

Analiza seizmičkog opterećenja ispune silosa prema Eurocodu 8

Zlatko Belošević¹, prof.dr.sc. **Mladen Meštorvić²**

¹ Ured ovlaštenog inženjera građevinarstva, belosevic.zlako@kr.t-com.hr

² Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za tehničku mehaniku, mastar@grad.hr

Sažetak

Cilj istraživanja je odrediti ili poboljšati proračunske metode za procjenu utjecaja dinamičkog djelovanja na konstrukciju silosa, prema europskim propisima za protupotresno projektiranje Eurocoda 8. Želja je odrediti korektni proračunski model za analizu konstrukcije silosa. Na temelju takvih proračuna mogu biti definirane propisane kombinacije i faktori za opterećenje silosa.

Ključne riječi: silos, potresna pobuda, dinamički odziv, inercijalne sile, nelinearnost, numeričko modeliranje

Seismic load analysis of material-filled storage tanks according to Eurocode 8

Abstract

The objective of the current research is to determine or improve calculation methods for estimating influence of dynamic load on storage-tank structures according to Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake resistance. The intention is to define an accurate calculation model for the analysis of silo structures. These calculations could be used to regulate silo loading combinations and factors.

Key words: silo, seismic excitation, dynamic response, inertia forces, nonlinearity, numerical modelling

1 Uvod

Poznato je da je za naše područje potresno opterećenje dominantno horizontalno opterećenje na građevinske konstrukcije. Potresi su prirodni događaji koji u sebi kriju velik potencijal štete. Kako bi se ljudski život i inventar zaštitili od posljedica takvih utjecaja, građevine treba dimenzionirati i prilagoditi takvim zahtjevima. Silosi su složeni konstrukcijski sustavi ponajprije zbog velike mase sadržaja. Ponašanje ispune silosa sipkim materijalom pri dinamičkom odzivu potresne pobude nije dovoljno istraženo, izrazito je nelinearno te ne prati formu oscilacije nosive konstrukcije silosa. Posljedica je toga pojava značajnih inercijalnih sila na stijenke silosa, što je vrsta opterećenja kakvoga kod drugih konstrukcija, osim vodotornjeva, realno nema. To dokazuje nedostatak općevažećih postupaka za uzimanje u obzir ponašanja rasutoga materijala i njegove interakcije s građevinom, što ima značajnu ulogu u procjeni dinamičkoga ponašanja cjelokupnog sustava – građevine i rasutoga materijala.

Neka istraživanja (npr. [1]), pokazuju da, ovisno o "vitkosti silosa", stupnju napunjenosti te jačini i frekvenciji ubrzanja potresa, oko 80 % ukupne mase doprinosi dinamičkoj ukupnoj nosivosti. Masa rasutoga materijala može sudjelovati u vibracijama konstrukcije silosa samo u mjeri u kojoj se tijekom potresa aktivira putem unutarnjih sila trenja. Međutim, istodobno se također aktiviraju i svojstva prigušenja ovoga medija. Iako je utjecaj uskladištenih rasutih materijala na prigušenje cjelokupnoga sustava neosporan, do danas nema realnih pokušaja njegova kvantificiranja. Današnje su spoznaje usredotočene oko toga da je kod niskih silosa udio sudjelovanja mase još manji [2, 3]. Očito se kod niskih silosa veliki dio horizontalnih opterećenja odvodi neposredno putem podnoga trenja [4].

2 Metode istraživanja

Istraživanje se planira provesti numeričkom proračunskom analizom ponašanja konstrukcije silosa pri djelovanju potresa [5, 6, 7]. Za ovaj rad u skladu s normom HRN EN 1998-4 točke 3.3 [8] analizirana je usporedba globalnoga odziva na potresno opterećenje, period titranja i pomaci uz pretpostavku da se sadržaj silosa giba zajedno sa stijenkom silosa smještenom u njezinu težištu i učinak odziva krutih čestica preko dodatnoga normalnog tlaka raspodijeljenog na stijenku silosa.

Za numerički je primjer odabran vitki cilindrični armiranobetonski silos promjera 12,0 m, visine 30,0 m sa sadržajem pšenice težine 9,0 kN/m³ ukupnog kapaciteta 2850,0 t. Silos je temeljen na temeljnoj ploči modeliranoj na elastičnim Winklerovim osloncima temeljnoga tla poboljšanog injektiranjem s fiksnim ležajevima po rubu temeljne ploče. Konstrukcija je silosa modelirana metodom konačnih elemenata, i to ljuskastim elementima.

