

TRIDIMENZIONALNI PORUŠNI MEHANIZMI ZA DOLOČITEV PASIVNEGA ZEMELJSKEGA PRITISKA

PASSIVE EARTH PRESSURE DETERMINATION BY THREE-DIMENSIONALS FAILURE MECHANISMS

Helena Vrecl Kojc

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

Povzetek

Prispevek prikazuje modificiran prostorski porušni mehanizem za določitev 3D koeficienta pasivnega zemeljskega pritiska ob uporabi metode mejne analize. Numerični rezultati mejnih vrednosti tridimenzionalnega (3D) pasivnega zemeljskega pritiska so predstavljeni v obliki brezdimenzijskega koeficienta K_{py} kot posledica lastne teže zemljine ter K_{pq} zaradi dodatne površinske obtežbe. Namen raziskave je bil izboljšanje do sedaj najnižjih vrednosti rešitev pridobljenih po teoriji mejne analize.

V prispevku sta predstavljena dva v svetovem merilu priznana prostorska porušna mehanizma, prvi translatorni in drugi rotacijski hiperbolični, ki prav tako temeljita na metodi mejne analize in sta objavljena v uglednih mednarodnih revijah.

Rezultati analize predstavljenega modela so prikazani v grafični obliki v odvisnosti od geometrijskih parametrov in lastnosti temeljnih tal. V zadnjem delu prispevka je prikazana primerjava rezultatov med vsemi tremi porušnimi mehanizmi.

Summary

The paper presents the modified three-dimensional failure mechanism for determination of the 3D passive earth pressure coefficient within the framework of limit analysis theory.

The numerical results of limit values of 3D passive earth pressure are presented by non-dimensional coefficients of passive earth pressure influenced by the soil weight K_{py} and a coefficient of passive earth pressure influenced by the surcharge K_{pq} . This research was intended to improve the lowest values obtained until now with the limit analysis theory.

In the paper there is also the briefly description of the world recognized failure mechanisms, first translational and second a rotational hyperbolic failure mechanism, that just so have been based on the approach of limit analysis. The results are presented in a graphical form dependant on geometrical parameters and soil properties. In the last part of the paper the comparison of the results is presented.

1. UVOD

Izbira vrste podporne konstrukcije, kakor tudi oblika, dimenzije ter razporeditev posameznih konstrukcijskih elementov so primarno odvisni od geoloških značilnosti, geomehanskih lastnosti, topografskih pogojev, urbanistične zasnove ter ostalih vhodnih podatkov. V kolikor geološki, urbanistični in ostali parametri dovoljujejo različne rešitve, ekonomski parameter prav gotovo predstavlja izredno pomemben faktor pri izbiri in projektiranju podpornih konstrukcij. Kakor gradbene konstrukcije na splošno, tako tudi geotehnični objekti že dolgo ne služijo zgolj in samo svojemu namenu, temveč so pogojeni več dejavnikom, kot so stabilnost, trajnost, estetika oziroma arhitekturni elementi, v zadnjem času pa postaja vse bolj pomembnejša racionalna oziroma ekonomična izvedba.

Optimiranje geotehničnih konstrukcij je danes možno doseči z dvema pristopoma: dokazovanje novih znanstvenih teorij na področju geomehanike ter optimiranje topologije konstrukcije. Nova spoznanja na področju geomehanike lahko temeljijo na aplikativnem teoretično podprtem raziskovalnem delu ter odpravljanju posplošitev, ki povzročajo ohlapnost obravnavane problematike in nenatančnost pridobljenih rešitev. Optimiranje topologije konstrukcij temelji na izračunu optimalnih dimenzij in razporeditve konstrukcijskih elementov na osnovi minimiziranja objektivne funkcije, ki je običajno definirana kot strošek. Ta način optimiranja temelji na metodah matematičnega programiranja, linearnega v enostavnih problemih z linearnimi enačbami in nelinearnega v kompleksnih problemih statično nedoločenih konstrukcij z nelinearnimi enačbami (Vrecl Kojc, 2005).

Namen prispevka je predstaviti novi modificiran kinematični model prostorskega porušnega mehanizma za določanje mejnih vrednosti količnika pasivnega pritiska kot posledica lastne teže, brez ali z dodatno površinsko obtežbo. Optimiranje porušnega mehanizma je izvedeno ob uporabi metode menje analize s teoremom zgornje vrednosti. Dosežene kritične vrednosti prostorskega količnika pasivnega pritiska je v praksi možno uporabiti pri projektiranju različnih tipov podpornih ter ostalih geotehničnih konstrukcij, kjer lahko z uporabo prostorskih mehanizmov dosežemo optimalnejše rešitve.

Pri določanju vrednosti zemeljskih pritiskov za pasivna mejna stanja je potrebno upoštevati oblike pričakovanih porušnih ploskev, ki morajo biti kinematično dopustne za predpostavljene premike podpornih sten. Prostorski porušni mehanizem za določitev kritične vrednosti koeficientov pasivnega pritiska kot posledica lastne teže tal in dodatne površinske obtežbe temelji na novem translatorskem kinematičnem modelu s sledečimi geometrijskimi karakteristikami. Porušnica je v prostor razširjena z osrednjim togim blokom različnih dimenzij ter zunanjsima bočnima blokoma, ki ju tvorijo ovojnice prisekanih stožčastih teles. Celoten mehanizem povezuje skupno kinematično dopustno hitrostno polje, podobno kot pri ravninskih stabilnostnih analizah, z upoštevanjem potencialnih porušnih ploskev. Spretna ravna površina osrednjega dela je v interakciji s podporno konstrukcijo, zgornja površina je lahko obremenjena tudi s površinsko obtežbo, zaledno ukrivljeno ploskev osrednjega dela določajo zunanje poligonalne ploskve. Bočni telesi sta v prečnem prerezu skladni s prerezom osrednjega telesa, navzven pa sta bočno omejeni z ukrivljeno kinematično dopustno površino, ki jo določa ovojnica infinitezimalno oddaljenih presekanih stožcev ter del površine plašča vodilnega polstožca. Primer je v osnovi obravnavan v homogenih nekoherentnih zemeljskih tleh brez in z dodatno površinsko obtežbo.

V geotehnični praksi so rezultati prostorskih analiz pasivnih zemeljskih pritiskov uporabni pri dimenzioniranju sidrišč, zagotavljanju stabilnosti temeljev in stebrov pri premostitvenih objektih, pri projektiranju temeljev ločnih konstrukcij, pilotnih sten itd. Pasivni zemeljski pritisk, ki deluje na toge podporne konstrukcije, je bil v preteklosti raziskovan večinoma na ravninskih modelih (Coulomb, 1773, Caquot in Kerisel, 1948, Hansen, 1953, Janbu, 1957, Lee in Herington, 1972, Shields in Tolunay, 1972, Kérisel in Absi, 1990, itd.), medtem, ko je raziskovanje omenjene problematike v prostoru omejeno (Blum, 1932, Soubra in Regenass, 2000 ter Škrabl in Macuh, 2005). Prav tako se raziskave razlikujejo med seboj po uporabi različnih teoretičnih izhodišč. Za izvrednotenje intenzitete zemeljskih pritiskov za aktivna in pasivna mejna stanja je uporabnih več različnih metod, npr. mejno ravnovesno stanje (Terzaghi, 1943, Sokolovski, 1965) in metoda mejne analize (Chen, 1975, 1990, Basudhar at.al., 1979, Michalowski, 2001 itd.). Pri prvi metodi so v analizah upoštevani statični in porušni pogoji, pričakovani premiki podpornih konstrukcij pa v analizi neposredno niso upoštevani. Z metodo mejne analize v splošnem določamo zgornje in spodnje mejne vrednosti rešitev z upoštevanjem pričakovanih premikov. Pri aktivnih stanjih se rezultati raziskav z različnimi pristopi med seboj bistveno ne razlikujejo. Za pasivna stanja so pridobljeni rezultati lahko zelo različni in odvisni predvsem od izbranih porušnih mehanizmov. Soubra in Regenass (2000) sta obravnavala translatorski prostorski kinematični mehanizem z modelom prizmatskih elementov, medtem, ko sta Škrabl in Macuh (2005) določanje pasivnih zemeljskih pritiskov obravnavala v prostorskih pogojih na osnovi izvirnega prostorskega rotacijskega hiperboličnega kinematično dopustnega porušnega mehanizma.

2. NOVI MODIFICIRAN PROSTORSKI PORUŠNI MEHANIZEM

Za pasivne zemeljske prisike v prostorskih razmerah je značilno bistveno povečanje njihove vrednosti pri zmanjševanju razmerja širine in višine stene. Vrednost prostorskega koeficienta pasivnega zemeljskega pritiska je odvisna od lastnosti tal, trenja med konstrukcijo in temeljnimi tlemi ter razmerja med višino in širino stene; lahko je nekajkrat višja od primerjalne vrednosti za ravninske primere. Analiza obravnava splošni primer homogenih nekoherentnih tal z možnostjo dodatne obremenitve q na površini temeljnih tal v zaledju.

