

OPTIMIZIRANJE MASIVNOG POTPORNOG ZIDA

Matija Lozić¹, Sonja Zlatović²

¹Student TVZ-a

²Tehničko veleučilište u Zagrebu

Sažetak

Optimizacija građevina postaje bitan faktor projektiranja građevina. Racionalna potrošnja resursa je bitan preduvjet za održivi razvoj te budućnost čovječanstva. Pojavom računala optimizacija postaje relativno pristupačno rješenje do kojeg dolazimo raznim računalnim i matematičkim metodama. Također je bitno dobro napraviti matematički model konstrukcije koja će se optimizirati. U ovom članku prikazati će se slučaj optimizacije poprečnog presjeka modela potpornog gravitacijskog betonskog zida. Optimiranje će se izvršiti "Brute Force" algoritmom pretraživanja rješenja. Zadana denivelacija tla je ujedno i jedini fiksni parametar zida koji se ne mijenja tokom optimizacije. Optimizira se ostalih pet parametara koji su: (širina krune zida, širina spojnice zida i temelja, širina temelja, dubina temelja i nagib poledine zida). Iterativnim izračunom dolazimo do konačnog broja slučajeva, te odabiranjem minimalne površine poprečnog presjeka kao jedinog kriterija ove optimizacije dobivamo rješenje koje je optimalno na skup rješenja svih slučajeva uzetih u obzir.

1. Uvod

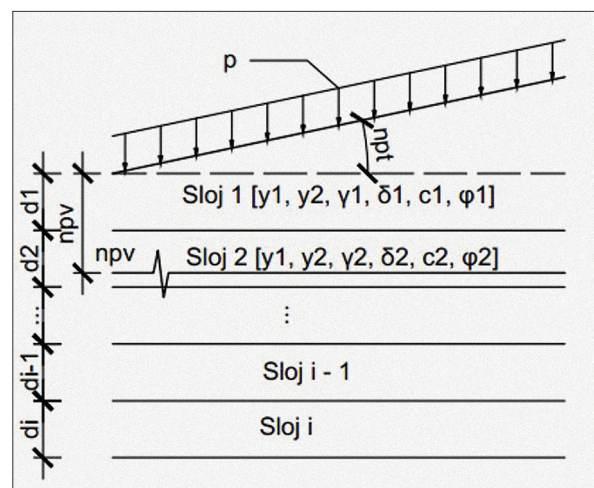
Optimizacija je u novije vrijeme poželjan proces u projektiranju građevina. Tražimo vrijednosti parametara koji daju ekstremnu vrijednost željenog kriterija ili više njih. Primjeri kriterija su npr. ugrađeni materijali, stabilnost, način izvedbe, buduće održavanje itd. Pojava računala značajno pridonosi korištenju optimizacijskih alata. Daljni tekst prikazati će primjenu optimizacije na projektiranje gravitacijskog potpornog zida. Objasniti će se korišteni modeli tla i zida, korišteni postupak proračuna djelovanja na zid te računanja stabilnosti istog i princip rada

algoritma pretraživanja parametara geometrije zida. Cijelokupni proračun je napravljen u programskom jeziku *Python*. Izračun konkretnog slučaja će predočiti efikasnost primjene računala te njegovu moć.

2. Jedinični slučaj

2.1 Model terena

Model terena je sačinjen od horizontalno uslojenog tla sa i slojeva. Svakom pripadajućem sloju pridruženi su parametri: (gornja granica $y1$, donja granica $y2$, jedinična težina γ_i , kut unutarnjeg trenja ϕ_i , kohezija c_i , kut trenja između tla i zida δ_i). Površina terena može biti u nagibu npt i jednoliko vertikalno kontinuirano opterećeno p . Prisutnost podzemne vode riješeno je dubinom na kojoj se nalazi npv te njenom jediničnom težinom γ_w . Svi gore navedeni parametri modela tla prikazani su na slici 1.