2.1 Podaci ispune silosa prema EN 1991-4: 2012

- kut rasprostiranja ispune silosa: $\phi_r = 34^\circ$
- kut unutarnjeg trenja ispu+ne silosa: $\phi_m = 30^\circ$, $\alpha_\phi = 1,12$
- kut trenja stijenke : $\phi_w = 30^\circ$
- omjer bočnoga tlaka prema EN 1991-4: 2012 dan je izrazom (1):

$$K_m = 1,1(1 - \sin \phi_m) = 0,54, \alpha_k = 1,11 \quad (1)$$

- koeficijent trenja stijenke dan je izrazom (2):

$$\mu = \tan \phi_w = \tan 30^\circ = 0,57, \alpha_\mu = 1,16 \quad (2)$$

- vrijednost vertikalnoga tlaka ispune dana je izrazom (3):

$$P_{ho} = 54,98$$

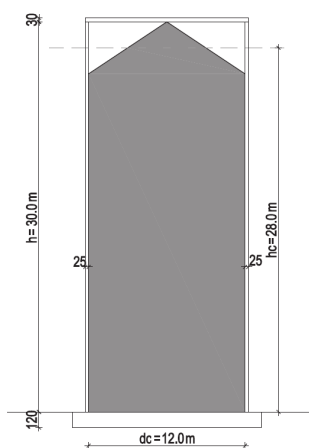
$$P_{vf}(z) = x Y_j(z) = -x 0,9357 = 85,9 \text{ kN/m}' \quad (3)$$

$$K = 0,599$$

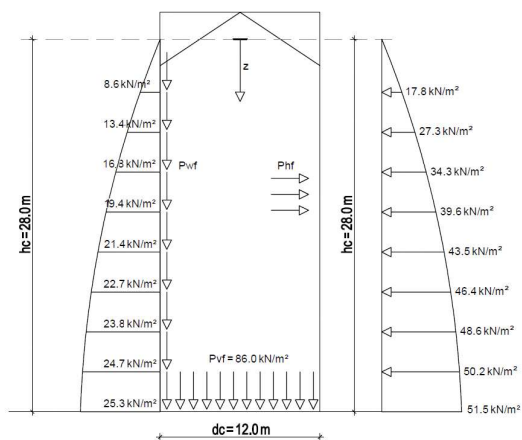
- vrijednost tangencijalnoga naprezanja od trenja ispune dana je izrazom (4):

$$P_{wf}(z = 26,0\text{m}) = \mu x P_{ho} \cdot Y_j(z) = 0,491 \cdot 54,98 \cdot 0,9357 = 25,3 \text{ kN/m}' \quad (4)$$

Na slici 1. dani su geometrijski podaci o silosu dok su na slici 2. dani dijagrami pritisa od ispune silosa.



Slika 1. Geometrijski podaci o silosu



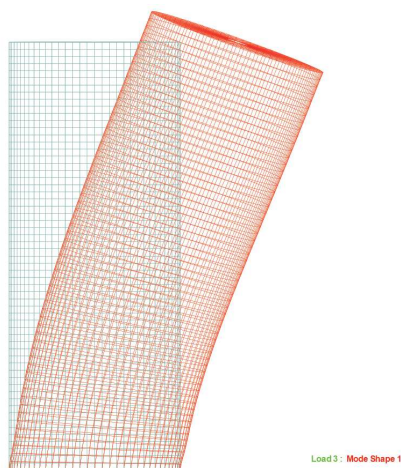
Slika 2. Dijagrami pritisa od ispune silosa

2.2 Globalni odziv konstrukcije silosa na potres uz pretpostavku da se ispuna giba zajedno sa stijenkom

Proračun globalnoga potresnog odziva silosa proveden je modalnom analizom na programom Staad.pro. Utvrđivanje potresnoga opterećenja u skladu je s normom HRN EN 1998-1, [9]:

- prema seizmičkoj karti za povratni period od 475 g za odabrano je područje ubrzanje podloge $a_g = 0,22 \text{ m/s}^2$
- temeljno je tlo kategorije B
- faktor ponašanja za izravno temeljene silose u skladu s normom EN 1998-4 iznosi $q = 1,0$
- masa ispune silosa zadana je jednoliko po površini stijenske silosa.