2.1. Predpostavke in omejitve

Upoštevane so naslednje predpostavke in omejitve:

- (a) tla so homogena in izotropna, upoštevan je Coulombov material z asociativnim pravilom tečenja, ob upoštevanju Hillovega principa maksimalnega dela ter majhne deformacije (Hill, 1950),
- (b) mobilizacija strižnih napetosti v porušnem mehanizmu je konstantna tako v ravnovesnem stanju kot tudi v porušitvenih pogojih,
- (c) upoštevano je translatorsko gibanje porušnega mehanizma, ki ga omejuje potencialna porušna ploskev v ravnini x - y in ovojnica infinitezimalno oddaljenih prisekanih stožcev v krožni smeri,
- (d) delo zunanjih sil je določeno z redistribucijo kontaktnih napetosti po površini, prispevek pasivnih pritiskov zaradi lastne teže zemljine narašča linearno z globino, medtem, ko se vpliv kohezije in dodatne obtežbe na zaledju z globino ohranja,
- (e) predpostavljen model predstavlja vertikalno steno s površino b/h (b = širina, h = višina) in horizontalnim zaledjem,
- (f) porušni mehanizem temelji na uporabi metode mejne analize. Teorem zgornje vrednosti zagotavlja, da je za ravnotežne kinematične sisteme sprememba dela zunanjih sil manjša

ali enaka spremembi disipacije notranje energije za vsa kinematično dopustna polja deformacijskih hitrosti. Kinematično dopustna polja deformacijskih hitrosti morajo ustrezati kompabilitetnim in deformacijskim robnim pogojem ter pravilu tečenja za upoštevane materiale. Delovna enačba pravi, da morajo biti sile, določene z izenačitvijo spremembe dela zunanjih sil in spremembe disipacije notranje energije večje ali enake dejanski mejnih obtežbi:

$$\int_A T_i \dot{u}_i^* dA + \int_V F_i \dot{u}_i^* dV = \int_V \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^* dV \quad (1)$$

kjer T_i, F_i označujejo zunanje sile na površini ali volumnske sile v telesu v določeni točki i , σ_{ij} označuje tenzor napetosti, $\dot{u}_i^*, \dot{\epsilon}_{ij}^*$ označujeta vektor spremembe pomika v točki i oziroma tenzor spremembe deformacij.

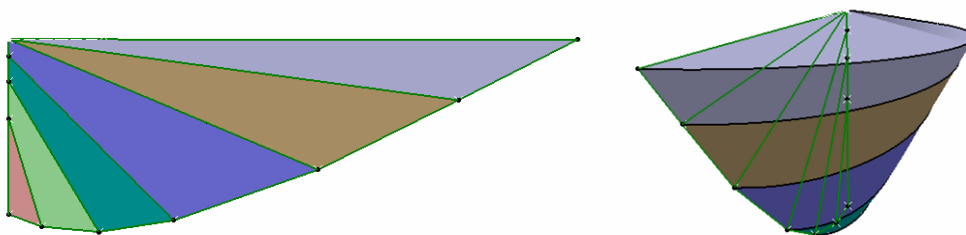
(g) rezultantno vrednost pasivnih zemeljskih pritiskov določa izraz:

$$P_p = K_{p\gamma} \cdot \gamma \cdot \frac{h^2}{2} b + K_{pq} \cdot q \cdot hb + K_{pc} \cdot c \cdot hb \quad (2)$$

kjer so P_p rezultantna sila pasivnega zemeljskega pritiska, $K_{p\gamma}$ koeficient pasivnega pritiska vsled lastne teže zemljine, K_{pq} koeficient pasivnega pritiska vsled dodatne površinske obtežbe, K_{pc} koeficient pasivnega pritiska vsled kohezije, γ dejanska prostorninska teža zemljine, c kohezija.

2.2. Geometrija in kinematično dopustno polje hitrosti porušnega mehanizma

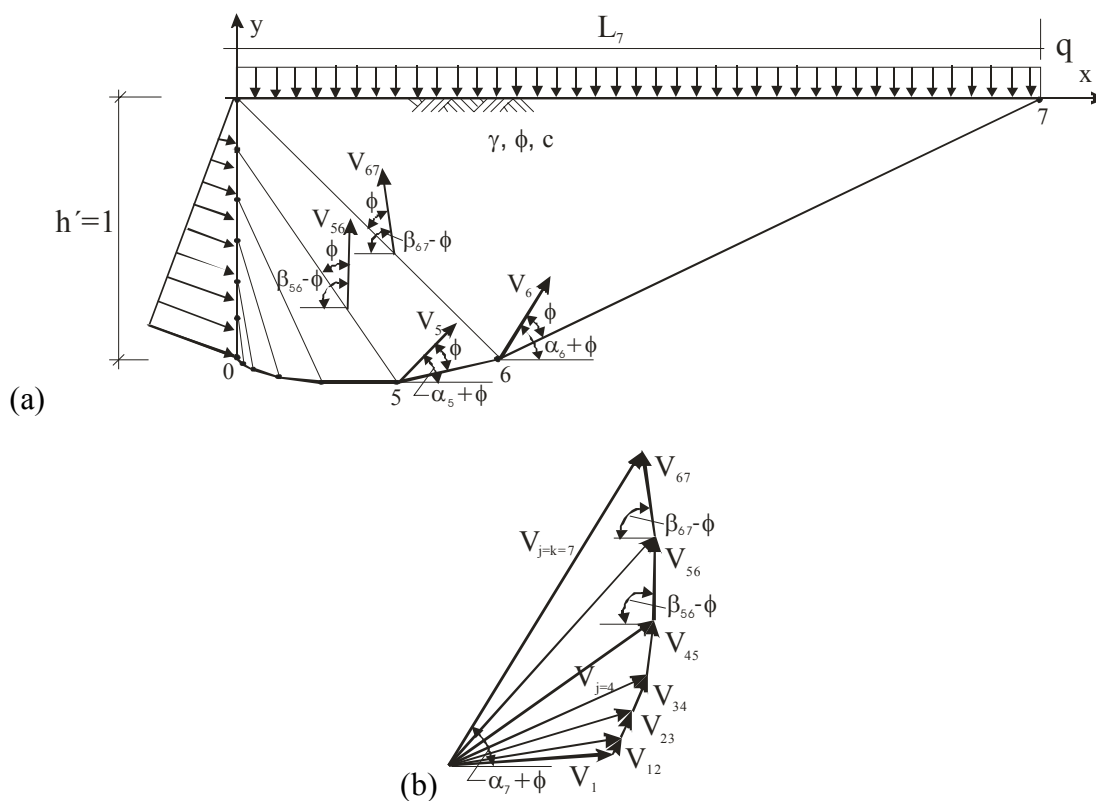
Mehanizem geometrijsko predstavlja prostorski blok sestavljen iz osrednjega dela in dveh stranskih togih blokov, ki ju sestavljajo ovojnice fiktivnih trenjskih stožcev. Prostorski porušni mehanizem sestavlja v ravnini x - y optimirano drsno ploskev, ki jo sestavlja končno število togih segmentov, geometrijsko je mehanizem generaliziran z globino $h=1$. V smeri z je model sestavljen iz osrednjega dela togega telesa, ki se zaključuje z zunanjima blokoma, katera predstavlja ovojnica polstožcev v vsakem segmentu zase. Slika 1 prikazuje prostorski porušni mehanizem s šestimi segmenti.



Slika 1: Shematski prikaz prostorskega porušnega mehanizma: (a) prerez v ravnini x - y , (b) bočna porušna ploskev

Slika 2 prikazuje prečni prerez porušnega mehanizma z vektorji hitrosti na petem in šestem segmentu ter hodograf kinematično dopustnega hitrostnega polja delujočega na predpostavljenem prostorskem porušnem mehanizmu, ki ga sestavlja n togih segmentov omejenih s točko na dnu s koordinatami $(0, -1)$ in končno točko s koordinato $(x_{opt}, 0)$.

Posamezni segment j ima začetno točko s koordinato $(x_{0-opt}, y_{0-opt})_j$ in $(0, y_{k-opt})_j$. V analizah smo upoštevali sedem segmentov ($j=7$); na splošno je možna formulacija kinematičnega modela s poljubnim številom segmentov. Kinematika hitrosti posameznih blokov je določena z vektorjem V_j , ki je odklonjen za kot $\alpha_j + \phi$ glede na horizontalno os ter z vektorjem $V_{j,j+1}$, ki je odklonjen za kot $\beta_j - \phi$. Porušni mehanizem je definiran z $2n-1$ ravninami s koti $\alpha_j (j=1, \dots, n-1)$ in $\beta_j (j=1, \dots, n)$. Hitrost posameznega n -tega segmenta določa gibanje celotne zemeljske mase porušnega mehanizma.



