

# Numerička analiza silosa za skladištenje žitarica

---

**Abramović, Luka**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:663247>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Luka Abramović**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivica Skozrit, dipl. ing.

Student:

Luka Abramović

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Ivici Skozritu na pomoći, uloženom trudu i savjetovanju tijekom pisanja diplomskog rada.

Najviše se zahvaljujem obitelji i djevojci na pokazanom strpljenju i moralnoj podršci. Također, zahvaljujem se i svojim prijateljima koji su mi pomogli tijekom studiranja.

Luka Abramović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|  |         |
|--|---------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |         |
| Datum:   | Prilog: |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1                                 |         |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -                                   |         |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Luka Abramović** Mat. br.: 0035199400

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Numerička analiza silosa za skladištenje žitarica**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical Analysis of Grain Storage Silo**

Opis zadatka:

Silosu su vertikalni spremnici koji se koriste za skladištenje raznih rastresitih materijala kao npr. skladištenje raznih žitarica na poljoprivrednim imanjima i farmama. U osnovi su sastavljeni od jednog ili više uspravno postavljenih cjevastih segmenata, najčešće su kružnog, ali mogu biti i četverokutnog, šesterokutnog ili osmerokutnog presjeka. Gotovo uvijek imaju dno u obliku lijevka s vratima za pražnjenje silosa tj. utovar materijala na vozila. Jedna su od najučestalijih formi velikih luskastih konstrukcija u inženjerstvu. Grade se od čelika, armiranog ili prednapregnutog betona, te u zadnje vrijeme i polimera ojačanih staklenim vlaknima.

U radu je potrebno:

- za proizvoljno definirani oblik, dimenzije i karakteristike materijala silosa za skladištenje žitarica izraditi prostorni CAD model te ukloniti sve dijelove koji dodatno kompliciraju provedbu numeričke analize, a ne utječu značajno na nosivost konstrukcije,
- sve numeričke analize provesti primjenom programskog paketa Abaqus® koji se temelji na metodi konačnih elemenata i za diskretizaciju svih numeričkih modela koristiti dostupne konačne elemente iz korištenog programskog paketa,
- na jednostavnim problemima provesti verifikaciju svih kasnije u numeričkim analizama korištenih konačnih elemenata i rezultate usporediti s dostupnim analitičkim rješenjima,
- za pojednostavljeni CAD model silosa za skladištenje žitarica te rubne uvjete i opterećenje, provesti numeričke analize te:
  - o odrediti optimalnu mrežu konačnih elemenata i prikazati konvergenciju rješenja,
  - o provjeriti zadovoljava li konstrukcija uvjet čvrstoće, tj. izvršiti kontrolni proračun i odrediti potencijalna kritična mjesta.

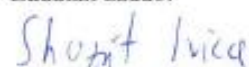
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.


Zadatak zadan:  
12. studenoga 2020.

Datum predaje rada:  
14. siječnja 2021.

Predviđeni datum obrane:  
18. – 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Ivo Skozrit

Predsjednica Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

**SADRŽAJ**

|  |      |
|--|------|
| SADRŽAJ .....  | I    |
| POPIS SLIKA .....  | II   |
| POPIS TABLICA.....                                       | IV   |
| POPIS OZNAKA .....                                       | V    |
| SAŽETAK.....   | VIII |
| SUMMARY .....  | IX   |
| 1. UVOD.....   | 1    |
| 1.1. Projektiranje silosa.....                           | 1    |
| 2. GEOMETRIJA SILOSA KORIŠTENOG ZA ANALIZU.....          | 4    |
| 3. METODA KONAČNIH ELEMENATA .....                       | 11   |
| 3.1. Opis programa za računanje pomoću MKE .....         | 11   |
| 3.2. Programski paket <i>Abaqus</i> [11].....            | 12   |
| 3.2.1. Konačni elementi u <i>Abaqusu</i> .....           | 12   |
| 3.2.2. Trodimenzijski konačni elementi.....              | 13   |
| 3.2.3. Ljuskasti elementi .....                          | 14   |
| 4. VERIFIKACIJA .....                                    | 16   |
| 4.1. Analitičko rješenje .....                           | 16   |
| 4.2. Numeričko rješenje .....                            | 20   |
| 4.2.1. 3D konačni elementi .....                         | 20   |
| 4.2.2. Ljuskasti konačni elementi.....                   | 25   |
| 5. OPTEREĆENJA SILOSA.....                               | 29   |
| 5.1. Opterećenje od težine uskladištenog materijala..... | 29   |
| 5.1.1. Opterećenja na stijenke cilindra.....             | 32   |
| 5.1.2. Opterećenja na lijevak silosa.....                | 39   |
| 5.2. Opterećenje uzrokovano vjetrom .....                | 45   |
| 6. NUMERIČKA ANALIZA .....                               | 51   |
| 6.1. Prikaz rezultata.....                               | 66   |
| 7. ZAKLJUČAK.....  | 75   |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1.1. Silos [1] .....  | 2  |
| Slika 1.2. Osnovni načini protoka [4] .....   | 3  |
| Slika 2.1. Opće dimenzije silosa [6].....   | 4  |
| Slika 2.2. Debljine stijenki za pojedine odjeljke silosa [6] .....  | 6  |
| Slika 2.3. Krov silosa .....  | 7  |
| Slika 2.4. Dimenzije vala lima [7].....   | 7  |
| Slika 2.5. Cilindrični odjeljak od valovitog lima .....   | 8  |
| Slika 2.6. Lijevak silosa .....   | 8  |
| Slika 2.7. Noge silosa s ojačanjima.....  | 9  |
| Slika 2.8. Nosiva konstrukcija silosa .....   | 10 |
| Slika 3.1. Grafički prikaz rada programa [8] .....  | 12 |
| Slika 3.2. Najčešće korištene skupine KE [11] .....   | 13 |
| Slika 3.3. Najčešće korišteni 3D elementi: a) heksaedarski element 1. reda, b) heksaedarski<br>element 2. reda, c) tetraedarski elementi 2. reda [11] ..... | 14 |
| Slika 3.4. Točke integracije za 2D kvadratne elemente [11] .....  | 14 |
| Slika 3.5. Tipovi ljuskastih konačnih elemenata [11] .....  | 15 |
| Slika 3.6. Točke integracije za ljuskaste elemente [10] .....   | 15 |
| Slika 4.1. Cilindrični spremnik opterećen hidrostatičkim tlakom [9] .....   | 16 |
| Slika 4.2. Raspodjela pomaka po visini stijenke cilindričnog spremnika .....  | 19 |
| Slika 4.3. Model spremnika i detalj prikaza debljine stijenke.....  | 20 |
| Slika 4.4. Presjek spremnika sa zadanim tlakom i uklještenjem.....  | 21 |
| Slika 4.5. Mreže 3D konačnih elemenata: a) 208 KE, b) 520 KE, c) 800 KE, d) 1386 KE ....  | 22 |
| Slika 4.6. Prikaz mreže od 520 C3D20R konačnih elemenata.....   | 23 |
| Slika 4.7. Deformirani oblik i prikaz maksimalnog pomaka spremnika u mm za model s 520<br>C3D20R KE .....   | 23 |
| Slika 4.8. Konvergencija rezultata maksimalnog radijalnog pomaka za različite 3d KE .....   | 24 |
| Slika 4.9. Raspodjela radijalnog pomaka po visini stijenke.....   | 25 |
| Slika 4.10. Mreže ljuskastih konačnih elemenata: a) 120 KE, b) 288 KE, c) 864 KE, d) 1470<br>KE.....  | 26 |
| Slika 4.11. Deformirani oblik i prikaz maksimalnog pomaka spremnika u mm za model s 864<br>S8R5 KE.....   | 27 |
| Slika 4.12. Konvergencija rezultata maksimalnog radijalnog pomaka u mm za različite<br>ljuskaste KE.....  | 27 |
| Slika 5.1. Opterećenja na stijenke silosa [2] .....   | 30 |
| Slika 5.2. Tipovi silosa s obzirom na vitkost .....   | 30 |
| Slika 5.3. Tlak nakon punjenja zdepastog ili silosa srednje vitkosti [2] .....  | 33 |
| Slika 5.4. Tipovi valovitog lima za silos [2] .....   | 34 |
| Slika 5.5. Raspodjela tlakova za slučaj nakon punjenja silosa.....  | 36 |
| Slika 5.6. Raspodjela tlakova po visini cilindra silosa za slučaj pražnjenja .....  | 38 |
| Slika 5.7. Raspodjela tlaka na strme i plitke lijevke [2].....  | 40 |
| Slika 5.8. Raspodjela tlakova po visini lijevka silosa za slučaj punjenja.....  | 42 |
| Slika 5.9. Raspodjela tlakova po visini lijevka silosa za slučaj pražnjenja.....  | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 5.10. Grafički prikaz faktora izloženosti $c_e(z)$ [14].....  | 46 |
| Slika 5.11. Zemljovid područja opterećenja vjetrom [13].....  | 47 |
| Slika 5.12. Vrijednosti faktora učinka kraja kao funkcije omjera punoće $\varphi$ vitkosti $\lambda$ [14].                    | 49 |
| Slika 5.13. Definicija omjera punoće [14] .....   | 50 |
| Slika 5.14. Referentna površina komore silosa .....   | 50 |
| Slika 6.1. Modificirani 3D model silosa .....   | 51 |
| Slika 6.2. Svojstva materijala .....  | 52 |
| Slika 6.3. Sklop silosa u Abaqusu .....   | 54 |
| Slika 6.4. Podjela ojačanja nogu silosa na jednostavnije dijelove .....   | 55 |
| Slika 6.5. Podjela krova na dijelove za kreiranje mreže KE .....  | 56 |
| Slika 6.6. Podjela lijevka na dijelove za kreiranje mreže KE .....  | 56 |
| Slika 6.7. Veza između krova i cilindričnog odjeljka .....  | 57 |
| Slika 6.8. Veze cilindričnih segmenata s nogama silosa.....   | 58 |
| Slika 6.9. Veze nogu i ojačanja .....   | 58 |
| Slika 6.10. Funkcije normalnih tlakova $p_{hf}$ i $p_{nf}$ na stijenke silosa.....  | 59 |
| Slika 6.11. Rubni uvjeti i tlakovi u smjeru normale na stijenke silosa .....  | 60 |
| Slika 6.12 Rubni uvjeti, vertikalni tlak $p_{wf}$ i tangencijalni tlak $p_{tf}$ .....   | 61 |
| Slika 6.13. Funkcije tlakova uslijed trenja uskladištenog materijala i stijenke silosa .....                                  | 62 |
| Slika 6.14. Opterećenje od snijega i vjetra .....   | 63 |
| Slika 6.15. Mreža od 89853 KE .....   | 64 |
| Slika 6.16. Prikaz detalja mreže konačnih elemenata .....   | 65 |
| Slika 6.17 Prikaz odabranog tipa konačnih elemenata za analizu silosa.....  | 65 |
| Slika 6.18. Ekvivalentna naprezanja silosa prema von Misesu u MPa .....   | 66 |
| Slika 6.19. Ekvivalentna naprezanja u integracijskim točkama na mjestu najvećeg naprezanja u cilindričnom odjeljku u MPa..... | 67 |
| Slika 6.20. Ekvivalentna naprezanja u integracijskim točkama u krovu silosa u MPa.....  | 68 |
| Slika 6.21. Presjek komore silosa i prikaz ekvivalentnih naprezanja u MPa.....  | 69 |
| Slika 6.22. Ekvivalentna naprezanja u lijevku silosa u MPa.....   | 70 |
| Slika 6.23. Ekvivalentna naprezanja u integracijskim točkama na mjestu najvećeg naprezanja u lijevku u MPa .....              | 71 |
| Slika 6.24. Ekvivalentna naprezanja u nogama silosa u MPa.....  | 72 |
| Slika 6.25. Ekvivalentna naprezanja u integracijskim točkama na mjestu najvećeg naprezanja u nogama u MPa.....                | 73 |
| Slika 6.26. Deformirani oblik konstrukcije i raspodjela pomaka [mm].....  | 74 |



**POPIS TABLICA**

|  |    |
|--|----|
| Tablica 2.1. Dimenzije silosa za tipove od 350 - 1 do 350 – 7 [6].....                         | 5  |
| Tablica 5.1. Mehanička svojstva materijala koji se pohranjuju u silose [2] .....               | 31 |
| Tablica 5.2. Raspodjela tlakova po visini cilindričnog dijela spremnika za slučaj punjenja ... | 36 |
| Tablica 5.3. Raspodjela tlakova po visini cilindra silosa u trenutku pražnjenja .....          | 39 |
| Tablica 5.4. Raspodjela tlakova po visini stijene lijevka silosa za slučaj punjenja .....      | 42 |
| Tablica 5.5. Raspodjela tlakova po visini stijenske lijevka za slučaj pražnjenja.....          | 45 |
| Tablica 5.6. Istovjetna hrapavost površine k [14] .....  | 48 |
| Tablica 6.1. Proces montaže nosive konstrukcije silosa .....                                   | 53 |
| Tablica 6.2. Najveća naprezanja u komponentama silosa.....                                     | 73 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka                       | Jedinica                       | Opis  |
|------------------------------|--------------------------------|---|
| $A$                          | $\text{mm}^2$                  | Površina poprečnog presjeka cilindra silosa                                   |
| $A_{\text{ref}}$             | $\text{mm}^2$                  | Referentna površina (projicirana površina izložena vjetru)                    |
| $A_c$                        | $\text{mm}^2$                  | Ukupna omeđena ploština   |
| $b$                          | -                              | Empirijski faktor   |
| $C_s$                        | -                              | Faktor vitkosti   |
| $C_{\text{op}}$              | -                              | Referentni faktor za asimetrično opterećenje                                  |
| $c_s c_d$                    | -                              | Konstruktivski faktor   |
| $c_e$                        | -                              | Faktor izloženosti  |
| $c_f$                        | -                              | Faktor sile za konačne kružne valjke  |
| $c_{f,0}$                    | -                              | Faktor sile za valjke bez toka preko slobodnog kraja                          |
| $D$                          | N                              | Fleksijska krutost ljuske   |
| $d_c$                        | mm                             | Promjer cilindričnog dijela silosa  |
| $E$                          | $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ | Modul elastičnosti  |
| $e_f$                        | mm                             | Najveća ekscentričnost hrpe tijekom punjenja                                  |
| $e_0$                        | mm                             | Ekscentričnost izlaznog otvora silosa   |
| $e_t$                        | mm                             | Ekscentričnost središta gornje površine materijala u slučaju kad je silos pun |
| $F$                          | N                              | Karakteristična vrijednost omjera tlaka u lijevku                             |
| $F_e$                        | N                              | Karakteristična vrijednost omjera tlaka u lijevku za slučaj pražnjenja silosa |
| $F_w$                        | N                              | Ukupna sila vjetra  |
| $f_4(\beta x), f_3(\beta x)$ | -                              | Eksponencijalno - trigonometrijske funkcije                                   |
| $H$                          | mm                             | Visina cilindričnog spremnika   |
| $h$                          | mm                             | Debljina stijenke cilindričnog spremnika                                      |
| $h_c$                        | mm                             | Visina cilindričnog dijela silosa   |
| $h_h$                        | mm                             | Visina stošca lijevka   |
| $h_o$                        | mm                             | Visina težišta stošca materijala koji nije u dodiru sa stijenkama silosa      |
| $K$                          | -                              | Faktor bočnog tlaka   |
| $K_m$                        | -                              | Srednja vrijednost faktora bočnog tlaka                                       |
| $k$                          | -                              | Istovjetna hrapavost površine   |
| $l$                          | mm                             | Visina komore silosa  |
| $M_0$                        | $\frac{\text{Nmm}}{\text{mm}}$ | Moment savijanja  |
| $m$                          | kg                             | Masa materijala koju silos može pohraniti                                     |

|                  |                  |   |
|------------------|------------------|---|
| $N_x$            | $\frac{N}{mm}$   | Meridijanska sila   |
| $N_\varphi$      | $\frac{N}{mm}$   | Cirkularna sila   |
| $p_{hf}, p_{he}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | Horizontalni tlak na stijenke cilindra pri punjenju/pražnjenju silosa |
| $p_{nf}, p_{ne}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | Normalni tlak na stijenke lijevka pri punjenju/pražnjenju silosa      |
| $p_{tf}, p_{te}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | Tlak trenja na stijenke lijevke pri punjenju/pražnjenju silosa        |
| $p_{wf}, p_{we}$ | $\frac{N}{mm^2}$ | Tlak trenja na stijenke cilindra pri punjenju/pražnjenju silosa       |
| $p_v$            | $\frac{N}{mm^2}$ | Vertikalni tlak u uskladištenom materijalu                            |
| $p_{vf}$         | $\frac{N}{mm^2}$ | Vertikalni tlak u uskladištenom materijalu nakon punjenja silosa      |
| $p_{vft}$        | $\frac{N}{mm^2}$ | Vertikalni tlak na mjestu spoja cilindra i lijevka                    |
| $Q_0$            | $\frac{N}{mm}$   | Posmična sila   |
| $q_b$            | $\frac{N}{m^2}$  | Osnovni tlak zbog brzine vjetra                                       |
| $q_p$            | $\frac{N}{m^2}$  | Vršni koeficijent tlaka brzine vjetra                                 |
| $q_p(z_e)$       | $\frac{N}{m^2}$  | Tlak pri vršnoj brzini na referentnoj visini $z_e$                    |
| $R$              | mm               | Polumjer cilindričnog spremnika                                       |
| $r_1$            | mm               | Meridijanski glavni polumjer  |
| $r_2$            | mm               | Cirkularni glavni radijus zakrivljenosti                              |
| $Re$             | -                | Reynoldsov broj   |
| $x_{w,max}$      | mm               | Visina maksimalnog radijalnog pomaka spremnika                        |
| $U$              | mm               | Unutarnji opseg poprečnog presjeka cilindra silosa                    |
| $V_s$            | $m^3$            | Volumen spremnika   |
| $v_{ref}$        | $\frac{m}{s}$    | Referentna brzina vjetra  |
| $v(z_e)$         | $\frac{m}{s}$    | Vršna brzina vjetra   |
| $w$              | mm               | Radijalni pomak   |
| $w_c$            | mm               | Ukupni pomak  |
| $w_c^m$          | mm               | Membranski pomak  |
| $w_c^f$          | mm               | Fleksijski pomak  |

|  |  |   |
|--|--|---|
| $x$  | mm   | Koordinata visine lijevka odozdo prema gore   |
| $Y_R$  | -  | Varijacijska funkcija dubine tlaka za zdepaste silose i silose srednje vitkosti   |
| $z$  | mm   | Dubina ispod ekvivalentne površine uskladištenog materijala   |
| $z_v$  | mm   | Dubina u silosu za izračun vertikalnog tlaka  |
| $\alpha_{11}, \alpha_{12}, \alpha_{21}, \alpha_{22}$ | $\frac{\text{mm}^2}{\text{N}}, \frac{\text{mm}}{\text{N}}, \frac{1}{\text{N}}$ | Uplivni koeficijenti  |
| $\alpha_c$   | rad  | Ukupni zakret   |
| $\alpha_c^m$   | rad  | Kut zakreta membranskog stanja naprezanja   |
| $\alpha_c^f$   | rad  | Kut zakreta kod savijanja   |
| $\alpha_w$   | -  | Faktor dodira stijenke  |
| $\beta$  | $\text{mm}^{-1}$   | Geometrijsko-materijalna značajka cilindrične ljuske  |
| $\gamma$   | $\frac{\text{N}}{\text{mm}^3}$   | Specifična težina uskladištenog materijala/tekućine   |
| $\Phi_i$   | °  | Kut unutarnjeg trenja materijala  |
| $\Phi_{im}$  | °  | Srednji kut unutarnjeg trenja materijala  |
| $\Phi_r$   | °  | Maksimalni kut u odnosu na horizontalnu ravninu pod kojim se rastresiti materijal može nagomilati bez propadanja/urušavanja |
| $\Phi_{wh}$  | °  | Kut trenja između stijenke lijevka i materijala   |
| $\varphi$  | -  | Omjer punoće  |
| $\mu$  | -  | Faktor trenja između materijala i stijenke silosa   |
| $\mu_{\text{eff}}$                                   | -  | Efektivni faktor trenja stijenke  |
| $\mu_h$  | -  | Faktor trenja između stijenke lijevka i materijala  |
| $\mu_{\text{wm}}$                                    | -  | Srednja vrijednost faktora trenja stijenke glatkog (nevalovitog) lima   |
| $\lambda$  | -  | Funkcija vitkosti   |
| $\nu$  | -  | Poissonov faktor  |
| $\nu$  | $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$  | Kinematska viskoznost zraka   |
| $\rho$   | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$   | Gustoća zraka   |
| $\rho_m$   | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$   | Gustoća materijala  |
| $\psi_\lambda$                                       | -  | Faktor učinka kraja   |

## SAŽETAK

Zadatak rada bio je modeliranje i numerička analiza nosive konstrukcije silosa za žitarice. U uvodu su ukratko opisani silosi, njihova namjena, vrste te način projektiranja i problematika koja se javlja tijekom konstruiranja silosa. U sljedećem poglavlju napravljen je 3D model silosa u programskom paketu *Solidworks*. Sve dimenzije, geometrija i komponente silosa preuzete su iz kataloga tvrtke *Polnet Sp. z o.o* koja se bavi proizvodnjom različitih vrsta silosa. Tijekom modeliranja pojedinih komponenti konstrukcije napravljena su određena pojednostavljenja kako bi se ubrzala i olakšala numerička analiza. Pri tome su, naravno, napravljena samo ona pojednostavljenja koja ne utječu znatno na čvrstoću i stabilnost konstrukcije. Zatim je provedena verifikacija konačnih elemenata na jednostavnijem primjeru. Za cilindrični spremnik opterećen tekućinom analitički je određen iznos najvećeg radijalnog pomaka, a zatim je u programskom paketu *Abaqus* provedena numerička analiza za taj primjer. Pri tome su se koristile različite vrste konačnih elemenata, a na temelju usporedbe konvergencije i točnosti rješenja odabrani su oni konačni elementi koji su najprikladniji za analizu silosa. Prije provođenja same analize izvršeni su analitički proračuni koji opisuju opterećenja koja djeluju na konstrukciju. Glavno i najveće opterećenje je ono koje se javlja uslijed težine uskladištenog materijala, a proračun tlakova koji djeluju na unutrašnje stijenske silosa proveden je prema normi EN 1991-4. Zatim, prema normi EN 1991-1-4:2005+A1 proveden je proračun za tlak koji nastaje uslijed djelovanja vjetra. Nakon određivanja svih opterećenja koja djeluju na silos, odabira prikladnih konačnih elemenata te modeliranja nosive konstrukcije silosa, silos je konačno podvrgnut analizi. Numerička analiza silosa također je izvršena u programskom paketu *Abaqus* te je izvršena za slučaj najnepovoljnijeg opterećenja silosa. Nakon analize prikazani su i komentirani rezultati naprezanja i pomaka. Na kraju, temeljem analize i usporedbe rezultata izveden je i zaključak.

Ključne riječi: silos, nosiva konstrukcija, uskladišteni materijal, tlak, numerička analiza, metoda konačnih elemenata

## SUMMARY

The task of this paper was modeling and numerical analysis of the supporting construction of a grain silo. The introduction briefly describes the silos, their purpose, types and methods of design and issues that arise during the construction of silos. In the next chapter, a 3D model of the silo was made in the Solidworks software package. All dimensions, geometry and silo components are taken from the catalog of company *Polnet Sp. z o.o.* which deals with the production of various types of silos. During the modeling of individual components of the construction, certain simplifications were made in order to speed up and facilitate the numerical analysis. In doing so, only those simplifications have been made that do not significantly affect the strength and stability of the construction. The finite element verification was then performed on a simpler example. For a cylindrical tank loaded with liquid, the amount of the maximum radial displacement was analytically determined, and then a numerical analysis for that example was performed in the Abaqus software package. Different types of finite elements were used, and based on the comparison of convergence and accuracy of the results, those finite elements that were most suitable for silo analysis were selected. Prior to performing the analysis, analytical calculations were performed describing the loads acting on the construction. The main and maximum load is that which occurs due to the weight of the stored material, and the calculation of pressures acting on the inner walls of the silo was carried out according to standard EN 1991-4. Then, according to the standard EN 1991-1-4: 2005 + A1, a calculation was performed for the pressure caused by the action of wind. After determining all the loads acting on the silo, selecting the appropriate finite elements and modeling the supporting construction of the silo, the silo could finally be subjected to analysis. Numerical analysis of the silo was performed in case of the most unfavorable load. After the analysis, the results of stress and displacement are presented and commented. Finally, based on the analysis and comparison of the results, a conclusion was made.

Keywords: silo, supporting construction, stored material, pressure, numerical analysis, finite element method

# 1. UVOD

Silosu su spremnici koji se koriste u raznim industrijama i farmama za skladištenje rastresitih materijala koji su ključni u poljoprivredi, rudarstvu, kemijskoj i brodskoj industriji i slično. Većinom su sagrađeni od betona, čelika i aluminijske (rjeđe od drva ili polimera). Postrojenje koje sadrži više spremnika za skladištenje materijala koji tvore jednu cjelinu naziva se silos, dok se svaki pojedini spremnik naziva komora silosa. Međutim, radi jednostavnosti, često se i jedan zasebni spremnik naziva silos pa će se i u ovom radu rabiti taj termin. Dije se na lučke, pretovarne, mlinske i poljoprivredne silose, ovisno o namjeni, kapacitetu i trajanju skladištenja. Prema načinu gradnje, dijele se na kružne, kvadratne, poligonalne. S obzirom na klase pouzdanosti, ovisno o pouzdanosti konstrukcije i različitim utjecajima otkazivanja konstrukcije prema [2] dijele se na:

- klasa pouzdanosti 1 (silosi kapaciteta manjeg od 100 tona),
- klasa pouzdanosti 2 (svi silosi iz standarda koji nisu svrstani u druge klase),
- klasa pouzdanosti 3 (silosi s kapacitetom većim od 10000 tona i silosi s kapacitetom većim od 1000 tona kod kojih se pojavljuje ekscentrično pražnjenje s omjerom  $e_0/d_c > 0,25$  ( $e_0$  predstavlja ekscentričnost izlaznog otvora, dok  $d_c$  promjer cilindričnog dijela silosa) i zdepasti silos s ekscentricitetom gornje plohe  $e_t/d_c > 0,25$  ( $e_t$  predstavlja ekscentričnost središta gornje površine materijala u slučaju kad je silos pun)).

Danas europske norme donose podjelu silosa prema načinu proračuna vertikalnih zidova silosa, pri čemu se uvodi pojam „vitkost silosa“ (odnos visine ćelije i promjera upisanog kruga baze ćelije). Klase silosa prema vitkosti i prema postupku proračuna su [2]:

- silosi velike vitkosti,
- silosi srednje vitkosti,
- zdepasti silosi,
- vrlo zdepasti silosi s ravnim dnom.

## 1.1. Projektiranje silosa

Sam proces projektiranja silosa može se znatno zakomplicirati s obzirom da je veoma teško predvidjeti ponašanje silosa uzimajući u obzir geometriju, uvjete oslanjanja i svojstva uskladištenog materijala. Uz proračunavanje dimenzija konstrukcijskih elemenata potrebno je i proučiti geometrijske oblike objekta, položaj i veličinu ispusnog otvora s opremom za punjenje i pražnjenje uskladištenog materijala. Također, potrebno je i adekvatno procijeniti statički

pritisak i pritisak zbog protjecanja materijala tijekom pražnjenja, dinamičke efekte, nejednolika djelovanja, toplinske utjecaje i ostale čimbenike. Opterećenja stijenki silosa mogu se povećati odmah na početku pražnjenja i mogu biti višestruko veća od onih nakon punjenja. Većina otkazivanja konstrukcija silosa događa se upravo na početku pražnjenja i uobičajeno dolazi do katastrofalnog kolapsa cijelog silosa. To se događa uglavnom zbog nedostatka znanja o složenim pojavama u rastresitim materijalima koji su u interakciji s konstrukcijom, odnosno stijenkama silosa. Osim nesimetričnih tlakova koji djeluju na stijenke silosa te opterećenja uzrokovanih vjetrom i potresom, potrebno je uzeti u obzir i naprezanja nastala zbog temperaturne razlike između stijenki silosa i uskladištenog materijala, potencijalnu unutarnju eksploziju materijala kao i naprezanja u temeljima i potpornim stupovima. Problem nesmetanog pražnjenja skladišnih ćelija nije točno riješen, a može se najuspješnije riješiti propisanim ispitivanjima uz velike financijske izdatke. [3, 4, 5]

Na slici 1.1 prikazani su silosi tvrtke *Polnet Sp. z o.o.*



Slika 1.1. Silos [1]

Opterećenje tijekom pražnjenja znatno ovisi o načinu protoka uskladištenog materijala, što treba uzeti u obzir tijekom provedbe proračuna. Potencijalni problemi tijekom projektiranja geometrije silosa, a ovisno o načinu protoka materijala, uključuju stvaranje svoda (tzv. zasvođavanje, eng. *arching*) preko otvora ispusta, formiranje cjevaste rupe kroz materijal (eng. *ratholing/piping*) i sam način protoka tijekom pražnjenja. Zasvođavanje ili formiranje cjevaste

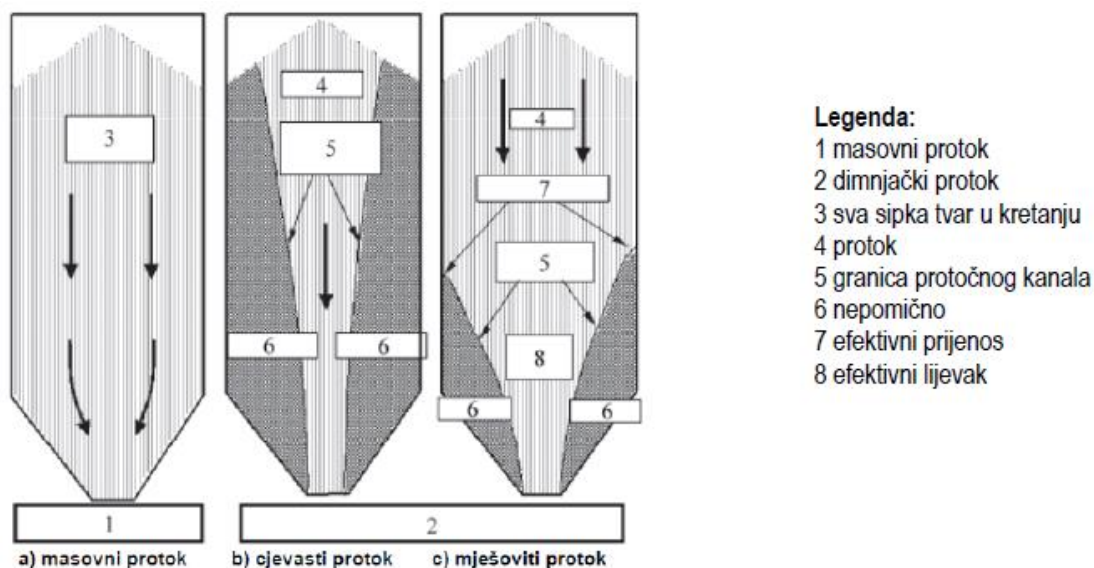


rupe povezano je s kohezivnošću materijala, a način protoka tijekom pražnjenja ovisi o kutu unutarnjeg trenja materijala i trenju koje se pojavljuje između materijala i stijenki silosa. Cilj projektiranja geometrije silosa je postizanje optimuma između iskoristivosti kapaciteta silosa i ukupnih troškova izgradnje. [4]

Kod projektiranja silosa nužno je provjeriti različite omjere dimenzija silosa (vitkosti), geometriju lijevka i postupke pražnjenja silosa jer sve navedeno znatno utječe na proračunske slučajeve koji se trebaju razmotriti. Pritom je potrebno analizirati načine protoka materijala tijekom pražnjenja. Načini protoka rastresite tvari pri pražnjenju silosa prema [4] su:

- masovni protok,
- dimnjački protok - cjevasti protok,
  - mješoviti protok,
- prošireni protok.

Slika 1.2 prikazuje osnovne načine protoka materijala u silosu. U slučaju masovnog protoka, sav materijal u silosu je u pokretu tijekom pražnjenja. Mogućnost masovnog protoka javlja se samo kada su stijenke lijevka strme i glatke te ako se materijal prazni kroz cijeli otvor ispusta. Ako su stijenke lijevka plitke i hrapave, pojavit će se dimnjački protok. Tada je u pokretu jedino dio materijala koji se nalazi iznad ili u okolini otvora. Uz način protoka, od iznimne je važnosti procijeniti je li protok centričan ili postoji ekscentritet prilikom pražnjenja silosa. Budući da se u ovome radu razmatra slučaj masovnog protoka, nepravilni protok materijala nije detaljnije razmatran te je proračun opterećenja silosa proveden prema normi EN 1991-4: Eurocode 1 – Actions on structures - Part 4: Silos and tanks [2].



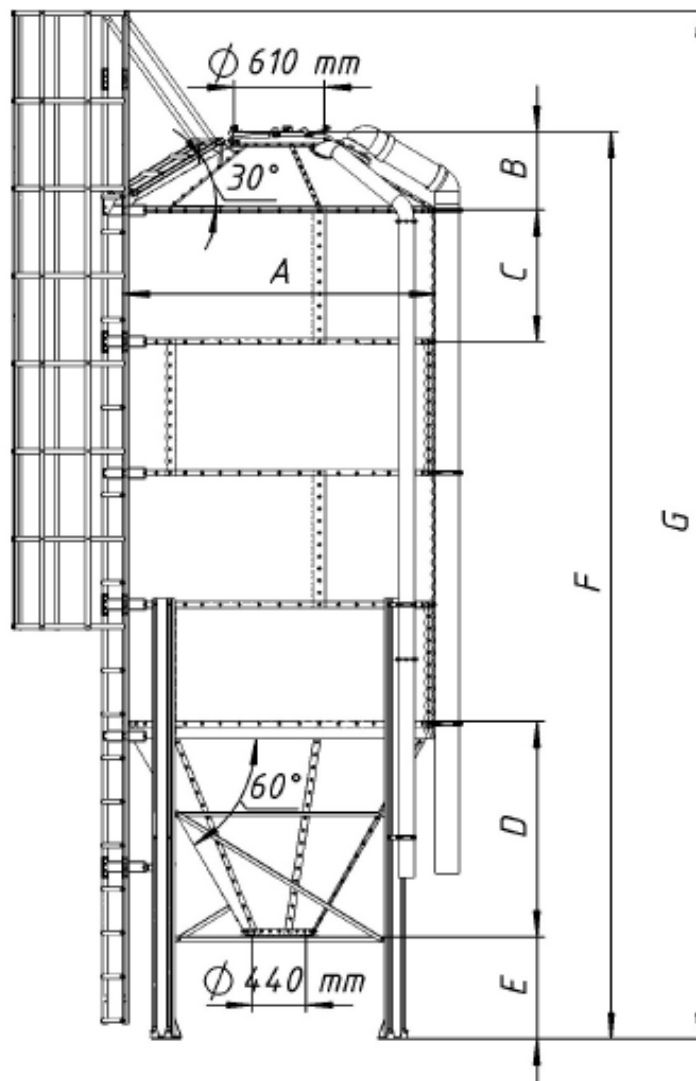
**Slika 1.2. Osnovni načini protoka [4]**

## 2. GEOMETRIJA SILOSA KORIŠTENOG ZA ANALIZU

Za modeliranje 3D modela silosa koristit će se programski paket *Solidworks* [15]. Sama geometrija te ostali podaci potrebni za modeliranje preuzeti su iz priručnika [6] poljske tvrtke *Polnet sp. z o.o.* Ovi silosi namijenjeni su za skladištenje rastresitog materijala gustoće do  $800 \text{ kg/m}^3$ . U poljoprivredi, materijali koji se skladište u silosima i zadovoljavaju traženi kriterij su:

- mješavina/granulat stočne hrane,
- ječam,
- brašno,
- kukuruz,
- soja,
- granulirana šećerna repa.

Slika 2.1 prikazuje opće dimenzije silosa.



Slika 2.1. Opće dimenzije silosa [6]

Ovi silosi su proračunati prema standardima tako da izdrže opterećenje vjetra prve (20 m/s) i druge (24-30 m/s) zone u Poljskoj i karakteristično opterećenje od snijega do 1,9 kN/m<sup>2</sup>. Svaki silos na dnu ima standardizirani otvor promjera 440 mm na koji se može priključiti pužni, vijčani ili lančani transporter poljske ili druge proizvodnje. Na krovu silosa je otvor, također standardiziranog promjera od 610 mm, a sam krov je montiran pod kutom od 30 stupnjeva kako bi spriječio nakupljanje vode ili snijega. Lijevak je konusnog oblika pod kutom od 60 stupnjeva i osigurava neometano istovaranje materijala. Dimenzije za silos tipa od 350-1 do 350-7 se mogu očitati iz tablice 2.1.

