62792,6 | |
| 6,7 | 0,1711 | | 23216,42 | 78,5 | 61261,1 | 1531,5 |
| 6,6 | 0,1701 | 0,001 | 22785,06 | 76,6 | 59729,5 | 1531,5 |
| 4,8 | 0,1493 | 0,0013 | 13848,22 | 41,2 | 32162,1 | |
| 4,7 | 0,1480 | | 13280,00 | 39,3 | 30630,5 | 1531,5 |
| 4,6 | 0,1468 | 0,0012 | 12703,48 | 37,3 | 29099,0 | 1531,5 |

Αυτό σημαίνει ότι το σύστημά μας μετράει 1,5 tn / min, οπότε με την απαίτηση της ροής 20 tn / hr (δηλαδή 350 kg / min) έχουμε , δυνατότητα νέων μετρήσεων κάθε 5 min.

## 7.2. Συμπεράσματα

- Επαληθεύτηκε το υπολογιστικό φύλλο των παραμορφώσεων με το πρόγραμμα Silo Express Tool
- Επαληθεύτηκαν οι παραμορφώσεις που προέκυψαν από την υπολογιστική λύση του SAP2000 με αυτές της πειραματικής διάταξης
- Ο αισθητήρας που επιλέχθηκε δίνει την δυνατότητα νέας μέτρησης στο σύστημα ανά 5min

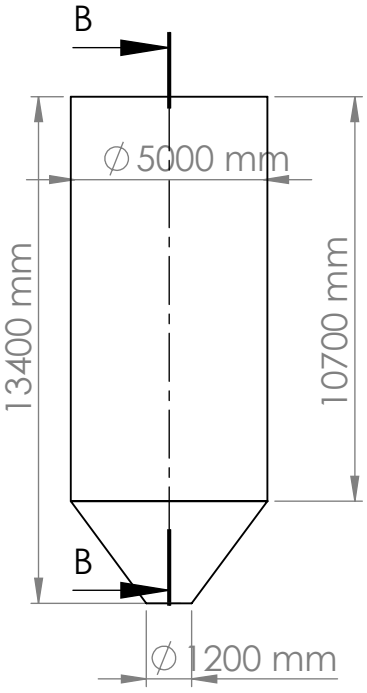
## 7.3. Προτάσεις για την ολοκλήρωση της κατασκευής του αισθητήρα

Για την ολοκλήρωση της κατασκευής του αισθητήρα πλήρωσης, θα πρέπει να πραγματοποιηθούν οι παρακάτω διαδικασίες:

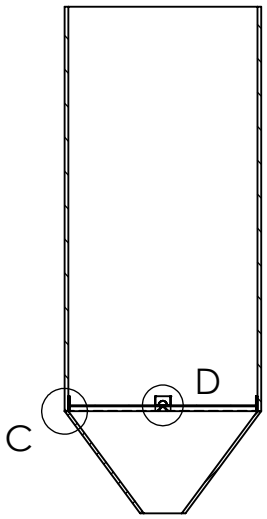
- Πλήρης δημιουργία πινάκων για όλα τα κοκκώδη υλικά, σε ότι αφορά την σχέση υγρασίας και γωνιών εσωτερικής τριβής και τριβής με τα τοιχώματα του σιλό
- Υπολογισμός της μεταλλικής διατομής L που θα χρησιμοποιηθεί για την στήριξη του ημισφαιρίου στο κέντρο του σιλό, καθώς και τον υπολογισμό της σύνδεσής της με τα τοιχώματα του σιλό για αποφυγή τοπικών αστοχιών
- Ανεξαρτητοποίηση του μετρητικού συστήματος κατά την διαδικασία γεμίσματος του σιλό, ώστε να αποφευχθούν εσφαλμένες τιμές από τα κρουστικά φορτία λόγω απότομης φόρτισης
- Δημιουργία κυκλώματος για σύνδεση με το υπάρχων PLC του μαλακού μύλου

# Παράρτημα σχεδίων

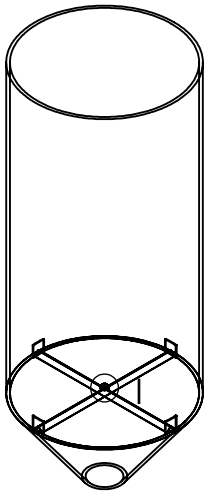
# ΣΧΕΔΙΟ 1. ΚΥΡΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΟΥ LVDT ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