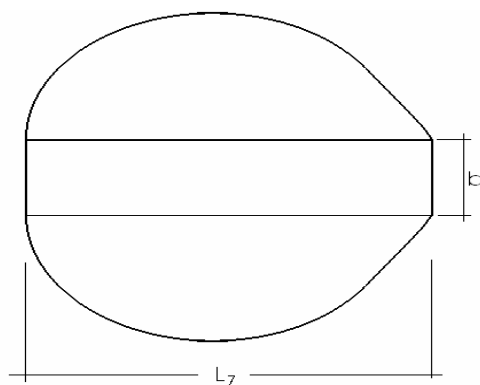
Slika 2: (a) Prečni prerez porušnega mehanizma s prikazom vektorjev hitrosti na dveh segmentih, (b) hodograf.

Zunanji vektorji hitrosti posameznega segmenta V_j in vektorji hitrosti na ploskvah med posameznimi segmenti $V_{j,j+1}$ so podani z izrazoma

$$V_{j+1} = V_j \frac{\sin(\beta_{j,j+1} - 2\phi - \alpha_j)}{\sin(\pi - \beta_{j,j+1} - \alpha_{j+1})} \quad (3)$$

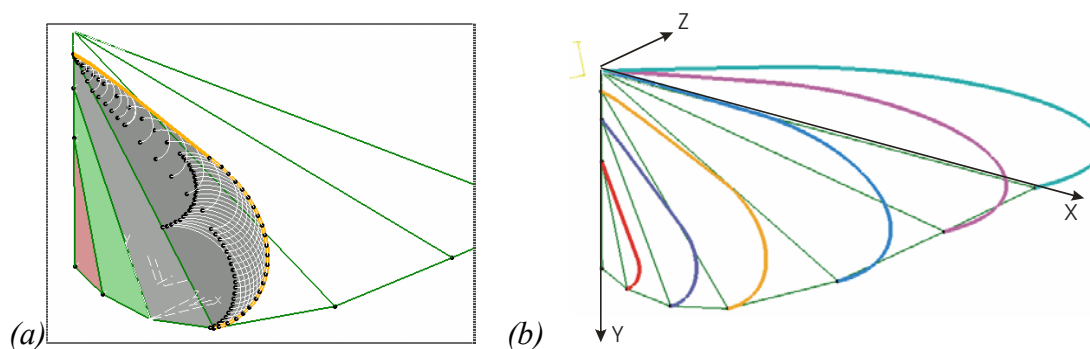
$$V_{j,j+1} = V_j \frac{\sin(\alpha_{j+1} - \alpha_j)}{\sin(\beta_{j,j+1} - \alpha_j - 2\phi)} \quad (4)$$

Slika 3 prikazuje tloris porušnega mehanizma v ravnini x-z, kjer je razvidna širina osrednjega bloka b in dveh stranskih togih blokov, ki ju sestavljajo ovojnice fiktivnih trenjskih stožcev maksimalne dolžine zadnjega segmenta L_7 .



Slika 3. Porušni mehanizem v tlorisu.

Ovojnico posameznega segmenta, kakor tudi celotnega porušnega mehanizma definiramo z teorijo diferencialne geometrije. Slika 4 prikazuje shematski prikaz ovojnice tretjega segmenta ter pogled na ovojnice bočnega togega bloka porušnega mehanizma. Na podlagi definiranih ovojníc bočnih blokov porušnega mehanizma smo izračunali pripadajoč volumen, ki smo ga potrebovali pri delovni enačbi teorema zgornje vrednosti metode mejne analize.



Slika 4: Shematski prikaz: (a) pogled ovojnice tretjega segmenta, (b) pogled na celoten porušni mehanizem.

2.3. Numerični postopek

Kritične vrednosti brezdimenzijskega koeficienta pasivnega zemeljskega pritiska $K_{p\gamma}$ in K_{pq} ter pripadajoči kritični porušni mehanizmi so v odvisnosti od karakteristik temeljnih tal ter geometrijskih parametrov pridobljeni z analizami, ki smo jih izvedli s programskim orodjem Microsoft Excel - Solver z metodo splošne redukcije gradienta. Analize smo izvedli na sedem-segmentnem porušnem mehanizmu, kar zagotavlja dovolj natančno rešitev sistema. Karakteristike temeljnih tal so podane kot konstante: strižni kot temeljnih tal ϕ variira od 25° do 45° ter kot notranjega trenja med podporno konstrukcijo in tlemi $\delta = 0, 1/3\phi, 1/2\phi, 2/3\phi$ in ϕ . Geometrijske karakteristike izkopa so podane s konstanto b/h za primere $2D$ oz. $20, 10, 5, 2, 1, 0.5$ in 0.25 .

Proces optimizacije podaja kritično kinematično dopustno polje hitrosti oziroma porušni mehanizem s koordinatami posameznih točk ob naslednjih geometrijskih pogojih:

- (a) geometrijske konstante: točka s koordinatami $(0,0)$ in točka $(0,-1)$,
- (b) zgornja točka na x osi ima koordinate $(x_{opt}, 0)_{j=N}$,

- (c) geometrijske spremenljivke točk j -tega segmenta (x_j, y_j) ter točke segmentov na y osi $(0, y_{opt})_j$,
- (d) pogojna neenačba kotov: $\alpha_j \leq \alpha_{j+1} - 0.01$,
- (e) pogojna neenačba točk segmentov na y osi $(0, y_{opt})_j$: $y_j \geq y_{j+1} + 0.001$,
- (f) ukrivljena bočna ploskev pri vseh analiziranih primerih mora sovpadati z vertikalnim robom podporne stene, kar dosežemo z dodatnim geometrijskim pogojem $\beta_j \leq \pi / 2 - \phi$,
- (g) določamo minimalno vrednost namenske funkcije $K_{p\gamma}$ in K_{pq} .

Optimalne rezultate po teoriji mejne analize s teoremom zgornje vrednosti pridobimo v procesu optimiranja po naslednjih korakih (Macuh, 2005):

- predpostavimo kinematično dopustni porušni mehanizem,
- izračunamo delo vseh zunanjih sil za majhne deformacije na predpostavljenem mehanizmu,
- izračunamo disipacijo notranje energije v hitrostnih diskontinuitetah, ki predstavljajo plastično deformirana območja,
- s pomočjo delovne enačbe določimo najbolj kritično oz. najnižjo rešitev zgornje vrednosti za izbrani mehanizem,
- z optimizacijo s programskim orodjem Microsoft Excel - Solver ob uporabi metode splošne redukcije gradienta pridobimo kritično vrednost brezdimenzijskega koeficienta pasivnega zemeljskega pritiska $K_{p\gamma}$ in K_{pq} ter pripadajoč kritični porušni mehanizem.

S procesom optimiranja smo določili tiste vrednosti parametrov oziroma spremenljivk, ki določajo porušni mehanizem z najnižjo vrednostjo pasivnih zemeljskih pritiskov. Količnike pasivnih zemeljskih pritiskov določamo ločeno za vplive lastne teže tal $K_{p\gamma}$ ter za zaledno obremenitev K_{pq} z izrazi:

$$K_{p\gamma} = \frac{g_\gamma}{f_\gamma}; \quad K_{pq} = \frac{g_q}{f_q} \quad (5)$$

Koeficient K_{pc} obsega vpliv kohezije ter se lahko določi z uporabo koeficienta K_{pq} (Kerisel and Absi, 1990):