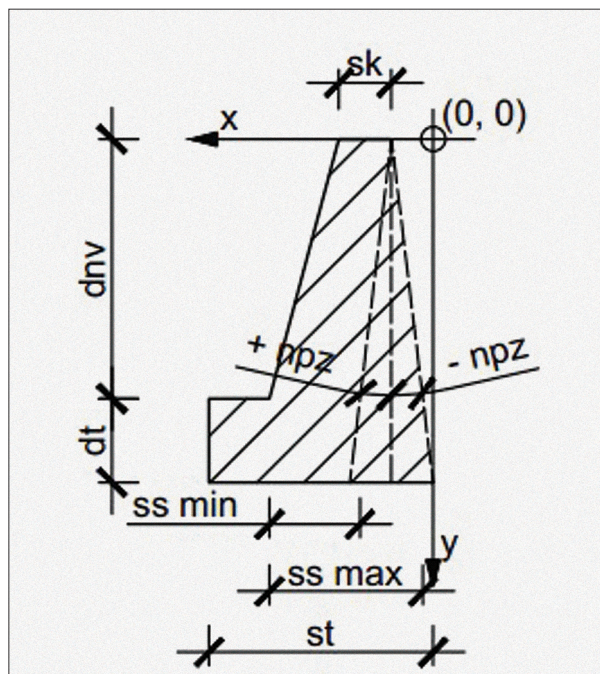


Slika 1

2.2 Model zida

Model zida koji se vidi na slici 2 sastoji se od denivelacije terena koju zid treba osigurati

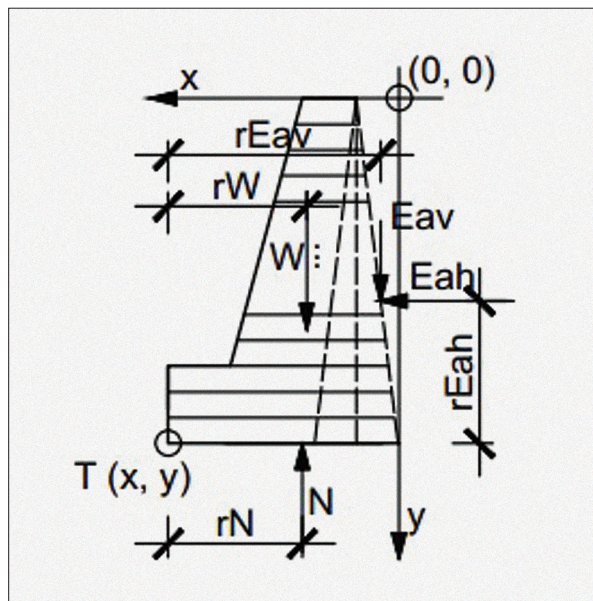
(*dnv*), širine krune (*sk*), širine spojnice zida i temelja (*ss*), širina temelja (*st*), dubina temelja (*dt*) te nagib poledine zida (*npz*). Nagib poledine zida zadan je kutom koji može biti pozitivan ili negativan kao što se vidi na slici 2.



Slika 2

2.3. Djelovanja na zid

Djelovanja na zid se računaju prema Coulombovoj teoriji graničnih stanja. Prvi korak je određivanje dijagrama naprezanja na zid gdje je cilj doći do dijagrama totalnih horizontalnih naprezanja. Dijagram totalnih naprezanja izračunat je uzimanjem u obzir pornog tlaka, koeficijenta aktivnog tlaka te utjecaja kohezije. Integracijom dijagrama totalnih horizontalnih naprezanja dobivamo horizontalnu komponentu sile aktivnog tlaka na zid. Vertikalnu komponentu dobivamo iz trigonometrijske relacije sa horizontalnom komponentom. Relacija ovisi o nagibu poledine zida i kutu trenja između zida i tla. Hvatišta sile aktivnog tlaka se dobivaju iz težišta dijagrama. Vlastita težina zida se dobiva jednostavnim produktom njegove površine i pripadajuće jedinične težine ugrađenog materijala. Sile koje djeluju na zid prikazane su na slici 3.