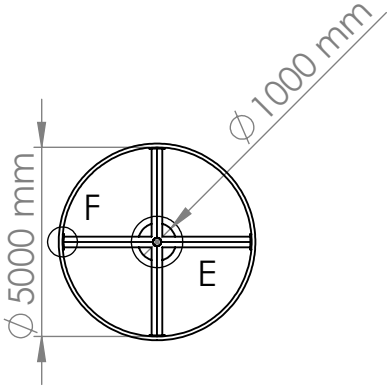



FRONT VIEW SILO
SCALE 1 : 200

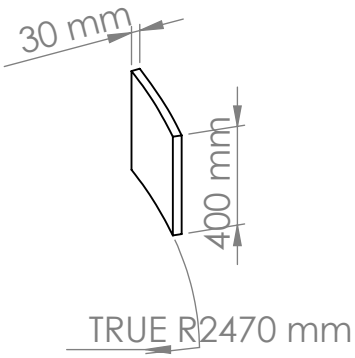



SECTION B-B
SCALE 1 : 200

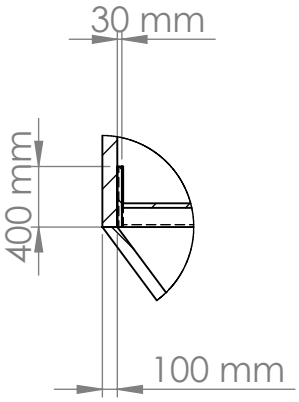




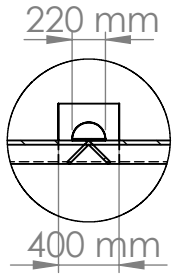

PLAN VIEW SILO
SCALE 1 : 200



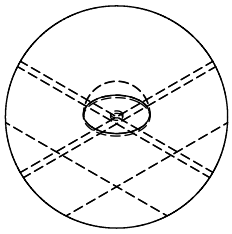

DETAIL support plate
SCALE 1 : 25



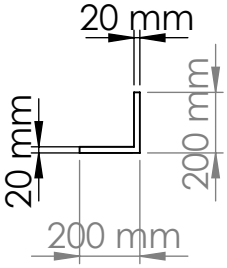

DETAIL C
SCALE 1 : 50



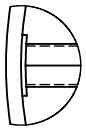

DETAIL D
SCALE 1 : 50



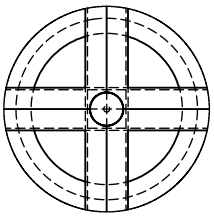
DETAIL I
SCALE 1 : 25



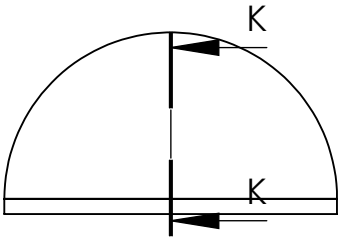

DETAIL L beam