$$K_{pc} = \frac{K_{pq} - 1 / \cos \delta}{\tan \phi} \quad (6)$$

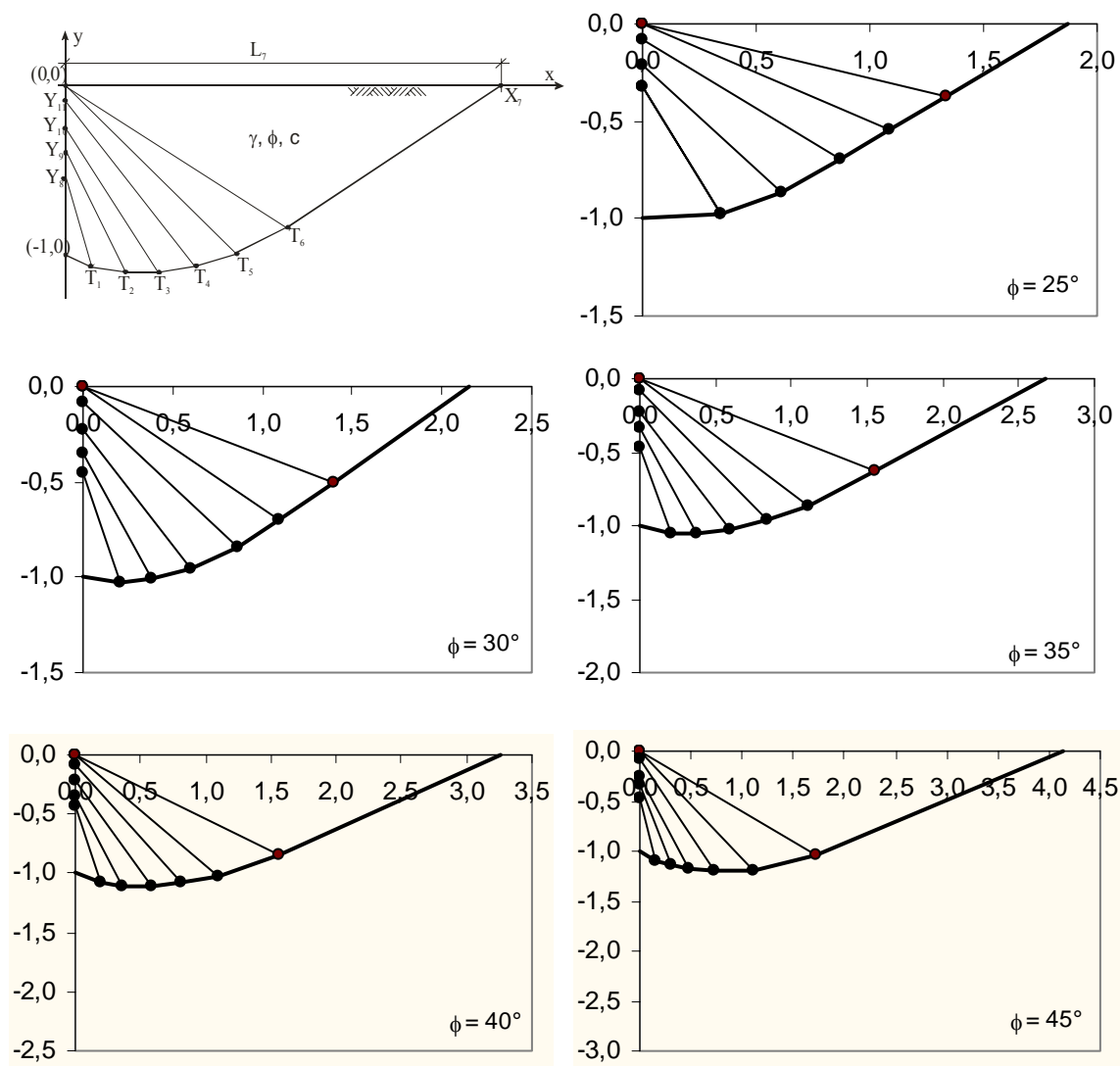
Rezultati numeričnih analiz so v obliki količnikov $K_{p\gamma}$ ter K_{pq} za 2D in 3D primere ter za različne strižne kote in količnike trenja med podporno konstrukcijo in zaledno zemljino prikazani v naslednjem poglavju.

2.4. Analiza numeričnih rezultatov

V procesu numerične analize je začetni kinematični model prostorskega porušnega mehanizma določen z izbiro začetne vrednosti spremenljivk, ki morajo biti izbrane tako, da zadoščajo pogojem, ki so navedeni v prejšnjem poglavju. Z optimiranjem so določene tiste vrednosti spremenljivk, ki določajo porušni mehanizem z najnižjo vrednostjo pasivnih zemeljskih pritiskov. Rezultati numeričnih analiz so v obliki količnikov $K_{p\gamma}$ in K_{pq} za različne

strižne kote ϕ in količnike trenja med podporno konstrukcijo in zaledno zemljino δ pregledno prikazani na slikah 7 in 8.

Globalna ravnina kinematičnega modela porušnega mehanizma ima koordinate x-y in leži normalno na vzdolžno os objekta oziroma izkopa (slika 5). Kinematični model vsebuje šest optimizacijskih točk od T_1 do T_6 s koordinatami (x_i, y_i) , ki so v procesu optimizacije definirane kot spremenljivke, točka X_7 s koordinatami $(x_7, 0)$ kjer je x_7 spremenljivka, ki predstavlja dolžino zadnje ovojnice L_7 , $y=0$. Na y osi so definirane točke Y_8 do Y_{11} s koordinatami $(0, y_i)$ kjer je y_i spremenljivka, točki s pripadajočimi koordinatami $(0, 0)$ in $(-1, 0)$ sta konstantni.



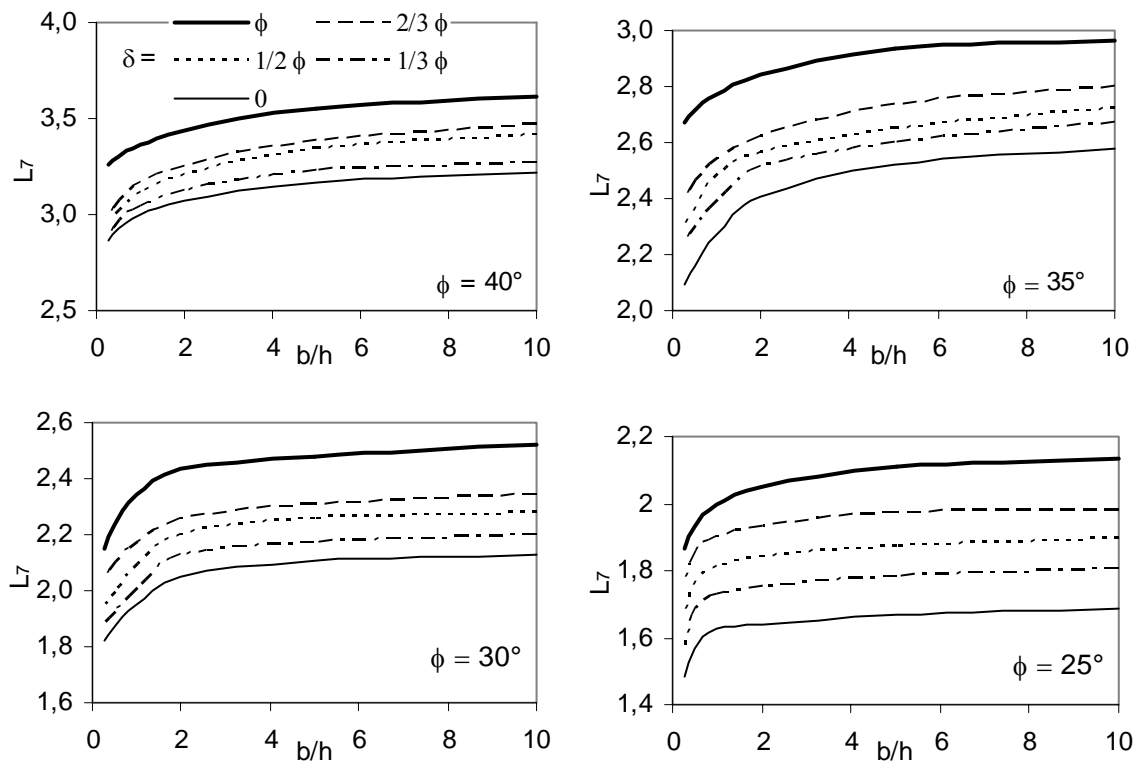
Slika 5. Geometrijski prikaz sedem-segmentnega kinematičnega modela v ravnini x-y ter kritični porušni mehanizmi v x-y ravnini za $\gamma' = 1.0$, $q' = c' = 0$, $\delta = \phi$,

$$b/h = 0.25 \text{ in } \phi = 25 - 45^\circ.$$

Na sliki 5 vidimo, da se volumen porušnega mehanizma povečuje z naraščanjem strižnega kota temeljnih tal ϕ , porušna ploskev je manj ukrivljena pri manjšem strižnem kotu ϕ , nato z večanjem strižnega kota prehaja v konkavnejšo zvezno krivuljo, dolžina zadnjega segmenta