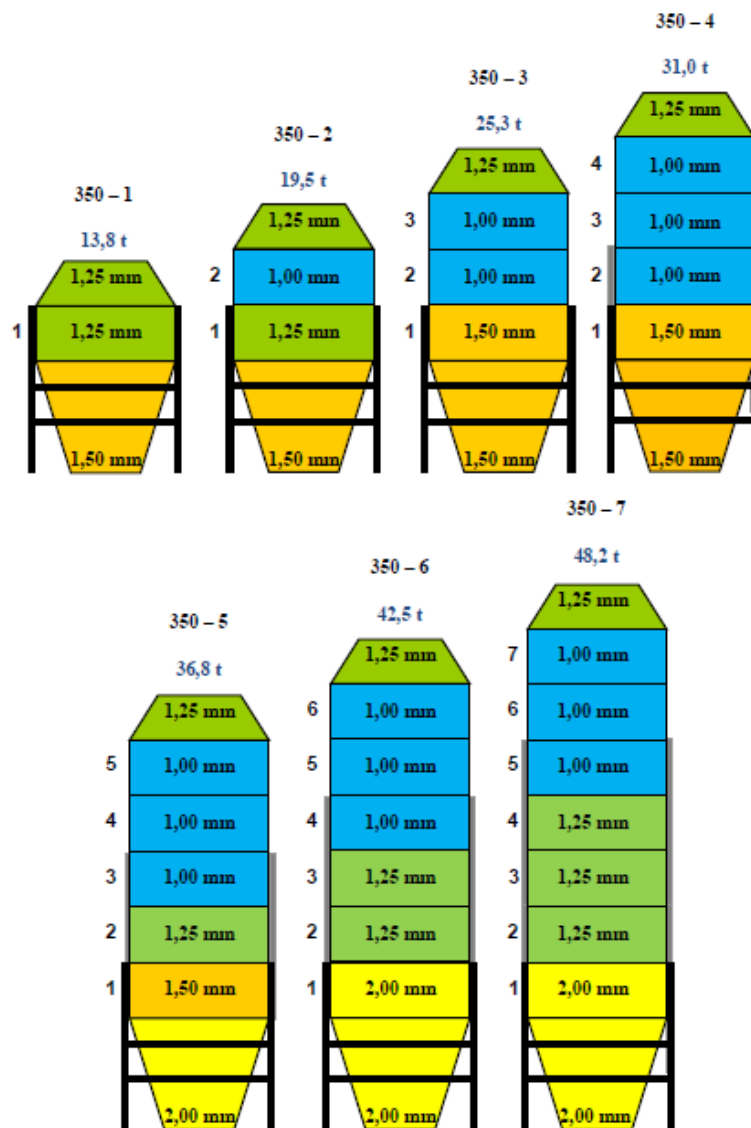
**Tablica 2.1. Dimenzije silosa za tipove od 350 - 1 do 350 – 7 [6]**

| TIP SILOSA                | 350   |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|                           | 350-1 |       | 350-2 |       | 350-3 |       | 350-4 |      | 350-5 |      | 350-6 |      | 350-7 |      |
| A (mm)                    | 3500  |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |
| B (mm)                    | 961   |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |
| C (mm)                    | 902   |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |
| D (mm)                    | 2660  |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |
| E (mm)                    | 750   |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |
| F (mm)                    | 5273  | 6175  | 7077  | 7979  | 8881  | 9783  | 10685 |      |       |      |       |      |       |      |
| G (mm)                    | 6169  | 7071  | 7973  | 8875  | 9777  | 10679 | 11581 |      |       |      |       |      |       |      |
| VOLUMEN (m <sup>3</sup> ) | 21,6  | 30,3  | 39    | 47,7  | 56,4  | 65,1  | 73,8  |      |       |      |       |      |       |      |
| TEŽINA HRANE (t)          | 14,48 | 20,31 | 26,13 | 31,96 | 37,79 | 43,62 | 49,45 |      |       |      |       |      |       |      |
| TEŽINA ŽITARICE (t)       | 17,28 | 24,24 | 31,20 | 38,16 | 45,12 | 52,08 | 59,04 |      |       |      |       |      |       |      |
| TEŽINA SILOSA (kg)        | 836   | 879   | 933   | 982   | 1055  | 1111  | 1250  | 1312 | 1480  | 1549 | 1626  | 1702 | 1839  | 1921 |
| BROJ NOGU                 | 8     |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |
| VISINA NOGU (mm)          | 4,2   |       |       |       |       |       |       |      |       |      |       |      |       |      |

Kako se s visinom silosa mijenja opterećenje na stijenke, tako se i proračunate debljine stijenki silosa s visinom mijenjaju. Debljine stijenki za pojedini odjeljak, u ovisnosti o tipu silosa, prikazane su na slici 2.2. Krov silosa je također izrađen i sklopljen prema dokumentaciji iz priručnika, kao i ostali konstrukcijski dijelovi koji su bitni za provođenje analize.

Proces montaže ovakvih silosa s konusnim dnom vrši se odozgo prema dolje. Dakle, prvo se montira gornji cilindrični odjeljak na koji se zatim postavi krov silosa. Potom, dizalicama se podižu sastavljene komponente silosa i montiraju se niži odjeljci sve do montaže lijevka. Zatim se postavljaju potporni stupovi, tj. noge silosa, koje se međusobno pričvršćuju manjim čeličnim profilima kako bi dali stabilnost i čvrstoću nosivog dijela konstrukcije. Pod utjecajem različitih vrsta opterećenja konstrukcija mora biti otporna kako na izvijanje, tako i na savijanje.

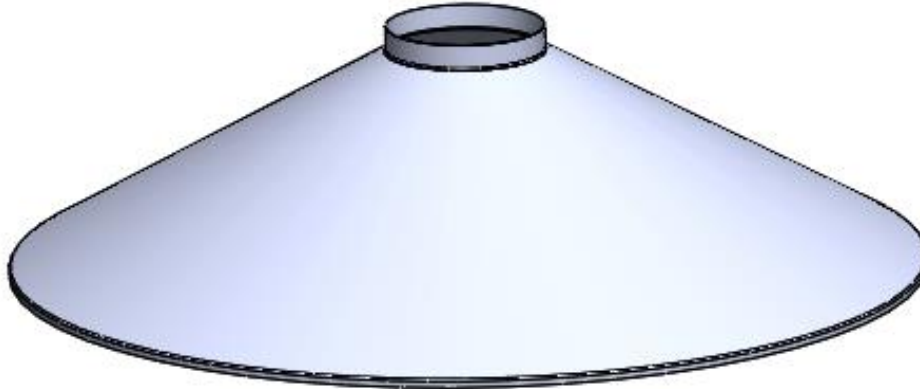
Prije numeričke analize, tijekom modeliranja 3D modela, bitno je pojednostaviti model kako bi se numerička analiza mogla što lakše i brže provesti. Pritom treba paziti, naravno, da se pojednostave ili izbace samo oni konstrukcijski dijelovi i značajke koji neće znatno utjecati na rezultate analize. Dakle, veoma bitno je poznavati što se događa u cijeloj konstrukciji, kakva su opterećenja i koji dijelovi bespotrebno kompliciraju numeričku analizu. Također, provedena je dodatna „iteracija pojednostavljenja“ 3D modela tijekom provođenja same analize kako bi se postigao optimum između trajanja cijelog procesa analize metodom konačnih elemenata i točnosti dobivenog rješenja.



Slika 2.2. Debljine stijenki za pojedine odjeljke silosa [6]

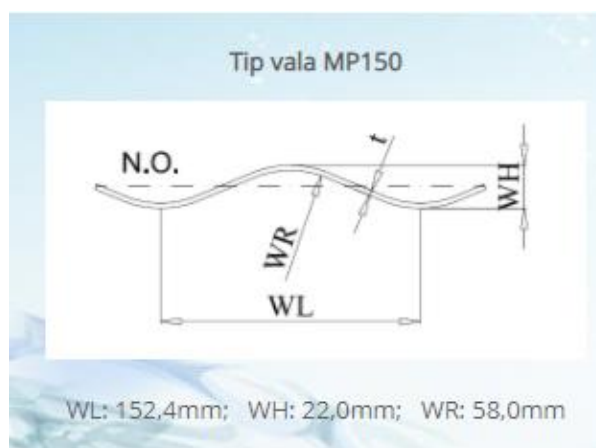
Krenuvši od krova silosa koji je u stvarnosti izrađen u segmentima koji se zatim vijcima spajaju i pričvršćuju za cilindrični dio, modelirat će se kao jedan segment od glatkog lima. Time se izbjegava mnoštvo veza između svakog segmenta koje bi se inače u *Abaqusu* morale dodijeliti.

Isto tako, provrti u krovu za montiranje cijevi za ventilaciju i punjenje silosa su također zanemareni jer ne utječu na analizu, a znatno kompliciraju diskretizaciju krova. Slika 2.3 prikazuje model krova silosa.



**Slika 2.3. Krov silosa**

Cilindrični dio sastavljen je tako da nekoliko međusobno vijcima spojenih segmenata od valovitog lima čini jedan odjeljak. Kao što je već spomenuto, debljina limova varira po pojedinim odjeljcima, ovisno o visini na kojoj se nalazi odjeljak. Tako su odjeljci koji su montirani na nižoj razini sastavljeni od segmenata limova veće debljine što je i logično jer su niži dijelovi više opterećeni. Također, cilindrični dio izrađen je od valovitih limova prema [7], a njihova prednost je dobivanje čvršće konstrukcije otpornije na deformacije i prelamanje sunčevih zraka čime se sprječava pretjerano zagrijavanje pohranjenog materijala. Slika 2.4 prikazuje dimenzije vala lima prema kojima je modeliran valoviti lim.



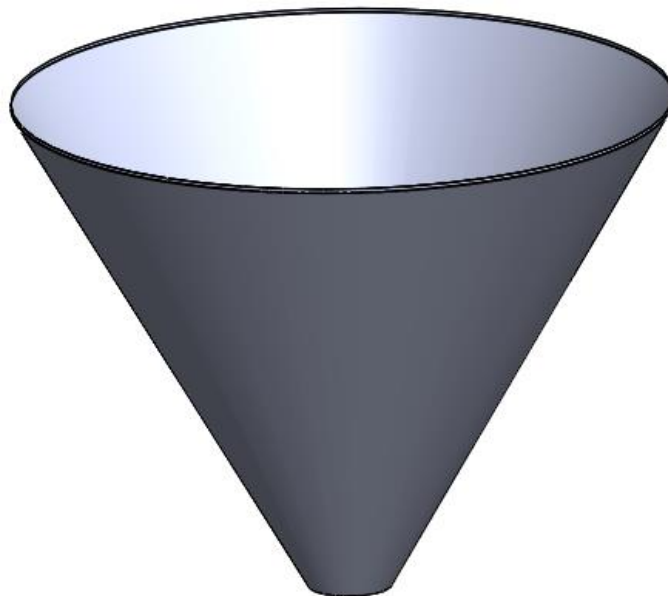
**Slika 2.4. Dimenzije vala lima [7]**

Na slici 2.5 nalazi se jedan odjeljak cilindričnog dijela silosa izrađen od valovitog lima. Prilikom montaže bitno je da se gornji odjeljak unutarnjim dijelom naslanja na vanjski dio nižeg odjeljka kako bi se sprječilo propuštanje vode prilikom padanja kiše ili topljenja snijega.



**Slika 2.5. Cilindrični odjeljak od valovitog lima**

Lijevak je kao i krov silosa modeliran iz jednog segmenta glatkog lima pod nagibom od 60 stupnjeva. Na dnu se nalazi otvor standardiziranog promjera za istovar uskladištenog materijala, a strmi nagib omogućava neometano pražnjenje silosa. Na slici 2.6 nalazi se 3D model lijevka koji zajedno s krovom i cilindričnim dijelom čini komoru silosa.



**Slika 2.6. Lijevak silosa**

Broj nogu koje drže cijeli silos čvrstim i uspravnim ovisi o veličini i tipu silosa. Zbog svoje veličine silosi tipa 350 moraju imati 8 nogu, a onima koji imaju više cilindričnih odjeljaka potrebno je „produžiti“, odnosno pričvrstiti dodatne noge. Također, potrebni su manji metalni profili koji se pričvršćuju za glavne profile radi dodatnog učvršćivanja konstrukcije. Cijeli podsklop se može vidjeti na slici 2.7.



**Slika 2.7. Noge silosa s ojačanjima**

Nakon što su modelirane sve komponente potrebno ih je sklopiti u jednu cjelinu koja predstavlja nosivu konstrukciju silosa za skladištenje žitarica. Cijeli sklop prikazan je na slici 2.8.

Kao što je navedeno prije u ovome poglavlju, za numeričku analizu je potrebno pojednostaviti konstrukciju koliko god je to moguće, a da se ne utječe znatno na čvrstoću konstrukcije. Tako su ovdje izbačeni svi manji provrti, otvori za kontrolu uskladištenog materijala, cijevi za ventilaciju i punjenje silosa. Ljestve koje bi znatno zakomplicirale diskretizaciju su zamijenjene postavljanjem koncentrirane sile u centar mase koja predstavlja opterećenje od težine ljestvi. Lijevak, krov te svaki cilindrični odjeljak silosa modelirani su iz jednog segmenta čime se izbjeglo postavljanje velikog broja veza u *Abaqusu*, a pritom ne mijenjajući čvrstoću cijele konstrukcije.

Prije same numeričke analize ukratko je opisana metoda konačnih elemenata te konačni elementi koji su korišteni u analizi. Također, provedena je verifikacija konačnih elemenata na jednostavnijem primjeru kako bi se utvrdilo koji elementi su najpogodniji za analizu ovog zadatka.





Slika 2.8. Nosiva konstrukcija silosa



### 3. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja je neizostavna u inženjerskim proračunima. To je približna numerička metoda jer su sva dobivena rješenja približna, a uz ispravan odabir proračunskog modela i konačnih elemenata moguće je približiti se realnim vrijednostima, odnosno opisati realni proces deformiranja. Temelji se na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Odnosno, kontinuum s beskonačno stupnjeva slobode gibanja zamjenjuje se s diskretnim modelom koji ima ograničen broj stupnjeva slobode, tj. ima konačan broj potpodručja koja se zovu konačni elementi. Dakle, razmatrani kontinuum pretvara se u mrežu konačnih elemenata.

Konačni elementi međusobno su povezani u točkama koje se nazivaju čvorovi. Stanje u svakom elementu (npr. polje pomaka, deformacije, naprezanja, temperature te ostalih veličina) opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija koje moraju zadovoljiti odgovarajuće uvjete kako bi se moglo realno opisati ponašanje kontinuiranog sustava. Povećavanjem broja konačnih elemenata te uz njihovu pravilnu formulaciju raste i približavanje točnom rješenju.

Nakon izvođenja jednadžbi za konačni element, gdje su nepoznanice neovisne varijable u čvorovima, odgovarajućim postupcima izvode se globalne jednadžbe za diskretizirani model. Pomoću izračunatih čvornih veličina moguće je, primjenom poznatih teorijskih relacija, odrediti sve veličine potrebne za analizu opisanoga kontinuiranog sustava.

Metoda konačnih elemenata primjenjuje se u mehanici za rješavanje problema statike i dinamike, i jednako tako za rješavanje općih problema polja kao što su proračun temperaturnih polja, proračun strujanja te analiza elektromagnetskih polja. Izvođenje sustava algebarskih jednadžbi analogno je za sva spomenuta područja.

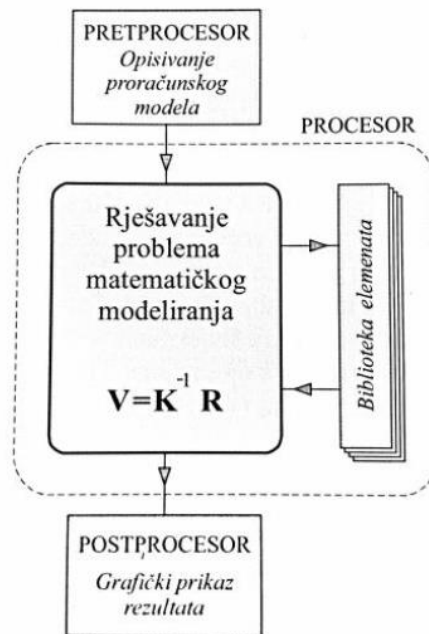
Složene konstrukcije zahtijevaju diskretizaciju s velikim brojem elemenata te valja riješiti sustav algebarskih jednadžbi s velikim brojem nepoznanica, što je gotovo nemoguće postići bez računala. Razvoj računalne tehnologije i pojava snažnijih računala posljedično je vodila i do razvoja metode konačnih elemenata čime se znatno poboljšala optimizacija složenih konstrukcija, u pogledu iskoristivosti materijala i zadovoljavanja čvrstoće. [8]

#### 3.1. Opis programa za računanje pomoću MKE

Rješavanje problema pomoću MKE provodi se primjenom računala, najčešće korištenjem postojećih programskih paketa (u ovom radu koristi se programski paket *Abaqus*) u kojima su već programirani postupci izračunavanja, shematski prikazani na slici 3.1. Glavni zadatak je

izrada proračunskog modela i definiranje ulaznih podataka. Radi lakšeg upravljanja i kontrole podataka, većina programskih paketa je podijeljena u nekoliko dijelova – najčešće tri radne faze:

- učitavanje ulaznih podataka (pretprocesor),
- izračunavanje (procesor),
- prikaz rezultata (postprocesor). [8]



Slika 3.1. Grafički prikaz rada programa [8]

### 3.2. Programski paket *Abaqus* [11]

*Abaqus* je skup moćnih inženjerskih simulacijskih programa koji se zasniva na metodi konačnih elemenata. Njime se mogu rješavati od jednostavnijih linearnih problema pa sve do najkompliciranijih nelinearnih simulacija. Najčešće se koristi za analizu pomaka i naprezanja, ali isto tako i u područjima prijenosa topline, difuzije mase, akustične analize i mnogih drugih. Širok spektar elemenata u *Abaqusu* omogućuje modeliranje bilo koje geometrije. Isto tako, velik izbor materijala omogućuje simuliranje ponašanja često korištenih inženjerskih materijala kao što su metali, guma, poliesteri, kompoziti, armirani beton, drobljive i elastične pjene, geotehnički materijali (npr. tla i stijene), itd.

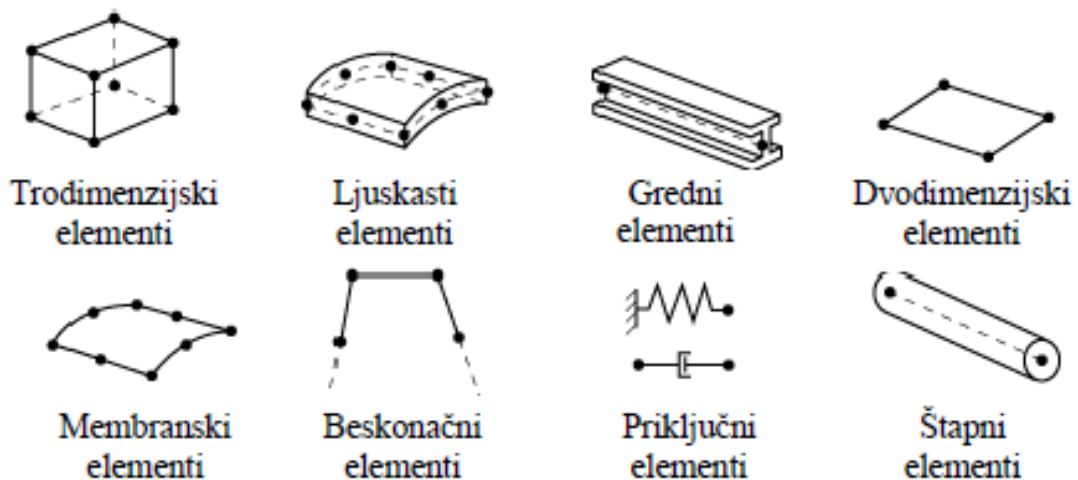
#### 3.2.1. Konačni elementi u *Abaqusu*

U *Abaqusu* je dostupan širok raspon konačnih elemenata (KE). Takva opsežna baza elemenata omogućuje rješavanje i najkompliciranijih problema. Svaki element karakteriziraju sljedeća obilježja:

- skupina,
- stupnjevi slobode (izravno se odnose na skupinu),
- broj čvorova,
- formulacija,
- integracija.

Svaki element ima svoje jedinstveno ime (npr. T2D2, S4R, C3D8I). Iz naziva elementa možemo iščitati svaki od prethodno nabrojanih obilježja.

Kako prikazuje slika 3.2, najčešće skupine konačnih elemenata su trodimenzijski, ljuskasti, gredni, dvodimenzijski, membranski, beskonačni, priključni te štapni elementi. Detaljnije će se prikazati elementi koji će se u ovom radu koristiti za analizu silosa.

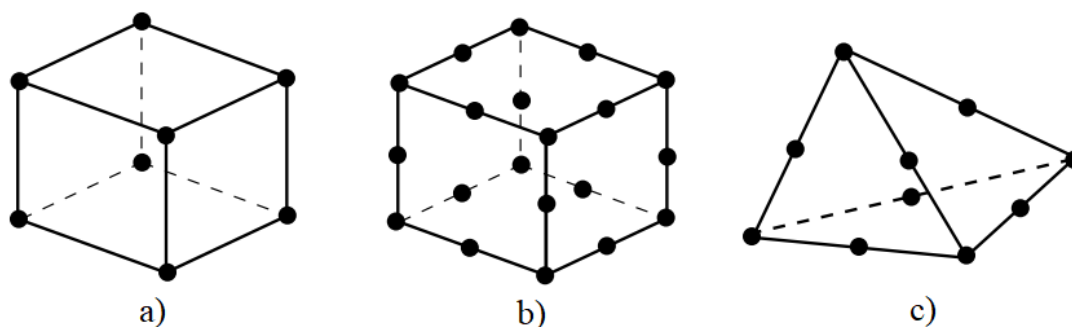


Slika 3.2. Najčešće korištene skupine KE [11]

### 3.2.2. Trodimenzijski konačni elementi

Između svih skupina elemenata, trodimenzijski konačni elementi mogu se koristiti za modeliranje najrazličitijih geometrija izloženih gotovo svakom opterećenju. Mogu biti u obliku četverostrane prizme (eng. *hexahedron*), trostrane prizme (eng. *wedge*) i tetraedra (eng. *tetrahedron*). Kod ovih elemenata svaki čvor ima 3 stupnja slobode gibanja, a to su pomaci u smjerovima osi  $x$ ,  $y$  i  $z$ . Kad god je to moguće, u *Abaqusu* treba koristiti heksaedarske konačne elemente ili tetraedarske elemente drugog reda. Tetraedarski elementi prvog reda (C3D4) imaju jednostavnu formulaciju s konstantnim deformacijama i stoga treba rabiti puno finiju mrežu za postizanje dobrih (preciznijih) rezultata. Na slici 3.3 prikazani su najčešće korišteni trodimenzijski elementi. Općenito, heksaedarski elementi drugog reda s reduciranom

integracijom daju podjednako dobre rezultate kao oni s punom integracijom. S druge strane, korištenjem elemenata s reduciranom integracijom značajno se smanjuje računalno vrijeme, pogotovo za trodimenzijske elemente. Na primjer, element C3D20 ima 27 točaka integracije ( $3 \times 3 \times 3 = 27$ ) dok element C3D20R ima 8 točaka integracije ( $2 \times 2 \times 2 = 8$ ). Stoga, u ovome zadatku prikladnije je korištenje elemenata drugog reda s reduciranom integracijom, što će se i pokazati u sljedećem poglavlju pri provođenju verifikacije.



Slika 3.3. Najčešće korišteni 3D elementi: a) heksaedarski element 1. reda, b) heksaedarski element 2. reda, c) tetraedarski elementi 2. reda [11]

Slika 3.4 prikazuje točke integracije za 2D elemente prvog i drugog reda za slučaj potpune i reducirane integracije pri čemu se analogno može dobiti broj točaka integracije za 3D element množenjem s brojem točaka u smjeru treće osi.

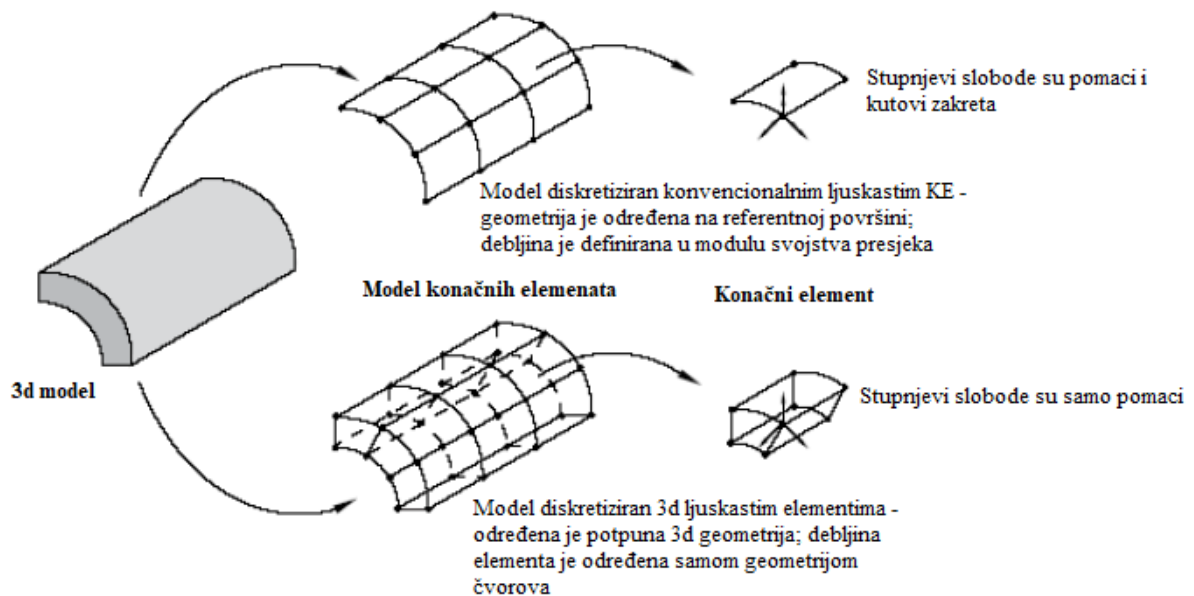
|                      | Potpuna integracija | Reducirana integracija |
|----------------------|---------------------|------------------------|
| Elementi prvog reda  |                     |                        |
| Elementi drugog reda |                     |                        |

Slika 3.4. Točke integracije za 2D kvadratne elemente [11]

### 3.2.3. Ljuskasti elementi

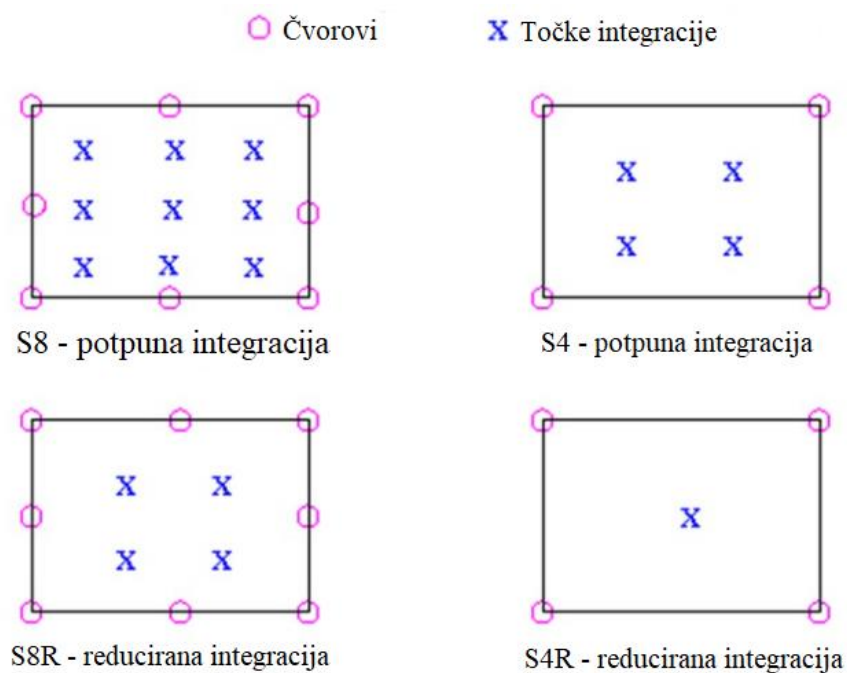
U *Abaqusu* su dostupne dvije vrste ljuskastih elemenata, a to su konvencionalni ljuskasti elementi i 3D ljuskasti element. Osnovna razlika je u tome što konvencionalni ljuskasti elementi

imaju za stupnjeve slobode pomake i kutove zakreta, dok ljuskasti elementi za diskretiziranje 3D geometrije imaju samo pomake kao stupnjeve slobode u čvorovima. Međutim, formulirani su tako da im je ponašanje slično konvencionalnim ljuskastim elementima. Na slici 3.5 prikazani su tipovi ljuskastih elemenata.



Slika 3.5. Tipovi ljuskastih konačnih elemenata [11]

Slika 3.6 prikazuje čvorove i točke integracije za ljuskaste elemente za slučaj prvog i drugog reda te potpunu i reduciranu integraciju.



Slika 3.6. Točke integracije za ljuskaste elemente [10]

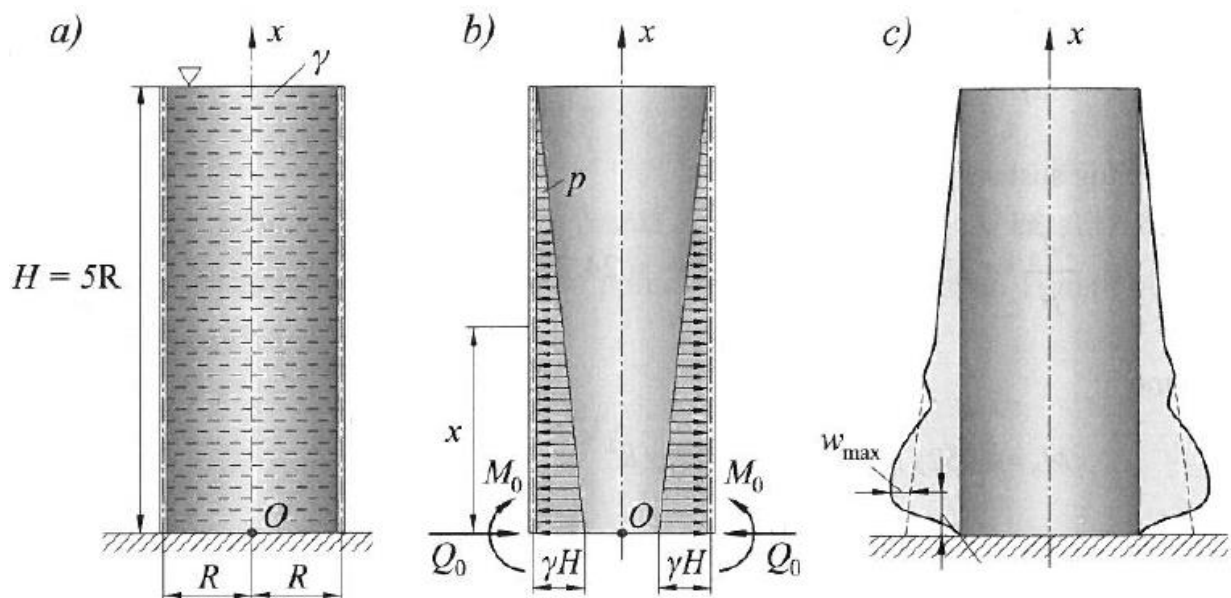
## 4. VERIFIKACIJA

Kako bi se postigla što bolja rješenja i što je više moguće uštedjelo na računalnom vremenu, provedena je verifikacija konačnih elemenata na jednostavnijem primjeru za koji se mogu dobiti analitička rješenja pri čemu je referentni parametar bio maksimalni progib. Verifikacija je provedena na način da je uspoređena točnost i brzina konvergencije samog rješenja za različite vrste konačnih elemenata. Na taj način u daljnjoj analizi silosa korišteni su oni konačni elementi koji su se pokazali najboljima za tu vrstu geometrije i opterećenja.

### 4.1. Analitičko rješenje

Za verifikaciju je korišten primjer 14.4., preuzet iz [9] te s promijenjenim nekim ulaznim podacima.

Cilindrični spremnik za tekućinu, polumjera  $R$ , visine  $H$  i debljine stijenke  $h$  ispunjen je tekućinom specifične težine  $\gamma$  prema slici 4.1. Cilindrična stijenka je na dnu uklještena. Odrediti poprečnu silu  $Q_0$ , moment savijanja  $M_0$  na mjestu uklještenja, te veličinu i mjesto najvećeg radijalnog pomaka stijenke. Zadano:  $\gamma$ ,  $E$ ,  $\nu$ ,  $h$ ,  $R = 50h$ ,  $H = 250h$ .



Slika 4.1. Cilindrični spremnik opterećen hidrostatičkim tlakom [9]

Cilindrična ljuska opterećena je hidrostatskim tlakom koji se može zapisati u sljedećem obliku:

$$p_h = \gamma(H - x). \quad (4.1)$$

Budući da je spremnik postavljen vertikalno na horizontalnoj podlozi, uklješten na dnu te otvoren na vrhu, meridijanska sila  $N_x$  iznosi nula (meridijanski glavni polumjer  $r_1$  je beskonačan).

Za cijeli spremnik vrijedi

$$N_x = 0. \quad (4.2)$$

Iznos cirkularne sile ovisi o hidrostatskom tlaku:

$$\begin{aligned} \frac{N_x}{r_1} + \frac{N_\varphi}{r_2} &= p_n, \\ N_\varphi &= p_h r_2, \end{aligned} \quad (4.3)$$

gdje je  $r_2$  cirkularni glavni radijus zakrivljenosti koji iznosi

$$r_2 = R. \quad (4.4)$$

Ako izraze (4.1) i (4.4) uvrstimo u izraz (4.3), izraz za cirkularnu silu glasi:

$$N_\varphi = \gamma R(H - x). \quad (4.5)$$

Sada, kada su poznati izrazi za cirkularnu i meridijansku silu u cilindričnom spremniku, moguće je zapisati i izraz za radijalne membranske pomake:

$$\begin{aligned} w_c^m &= \frac{r}{Eh} (N_\varphi - \nu N_x), \\ w_c^m &= \frac{\gamma R^2 (H - x)}{Eh}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Derivacijom radijalnog membranskog pomaka po  $x$  dobije se izraz za kutni membranski zakret:

$$\alpha_c^m = \frac{\gamma R^2}{Eh} \quad (4.7)$$

Na dnu posude ( $x = 0$ ) membranski pomak i zakret iznose

$$w_c^m(x=0) = \frac{\gamma R^2 H}{Eh}, \quad \alpha_c^m(x=0) = \frac{\gamma R^2}{Eh}. \quad (4.8)$$

Membranski pomaci su partikularno rješenje diferencijalne jednadžbe cilindrične ljuske.