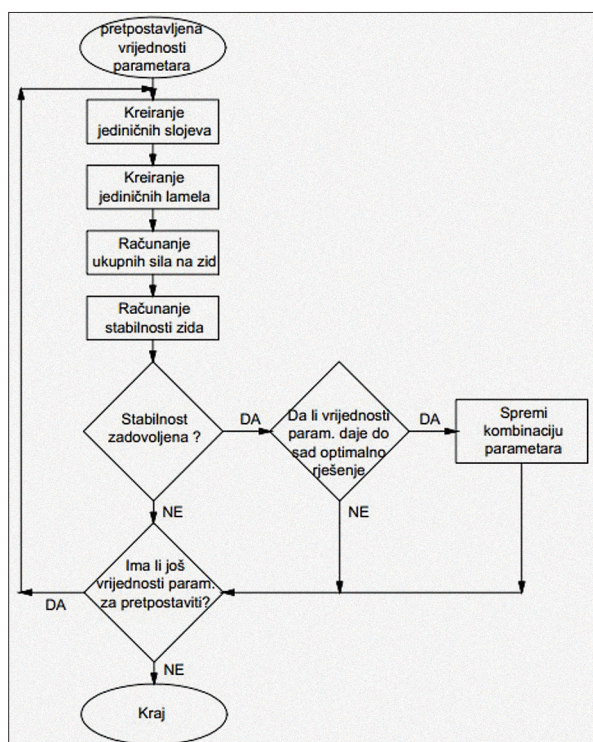


Slika 3

2.4 Proračun stabilnosti

Stabilnost jediničnog slučaja biti će zadovoljena ukoliko su zadovoljene provjere na prevrtanje i klizanje te unutarnju stabilnost zida. Proračun na kraju prikazuje vrijednosti naprezanja na temeljno tlo u razini temelja iako je u ovom slučaju izostavljena provjera na slom tla pod temeljem.

3. “Brute force” algoritam



Slika 4

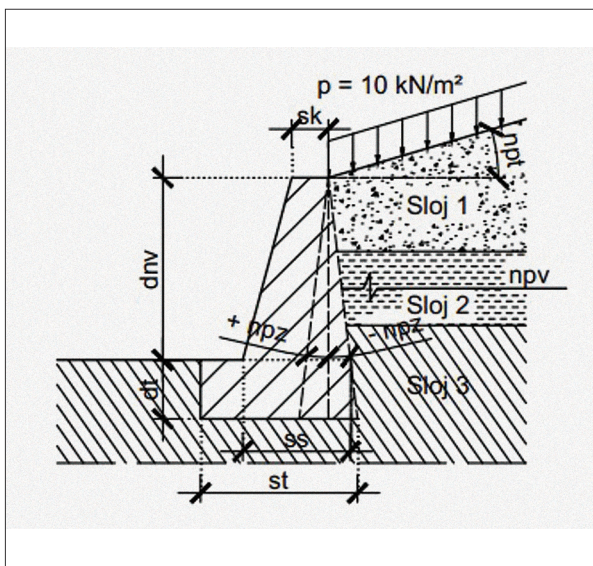
Optimizacija će se izvršiti algoritmom pretraživanja rješenja pod nazivom “Brute Force”. “Brute Force” se svodi na iterativan proces kojim se provjerava proračun svih mogućih kombinacija zadanih veličina parametara. Rješenje svakog koraka iteracije uspoređuje se dotadašnjim optimalnim rješenjem. Ukoliko je novo rješenje optimalno obzirom na prethodno sprema se u memoriju računala, te se nastavlja iteracija. Kraj pretraživanja je kada se provjere sve zadane veličine i kombinacije parametara. Svaki algoritam ima svoje prednosti i nedostatke. Prednost “Brute Force” algoritma je ta što će se sigurno naći optimalno rješenje, samo je pitanje vremena što je njegov glavni nedostatak, odnosno dugo traje. Dijagram toka je prikazan na slici 4.