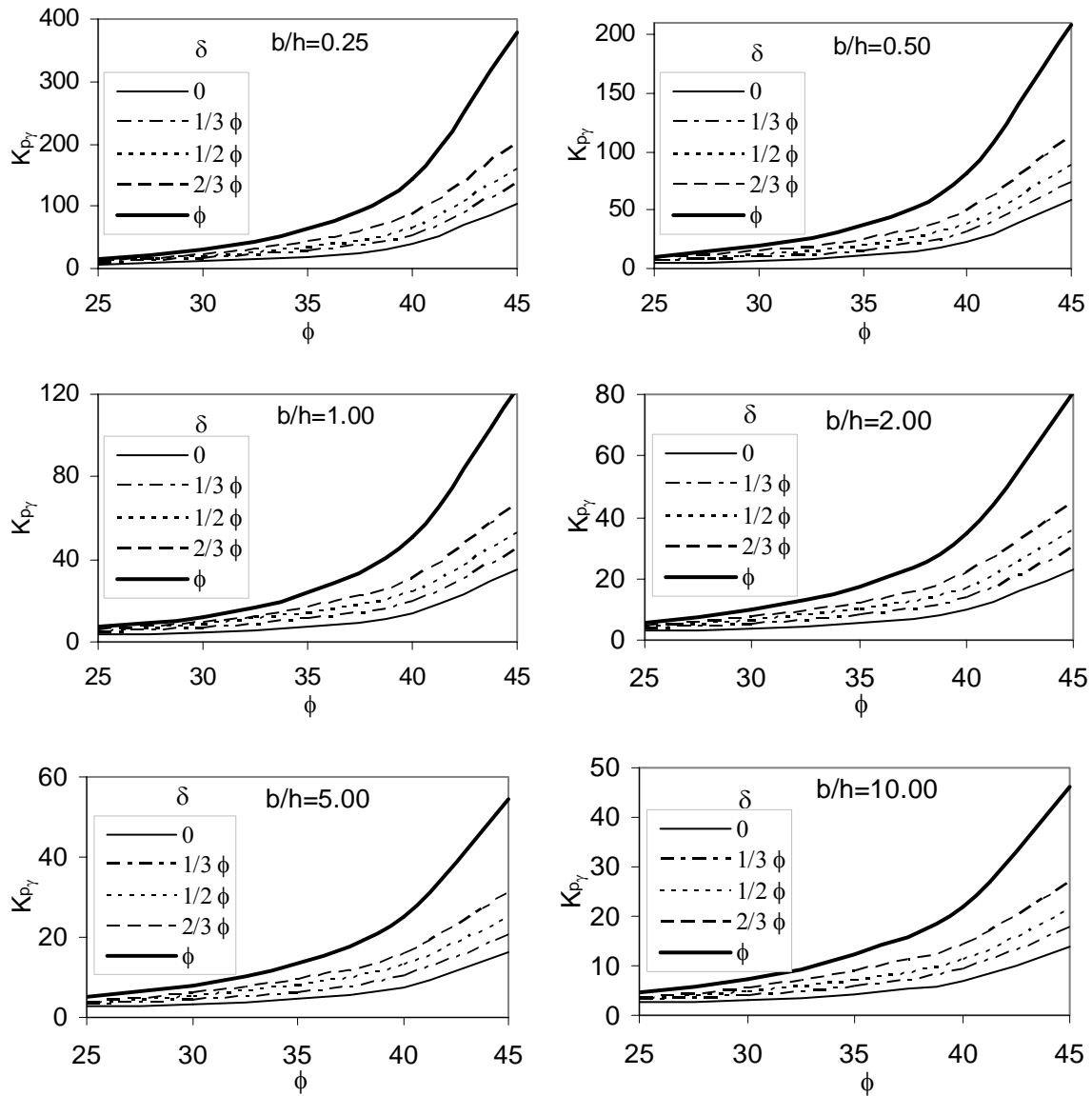
L_7 (točka X_7) zvezno narašča z večanjem strižnega kota temeljnih tal, kar je prikazano tudi v diagramih na sliki 6.

Dolžina zadnjega segmenta L_7 (slika 6) in posledično prostornina kinematičnega modela sta največji pri $\phi=45^\circ$ in $\delta=\phi$, nato z zmanjševanjem strižnega kota ϕ vrednosti L_7 upadajo in s tem se zmanjšuje tudi prostornina kinematičnega modela. Kot notranjega trenja med konstrukcijo in tlemi δ bistveno vpliva na rezultate pri vseh strižnih kotih temeljnih tal. Geometrijska lastnost kinematičnega modela b/h ima največji vpliv pri najmanjšem strižnem kotu $\phi=25^\circ$ in sicer v območju $b/h=0.25$ do $b/h=1$, pri $b/h>1$ pa vpliv geometrijskih lastnosti upada.

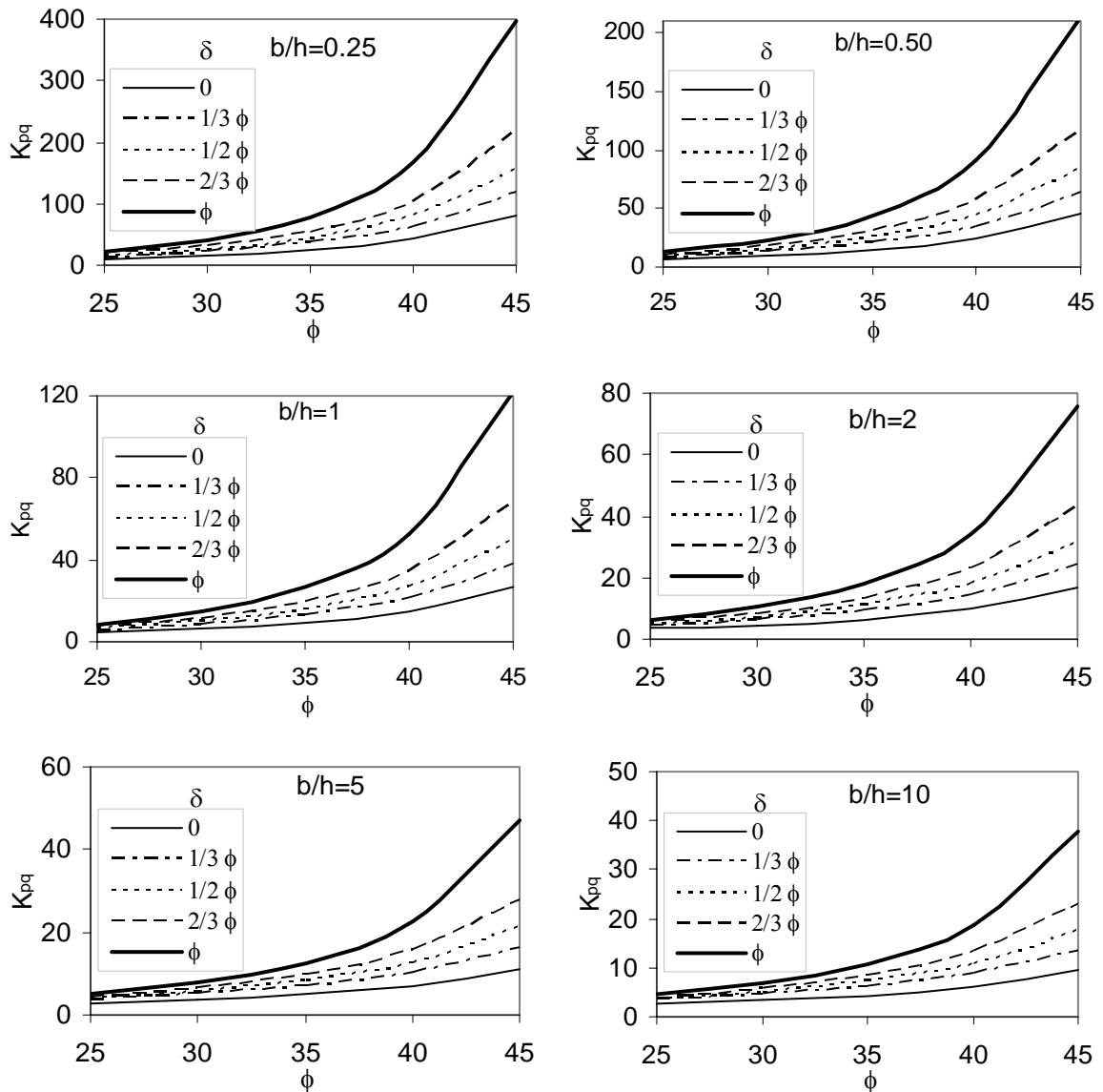


Slika 6: Dolžina kinematičnega modela prostorskega porušnega mehanizma L_{ovoj} v odvisnosti od b/h za različne strižne kote ϕ .

Sliki 7 in 8 podajata rezultate numeričnega postopka, vrednosti koeficientov $K_{p\gamma}$ in K_{pq} za različne primere b/h , strižnega kota zemljine ϕ in trenjskega količnika med podporno konstrukcijo in tlemi δ .



Slika 7: Količniki $K_{p\gamma}$ v odvisnosti od vhodnih parametrov ϕ , δ in b/h .



Slika 8: Količniki K_{pq} v odvisnosti od vhodnih parametrov ϕ , δ in b/h .

Rezultati analiz potrjujejo ugotovitve, da vrednosti koeficientov $K_{p\gamma}$ in K_{pq} močno upadajo s povečanjem količnika b/h , vrednosti pri $b/h=10$ se približajo vrednostim 2D, prav tako so tudi oblike porušnih mehanizmov za 2D in $b/h=10$ zelo podobne.