Na slici 3. dan je oblik oscilacija prvoga tona silosa dok su na slikama 4. i 5. prikazane vertikalne vlačne i tlačne sile.



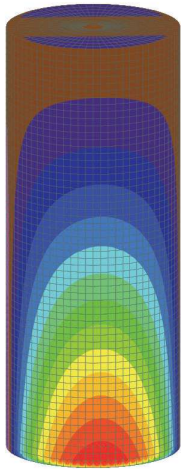
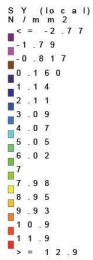
Slika 3. Oblik oscilacija prvoga tona silosa ($T_1 = 0,371 \text{ s}$)

Kontrola vertikalne membranske vlačne sile u kombinaciji opterećenja potresom, [6]:

$$N_{y \max} = 12,9 \cdot 1000,0 \cdot 250,0 = 3225,0 \text{ kN (vlak).}$$

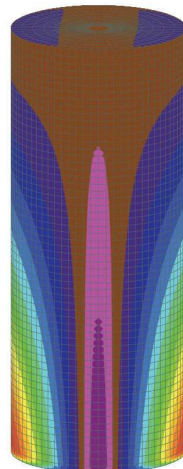
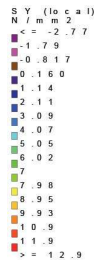
Potrebna armatura za preuzimanje vlačnih naprezanja jest $A_s = 37,1 \text{ cm}^2/\text{m}'$ za svaku stranu stijenske.

Ukupna je seizmička sila: $F_{b \text{ staad}} = 15 \text{ 171 kN.}$



Y
x z

Slika 4. Vertikalne membranske sile SY (VLAK)



Y
x

Slika 5. Vertikalne membranske sile SY (TLAK)

2.3 Komparacija perioda oscilacija i potresne sile dobivenih pojednostavljenim proračunom

Pojednostavljeni proračun prvoga tona oscilacija, prema [10]:

$$dc = 12,0 \text{ m}, h = 30,0 \text{ m}$$

$$C = 213452,0 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma M = 28480,0 \cdot 0,8 + 7360,0 = 30144,0 \text{ kN}$$

$$f = 1/2\pi \sqrt{C/M} = 0,423$$

$$T_1 = 2,35 \text{ s} > T_D = 2,0 \text{ s}$$

$a_g = 0,22$ - poredbeno vršno ubrzanje tla za građevinsko tlo klase B u jedinici gravitacijskog ubrzanja

$S = 1,2$ - parametar tla za Tip B

$\beta = 2,5$ - faktor uvećanja spektralnog ubrzanja

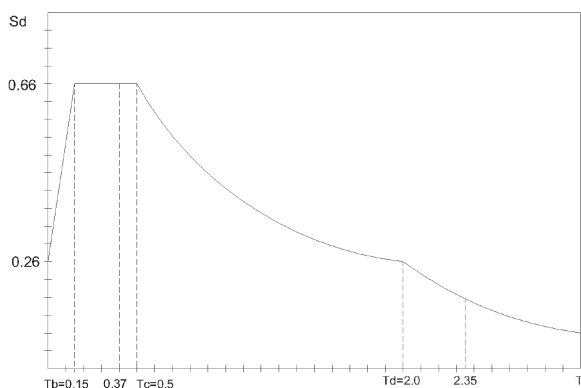
Ordinata proračunskoga spektra za period $T_1 = 2,35 \text{ s}$ dana je izrazom (5):

$$S_d(T_1) = 0,22 \cdot 1,2 \cdot 2,5 \cdot (0,5 \cdot 2,0/2,35^2) = 0,1195 \quad (5)$$

Za linearno elastičan proračun "metodom bočnih sila" na temelju očitane ordinate proračunskoga spektra određuje se ukupna poprečna sila na konstrukciju silosa koja je dana izrazom (6):

$$F_b = S_d(T_1) \cdot W \cdot x/q = 0,1195 \cdot 30144,0 / 1,0 = 3602,0 \text{ kN} < F_{b \text{ staaad}} = 15 \text{ 171 kN} \quad (6)$$

Komparacija perioda oscilacije za prvi ton T_1 , odnosno projektnoga spektra odziva vidljiv je na slici 6.