Ukupne pomake čine membranski i fleksijski pomaci, tj.

$$\begin{aligned} w_c &= w_c^m + w_c^f = 0, \\ \alpha_c &= \alpha_c^m + \alpha_c^f = 0. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Ti pomaci su jednaki nuli zato što je cilindrična ljuska na dnu uklještena. Fleksijski pomaci određuju se pomoću uplivnih koeficijenata

$$\alpha_{11} = \frac{1}{2D\beta^3}, \quad \alpha_{12} = \alpha_{21} = \frac{1}{2D\beta^2}, \quad \alpha_{22} = \frac{1}{D\beta}, \quad (4.10)$$

gdje je  $D$  fleksijska krutost ljuske, a  $\beta$  geometrijsko-materijalna značajka cilindrične ljuske te su definirani sljedećim izrazima:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (4.11)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Eh}{4DR^2}}. \quad (4.12)$$

Za čelik i većinu drugih metalnih materijala se može približno uzeti da je  $\nu = 0,3$ . Nakon uvrštavanja izraza (4.11) u izraz (4.12) i sređivanja, dobit će se

$$\beta = \frac{1,2854}{\sqrt{Rh}}. \quad (4.13)$$

Fleksijski pomaci iznose

$$\begin{aligned} w_c^f &= -\alpha_{11}Q_0 + \alpha_{12}M_0 = -\frac{Q_0}{2D\beta^3} + \frac{M_0}{2D\beta^2}, \\ \alpha_c^f &= -\alpha_{21}Q_0 + \alpha_{22}M_0 = -\frac{Q_0}{2D\beta^2} + \frac{M_0}{D\beta}. \end{aligned} \quad (4.14)$$

Ako jednačbe (4.8) i (4.14) uvrstimo u (4.9) dobit ćemo dvije jednačbe s dvije nepoznane  $Q_0$  i  $M_0$ , tj.

$$\begin{aligned} \frac{\gamma R^2 H}{Eh} - \frac{Q_0}{2D\beta^3} + \frac{M_0}{2D\beta^2} &= 0, \\ \frac{\gamma R^2}{Eh} - \frac{Q_0}{2D\beta^2} + \frac{M_0}{D\beta} &= 0. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Nakon uvrštavanja (4.11) i (4.13) u (4.15) te rješavanja dvije jednačbe s dvije nepoznane dobiju se iznosi nepoznanica  $Q_0$  i  $M_0$

$$\begin{aligned} M_0 &= 27,743 \frac{\gamma R^2 h^2}{12(1-\nu^2)} \beta, \\ Q_0 &= 112,97 \frac{\gamma R^2 h^2}{12(1-\nu^2)} \beta^2. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Sada su poznate sve veličine koje su potrebne za određivanje radijalnog pomaka po visini stijenke cilindričnog spremnika

$$w = \frac{Q_0}{2D\beta^3} f_4(\beta x) + \frac{M_0}{2D\beta^2} f_3(\beta x) + w_p, \quad (4.17)$$



gdje  $f_4(\beta x)$  i  $f_3(\beta x)$  predstavljaju eksponencijalno - trigonometrijske funkcije i izražene su u sljedećem obliku:

$$\begin{aligned} f_3(\beta x) &= e^{-\beta x} (\cos(\beta x) - \sin(\beta x)), \\ f_4(\beta x) &= e^{-\beta x} \cos(\beta x). \end{aligned} \quad (4.18)$$

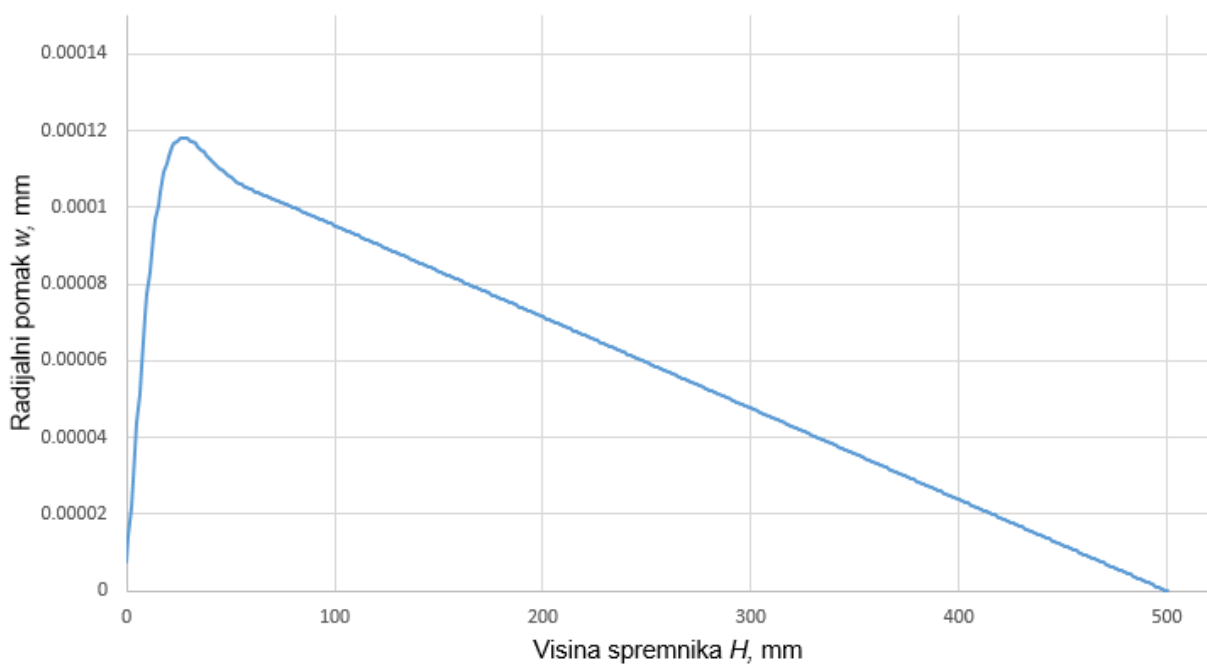
Uvrštavanjem poznatih veličina u izraz (4.17) i sređivanjem dobije se izraz za radijalni pomak u ovisnosti o visini stijenke

$$w(x) = \frac{\gamma R^2}{E} [-310,73 f_4(\beta x) + 76,31 f_3(\beta x)] + \frac{\gamma R^2}{Eh} (H - x). \quad (4.19)$$

Kako bi se mogla provesti verifikacija i usporedba analitičkog i numeričkog rješenja, potrebno je opće veličine zamijeniti brojevima koji opisuju geometriju spremnika i svojstva materijala:

- $R = 100 \text{ mm}$ , - polumjer cilindra spremnika,
- $H = 500 \text{ mm}$  - visina spremnika,
- $h = 2 \text{ mm}$  - debljina stijenke spremnika,
- $\gamma = 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{mm}^3}$  - specifična gustoća tekućine,
- $E = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  - modul elastičnosti,
- $\nu = 0,3$  - Poissonov faktor.

Slika 4.2 prikazuje raspodjelu radijalnog pomaka po visini stijenke spremnika.



**Slika 4.2. Raspodjela pomaka po visini stijenke cilindričnog spremnika**

Zbog uštede vremena dobivanja rješenja, točna raspodjela pomaka po visini stijenke cilindričnog spremnika dobivena je na način da su korištenjem „FOR“ petlje u programskom jeziku C++ izračunate vrijednosti eksponencijalno-trigonometrijskih funkcija, a zatim i vrijednosti samih pomaka za svaki milimetar visine stijenke cilindra. Time su pomaci jednostavno izračunati za bilo koju visinu stijenke. Također, zbog otežanog očitavanja točne vrijednosti s grafa, u C++ napisan je kod i za ispisivanje najveće vrijednosti radijalnog pomaka kao i za visinu stijenke na kojoj se nalazi najveći pomak.

$$w_{\max} = 0,0001181 \text{ mm},$$

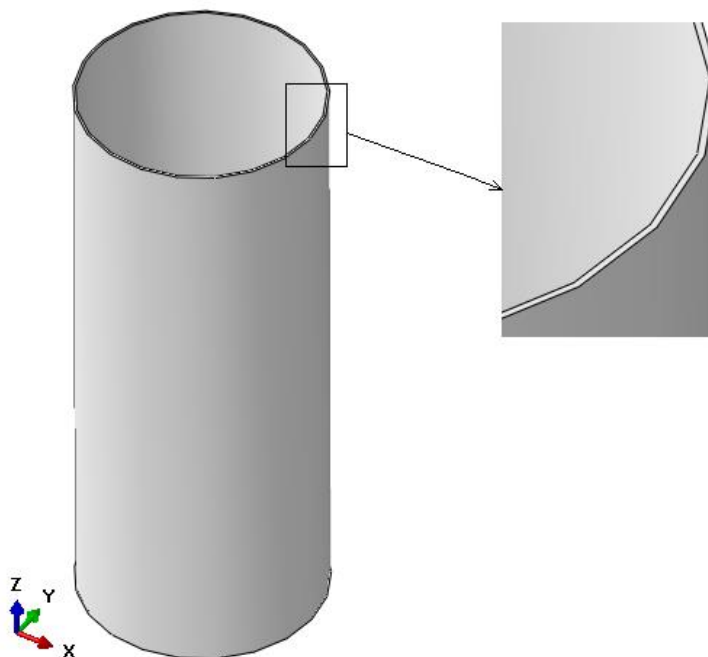
$$x_{w,\max} = 27 \text{ mm}.$$

## 4.2. Numeričko rješenje

Numerička analiza provedena je u programskom paketu *Abaqus* [16] koji se temelji na metodi konačnih elemenata. Za verifikaciju su korištene različite vrste konačnih elemenata te su na temelju usporedbe točnosti i brzine konvergencije rješenja određeni konačni elementi koji su korišteni za analizu silosa. Za primjer 14.4. prikladni su 3D konačni elementi, ljuskasti elementi i osnosimetrični elementi. Budući da je silos koji je analiziran u ovom radu složenije geometrije, a nosiva konstrukcija se sastoji od više komponenti, osnosimetrični konačni elementi nisu korišteni tijekom verifikacije.

### 4.2.1. 3D konačni elementi

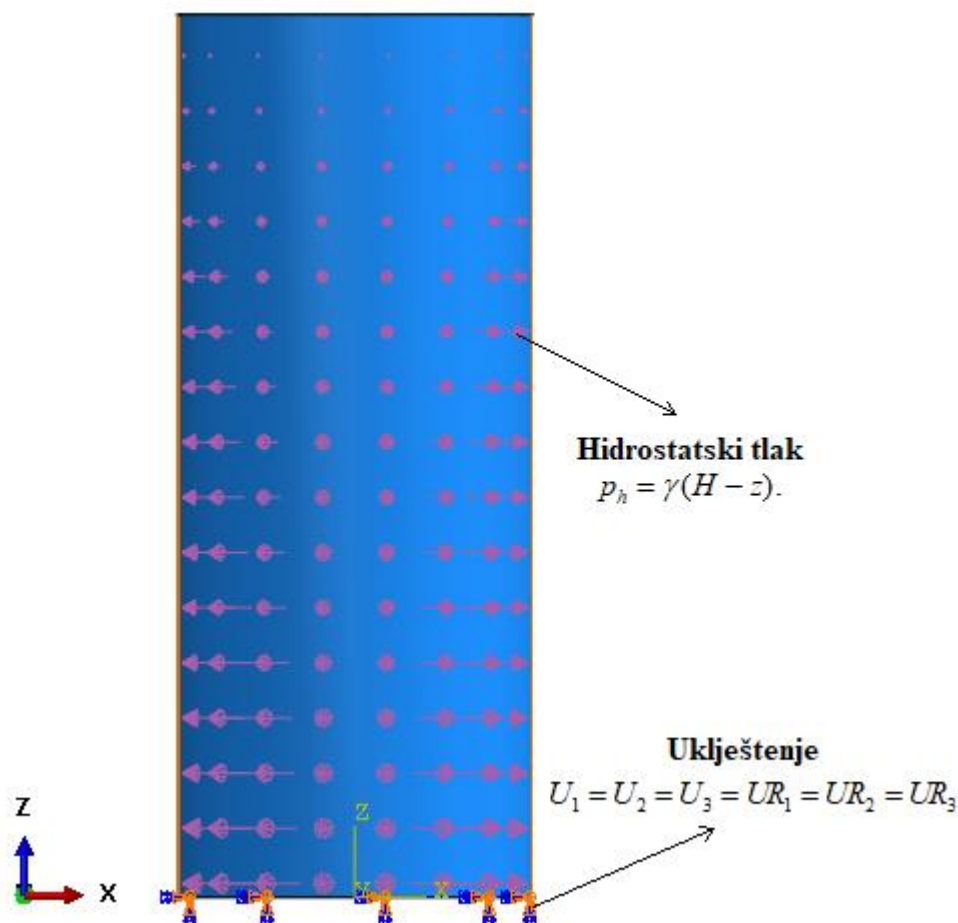
Slika 4.3 prikazuje model spremnika i detalj debljine stijenke.



Slika 4.3. Model spremnika i detalj prikaza debljine stijenke

Za verifikaciju 3D konačnih elemenata modeliran je spremnik s potpunom geometrijom, pri čemu je u *Abaqusu* kod modeliranja spremnika korištena opcija izrade „3D“ i „Solid“ modela. Nakon modeliranja spremnika te definiranja materijala i njegovih svojstava u „Property“ modulu, potrebno je zadati opterećenje i rubne uvjete.

Rubni uvjet predstavlja uklještenje na dnu spremnika što se može vidjeti na slici 4.1, a opterećenje je hidrostatski tlak uzrokovan tekućinom u spremniku. Na slici 4.4 prikazan je presjek spremnika sa zadanim rubnim uvjetima i opterećenjem. Poznato je da se hidrostatski tlak linearno mijenja s dubinom pa je tako zadano i u samom programu. Zadavanje hidrostatskog tlaka može se provesti na dva načina. Prvi je da se u „Load“ modulu tijekom zadavanja tlaka na unutarnju površinu stijenke spremnika odabere opcija „hydrostatic“, a drugi način je da se korištenjem opcije „Analytical fields“ zada funkcija tlaka koji djeluje na spremnik.

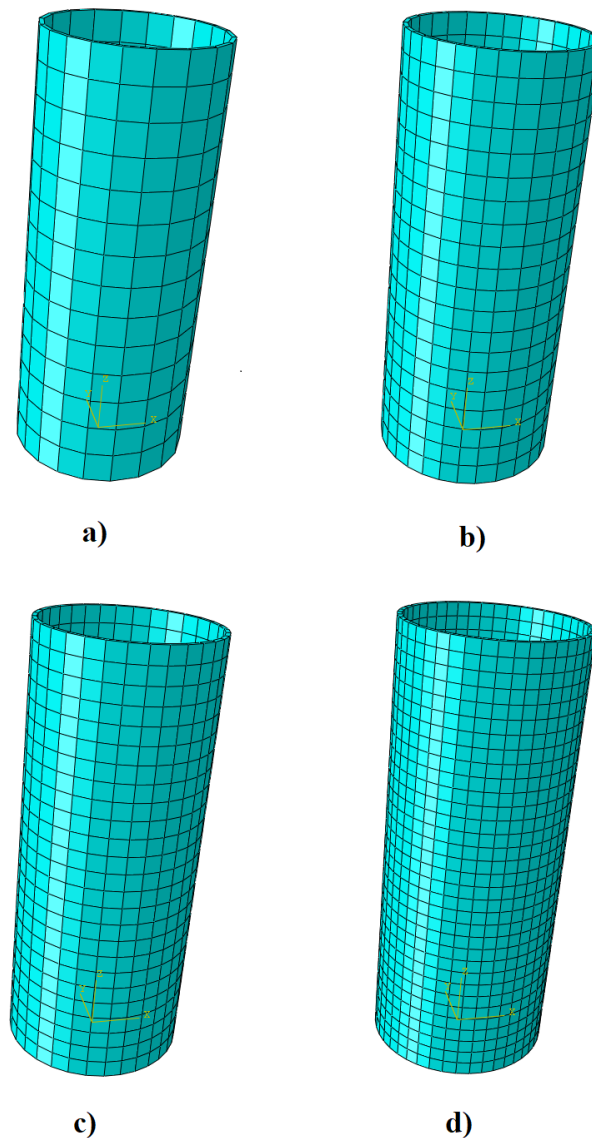


Slika 4.4. Presjek spremnika sa zadanim tlakom i uklještenjem

Sada još preostaje primijeniti različite trodimenzijske konačne elemente te usporediti rezultate analiza s analitičkim rješenjem. Za kreiranje mreže konačnih elemenata korišteni su

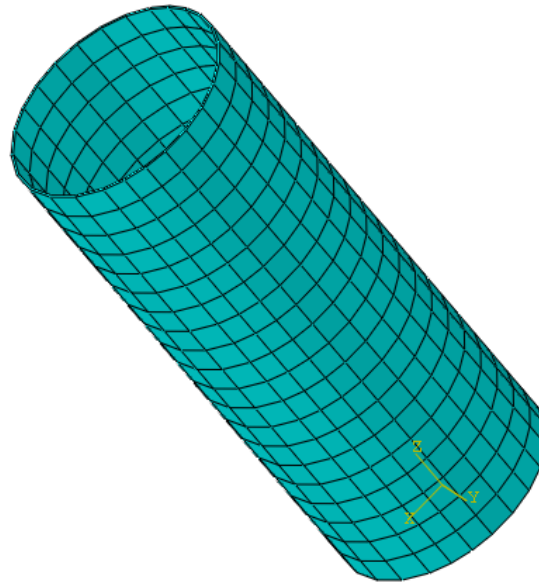
heksaedarski elementi prvog reda (C3D8), heksaedarski elementi drugog reda (C3D20), heksaedarski elementi drugog reda s reduciranom integracijom (C3D20R) i trostrani prizmatični elementi drugog reda (C3D15). Tetraedarski konačni elementi nisu se provjeravali budući da je za pravilnu mrežu bez upozorenja programa o greškama potrebno nekoliko tisuća elemenata. To je i jasno s obzirom na malu debljinu stijenke, odnosno općenitu geometriju spremnika. Za svaku vrstu konačnih elemenata provedena je analiza s različitim brojem elemenata, počevši od grublje pa do sve sitnije mreže, kako bi se mogla provjeriti konvergencija rješenja i odrediti koji su elementi najbolji za analizu silosa.

Slika 4.5 prikazuje različite gustoće mreže konačnih elemenata za C3D8, C3D20 i C3D20R elemente. Na isti način, progušćavanjem mreže, provjeravala se točnost i konvergencija rješenja za C3D15 konačne elemente.

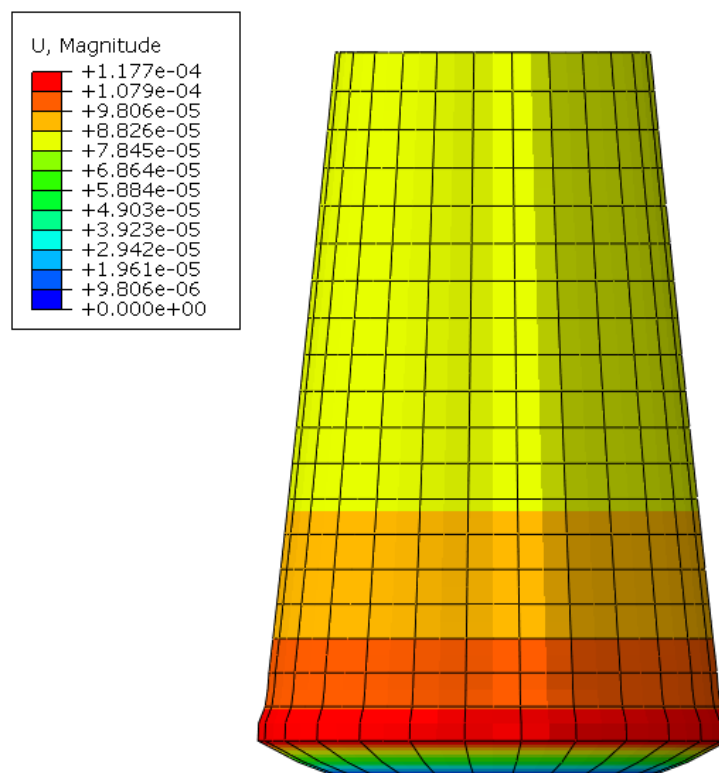


**Slika 4.5. Mreže 3D konačnih elemenata: a) 208 KE, b) 520 KE, c) 800 KE, d) 1386 KE**

Slika 4.6 prikazuje mrežu od 520 heksaedarskih konačnih elemenata drugog reda s reduciranom integracijom kod koje je došlo do značajnije konvergencije i postizanja točnih rješenja, a deformirani oblik i maksimalni pomak u mm prikazan je na slici 4.7.

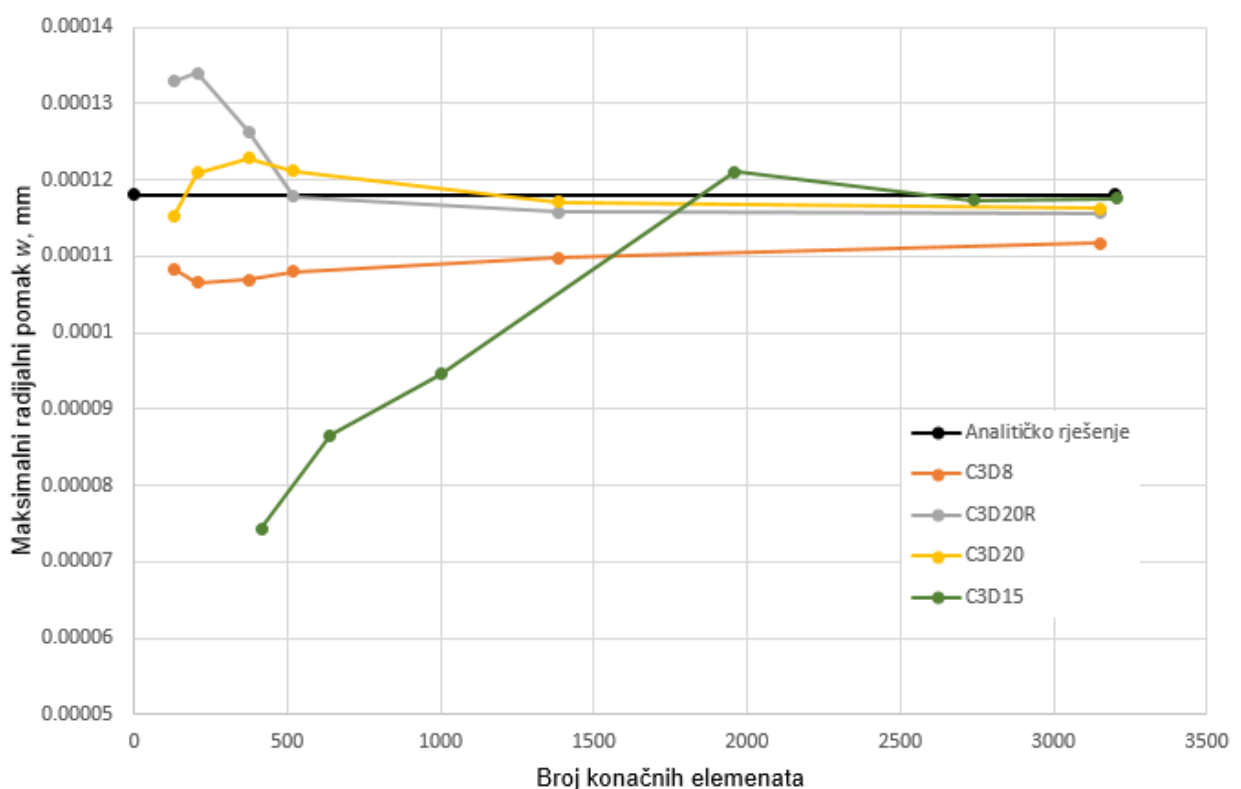


**Slika 4.6. Prikaz mreže od 520 C3D20R konačnih elemenata**



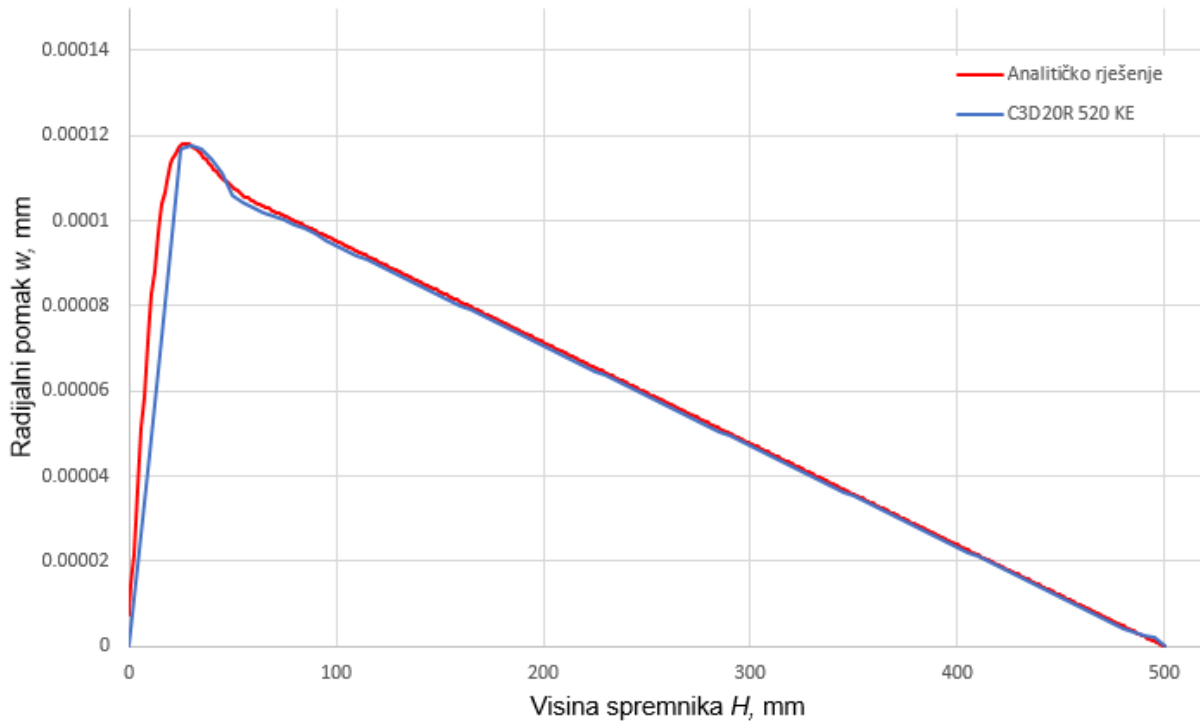
**Slika 4.7. Deformirani oblik i prikaz maksimalnog pomaka spremnika u mm za model s 520 C3D20R KE**

Slika 4.8 prikazuje konvergenciju rješenja za maksimalni radijalni pomak za različite vrste trodimenzijskih konačnih elemenata. Vidljivo je kako za sve tipove konačnih elemenata osim za C3D8 rješenja nemonotono konvergiraju. Ipak, za već oko 500 C3D20 i C3D20R elemenata maksimalni pomaci se razlikuju za manje od 3% od analitičkog rješenja. C3D15 elementi pri malom broju daju netočne rezultate, što je za očekivati jer su zbog geometrije spremnika elementi distordirani za grubu mrežu. Povećanjem broja elemenata i usitnjavanjem mreže, C3D15 elementi daju veoma točne rezultate, za 3200 konačnih elemenata relativna razlika je manja od 1 % u odnosu na analitičke rezultate. C3D8 elementi konvergiraju monotono, ali jako sporo, što znači da bi za precizna rješenja trebao velik broj C3D8 elemenata.



**Slika 4.8. Konvergencija rezultata maksimalnog radijalnog pomaka za različite 3d KE**

Raspodjela pomaka po visini stijenke spremnika u mm za model s 520 C3D20R elemenata i usporedba s raspodjelom pomaka dobivenom analitičkim rješavanjem može se vidjeti na slici 4.9. Možemo vidjeti kako se raspodjela pomaka vrlo dobro podudara s raspodjelom dobivenom analitičkim rješavanjem. Male razlike u pomaku uočavaju se pri dnu spremnika, a javljaju se zbog grube mreže elemenata što se, naravno, rješava progušćivanjem mreže konačnih elemenata.



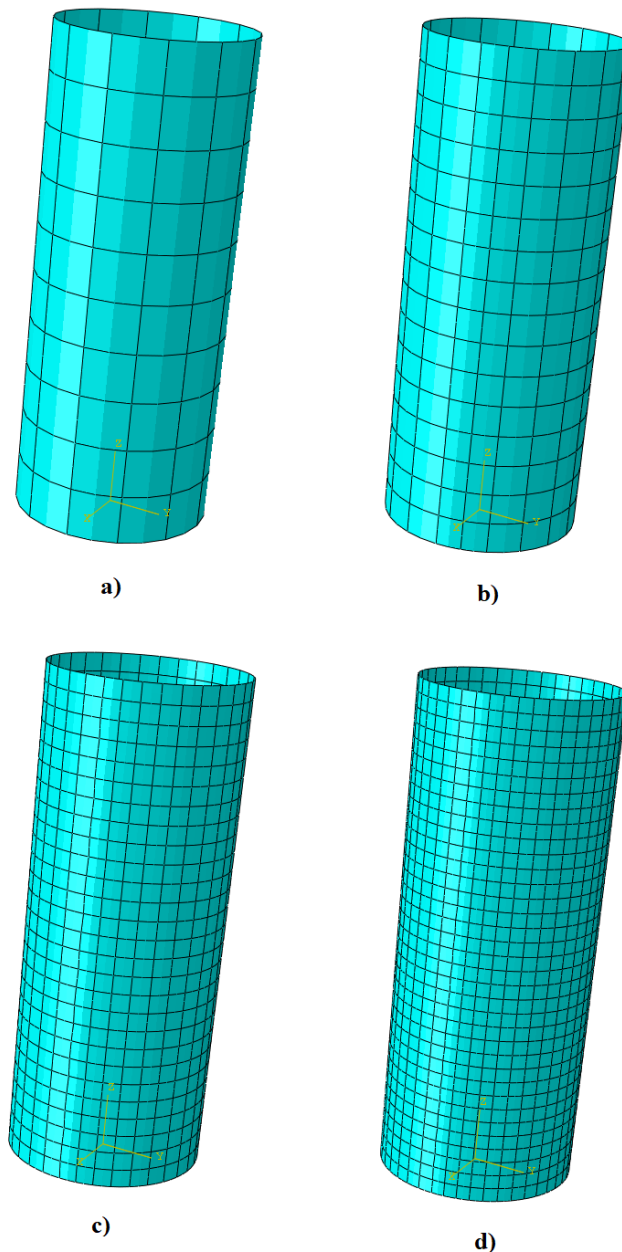
Slika 4.9. Raspodjela radijalnog pomaka po visini stijenke

#### 4.2.2. Ljuskasti konačni elementi

Za razliku od 3D konačnih elemenata, kod korištenja ljuskastih elemenata spremnik se modelira tako što se izostavlja debljina stijenke te se definira naknadno u okviru modula „*Property*“ pri dodjeljivanju presjeka cilindra. U modulu „*Part*“ odabere se „*3D*“ model i „*Shell*“ oblik i zatim se napravi cilindar čiji promjer treba biti jednak promjeru srednje plohe ljuske. Nakon dodjeljivanja materijala i njegovih svojstava te određivanja debljine stijenke potrebno je zadati rubne uvjete i opterećenja. Na kraju je još potrebno diskretizirati spremnik različitim tipovima ljuskastih konačnih elemenata te provjeriti konvergenciju rješenja.

Za diskretizaciju su korišteni četverokutni ljuskasti elementi prvog reda s reduciranom integracijom (S4R5), četverokutni ljuskasti elementi drugog reda s reduciranom integracijom i 5 stupnjeva slobode po čvoru (S8R5) i trokutni ljuskasti elementi drugog reda (STRI65). Dalje, kao i kod korištenja 3D konačnih elemenata, primjenom postupka progušćivanja mreže provjerena je brzina konvergencije i točnost rješenja za navedene tipove elemenata.

Slika 4.10 prikazuje različite gustoće mreže konačnih elemenata za S4R5 i S8R5 konačne elemente. Kako STRI65 konačni elementi imaju drugačiji oblik, nisu prikazani u radu, ali je analognim postupkom progušćavanja mreže provjerena konvergencija i točnost rješenja za te konačne elemente.

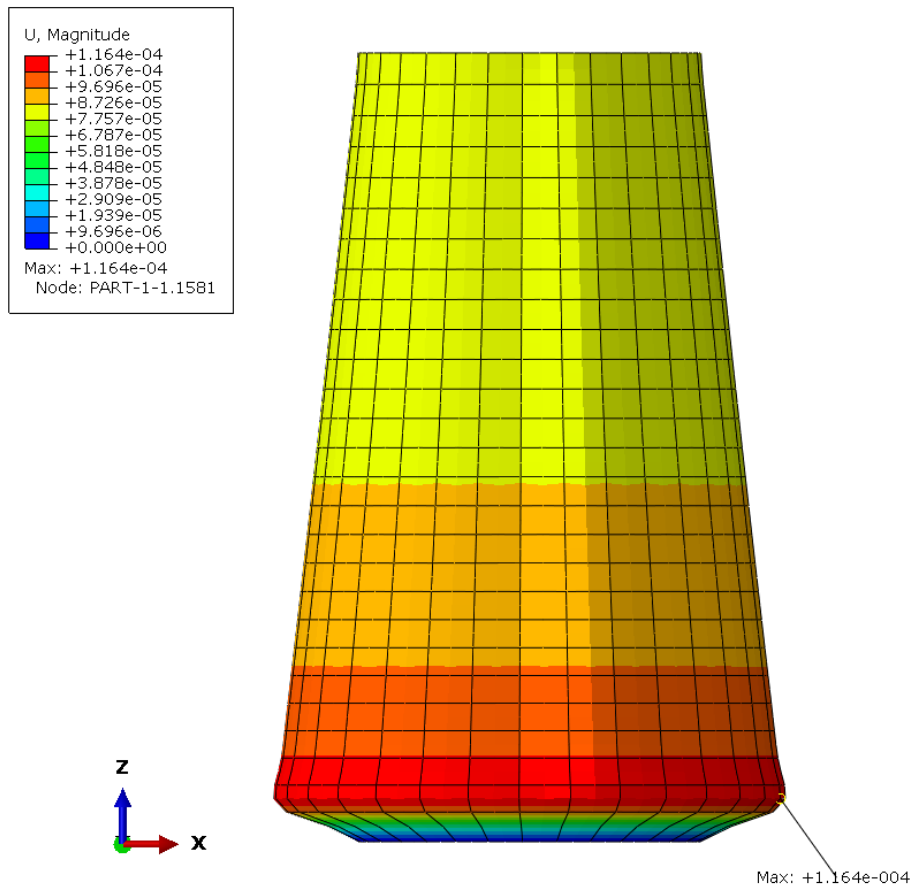


**Slika 4.10. Mreže ljuskastih konačnih elemenata: a) 120 KE, b) 288 KE, c) 864 KE, d) 1470 KE**

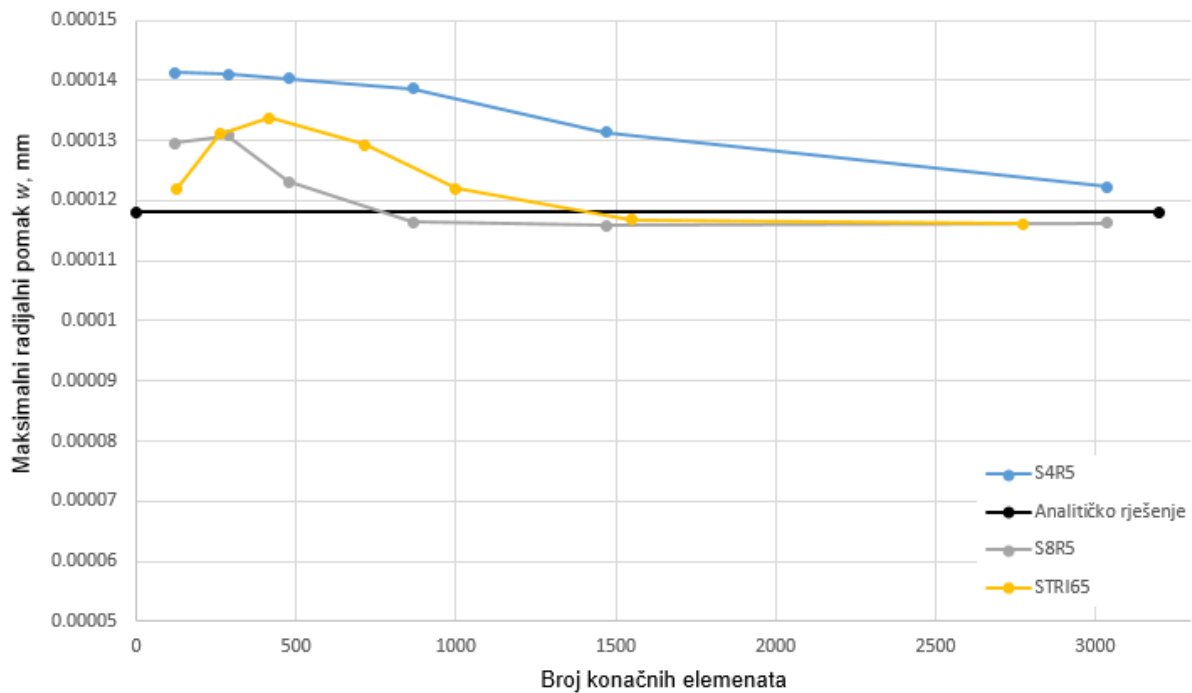
Slika 4.11 prikazuje raspodjelu pomaka spremnika u mm za slučaj kada je korišteno 864 konačna elementa tipa S8R5.

S grafa na slici 4.12 vidljivo je da najbrže konvergiraju četverokutni ljuskasti elementi drugog reda (S8R5). Već za oko 800 konačnih elemenata rješenje odstupa manje od 2 % od analitičkog rješenja i nakon toga se povećavanjem broja elemenata rješenje gotovo ne mijenja. Slična situacija je i s trokutastim ljuskastim elementima (STRI65), ali konvergencija se postiže tek za oko 1500 konačnih elemenata. Četverokutni ljuskasti elementi prvog reda (S4R5) konvergiraju monotono, ali puno sporije u odnosu na S8R5 i STRI65. Odstupanje rješenja za 3,5 % od analitičkog dobije se tek za oko 3000 konačnih elemenata.





Slika 4.11. Deformirani oblik i prikaz maksimalnog pomaka spremnika u mm za model s 864 S8R5 KE



Slika 4.12. Konvergencija rezultata maksimalnog radijalnog pomaka u mm za različite ljuskaste KE

Na kraju ovog poglavlja može se zaključiti kako bi najbolje bilo koristiti heksaedarske elemente drugog reda s reduciranom integracijom (C3D20R) ili ljuskaste elemente drugog reda s reduciranom integracijom (S8R5). Izbor konačnih elemenata ovisi i o tome na koji način će se modelirati sam silos. U ovom slučaju, radi lakšeg modificiranja modela, cijela geometrija silosa ubačena je iz *Solidworks-a* u *Abaqus* opcijom „*Import*“ što znači da su korišteni trodimenzijski konačni elementi – C3D20R.

## 5. OPTEREĆENJA SILOSA

Kako bi se analiza silosa za skladištenje žitarica pravilno provela nužno je razumjeti i poznavati opterećenja koja se javljaju u samoj konstrukciji.

Glavni udio opterećenja predstavlja težina uskladištenog materijala. Osim žitarica koje je dopušteno skladištiti u ovom silosu, navedena je i maksimalna gustoća materijala, tako da će se u zadatku uzeti najnepovoljniji slučaj. Proračun opterećenja kao posljedice težine materijala u silosu proveden je prema EN 1991-4 [2].

Javljaju se još opterećenja od nakupljanja snijega na krovu i naleta vjetra koji opterećuje konstrukciju na savijanje. U priručniku [6] navedeni su podaci za maksimalno dopušteno opterećenje uslijed težine snijega te maksimalnu brzinu vjetra koju silos može izdržati. Opterećenje uslijed naleta vjetra izračunato je prema EN 1991-1-4:2005+A1 [14].