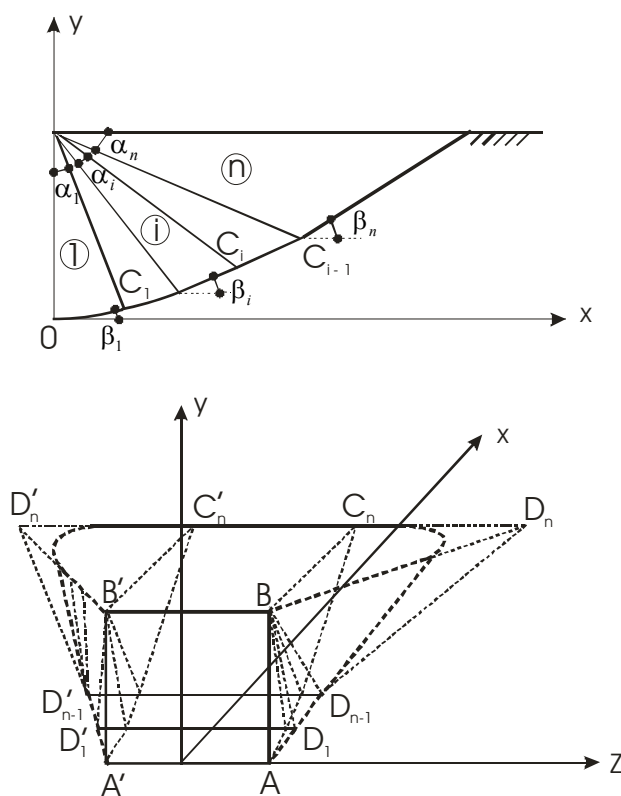
Vrednosti koeficientov $K_{p\gamma}$ in K_{pq} za primer 2D se zelo približajo vrednostim, ki jih podajata Kerisel in Absi (1990). Rezultati iz slik 7 in 8 se lahko uporabijo v geotehnični praksi, zato so podani v odvisnosti od različnih vhodnih parametrov.

3. OKVIRNA PREDSTAVITEV SVETOVNO PRIZNANIH PORUŠNIH MEHANIZMOV

Obstoječa literatura praviloma obravnava samo ravninske analize kritičnih vrednosti pasivnih zemeljskih pritiskov z različnimi pristopi, rezultati raziskav za prostorska stanja so v literaturi zelo omejeni. Rezultati prostorskih analiz pasivnega pritiska ob uporabi mejne analize s teoremom zgornje vrednosti sta prikazala Soubra in Regenass (2000) za translatorski porušni mehanizem ter Škrabl in Macuh (2005) za rotacijski hiperbolični porušni mehanizem.

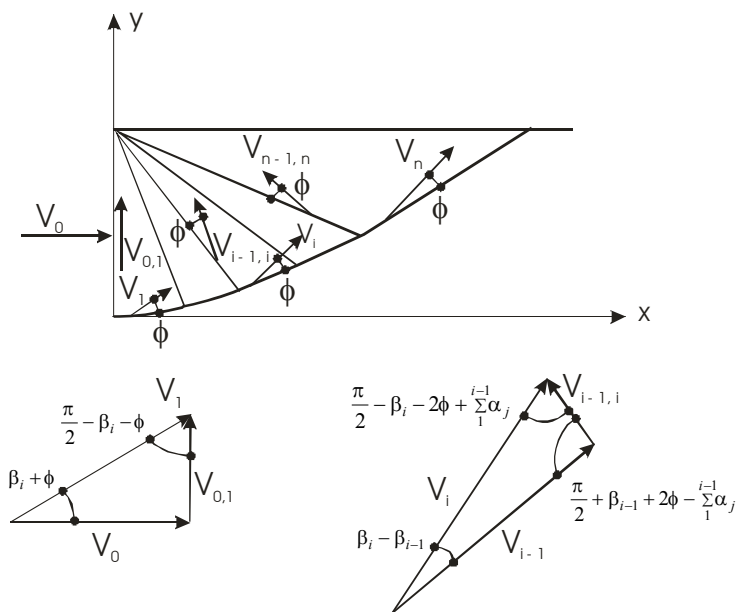
3.1. Multi-blok porušni mehanizem M_{nt}

Soubra in Regenass sta leta 2000 v reviji »Journal for Geotechnical & Geoenvironmental Engineering« objavila multi-blok translatorski porušni mehanizem poimenovan kot M_{nt} , ki je izboljššan mehanizem od predhodnjih dveh, ki sta enojni-blok mehanizem M_1 ter poenostavljen multi-blok mehanizem M_n ter sta prav tako predstavljena v omenjenem prispevku. Izboljšava mehanizma M_n je bila dosežena z redukcijo volumna končnega bloka ter mehanizma M_1 s povečanjem števila blokov iz enega bloka na večje število blokov n .



Slika 9: Prerez ter pogled multi-blok translatorsnega porušnega mehanizma M_{nt} (Soubra in Regenass, 2000).

Slika 9 prikazuje prečni prerez in pogled M_{nt} mehanizma. V prikazanem mehanizmu sta zgornji lateralni ploskvi presekanji z dvema presečnima ravninama ter zaključeni z polkrožnim stožcem v točkah D_{n-1} in D'_{n-1} . Desni in levi stožec predstavlja tangento lateralne ravnine $BD_{n-1}D_n$ ($B'D'_{n-1}D'_n$) in spodnje ravnine $D_nD'_nD_{n-1}D'_{n-1}$.



Slika 10. Polje hitrosti M_{nt} porušnega mehanizma.

Slika 10 prikazuje polje hitrosti kinematično dopustnega hitrostnega polja M_{nt} porušnega mehanizma. Zemeljska masa posameznega bloka se giba s hitrostjo V_i , ki je nagnjena pod kotom $\beta_i + \phi$ glede na horizontalno smer oziroma pod kotom ϕ glede na porušno ravnino. Hitrost med posameznima blokoma $V_{i-1,i}$ je nagnjena pod kotom ϕ glede na vmesno ravnino (slika 10). Stena se giba s hitrostjo V_0 in $V_{0,1}$, ki predstavlja relativno hitrost na interakciji tla-zemljina. Vse definirane hitrosti so vzporedne vertikalni simetrični ravnini xOy.

Primerjava M_{nt} porušnega mehanizma ter novega modificiranega porušnega mehanizma podaja naslednje podobnosti:

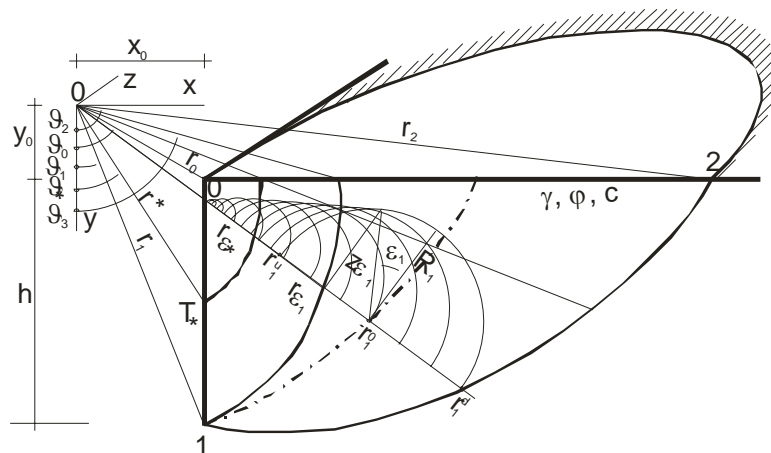
- modela sta translatorna,
- vsebujeta nekatere skupne predpostavke in omejitve,
- temeljita ne metodi mejne analize, teoremu zgornje vrednosti,
- numerični postopek je izveden s programskim orodjem Excel ob uporabi metode splošne redukcije gradienta.

Razlike med mehanizmoma so naslednje:

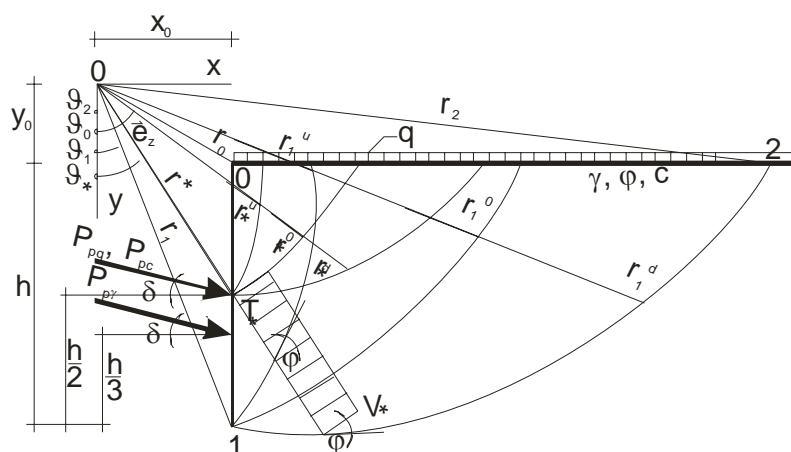
- geometrija mehanizmov se bistveno razlikuje v x-y ravnini, saj so plosvke posameznega bloka pri novem porušnem mehanizmu v začetni kakor tudi končni točki optimalne. Začetna točka leži na y osi, ki predstavlja spremenljivko ($x=0$). Iz slike 9 je razvidno, da pri M_{nt} porušnem mehanizmu začetne točke vseh blokov izhajajo iz koordinatnega izhodišča in imajo zato neoptimalno lego.
- volumen novega modificiranega porušnega mehanizma temelji na ovojnici infinitezimalno oddaljenih polstožcev, ki imajo vrh na posamezni ravnini blokov, M_{nt} mehanizem pa temelji na poenostavljenem izračunu volumna.

3.2. Prostorski rotacijski hiperbolični porušni mehanizem

Škrabl in Macuh (2005) v reviji »Canadian Geotechnical Journal« predstavila prostorski porušni mehanizem ob uporabi teorije mejne analize, podobno kot M_{nt} in novi modificiran porušni mehanizem, z razliko, da je njun mehanizem 3D kinematično dopustni rotacijski hiperbolični porušni mehanizem (slika 11).



Slika 11. Shema rotacijskega hiperboličnega porušnega mehanizma.



Slika 12. Logaritemska spirala drsine mehanizma.

Za analize je uporabljen 3D rotacijski porušni mehanizem, ki predstavlja nadgradnjo ravninske porušnice v obliki logaritemske špirale (slika 12). Sestavljen iz osrednjega in dveh stranskih teles, ki jih povezuje skupno hitrostno polje, podobno kot pri 2D stabilnostnih analizah z upoštevanjem potencialnih porušnih ploskev v obliki logaritemske spirale. Sprednja ravna površina osrednjega dela je v interakciji s podporno konstrukcijo, zgornja površina je lahko obremenjena tudi s površinsko obtežbo, zaledno ukrivljeno ploskev osrednjega dela določa odsek logaritemske spirale. Bočni telesi sta v prečnem prerezu skladni s prerezom osrednjega telesa, navzven pa sta bočno omejeni z ukrivljeno in kinematično dopustno hiperbolično površino, ki jo določa ovojnica hiperboličnih pol-stožcev ter del površine plašča vodilnega polstožca.

Rešitve so pridobljene z uporabo kinematičnega pristopa in matematičnega optimiranja, kjer pasivna stanja preučujemo z izenačevanjem spremembe dela zunanjih sil ter disipacije notranje energije na kinematično dopustnih poljih deformacijskih hitrosti. K spremembam dela zunanjih sil prispevajo pasivni zemeljski pritiski v kontaktni površini med podporno

konstrukcijo in tlemi, lastna teža zalednih zemljin v celotnem porušnem telesu ter površinske obremenitve na površini zaledja. Disipacijo notranje energije sistema povzročajo diskontinuitete hitrostnega vektorskega polja znotraj porušnega telesa ter vzdolž porušne ploskve, ki jo določa odsek logaritemske spirale.

Zunanje ploskve so lateralno omejene s krivuljo ter kinematično dopustno hiperbolično ploskvijo, ki je definirana z ovojnico hiperbolinega polstožca ter delom ploskve vodilnega polstožca. Katerikoli točki po višini podporne stene (1-0, slika 11) pripada natančno določeni fiktivni in kinematično dopustni hiperbolični trenjski stožec. Definirano telo je omejeno z logaritemsko spiralo v območju podporne stene na širini b ter dvema bočnima telesoma omejenima s hiperbolično ploskvijo, ki jo določajo ovojnice plaščev vseh pol-stožcev z vrhom na obeh vertikalnih robovih podporne stene. Vsa tri telesa povezuje skupno vektorsko kinematično dopustno polje deformacijskih hitrosti.

Primerjava rotacijskega hiperboličnega porušnega mehanizma z novim modificiranim mehanizmom podaja naslednje podobnosti:

- nekatere skupne predpostavke in omejitve,
- temeljita ne metodi mejne analize, teoremu zgornje vrednosti,
- numerični postopek iz izveden s programskim orodjem Excel ob uporabi metode splošne redukcije gradienta.

Razlike med mehanizmoma so naslednje:

- prikazan model je rotacijski, novi modificiran model je translatorski,
- geometrija mehanizmov se razlikuje v porušni drsini v x-y ravnini, saj so točke posameznega bloka pri novem porušnem mehanizmu povezane med seboj linijsko, pri tem mehanizmu pa ima drsina obliko krivulje,
- volumen novega porušnega mehanizma temelji na ovojnicah infinitezimalno oddaljenih polstožcev, ki imajo vrh na posamezni ravnini blokov, pri tem mehanizmu je volumen definiran z ovojnico hiperboličnega polstožca.

4. PRIMERJAVA REZULTATOV

Primerjava rezultatov doseženih novim translatorskim prostorskim porušnim mehanizmom z rezultati rotacijskega porušnega mehanizma, Škrabl in Macuh (2005) ter multi-blok translatorskim porušnim mehanizmom M_{nt} , Soubra in Regenass (2000) je prikazana v tabeli 1 za koeficient K_{py} in v tabeli 2 za koeficient K_{pq} v odvisnosti od vhodnih parametrov ϕ , δ in b/h .

Primerjava podaja ugotovitev, da se z večanjem strižnega kota ϕ in manjšanjem količnika b/h povečuje razlika med novim modificiranim modelom translatorskega prostorskega porušnega mehanizma in rotacijskim mehanizmom, ki sta ga predlagala Škrabl in Macuh (2005). Koeficient K_{py} je pri $b/h=0.5$, $\delta/\phi=0.5$ za rotacijski mehanizem 41.43% manjši od translatorskega, ki sta ga predlagala Soubra & Regenass (2000, [51]) ter 18.48% večji od novega porušnega mehanizma. Pri večjih vrednostih količnika b/h se razlika zmanjšuje, pri vrednostih $b/h > 10$ so rezultati že skoraj skladni z 2D porušnim mehanizmom.

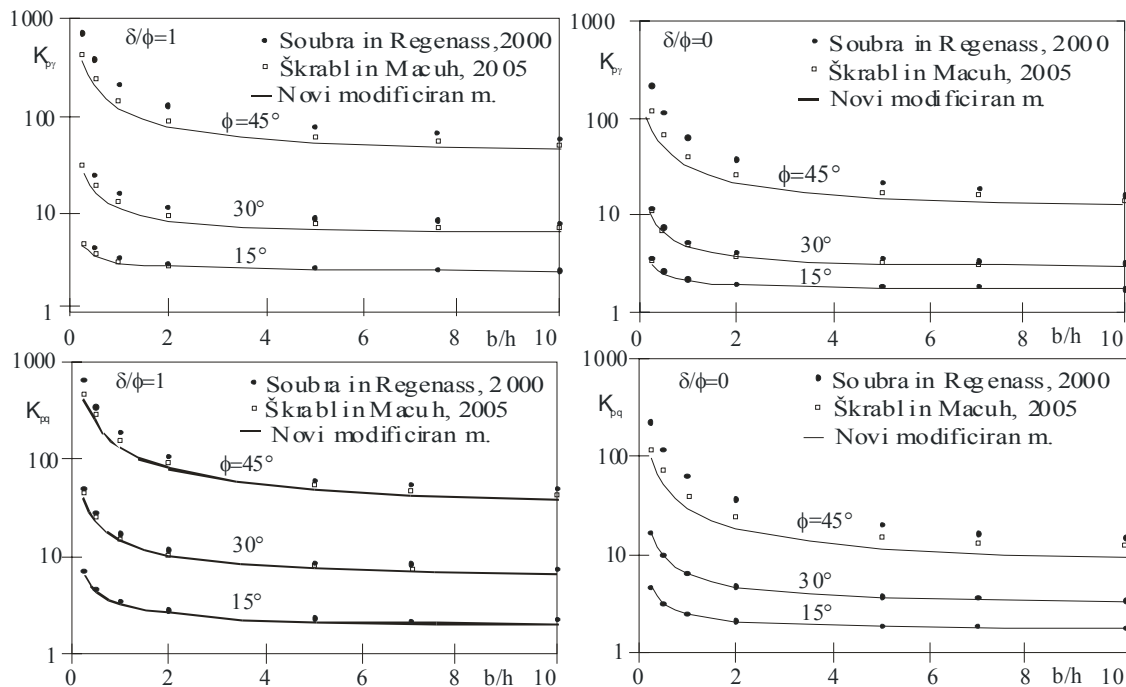
ϕ (°)	δ / ϕ	K_{py} (Soubra in Regenass, 2000)			K_{py} (Škrabl in Macuh, 2005)			K_{py} (novi modificiran m.)		
		0.5	1.0	10.0	0.5	1.0	10.0	0.5	1.0	10.0
25	0.5	7.963	5.779	3.770	7.360	5.539	3.625	7.296	5.027	3.253
	1.0	12.776	8.798	5.004	10.985	7.809	4.885	10.431	7.360	4.579
35	0.5	22.855	15.150	8.150	20.779	13.709	7.320	19.847	13.533	7.079
	1.0	54.064	33.202	13.730	40.135	25.839	12.857	37.509	24.229	12.131
45	0.5	178.689	99.555	26.684	104.658	61.825	23.293	88.334	53.074	20.652
	1.0	379.494	212.364	59.215	239.688	140.857	51.747	207.888	122.938	45.991

Tabela 1. Primerjava K_{py} v odvisnosti od vhodnih parametrov ϕ , δ in b/h .

ϕ (°)	δ / ϕ	K_{pq} (Soubra in Regenass, 2000)			K_{pq} (Škrabl in Macuh, 2005)			K_{pq} (novi modificiran m.)		
		0.5	1.0	10.0	0.5	1.0	10.0	0.5	1.0	10.0
25	0.5	10.135	6.873	3.748	9.733	6.579	3.687	9.368	6.346	3.627
	1.0	14.599	9.445	4.620	13.699	9.058	4.782	12.598	8.394	4.495
35	0.5	30.545	19.006	7.951	26.859	16.699	7.426	25.356	15.844	7.209
	1.0	57.371	33.627	11.708	49.308	29.814	12.044	43.675	26.561	10.860
45	0.5	176.444	96.248	23.101	107.038	60.919	19.397	86.218	50.080	17.420
	1.0	338.705	184.474	43.854	249.114	140.401	42.041	215.048	121.667	36.648

Tabela 2. Primerjava K_{pq} v odvisnosti od vhodnih parametrov ϕ , δ in b/h .

Slika 7 prikazuje primerjavo rezultatov koeficienta K_{py} in K_{pq} za $\phi=15^\circ$, 30° in 45° , različne količnike b/h ter $\delta/\phi=1$ in $\delta/\phi=0$. Primerjava rezultatov kaže ugotovitev, da so vrednosti koeficienta K_{py} novega modificiranega porušnega mehanizma nižje od rotacijskega hiperboličnega porušnega mehanizma (Škrabl in Macuh, 2005) in porušnega mehanizma M_{nt} (Soubra in Regenass, 2000) v vseh primerih. Razlika se pri vseh vrednostih manjša z nižanjem strižnega kota ϕ in manjšanjem količnika b/h .



Slika 7. Primerjava K_{py} in K_{pq} proti b/h za: (a) $\delta/\phi=1$ in (b) $\delta/\phi=0$; $\phi=15^\circ$, 30° , 45° .

5. ZAKLJUČEK

Novi modificiran prostorski porušni mehanizem za določitev kritične vrednosti koeficienta pasivnega pritiska zaradi lastne teže, brez ali z dodatno površinsko obtežbo, temelji na izvornem optimiranem prostorskem kinematičnem modelu. Namen raziskav je bil pridobiti najnižje vrednosti rešitev brezdimenzijskega koeficienta 3D pasivnega zemeljskega pritiska zaradi lastne teže K_{py} in dodatne obtežbe K_{pq} .

Mehanizem geometrijsko predstavlja prostorski togi blok sestavljen iz osrednjega dela in dveh stranskih togih blokov, ki ju sestavljajo ovojnice bočnih trenjskih stožcev. Prostorski kinematični mehanizem sestavlja v ravnini x - y optimirano porušno ploskev, ki jo sestavlja končno število togih segmentov, geometrijsko je mehanizem generaliziran z globino $h=1$.

Analize smo izvedli na sedem-segmentnem porušnem mehanizmu, kar zagotavlja dovolj natančno rešitev sistema. Karakteristike temeljnih tal so podane kot vhodni parameter: strižne karakteristike temeljnih tal variirajo od 25° do 45° ter kot notranjega trenja $\delta=0, 1/3\phi, 1/2\phi, 2/3\phi$ in ϕ . Analiza rezultatov prostorskega porušnega mehanizma podaja naslednje lastnosti: prostornina porušnega mehanizma narašča z večanjem strižnega kota temeljnih tal, porušna ploskev v x - y ravnini je strma in manj ukrivljena pri $\phi=20^\circ$, nato s večanjem strižnega kota prehaja v bolj ukrivljeno zvezno krivuljo, dolžina zadnjega segmenta na x osi se zvezno povečuje z večanjem strižnega kota temeljnih tal, kot notranjega trenja bistveno vpliva na rezultate v vseh geometrijskih modelih ($b/h=0.25$ do $b/h=10$), vrednost količnikov pasivnih pritiskov narašča z ozirom na strižni kot temeljnih tal ϕ v vseh modelih. Strižni kot temeljnih tal ϕ ima velik vpliv na dolžino ovojnice, saj vrednost L_7 upada s slabšanjem lastnosti temeljnih tal. Parameter L_7 bistveno vpliva na prostornino porušnega mehanizma in posledično na koeficient K_{py} .

Numerični rezultati dajejo optimalnejše rezultate koeficienta pasivnega pritiska od rezultatov dosedanjih raziskav v prostorskih analizah. V primerjavi z rezultati, ki sta jih podala Škrabl in Macuh (2005) je razlika največja pri velikem strižnem kotu $\phi=45^\circ$ ter $\delta=\phi$ in znaša okrog 20%, nato pa upada in je najmanjša pri $\delta=0$.

Predloženi porušni mehanizem je sestavljen iz tri in štiristranskih togih blokov, ki skupaj tvorijo optimalni kinematični model, saj rezultati analiz kažejo, da takšen model pri prostorskih analizah daje nižje količnike pasivnih pritiskov kot so objavljeni v strokovni literaturi. Zlasti štiristranski togi bloki predstavljajo novost na področju geomehanskih analiz, saj bočna ploskev predstavlja kombinacijo površine plašča vodilnega stožca, ovojnica neskončnega števila vmesnih trenjskih stožcev, plašč zgornjega trenjskega stožca ter tangentno ravnino, ki se ob vertikalnem robu plašča dimenzij (b/h) priključi na vertikalno steno v zaledju. Izvirni kinematični model za prostorske analize pasivnih pritiskov omogoča iskanje optimalnejših rešitev različnih geotehničnih problemov.

ZAHVALA

Predstavljeni dosežki predstavljajo enega od skupno treh sklopov raziskovalnega dela podiplomskega študija, ki so predstavljeni v doktoratu znanosti (Vrecl Kojc, 2006), katerega financer je bila Agencija za raziskovanje Republike Slovenije, za kar se iskreno zahvaljujem.

LITERATURA

- Basudhar P. K., Valsangkar A. J. and Madhav M. R. (1979). "Optimal lower bound of passive earth pressure using finite elements and non-linear programming." *Int. Jour. Num. & Anal. Meth. in Geomech.*, 3, No. 4, 367-379.
- Blum, H. (1932). "Wirtschaftliche Dalbenformen und den Berechnung." *Bautechnik*, 10(5), 122-135.
- Caquot, A., Kérisel, J. (1948). "Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundation." Gauthier-Villard, Paris, France.
- Chen, W.F. (1975). "Limit analysis and soil plasticity." Elseier Sci. Publ. Comp., The Netherlands.
- Chen, W.F. and Liu, X.L. (1990). *Limit analysis in Soil Mechanics*. Elsevier, Amsterdam.
- Coulomb, C..A. (1776). "Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture." *ACAD.r.Sci. Mém. Math. Phys. par divers savants*, 7, 343-382.
- Hansen, J. (1953). "Earth Pressure Calculation." Danish Technical Press, Copenhagen.
- Hill, R. (1950). *The Mathematical Theory of Plasticity*. Clarendon Press, Oxford.
- Janbu, N. (1957). "Earth pressure and bearing capacity calculations by generalised procedure of slices." *Proc. 4 Int. Conf., Int. Soc. Soil Mech. and Found. Eng.*, 207-213.
- Kérisel, J. and Absi, E. (1990). *Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations*. Gauthier-Villard, Paris.
- Lee I. K. and Herington J. R. (1972). "A theoretical study of the pressures acting on a rigid wall by a sloping earth on rockfall." *Géotechnique*, 22(1), 1-26.
- Macuh, B. (2005). *Mejna analiza s teoremom zgornje vrednosti*. Zbornik Šukljjetovih dni, 6, 40-58.
- Michalowski, R.L. (2001). Upper-bound load estimates on square and rectangular footings. *Geotechnique*, 51, No. 9, 787-798.
- Shields, D. H., Tolunay, A. Z. (1973). "Passive pressure coefficients by method of slices." *J. Soil Mech. & Found. Div., ASCE*, 99(12), 1043-1053.
- Sokolovski, V.V. (1965). "Static of granular media", Pergamon Press, New York.
- Soubra, A.H. and Regenass, P. (2000). Three-Dimensional Passive Earth Pressures by Kinematical Approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 2, No.2, 969-978.
- Soubra, A.H. and Macuh, B. (2002). Active and passive earth pressure coefficients by a kinematical approach. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 155, No. 2, str. 119-131.
- Škrabl, S. and Macuh, B. (2005). Upper-Bound Solutions of Three-dimensional Passive Earth Pressures." *Canadian Geotechnical Journal*, 42, No.5, 1449-1460.
- Terzaghi, K. (1943). "Theoretical soil mechanics." Wiley, New York.
- Vrecl-Kojc, H. (2005). The Anchored pile wall optimization using NLP approach. *Acta geotechnica Slovenica*, 2, No.2, 5-11.
- Vrecl-Kojc, H. (2006). Optimiranje geomehanskega modela nesidranih vpetih podpornih konstrukcij z uporabo teorema zgornje vrednosti: doktorska disertacija. Univerza v Mariboru.