4. Konkretni slučaj

4.1 Uvod

Rješavati će se primjer proračuna u programskom jeziku Python, gdje ćemo modelirati tlo i zid te napraviti optimizaciju gravitacijskog potpornog zida s obzirom na kriterij minimalne površine

4.2 Zadavanje konstantnih parametara modela



Slika 5

Zadan je terena kao na slici 5. Nagib Površine terena je pod kutom od $npt = 10^\circ$, na površini terena djeluje vertikalno kontinuirano jednoliko opterećenje sa $p = 10 \text{ kN/m}$. Tlo je horizontalno uslojeno sa 3 sloja:
 Sloj i $[y_1, y_2, \gamma_i, \varphi_i, c_i, \delta_i]$
 Sloj 1 $[0, 2, 18, 20, 4, 10]$
 Sloj 2 $[2, 4, 20, 18, 6, 12]$
 Sloj 3 $[4, 8, 22, 16, 8, 8]$
 Nivo podzemne vode $npv = 3 \text{ m}$ i zadana je denivelacija terena $dnt = 5 \text{ m}$. Rješenje ovog primjera će biti optimalni oblik zadane geometrije zida prikazane na slici 5.

4.3 Tijek proračuna

Pretpostavi se skup vrijednosti za svaki parametar zida, zatim se napravi Kartezijev produkt svih vrijednosti parametara. Korak po korak iteracije za svaku permutaciju vrijednosti pretpostavljenih parametara slijedi proračun. Prvo se profil tla podijeli u n jediničnih slojeva debljine 1 cm . Svakom n -tom jediničnom sloju pridružuju se njegovi pripadajući parametri, poput gornje granice sloja, jedinične težine..., nagiba zida.

Jedinični sloj:

$$sloj_n = [y_n, \gamma_n, \varphi_n, c_n, \delta_n, npz_n]$$

Sa svim potrebnim parametrima računamo, naprezanja od tla, porni tlak, utjecaj kohezije te koeficijent aktivnog tlaka.

Totalna vertikalna naprazanja:

$$\sigma_0 = p$$

$$\sigma_{vn} = \sigma_{vn-1} + 0.01 \cdot \gamma_n$$

Porni tlak:

$$u_n = [(y_n + 0.01) - npv] \cdot \gamma_w$$

Prni tlak se uzima u obzir ako i samo ako je $u > 0$.

Efektivna vertikalna naprazanja:

$$\sigma'_{vn} = \sigma_{vn} - u_n$$

Koeficijent aktivnog tlaka se računa po Coulombovoj formuli, a ukazuje na omjer vertikalnih i horizontalnih naprazanja u tlu.

Koeficijent aktivnog tlaka:

$$ka_n = \frac{\frac{\cos^2(\varphi_n + npz_n)}{\cos(\delta_n - npz_n) \cdot \cos^2(npz_n)}}{\left(1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi_n + \delta_n) \cdot \sin(\varphi_n - npt_n)}{\cos(\delta_n - npz_n) \cdot \cos(npt_n + npz_n)}}\right)^2}$$

Ukoliko je tlo koherentno moramo uzeti utjecaj kohezije u obzir.

Utjecaj kohezije:

$$uk_n = 2 \cdot c \cdot \sqrt{ka_n}$$

Nakon toga možemo izračunati efektivna horizontalna naprazanja. Tlo ne može preuzeti vlačna naprazanja pa se efektivna horizontalna naprazanja uzimaju u obzir samo ako su pozitivna

$$\sigma'_{hn} > 0$$

Efektivna horizontalna naprazanja:

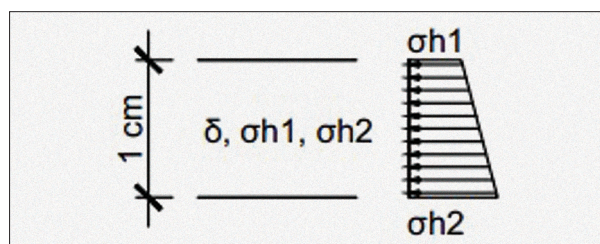
$$\sigma'_{hn} = \sigma'_{vn} \cdot ka_n - uk_n$$

Dodavanjem pripadajućeg pornog tlaka dobiju se totalna horizontalna naprazanja.

Totalna horizontalna naprazanja:

$$\sigma_{hn} = \sigma'_{hn} + u_n$$

Dobiveni jedinični sloj prikazan je na slici 6.



Slika 6

Nadalje zid se podjeli na n jediničnih lamela tako da svakoj lameli se pridruži pripadajući jedinični sloj. Kako time pridružujemo i naprazanja možemo za svaku jediničnu lamelu dobiti horizontalnu komponentu aktivnog tlaka integracijom totalnih horizontalnih naprazanja Horizontalna komponenta sile aktivnog tlaka:

$$E_{AHn} = \frac{(\sigma_{h1} + \sigma_{h2})}{2} \cdot 0.01$$

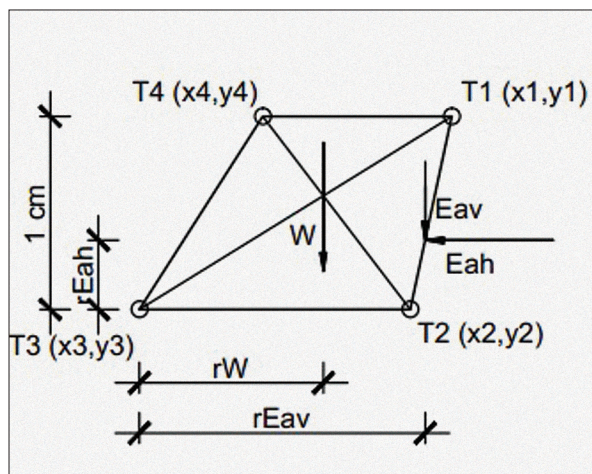
Iz trigonometrijskog odnosa dobivamo.

Vertikalnu komponentu aktivnog tlaka:

$$E_{AVn} = E_{AHn} \cdot \tan(\delta_n - npz_n)$$

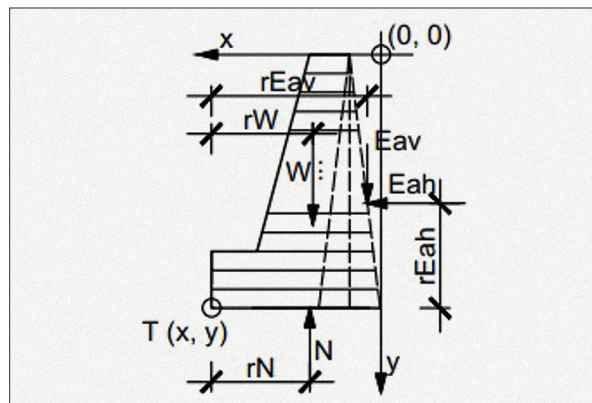
Na slici 7. se vidi da za računanje momenata se uzima u obzir donji lijevi vrh lamele. Jedniničnoj lameli se pridružuju komponente sile aktivnog

tlaka sa pripadajućim krakovima, te sila vlastite težine lamele sa svojim krakom oko donjeg lijevog ruba.



Slika 7

Takvim uređenjem lako dolazimo do ukupnih sila koje djeluju na zid kako je prikazano na slici 8.