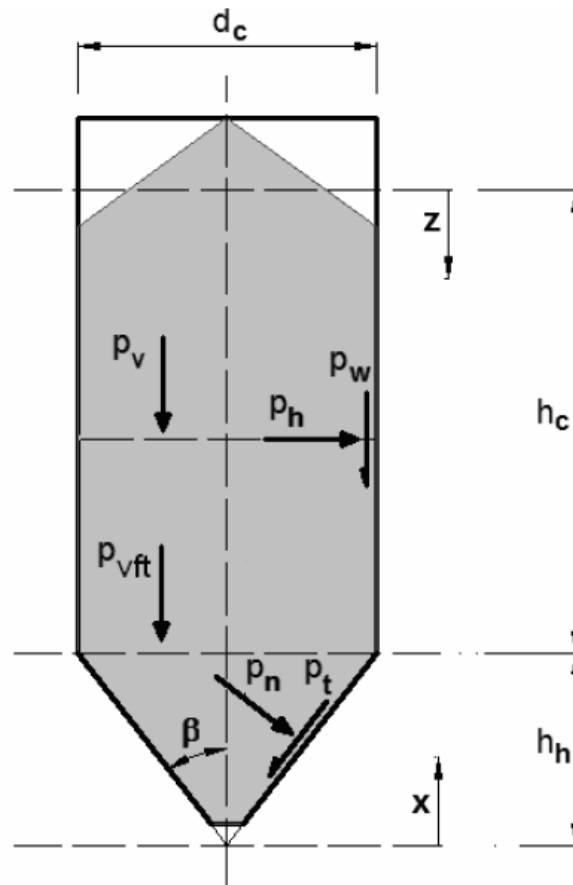
Također, javlja se i opterećenje uslijed težine cijele konstrukcije koje je neznatnog iznosa u odnosu na ostala opterećenja, ali pošto je poznata ukupna masa silosa, može se primijeniti u analizi.

### 5.1. Opterećenje od težine uskladištenog materijala

Uskladišteni materijal predstavlja najveći udio opterećenja na nosivu konstrukciju silosa za žitarice. Opterećenje od težine uskladištenog materijala uvelike ovisi o mehaničkim svojstvima samog materijala, kao i o geometriji te svojstvima materijala od kojeg je izrađen silos. Proračun je proveden za slučaj punjenja i pražnjenja silosa uz pojavu malog iznosa ekscentričnosti te uz pretpostavku masovnog protoka uskladištenog materijala.

Slika 5.1 prikazuje opterećenja koja se javljaju na stijenke silosa. Na stijenkcu cilindra djeluje horizontalni tlak  $p_h$  te vertikalni tlak  $p_w$  uslijed trenja između uskladištenog materijala i stijenke silosa. Na stijenkcu lijevka djeluje normalni tlak  $p_n$  te tangencijalni tlak  $p_t$  uslijed trenja između uskladištenog materijala i stijenke silosa. Vertikalni tlak u materijalu označava se s  $p_v$ , a na mjestu spoja cilindra i lijevka označen je s  $p_{vt}$ . Tablica 5.1 prikazuje mehanička svojstva raznih materijala koji se pohranjuju u silosima i spremnicima. Kako maksimalna dopuštena gustoća materijala prema [6] za silos koji je analiziran iznosi  $800 \text{ kg/m}^3$ , odabrana žitarica za skladištenje bit će kukuruz.

Sljedeći korak je određivanje klase pouzdanosti silosa, vitkosti silosa i tipa silosa s obzirom na dno kako bi se omogućio odabir ispravnih relacija za proračun. Postupak određivanja opterećenja proveden je prema standardu *EN 1991-4:2006* [2].

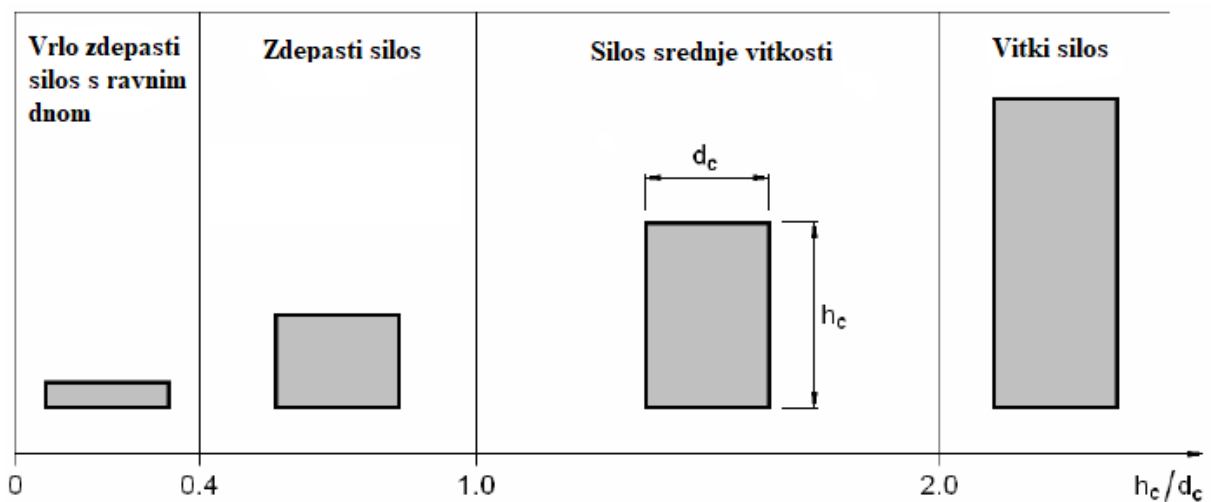


Slika 5.1. Opterećenja na stijenke silosa [2]

Vitkost silosa određuje se prema iznosu omjera visine cilindričnog dijela  $h_c$  i promjera cilindričnog cijela  $d_c$ :

$$\frac{h_c}{d_c} = \frac{3,645}{3,5} = 1,04 . \quad (5.1)$$

Kako vidimo na slici 5.2, proračun se provodio koristeći relacije za silose srednje vitkosti.



Slika 5.2. Tipovi silosa s obzirom na vitkost

U tablici 2.1 nalazi se iznos volumena spremnika za silos tipa 350 – 4 te za najveću dopuštenu gustoću materijala koji se smije skladištiti može se izračunati masa materijala koju silos može pohraniti:

$$m = \rho_m V_s = 800 \cdot 47,7 = 38160 \text{ kg} = 38,16 \text{ t} < 100 \text{ t.} \quad (5.2)$$

Silos koji mogu pohraniti masu materijala manju od 100 tona svrstavaju se u silose klase pouzdanosti 1.

**Tablica 5.1. Mehanička svojstva materijala koji se pohranjuju u silose [2]**

| Type of particulate solid <sup>d,e</sup> | Unit weight <sup>b</sup>   |                            | Angle of repose<br>$\phi_r$ | Angle of internal friction<br>$\phi_i$ |        | Lateral pressure ratio<br>$K$ |        | Wall friction coefficient <sup>c</sup><br>$\mu$<br>( $\mu = \tan \phi_w$ ) |              |              |         | Patch load solid reference factor<br>$C_{op}$ |
|--|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|--|--------|-------------------------------|--------|--|--------------|--------------|---------|---|
|  | $\gamma$                   |                            |                             |  |        |                               |        | Wall type D1   | Wall type D2 | Wall type D3 | $a_\mu$ |   |
|  | Lower<br>kN/m <sup>3</sup> | Upper<br>kN/m <sup>3</sup> | degrees                     | Mean<br>degrees                        | Factor | Mean                          | Factor | Mean   | Mean         | Mean         | Factor  |   |
| Default material <sup>a</sup>            | 6,0                        | 22,0                       | 40                          | 35                                     | 1,3    | 0,50                          | 1,5    | 0,32   | 0,39         | 0,50         | 1,40    | 1,0   |
| Aggregate                                | 17,0                       | 18,0                       | 36                          | 31                                     | 1,16   | 0,52                          | 1,15   | 0,39   | 0,49         | 0,59         | 1,12    | 0,4   |
| Alumina                                  | 10,0                       | 12,0                       | 36                          | 30                                     | 1,22   | 0,54                          | 1,20   | 0,41   | 0,46         | 0,51         | 1,07    | 0,5   |
| Animal feed mix                          | 5,0                        | 6,0                        | 39                          | 36                                     | 1,08   | 0,45                          | 1,10   | 0,22   | 0,30         | 0,43         | 1,28    | 1,0   |
| Animal feed pellets                      | 6,5                        | 8,0                        | 37                          | 35                                     | 1,06   | 0,47                          | 1,07   | 0,23   | 0,28         | 0,37         | 1,20    | 0,7   |
| Barley                                   | 7,0                        | 8,0                        | 31                          | 28                                     | 1,14   | 0,59                          | 1,11   | 0,24   | 0,33         | 0,48         | 1,16    | 0,5   |
| Cement                                   | 13,0                       | 16,0                       | 36                          | 30                                     | 1,22   | 0,54                          | 1,20   | 0,41   | 0,46         | 0,51         | 1,07    | 0,5   |
| Cement clinker                           | 15,0                       | 18,0                       | 47                          | 40                                     | 1,20   | 0,38                          | 1,31   | 0,46   | 0,56         | 0,62         | 1,07    | 0,7   |
| Coal                                     | 7,0                        | 10,0                       | 36                          | 31                                     | 1,16   | 0,52                          | 1,15   | 0,44   | 0,49         | 0,59         | 1,12    | 0,6   |
| Coal, powdered                           | 6,0                        | 8,0                        | 34                          | 27                                     | 1,26   | 0,58                          | 1,20   | 0,41   | 0,51         | 0,56         | 1,07    | 0,5   |
| Coke                                     | 6,5                        | 8,0                        | 36                          | 31                                     | 1,16   | 0,52                          | 1,15   | 0,49   | 0,54         | 0,59         | 1,12    | 0,6   |
| Flyash                                   | 8,0                        | 15,0                       | 41                          | 35                                     | 1,16   | 0,46                          | 1,20   | 0,51   | 0,62         | 0,72         | 1,07    | 0,5   |
| Flour                                    | 6,5                        | 7,0                        | 45                          | 42                                     | 1,06   | 0,36                          | 1,11   | 0,24   | 0,33         | 0,48         | 1,16    | 0,6   |
| Iron ore pellets                         | 19,0                       | 22,0                       | 36                          | 31                                     | 1,16   | 0,52                          | 1,15   | 0,49   | 0,54         | 0,59         | 1,12    | 0,5   |
| Lime, hydrated                           | 6,0                        | 8,0                        | 34                          | 27                                     | 1,26   | 0,58                          | 1,20   | 0,36   | 0,41         | 0,51         | 1,07    | 0,6   |
| Limestone powder                         | 11,0                       | 13,0                       | 36                          | 30                                     | 1,22   | 0,54                          | 1,20   | 0,41   | 0,51         | 0,56         | 1,07    | 0,5   |
| Maize                                    | 7,0                        | 8,0                        | 35                          | 31                                     | 1,14   | 0,53                          | 1,14   | 0,22   | 0,36         | 0,53         | 1,24    | 0,9   |
| Phosphate                                | 16,0                       | 22,0                       | 34                          | 29                                     | 1,18   | 0,56                          | 1,15   | 0,39   | 0,49         | 0,54         | 1,12    | 0,5   |
| Potatoes                                 | 6,0                        | 8,0                        | 34                          | 30                                     | 1,12   | 0,54                          | 1,11   | 0,33   | 0,38         | 0,48         | 1,16    | 0,5   |
| Sand                                     | 14,0                       | 16,0                       | 39                          | 36                                     | 1,09   | 0,45                          | 1,11   | 0,38   | 0,48         | 0,57         | 1,16    | 0,4   |
| Slag clinkers                            | 10,5                       | 12,0                       | 39                          | 36                                     | 1,09   | 0,45                          | 1,11   | 0,48   | 0,57         | 0,67         | 1,16    | 0,6   |
| Soya beans                               | 7,0                        | 8,0                        | 29                          | 25                                     | 1,16   | 0,63                          | 1,11   | 0,24   | 0,38         | 0,48         | 1,16    | 0,5   |
| Sugar                                    | 8,0                        | 9,5                        | 38                          | 32                                     | 1,19   | 0,50                          | 1,20   | 0,46   | 0,51         | 0,56         | 1,07    | 0,4   |
| Sugarbeet pellets                        | 6,5                        | 7,0                        | 36                          | 31                                     | 1,16   | 0,52                          | 1,15   | 0,35   | 0,44         | 0,54         | 1,12    | 0,5   |
| Wheat                                    | 7,5                        | 9,0                        | 34                          | 30                                     | 1,12   | 0,54                          | 1,11   | 0,24   | 0,38         | 0,57         | 1,16    | 0,5   |

Potrebno je još odrediti vrstu silosa s obzirom na dno silosa pa tako imamo:

- silos s ravnim dnom,
- silos sa strmim lijevkom,
- silos s plitkim lijevkom.

Kako vrijedi

$$\tan \beta < \frac{1 - K_m}{2\mu_{hm}} \rightarrow \tan 30^\circ < \frac{1 - 0,553}{2 \cdot 0,36} \rightarrow 0,577 < 0,621, \quad (5.3)$$

što je uvjet strmog lijevka, proračun za opterećenja lijevka proveden je prema postupku za silose sa strmim lijevkom.

Srednja vrijednost faktora bočnog pritiska  $K_m$  te srednja vrijednost faktora trenja između stijenki lijevka i materijala  $\mu_{hm}$  očitana je iz tablice 5.1. U tablici su zadane samo srednje vrijednosti te pripadni korekcijski faktori pomoću kojih se računaju donje i gornje vrijednosti koeficijenata. Kako silos u ovom zadatku pripada u klasu pouzdanosti 1, proračun opterećenja prema [2] može se provoditi koristeći srednje vrijednosti navedenih parametara.

### 5.1.1. Opterećenja na stijenske cilindra

Tlakovi na stijenama cilindra koji se javljaju izračunat će se za slučaj punjenja i pražnjenja silosa.

#### PUNJENJE SILOSA

Vrijednosti horizontalnog tlaka  $p_{hf}$  i vertikalnog tlaka zbog trenja između stijenki silosa i uskladištenog materijala  $p_{wf}$  na bilo kojoj dubini nakon punjenja određuju se prema sljedećim izrazima:

$$p_{hf} = p_{ho} Y_R, \quad (5.4)$$

$$p_{wf} = \mu p_{hf}, \quad (5.5)$$

gdje je:

$p_{ho}$  - asimptotski horizontalni tlak na najvećoj dubini uslijed uskladištenog materijala,

$\mu$  - iznos faktora trenja između materijala i stijenske silosa,

$Y_R$  - varijacijska funkcija dubine tlaka za zdepaste silose i silose srednje vitkosti.

Izrazi za navedene veličine koje su potrebne za izračunavanje horizontalnog i vertikalnog tlaka koji djeluju na stijenske cilindra glase:

$$p_{ho} = \gamma \cdot K \cdot z_o = \gamma \frac{1}{\mu} \frac{A}{U}, \quad (5.6)$$

$$Y_R = \left( 1 - \left[ \left( \frac{z - h_o}{z_o - h_o} \right) + 1 \right]^n \right), \quad (5.7)$$

$$z_o = \frac{1}{K \mu} \frac{A}{U}, \quad (5.8)$$

$$n = -(1 + \tan \Phi_r) \left( 1 - \frac{h_o}{z_o} \right), \quad (5.9)$$

gdje je:

$\gamma$  - specifična težina uskladištenog materijala,

$K$  - omjer horizontalnog efektivnog naprezanja i vertikalnog efektivnog naprezanja (Janssenova konstanta),

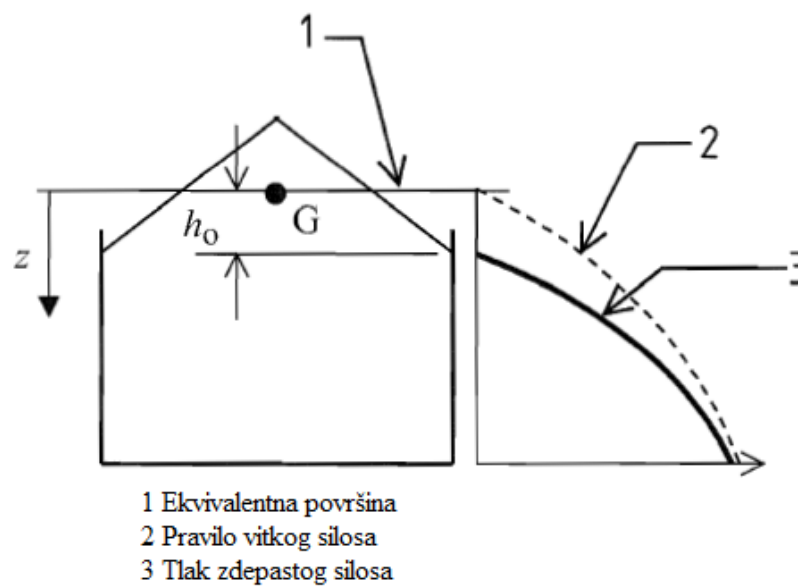
$z$  - dubina ispod ekvivalentne površine uskladištenog materijala,

$A$  – površina poprečnog presjeka cilindra silosa,

$U$  – unutarnji opseg poprečnog presjeka cilindra silosa,

$\Phi_r$  - maksimalni kut u odnosu na horizontalnu ravninu pod kojim se rastresiti materijal može nagomilati bez propadanja/urušavanja,

$h_o$  - visina težišta stošca materijala koji nije u dodiru sa stijenkama silosa (slika 5.3).



Slika 5.3. Tlak nakon punjenja zdepastog ili silosa srednje vitkosti [2]

Za simetrično punjene cirkularne silose radijusa  $r$ ,  $h_o$  računa se kao:

$$h_o = \frac{r}{3} \tan \Phi_r = \frac{1750}{3} \tan 35^\circ = 408,5 \text{ mm} . \quad (5.10)$$

Budući da je silos koji je analiziran napravljen od valovitih limova, faktor trenja stijenki ne može se izravno očitati iz tablice 5.1, nego se računa prema postupku iz dodatka D – D.2 [2]. Za valovite limove izračunat je efektivni faktor trenja koji je dan izrazom:

$$\mu_{\text{eff}} = (1 - \alpha_w) \tan \Phi_{\text{im}} + \alpha_w \mu_{w_{\text{wm}}} , \quad (5.11)$$

gdje je:

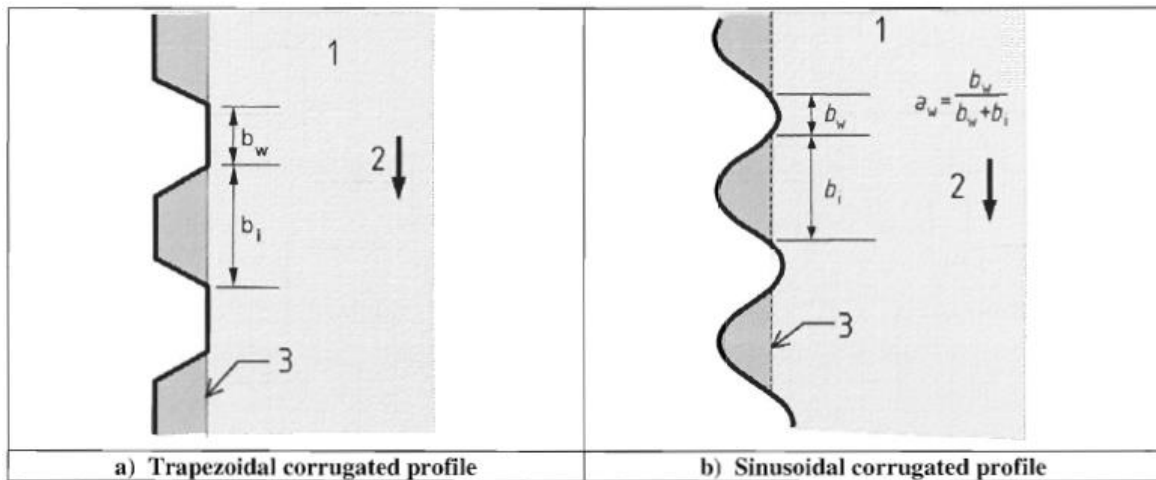
$\mu_{\text{eff}}$  - efektivni faktor trenja stijenke,

$\Phi_{\text{im}}$  - srednji kut unutarnjeg trenja materijala,

$\mu_{\text{wm}}$  - srednja vrijednost faktora trenja stijenke glatkog (nevalovitog) lima,

$\alpha_w$  - faktor dodira stijenke.

Slika 5.4 prikazuje 2 tipa valovitog lima koji se koriste za izgradnju silosa.



- 1 Uskladišteni materijal  
2 Tok materijala  
3 Površina prekida toka materijala

**Slika 5.4. Tipovi valovitog lima za silos [2]**

Za valovite limove sinusoidalnog oblika kao što prikazuje slika 5.4 b) može se uzeti

$$\alpha_w = 0,2. \quad (5.12)$$

Kut unutarnjeg trenja materijala, kao i faktor dodira stijenke nevalovitog lima,  $\mu_w$ , izrađenog od galvaniziranog čelika koji pripada u tip stijenke D2, može se očitati iz tablice 5.1:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{wm}} &= 0,36 \\ \Phi_{\text{im}} &= 31^\circ. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Uvrštavanjem izraza (5.12) i (5.13) u izraz (5.11), dobiva se iznos efektivnog faktora trenja stijenke:

$$\mu_{\text{eff}} = (1 - \alpha_w) \tan \Phi_{\text{im}} + \alpha_w \mu_{\text{wm}} = (1 - 0,2) \tan 31^\circ + 0,2 \cdot 0,36 = 0,553. \quad (5.14)$$

Sada, moguće je izračunati parametar  $z_o$  koji predstavlja karakterističnu dubinu prema Janssen-ovoj teoriji:

$$z_o = \frac{1}{K \mu U} A = \frac{1}{K_m \mu_{\text{eff}}} \frac{d^2 \pi}{4 d \pi} = \frac{1}{0,53 \cdot 0,553} \frac{3500}{4} = 2985,4 \text{ mm}. \quad (5.15)$$



Također, mogu se izračunati i veličine  $n$ ,  $Y_R$  i  $p_{ho}$ :

$$n = -(1 + \tan \Phi_r) \left( 1 - \frac{h_o}{z_o} \right) = -(1 + \tan 35^\circ) \left( 1 - \frac{408,5}{2985,4} \right) = -1,47, \quad (5.16)$$

$$Y_R = \left( 1 - \left[ \left( \frac{z - h_o}{z_o - h_o} \right) + 1 \right]^n \right) = \left( 1 - \left[ \left( \frac{z - 408,5}{2985,4 - 408,5} \right) + 1 \right]^{-1,47} \right), \quad (5.17)$$

$$p_{ho} = \gamma \cdot K \cdot z_o = \gamma \frac{1}{\mu} \frac{A}{U} = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,53 \cdot 2985,4 = 0,01266 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (5.18)$$

Konačno, uvrštavanjem izraza (5.18), (5.17) i (5.14) u izraze (5.4) i (5.5) dobiju se izrazi za horizontalni i vertikalni tlak na cilindrične stijenke silosa u ovisnosti o dubini  $z$ :

$$p_{hf} = p_{ho} Y_R = 0,01266 \cdot \left( 1 - \left[ \left( \frac{z - 408,5}{2985,4 - 408,5} \right) + 1 \right]^{-1,47} \right), \quad (5.19)$$

$$p_{wf} = \mu p_{hf} = \mu_{\text{eff}} p_{hf} = 0,553 \cdot 0,01266 \cdot \left( 1 - \left[ \left( \frac{z - 408,5}{2985,4 - 408,5} \right) + 1 \right]^{-1,47} \right), \quad (5.20)$$

gdje se  $z$  kreće u rasponu  $h_o = 408,5 \text{ mm} \leq z \leq z_{\text{max}} = 3645 \text{ mm}$  od ekvivalentne površine (slika 5.3).

Vertikalni tlak u materijalu, na bilo kojoj dubini nakon punjenja, određen je izrazom

$$p_{vf} = \gamma z_v, \quad (5.21)$$

$$z_v = h_o - \frac{1}{n+1} \left( z_o - h_o - \frac{(z + z_o - 2h_o)^{n+1}}{(z_o - h_o)^n} \right),$$

$$z_v = 408,5 - \frac{1}{-1,47+1} \left( 2985,4 - 408,5 - \frac{(z + 2985,4 - 2 \cdot 408,5)^{-1,47+1}}{(2985,4 - 408,5)^{-1,47}} \right),$$

$$z_v = 408,5 + 2,128 \left( 2576,9 - \frac{(z + 2168,4)^{-0,47}}{2576,9^{-1,47}} \right), \quad (5.22)$$

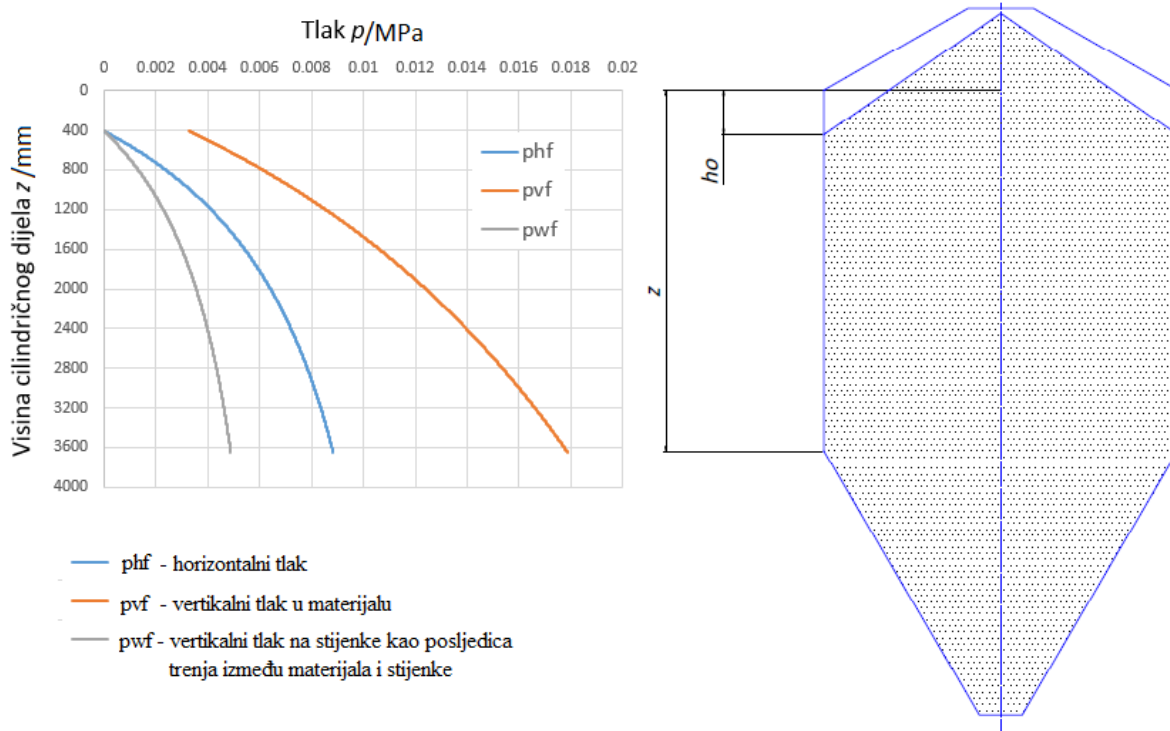
gdje je  $z_v$  mjera dubine koja se koristi kod izračunavanja vertikalnog tlaka.

$$p_{vf} = \gamma z_v = 8 \cdot 10^{-6} \cdot \left[ 408,5 + 2,128 \left( 2576,9 - \frac{(z + 2168,4)^{-0,47}}{2576,9^{-1,47}} \right) \right], \quad (5.23)$$

gdje se  $z$  kreće u rasponu  $h_o = 408,5 \text{ mm} \leq z \leq z_{\text{max}} = 3645 \text{ mm}$  od ekvivalentne površine (slika 5.3).

Kao i kod raspodjele progiba prilikom provođenja verifikacije u poglavlju 4 i ovdje se koristio programski jezik C++ kako bi se dobila raspodjela tlakova po visini cilindričnog dijela silosa.

Slika 5.5 prikazuje raspodjele horizontalnog i vertikalnog tlaka na stijenke silosa te raspodjelu vertikalnog tlaka u materijalu koji je potreban za daljnji izračun tlakova na stijenke lijevka silosa.



**Slika 5.5. Raspodjela tlakova za slučaj nakon punjenja silosa**

Tablica 5.2 prikazuje raspodjelu tlakova po visini cilindričnog dijela silosa.

**Tablica 5.2. Raspodjela tlakova po visini cilindričnog dijela spremnika za slučaj punjenja**

| $z/\text{mm}$ | $p_{hf}/\text{MPa}$ | $p_{wf}/\text{MPa}$ | $p_{vf}/\text{MPa}$ |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 408,5         | 0,00000             | 0,00000             | 0,00328             |
| 800           | 0,00237             | 0,00131             | 0,00609             |
| 1200          | 0,00412             | 0,00228             | 0,00846             |
| 1600          | 0,00542             | 0,00300             | 0,01045             |
| 2000          | 0,00642             | 0,00355             | 0,01215             |
| 2400          | 0,00720             | 0,00398             | 0,01362             |
| 2800          | 0,00785             | 0,00434             | 0,01494             |
| 3200          | 0,00836             | 0,00463             | 0,01609             |
| 3645          | 0,00883             | 0,00488             | 0,01721             |

Kako je u *Abaqus*-u korišten sustav jedinica N,mm,t, iz toga slijedi da su opterećenja i naprezanja iskazana u MPa pa su i rezultati u tablici prikazani u toj mjernoj jedinici.

Ponovljen je postupak određivanja tlakova za slučaj pražnjenja silosa, naravno s adekvatnim formulacijama prema [2].

### PRAŽNENJE SILOSA

Kod pražnjenja srednje vitkih silosa tlakovi  $p_{he}$  i  $p_{we}$  određuju se u ovisnosti o faktorima pražnjenja  $C_h$  i  $C_w$  prema sljedećim izrazima:

$$p_{he} = C_h p_{hf}, \quad (5.24)$$

$$p_{we} = C_w p_{wf}. \quad (5.25)$$

Za silose srednje vitkosti i klase pouzdanosti 1 gdje se u proračunu koriste srednje vrijednosti svojstava materijala  $K$  i  $\mu$ , faktori pražnjenja računaju se kao

$$C_h = 1 + \left[ 0,15 + 1,5 \left( 1 + 0,4 \frac{e}{d_c} \right) C_{op} \right] C_s, \quad (5.26)$$

$$C_w = 1 + 0,4 \left( 1 + 1,4 \frac{e}{d_c} \right) C_s, \quad (5.27)$$

$$C_s = \frac{h_c}{d_c} - 1, \quad (5.28)$$

$$e = \max(e_f, e_o), \quad (5.29)$$

gdje je:

$e_f$  - najveća ekscentričnost hrpe tijekom punjenja,

$e_o$  - ekscentričnost otvora za pražnjenje silosa,

$C_{op}$  - referentni faktor za asimetrično opterećenje,

$C_s$  - faktor vitkosti.

Za silos u ovom zadatku sa sustavom pneumatskog punjenja materijala, ekscentričnosti  $e_f$  i  $e_o$  iznose

$$e_f \approx 300 \text{ mm} \text{ i } e_o = 0 \text{ mm}. \quad (5.30)$$

Iz čega slijedi

$$e = 300 \text{ mm}, \quad (5.31)$$

$$C_s = \frac{h_c}{d_c} - 1 = \frac{3645}{3500} - 1 = 0,04, \quad (5.32)$$

$$C_h = 1 + \left[ 0,15 + 1,5 \left( 1 + 0,4 \frac{e}{d_c} \right) C_{op} \right] C_s = ,$$

$$C_h = 1 + \left[ 0,15 + 1,5 \left( 1 + 0,4 \frac{300}{3500} \right) \cdot 0,9 \right] \cdot 0,04 = 1,062 , \quad (5.33)$$

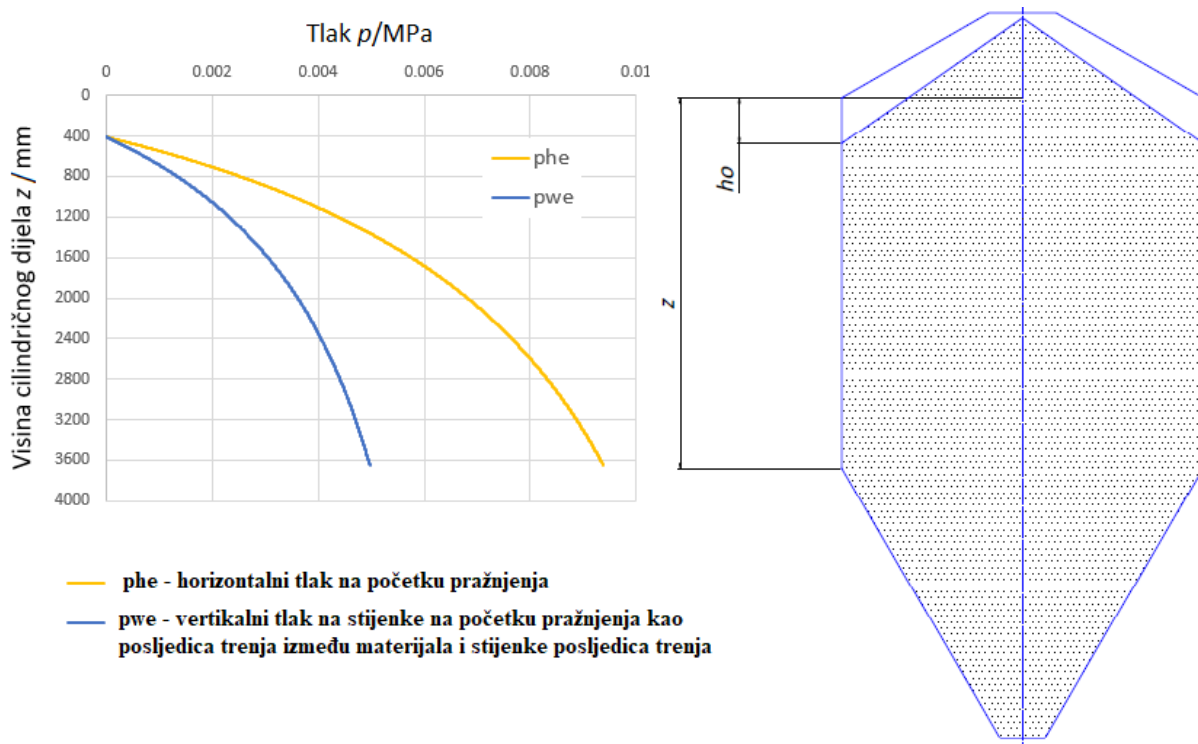
$$C_w = 1 + 0,4 \left( 1 + 1,4 \frac{e}{d_c} \right) C_s = 1 + 0,4 \left( 1 + 1,4 \frac{300}{3500} \right) \cdot 0,04 = 1,018 . \quad (5.34)$$

Sada se iznosi tlakova  $p_{hf}$  i  $p_{wf}$  moraju pomnožiti s faktorima pražnjenja kako bi se dobili tlakovi za slučaj pražnjenja silosa:

$$p_{he} = C_h p_{hf} = 1,062 \cdot 0,01266 \cdot \left( 1 - \left[ \left( \frac{z - 408,5}{2985,4 - 408,5} \right) + 1 \right]^{-1,47} \right), \quad (5.35)$$

$$p_{we} = C_w p_{wf} = 1,018 \cdot 0,553 \cdot 0,01266 \cdot \left( 1 - \left[ \left( \frac{z - 408,5}{2985,4 - 408,5} \right) + 1 \right]^{-1,47} \right). \quad (5.36)$$

Prema faktorima pražnjenja možemo vidjeti kako povećanje nije znatno u odnosu na slučaj nakon punjenja. Ponovljen je postupak određivanja tlakova po visini stijenke cilindričnog dijela, a rezultati su prikazani na slici 5.6.



Slika 5.6. Raspodjela tlakova po visini cilindra silosa za slučaj pražnjenja

Tablica 5.3 prikazuje iznose tlakova po visini cilindričnog dijela silosa na ekvivalentnim razmacima te su prikazani i iznosi maksimalnih tlakova koji se javljaju na spoju cilindričnog i konusnog dijela silosa.

**Tablica 5.3. Raspodjela tlakova po visini cilindra silosa u trenutku pražnjenja**

| $z / \text{mm}$ | $p_{he} / \text{MPa}$ | $p_{we} / \text{MPa}$ |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| 408,5           | 0                     | 0                     |
| 800             | 0,00252159            | 0,00133667            |
| 1200            | 0,00437456            | 0,0023189             |
| 1600            | 0,00575421            | 0,00305024            |
| 2000            | 0,00681443            | 0,00361225            |
| 2400            | 0,00765018            | 0,00405527            |
| 2800            | 0,00832294            | 0,00441189            |
| 3200            | 0,00887409            | 0,00470406            |
| 3645            | 0,00937913            | 0,00497177            |

### 5.1.2. Opterećenja na lijevak silosa

Kao što je već izračunato u poglavlju 5.1, proračun opterećenja na lijevak proveden je za strme lijevke, prema izrazu (5.3). Dvije su metode koje se koriste za proračun opterećenja, a u ovom radu korištena je metoda iz poglavlja 6.1.2 prema [2].