SCALE 1 : 20



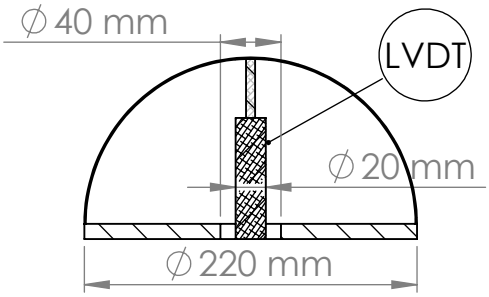
DETAIL F
SCALE 1 : 50



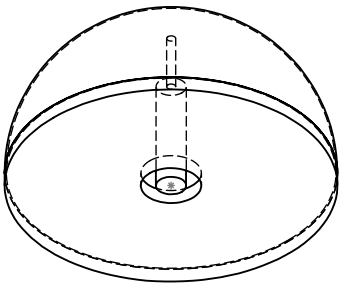
DETAIL E
SCALE 1 : 50



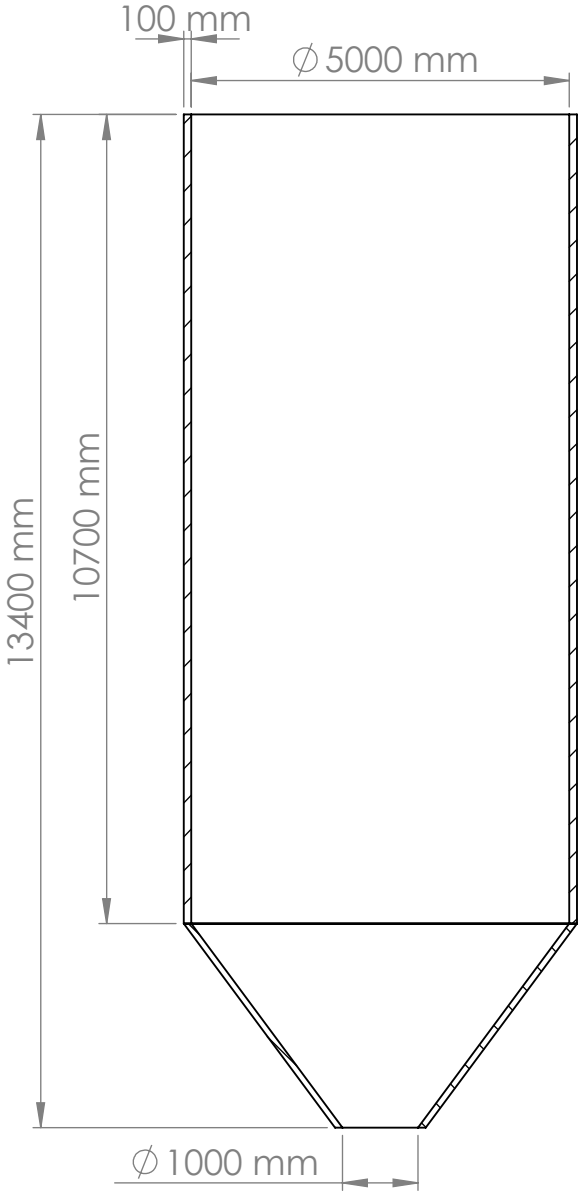

FRONT VIEW SENSOR
SCALE 1 : 5



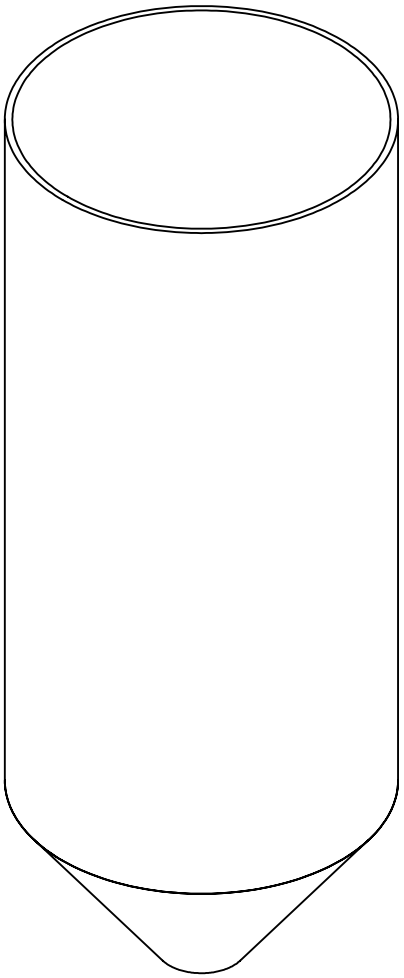

SECTION K-K
SCALE 1 : 5

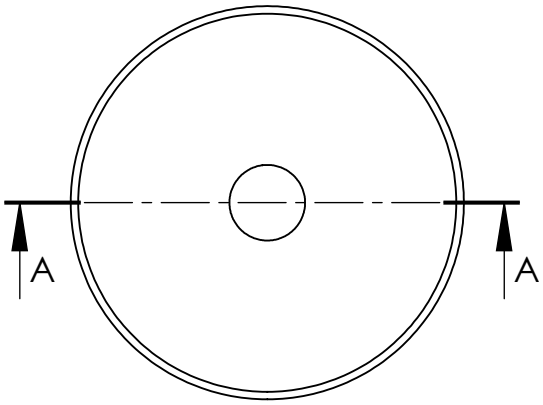


# ΣΧΕΔΙΟ 2. ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΙΛΟ



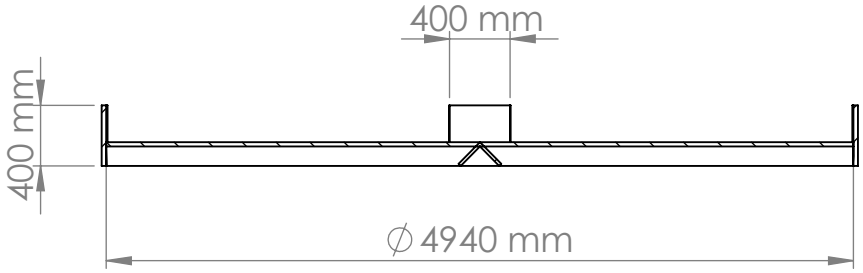

SECTION A-A
SCALE 1 : 100



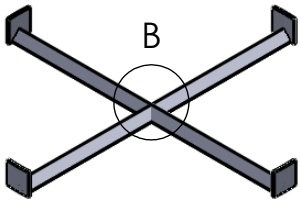


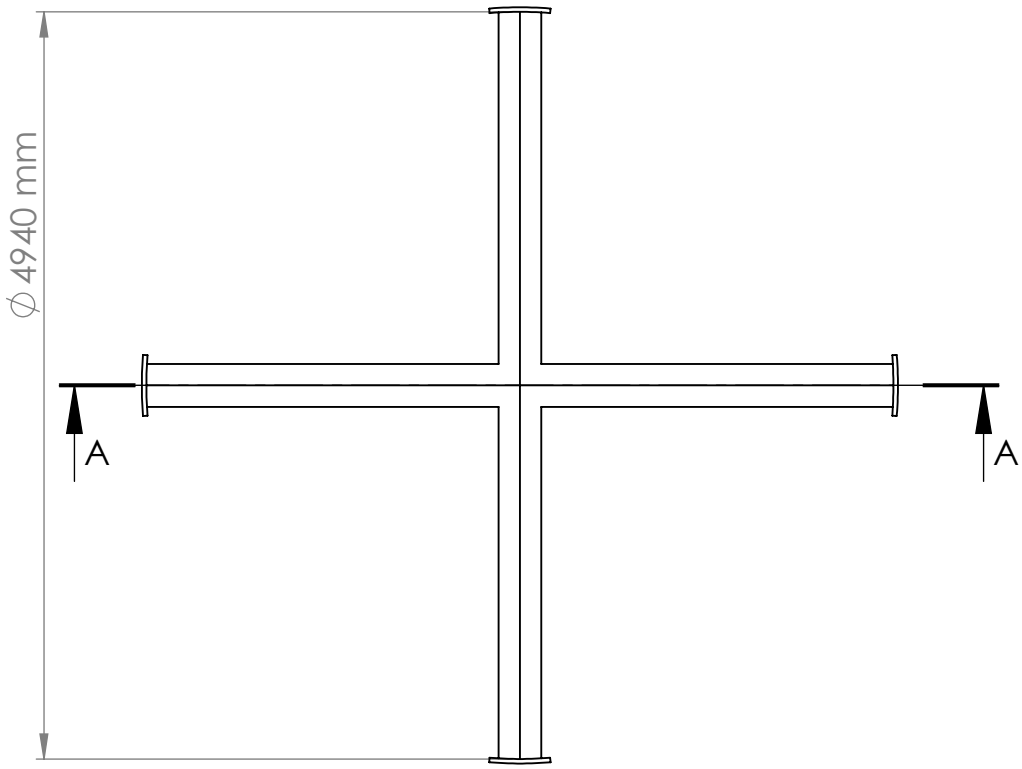

PLAN VIEW SILO
SCALE 1 : 100

# ΣΧΕΔΙΟ 3. ΔΙΑΤΟΜΗΣ L ΚΑΙ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕ ΤΟ ΣΙΛΟ

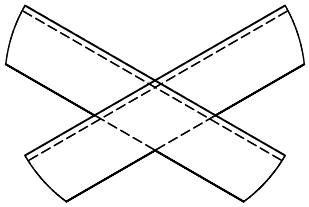



SECTION A-A
SCALE 1 : 50

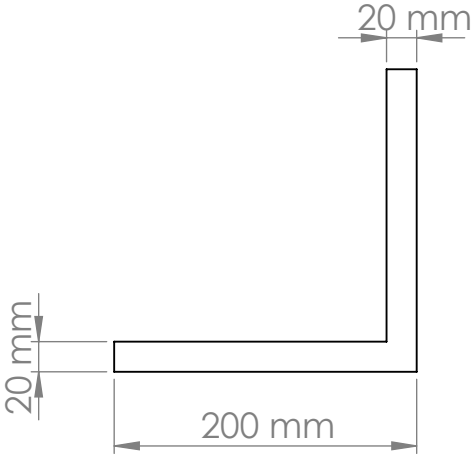


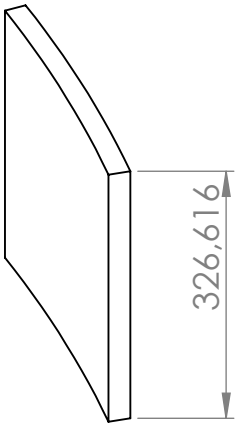

PLAN VIEW BEAMS CONNECTION
SCALE 1 : 50



DETAIL B
SCALE 1 : 25

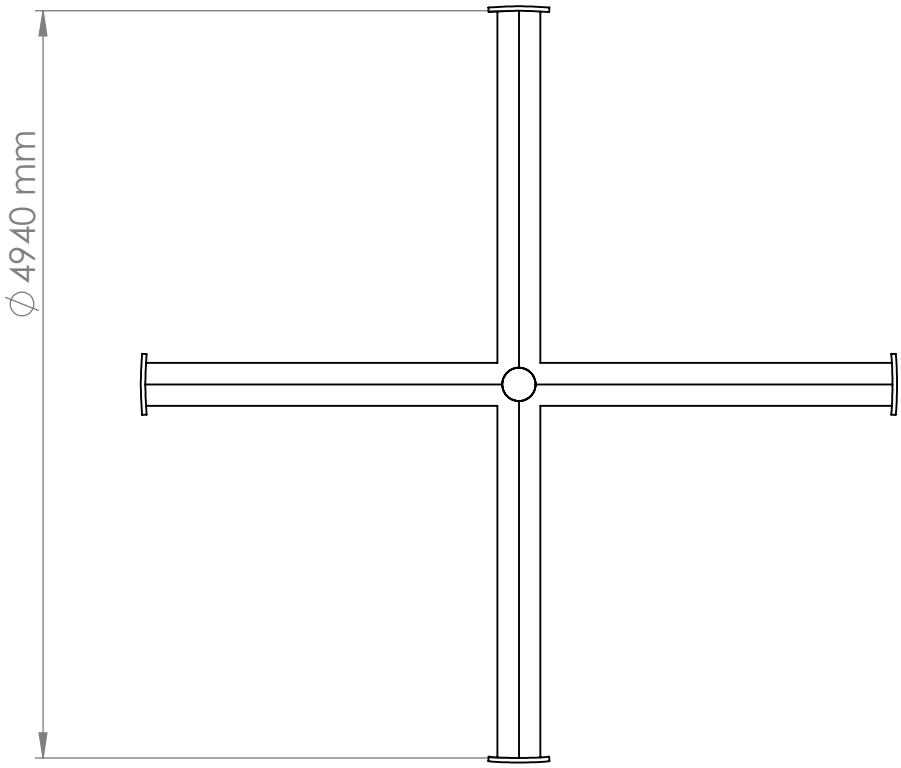



DETAIL L BEAM
SCALE 1 : 5

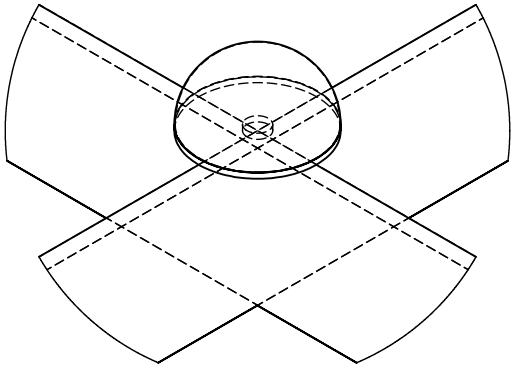



DETAIL SUPPORT PLATE
SCALE 1 : 10

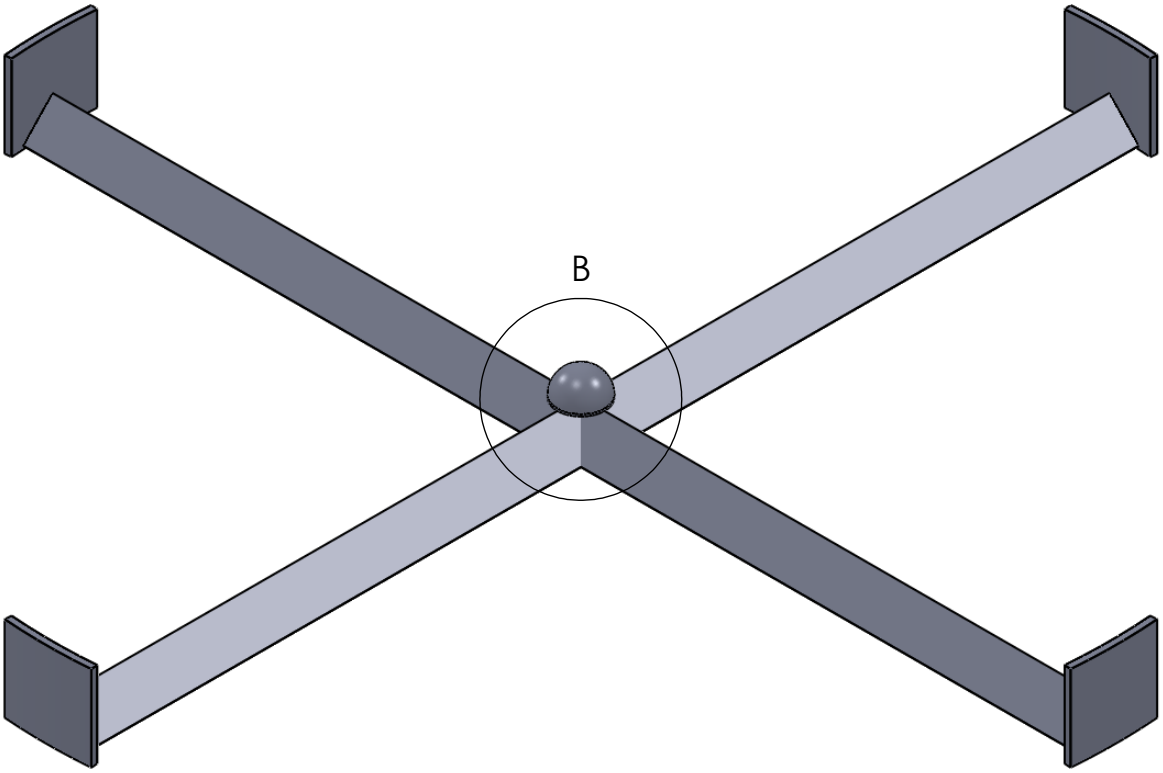
# ΣΧΕΔΙΟ 4. ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ LVDT ΜΕ ΤΗ ΣΤΗΡΙΞΗ



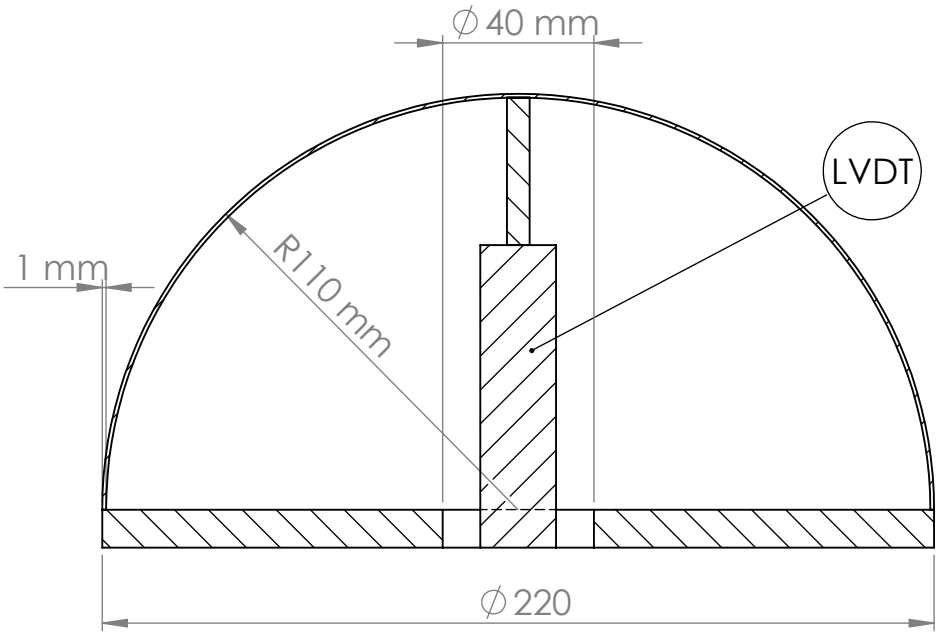

PLAN VIEW BEAMS CONNECTION
SCALE 1 : 50



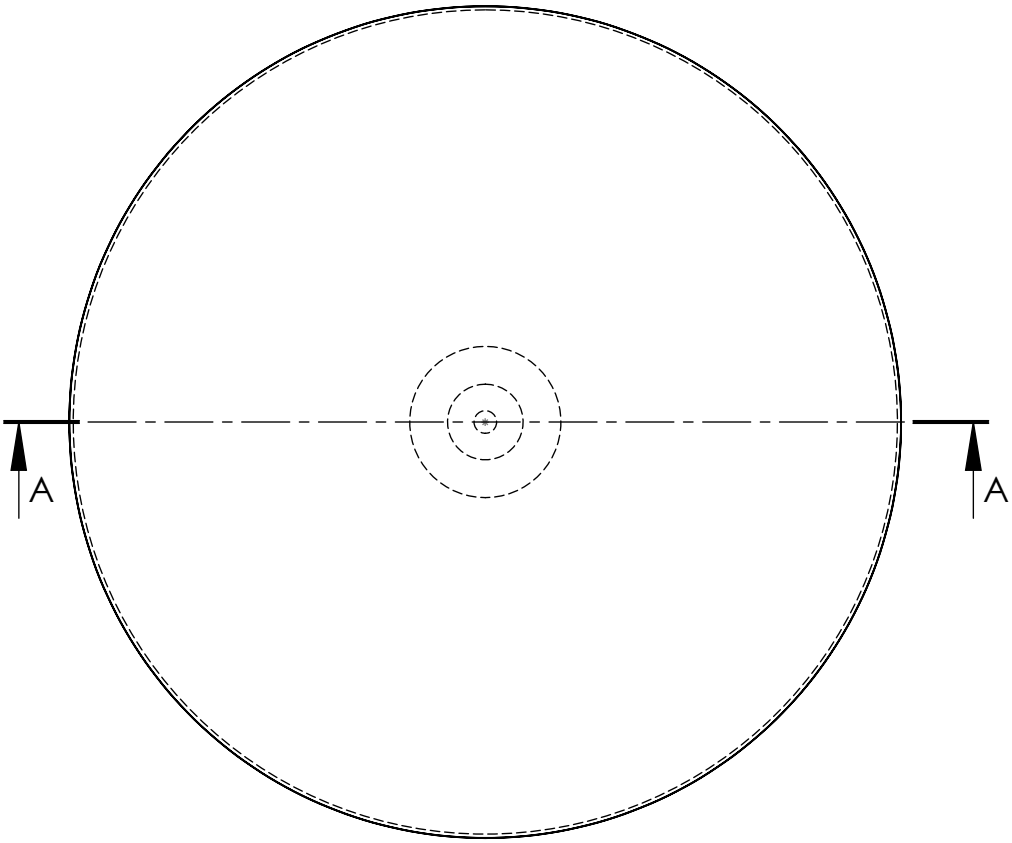
DETAIL B
SCALE 1 : 10



# ΣΧΕΔΙΟ 5. ΔΙΑΤΑΞΗ LVDT ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ

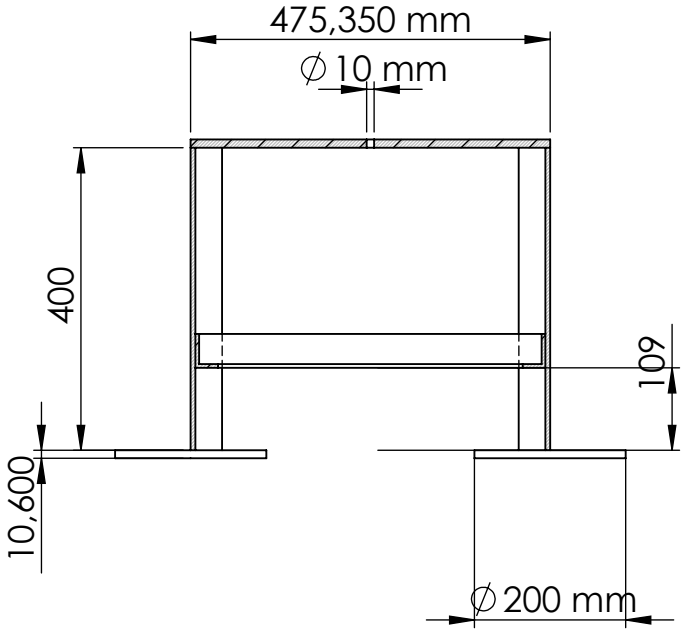



SECTION A-A
SCALE 1 : 2

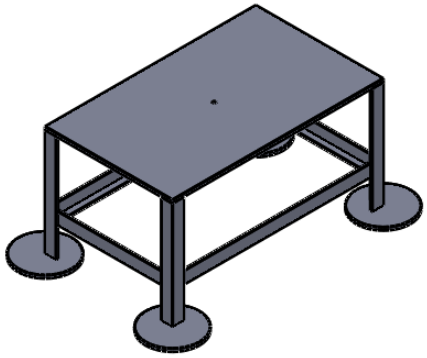


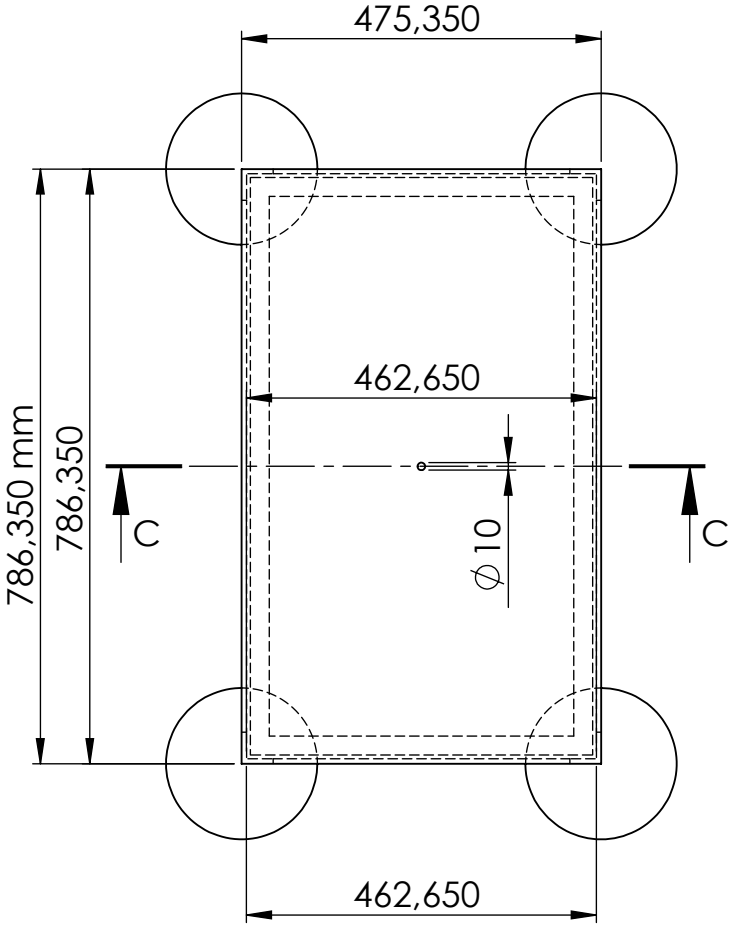

PLAN VIEW
SCALE 1 : 2

# ΣΧΕΔΙΟ 6. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΑΠΕΖΙΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

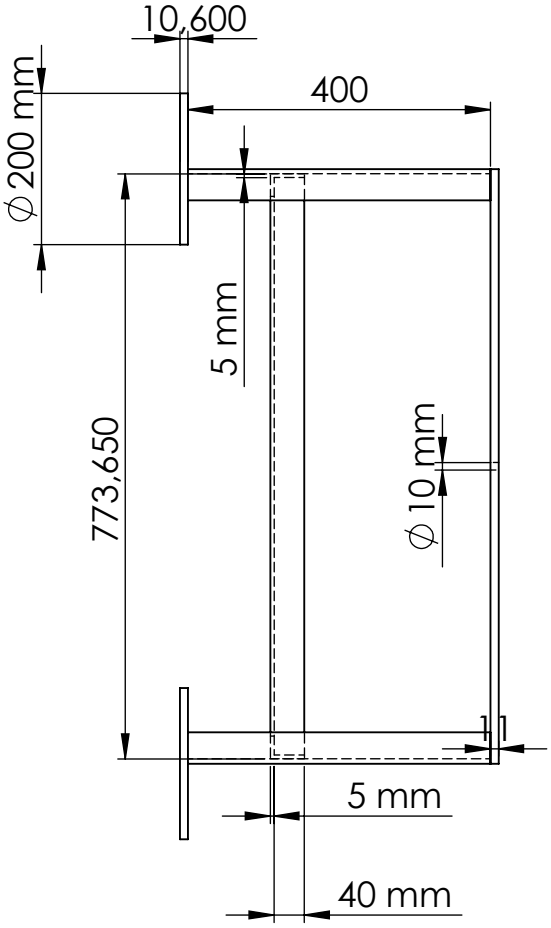



SECTION C-C
SCALE 1 : 10



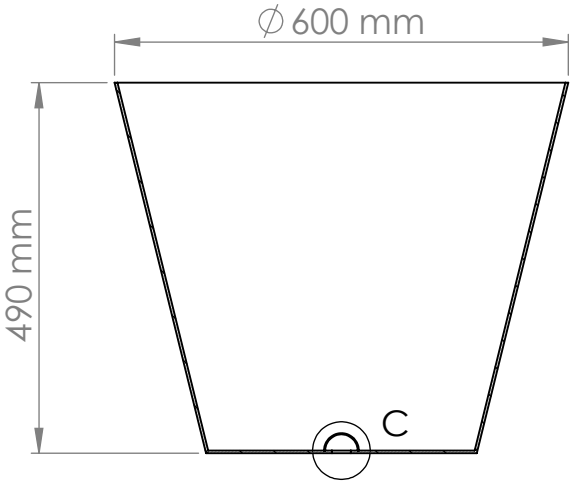



PLAN VIEW TABLE
SCALE 1 : 10

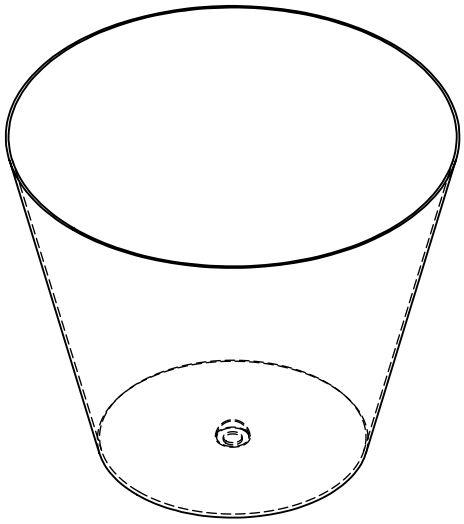


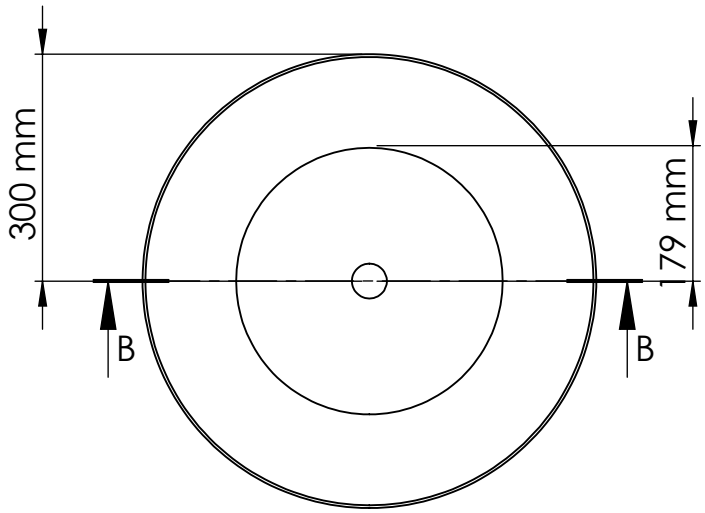

FRONT VIEW TABLE
SCALE 1 : 10

# ΣΧΕΔΙΟ 7. ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΙΛΟ ΚΑΙ ΗΜΙΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΚΕΛΥΦΟΥΣ

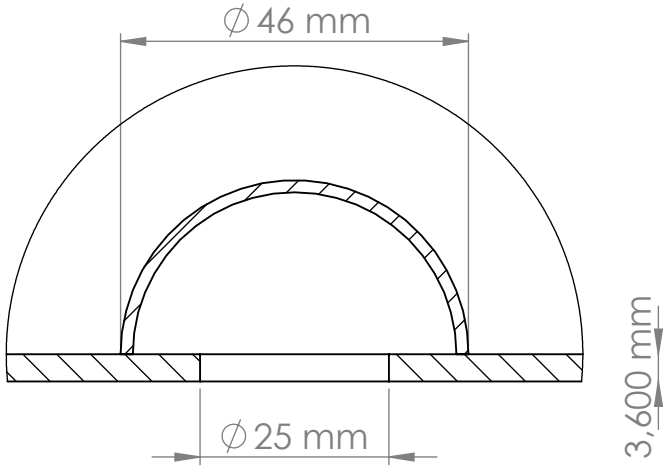



SECTION B-B
SCALE 1 : 10

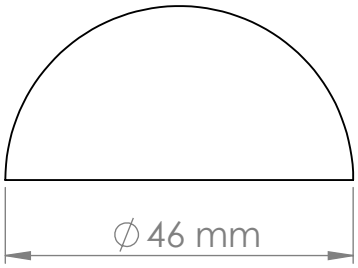




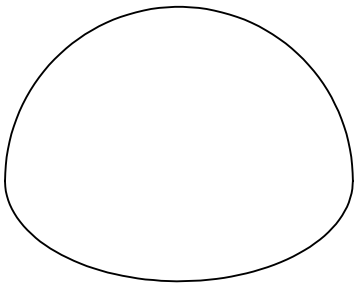

PLAN VIEW TEST SILO
SCALE 1 : 10



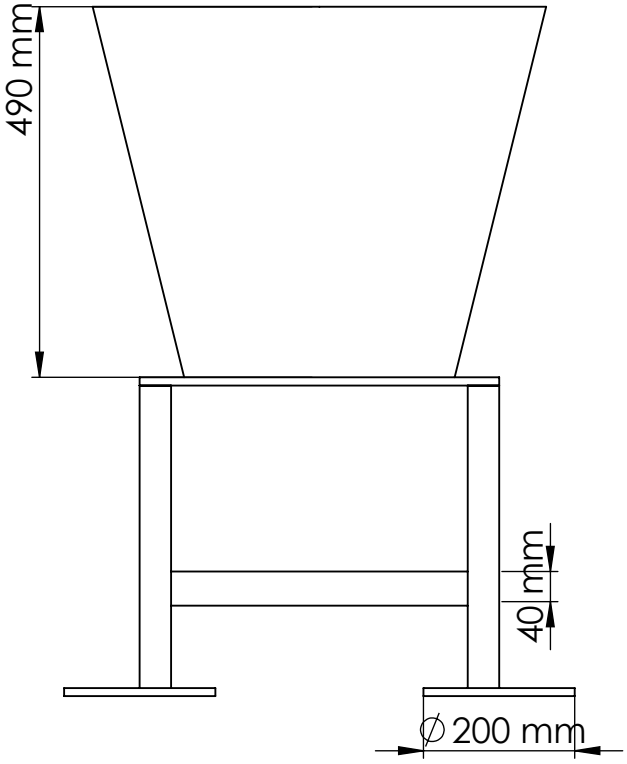

DETAIL C
SCALE 1 : 1



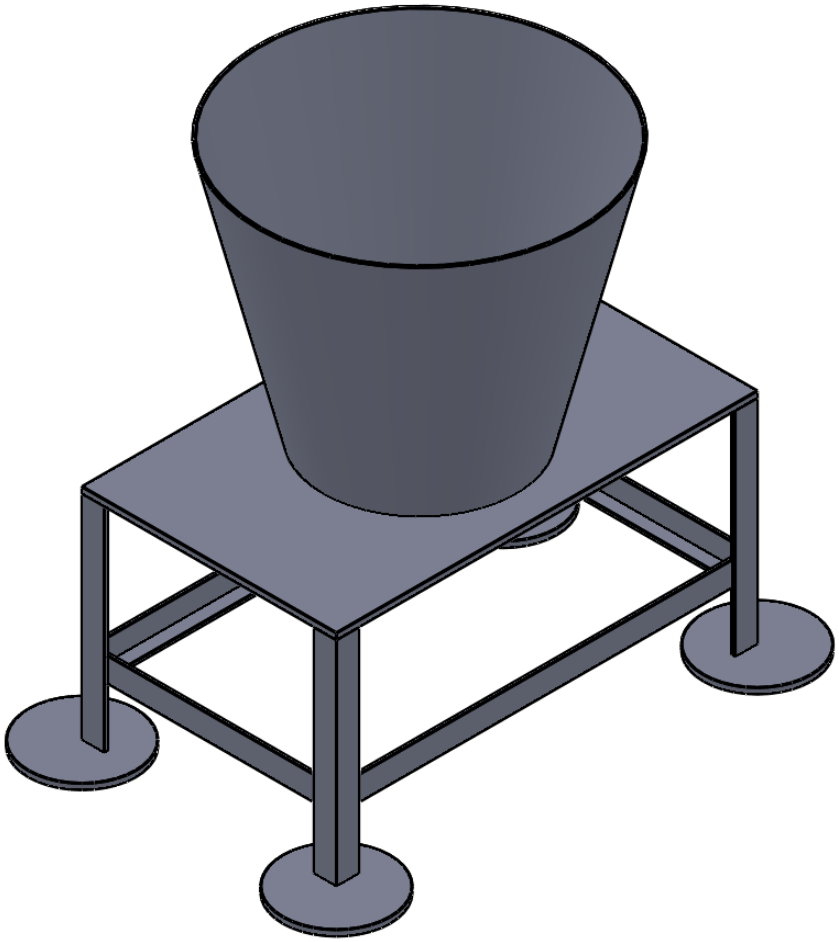

FRONT VIEW TEST SEMISPHERE
SCALE 1 : 1

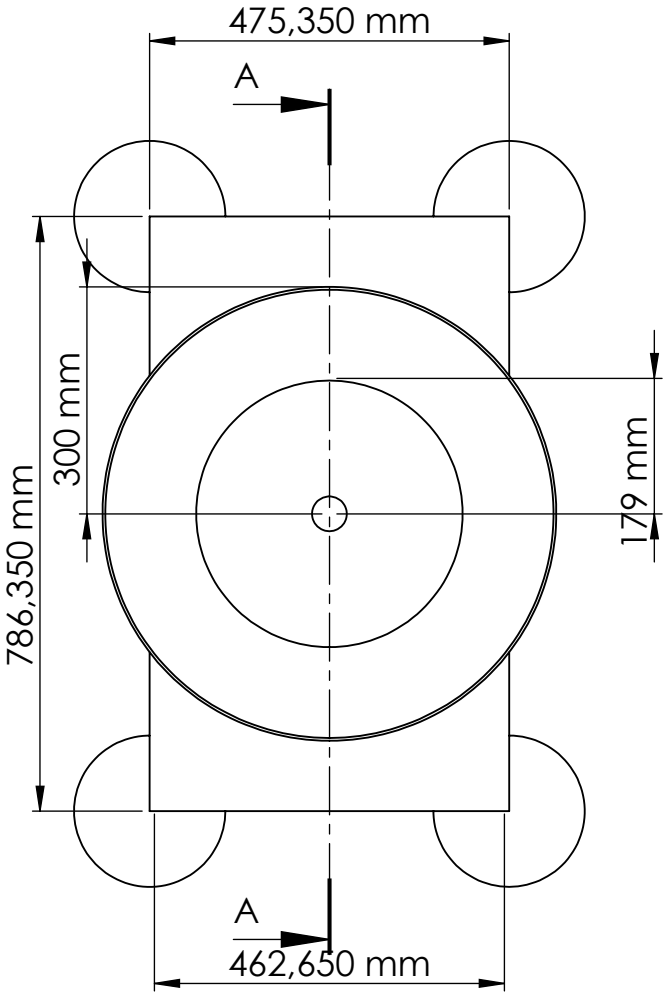


# ΣΧΕΔΙΟ 8. ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

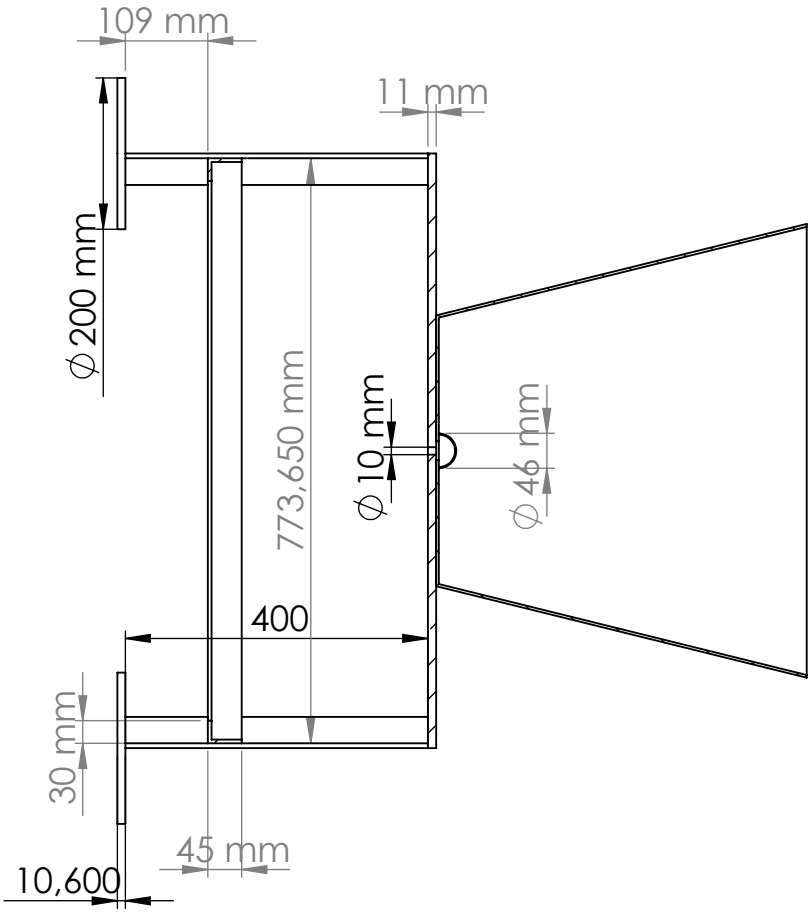



REAR VIEW TEST SET
SCALE 1 : 10






PLAN VIEW TEST SET
SCALE 1 : 10




SECTION A-A
SCALE 1 : 10

## Βιβλιογραφία


1. Οδηγία 96/61/ΕΚ για την ολοκληρωμένη πρόληψη και περιορισμό της ρύπανσης (IPPC) και οι ελληνικές προτάσεις για τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές βιομηχανίας τροφίμων – ΑΘΗΝΑ (2001)
2. Μύλοι Χατζηκρανιώτη - www.xkran.gr
3. Μύλοι Λούλη - http://www.alevri.com
4. Μύλοι Μάρρα - http://mills.marras-sa.gr/
5. Buhler industry solutions - http://www.buhlergroup.com
6. Cereals processing technology – Gavin Owens (2000), Woodhead Publishing Limited
7. Step by step wheat farming, milling & quality requirement – Irfan Hashmi, GrainCorp
8. Wheat and Flour Testing Methods: A Guide to Understanding Wheat and Flour Quality: Version 2 - Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service
9. Handbook of Cereal Science and Technology Food Science and Technology - Kulp, Karel. CRC Press, 2000
10. Coeffients of friction between cereal grin and various silo wall materials – J. agric, Engng Res. (1980) 25, 75-86, P.J. Lawton
11. Effect of moisture content on coefficients of friction and angle of repose for different types of grains – Departamento de Pre-Processamento de Productow Agropecuarios, Universidale Estadual de Campinas, Benedetti and Jorge, Brasil
12. Effect of moisture content on angle of repose and friction coefficient of wheat grain – A.K.Zaalouk and F.I.Zabady , J.Ag.Eng. 418-427 , (2009)
13. Powders and Bulk Solids Behavior, Characterization, Storage and Flow – D.Schulze (2007), Springer
14. Design considerations for the construction and the operation of flour milling facilities – ASABE, paper number 074116, June 2007
15. The effect of moisture content and compaction on the strength and arch formation of wheat flour in a model bin – Journal of Food Engineering 94 (2009) 227-232, W. Guan, Q. Zhang
16. Mechanical properties of granular agricultural materials considered in silo design – 15$^{th}$ ASCE June 2-5,2002, Columbia Univercity, New York, Manuel Moya
17. Flowability, cohesive and granulation properties of wheat powders – Journal of food engineering 86 ,page 178-193, 2008
18. Effect of moisture content on angle of repose and friction coefficient of wheat grain – Process Engineering, 77isr J.Ag.Eng., 26(1):418-427, A.K.Zaalouk and F.I.Zabady
19. Coefficient of friction wheat grain on grain and steel – Girja Sharan , J.H.A.Lee

20. Practical Stress Analysis in Engineering Design - Ronald Huston and Harold Josephs, CRC Press 2008
21. Silo Express Tool - http://www.dietmar-schulze.de/
22. Practical Stress Analysis in Engineering Design, Third Edition - Ronald Huston and Harold Josephs, CRC Press 2008
23. Roark's Formulas for Stress and Strain – Warren C. Young, McGraw Hill 2002

**Υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν**

- SAP2000 v15
- ANSYS Workbench 14.0
- SOLIDWORKS 2012
- SILO EXPRESS TOOL
- OFFICE 2010