Slika 6. Oblik projektnoga spektra odziva

2.4 Globalni odziv silosa na potres preko dodatnog normalnog tlaka na stijenu silosa

Dodatno stožasto opterećenje silosa s kružnim tlocrtom opterećenje je koje u ovom slučaju djeluje po cjelokupnoj visini silosa u radijalnom smjeru s povećanjem tlačnih membranskih naprezanja u kombinaciji sa savijanjem.

Dodatni horizontalni tlak na stjenke silosa od potresnog djelovanja ispune silosa dan je izrazom (7):

$$\Delta_{ph,so} = \alpha_z \cdot \gamma \cdot r_s \quad (7)$$

$$r_s = \min(h_b, d_c/2) = \min(30,0; 12,0/2) = 6,0 \text{ m}$$

$$\alpha_{(z)} = 0,22 \text{ m/s}^2, \gamma = 9,0 \text{ kN/m}^3$$

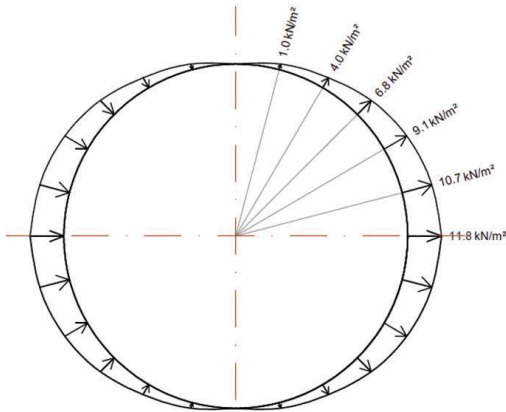
$$\Delta_{ph,so} = \alpha_{(z)} = 0,22 \cdot 9,0 \cdot 6,0 = 11,86 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta_{ph,s} = \Delta_{ph,so} \cdot \cos\theta \quad (8)$$

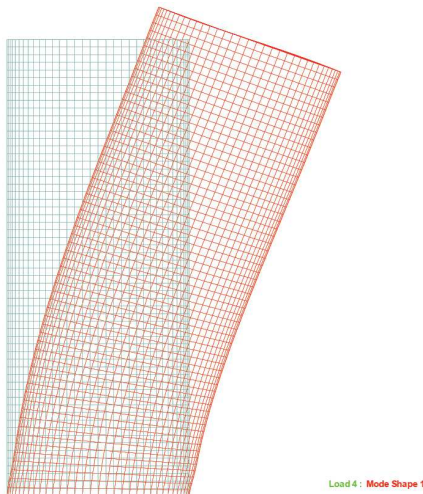
$$\Delta_{ph,s}(0^\circ) = 11,86 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta_{ph,s}(90^\circ) = 0,00 \text{ kN/m}^2$$

Na slici 7. prikazan je dijagram dodatnog horizontalnog pritiska dok je na slici 8 prikazan oblik oscilacija prvoga tona silosa. Vertikalne vlačne sile prikazane su na slici 9., dok su na slici 10. prikazane vertikalne tlačne sile.



Slika 7. Dijagram dodatnoga horizontalnog pritiska $\Delta_{ph,s}$



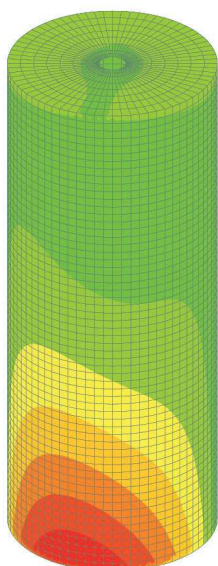
Slika 8. Oblik oscilacija prvoga tona silosa ($T_1 = 0,18$ s)

Kontrola vertikalne membranske vlačne sile u kombinaciji opterećenja s potresom:

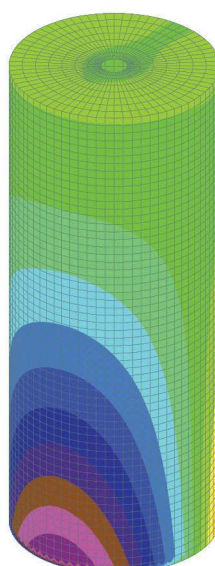
$$N_{y \max} = 0,222 \cdot 1000,0 \cdot 250,0 = 55,5 \text{ kN (vlak).}$$

Potrebna je armatura za preuzimanje vlačnih naprezanja $A_s = 1,3 \text{ cm}^2/\text{m}'$.

Ukupna je seizmička sila: $F_{b \text{ staad}} = 3578 \text{ kN.}$



Y
Z



Y
Z

Slika 9. Vertikalne membranske sile SY (VLAK) Slika 10. Horizontalne membranske sile SY (TLAK)

4 Zaključak i smjernice za daljnja istraživanja

Analizom rezultata provedenih za globalni odziv silosa na potres za slučaj s ispunom u 80-postotnom iznosu i praznom silosu s dodatnim horizontalnim pritiskom po stijenci silosa, svedenih na usporedbu vlačnih membranskih naprezanja, perioda titranja i time ukupne potresne sile, pokazuju rezultate koji dosta odstupaju i odlaze u krajnosti. Odziv praznoga silosa s dodatnim horizontalnim pritiscima na stijenke silosa nije dostatan utjecaju inercijalnih sila na stijenke silosa. Globalni odziv punoga silosa s 80-postotnom ispunom previše je gruba aproksimacija ponašanja ispune silosa, jer su rezultati ekstremni, pa stijenke silosa ne mogu zadovoljiti granično stanje nosivosti.

Kod toga je važno uočiti da period oscilacije konstrukcije silosa izravno utječe na ordinatu proračunskoga spektra. Međutim, bez obzira na to što masa ispune silosa načelno povećava period titranja i time smanjenje ukupne potresne sile, odnos geometrije, promjera i visine silosa mogu također utjecati na period te time ponovo povećati ukupno potresno opterećenje.

U budućnosti treba prije svega provesti opsežna numerička istraživanja potresnoga djelovanja za razne odnose u geometriji i ispuni silosa te provesti eksperimentalna istraživanja modela silosa u određenom mjerilu radi utvrđivanja ponašanje ispune za vrijeme potresne pobude te njezina utjecaja na veličinu potresnih sila i period konstrukcije silosa.

Cilj je istraživanja odrediti ili poboljšati proračunske metode za procjenu utjecaja dinamičkoga djelovanja na konstrukciju silosa prema europskim propisima za protu-potresno projektiranje EN 1998-4. Osobito je važno istražiti ponašanje ispune silosa kod potresnoga djelovanja te izraditi numerički model ponašanja konstrukcije silosa u globalnom odzivu potresnoga djelovanja. Na temelju takvih proračuna mogu biti definirane propisane kombinacije i faktori za opterećenje silosa. Znanstveni doprinos istraživanja koji se očekuje parametri su za definiranje smjernica radi kalibracije službenih propisa u području proračuna silosa.

Literatura

- [1] Boswell: Current practica in the analysis and design of bulk storage silos subjected to earthquake motion, In: Sec. Int. Conf. On design of Silos for Strength
- [2] Briassoulis, D.: Cylindrical shells: other actions., In [13], pp. 400–414.
- [3] Hampe, E., Bohn, W., Schwarz, J.: Erdbebenberechnung von Silobauwerken mit der Response-Spektrum und Time-History-Methode. Technische Mechanik, 3 (1982) 3, pp. 66–73.
- [4] Meskouris, K., Hinzen, K.G.: Bauwerke und Erdbeben. Grundlagen – Anwendung – Beispiele, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2003.
- [5] Chopra, A.K.: Dinamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, Pearson, 2014
- [6] Beton kalender 2016: 9.3 Erdbeben (Einwirkungen aus außergewöhnlichen Bemessungssituationen nach DIN EN 1998-4, Stefan Ehmman, Hamburg)
- [7] Ghali, A.: Cirkular Storage Tanks and Silos, London and New Yoork, 2000
- [8] Eurocode 8: HRN EN 1998-4 : (EN1998-4:2006) – 4. dio : Silosi, spremnici i cjevovodi (EN1998-1:2006) Design of structures forearthquake resistance – Part 4: Silos, tanks, and pipelines
- [9] Eurocode 8: HRN EN 1998-1 : (EN1998-1:2004+AC:2009) Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija- 1, (EN1998-1:2004+AC:2009) Design of structures forearthquake resistance – Part 1: General rules, seizmic actions and rules seizmic actions and rules for buildings
- [10] Stahlbau kalender 2013: 5.3.10 Erdbeben (7 silos und Einwirkungen auf silos nach DIN EN 1993-4-1)