Slika 5.7 prikazuje raspodjelu tlaka na lijevak silosa i osnovne dimenzije koje su korištene u proračunu. Srednji vertikalni tlak na mjestu spoja cilindričnog i konusnog dijela određen je izrazom:

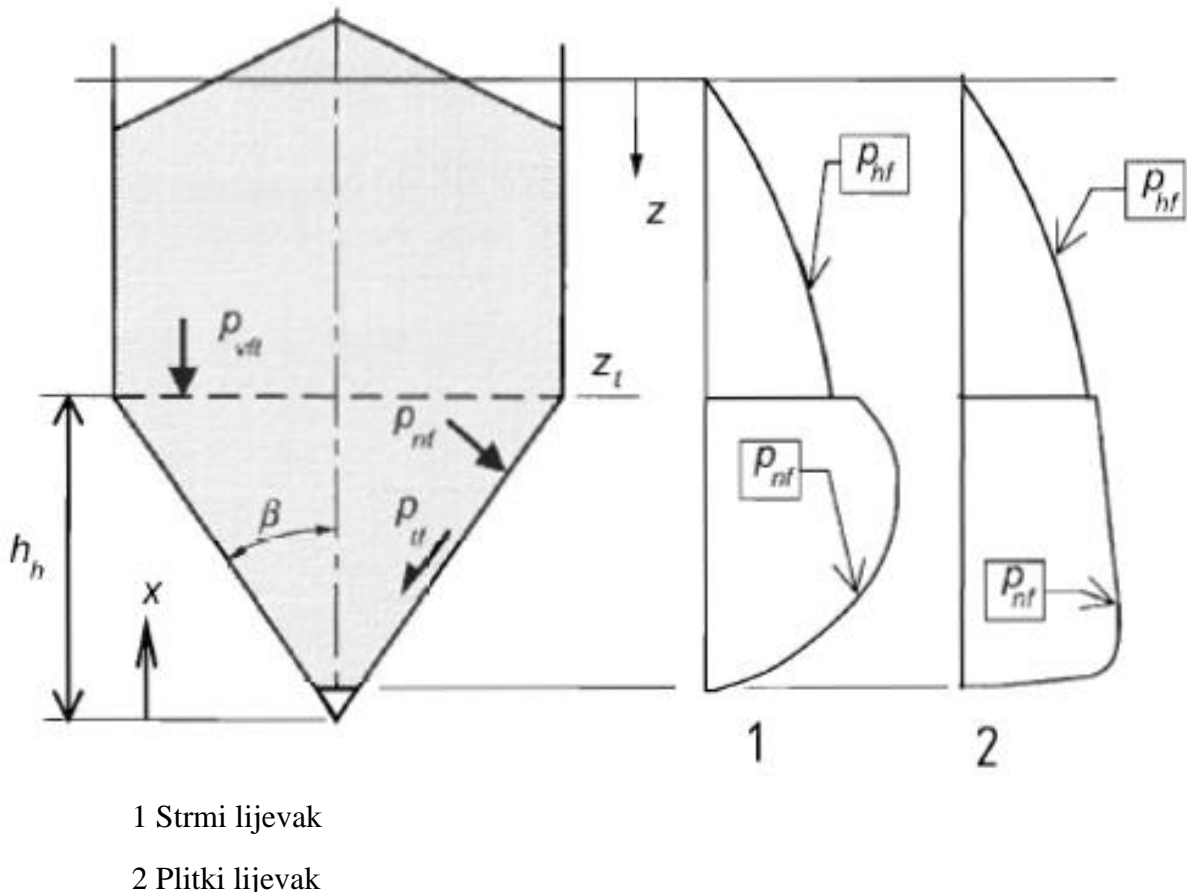
$$p_{vft} = C_b p_{vf} = 1,3 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot \left[ 408,5 + 2,857 \left( 2576,9 - \frac{(3645 + 2168,4)^{-0,35}}{2576,9^{-1,35}} \right) \right],$$

$$p_{vft} = 0,02322 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad (5.37)$$

gdje je:

$p_{vf}$  - vrijednost vertikalnog tlaka prema izrazu (5.23) s koordinatom  $z = 3645$  mm što označava mjesto spoja,

$C_b$  - faktor koji uzima u obzir mogućnost prenošenja većih opterećenja iz okomitog cilindričnog segmenta na lijevak ( $C_b = 1,3$  - za silose klase pouzdanosti 1 gdje se u proračunu koriste srednje vrijednosti svojstava materijala  $K$  i  $\mu$ ).



Slika 5.7. Raspodjela tlaka na strme i plitke lijevke [2]

Srednji vertikalni tlak na nekoj visini  $x$  prema slici 5.7 zadan je izrazom:

$$p_v = \left( \frac{\gamma h_h}{n-1} \right) \left[ \left( \frac{x}{h_h} \right) - \left( \frac{x}{h_h} \right)^n \right] + p_{vf} \left( \frac{x}{h_h} \right)^n. \quad (5.38)$$

Izračunato je opterećenje na stijenke lijevka za slučaj pražnjenja te slučaj punjenja silosa.

### PUNJENJE SILOSA

Parametri iz jednadžbe (5.38) koje je potrebno izračunati za slučaj punjenja silosa dani su sljedećim izrazima:

$$h_h = \frac{d}{2 \tan \beta} = \frac{3500}{2 \cdot \tan 30^\circ} = 3031 \text{ mm}, \quad (5.39)$$

$$n = S(F \mu_{\text{eff}} \cot \beta + F) - 2, \quad (5.40)$$

$$F_f = 1 - \frac{b}{\left( 1 + \frac{\tan \beta}{\mu_h} \right)} = 1 - \frac{0,2}{\left( 1 + \frac{\tan 30^\circ}{0,36} \right)} = 0,9232. \quad (5.41)$$

Uvrštavanjem izraza (5.41) u (5.40) dobije se sređeniji oblik:

$$n = S(1-b)\mu_h \cot \beta = 2(1-0,2) \cdot 0,36 \cdot \cot 30^\circ = 0,998, \quad (5.42)$$

gdje je:

$h_h$  - visina stošca lijevka,

$x$  - koordinata visine lijevka odozdo prema gore,

$n$  - eksponent u relaciji vertikalnog tlaka lijevka.

$S = 2$  za konusne lijevke,

$F$  - karakteristična vrijednost omjera tlaka u lijevku,

$b$  - empirijski faktor:  $b = 0,2$ ,

$\mu_{\text{eff}} = \mu_h = 0,36$  - faktor trenja stijenke lijevka za tip stijenke D2.

Sada se može dobiti izraz za vertikalni tlak koji djeluje na lijevak silosa u ovisnosti o visini:

$$p_v = \left( \frac{\gamma h_h}{n-1} \right) \left[ \left( \frac{x}{h_h} \right) - \left( \frac{x}{h_h} \right)^n \right] + p_{\text{vft}} \left( \frac{x}{h_h} \right)^n,$$

$$p_v = \left( \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 3031}{0,998-1} \right) \left[ \left( \frac{x}{3031} \right) - \left( \frac{x}{3031} \right)^{0,998} \right] + 0,02322 \cdot \left( \frac{x}{3031} \right)^{0,998}. \quad (5.43)$$

Konačno, mogu se dobiti izrazi za normalni tlak i tlak trenja na stijenke lijevka u ovisnosti o koordinati visine  $x$ :

$$p_{\text{nf}} = F_f p_v$$

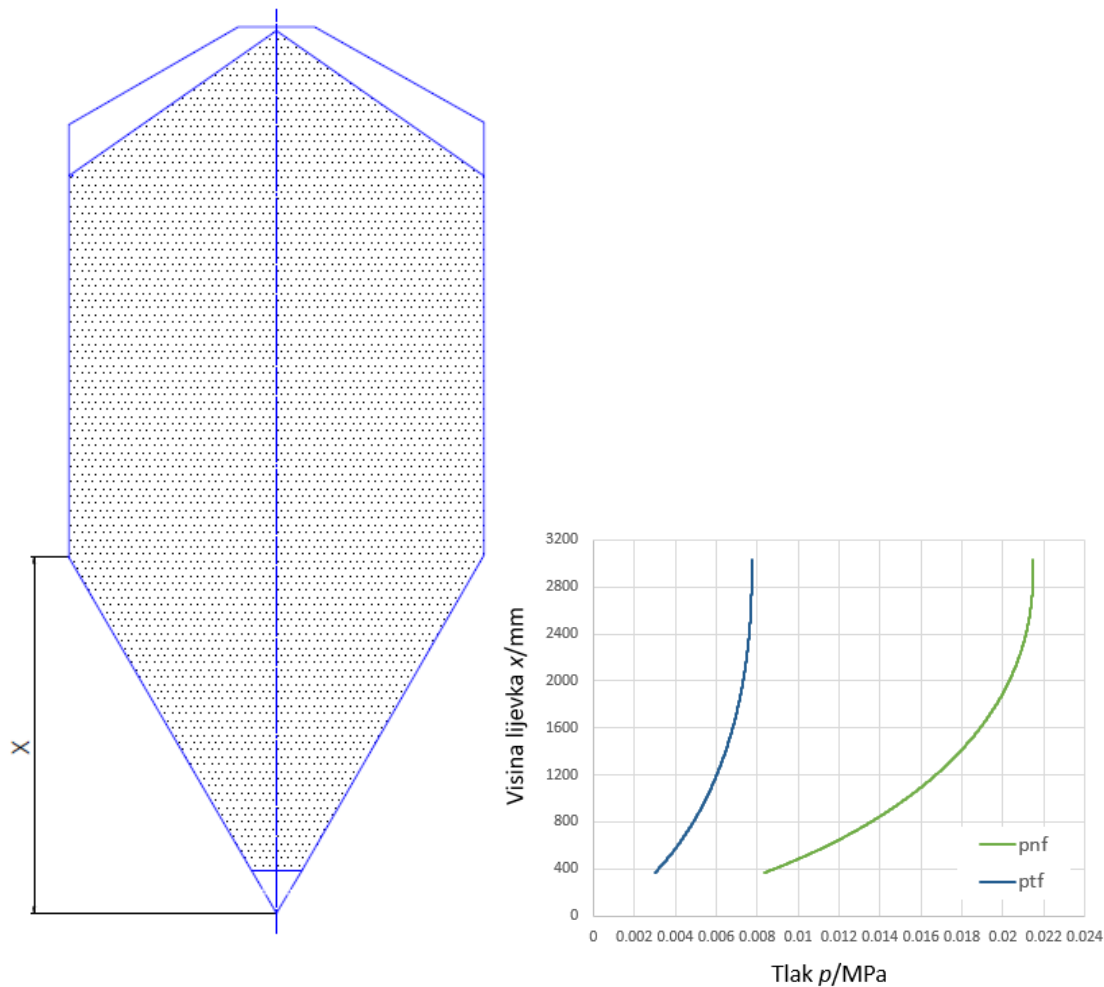
$$p_{\text{nf}} = 0,9232 \cdot \left[ -12,124 \cdot \left[ \left( \frac{x}{3031} \right) - \left( \frac{x}{3031} \right)^{0,998} \right] + 0,02322 \cdot \left( \frac{x}{3031} \right)^{0,998} \right], \quad (5.44)$$

$$p_{\text{tf}} = \mu_h F_f p_v$$

$$p_{\text{tf}} = 0,33235 \cdot \left[ -12,124 \cdot \left[ \left( \frac{x}{3031} \right) - \left( \frac{x}{3031} \right)^{0,998} \right] + 0,02322 \cdot \left( \frac{x}{3031} \right)^{0,998} \right]. \quad (5.45)$$

Slika 5.8 prikazuje raspodjelu normalnog i tangencijalnog tlaka po visini stijenke lijevka za slučaj nakon punjenja silosa.

Također, tablica 5.4 prikazuje iznose tlakova po visini lijevka silosa, ali na ekvivalentnim razmacima te su prikazani i iznosi maksimalnih tlakova koji se javljaju na spoju cilindričnog i konusnog dijela silosa.



Slika 5.8. Raspodjela tlakova po visini lijevka silosa za slučaj punjenja

Tablica 5.4. Raspodjela tlakova po visini stijene lijevka silosa za slučaj punjenja

| $x/\text{mm}$ | $p_{nf}/\text{MPa}$ | $p_{tf}/\text{MPa}$ |
|---------------|---------------------|---------------------|
| 366           | 0,00832605          | 0,00299736          |
| 725           | 0,0128128           | 0,00461257          |
| 1050          | 0,0156716           | 0,00564173          |
| 1375          | 0,0177735           | 0,00639841          |
| 1700          | 0,0193017           | 0,00694859          |
| 2025          | 0,0203678           | 0,00733237          |
| 2350          | 0,0210467           | 0,00757676          |
| 2675          | 0,0213924           | 0,00770121          |
| 3031          | 0,0214367           | 0,00771717          |

### PRAŽNJENJE SILOSA

Srednji vertikalni tlak u materijalu za slučaj pražnjenja također se računa prema izrazima (5.38) i (5.40), s tim da je parametar vrijednosti omjera tlaka u lijevku  $F = F_e$  dan izrazom

$$F_e = \frac{1 + \sin \Phi_1 \cos \varepsilon}{1 - \sin \Phi_1 \cos(2\beta + \varepsilon)}, \quad (5.46)$$



pri čemu vrijedi:

$$\varepsilon = \Phi_{wh} + \sin^{-1} \left( \frac{\sin \Phi_{wh}}{\sin \Phi_i} \right), \quad (5.47)$$

$$\Phi_{wh} = \tan^{-1} \mu_h, \quad (5.48)$$

gdje je

$\mu_h$  - faktor trenja stijenke lijevka,

$\Phi_i$  - kut unutarnjeg trenja materijala,

$\Phi_{wh}$  - kut trenja između stijenke lijevka i materijala.

Sada preostaje izračunati nepoznate veličine kako bi se mogli dobiti konačni izrazi za raspodjelu tlaka po stijenci lijevka za slučaj pražnjenja.

$$\Phi_{wh} = \tan^{-1} \mu_h = \tan^{-1} 0,36 = 19,8^\circ, \quad (5.49)$$

$$\varepsilon = \Phi_{wh} + \sin^{-1} \left( \frac{\sin \Phi_{wh}}{\sin \Phi_i} \right) = 19,8 + \sin^{-1} \left( \frac{\sin 19,8^\circ}{\sin 31^\circ} \right) = 60,9^\circ, \quad (5.50)$$

$$F_e = \frac{1 + \sin \Phi_i \cos \varepsilon}{1 - \sin \Phi_i \cos (2\beta + \varepsilon)} = \frac{1 + \sin 31^\circ \cdot \cos 60,9^\circ}{1 - \sin 31^\circ \cos (2 \cdot 30^\circ + 60,9^\circ)} = 0,9889. \quad (5.51)$$

Normalni i tangencijalni tlak na stijenske lijevka silosa na bilo kojoj visini računaju se prema sljedećim izrazima:

$$p_{ne} = F_e p_v, \quad (5.52)$$

$$p_{te} = \mu_h F_e p_v. \quad (5.53)$$

Vertikalni tlak  $p_v$  računa se prema izrazu (5.43), s tim da se eksponent  $n$  mijenja u odnosu na slučaj punjenja u ovisnosti o  $F_e$

$$n = S(F_e \mu_{\text{eff}} \cot \beta + F_e) - 2 = 2(0,9889 \cdot 0,36 \cdot \cot 30^\circ + 0,9889) - 2 = 1,21. \quad (5.54)$$

Konačno, izrazi za raspodjelu tlakova po visini stijenke lijevka za slučaj pražnjenja silosa zadani su kao

$$p_{ne} = F_e p_v$$

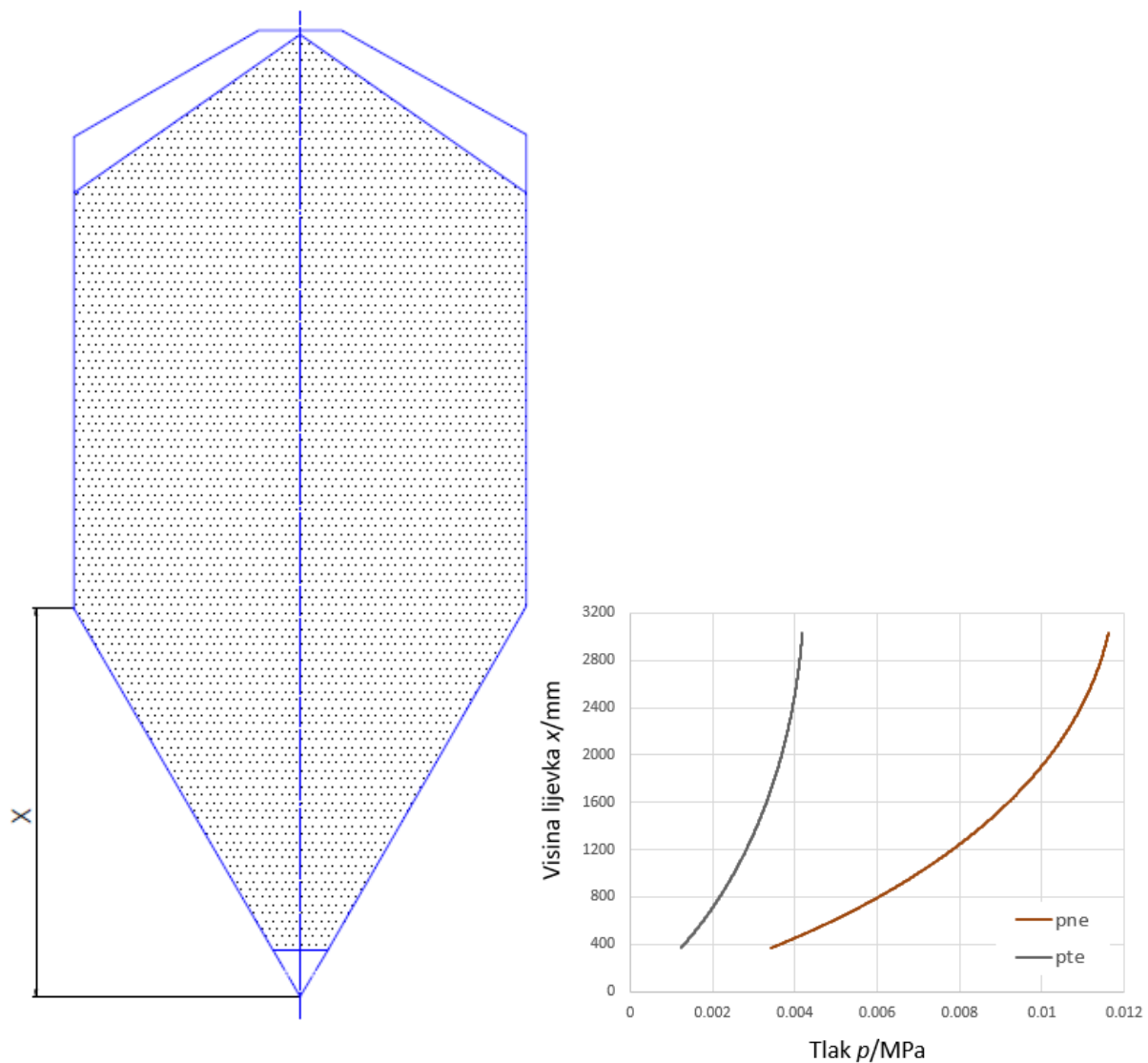
$$p_{ne} = 0,9889 \cdot \left[ \left( \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 3031}{1,21 - 1} \right) \left[ \left( \frac{x}{3031} \right) - \left( \frac{x}{3031} \right)^{1,21} \right] + 0,02322 \cdot \left( \frac{x}{3031} \right)^{1,21} \right], \quad (5.55)$$

$$p_{te} = \mu_h F_e p_v$$

$$p_{te} = 0,18 \cdot \left[ \left( \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 3031}{1,21-1} \right) \left[ \left( \frac{x}{3031} \right) - \left( \frac{x}{3031} \right)^{1,21} \right] + 0,02322 \cdot \left( \frac{x}{3031} \right)^{1,21} \right]. \quad (5.56)$$

Isto kao i za slučaj punjenja, prikazat će se raspodjela normalnog i tangencijalnog tlaka po visini stijenke lijevka.

Na slici 5.9 te u tablici 5.5 prikazana je raspodjela normalnog i tangencijalnog tlaka po visini stijenke lijevka za slučaj pražnjenja silosa. Radi lakšeg očitavanja, u tablici su prikazani iznosi tlakova na ekvivalentnim razmacima visine silosa kao i iznos maksimalnog tlaka koji se javlja na spoju cilindričnog dijela i lijevka silosa.



Slika 5.9. Raspodjela tlakova po visini lijevka silosa za slučaj pražnjenja

Tablica 5.5. Raspodjela tlakova po visini stijenke lijevka za slučaj pražnjenja

| $x/\text{mm}$ | $p_{ne}/\text{MPa}$ | $p_{te}/\text{MPa}$ |
|---------------|---------------------|---------------------|
| 366           | 0,00339859          | 0,00122349          |
| 725           | 0,00563974          | 0,00203031          |
| 1050          | 0,00721088          | 0,00259592          |
| 1375          | 0,00846704          | 0,00304813          |
| 1700          | 0,00946991          | 0,00340917          |
| 2025          | 0,0102591           | 0,00369327          |
| 2350          | 0,0108624           | 0,00391045          |
| 2675          | 0,0113005           | 0,00406819          |
| 3031          | 0,01161             | 0,0041796           |

## 5.2. Opterećenje uzrokovano vjetrom

U ovom poglavlju određeno je opterećenje konstrukcije silosa uslijed djelovanja vjetra. Kao što je već navedeno, ovi silosi su projektirani da izdrže nalete vjetra do 30 m/s. Ako bi se silos postavio negdje u Hrvatskoj, potrebno je odrediti područja koja zadovoljavaju ovaj parametar.

Ukupna sila vjetra na konstrukciju ili konstrukcijsku komponentu može se odrediti prema poglavlju 5.3 iz EN 1991-1-4:2005 [14]:

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{\text{ref}}, \quad (5.57)$$

gdje je:

$c_s c_d$  - konstrukcijski faktor,

$c_f$  - faktor sile za konstrukciju ili konstrukcijski element,

$q_p(z_e)$  - tlak pri vršnoj brzini na referentnoj visini  $z_e$ ,

$A_{\text{ref}}$  - referentna površina (projicirana površina izložena vjetru).

Vršni koeficijent tlaka brzine vjetra  $q_p$  računa se prema poglavlju 4.5 iz [14]:

$$q_p = c_e(z) \cdot q_b, \quad (5.58)$$

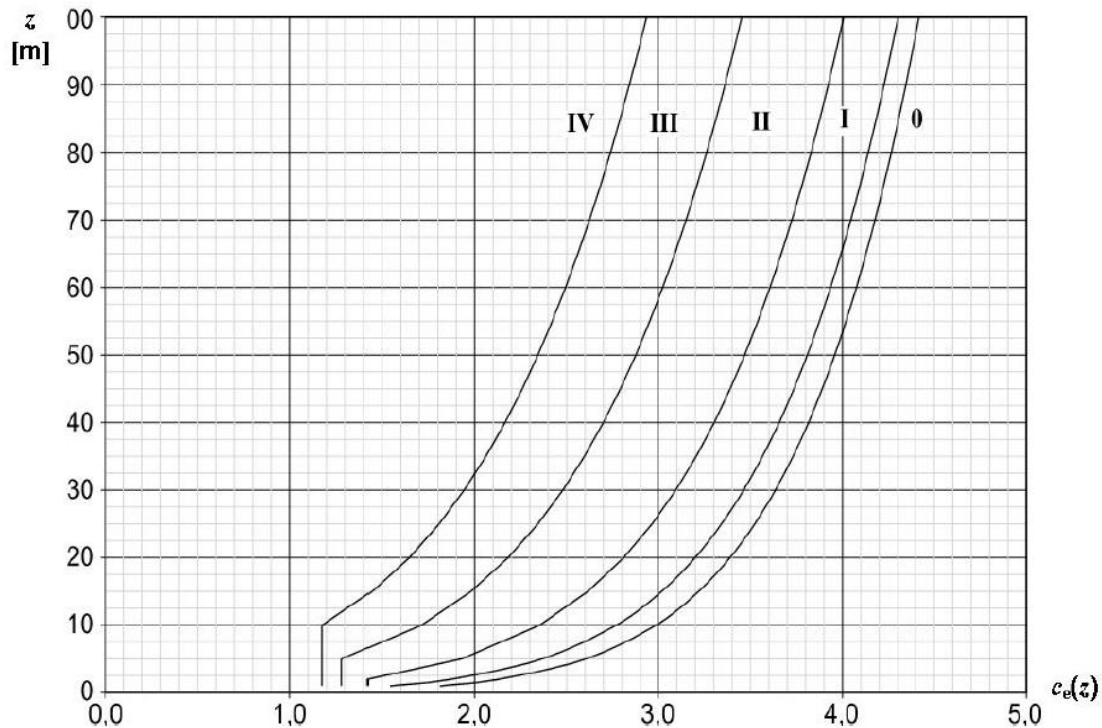
gdje je:

$c_e$  - faktor izloženosti,

$q_b$  - osnovni tlak zbog brzine vjetra.

Za kategoriju terena 0 (more ili priobalna područja izložena otvorenom moru) i visinu silosa od približno  $z = 7,9$  m, s grafa na slici 5.10 može se očitati:

$$c_e(z) = 2,85. \quad (5.59)$$



Slika 5.10. Grafički prikaz faktora izloženosti  $c_e(z)$  [14]

Osnovni tlak zbog brzine vjetra računa se prema izrazu:

$$q_b = \frac{\rho v_{\text{ref}}^2}{2}, \quad (5.60)$$

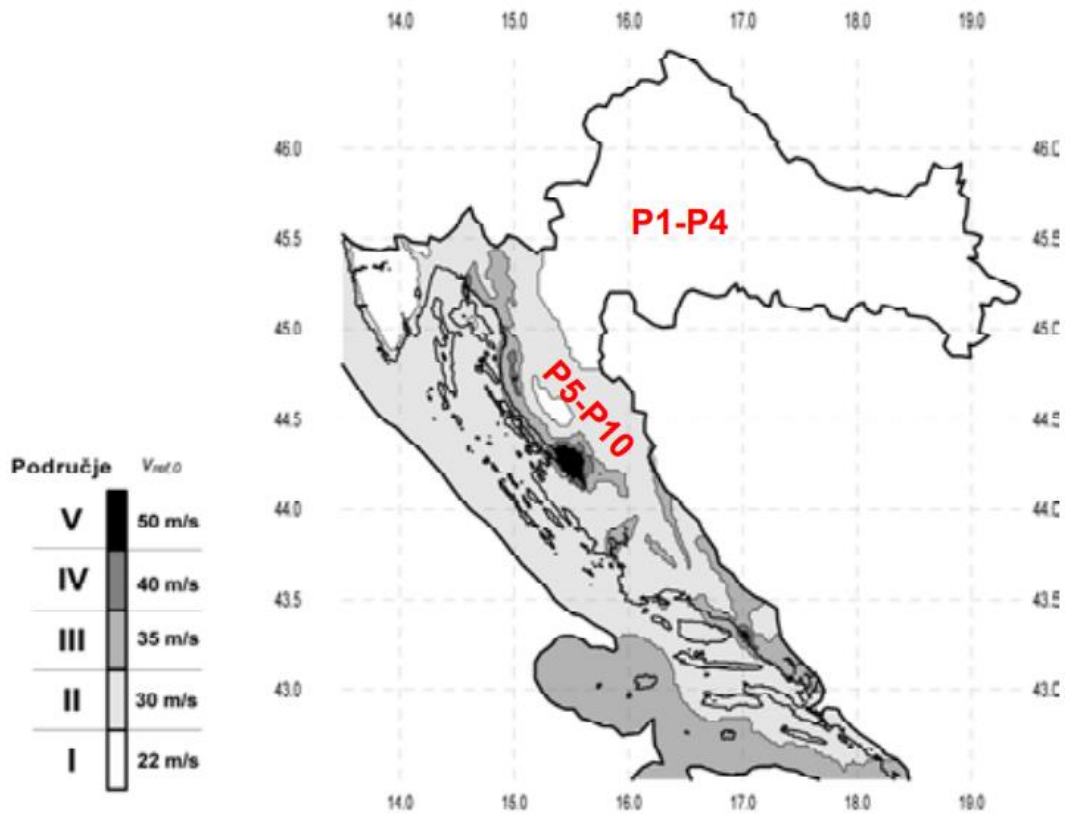
gdje je:

$\rho = 1,25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  - gustoća zraka i ovisi o nadmorskoj visini, temperaturi i tlaku zraka koji se očekuje u određenom vjetrovitom području za oluje,

$v_{\text{ref}}$  - referentna brzina vjetra definirana na slici 5.11.

Ako silos bude postavljen u područjima kategorije I i II što predstavlja većinu površine Republike Hrvatske, tada je  $v_{\text{ref}} = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Uvrštavanjem tih podataka u izraz (5.60) dobije se:

$$q_b = \frac{\rho v_{\text{ref}}^2}{2} = \frac{1,25 \cdot 30^2}{2} = 562,5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}. \quad (5.61)$$



Slika 5.11. Zemljovid područja opterećenja vjetrom [13]

Uvrštavanjem izraza (5.59) i (5.61) u izraz (5.58) dobije se vršni koeficijent tlaka brzine vjetra:

$$q_p = c_e(z) \cdot q_b = 2,85 \cdot 562,5 = 1603 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}. \quad (5.62)$$

Faktor konstrukcije iznosi:

$$c_s d_d = 1 \quad - \text{ za objekte niže od 15 m.} \quad (5.63)$$

Faktor sile za konačne kružne valjke prema poglavlju 7.9.2 iz [14]:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda, \quad (5.64)$$

gdje je:

$c_{f,0}$  - faktor sile za valjke bez toka preko slobodnog kraja (uzdignute od zemlje),

$\psi_\lambda$  - faktor učinka kraja.

Reynoldsov broj  $Re$  određuje se prema izrazu:

$$Re = \frac{bv(z_e)}{\nu}, \quad (5.65)$$

gdje je:

$b$  - promjer,

$v(z_e)$  - vršna brzina vjetra određena izrazom (5.66) prema [14],

$\nu$  - kinematska viskoznost zraka ( $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ ).

Iznos vršne brzine vjetra određen je sljedećim izrazom:

$$v(z_e) = \sqrt{\frac{2q_p}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1603}{1,25}} = 50,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (5.66)$$

Reynoldsov broj sada iznosi:

$$Re = \frac{bv(z_e)}{\nu} = \frac{3,5 \cdot 50,6}{15 \cdot 10^{-6}} = 1,18 \cdot 10^7 \quad (5.67)$$

Istovjetna hrapavost površine  $k$  za galvanizirani čelik od kojeg su napravljeni limovi koji čine komoru silosa može se očitati iz tablice 5.6.

**Tablica 5.6. Istovjetna hrapavost površine  $k$  [14]**

| Vrsta površine      | Istovrijedna hrapavost u mm | Vrsta površine    | Istovrijedna hrapavost u mm |
|---------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| staklo              | 0,0015                      | glatki beton      | 0,2                         |
| uglačani metal      | 0,002                       | blanjano drvo     | 0,5                         |
| fina boja           | 0,006                       | grubi beton       | 1,0                         |
| prskana boja        | 0,02                        | grubo rezano drvo | 2,0                         |
| sjajni čelik        | 0,05                        | hrđa              | 2,0                         |
| lijevano željezo    | 0,2                         | ziđe              | 3,0                         |
| galvanizirani čelik | 0,2                         |                   |                             |

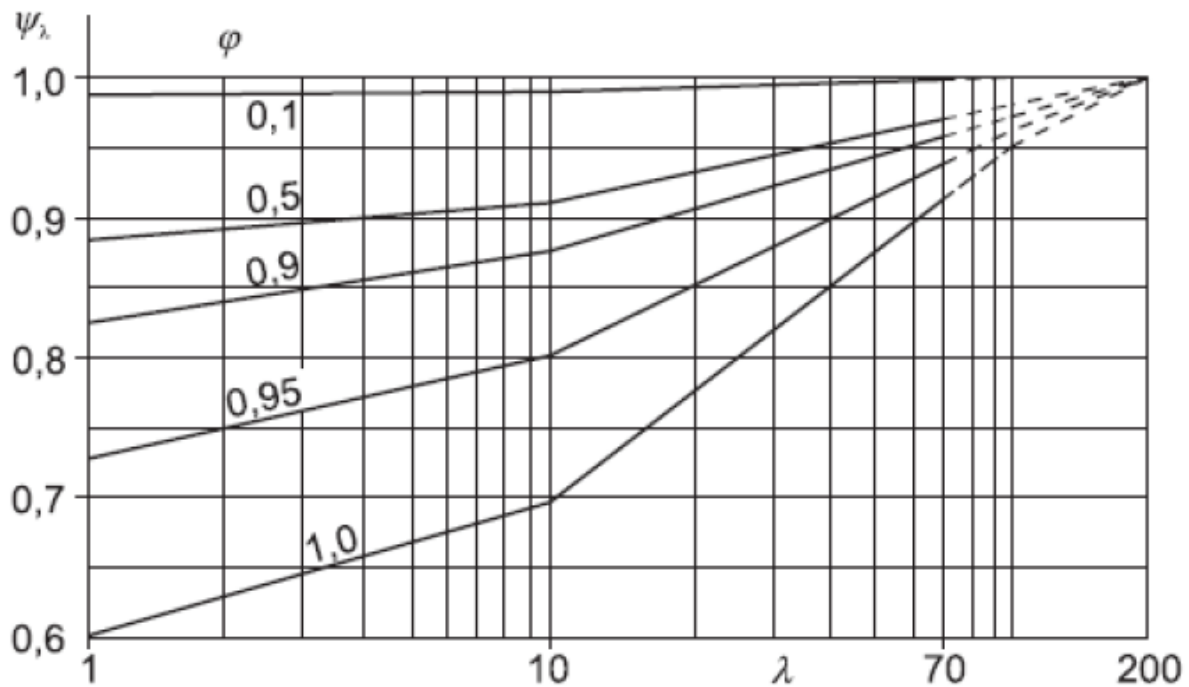
Potrebno je još odrediti omjer istovjetne hrapavosti površine  $k$  i promjera  $b$ :

$$\frac{k}{b} = \frac{0,2}{3500} = 5,7 \cdot 10^{-5}. \quad (5.68)$$

Nakon toga može se odrediti faktor sile za valjke bez toka preko slobodnog kraja  $c_{f,0}$ :

$$c_{f,0} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log 10 \cdot \left(\frac{k}{b}\right)}{1 + 0,4 \cdot \log \left(\frac{Re}{10^6}\right)} = 1,2 + \frac{0,18 \cdot \log(10 \cdot 5,7 \cdot 10^{-5})}{1 + 0,4 \cdot \log \left(\frac{1,17 \cdot 10^7}{10^6}\right)} = 0,79. \quad (5.69)$$

Faktor učinka kraja  $\psi_\lambda$  određuje se kao funkcija vitkosti  $\lambda$ . Izračunati faktor sile  $c_{f,0}$  temelji se na mjerenjima provedenim na konstrukcijama bez učinka slobodnog kraja, uzdignuto od tla. Faktor učinka kraja obuhvaća smanjenu otporost konstrukcije zbog toka vjetra oko kraja (učinak kraja), a njegova vrijednost može se očitati s dijagrama na slici 5.12.



Slika 5.12. Vrijednosti faktora učinka kraja kao funkcije omjera punoće  $\varphi$  vitkosti  $\lambda$  [14]

Za kružne valjke niže od 15 m vitkost se računa prema sljedećem izrazu:

$$\lambda = \frac{l}{b} = \frac{7,135}{3,5} = 2,04, \quad (5.70)$$

gdje  $l$  u ovom slučaju predstavlja visinu komore silosa, a  $b$  je promjer cilindričnog dijela silosa.

Omjer punoće  $\varphi$  (vidjeti sliku 5.13) dan je u sljedećem izrazu:

$$\varphi = \frac{A}{A_c}, \quad (5.71)$$

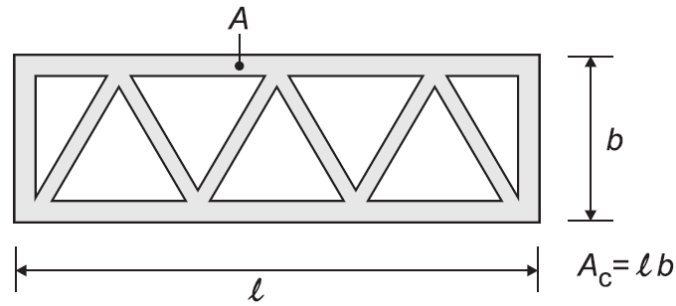
gdje je:

$A$  – zbroj projiciranih ploština predmeta,

$A_c$  – ukupna omeđena ploština  $A_c = l b$ .