Slika 8

Ukupne sile koje djeluju na zid dobijemo jednostavnim zbrajanjem istih iz svake jedinične lamele, isto vrijedi i za momente samo što se krakovi uzimaju od donjeg lijevog ruba zida. Ukoliko ne zid podijeljen na i n-tih horizontalnih elemenata tada slijedi.

Ukupna horizontalna komponenta aktivnog tlaka:

$$E_{AH} = \sum_{n=1}^i E_{AHn}$$

Ukupna vertikalna komponenta aktivnog tlaka:

$$E_{AV} = \sum_{n=1}^i E_{AVn}$$

Ukupna sila vlastite težine zida:

$$W = \sum_{n=1}^i W_n$$

Stabilnost zida obuhvaća provjeru na prevrtanje, klizanje i unutarnju stabilnost. Slom tla pod temeljem nije uzet u obzir u ovom članku.

Provjera na prevrtanje:

$$FS_{\text{prevrtanje}} = \frac{(W + E_{AV})}{E_{AH}}$$

Provjera na klizanje:

$$FS_{\text{klizanje}} = \frac{c_{\text{tem.tla}} \cdot st + (W + E_{AV}) \cdot \tan(\varphi_{\text{tem.tla}})}{E_{AH}}$$

Provjera unutarnje stabilnosti se svodi na provjeru položaja rezultante u svakoj jedinичnoj lameli. Položaj rezultante mora biti u srednjoj trećini dna lamele da ne bude vlačnih naprežanja u zidu.

4.4 Pokretanje algoritma

U datoteci *početni parametri* unesemo parametre iz točke 4.1. koji su konstantni parametri modela, kao što je vidljivo na slici 9.

```
# -- PARAMETRI TLA --
# Nagib površine terena
npt = 10
# Jednoliko kontinuirano opterećenje površine terena
p = 10.
# Slojevi tla slojevi = n [y1, y2, gama, fi, c, delta]
slojevi = [[0, 2, 18, 20, 6, 10], [2, 4, 20, 18, 12, 12], [4, 8, 20, 18, 38, 16]]
# Denivelacija terena
dnt = 5.

# -- PARAMETRI VODE --
# Nivo podzemne vode
npv = 3.
# Jedinicna težina vode
gamaW = 10.
```

Slika 9

Parametre iteracije odabiremo tako da za svaki parametar odaberemo granice pretraživanja, te korak pomicanja kako se vidi na slici 10. Nakon toga se kreira niz vrijednosti za svaki parametar koji se provjeravaju te se u memoriju spremaju ukoliko čine dotad minimalnu vrijednost kriterija. Nakon određenog vremena dobijemo rezultat optimizacije. Iz slike 11. se vidi optimalan slučaj. Vrijednost kriterija (površine zida) je 7.30664 m², za optimalne vrijednosti parametara zida.

```
# -- PARAMETRI OPTIMIZACIJE --
# Dubina temeljenja
dtmin = 0.0
dtmax = 2.0
# Širina krune
skmin = 0.0
skmax = 1.0
# Širina spojnice
ssmin = 1.0
ssmax = 2.0
# Širina temelja
stmin = 2.0
stmax = 4.0
# Nagib poledijne zida
npzmin = -20
npzmax = 20

korakDuljina = 0.5
korakStupanj = 5
```

Slika 10

```
=====
REZULTATI OPTIMIZACIJE
=====
-- PARAMETRI MODELA --
-----
- Denivelacija terena (dnt) = 5.0 m
- Nagib površine terena (npt) = 0.174532925199 deg
- Opterećenje površina terena (p) = 10.0 kN/m^2
- Nivo podzemne vode (npv) = 3.0 m

- Slojevi :
Sloj n [y1, y2, gama, fi, c, delta]
Sloj 1 [0.0, 2.0, 18.0, 20.0, 6.0, 10.0]
Sloj 2 [2.0, 4.0, 20.0, 18.0, 12.0, 12.0]
Sloj 3 [4.0, 8.0, 20.0, 18.0, 38.0, 16.0]

- Jedinicna težina vode (gamaW) = 10.0 kN/m^3
- Jedinicna težina betona (gamaB) = 24.0 kN/m^3

-- OPTIMALAN SLUCAJ --
-----
- Parametri zida -
- Širina krune (sk) = 0.5 m (sk => 0.5 m)
- Širina spojnice (ss) = 1.4375 m (ss => ss)
- Širina temelja (st) = 3.03125 m (st => ss)
- Dubina temelja (dt) = 0.8125 m (dt => 0.8 m)
- Nagib poledijne zida (npz) = 0.0 deg

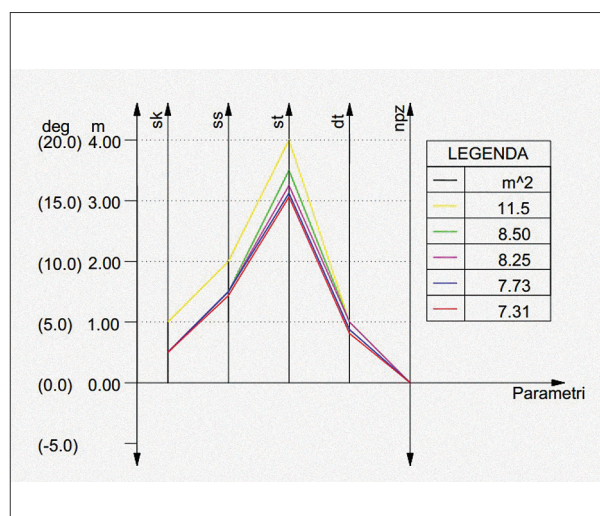
- Stabilnost -
- Faktor sigurnosti prevrtanja (fsPrevrtanje) = 2.34179364336
- Faktor sigurnosti klizanja (fsKlizanje) = 2.00729464082
- Unutarnja stabilnost = stabilan

-----
- POVRŠINA ZIDA = 7.306640625 m^2
```

Slika 11

Širina krune zida (sk) = 0.5 m
 Širina spojnice (ss) = 1.4375 m
 Širina temelja (st) = 3.0313 m
 Dubina temelja (dt) = 0.8125 m

Nagib poledjine zida (npz) = 0.0 deg
Predstaviti će se neki od optimalnih slučajeva tijekom optimizacije na slici 12.



Slika 12

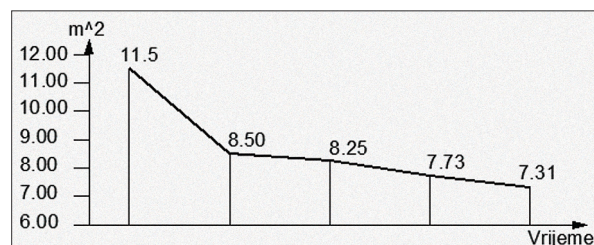
Na slici 12. Također se vidi da tijekom vremena opada površina poprečnog presjeka, žuta linija

AUTORI · AUTHORS

Sonja Zlatović – nepromjenjena biografija nalazi se u časopisu Polytechnic & Design Vol. 1, No. 1, 2013.

Korespondencija:
szlatovic@tvz.hr

predstavlja stabilan zid u ranoj fazi optimizacije koja prikazuje parametre kod kojih površina poprečnog presjeka iznosi 11.5 m², dok s kraja optimizacije crvena linija pokazuje parametre kod kojih površina zida je 7.31 m². Pad površine poprečnog presjeka u vremenu se vidi na ljedećoj slici 13.



Slika 13

5. Zaključak

Prikazan je program optimiziranja konstrukcije potpornog zida izrađen u sklopu predmeta Završni rad sa stručnom praksom što je završni predmet stručnog studija graditeljstva na TVZ.