Kako su za silos u ovom zadatku veličine  $A$  i  $A_c$  jednake, omjer punoće iznosi:

$$\varphi = \frac{A}{A_c} = \frac{18,865}{18,865} = 1. \quad (5.72)$$



Slika 5.13. Definicija omjera punoće [14]

Sada je iz dijagrama sa slike 5.12 moguće očitati vrijednost faktora učinka kraja kao funkcije omjera punoće i vitkosti:

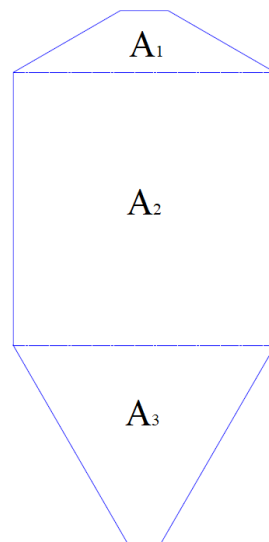
$$\psi_\lambda = 0,63. \quad (5.73)$$

Uvrštavanjem izraza (5.69) i (5.73) u izraz (5.64) dobije se iznos faktora sile za konačne kružne valjke:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda = 0,79 \cdot 0,63 = 0,4977. \quad (5.74)$$

Slika 5.14 prikazuje projekciju komore silosa koja predstavlja ekvivalentnu površinu koja je potrebna za izračunavanje ukupne sile vjetra, a podijeljena je na 3 dijela koji predstavljaju površinu projekcije krova, lijevka i cilindričnog dijela komore silosa.

$$A_{\text{ref}} = A_1 + A_2 + A_3 = 1,75 \cdot 0,825 + 3,5 \cdot 3,645 + 1,75 \cdot 2,665 = 18,865 \text{ m}^2. \quad (5.75)$$



Slika 5.14. Referentna površina komore silosa

Konačno, uvrštavanjem izraza (5.62), (5.63), (5.74) i (5.75) u izraz (5.57) dobije se iznos ukupne sile vjetra koja djeluje na nosivu konstrukciju silosa:

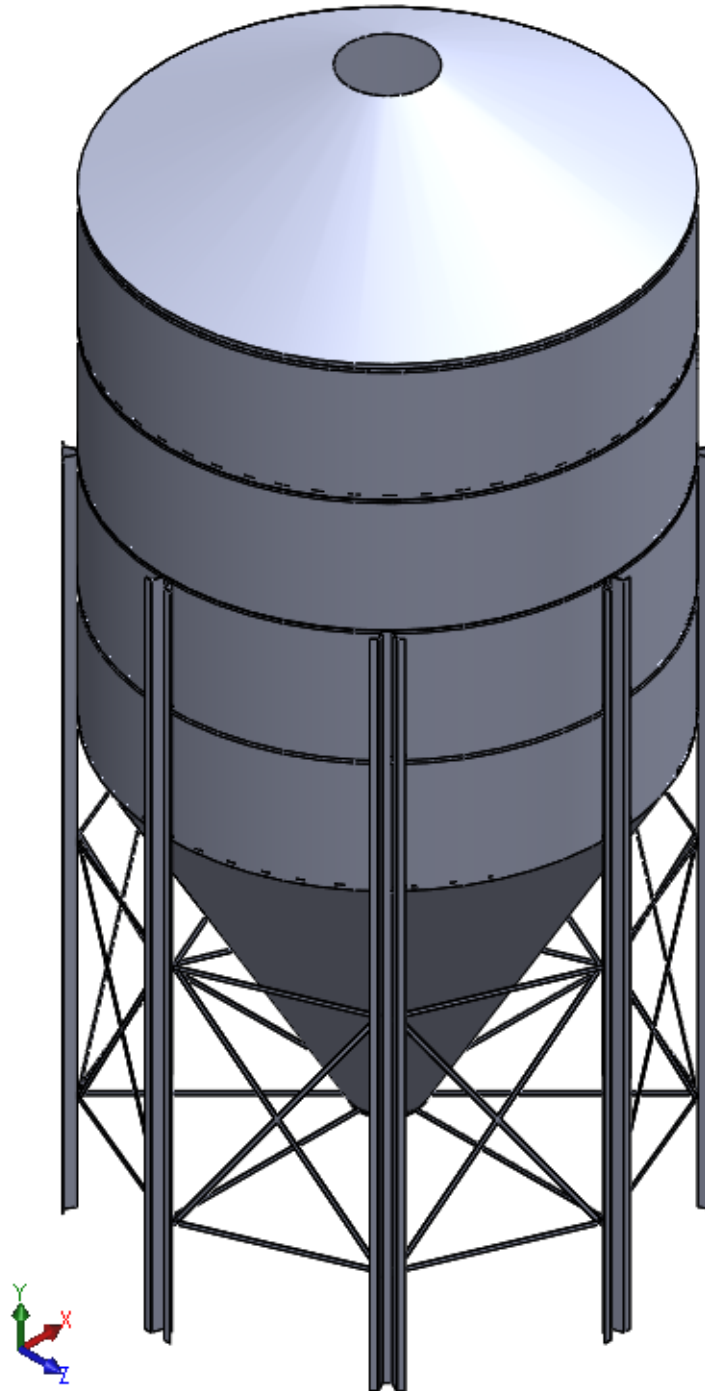
$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{\text{ref}} = 1 \cdot 0,4977 \cdot 1603 \cdot 18,865 = 15050 \text{ N}. \quad (5.76)$$



## 6. NUMERIČKA ANALIZA

Nakon modeliranja geometrije silosa, verifikacije konačnih elemenata te određivanja opterećenja koja se pojavljuju može se izvršiti analiza metodom konačnih elemenata. Kao što je već navedeno, analiza je provedena pomoću programskog paketa *Abaqus*.

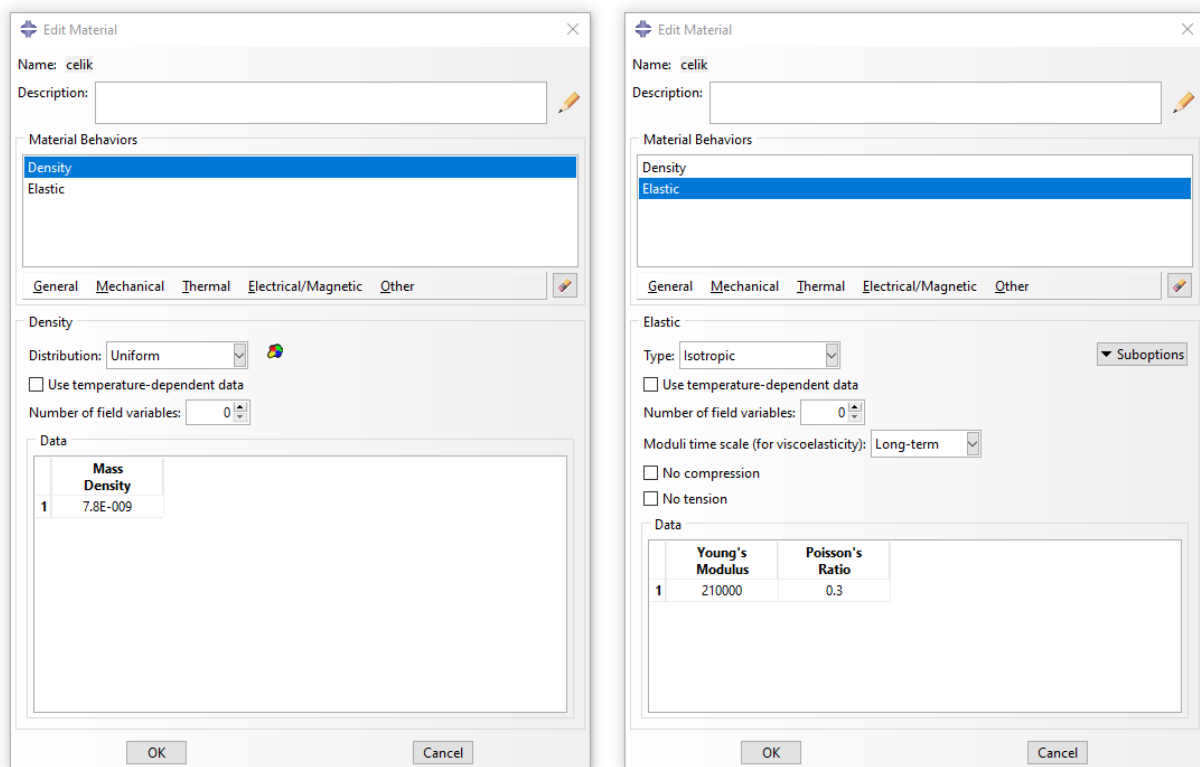
Na slici 6.1 nalazi se konačna modifikacija 3D modela silosa za koji je provedena numerička analiza pomoću metode konačnih elemenata.



Slika 6.1. Modificirani 3D model silosa

Za početak, 3D model silosa napravljen u *Solidworks-u* spremljen je kao STEP datoteka kako bi se mogao otvoriti u *Abaqus-u*. Prije početka provođenja pojedinih koraka potrebnih za pokretanje analize, na slici 6.1 možemo primijetiti kako je geometrija silosa dodatno modificirana. Cilindrični dio koji je izrađen od valovitih limova, zamijenjen je segmentima od glatkih limova kako bi se jednostavnije mogli zadati tlakovi koji nastaju uslijed pohranjenog materijala. Iako to nije potpuno realna situacija, pojednostavljuje se postupak kreiranja cijelog sklopa u *Solidworks-u* te zadavanja ulaznih parametara u *Abaqus-u*. Također, provođenjem analize na ovaj način nalazimo se na strani sigurnosti jer su valoviti limovi otporniji na opterećenja u silosu.

Nakon učitavanja sklopa silosa pomoću opcije „*Import*“, potrebno je dodijeliti svojstva materijala. U modulu „*Properties*“ dodijeljena su svojstva za čelik koja su nužna za analizu, a to su modul elastičnosti, Poissonov faktor i gustoća materijala. Kako su svi dijelovi nosive konstrukcije silosa napravljeni od istog materijala, preostalo je dodijeliti ta svojstva svakoj komponenti konstrukcije. Prikaz dodanih svojstava materijala nalazi se na slici 6.2.

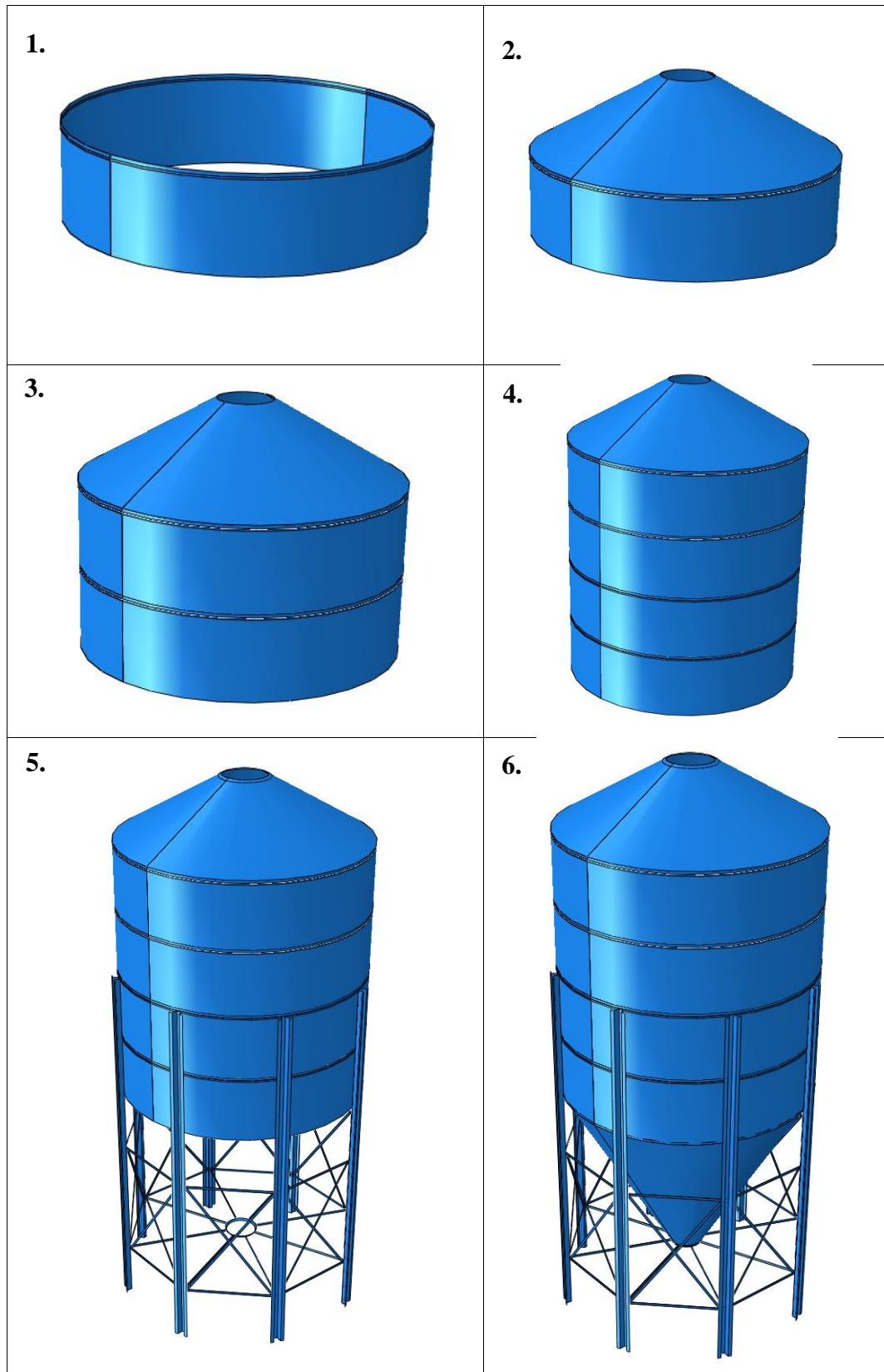


**Slika 6.2. Svojstva materijala**

Nakon toga, u modulu „*Assembly*“ ubačene su sve komponente i sklopljene tako da čine nosivu konstrukciju silosa. Proces montaže u stvarnosti se odvija prema koracima prikazanim u tablici 6.1, odnosno kako je opisano u poglavlju 2. U *Abaqusu* naravno nije bitan redoslijed montaže

komponenti, važno je na pravilan način osigurati veze i spojeve između komponenti te pravilno nalijeganje površina.

**Tablica 6.1. Proces montaže nosive konstrukcije silosa**



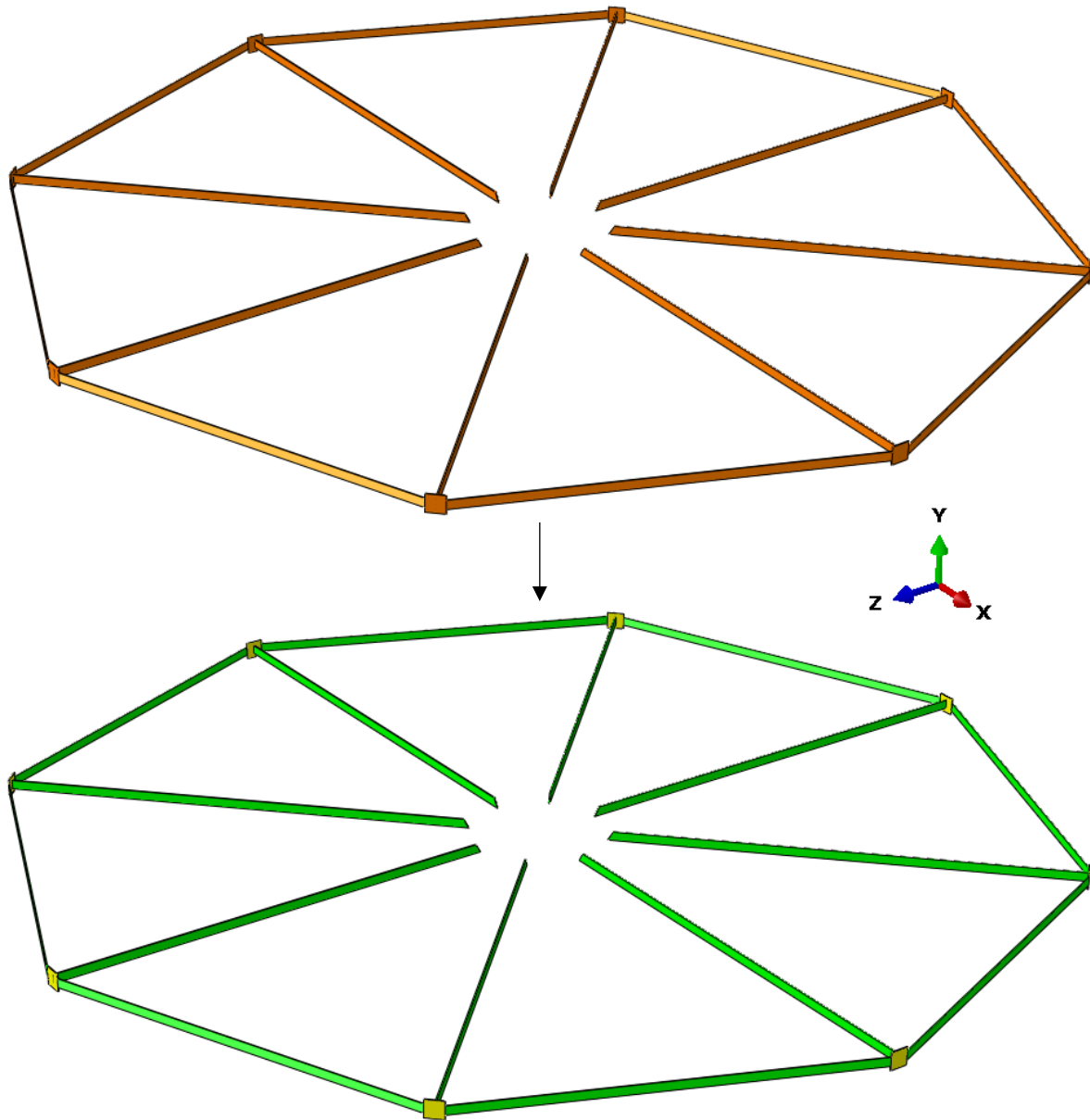
Na slici 6.3 prikazan je sklop nosive konstrukcije silosa u *Abaqusu*.



Slika 6.3. Sklop silosa u *Abaqusu*

U modulu „*Interaction*“ dodijeljene su sve veze između pojedinih komponenti koje su međusobno na neki način spojene i daju stabilnost i čvrstoću konstrukciji. Ravnine i koordinatni sustavi koji su dodani služe za lakše zadavanje opterećenja te podjelu segmenata kako bi se omogućilo umrežavanje cijele konstrukcije. Zbog komplicirane geometrije, neke komponente su se morale podijeliti na manje pravilnije oblike kako bi se mogla stvoriti mreža konačnih elemenata. Također, radi smanjenja broja veza koje se moraju dodijeliti na spojevima, neki

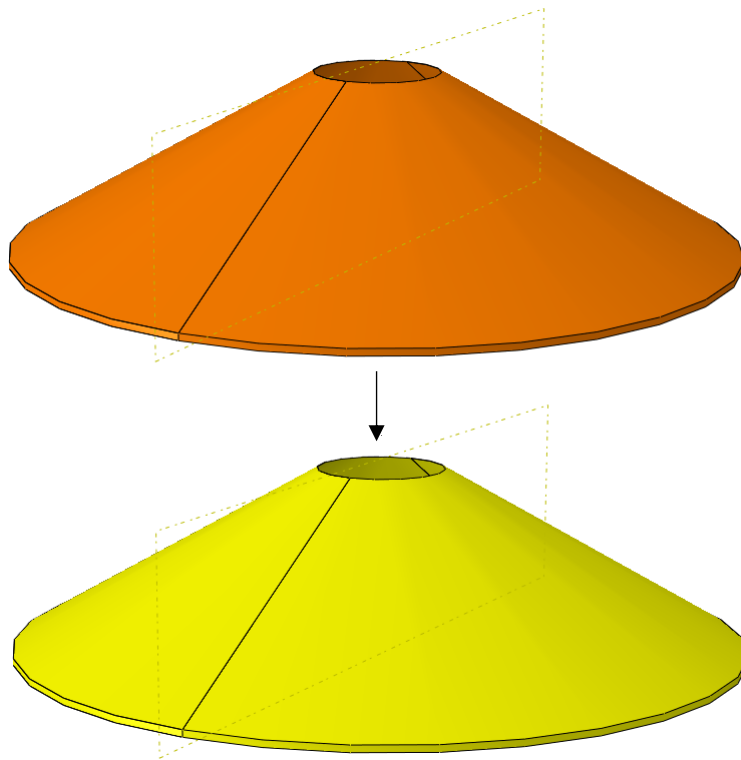
podsklopovi modelirani su kao jedna komponenta. Zbog toga je pomoću opcije „*Create Partition*“ napravljena podjela metalnih profila koji služe za ojačanje i učvršćivanje nogu silosa, a prikazana je na slici 6.4.



**Slika 6.4. Podjela ojačanja nogu silosa na jednostavnije dijelove**

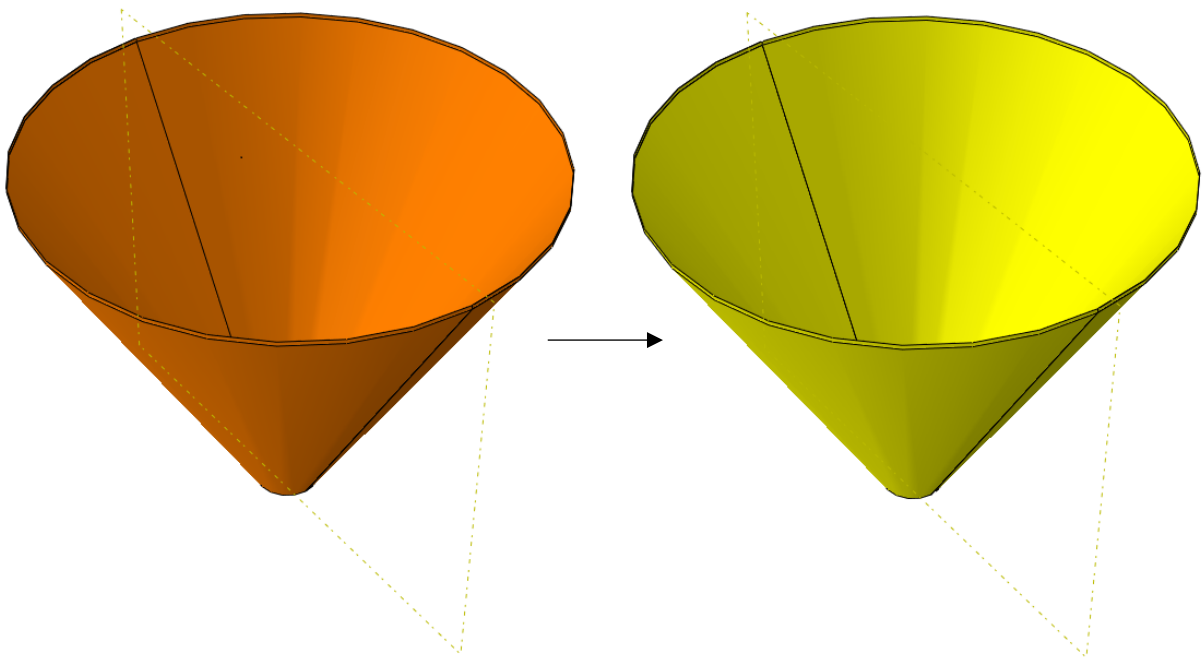
Isto tako, napravljena i je i podjela nekih drugih komponenti silosa kao što su krov i lijevak. Prvo su kreirane ravnine koje su dijelile komponente na dva jednaka dijela. Zatim je opcijom „*Create Partition*“ → „*Cell Partition*“ → „*Use datum plane*“ napravljena podjela krova i lijevka na dva dijela. Možemo vidjeti kako su prije same podjele komponente bile narančaste boje što u *Abaqus*-u označava da nije moguće kreirati mrežu konačnih elemenata i da je potrebno napraviti upravo podjelu na jednostavnije dijelove.

Podjela krova na dva dijela prikazana je na slici 6.5.



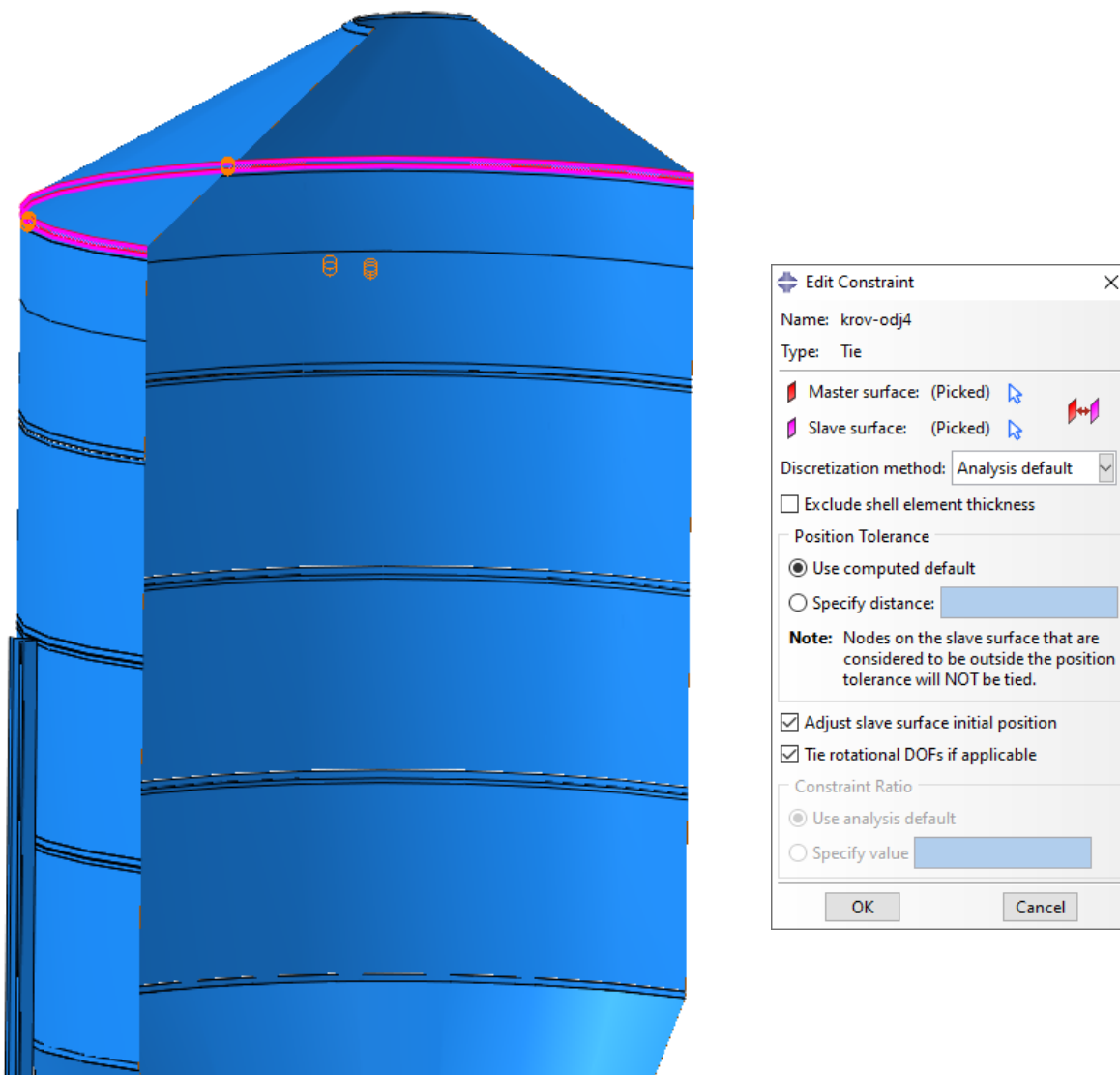
**Slika 6.5. Podjela krova na dijelove za kreiranje mreže KE**

Slika 6.6 prikazuje podjelu lijevka na dijelove za kreiranje mreže KE.



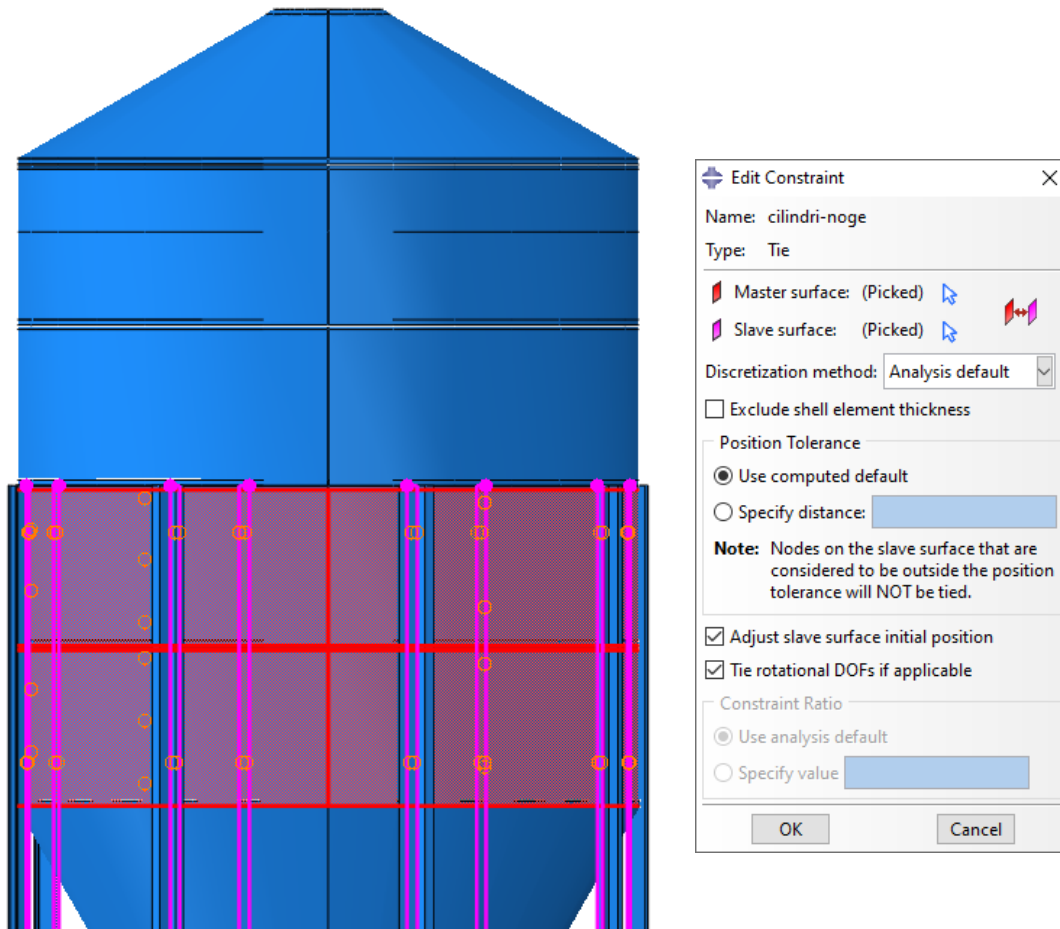
**Slika 6.6. Podjela lijevka na dijelove za kreiranje mreže KE**

Veze između komponenti su vijčani ili zavareni spoj. Kako se u realnoj situaciji konstrukcija sastoji od nekoliko stotina veza, bilo bi neisplativo modelirati svaki spoj posebno te zadavati svaku vijčanu vezu jer je za to potrebno puno vremena, a i umrežavanje konstrukcije bi se zakompliciralo te bi se povećalo i računalno vrijeme. Stoga, na mjestima gdje se nalaze vijčani spojevi, odgovarajuće površine spojene su „Tie“ vezom koja u ovom slučaju predstavlja vijčani spoj dvaju komponenti. Svaki segment komore silosa pričvršćen je vijcima sa susjednim segmentom. Isto tako, noge silosa vijcima su povezane s donja dva cilindrična segmenta kao i sa svim manjim metalnim profilima koji međusobno povezuju i učvršćuju noge. Stoga, na mjestima svih tih spojeva dodijeljena je „Tie“ veza. Na slici 6.7 i slici 6.8 prikazane su veze krova i cilindričnog dijela te veze cilindričnih segmenata s nogama silosa. Kao za vezu krova i cilindričnog odjeljka, dodijeljene su i veze za sve spojeve između cilindričnih odjeljaka međusobno.



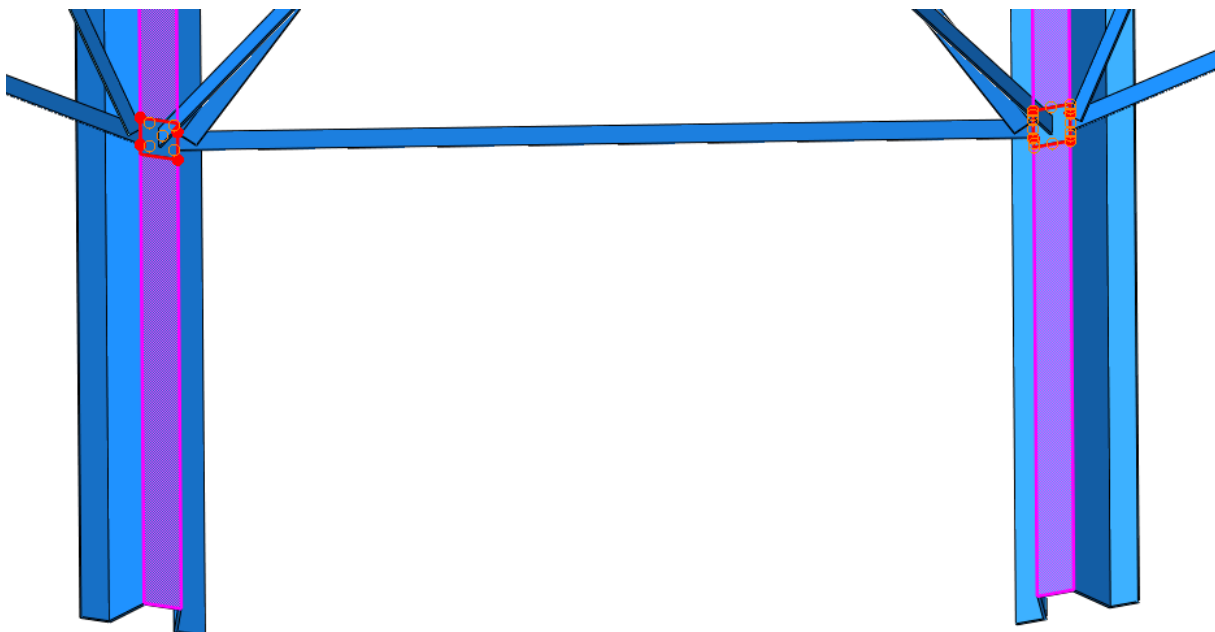
Slika 6.7. Veza između krova i cilindričnog odjeljka





Slika 6.8. Veze cilindričnih segmenata s nogama silosa

Slika 6.9 prikazuje veze između nogu silosa i ojačanja kojima se ostvaruje veća otpornost konstrukcije na savijanje.

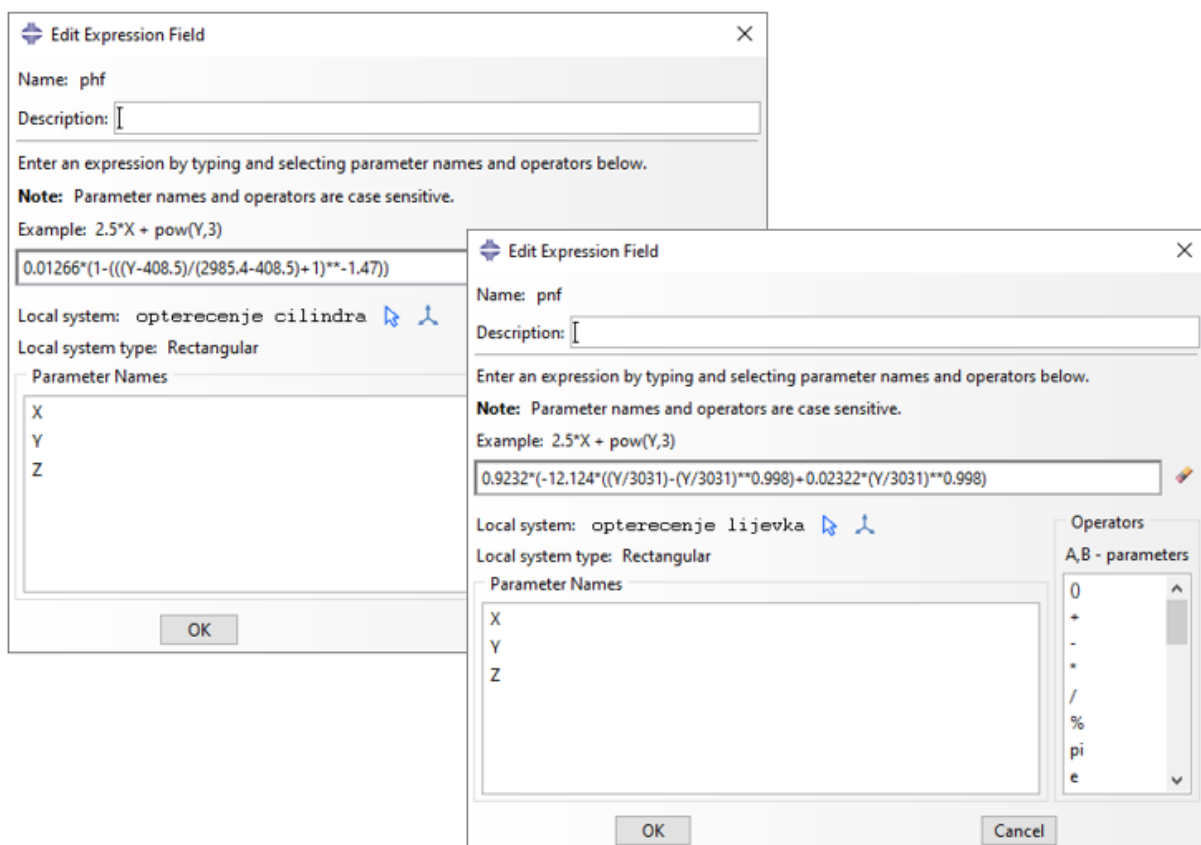


Slika 6.9. Veze nogu i ojačanja



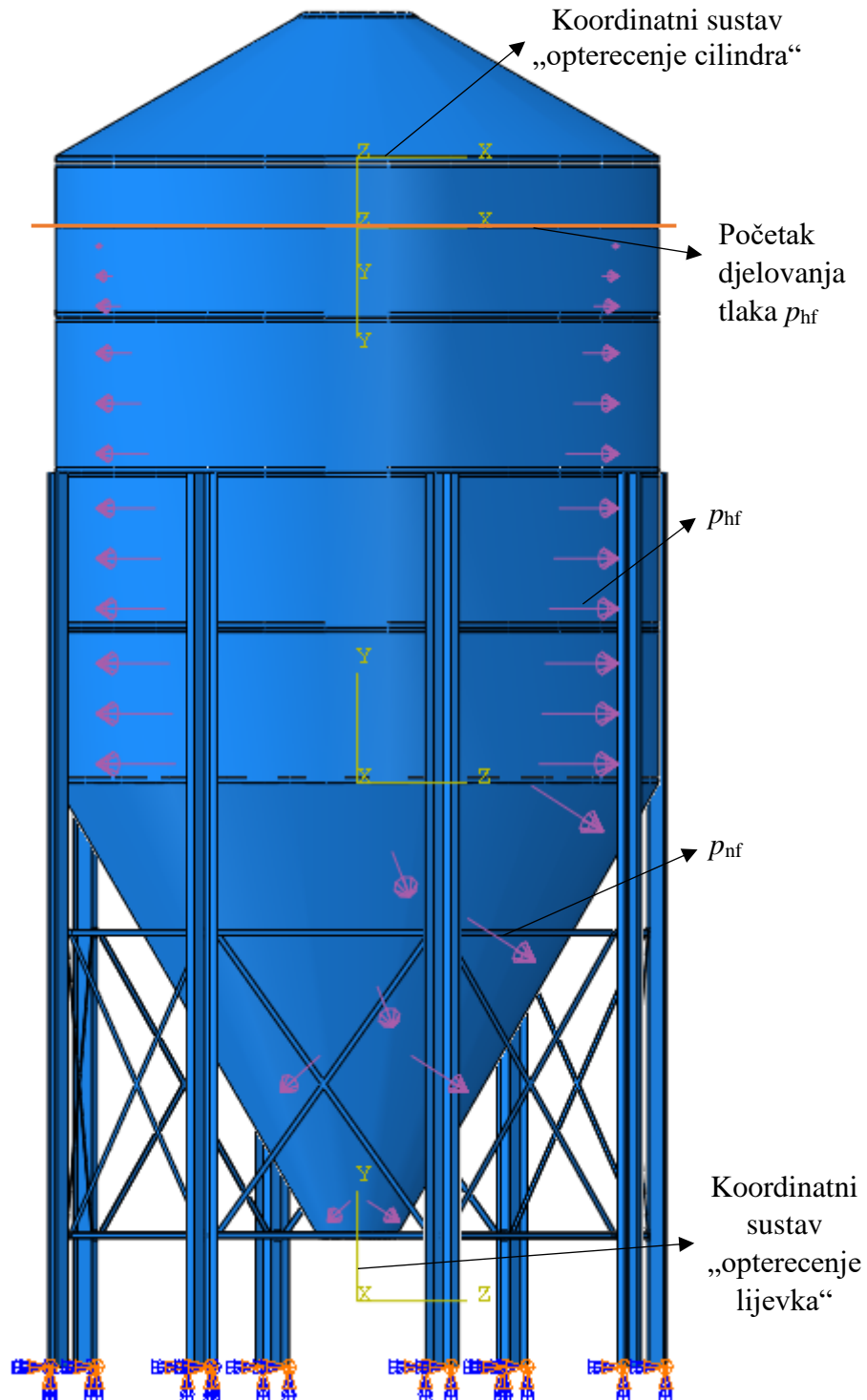
Nakon dodjeljivanja veza i ograničenja, slijedi zadavanje rubnih uvjeta i opterećenja. Budući da noge drže silos uspravnim i stabilnim te preuzimaju težinu uskladištenog materijala, jasno je da rubni uvjet predstavlja uklještenje pri dnu nogu. Opterećenja koja djeluju na silos malo su kompleksnija i njihovo zadavanje i određivanje zahtijevalo je više vremena. Krenuvši od uskladištenog materijala koji predstavlja glavno i najveće opterećenje, potonje se može razložiti na dvije komponente koje djeluju na cilindrični dio te dvije komponente koje djeluju na lijevak silosa, što ukupno daje 4 komponente opterećenja. Kako je spomenuto i izračunato u poglavlju 5.1, te komponente su normalni i tangencijalni tlakovi na stijenke silosa. Njihovo djelovanje razlikuje se od djelovanja tekućina na stijenke, a tlak koji se javlja ne mijenja se linearno s dubinom kao što je to slučaj kod tlaka nastalog zbog tekućine. Nakon što su prema odgovarajućim normama izračunate raspodjele tlakova koji djeluju na stijenke, preostaje ih zadati u *Abaqus-u*. Za to je korištena opcija „*Analytical fields*“ pomoću koje se izravno može zadati funkcija koja opisuje djelovanje tlaka u ovisnosti o dubini u silosu. Zatim je taj tlak primijenjen na površinu na koju djeluje.

Slika 6.10 prikazuje funkcije koje predstavljaju djelovanje tlakova u smjeru normale na stijenke silosa. U samom prozoru „*Edit Expression Field*“ vidljivo je da se funkcije tlakova odnose na određene lokalne koordinatne sustave koji su kreirani prema proračunu iz normi.



Slika 6.10. Funkcije normalnih tlakova  $p_{hf}$  i  $p_{nf}$  na stijenke silosa

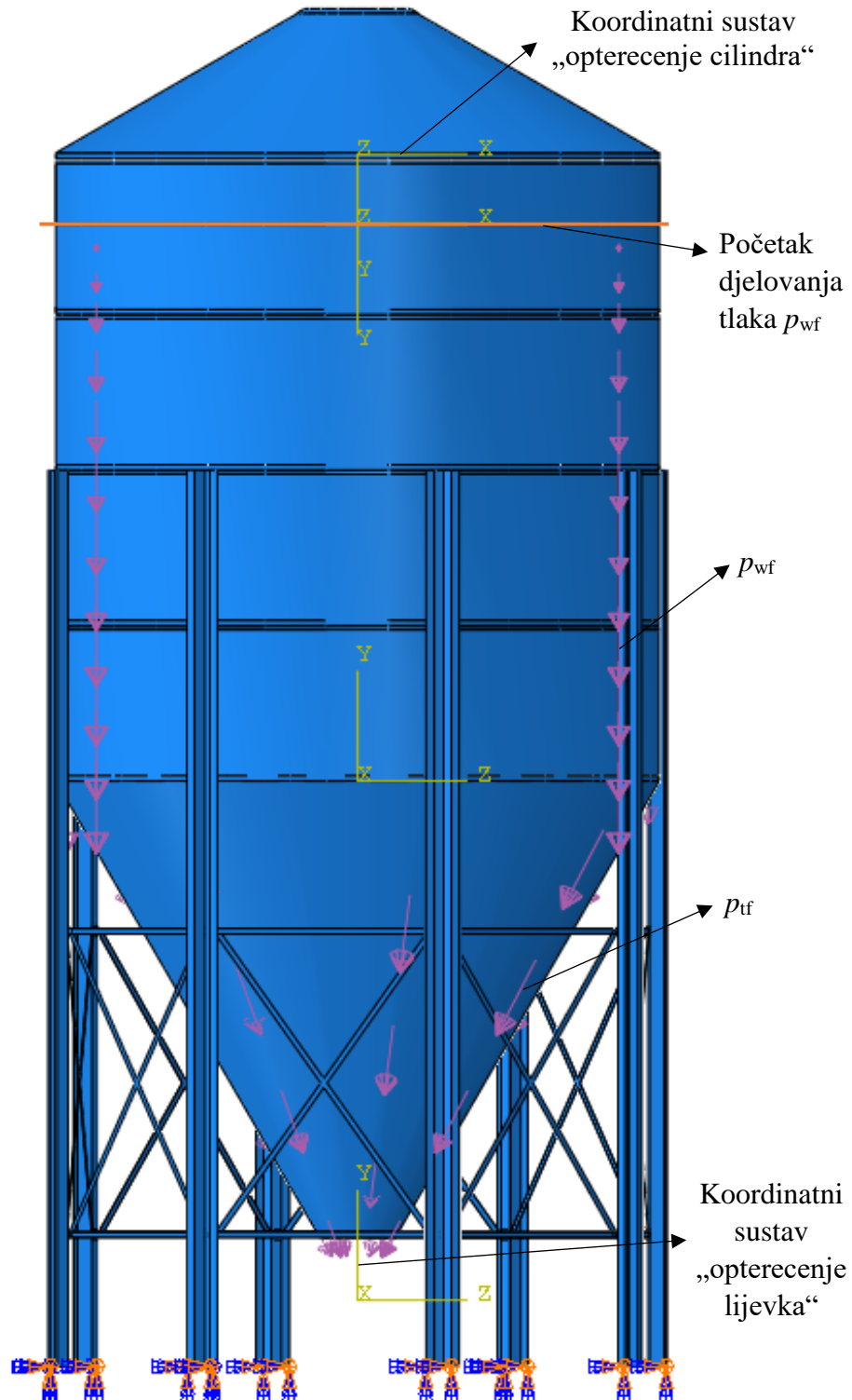
Na slici 6.11 prikazani su zadani rubni uvjeti te normalni tlakovi i pripadni lokalni koordinatni sustavi preko kojih su zadane funkcije tlakova.



**Slika 6.11. Rubni uvjeti i tlakovi u smjeru normale na stijenke silosa**

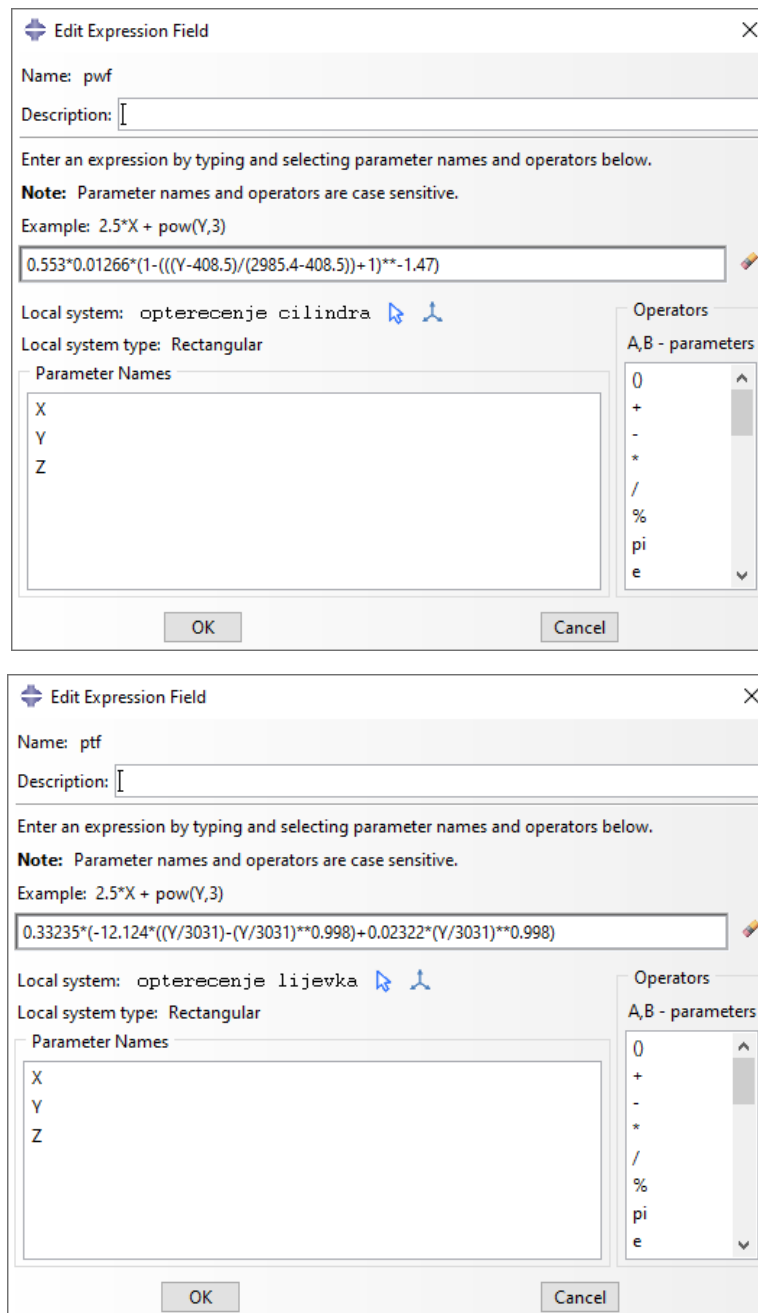
Koordinatni sustav „*opterećenje cilindra*“ označava ekvivalentnu površinu pohranjenog materijala, dok ravnina ispod tog sustava označava mjesto početka dodira materijala sa stijenka silosa nakon koje počinje djelovanje tlaka na stijenke. Koordinatni sustav

„opterećenje lijevka“ nalazio bi se u vrhu stošca lijevka kada lijevak ne bi bio odrezan pri dnu, odnosno kad ne bi bio u obliku krnjeg stošca. Taj koordinatni sustav je relevantan za zadavanje tlakova na lijevak. Na slici 6.12 analogno su prikazani zadani tlakovi zbog trenja nastalog između materijala i stijenki silosa pri čemu se koriste pripadni lokalni koordinatni sustavi.



Slika 6.12 Rubni uvjeti, vertikalni tlak  $p_{wf}$  i tangencijalni tlak  $p_{tf}$

Slika 6.13 prikazuje funkcije koje predstavljaju djelovanje tlakova nastalih zbog trenja između uskladištenog materijala i stijenki silosa.

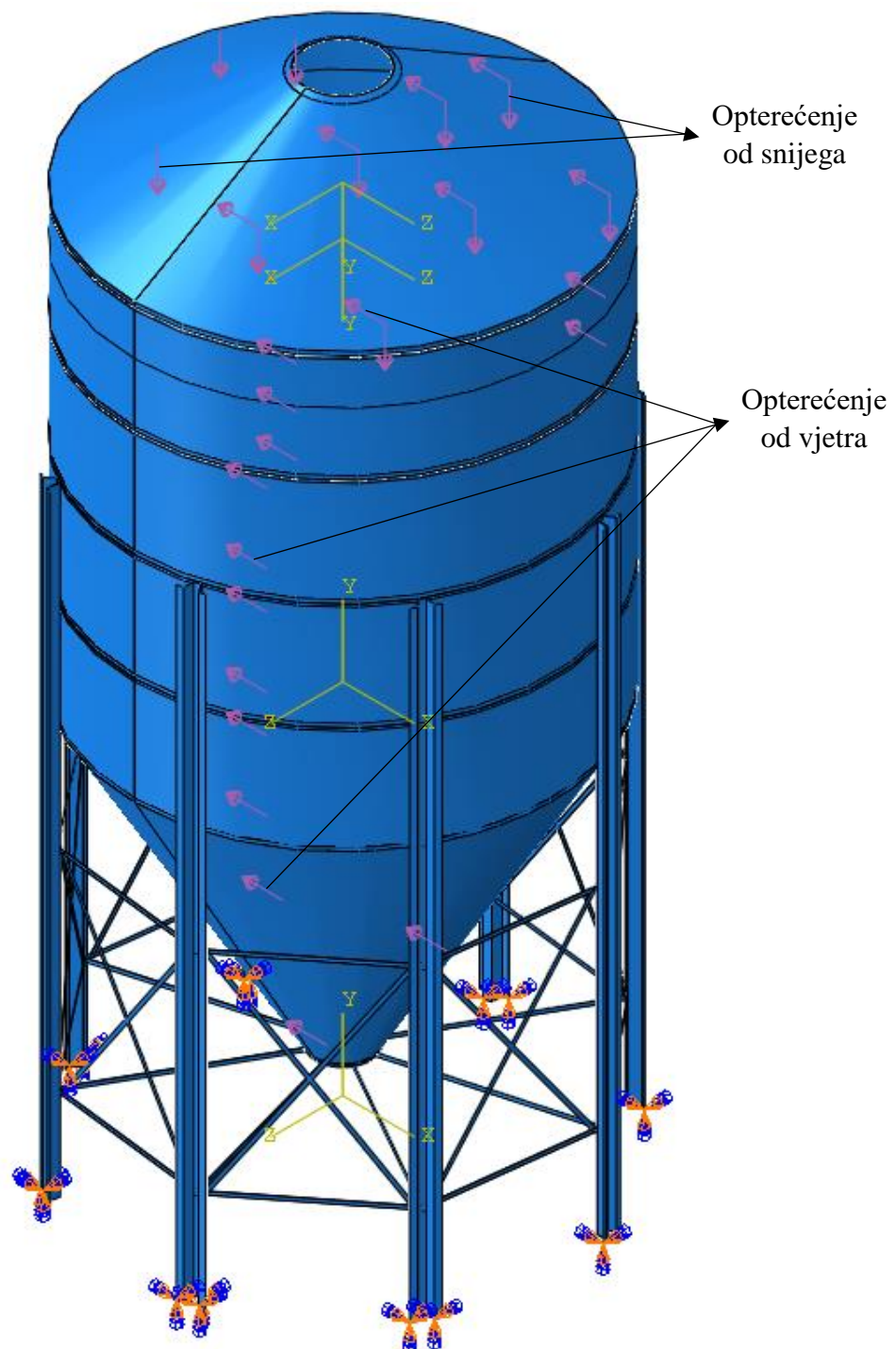


**Slika 6.13. Funkcije tlakova uslijed trenja uskladištenog materijala i stijenke silosa**

Nakon što su zadani tlakovi koji nastaju zbog pohranjenog materijala, preostalo je još zadati opterećenje uzrokovano vjetrom i snijegom. Opterećenje od snijega poznato je iz priručnika tvrtke *Polnet* gdje je napisan podatak o maksimalnom dopuštenom opterećenju. Opterećenje od vjetra izračunato je u poglavlju 5.2 prema normi EN 1991-1-4:2005+A1 [14].

Slika 6.14 prikazuje zadana opterećenja od vjetra i snijega u *Abaqusu*. Opterećenja su zadana pomoću opcije „*Surface traction*“ gdje tlak od snijega djeluje na krov silosa okomito prema

dolje u smjeru gravitacije, dok tlak od vjetra djeluje u horizontalnom smjeru te je primijenjen na polovicu komore silosa.

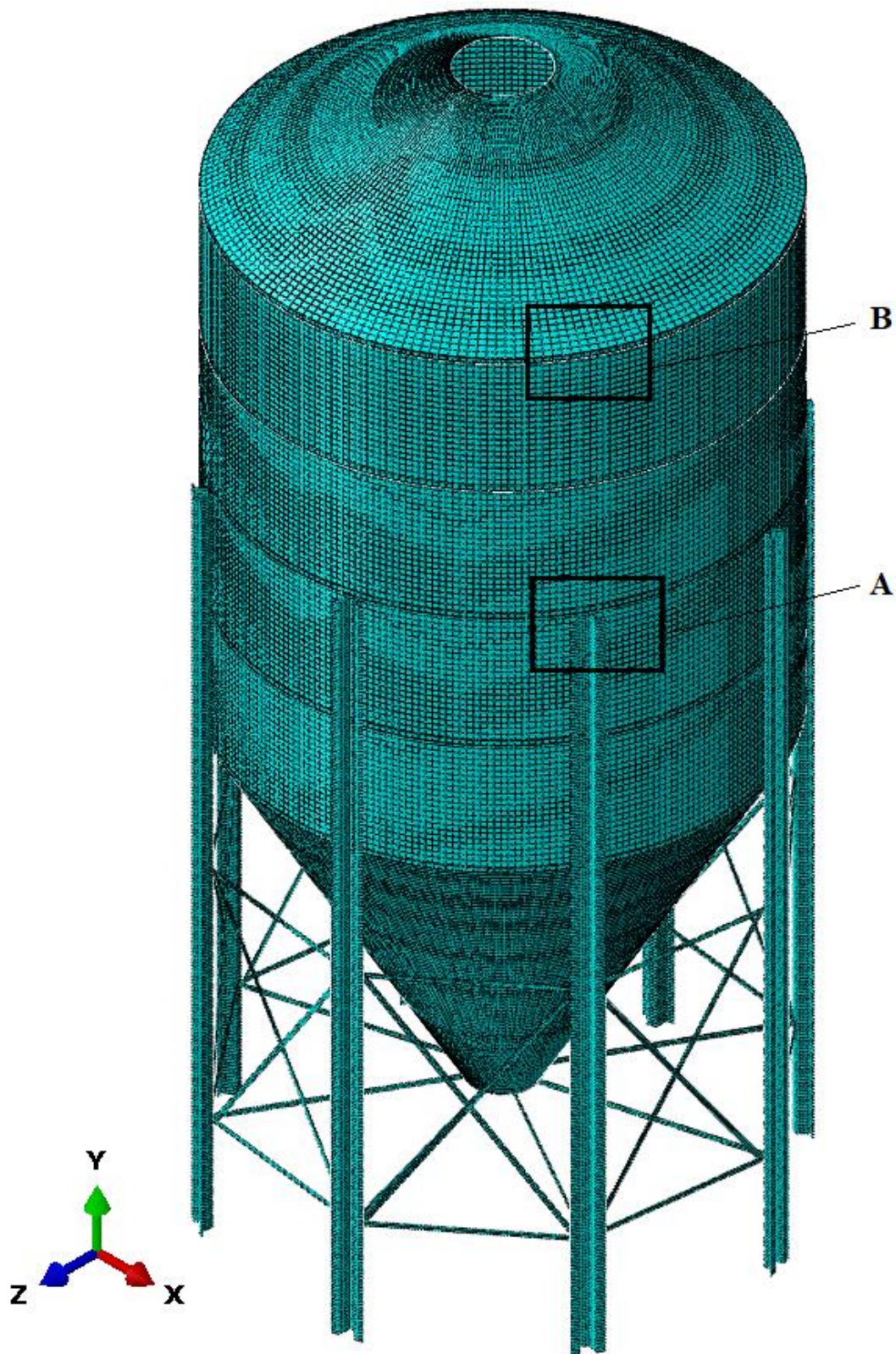


**Slika 6.14. Opterećenje od snijega i vjetra**

Nakon zadavanja svih veza, ograničenja, rubnih uvjeta i opterećenja slijedi stvaranje mreže konačnih elemenata sklopa. Prije stvaranja same mreže, pojedine komponente su se zbog specifične geometrije morale podijeliti na jednostavnije oblike kako bi im se mogla dodijeliti prikladna mreža konačnih elemenata.

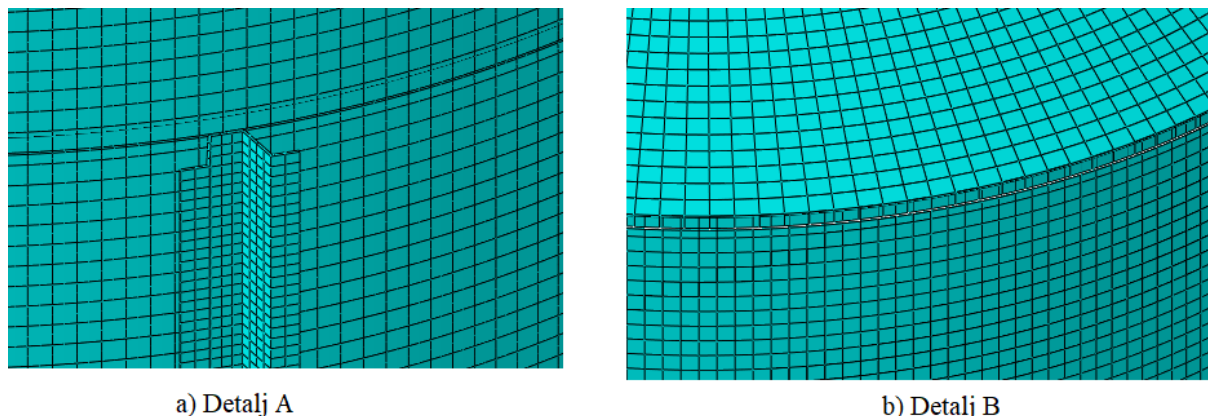


Kako je određeno tijekom provođenja verifikacije, za umrežavanje silosa koristit će se heksaedarski konačni elementi drugog reda s reduciranom integracijom (C3D20R). Konačna mreža od 89853 konačna elementa prikazana je na slici 6.15.



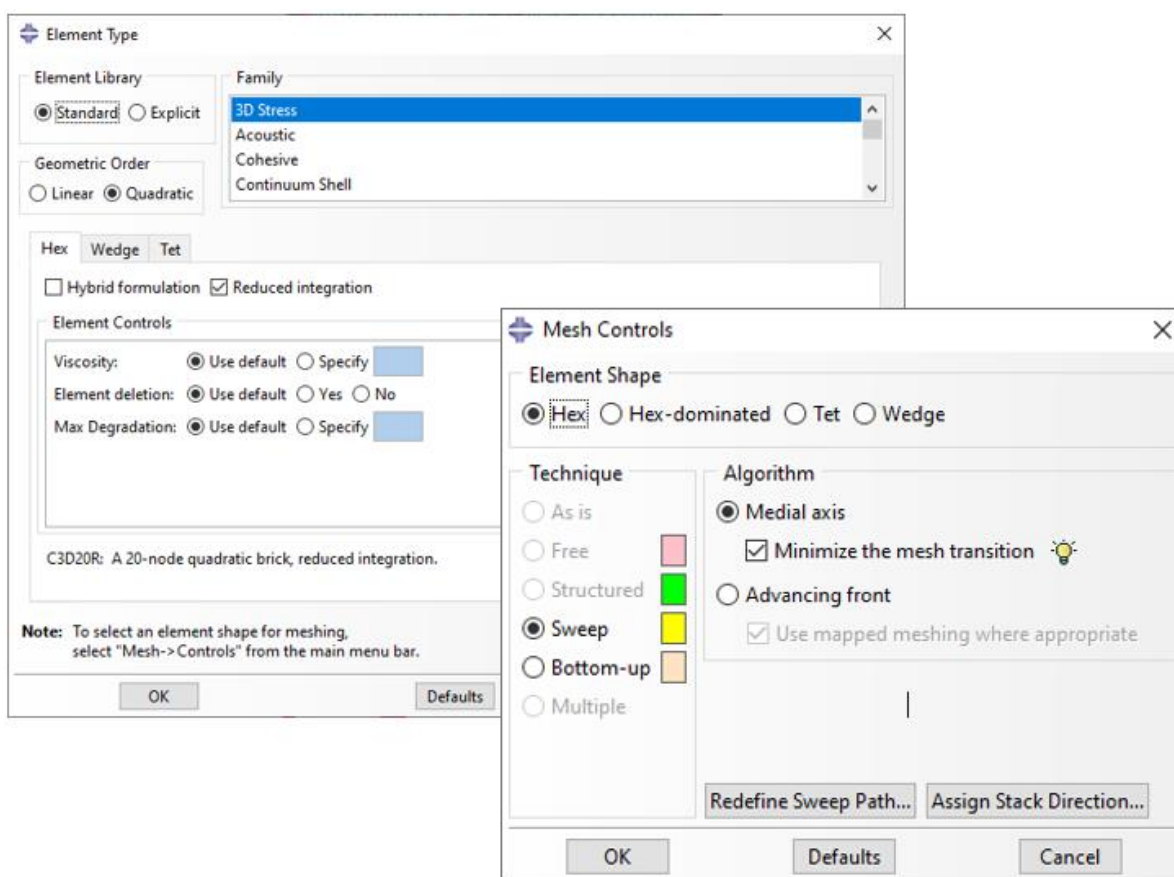
Slika 6.15. Mreža od 89853 KE

Na slici 6.16 mogu se vidjeti detalji prethodne slike gdje je bolje prikazana mreža konačnih elemenata. Prikazane su mreže krova, cilindričnih dijelova te noge silosa.



**Slika 6.16. Prikaz detalja mreže konačnih elemenata**

Prije kreiranja mreže elemenata, u modulu „Mesh“ odabran je tip konačnih elemenata korištenjem opcija „Assign Mesh Type“ i „Assign Mesh Controls“ kako je prikazano na slici 6.17.

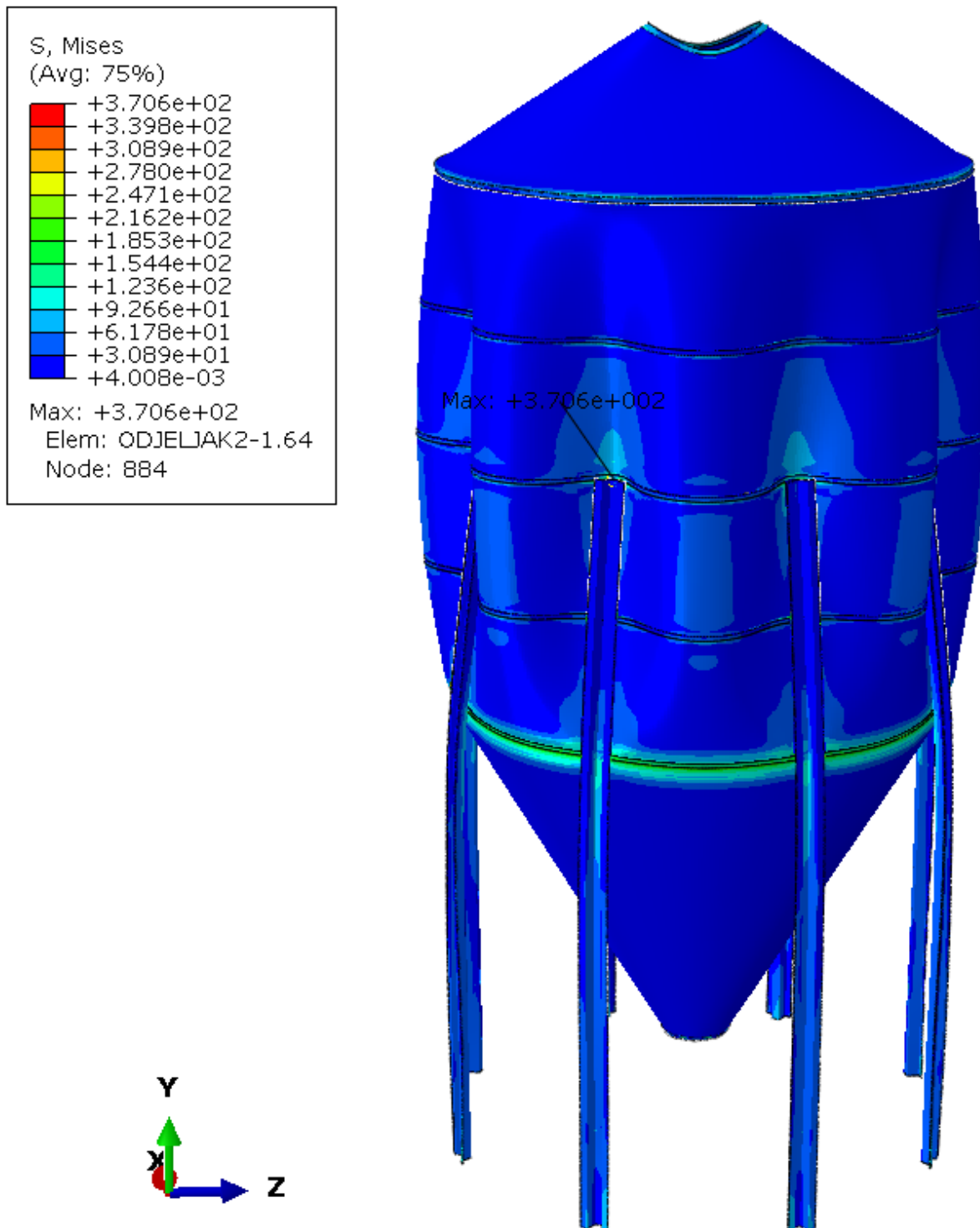


**Slika 6.17 Prikaz odabranog tipa konačnih elemenata za analizu silosa**

Nakon definiranja svih potrebnih parametara i stvaranja mreže konačnih elemenata, silos je konačno podvrgnut analizi.

## 6.1. Prikaz rezultata

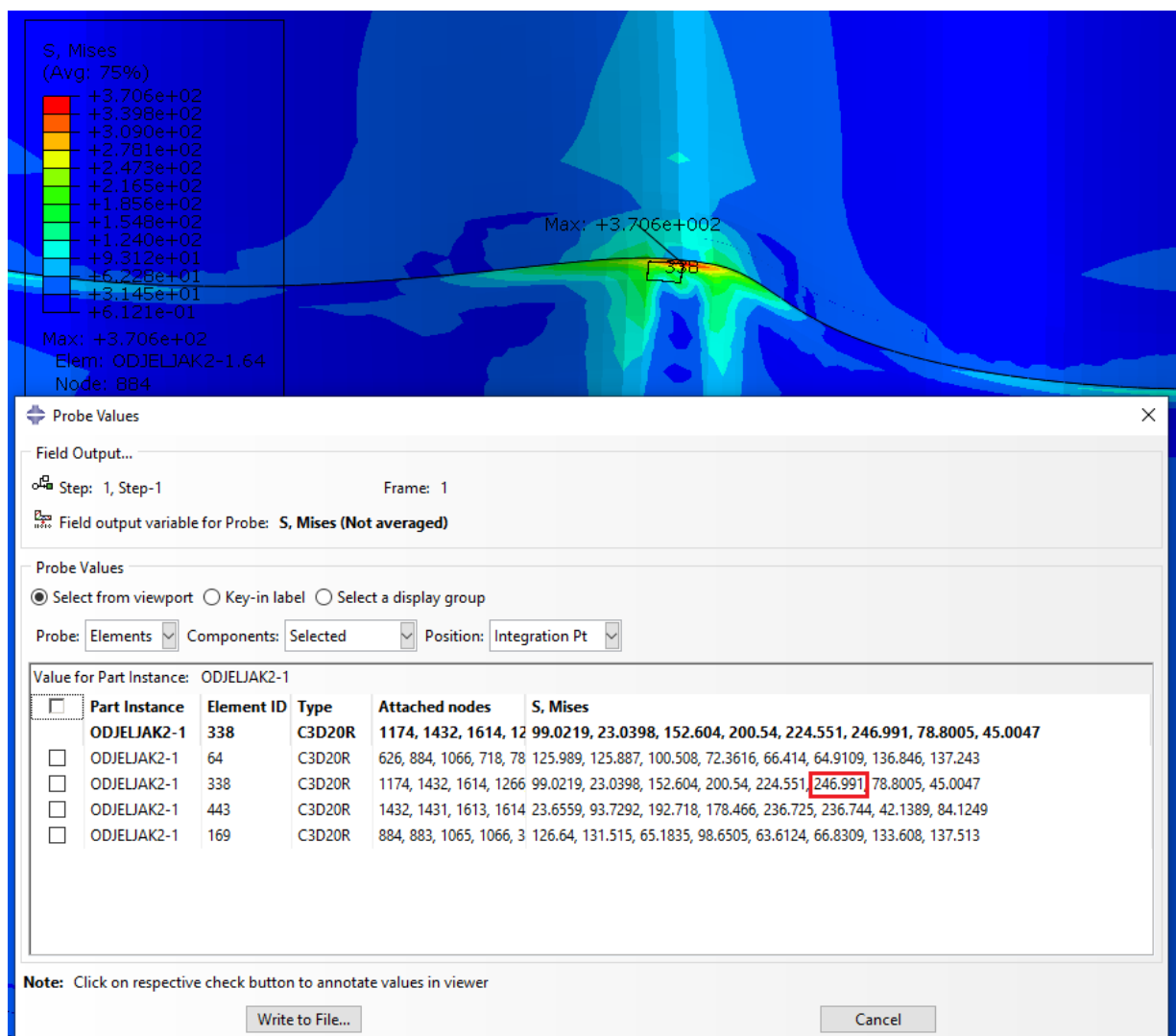
Slika 6.18 prikazuje ekvivalentna naprezanja silosa prema *von Misesu* u MPa. Deformirani oblik silosa je naravno karikiran, tj. uvećan za određeni faktor kako bi se lakše uočile velike deformacije i naprezanja.



Slika 6.18. Ekvivalentna naprezanja silosa prema *von Misesu* u MPa



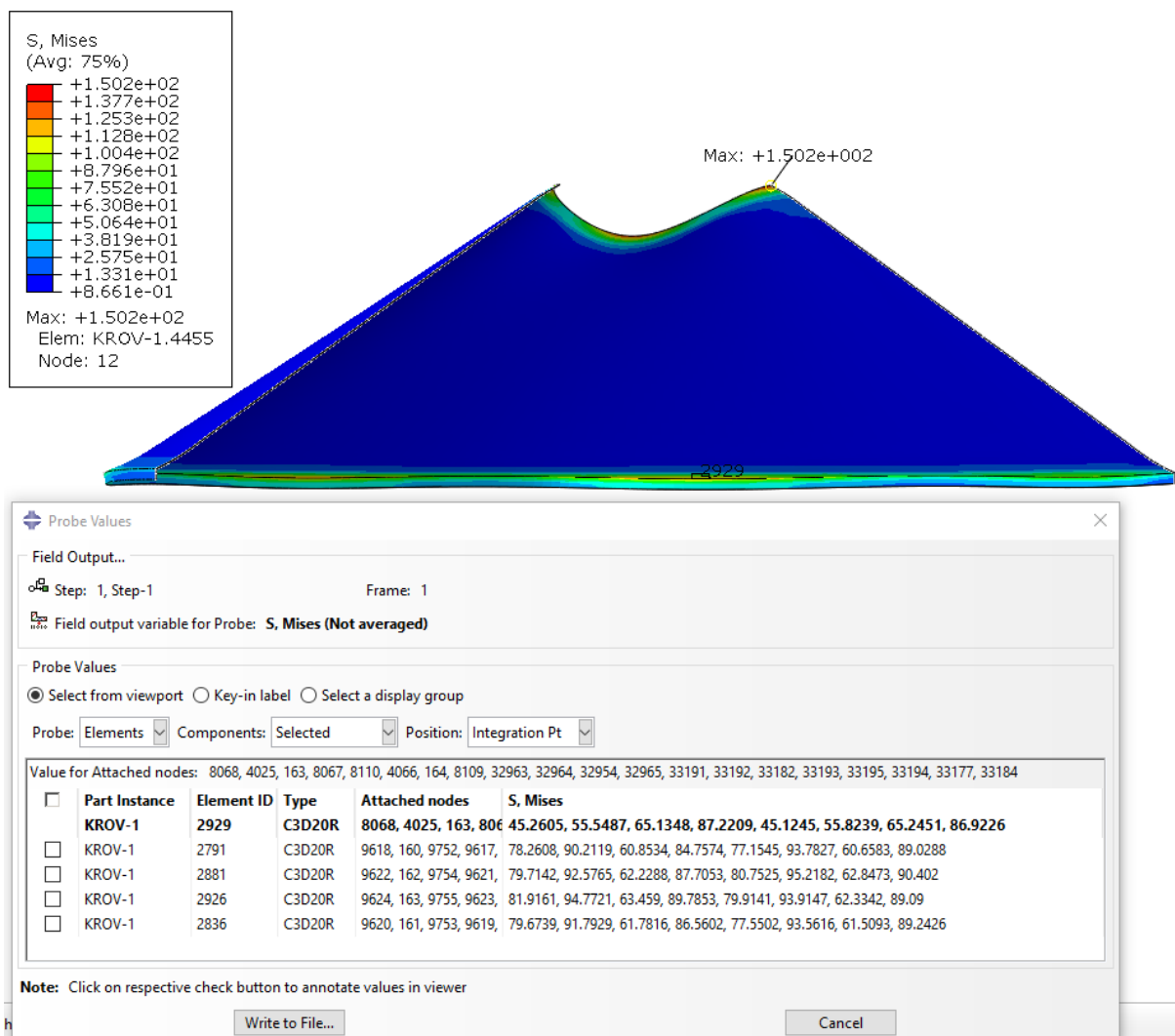
Ako pogledamo maksimalno naprezanje, možemo primijetiti kako ono prelazi granicu tečenja za čelik S355 od kojeg je napravljen silos. No, potrebno je malo bolje promotriti rješenja i mjesta pojave maksimalnog naprezanja. Maksimalno naprezanje od oko 370 MPa pojavljuje se na preklopu dvaju cilindričnih segmenata koji se međusobno pričvršćuju vijcima. Na tom mjestu nalazi se i spoj cilindričnih segmenata s nogom silosa koja se pod utjecajem svih opterećenja izvija prema unutra, odnosno prema središtu cilindra. Dakle, jasno je da će se ondje pojaviti koncentracija naprezanja. Međutim, ako promotrimo relevantne rezultate naprezanja u integracijskim točkama u elementima gdje se pojavljuje koncentracija naprezanja, možemo vidjeti kako je maksimalno naprezanje manje od 250 MPa što zadovoljava uvjet čvrstoće. Rezultati naprezanja u integracijskim točkama te uvećani prikaz mjesta maksimalnog naprezanja prikazan je na slici 6.19.



Slika 6.19. Ekvivalentna naprezanja u integracijskim točkama na mjestu najvećeg naprezanja u cilindričnom odjeljku u MPa

Sa slike 6.19 vidljivo je da se donji segment podvlači pod gornji, a razlog je sprječavanje prodiranja vode u silos prilikom padanja kiše ili topljenja snijega. Zbog toga se rub donjeg segmenta silosa koji se podvlači pod gornji segment mora deformirati što uzrokuje spomenutu koncentraciju naprezanja na svim mjestima u silosu gdje je spoj dvaju segmenata i nogu silosa.

Na slici 6.20 prikazana su ekvivalentna naprezanja u MPa za krov silosa. Kako su stijenke krova najtanje u silosu i iznose samo 1 mm, potrebno je provjeriti i analizirati naprezanja u krovu. Najveća naprezanja su na otvoru krova, ali to je samo zbog toga što u modelu ne postoji poklopac koji u stvarnosti učvršćuje krov na mjestu otvora i sprječava pojavu većih deformacija i naprezanja. Na spoju krova i cilindričnog odjeljka najveća naprezanja u integracijskim točkama iznose oko 95 MPa što zadovoljava uvjet čvrstoće.

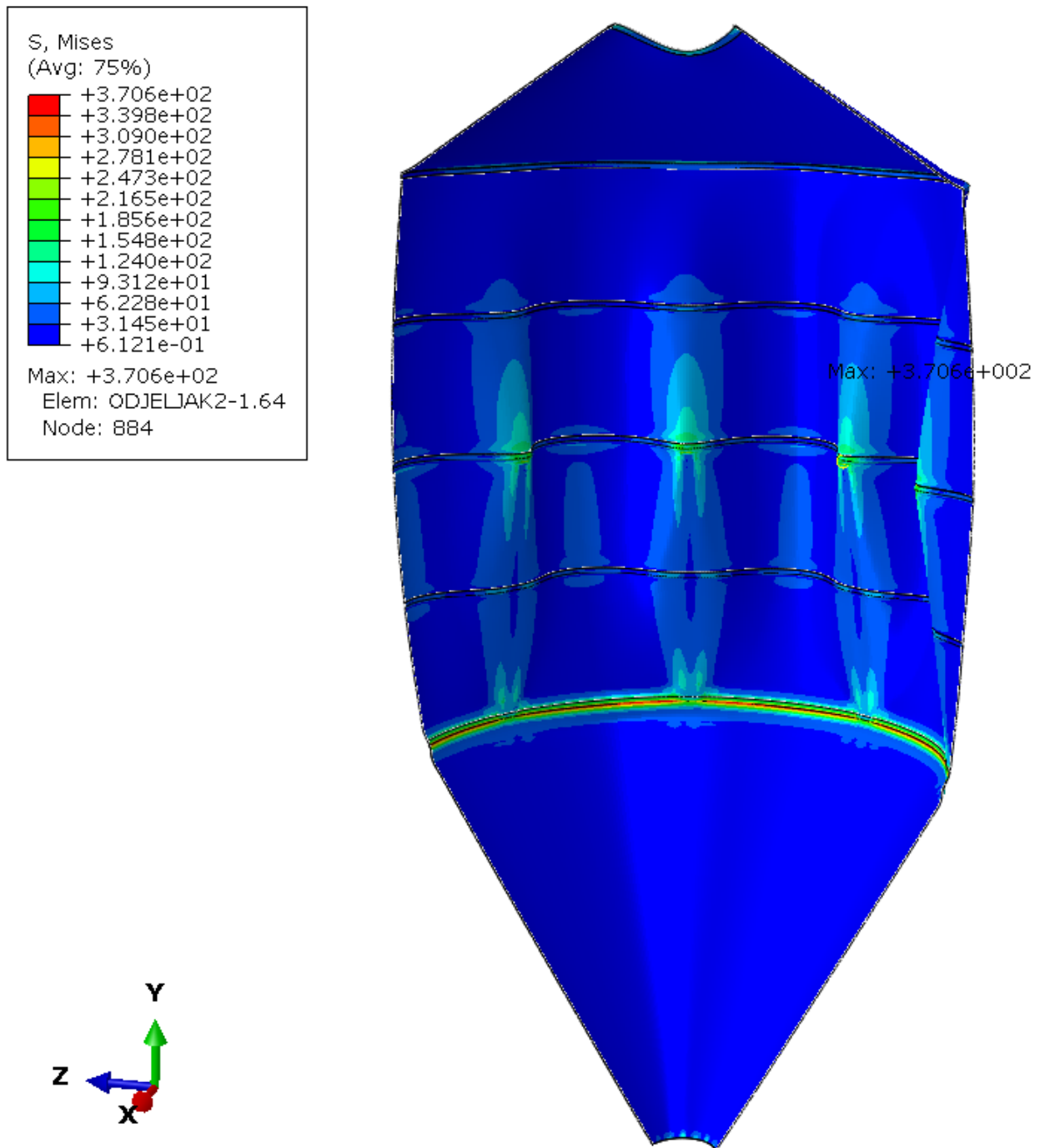


**Slika 6.20. Ekvivalentna naprezanja u integracijskim točkama u krovu silosa u MPa**

Sada ćemo prikazati naprezanja na mjestu gdje je pretpostavljena pojava najvećeg naprezanja, a to je spoj cilindričnog dijela i lijevka silosa. Naizgled prema slici 6.18, izgleda se ne čini da je

ondje veliki iznos naprezanja, ali kako tlak uzrokovan pohranjenim materijalom čini glavninu naprezanja nosive konstrukcije silosa, potrebno je pogledati naprezanja na unutarnjim stijenkama silosa. Također, ne isključuje se pojava kritičnog naprezanja i na drugim spojevima budući da je silos tako konstruiran da se debljina stijenki silosa mijenja po visini radi uštede materijala i troškova izrade.

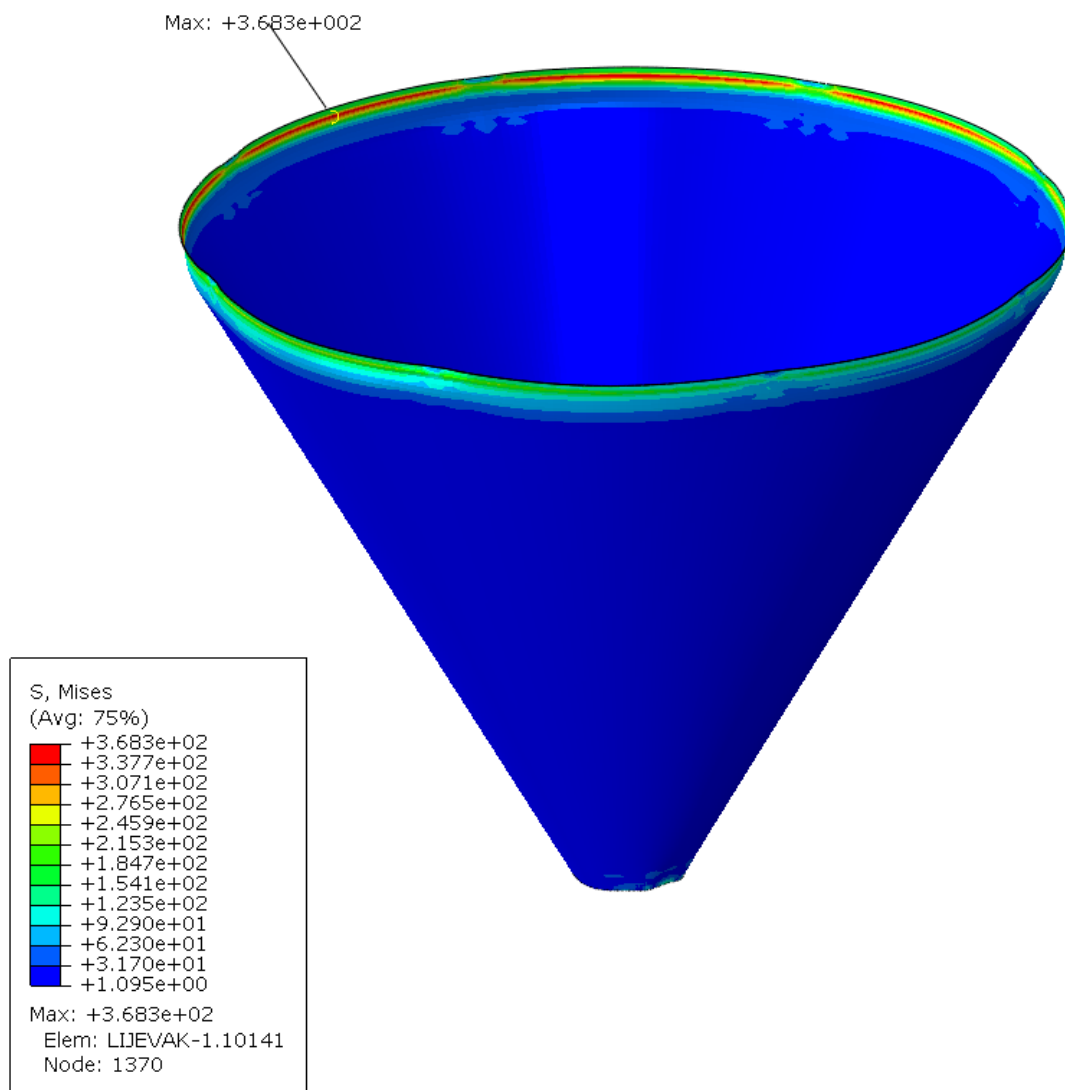
Slika 6.21 prikazuje presjek silosa po visini te naprezanja s unutarnje strane stijenki.



Slika 6.21. Presjek komore silosa i prikaz ekvivalentnih naprezanja u MPa

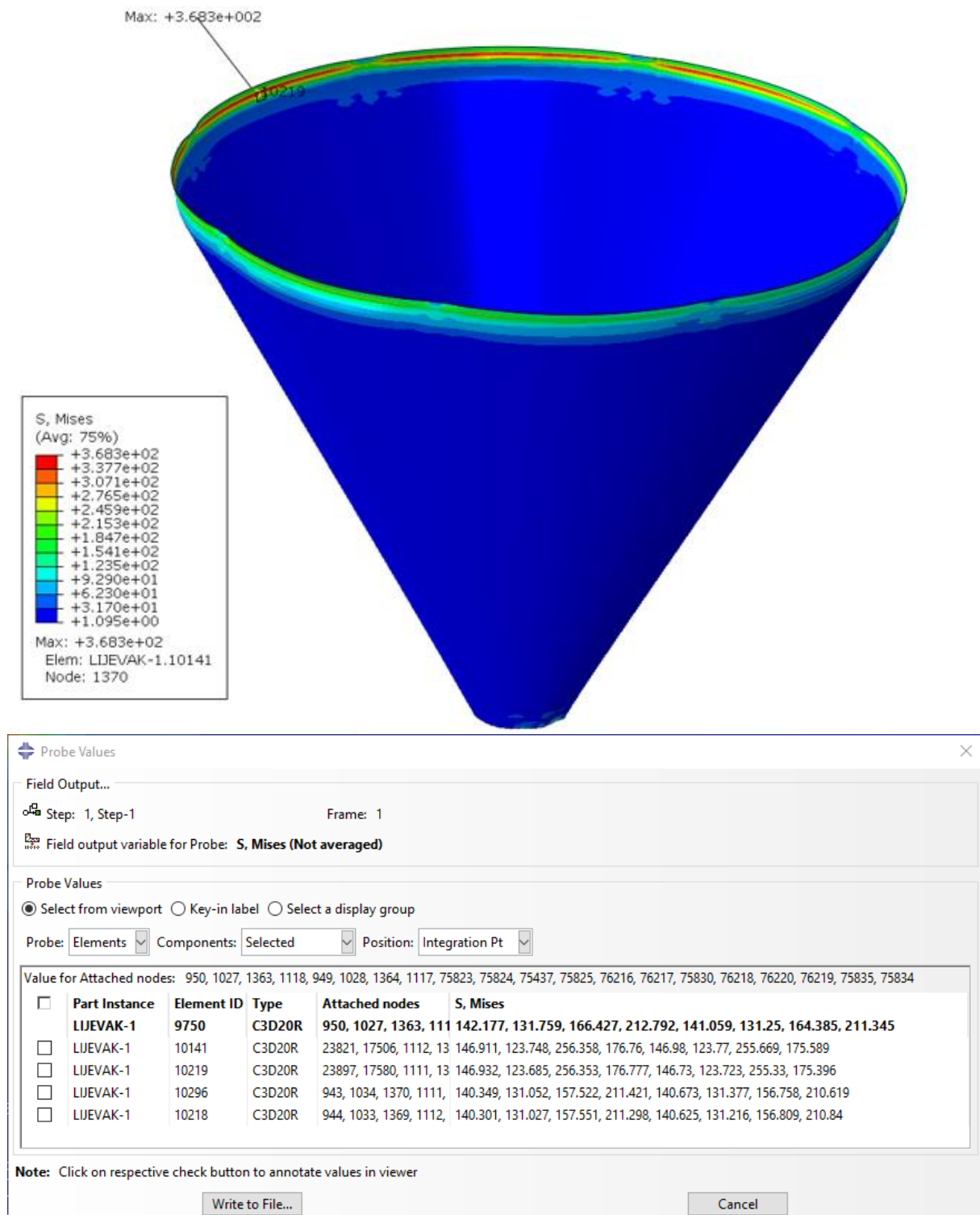
Vidljivo je kako su kritična naprezanja uistinu na mjestu spoja cilindričnog dijela i lijevka silosa. Kako bi se detaljnije proučila i prikazala naprezanja u stijenka samog lijevka, od cijele nosive konstrukcije bit će izdvojen samo lijevak te će se provjeriti naprezanja u integracijskim točkama na kritičnim mjestima kako bi se utvrdila postojanost konstrukcije za slučaj kad je silos podvrgnut najvećim opterećenjima.

Na slici 6.22 prikazan je izdvojeni lijevak silosa te su prikazana ekvivalentna naprezanja prema *von Misesu* u MPa. Kao što je već spomenuto pri analiziranju rezultata, to su naprezanja u čvorovima konačnih elemenata koja program ekstrapolira iz integracijskih točki za potrebe prikaza rezultata u čvorovima. Prema rezultatima u čvorovima elemenata, naprezanja prelaze granicu tečenja materijala, ali ako pogledamo naprezanja u integracijskim točkama vidjet ćemo kako su ta naprezanja ipak manja. Detaljniji rezultati u točkama integracije prikazani su na slici 6.23.



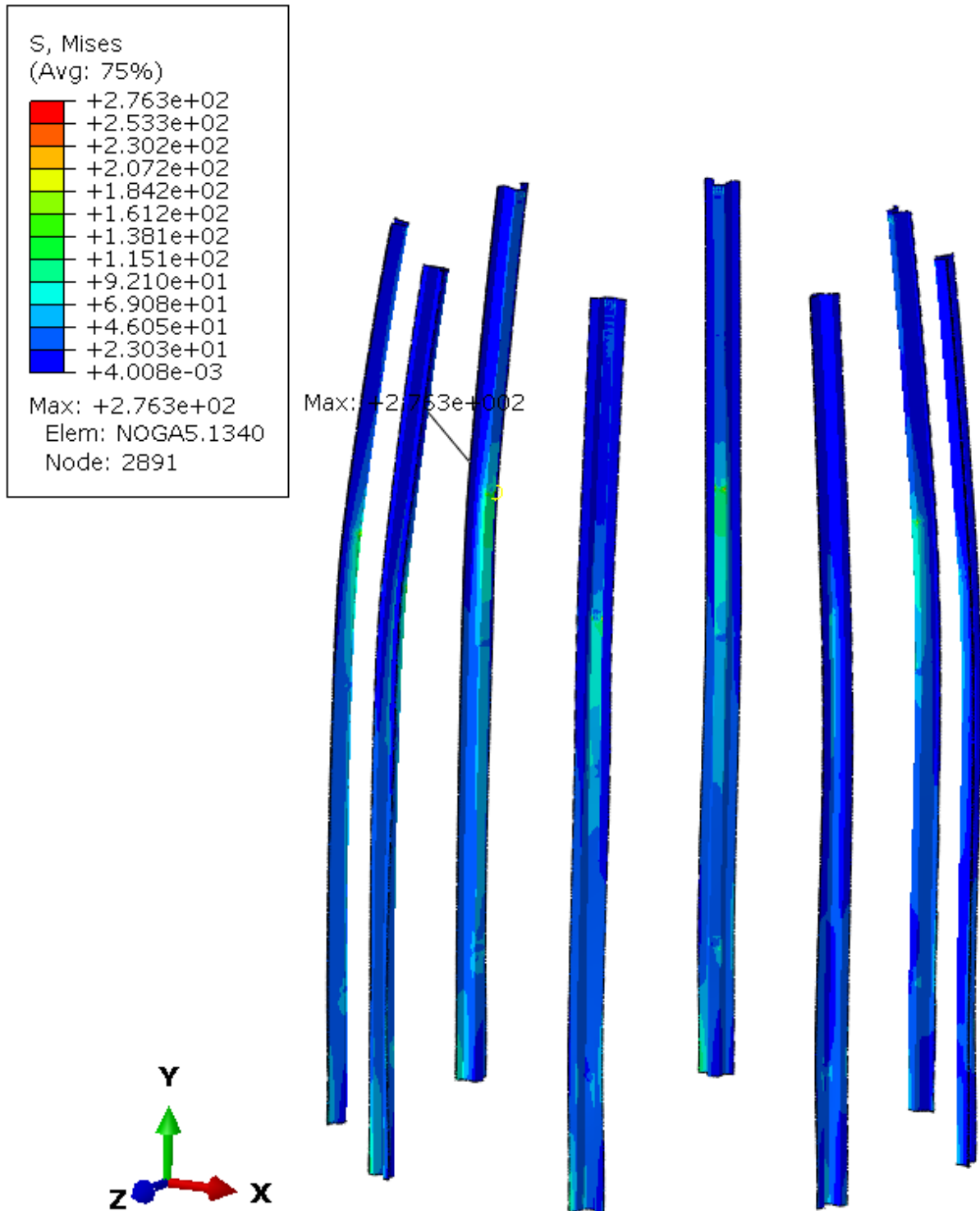
Slika 6.22. Ekvivalentna naprezanja u lijevku silosa u MPa

Na slici 6.23 možemo vidjeti kako su stvarna maksimalna naprezanja u lijevku nešto ispod 260 MPa što također zadovoljava uvjet čvrstoće. Preostaje još analiza naprezanja u nogama silosa pa su stoga izdvojeni rezultati naprezanja samo za noge kako bi se lakše prikazali i prokomentirali.

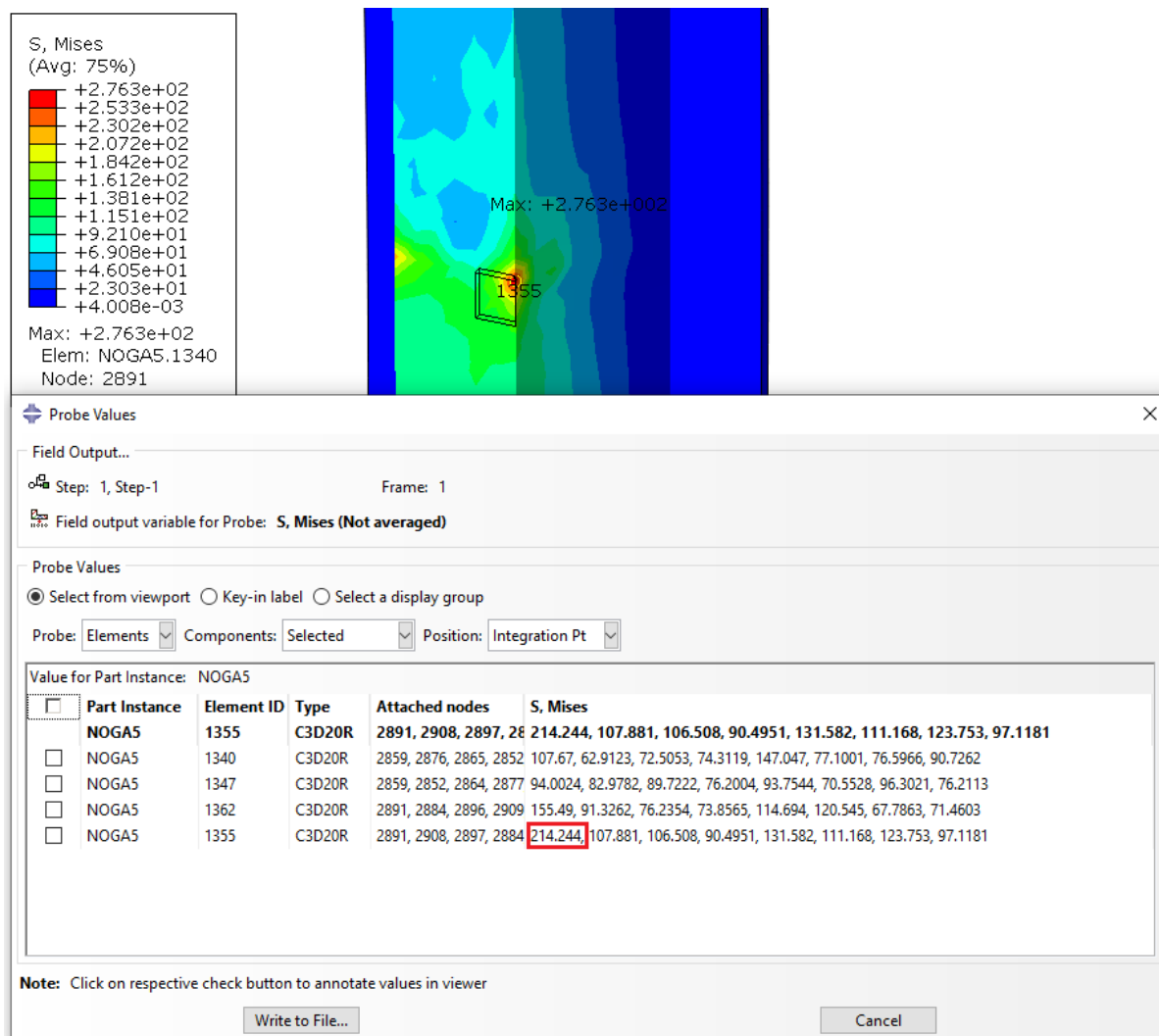


**Slika 6.23. Ekvivalentna naprezanja u integracijskim točkama na mjestu najvećeg naprezanja u lijevku u MPa**

Na slici 6.24 možemo vidjeti da su maksimalna naprezanja u nogama ispod dopuštenih što znači da je zadovoljen uvjet čvrstoće. Za preciznije rezultate naprezanja u integracijskim točkama prikazana su na slici 6.25. Također se može vidjeti da se najveće naprezanje u nogama nalazi na mjestu gdje završava dodir s komorom silosa.



Slika 6.24. Ekvivalentna naprezanja u nogama silosa u MPa



**Slika 6.25. Ekvivalentna naprezanja u integracijskim točkama na mjestu najvećeg naprezanja u nogama u MPa**

Tablica 6.2 prikazuje najveća naprezanja koja su se javila u pojedinim komponentama silosa. Ako je poznato maksimalno naprezanje i granica tečenja, lako se može dobiti iznos faktora sigurnosti konstrukcije:

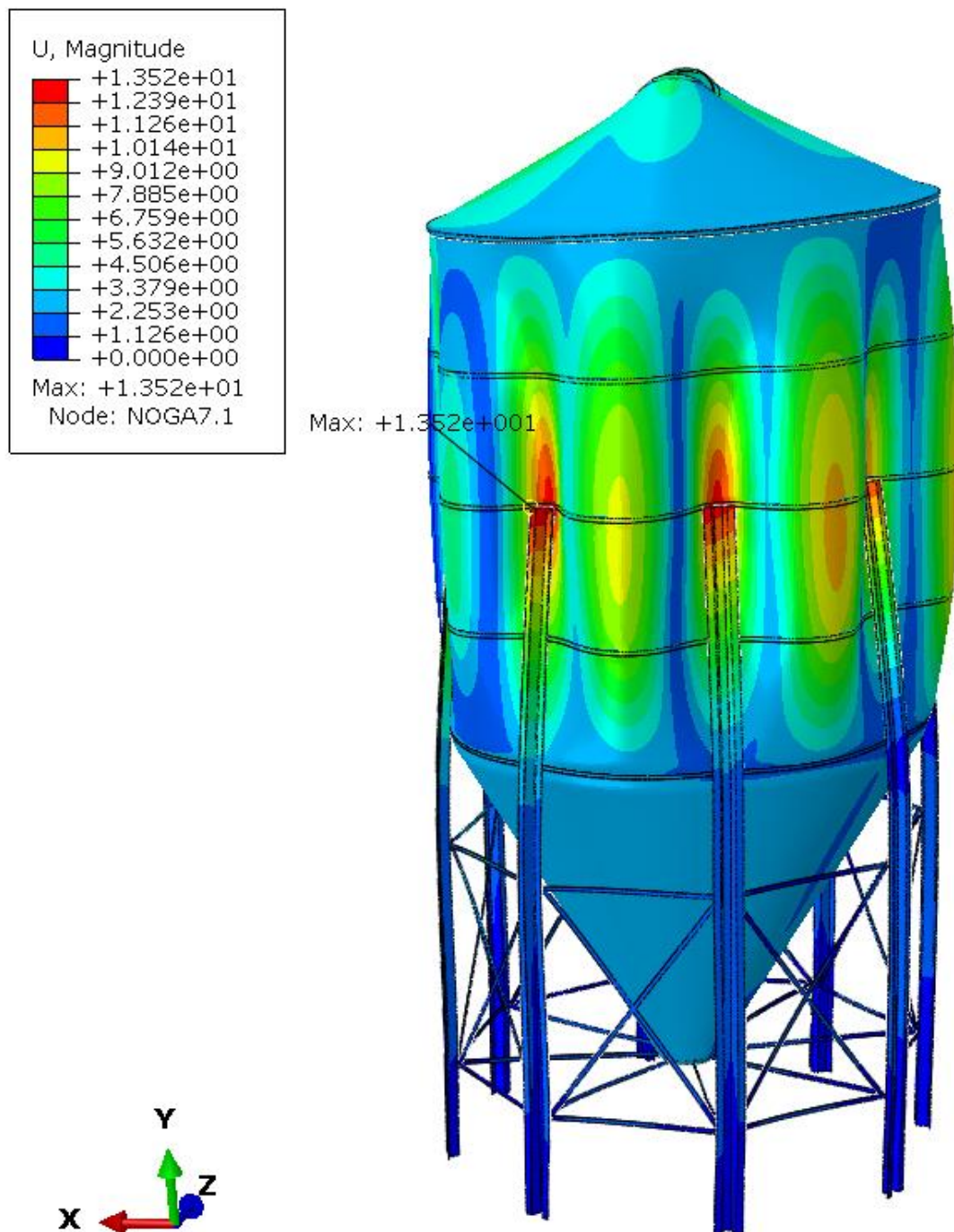
$$S = \frac{R_e}{\sigma_{\text{ekv,max}}} = \frac{355}{260} = 1,365. \quad (6.1)$$

**Tablica 6.2. Najveća naprezanja u komponentama silosa**

| Komponenta silosa | Najveće naprezanje / MPa |
|-------------------|--------------------------|
| Odjeljak 2        | 250                      |
| Noga 5            | 215                      |
| Lijevak           | 260                      |
| Krov              | 150                      |



Slika 6.26 prikazuje deformirani oblik cijele nosive konstrukcije silosa te raspodjelu pomaka u konstrukciji. Na slici se može vidjeti i maksimalni pomak u konstrukciji koji iznosi 13,52 mm.



**Slika 6.26. Deformirani oblik konstrukcije i raspodjela pomaka u mm**

Na kraju, završetkom analize i proučavanjem rezultata možemo zaključiti kako je nosiva konstrukcija silosa stabilna i zadovoljava uvjet čvrstoće s faktorom sigurnosti  $S = 1,365$ . Također treba napomenuti kako su geometrija te pojedine komponente silosa pojednostavljene u svrhu lakšeg provođenja analize te uštede računalnog vremena.



## 7. ZAKLJUČAK

U radu je u programskom paketu *Solidworks* modelirana, a zatim pomoću metode konačnih elemenata u programskom paketu *Abaqus* numerički analizirana nosiva konstrukcija silosa za žitarice. Potrebne dimenzije za modeliranje konstrukcije preuzete su iz kataloga tvrtke *Polnet Sp. z o.o.* Prije provođenja analize bilo je potrebno proučiti probleme i opterećenja koja se javljaju na samoj konstrukciji. Glavna opterećenja predstavljaju tlak koji se javlja uslijed težine pohranjenog materijala i težine snijega te tlak uslijed djelovanja vjetra na samu konstrukciju. Kako bi se u *Abaqus-u* pravilno zadala ta opterećenja, potrebno je bilo provesti prikladne proračune. Proračun za tlak od težine materijala proveden je prema normi EN 1991-4. Pri tome je bilo nužno poznavanje mehaničkih svojstava materijala koji se pohranjuje u silosu. Proračun za tlak od vjetra proveden je prema normi EN 1991-1-4:2005+A1. Prije analize silosa provedena je i verifikacija konačnih elemenata na jednostavnijem primjeru. Kod verifikacije su se koristile različite vrste konačnih elemenata i različite gustoće mreža te je na temelju usporedbe konvergencije i točnosti rješenja odabran tip konačnih elemenata koji je najprikladniji za rješavanje ovog problema. Na kraju je provedena analiza nosive konstrukcije silosa te su analizirani dobiveni rezultati, a mjesta pojave kritičnih naprezanja su uspoređena s pretpostavljenim kritičnim mjestima.

Kako je i pretpostavljeno, kritična naprezanja javljaju se na spoju cilindričnog dijela i lijevka silosa te iznose oko 260 MPa. Također, zbog različite debljine stijenki silosa provjerena su naprezanja i na drugim mjestima u silosu. Velika koncentracija naprezanja javlja se i na spoju dvaju cilindričnih segmenata i kraja noge silosa. Ovdje je najopterećeniji donji cilindrični segment koji se podvlači pod gornji segment, a maksimalno naprezanje iznosi oko 250 MPa. Tu se također očekivano javlja koncentracija naprezanja zbog načina sklapanja same konstrukcije koja zahtijeva prednaprezanje stijenki prije opterećenja od uskladištenog materijala. Proučavanjem rezultata nogu silosa, ustanovljeno je najveće naprezanje od oko 215 MPa. Uslijed opterećenja od težine snijega i zbog male debljine stijenki, najveća naprezanja u krovu su oko 95 MPa što nije zanemarivo. Daljnjom analizom rezultata, pojava najvećeg pomaka u nosivoj konstrukciji nalazi se na mjestu spoja nogu i dvaju cilindričnih odjeljaka te iznosi 13,52 mm.

Na temelju provedene analize može se zaključiti kako je nosiva konstrukcija silosa za žitarice stabilna te zadovoljava uvjet čvrstoće i za najnepovoljniji slučaj opterećenja. Ipak, treba primijetiti da je pri tome faktor sigurnosti poprilično nizak ( $S = 1,365$ ). Iz toga je jasno da bilo kakvo dodatno nepredviđeno opterećenje, greška u montaži, kvaliteti materijala ili neka druga

nepredviđena situacija može dovesti do katastrofalnog otkazivanja konstrukcije i pri tome ugroziti ljudske živote te uzrokovati velike troškove i gubitke. U ovom radu nisu uzeti u obzir faktori kao što je mogućnost pojave potresa, zatim kemijski procesi koji uzrokuju nagli porast temperature u silosu pri čemu može doći do samozapaljenja pohranjenog materijala i slično. Također, potrebno je napomenuti kako je numerička analiza provedena za silos s glatkim stijenkama cilindričnog dijela radi olakšavanja cijelog procesa zadavanja ulaznih podataka u program. U stvarnosti, cilindrični dio je napravljen od valovitih limova što dodatno povećava čvrstoću same konstrukcije pa se na ovaj način nalazimo na strani sigurnosti. Teško je precizno uključiti sve faktore koji mogu utjecati na čvrstoću konstrukcije jer to iziskuje vrhunsko poznavanje problematike tijekom konstruiranja silosa. Upravo taj nedostatak znanja i želja za smanjenjem troškova izrade nerijetko dovode do ugrožavanja postojanosti konstrukcije i ljudskog života. Zbog navedenih problema postoji daljnja potreba za proučavanjem tog područja kako bi se korištenjem programskih paketa mogle provoditi analize pomoću kojih bi se gradili sigurniji i isplativiji silosi.

## Literatura

- [1] <https://www.polnet.pl/sites/default/files/paszowe-baner1.jpg>
- [2] European Committee for Standardization (CEN) 2006. EN 1991-4: Eurocode 1 – Actions on structures - Part 4: Silos and tanks.
- [3] <https://www.dietmar-schulze.de/fre.html>
- [4] Skejić, D., Bolanča, M.: *Projektiranje silosa s aspekta načina protoka materijala pri pražnjenju*, Građevinski fakultet, Zagreb, 2013.
- [5] Tejchman, J.: *Confined Granular Flow in Silos*, Springer, Switzerland, 2013.
- [6] [https://www.polnet.pl/sites/default/files/manual\\_for\\_polnet\\_silos\\_rev.2016-08-03\\_0.pdf](https://www.polnet.pl/sites/default/files/manual_for_polnet_silos_rev.2016-08-03_0.pdf)
- [7] <http://his-projekt.hr/index.php/hr/proizvodi/konstrukcije-od-celcnog-valovitog-lima-multi-plate-sistemi>
- [8] Sorić, J.: *Metoda konačnih elemenata*, Golden marketing, Zagreb 2004.
- [9] Alfrević, I.: *Linearna analiza konstrukcija*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2011.
- [10] <http://slideplayer.com/slide/4811063/>
- [11] ABAQUS, Abaqus Documentation: Version 6.14. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE
- [12] Alfrević, I.: *Linearna analiza konstrukcija*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2011.
- [13] Bernardini Peroš, Ivica Boko, Tihomir Šimunović, David Kuzmanić: *Podloge za nove hrvatske norme za opterećenje vjetrom*, 2007.
- [14] Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions; <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.4.2005.pdf>
- [15] Dassault Systemes Solidworks 2018 x64 Edition; <https://www.solidworks.com>
- [16] ABAQUS, Abaqus Software: Version 6.14. 2014, Dassault Systemes: 3DS Paris Campus, 10 rue Marcel Dassault, 78140 Vélizy-Villacoublay, FRANCE.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc