



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Tudományos Diákköri Konferencia 2013

Építőmérnöki Kar

2D és 3D állékonyságvizsgálat összehasonlítása

Készítette: Polyák Szabolcs István

NEPTUN - kód: OMMN5T

Konzulensek:

Dr. Nagy László, egyetemi docens, tanszékvezető, BME Geotechnikai Tanszék

Dr. Takács Attila, adjunktus, BME Geotechnikai Tanszék

Tartalomjegyzék

1. Absztrakt	3
2. Bevezetés	4
3. Rézsűállékonyság	5
4. 2D állékonyságvizsgálati módszerek	6
4.1 Svéd nyomatéki módszer	6
4.2 Blokk – módszer	7
4.3 Lamellás módszerek	7
4.3.1 Fellenius módszere (Ordinary Method of Slices)	8
4.3.2 Egyszerűsített Bishop – módszer (Simplified Bishop Method)	9
4.3.3 Janbu egyszerűsített módszere (Janbu's Simplified Method)	10
4.3.4 Spencer – módszer	11
4.3.5 Morgenstern – Price – módszer	11
4.3.6 Általánosított lamellás eljárás (Generalized Limit Equilibrium Method, GLE)	12
5. 3D állékonyságvizsgálati módszerek	14
5.1 Történeti áttekintés	15
5.2 3D állékonyságvizsgálati módszerek összegzése és értékelése	18
6. Végeselemes modellezés	19
6.1 Talajmodell	19
6.2 A biztonsági tényező értelmezése	20
7. Összehasonlító vizsgálatok	21
7.1 Homogén szemcsés talaj ($\varphi > 0^\circ$ és $c = 0$ kPa)	21
7.2 Homogén kohéziós talaj ($\varphi = 0^\circ$ és $c > 0$ kPa)	27
7.3 Homogén általános talaj ($\varphi > 0^\circ$ és $c > 0$ kPa)	32
7.4 Gyenge sík	37
7.5 Bordás megtámasztás	42
7.6 Összehasonlító vizsgálatok eredményeinek összegzése	45
8. Esettanulmányok	46
8.1 1. esettanulmány: hulladéklerakó tönkremenetele, Cincinatti (Stark & Eid, 1998)	46
8.2 2. esettanulmány: hulladéklerakó tönkremenetele, Dél-Kalifornia (Stark & Eid, 1998)	48
9. Konklúzió	51
10. További kutatási lehetőségek a témában	51
11. Köszönetnyilvánítás	52
12. Irodalomjegyzék	52

1. Absztrakt

A rézsűk állékonyságának vizsgálata fontos gyakorlati probléma a geotechnikában. Leggyakrabban rézsűs lehatárolást alkalmaznak vonalas létesítmények lehatárolásaként, az út – és vasútépítésben, valamint a vízépitésben. Az adott hajlással kialakított földtömeg állékonyságvesztése esetén komoly anyagi kár keletkezhet, mely időnként emberáldozattal is jár, ezért nagy körültekintéssel kell eljárni rézsűk a tervezésekor és kivitelezésekor.

Régóta folynak kutatások a témában, és számos eljárás alakult ki az idők során. A korai módszerekre elmondható, hogy általában egy – egy meghatározott, speciális esetben alkalmazhatók, teljesülniük kell az alkalmazhatósági feltételeknek. Ilyen feltétel, hogy csak adott talajtípusokat lehet vizsgálni ezekkel az eljárásokkal, például csak homogén, kohéziós vagy szemcsés talaj esetén adnak megbízható eredményeket.

A valóságban azonban csak ritkán fordul elő ideálshoz közeli állapot. Az ilyen problémák kezelésére dolgozták ki a 20. század közepén az ún. lamellás eljárásokat, melyeket a mérnökök azóta is szívesen alkalmaznak, mivel egyszerűen, gyorsan, kis számítási igénnyel is megfelelően pontos eredményeket szolgáltatnak. Sikeresen kezelik a talaj rétegzettségét, a külső terhelések és a talajvíz hatását is. Hátrányuk viszont, hogy a problémát síkbeliként kezelik, a rézsű szélességét végtelen kiterjedésűnek feltételezve elhanyagolják a térbeli hatásokat.

A valós rézsűk viszont véges kiterjedésűek, gyakran inhomogének, a rétegzettség és a talajvízviszonyok hosszirányban jelentősen változhatnak. Ilyen esetekben a probléma kétdimenziós modellezése nehézségekbe ütközik, és elég nagy eltérések adódhatnak az eredményekben. A feladat térbelisége hívta életre a háromdimenziós eljárásokat. Ezek túlnyomórészt a már meglévő kétdimenziós módszerek továbbfejlesztései, kiterjesztései a térbeli problémák kezelésére. A gyakorlatban viszont nem terjedtek el, részben azért, mert a jelenlegi kétdimenziós módszerek is elég pontosak, valamint nem született egy általános, minden geotechnikai problémát megfelelően kezelni képes eljárás.

A számítógépek elterjedésével viszont megnyílt az út a numerikus módszerek előtt. Ilyen a végeselemes módszer is. Nagy előnye, hogy megkötések nélkül, természetesen zajlódnak le a folyamatok tönkremenetelig, a feszültségekről és az elmozdulásokról vizuálisan is információhoz juthatunk.

A dolgozatban végeselemes program segítségével, mintapéldákön keresztül összehasonlítjuk a kétdimenziós és a háromdimenziós modellezés eredményeit, sajátosságait, kiemeljük a hasonlóságokat és a különbségeket, és a dolgozat végén javaslatot teszünk az alkalmazás körülményeire is.

Kulcsszavak: rézsű, rézsűállékonyság, 2D, 3D, végeselemes modellezés, összehasonlítás

2. Bevezetés

A rézsűk állékonyságának vizsgálata fontos geotechnikai probléma, mivel rézsűs lehatárolást széles körben alkalmazunk, legfőképpen vonalas létesítmények, például utak, vasutak építésénél, vízépitési műtárgyaknál, de gyakran munkatér határolásként is.

A rézsűállékonyság vizsgálata nagy múltra tekint vissza, rengeteg módszer és eljárás alakult ki az idők során a vektorpoligonális eljárásoktól kezdve a lamellás módszereken át a számítógépek elterjedése által lehetővé tett modern végeselemes vizsgálatokig. A mérnöki gyakorlatban ezeket a módszereket hosszú ideje sikeresen alkalmazzák, ennek oka elsősorban egyszerűségükben keresendő. Ez viszont hátránnyként is jelentkezhethet, mivel bonyolultabb feladatok modellezéséhez nem szolgáltatnak kellően pontos és megbízható eredményeket.

Közös dolog viszont ezekben a módszerekben, hogy a rézsűk állékonyságvizsgálatát kétdimenziós problémaként kezelik, a rézsűk szélességét végtelen nagynak feltételezve. Ennek orvoslására hozták létre a háromdimenziós vizsgálatokat. Legtöbbjük a kétdimenziós eljárások térbeli kiterjesztéseként jött létre, megtartva az alapul szolgáló kétdimenziós módszer feltevéseit. Az így kapott módszerek csak egyszerű geometria esetén szolgáltatnak megfelelő eredményeket, alkalmazásuk erősen limitált.

Manapság viszont a számítógépek elterjedésével megnyílt az út a komplexebb, pontosabb eljárások használata felé. A gépi számítás során nincs szükség a kézi számítást egyszerűvé tevő feltevésekre, közelítésekre a hatalmas számítási kapacitás miatt, ezáltal akár már háromdimenziós problémákat is képesek vagyunk hatékonyan, megkötések nélkül kezelni. Ennek ellenére nem terjedtek el annyira széles körben, mint a lamellás módszerek, mivel azok a legtöbb esetben megfelelő pontosságú eredményeket adnak, valamint nem fejlődött ki egy minden esetben megbízható eredményeket szolgáltató, könnyen kezelhető és kísérletekkel alátámasztott módszer.

Ebben a dolgozatban végeselemes modellezés során több példa bemutatásával összehasonlításra kerülnek a kétdimenziós és a háromdimenziós modellezés tulajdonságai, eredményei, rámutatva a köztük lévő különbségekre, és alaposabban vizsgálom a 3D biztonsági tényező viselkedését különböző modellezési viszonyok között.

3. Rézsűállékonyság

A talajban a földtömeg önsúlyának hatására nyírófeszültségek keletkeznek a rézsűs határolás elkészültével. Ha a nyírófeszültségek a rézsű és az altalaj nyírószilárdságát elérik, talajtörés jön létre. A törési felületen, a csúszólapon a földtest lecsúszhat. Többféle geometriájú csúszólap alakulhat ki a talajviszonyok függvényében, például kör-, sík- vagy összetett csúszólap. Ezek felszíni kimetsződése is nagyban függ az altalaj tulajdonságaitól, rétegzettségétől. A kimetsződés helye szerint megkülönböztethetünk talpponti, alámetsző vagy a rézsűbe belemetsző csúszólapot.

Rézsűk állékonyságának mértékeként az ún. biztonsági tényezőt (jelölése itt: FS^1) használjuk. Általában véve a biztonsági tényező a tönkremeneteli felületen rendelkezése álló nyírószilárdság (R_{adott}) és az egyensúlyhoz éppen szükséges nyírószilárdság ($R_{szükséges}$) hányadosaként értelmezhető:

$$FS = \frac{R_{adott}}{R_{szükséges}}$$

A nyírószilárdság az egyes módszerek értelmezése szerint lehet a tönkremenetelt akadályozó és a tönkremenetelt okozó erők, nyomatékok egymáshoz viszonyítása.

A biztonsági tényező meghatározására számos módszer született. A megoldási lehetőségek sokrétősége miatt különösen fontos ismerni a különböző módszerek elméleti hátterét, mivel csak így lehetséges kiválasztani az adott rézsűhöz leginkább megfelelő vizsgálatot. Léteznek olyan eljárások, melyek csak meghatározott talajviszonyok között alkalmazhatók. Ilyenek például a svéd nyomatéki módszer, a súrlódási körös eljárás, a Taylor-grafikon vagy a blokk – módszer.

Jóval elterjedtebbek azonban az ún. lamellás eljárások. Sikerük oka az, hogy viszonylag egyszerűen, kis számítási igénnyel kellő pontossággal meghatározható a biztonsági tényező. Bonyolultabb eseteknél is használhatók, ilyen például talajvíz jelenléte vagy több talajrétegből álló rézsű biztonsági tényezőjének meghatározása.

A legmodernebb vizsgálatok már a legösszetettebb problémákat is nagy pontossággal kezelik, köszönhetően a számítógépek nyújtotta számítási kapacitásnak. Többféle, a valóságot jobban közelítő anyagmodellekkel dolgozhatunk, és a deformációkat is megfigyelhetjük, szemben a hagyományos módszerekkel, melyek az elmozdulásokról egyáltalán nem adnak információt. Ilyen módszer a végeselemes modellezés is, melyet ebben a dolgozatban alkalmazok.

¹ FS a biztonsági tényező jelölése, az angol Factor of Safety kifejezés rövidítéseként.

4. 2D állékonyságvizsgálati módszerek

A kétdimenziós eljárások kedveltek és széles körben elterjedtek a mérnöki gyakorlatban. Ennek oka egyszerűségükben keresendő. Nem igényelnek nagy számítási kapacitást, relatíve gyorsan megfelelően pontos eredményt szolgáltatnak.

Hátrányuk is az egyszerűségükből adódik. Mivel ezek a módszerek valójában egy háromdimenziós problémát ültetnek át különböző egyszerűsítő feltevések által két dimenzióba, ezért az egyes eljárások által meghatározott biztonsági tényező eltérő értéket eredményezhet ugyanazon rézsű esetében. Ráadásul a talaj viselkedéséről, deformációiról sem adnak információt, ami fontos adat lehet például arról, hogy hol szükséges megerősíteni a rézsűt.

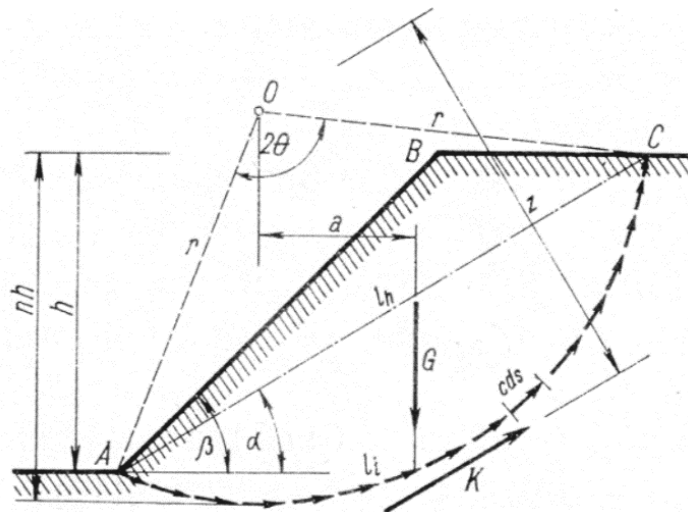
A számtalan eljárásból itt csak azokat ismertetem, melyekhez rendelhető háromdimenziós állékonságvizsgálati módszer.

4.1 Svéd nyomatéki módszer

Ez a módszer olyan talajok esetén alkalmazható, melyeknek nincs belső súrlódási szöge ($\varphi = 0^\circ$). Ez speciális eset, homogén, telített kötött talajok zárt rendszerben történő törése esetén alakulhat ki. Ilyen feltételek általában kötött agyagból készült árvízvédelmi gátak esetében adódhatnak.

A módszer kör csúszólapot feltételez. Ez egy jó közelítés, mivel ilyen feltételek mellett a megfigyelések szerint valóban kör csúszólap alakul ki.

A biztonsági tényező a kör középpontjára felírt, a tönkremenetelt akadályozó és a tönkremenetelt okozó nyomatók hányadosaként adódik.



1. ábra: A svéd nyomatéki módszer

A tönkremenetelt okozó hatás a lecsúszó földtömeg önsúlya (G) által okozott nyomaték a kör középpontjára. Az önsúly erőkarja a .

A tönkremenetelt akadályozó hatás a csúszólap mentén működő kohéziós erő: $K = c \cdot l_h$

A kohéziós erő erőkarja: $z = r \cdot \frac{l_i}{l_h}$

A biztonsági tényező: $FS = \frac{K \cdot z}{G \cdot a}$

Több különböző helyzetű csúszólapra is meg kell határozni a biztonsági tényezőt, és ezek közül a legkisebb lesz a rézsű biztonsági tényezője.

4.2 Blokk – módszer

Ezt a módszert akkor alkalmazhatjuk, amikor a talajrétegek között van egy „gyenge sík”, melynek a nyírószilárdsága lényegesen kisebb, mint a többi talajrétegé. Ekkor a talajtömeg a gyenge sík mentén csúszik le, síkcsúszólap alakul ki. Ez a gyenge sík kialakulhat például olyan agyagok felszínén, melyek felett szemcsés talaj található. A szemcsés talajban áramló víz megnedvesíti az alatta fekvő agyag felületét, melynek így jelentősen lecsökken a nyírószilárdsága.

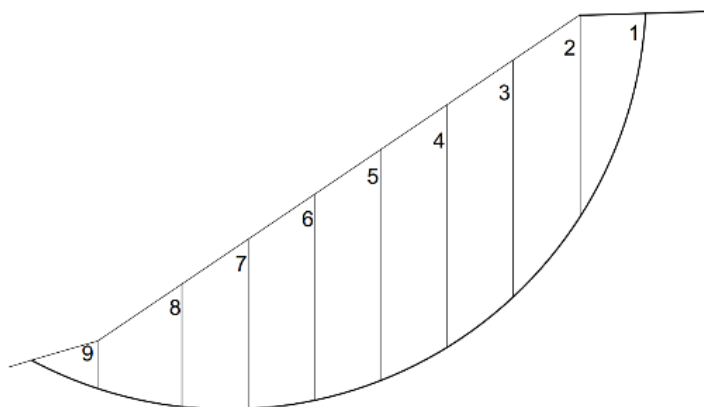
A biztonsági tényező az elcsúszást akadályozó és az elcsúszást okozó erők hányadosa:

$$FS = \frac{\sum \text{elcsúszást akadályozó erők}}{\sum \text{elcsúszást okozó erők}}$$

4.3 Lamellás módszerek

A lamellás módszerek a legnépszerűbbek a mérnökök körében a kétdimenziós vizsgálatok közül, mivel segítségükkel könnyen és kellő pontossággal oldhatók meg bonyolultabb feladatok is. Képesek kezelni a talajvíz jelenlétét, a talaj rétegzettségét, és általános ($\varphi \neq 0^\circ$ és $c \neq 0$ kPa) talajoknál is használhatók, nincs megkötés a talaj típusát tekintve. Hátrányuk, hogy szemcsés talajok esetén a valóságban logaritmikus spirál alakú csúszólapot körcsúszólappal közelítik.

Ezeknél a módszereknél a vizsgálat során szükséges feltételeznünk egy csúszólapot. A csúszólap feletti földtömeget ún. lamellákra (slices) osztjuk, majd pedig vizsgáljuk a lamellákra ható erőket, és ellenőrizzük, hogy az adott módszerhez tartozó egyensúlyi feltételek (erőegyensúly, nyomatéki egyensúly vagy mindkettő) teljesülnek-e.



2. ábra: Lamellákra osztott rézsű

Számos lamellás eljárás alakult ki, a köztük lévő alapvető különbség a lamellák között fellépő erők értelmezésében rejlik, az adott módszerhez tartozó feltételezések figyelembevételével.

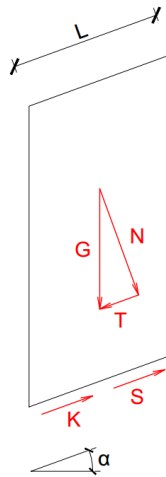
4.3.1 Fellenius módszere (Ordinary Method of Slices)

Ez az elsőként kifejlesztett és a legegyszerűbb lamellás módszer. Egyszerűsége miatt a számítás kézzel is könnyen elvégezhető. A lamellák között fellépő erők a módszer feltételezése szerint normálerők, melyek párhuzamosak a lamella alapvonalával, és egyenlő nagyságúak, így a számítás során elhanyagolhatók. Emiatt nem teljesül a vetületi egyensúly, a vektorpoligon nem jól záródik, főleg közel vízszintes alapvonal esetén. Ez elég nagy pontatlanságokhoz vezethet az állékonyságvizsgálat során. A módszer csak körcsúszólap esetén alkalmazható.

A lamellára ható erők:

- Az önsúlyból:
 - Normálerő: $N = G \cdot \cos \alpha$
 - Nyíróerő: $T = G \cdot \sin \alpha$
- A csúszólapon ébredő erők:
 - Kohéziós erő: $K = c \cdot L$
 - Súrlódási erő: $S = (N - u \cdot L) \cdot \tan \varphi = (G \cdot \cos \alpha - u \cdot L) \cdot \tan \varphi$

A lamellára ható erők a 3. ábrán láthatók.



3. ábra: Lamellára ható erők Fellenius módszere szerint

ahol G a lamella által határolt talajtömeg súlya, α a csúszólapon a lamella talppontjához húzott érintő vízszintessel bezárt szöge, L a csúszólap lamella által közbezárt szakasza, c a talaj kohéziója, φ a talaj belső súrlódási szöge, u pedig a pórusvíznyomás.

Ennél a módszernél csak a nyomatéki egyensúly teljesül, a biztonsági tényező is a nyomatéki egyensúlyi egyenletből határozható meg. Az erőkarokkal egyszerűsítve, a biztonsági tényező az elcsúszást akadályozó és az elcsúszást okozó erők hányadosa:

$$FS = \frac{r \cdot \sum (K + S)}{r \cdot \sum T} = \frac{\sum (c \cdot L + (G \cdot \cos \alpha - u \cdot L) \cdot \tan \varphi)}{\sum (G \cdot \sin \alpha)}$$

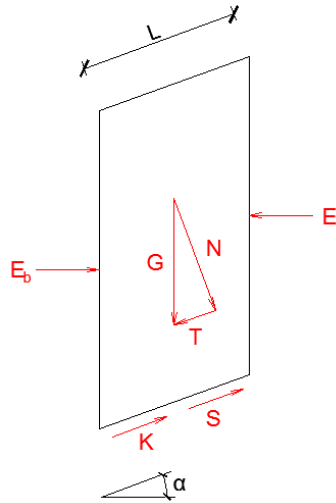
A lamellás módszerek közül ez adja a legalacsonyabb biztonsági tényezőt. A gyakorlatban későbbi, fejlettebb módszerek esetén alkalmazhatjuk, melyek iterációval oldhatók meg. Ekkor a gyorsabb konvergencia érdekében kezdő értéként alkalmazható a Fellenius – módszerrel meghatározott biztonsági tényező. Valós mérnöki feladatok esetén önmagában nem ajánlott az eljárás használata.

4.3.2 Egyszerűsített Bishop – módszer (Simplified Bishop Method)

Az Egyszerűsített Bishop – módszer feltételezései szerint a lamellák között fellépő erők csak normálerők, melyek vízszintesek, nincsenek nyíróerők, és habár így sem teljesíti maradéktalanul a vetületi erőegyensúlyt, sokkal pontosabb értéket ad a biztonsági tényezőre, mint Fellenius módszere. Szintén csak körcsúszólap esetén alkalmazható. A lamellára ható erők a 4. ábrán láthatók.

A lamellára ható erők:

- Az önsúlyból:
 - Normálerő: $N = G \cdot \cos \alpha$
 - Nyíróerő: $T = G \cdot \sin \alpha$
- A csúszólapon ébredő erők:
 - Kohéziós erő: $K = c \cdot L$
 - Súrlódási erő: $S = (N - u \cdot l) \cdot \tan \varphi = (G \cdot \cos \alpha - u \cdot l) \cdot \tan \varphi$



4. ábra: Lamellára ható erők az Egyszerűsített Bishop - módszer esetén

ahol G a lamella által határolt talajtömeg súlya, α a csúszólapon a lamella talppontjához húzott érintő vízszintessel bezárt szöge, L a csúszólap lamella által közbezárt szakasza, c a talaj kohéziója, φ a talaj belső súrlódási szöge, u a pórusvíznyomás, E_b és E_j pedig a szomszédos lamellákról átadódó erők, melyek nem ugyanakkorák ($E_b \neq E_j$).

A módszer a nyomatéki egyensúly feltételeit teljesíti, a biztonsági tényező a csúszólap körívének középpontjára felírt nyomatéki egyenletből adódik:

$$FS = \frac{r \cdot \sum \left(\frac{K \cdot \cos \alpha + S}{m_\alpha} \right)}{r \cdot \sum T}$$

ahol

$$m_\alpha = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \varphi}{FS}$$

Ezt behelyettesítve, az erőkarokkal egyszerűsítve az alábbi kifejezést kapjuk:

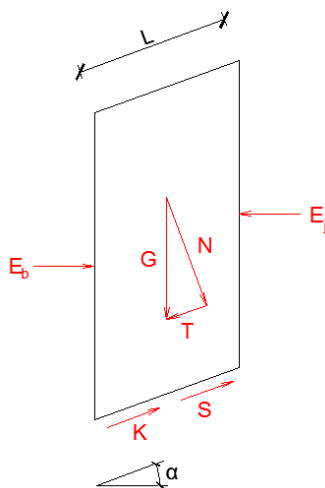
$$FS = \frac{\sum \left(\frac{c \cdot L \cdot \cos \alpha + (G \cdot \cos \alpha - u \cdot L) \cdot \tan \varphi}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \varphi}{FS}} \right)}{\sum G \cdot \sin \alpha}$$

Az egyenletből látszik, hogy a biztonsági tényező az egyenlet mindkét oldalán szerepel, amely így már nem lineáris. Ezért csak iterációval oldható meg a feladat. A legtöbb esetben a feladat gyorsan konvergál.

Az Egyszerűsített Bishop – módszer csak a nyomatéki egyensúly feltételeit elégíti ki, viszont a vetületi egyensúly feltételeihez jóval közelebb áll, mint Fellenius módszere. Ez okozza az általában jelentős eltérést a két módszerrel meghatározott biztonsági tényező között.

4.3.3 Janbu egyszerűsített módszere (Janbu's Simplified Method)

Ez a módszer a lamellák között fellépő erő feltételezését tekintve megegyezik az Egyszerűsített Bishop – módszerrel, tehát a lamellák között fellépő erők csak normálerők, melyek vízszintesek, a nyíróerők elhanyagolhatók. A különbség, hogy itt csak a vetületi egyensúly teljesül, a nyomatéki nem. Ezzel az eljárással összetett csúszólapok is vizsgálhatók.



5. ábra: Lamellára ható erők Janbu egyszerűsített módszere szerint

A lamellára ható erők:

- Az önsúlyból:
 - Normálerő: $N = G \cdot \cos \alpha$
 - Nyíróerő: $T = G \cdot \sin \alpha$
- A csúszólapon ébredő erők:
 - Kohéziós erő: $K = c \cdot L$
 - Súrlódási erő: $S = (N - u \cdot L) \cdot \tan \varphi = (G \cdot \cos \alpha - u \cdot L) \cdot \tan \varphi$

A biztonsági tényező alapértéke vetületi egyenletből fejezhető ki, ráadásul iterációra sincs szükség:

$$F_0 = \frac{\sum (c \cdot L \cdot \cos \alpha + (G \cdot \cos \alpha - u \cdot L) \cdot \tan \varphi)}{\sum G \cdot \sin \alpha}$$

Az F_0 tényező módosítandó egy tapasztalati korrekciós tényezővel (k), melyre Janbu ajánlásokat adott a rézsű geometriájától és a talaj tulajdonságaitól függően. Így a korrekciós tényezővel korrigált érték lesz a biztonsági tényező:

$$FS = k \cdot F_0$$

4.3.4 Spencer – módszer

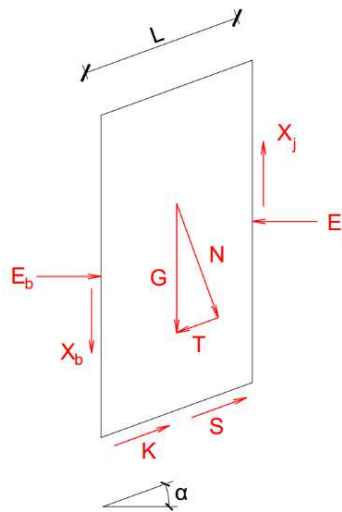
Spencer (1967) módszere szerint a lamellák között fellépő erők normálerők (E_i) és nyíróerők (X_i), melyek között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$\tan \theta = \frac{X_i}{E_i} = \text{const.}$$

ahol $\tan \theta$ a lamellák között fellépő eredő erő hajlása a vízszinteshez képest.

A számítás során meghatározzuk a biztonsági tényezőt mind a vetületi (FS_F), mind a nyomatéki egyensúlyi (FS_M) feltételekből. Ez egy iterációs folyamat, a procedúrát egészen addig ismétljük, amíg a két egyenlettel meghatározott biztonsági tényezők közötti eltérés egy megadott toleranciahatáron belülre adódik. Amennyiben a megoldás során meghatároztuk azt a normálerő – nyíróerő arányt, melynek értékénél a biztonsági tényezők megegyeznek, akkor az egyensúlyi feltételek automatikusan teljesülnek. Ez a módszer kielégíti mind a vetületi, mind a nyomatéki egyensúly feltételeit. Ugyancsak alkalmazható bármilyen alakú csúszólapra.

A lamellára ható erők a 6. ábrán láthatók.



6. ábra: Lamellára ható erők a Spencer - módszer és a Morgenstern – Price – módszer szerint

4.3.5 Morgenstern – Price – módszer

Ez a módszer alapjaiban hasonló a Spencer – módszerhez, azzal a különbséggel, hogy a lamellák között fellépő normálerők (E_i) és nyíróerők (X_i) arányát nem szükségszerűen konstansnak feltételezi. A módszer feltételezése szerint a lamellák között fellépő erők összefüggését egy függvénnyel lehet leírni:

$$\frac{X_i}{E_i} = \lambda \cdot f(x)$$

ahol $f(x)$ a függvénykapcsolat a normálerők és a nyíróerők között, λ pedig egy konstans, melyet a megoldás során határozunk meg. Ha az $f(x)$ függvényt konstansnak feltételezzük, akkor a feladat gyakorlatilag egyenértékűvé válik a Spencer – módszerrel.

A módszer feltételezései szerinti lamellára ható erők a 6. ábrán láthatók.

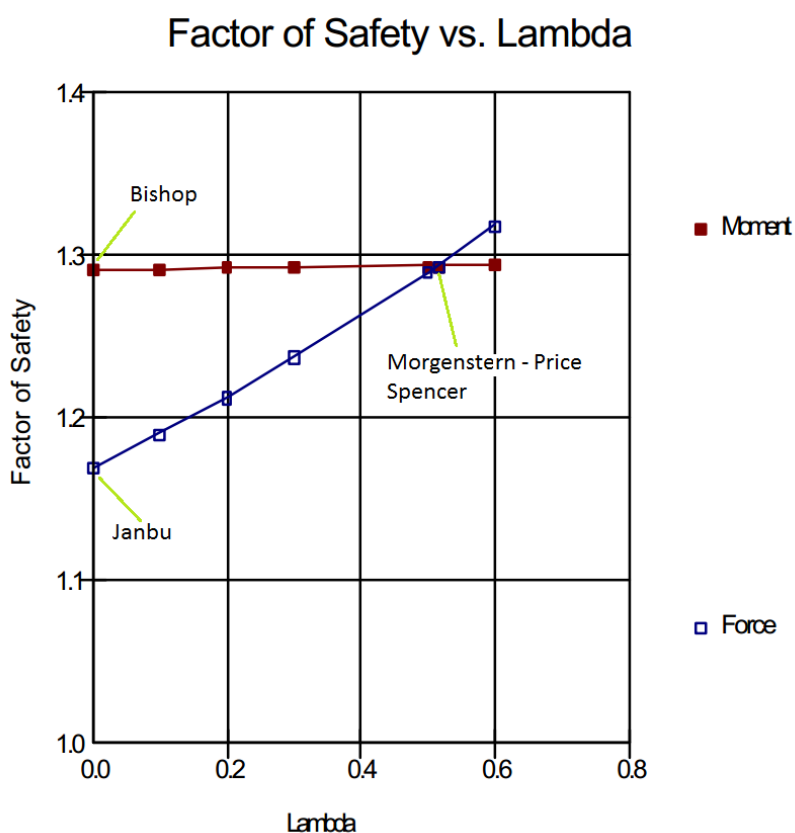
4.3.6 Általánosított lamellás eljárás (Generalized Limit Equilibrium Method, GLE)

Ezt a módszert Fredlund és Krahn (1977) dolgozta ki, a már meglévő módszerek tapasztalatai alapján. Éppen emiatt nagyon hasznos eszköz a már meglévő lamellás eljárások által meghatározott biztonsági tényezők összehasonlítására.

A számítás során értékek sorozatát tételezzük fel a lamellák között fellépő normálerők (E_i) és nyíróerők (X_i) arányára vonatkozóan. Ezt az arányt λ - val jelöljük.

$$\lambda = \frac{X_i}{E_i}$$

Kiszámítjuk minden egyes λ értékre a vetületi egyensúlyból számított biztonsági tényező (FS_F) és a nyomatéki egyensúlyból számított biztonsági tényező (FS_M) értékét, majd grafikonon ábrázoljuk (7. ábra).



7. ábra: Biztonsági tényező λ függvényében (forrás: Teaching Guide for the SLOPE/W Student Edition)

A grafikont vizsgálva egy pontosabb képet kaphatunk arról, hogy miként határozzák meg a biztonsági tényezőt az egyes módszerek.

Az Egyszerűsített Bishop – módszer feltételezései szerint a lamellák között nem működnek nyíróerők, így $\lambda = 0$. És mivel csak a nyomatéki egyensúlyi feltételből kerül meghatározásra, így a nyomatéki görbén (Moment) található a biztonsági tényező.

Janbu egyszerűsített módszerének feltételezései a lamellák között működő erőkre megegyeznek az Egyszerűsített Bishop – módszerével, így a biztonsági tényező értéke szintén $\lambda = 0$ értéknél olvasható le a grafikonról. A különbség, hogy a Janbu – módszer a vetületi egyensúlyi feltételből határozza meg a biztonsági tényezőt, így az az erő (Force) görbén lesz. A grafikonon látható érték a korrigálatlan biztonsági tényező (F_0), ez a jelentős eltérés oka.

A Spencer – módszer és a Morgenstern – Price – módszer alapfeltevései közel azonosak. Mindkét eljárás valamekkora λ értéket feltételez. A megoldás annál a λ értéknél lesz, ahol a vetületi egyensúlyból számított biztonsági tényező (FS_F) és a nyomatéki egyensúlyból számított biztonsági tényező (FS_M) megegyezik, azaz ahol a nyomaték görbe és az erő görbe metszi egymást.

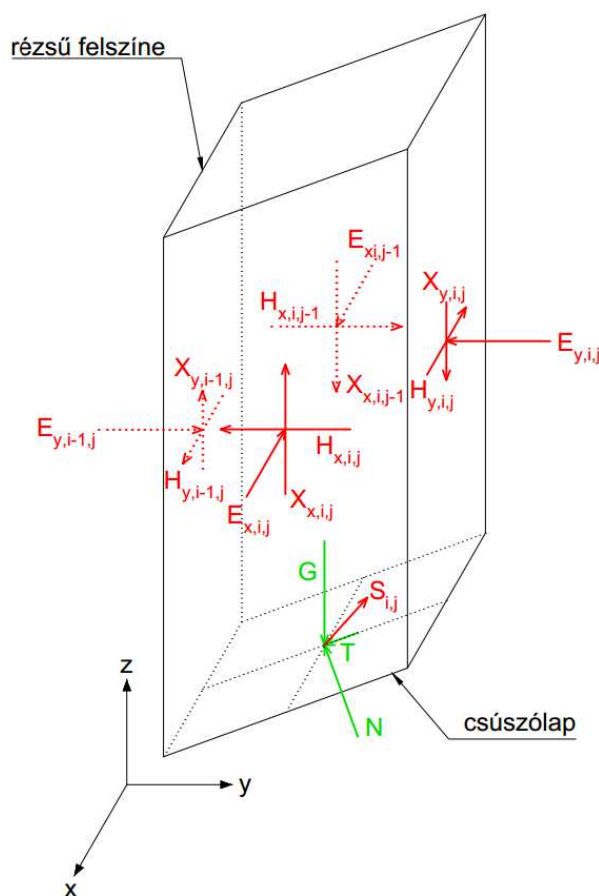
Érdemes megjegyezni, hogy míg az erő görbe monoton növekszik, addig a nyomaték görbe közel vízszintes. Ezt a jelenséget az okozza, hogy a nyomatéki egyensúly kevésbé érzékeny a lamellák között fellépő erők változására. Ez magyarázza azt, hogy miért ad hasonló értéket a biztonsági tényezőre az Egyszerűsített Bishop – módszer, a Spencer – módszer és a Morgenstern – Price – módszer. Ez a tulajdonság teszi kedvelt eljárássá az Egyszerűsített Bishop – módszert, mivel jóval kevesebb számítási igénnyel közel azonos értéket kaphatunk a biztonsági tényezőre, mint a szigorúbb, komplexebb módszerek esetén. Hátrány, hogy ez csak körcsúszólap esetén igaz.

5. 3D állékonyságvizsgálati módszerek

A gyakorlatban sok esetben előnyösebb lehet az adott probléma térbeli modellezése és vizsgálata. A 3D analízis sokféle rézsűállékonysági problémára használható: keskeny csúszólapok (hosszirányban kis kiterjedésűek), csúcsok vagy sarkok, külső terhekkel terhelt rézsűk, bevágások, vagy olyan rézsűk esetén, ahol a geometria, a talajjellemzők vagy a talajvízviszonyok hosszirányban jelentősen változnak (Hungar et al. 1989). Az imént felsorolt előnyök ellenére sem terjedtek el a 3D módszerek a gyakorlatban, mivel még mindig nem sikerült egy általánosan elfogadott, helyszíni kísérleti eredményekkel megfelelően alátámasztott eljárást prezentálni.

A háromdimenziós állékonyságvizsgálati módszerek legtöbbje a már ismert 2D eljárásokból alakult ki. A háromdimenziós megfelelőkre ugyanúgy érvényesek a kiindulásként alkalmazott 2D módszer feltevései, esetenként kiegészítve vagy módosítva a térbeli követelményeknek megfelelően.

A legtöbb térbeli módszer a lamellás eljárások kiterjesztése térbeli problémákra. A lecsúszó földtömeget itt is kisebb elemekre osztjuk, de mivel a rézsű hossza már nem végtelen kiterjedésű, így keresztirányban is szükséges a felosztás. Ezt úgy oldották meg, hogy a lamelláknak „vastagságot” adtak, azaz a térben a lamellák megfelelői az ún. oszlopok (columns). Térbeli vizsgálatoknál is szükséges feltételeznünk egy csúszólapot, hasonlóan a síkbeli módszerekhez, majd ezt kell felosztani oszlopokra. Az egyes módszerek közötti eltérés az oszlopok között ébredő erő értelmezésében figyelhető meg, hasonlóan a lamellás módszereknél tapasztaltakkal. Az oszlopra ható jellemző erőket mutatja a 8. ábra.



8. ábra: Oszlopra ható erők általános esetben

Ahol G az önsúlyból eredő súlyerő, N az önsúlyból eredő normálerő, T az önsúlyból eredő nyíróerő, S_{ij} a csúszólapon adott nyírószilárdság (kohéziós + súrlódási erő), az oszlopok között fellép erők jelölésénél pedig E a normálerő, H a nyíróerő vízszintes komponense, X a nyíróerő függőleges komponense, az indexelésben pedig sorrendben az első az adott sík normálisára utal, az utána következő indexek pedig az egymás melletti oszlopok sorszámára, tehát például $E_{x,ij}$ az x normálisú síkba mutató normálerő az (i,j) - edik oszlopsíkon.

5.1 Történeti áttekintés

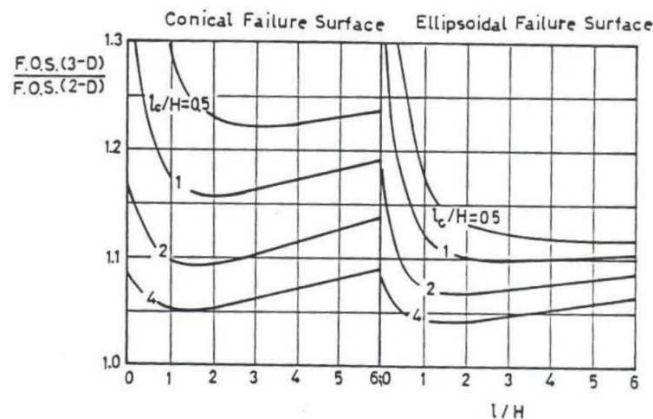
A 3D állékonyságvizsgálat nem tekint vissza hosszú múltra. Az első térbeli módszert Anagnosti (1969) publikálta. Ő alkalmazta elsőként az oszlopok módszerét, a Morgenstern-Price – módszer kiterjesztésével. Csakúgy, ahogy a síkban, az oszlopok között fellépő függőleges nyíróerők a vízszintes normálerők függvényei. Mint ismert, a Morgenstern-Price – módszer előnye, hogy nem korlátozódik meghatározott alakú csúszólagra, a tönkremeneteli felület általános helyzetű és geometriájú. Ez Anagnosti módszerére is igaz. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a 2D módszerekkel összehasonlítva az eltérés egyes esetekben akár 50%-os is lehet a 3D biztonsági tényező javára.

Hovland (1977) egy Fellenius (1936) módszerén (Ordinary method of slices) alapuló térbeli eljárást dolgozott ki. Az oszlopra pusztán az oszlop önsúlyából eredő erők hatnak, az oszlopok között fellépő normál- és nyíróerőket elhanyagolja. A vizsgálatok során Hovland az alábbi következtetésekre jutott:

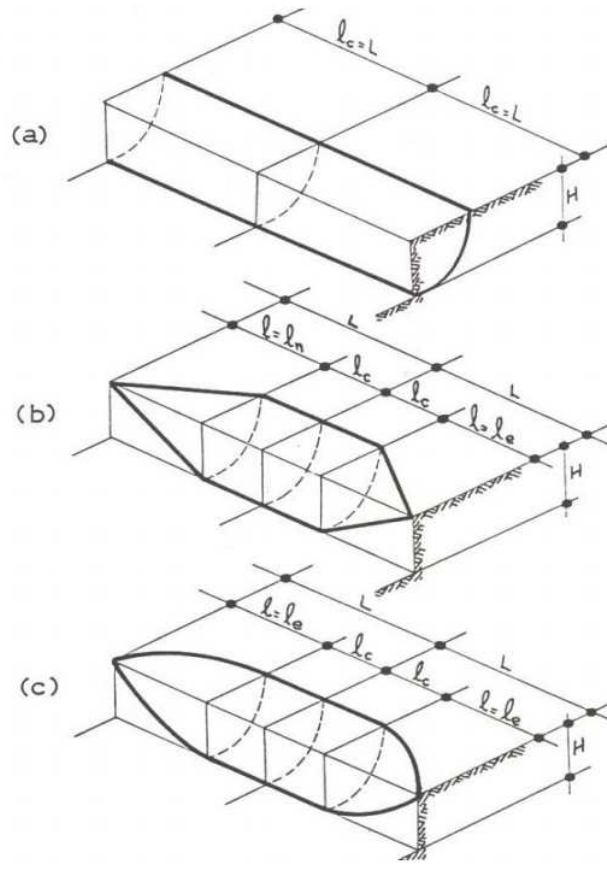
- A 3D és a 2D biztonsági tényező aránya érzékeny a nyírószilárdsági paraméterekre, és a feltételezett csúszólap geometriájára
- A háromdimenziós biztonsági tényező kohéziós talajok esetén magasabb, mint a kétdimenziós biztonsági tényező, de szemcsés talajok esetén előfordulhat, hogy a háromdimenziós kisebbre adódik, mint a kétdimenziós.

Baligh & Azzouz (1975) nem az oszlopok módszerét alkalmazta a háromdimenziós vizsgálatok során. Azt vizsgálták, hogy függőleges falú bevágás (10. ábra) esetén milyen és mekkora hatása van a probléma térbeli modellezésének a kiindulási kétdimenziós módszerhez képest. A problémát csak kohéziós talajokra ($\varphi = 0^\circ$) vizsgálták. A vizsgálataik során a következő konklúziókra jutottak (Albataineh, 2006):

- A 3D hatások növelik a biztonsági tényezőt
- Ahogy növekszik az l_c/H arány (9. ábra), a 3D FS/2D FS arány csökken. 4 körüli l_c/H értéknél a tönkremenetel már elég jól közelít a síkbeli viszonyokhoz.



9. ábra: l_c/H arány hatása a 3D FS/2D FS hányadosra b) és c) esetekben Baligh & Azzouz (1975) szerint (forrás: Albataineh, 2006)



D

10. ábra: Különböző feltételezett tönkremeneteli felületek Baligh & Azzouz (1975) szerint: a) henger, b) henger és kúp, c) henger és ellipszoid (forrás: Albataineh, 2006)

Baligh & Azzouz (1975) módszerének alkalmazhatósága (Albataineh, 2006):

- csak kohéziós talajokra alkalmazható
- csak a nyomatéki egyensúly teljesül
- a csúszólap alakja kötött

Baligh & Azzouz később a fentebb ismertetett módszerük továbbfejlesztésén dolgoztak. Megpróbálták alkalmassá tenni kohézióval és belső súrlódási szöggel egyaránt rendelkező talajok vizsgálatára (1978), majd pedig külső terhek kezelésére (1983).

Chen & Chameau (1983) a Spencer – módszeren alapuló térbeli eljárást vezettek le. A módszerük segítségével vizsgáltak blokkos és körcsúszólapos tönkremenetelleket. A módszer hátránya, hogy csak speciális, a feltételezéseknek megfelelő esetekben alkalmazható. A blokkos módszerre vonatkozó feltevések:

- a probléma térbeli és szimmetrikus
- a talajrétegek hosszirányban folytonosak
- a tönkremeneteli felület síkcsúszólap mentén alakul ki
- A biztonsági tényező a tönkremeneteli felület minden pontjában ugyanakkora
- Rankine földnyomáselméletének megfelelő aktív és passzív tönkremeneteli zóna (a csúszólapok vízszintessel bezárt szöge aktív esetben $45^\circ + \frac{\varphi}{2}$, passzív esetben $45^\circ - \frac{\varphi}{2}$)
- a talajvízszint a talajfelszín alatt mélyen van

A blokkos vizsgálatok kimutatták, hogy a 3D biztonsági tényező általában nagyobb a 2D biztonsági tényező. Ez jelentősebben jelentkezik kohéziós talajoknál. Viszont egyes speciális tönkremeneteltípusok esetén a 3D biztonsági tényező kisebbre is adódhat, mint a kétdimenziós.

A körcsúszólapos vizsgálatokra vonatkozóan az oszlopok módszerét alkalmazták, a Spencer – módszeren alapuló feltevésekkel, azaz az oszlopok között ébredő normál- és nyíróerők aránya a csúszólapon konstans, így az eredőjük vízszintessel bezárt szöge szintén konstans. További feltételezések, hogy a térbeli probléma szimmetrikus, és a csúszólap csak síkbeli mozgást végez, hosszirányban nem tér ki.

A vizsgálatok szerint a 3D hatások jelentősebbek, ha a tönkremeneteli felület hosszirányú kiterjedése kisebb, valamint a nagyobb kohézióval rendelkező talajok esetén szintén számottevőbbek. Egyes esetekben a körcsúszólapos háromdimenziós vizsgálat is eredményezhet a kétdimenziósnál kisebb biztonsági tényezőt.

Hungr et al. (1989) az oszlopok módszerét használva mutatta be az Egyszerűsített Bishop – módszeren alapuló eljárását, majd Janbu egyszerűsített módszerét is kiterjesztette 3D-be. A problémák vizsgálatára kifejlesztette a CLARA nevű számítógépes programot, mely az oszlopok módszerét használja, és később is számos kutató alkalmazta 3D vizsgálatainak során.

A térbeli egyszerűsített Bishop – módszer feltételezései szerint az oszlopok között ébredő függőleges és vízszintes nyíróerők elhanyagolhatók. Hungr et al. (1989) térbeli módszerénél a nyomatéki egyensúly feltételei teljesülnek.

Hungr et al. (1989) kutatásainak konklúziói:

- az Egyszerűsített Bishop – módszeren alapuló térbeli eljárás pontos értéket ad a biztonsági tényezőre, körcsúszólapok esetén, ha a probléma szimmetrikus. Ezért sokféle gyakorlati probléma megoldására alkalmas, hasonlóan a síkbeli megfelelőjéhez.
- síkcsúszólap és aszimmetrikus geometria esetén nem pontos
- a Janbu módszerén alapuló eljárás mindig alacsonyabb értéket ad a biztonsági tényezőre

Fredlund & Lam (1993) az általuk kifejlesztett Általánosított lamellás eljárás (Generalized Limit Equilibrium Method, 1977) alapján mutattak be egy háromdimenziós módszert. Az oszlopok között ébredő erőkre vonatkozó feltevés szerint a nyíróerők és a normálerők között függvénykapcsolat van. Az egyszerűsítő feltevés szerint, hogy a feladat határozott legyen, csak az oszlopok között fellépő normálerők és függőleges nyíróerők között tételezik fel a függvénykapcsolatot, a vízszintes nyíróerőket elhanyagolják. Ez a feltevés 2 db λ konstanst feltételez, melyeket a számítás során határoznak meg iterációval. Ezek megfelelő kombinációja esetén adódik a határállapothoz tartozó legkisebb biztonsági tényező. A módszer szerint a biztonsági tényező úgy értelmezhető, mint az adott és a tönkremenetelhez szükséges nyírószilárdság hányadosa, azaz mennyire kell lecsökkenteni a nyírószilárdsági paramétereket ahhoz, hogy a rézsű határegyensúlyi állapotba kerüljön. Fontos, hogy a kohézióhoz és a belső súrlódási szöghöz tartozó biztonsági (csökkentő) tényező megegyezik ($FS_c = FS_\phi$).

5.2 3D állékonyságvizsgálati módszerek összegzése és értékelése

A fentebb ismertetett háromdimenziós módszerek közül egyik sem nyújt olyan hatékony és egyszerű megoldást térbeli rézsűk állékonyságának vizsgálatára, mint az elterjedt kétdimenziós eljárások síkbeli problémák esetén. Ez annak tudható be, hogy az ismertetett 3D módszerek általában csak meghatározott, idealizált esetben adnak megfelelő pontosságú eredményeket. Valós rézsűk esetén viszont csak ritkán beszélhetünk ideális körülményekről. Azonban ezen kutatások eredményei alapján is tehetünk fontos, és a 3D vizsgálatokra nézve általános megállapításokat, melyek a következők:

1. A háromdimenziós biztonsági tényező (FS_{3D}) mindig nagyobb, mint a kétdimenziós (FS_{2D}). Habár néhány módszer szerint adódhat kisebbre, de későbbi vizsgálatok kimutatták, hogy azok a módszerek nem megfelelő vagy pontatlan feltételezéseken alapulnak, melyek okozhatják ezt a hibát.
2. Az FS_{3D}/FS_{2D} arány erősen függ a tönkremenetel szélességétől. Minél nagyobb kiterjedésű hosszirányban a tönkremeneteli felület a csúszólap magasságához viszonyítva, az FS_{3D}/FS_{2D} arány annál inkább közelít az 1,0 – hoz. Ez azzal magyarázható, hogy nagy kiterjedés esetén nagy a lecsúszó földtömeg súlya, amelyhez képest a 3D hatásokból származó ellenállás kicsi, hatása szinte elhanyagolható. Ez főleg síkcsúszólap esetén jelentős, körcsúszólap esetén nincs akkora jelentőségük a térbeli hatásoknak (Chen & Chameau 1983).
3. Deschamps & Yankey (2006) szerint, amelyik eljárás a tervezés során a biztonság javára közelít, tehát egy viszonylag alacsonyabb értéket ad a biztonsági tényezőre, az az ún. back-analízis (ismert tönkremenetelből számítással következtetünk a nyírószilárdsági paraméterek értékére) során a biztonság kárára téved, tehát túlbecsüli a nyírószilárdsági paramétereket. Ez az eltérés igen jelentős lehet, elérheti akár a 30%-ot is (Stark & Eid, 1998). Ezzel magyarázható a 2D eljárások sikere és széleskörű elterjedése, mivel síkbeli voltukból adódóan nem veszik figyelembe a térbeli hatásokat, így alacsonyabb biztonsági tényezőt eredményeznek a tervezés során. Ez viszont túltervezett, gazdaságtalan rézsűkhöz vezethet. Ez kiküszöbölhető a háromdimenziós vizsgálatokkal, melyek magasabb biztonsági tényezőt adnak a 3D hatások figyelembe vételével, viszont bonyolultabbak. Ezért állítják többen (Deschamps & Yankey 2006, Stark & Eid 1998, Stark 2003, Fredlund & Lam 1993, Leshchinsky & Huang 1992), hogy mivel a tervezéskor a mérnökök leginkább a biztonság oldalán állnak, így ekkor a 2D eljárások ajánlatosak. Ezek azonban a back-analízis során már túlbecsülik a nyírószilárdsági paramétereket. Ekkor ajánlott a 3D vizsgálat, mivel jellegéből adódóan figyelembe veszi a térbeli hatásokat.
4. Ha a back-analízis során elhanyagoljuk a térbeli hatásokat, akkor az eredmény hasonló lesz, mint 2D esetben (Deschamps & Yankey 2006).
5. Homogén szemcsés rézsű esetén a 2D és a 3D biztonsági tényező megegyezik (Hutchinson & Sarma 1985, Leshchinsky & Baker 1986), mivel a tönkremeneteli felület a rézsű hosszán mindenhol ugyanaz lesz (Albataineh, 2006).

Annak oka, hogy a háromdimenziós állékonyságvizsgálati módszerek nem terjedtek el a gyakorlatban olyan széles körben, mint a kétdimenziós eljárások, a költségükben is keresendő. A talajfeltárás drága folyamat, egy-egy szelvény megfelelő pontosságú felvételéhez számos mintavétel szükséges. Még várhat magára egy költséghatékony, ámde kellő pontosságot biztosító talajfeltáró módszer, amely gazdaságosabbá, és ezáltal egy kedvezőbb, elterjedtebb alternatívává tehetné a 3D vizsgálatokat.

6. Végeselemes modellezés

Az ipari fejlődés a XIX. század végén már olyan szintet ért el, hogy megnőtt az igény a korábbiaknál jóval bonyolultabb szerkezetek pontos és gazdaságos számítására. Az ehhez szükséges elméleti alapok már rendelkezésre álltak, viszont az adott kor technikai lehetőségei igen nehézé vagy lehetetlenné tették a problémák megoldását. A számítógépek elterjedésével és a számítási kapacitás növekedésével megnyílt az út a nagy számítási igényű numerikus módszerek előtt.

Ilyen módszer a végeselemek módszere is. Segítségével a folytonos, végtelen sok keresztmetszetből álló anyagok (kontinuumok) vizsgálata egyszerűbbé vált. A folytonos szövetet véges kiterjedésű, a vizsgált anyag tulajdonságaival rendelkező elemekre, végeselemekre osztja. A módszer forradalmasította a mérnöki munkát, mivel gyakorlatilag bármilyen gyakorlati feladat vizsgálatára alkalmazható, kezdve a tartószerkezet tervezéstől gépészeti berendezések modellezésén át a geotechnikáig.

A végeselemes technikát nem régóta alkalmazzák talajmechanikai feladatok vizsgálatára. Komolyabban az ezredforduló környékén kezdtek foglalkozni a témával, ekkor jelentek meg az első ipari geotechnikai végeselemes programok első verziói is. Manapság viszont már széles körben használják ezeket a szoftvereket nap, mint nap, köszönhetően a rengeteg előnyüknek a hagyományos technikákkal szemben. Ezek az előnyök (Griffiths & Lane 1999, Rocscience Inc. 2001 - 2004):

1. Nem szükséges feltételezéseket tenni a tönkremeneteli felület alakját és helyét illetően, mivel a tönkremenetel „természetesen”, a definiált talaj tulajdonságainak megfelelően következik be.
2. Mivel a végeselemes módszer nem használ lamellákat, így a lamellák között fellépő erőket illetően nincs szükség feltételezésekre. A végeselemes módszer globális egyensúlyt biztosít egészen a tönkremenetelig.
3. Ha realisztikus talajadatokat adunk meg, a végeselemes technika információt ad a deformációkról és a feszültségekről.
4. A végeselemes technikával progresszív tönkremenetel is vizsgálható.
5. Komplex geometria esetén is nagy pontosságú eredményt szolgáltat, 2D-ben és 3D-ben egyaránt.
6. Sokféle, az adott problémához leginkább optimális talajmodellel dolgozhatunk.

6.1 Talajmodell

Rézsúállékonysági vizsgálatokhoz elegendő a Mohr – Coulomb talajmodell használata, hiszen a vizsgálatok során nincs szükségünk a valós elmozdulásokra, csak a biztonsági tényezőt és a kritikus csúszólapot keressük. Ehhez a talajmodellhez az alábbi hat paraméter tartozik (Griffiths & Lane 1999):

- c kohézió
- φ belső súrlódási szög
- γ térfogatsúly
- E rugalmassági modulus
- ν Poisson – tényező
- ψ dilatációs szög

A fenti paraméterek közül a rugalmassági modulus (E) és a Poisson – tényező (ν) csak a deformációkra van szignifikáns hatással, a biztonsági tényező értékére hatásuk nem jelentős, elhanyagolható. A korábbi kutatások egybehangzóan kimutatták, hogy a dilatációs szög (ψ) hatása elhanyagolható a vizsgálat egészére nézve, ezért értéke zérusra vehető ($\psi = 0^\circ$). Így összességében elmondható, hogy az állékonyságvizsgálat legfontosabb paraméterei a kohézió (c), a belső súrlódási szög (ϕ), a térfogatsúly (γ) és a geometria, csakúgy, mint a hagyományos lamellás (és oszlopos) módszerek esetén, így jó összehasonlítási alapot is jelent.

Megjegyzés: a dolgozatban a talajjellemzőknél az összenyomódási modulus (E_{oed}) adtam meg, de a szoftver a számítás során a rugalmassági modulussal számol.

6.2 A biztonsági tényező értelmezése

A biztonsági tényező meghatározására a legelterjedtebb eljárás az ún. $\phi - c$ redukciós technika. A módszer lényege, hogy a bemenő hatékony belső súrlódási szög (ϕ') és a hatékony kohézió (c') értékét iterációs folyamat során egy szilárdságcsökkentő tényezővel (strength reduction factor, SRF) addig redukáljuk, amíg a rézsű éppen tönkremeneteli állapotba kerül, kialakul a kritikus csúszólap.

$$c'_{sz} = \frac{c'}{SRF}$$

$$\tan \phi'_{sz} = \frac{\tan \phi'}{SRF}$$

ahol c'_{sz} a tönkremenetelhez szükséges hatékony kohézió, ϕ'_{sz} pedig a tönkremenetelhez szükséges hatékony belső súrlódási szög.

Ha elértük a tönkremenetelt, akkor a szilárdságcsökkentő tényező tönkremenetelhez tartozó értéke (SRF_{krit}) lesz a biztonsági tényező:

$$SRF_{krit} = FS$$

Tehát a biztonsági tényező tulajdonképpen az az érték, mellyel csökkentve a bemenő nyírószilárdsági paraméterek értékét a rézsű éppen tönkremeneteli állapotba kerül.

Egy másik módszer a biztonsági tényező meghatározására az ún. gravitációs módszer. Ekkor a talajtömegre ható gravitáció értékét növeljük egészen a tönkremenetelig. A biztonsági tényező a tönkremenetelhez tartozó (g_{krit}) és a nyugalmi (g_0) gravitációs gyorsulás hányadosa:

$$FS = \frac{g_{krit}}{g_0}$$

A gyakorlatban a gravitációs módszer építés közbeni állapotok analizésére alkalmas, a $\phi - c$ redukciós módszer pedig már megépült rézsűk állékonyságának vizsgálatakor ad pontosabb eredményt. A dolgozat során használt szoftverek a $\phi - c$ redukciós technikát használják.

7. Összehasonlító vizsgálatok

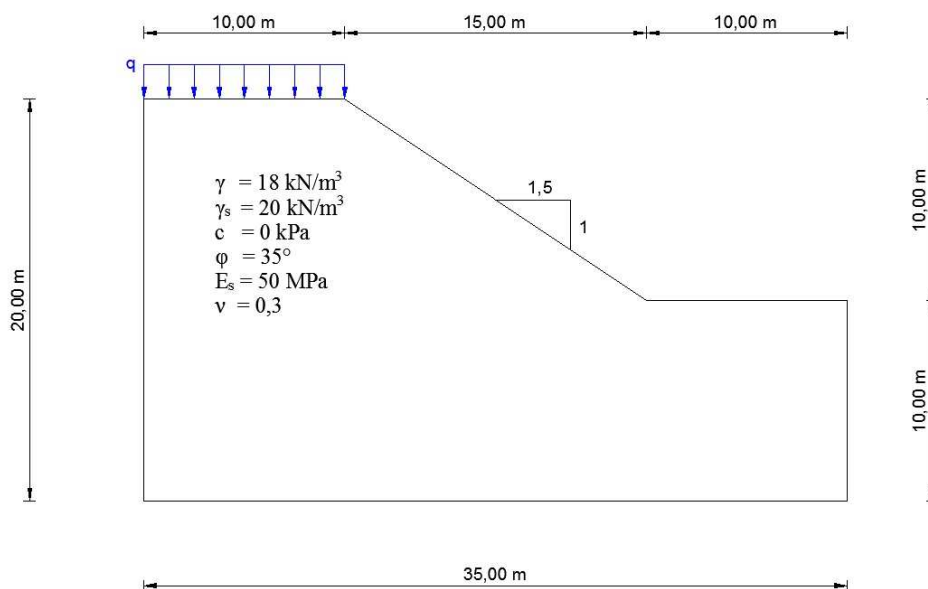
A következőkben 5 db példán keresztül vizsgálom a kétdimenziós és a háromdimenziós modellezés közötti eltéréseket. A kétdimenziós vizsgálatokat a PLAXIS 2D, a háromdimenziós vizsgálatokat a PLAXIS Tunnel 3D szoftverrel végeztem.

A PLAXIS Tunnel 3D nem teljesen háromdimenziós szoftver. A háromdimenziós modell generálása úgy történik, hogy a kétdimenziós geometriát adott távolsággal eltoljuk. Ekkor a szoftver az első (front) és a hátsó (rear) sík között segédsíkokat definiál, amelyek segítségével generálja a háromdimenziós végeselem hálót. A két szélső sík közé tetszőlegesen tudunk definiálni síkokat. Ezek az általunk definiált síkok sávokat zárnak közre. Ezen sávokon külön-külön tudjuk aktiválni a terheket, geometriai elemeket. A szoftver korlátai miatt a mintapéldákat úgy kellett kialakítani, hogy értékelhető eredményeket kapjak. Ezért választottam a felszíni teherrel történő összehasonlítást.

Mivel a rézsű a háromdimenziós modellben homogén és prizmatikus, így a háromdimenziós szoftver segítségével azt vizsgáltam, hogy a teher hosszának változása milyen hatással van a biztonsági tényezőre. A külső teher nagysága $q = 10 \text{ kPa}$, melyet a rézsű koronáján működtettünk. A külső terhelés hosszát a háromdimenziós vizsgálatok során rendre 10, 20, 40 és 50 m széles sávokra adtam meg, így az első 4 példában 4 db értéket kaptam a biztonsági tényezőre a teher hossza függvényében. A háromdimenziós modell hossza az első négy példában 150 m, mivel így biztosítható, hogy a peremfeltételek ne befolyásolják a vizsgálat eredményét.

Az első 3 példában a GeoStudio 2012 Slope/W moduljával, lamellás módszerekkel is meghatároztam a biztonsági tényezőket.

7.1 Homogén szemcsés talaj ($\varphi > 0^\circ$ és $c = 0 \text{ kPa}$)



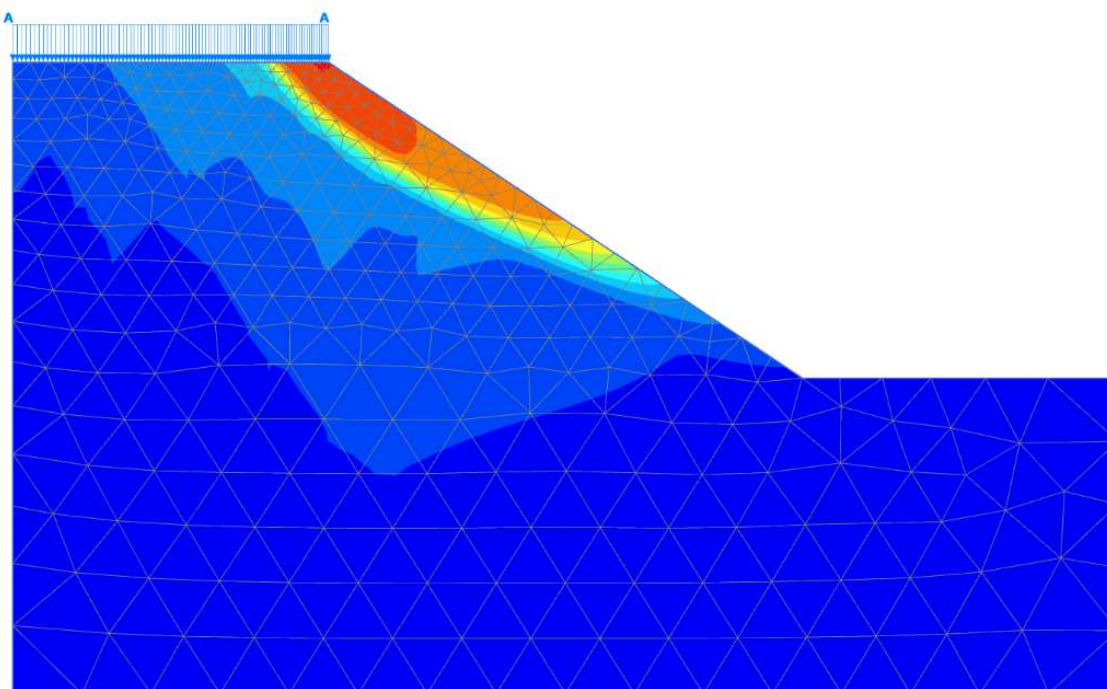
11. ábra: rézsűgeometria homogén szemcsés rézsű esetén

Az első példában egy homogén szemcsés talajból álló rézsút vizsgáltam. A talajjellemzőket az 1. táblázat tartalmazza. A 6.1 pontban ismertetett Young-modulus (E_s) helyett az összenyomódási modulus (E_{oed}) szerepel.

nedves térfogatsúly	γ	18 kN/m ³
telített térfogatsúly	γ_s	20 kN/m ³
kohézió	c	0 kPa
belső súrlódási szög	φ	30°
összenyomódási modulus	E_{oed}	25 MPa
Poisson - tényező	ν	0,3

1. táblázat: homogén szemcsés talaj jellemzői

A kétdimenziós szoftverrel meghatározott csúszólap a 12. ábrán látható.



12. ábra: kritikus csúszólap, homogén szemcsés talaj, 2D

Látható, hogy a tönkremenetel reális, mivel szemcsés talajok esetén a csúszólap általában logaritmikus spirál alakú.

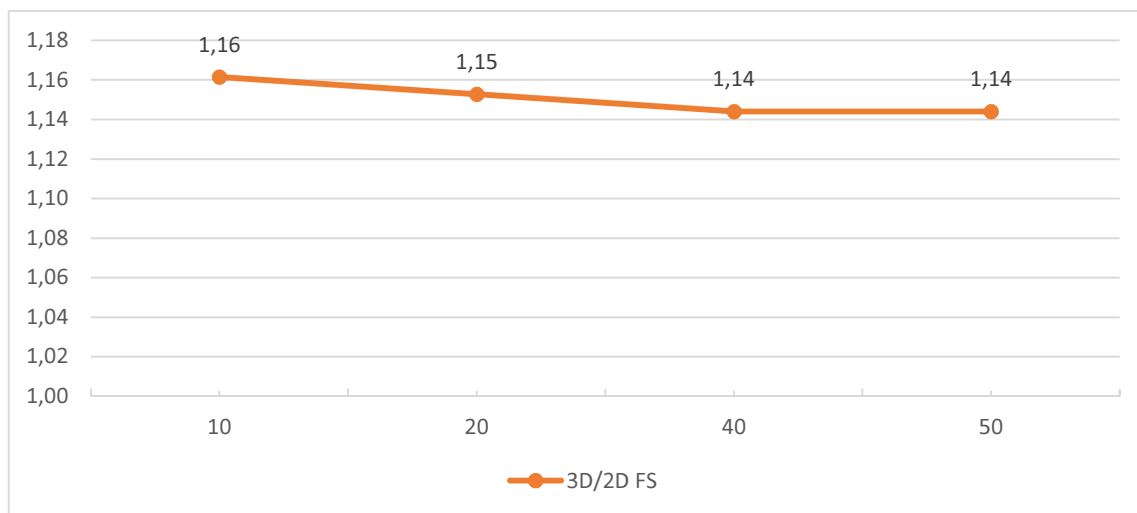
A 2. táblázat tartalmazza a kétdimenziós biztonsági tényezőket, valamint a 3D biztonsági tényezőket 10, 20, 40 és 50 m-es teherhossz esetén. A táblázatban a teher hosszát L_q – val jelöltem. A relatíve nagy eltérés a lamellás módszerek és a végesselemez vizsgálattal meghatározott biztonsági tényezők között abból adódik, hogy a lamellás módszerek a valójában logaritmikus spirál csúszólapot körcsúszólappal közelítik.

		FS
2D	Ordinary	1,08
	Bishop	1,08
	Janbu	1,06
	Spencer	1,09
	Morgenstern – Price	1,08
	VEM (Plaxis 2D)	1,15
3D	$L_q = 10$	1,33
	$L_q = 20$	1,32
	$L_q = 40$	1,31
	$L_q = 50$	1,31

2. táblázat

Egyértelműen látszik, hogy a 3D biztonsági tényezők minden esetben nagyobbak, mint a kétdimenziós biztonsági tényező. Ezek az eredmények nem támasztják alá Hutchinson & Sarma (1985), valamint Leshchinsky & Baker (1986) állításait, mivel ők arra a megállapításra jutottak, hogy homogén szemcsés rézsű esetén a 2D és a 3D biztonsági tényező megegyezik. Ennek lehetséges oka, hogy állításuk terheletlen rézsűkre vonatkozik.

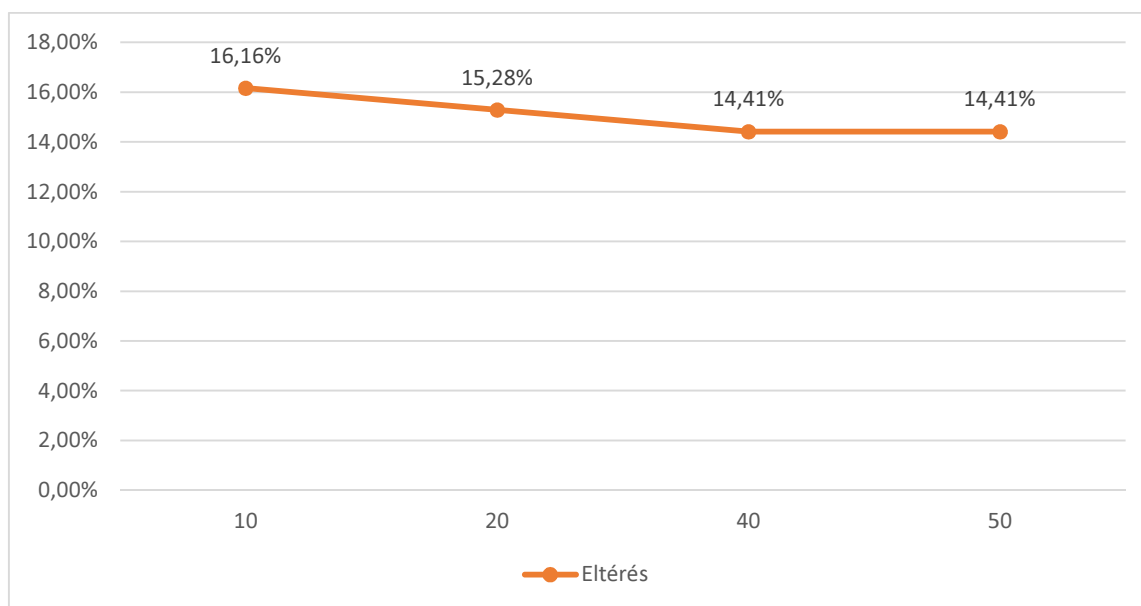
A 3D és a 2D biztonsági tényező viszonyát grafikonon is ábrázolhatjuk, a teher hossza függvényében. Az első esetben az FS_{3D}/FS_{2D} arányt ábrázoltam a grafikonon (13. ábra). Ez az ábrázolási mód szemléletes képet ad az eltérés nagyságáról és a 3D biztonsági tényező viselkedéséről is.

13. ábra: 3D/2D FS arány L_q függvényében homogén szemcsés talaj esetén

A 3D és a 2D biztonsági tényező viszonyát ábrázolhatjuk olyan módon is, hogy a kettő közti különbséget viszonyítjuk a 2D biztonsági tényezőhöz (14. ábra), tehát így százalékos eltérést kapunk. A függőleges tengelyen az

$$\frac{FS_{3D} - FS_{2D}}{FS_{2D}} \cdot 100$$

százalékos értékek szerepelnek a teher hossza függvényében.

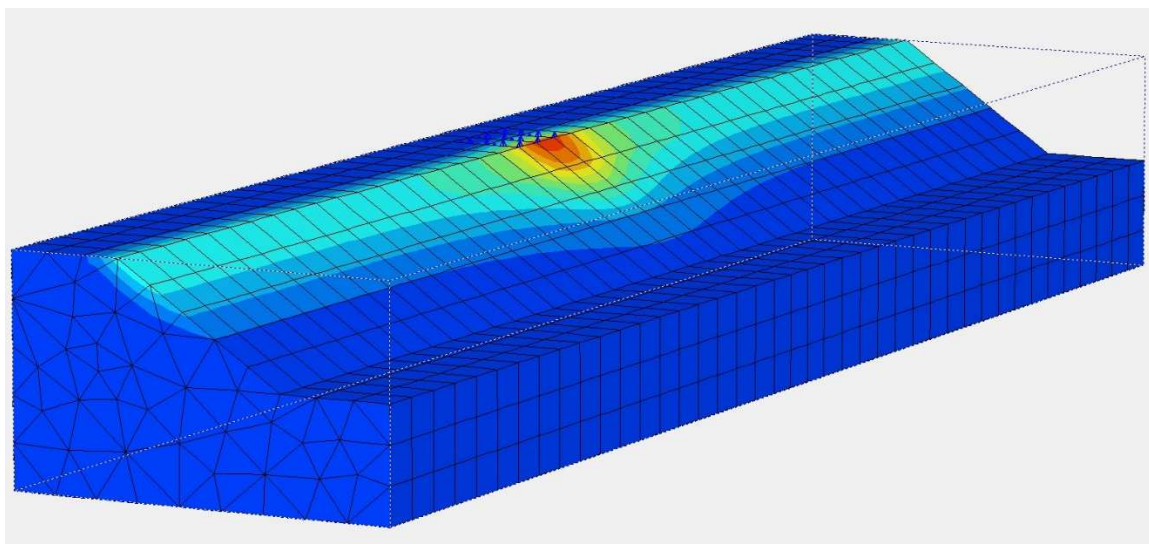


14. ábra: FS_{3D} és FS_{2D} közötti eltérés L_q függvényében homogén szemcsés talaj esetén

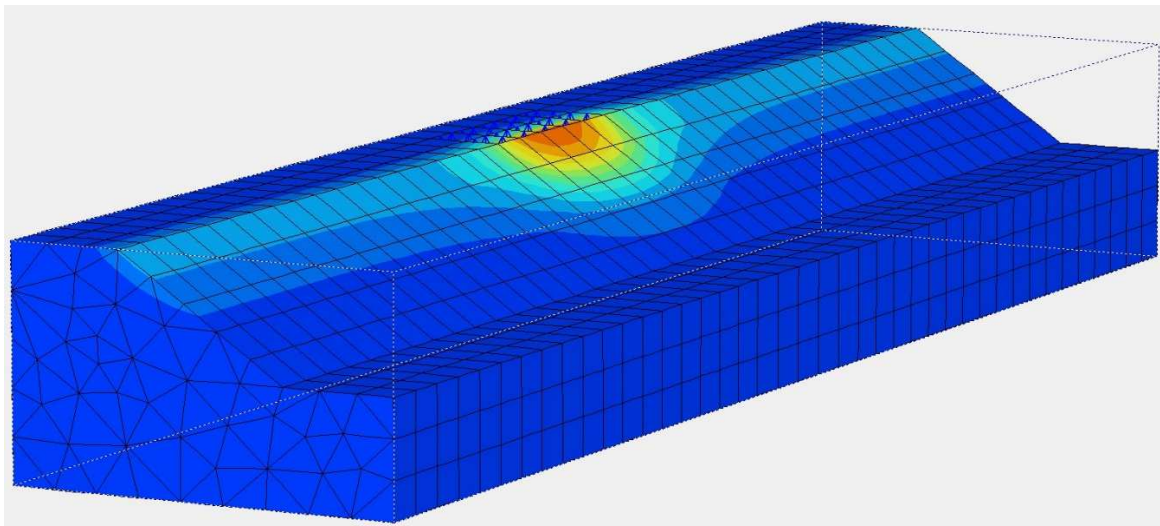
Látható, hogy a kétfajta ábrázolásmód hasonló alakú grafikont eredményez. Ez könnyen belátható, mivel a kétféle megközelítés gyakorlatilag ugyanazon matematikai fogalom két különböző megközelítése.

Elfogadva azt a kijelentést, mely szerint a 3D biztonsági tényező mindig nagyobb a kétdimenziósnál, az 13. ábra szerinti ábrázolás tűnik alkalmasabbnak a jelenség szemléltetésére. Így azonnali képet kaphatunk a 3D biztonsági tényező nagyságára vonatkozóan, mivel gyakorlatilag azt tüntetjük fel, hogy a 3D biztonsági tényező hányszorosa a 2D biztonsági tényezőnek.

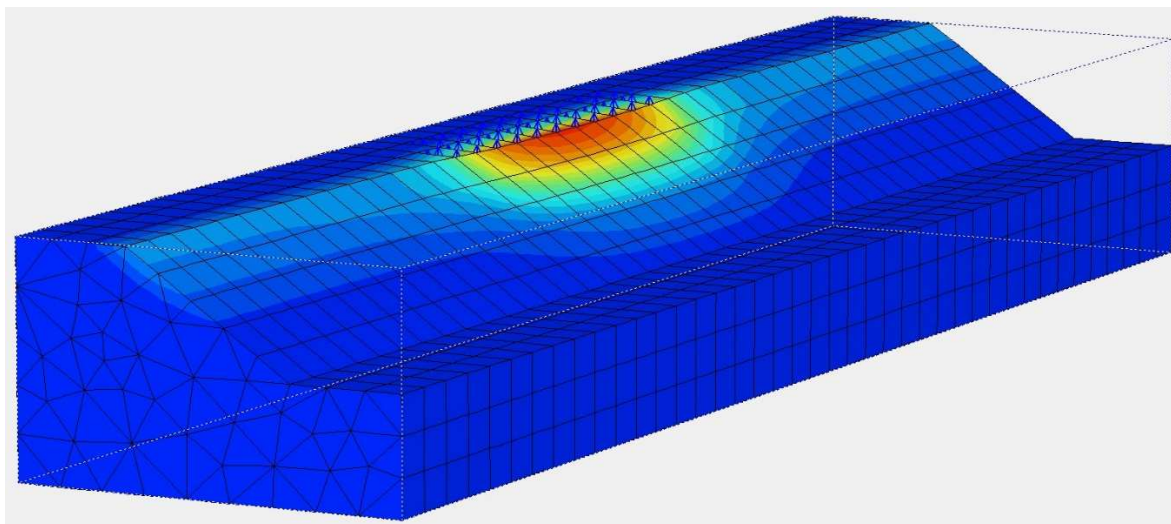
A háromdimenziós szoftverrel meghatározott csúszólapok a 15 – 18 ábrákon láthatók.



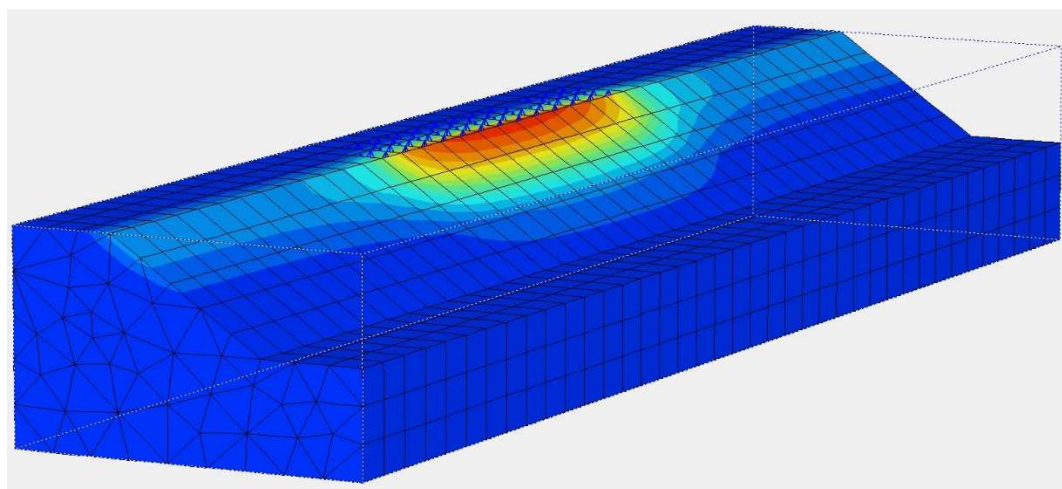
15. ábra: homogén szemcsés talaj, $L_q = 10 \text{ m}$



16. ábra: homogén szemcsés talaj, $L_q = 20$ m



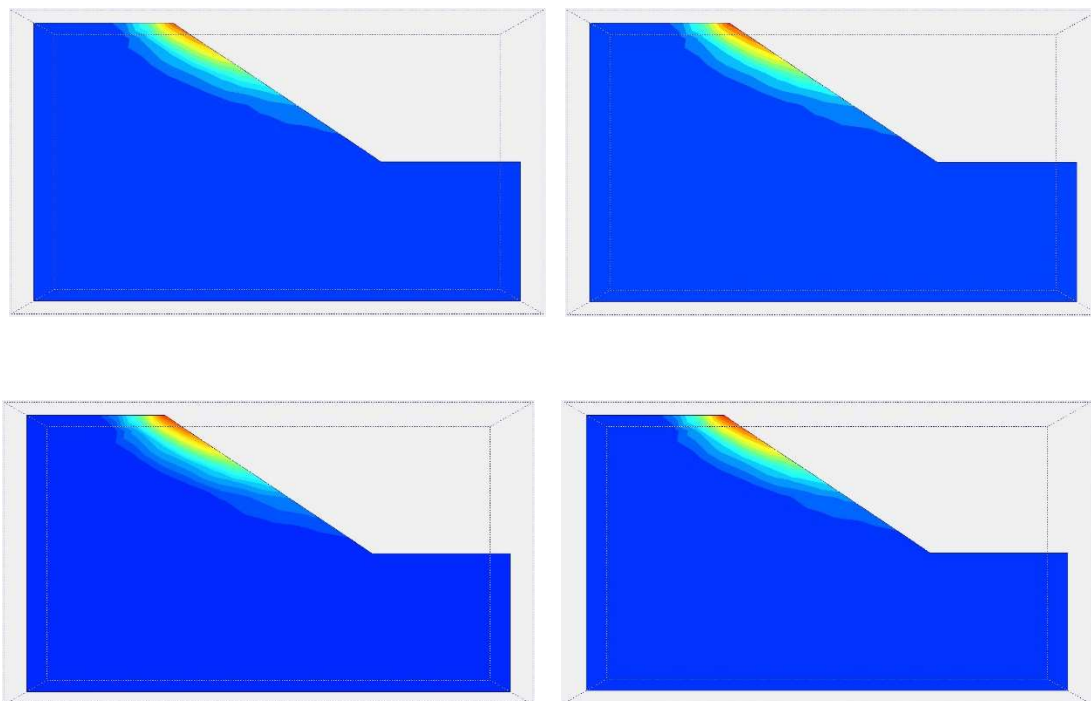
17. ábra: homogén szemcsés talaj, $L_q = 40$ m



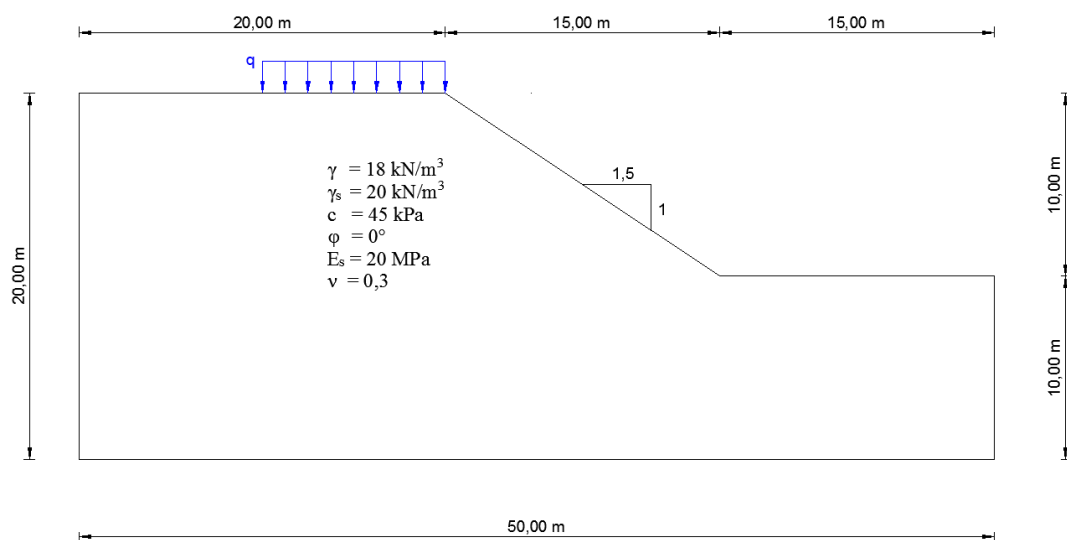
18. ábra: homogén szemcsés talaj, $L_q = 50$ m

Megfigyelhető, hogy a teher hatása kis szélesség esetén erősen lokális jellegű, csak a közvetlenül terhelt felületen befolyásolja a kialakuló csúszólap alakját. A tönkremenetel viszont a nem terhelt részekben gyakorlatilag ugyanúgy megy végbe, a terhelés hatása nem terjed ki az oldallapok felé. A teherhossz növekedésével ez a lokális jelleg gyengül, a nagyobb felületen megoszló teher miatt a tönkremeneteli zóna szélesebb lesz, hatása pedig erősebb, így a rézsű terheletlen részén nem alakul ki tönkremenetel.

A terhelt mező közepén lévő kritikus keresztmetszet változását szemlélteti a teherhossz függvényében a 19. ábra. Látható, hogy a kritikus csúszólap gyakorlatilag nem változik, mindegyik terhelési esetben ugyanaz. A kétdimenziós csúszólaphoz képest magasabban metsz bele a rézsűbe, ennek lehetséges oka valószínűleg a térbeli hatásokból fellépő ellenállás.



19. ábra: $L_q = 10$ m (balra fent), 20 m (jobbra fent), 40 m (balra lent) és 50 m (jobbra lent)

7.2 Homogén kohéziós talaj ($\varphi = 0^\circ$ és $c > 0$ kPa)

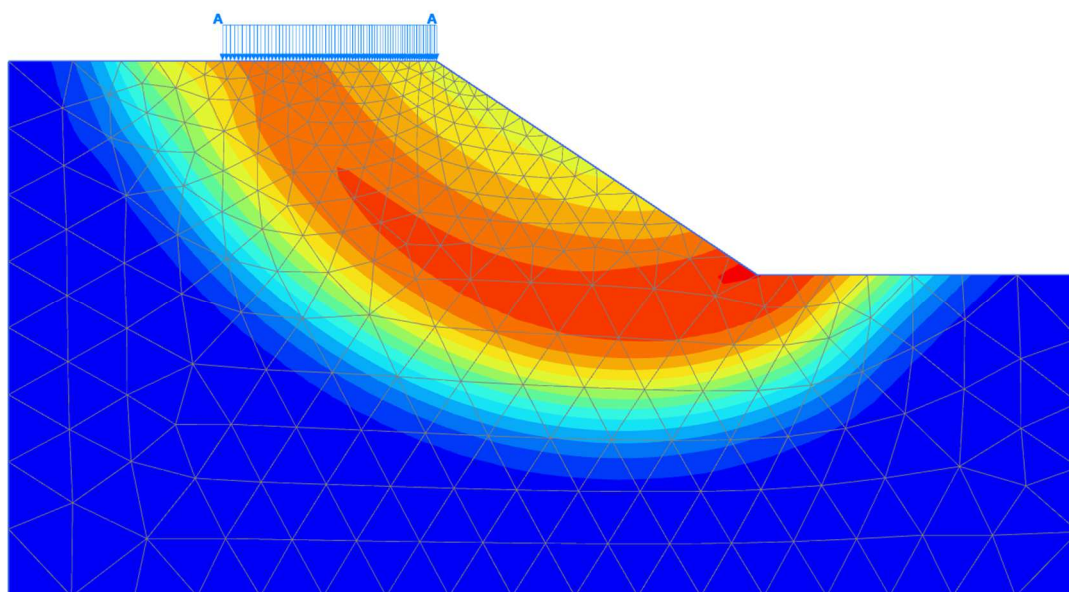
20. ábra: rézsűgeometria homogén kohéziós rézsű esetén

A 2. példában egy homogén kohéziós talajból álló rézsűt vizsgáltam. A talaj jellemzőit a 3. táblázat tartalmazza.

nedves térfogatsúly	γ	18 kN/m ³
telített térfogatsúly	γ_s	20 kN/m ³
kohézió	c	45 kPa
belső súrlódási szög	φ	0°
összenyomódási modulus	E_{oed}	27 MPa
Poisson - tényező	ν	0,3

3. táblázat

A kétdimenziós szoftverrel meghatározott csúszólap a 21. ábrán látható.



21. ábra: kritikus csúszólap, homogén kohéziós talaj, 2D

A tönkremenetel megfelel a valós viszonyoknak, mivel tisztán kohéziós talajok esetén általában körcsúszólap alakul ki.

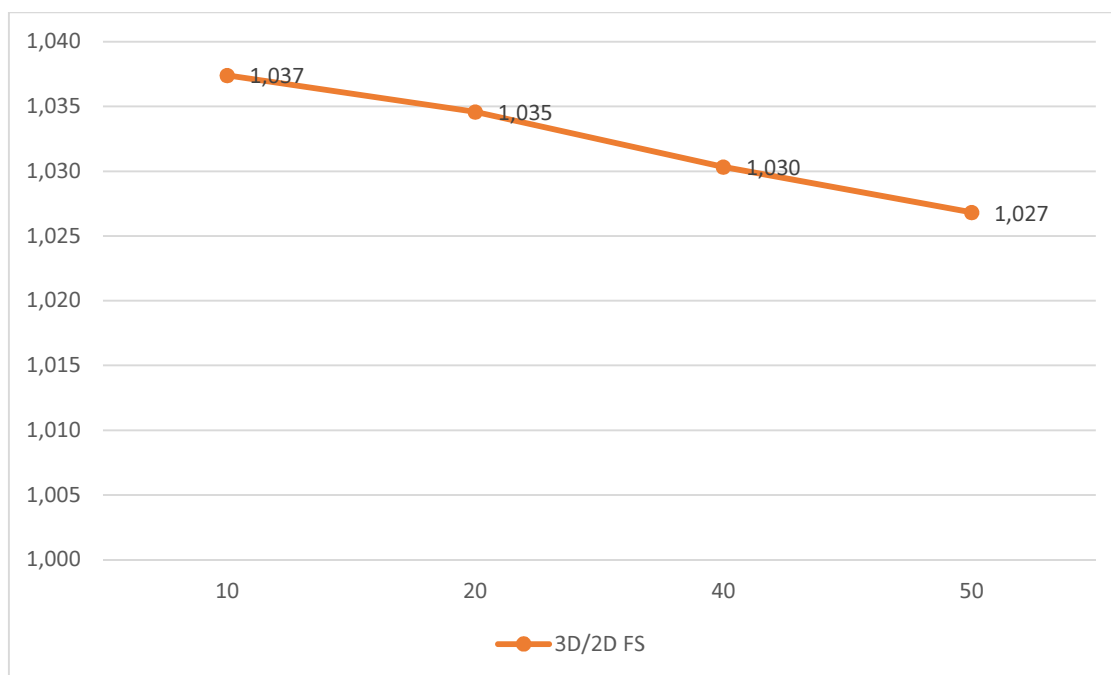
A 4. táblázat tartalmazza a kétdimenziós biztonsági tényezőt, valamint a 3D biztonsági tényezőket 10, 20, 40 és 50 m-es teherhossz esetén. A táblázatban a teher hossza L_q .

		FS
2D	Ordinary	1,42
	Bishop	1,42
	Janbu	1,40
	Spencer	1,43
	Morgenstern – Price	1,42
	VEM (Plaxis 2D)	1,42
3D	$L_q = 10$	1,47
	$L_q = 20$	1,47
	$L_q = 40$	1,46
	$L_q = 50$	1,46

4. táblázat

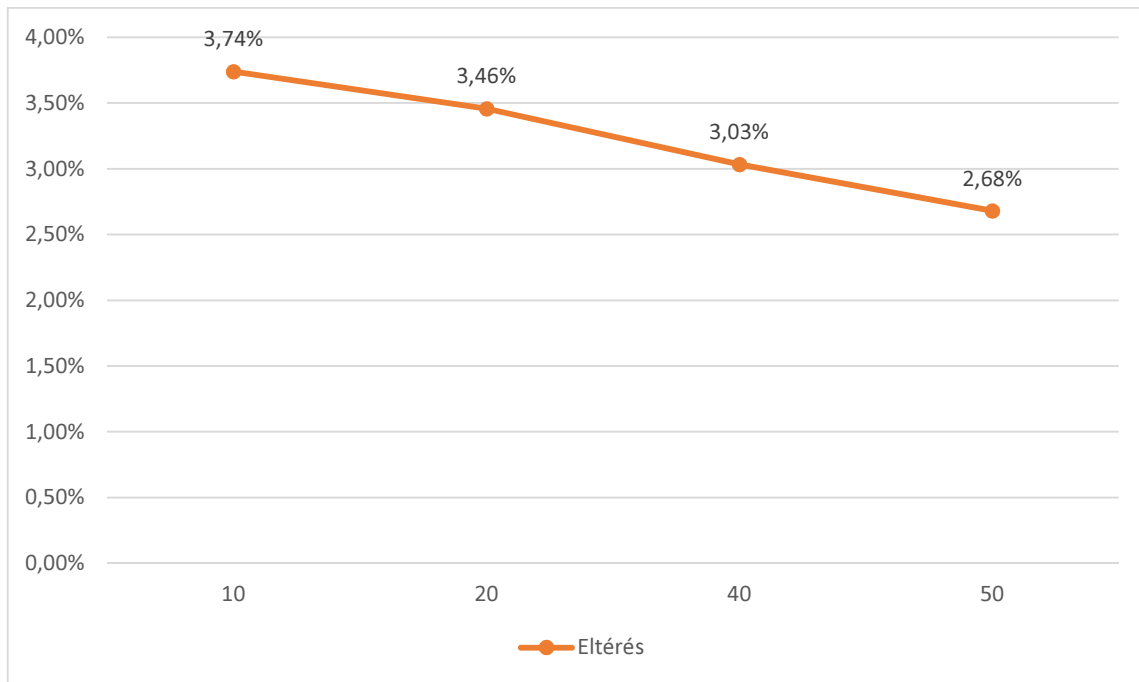
Látható, hogy erősen kohéziós talaj esetén a teherhossz változása elhanyagolható hatással van a 3D biztonsági tényezőre. A kétdimenziós biztonsági tényezőtől való eltérés is csekély. Chen & Chameau (1983) szerint a térbeli hatások kevésbé befolyásolják a 3D biztonsági tényezőt körcsúszólap esetén. Ez a példa ennek az állításnak egy szélsőséges igazolása, ugyanis az eltérés és a változás is minimális.

Az FS_{3D}/FS_{2D} arányt grafikonon ábrázolva a teher hossza függvényében (22. ábra):



22. ábra: $3D/2D$ FS arány L_q függvényében homogén kohéziós talaj esetén

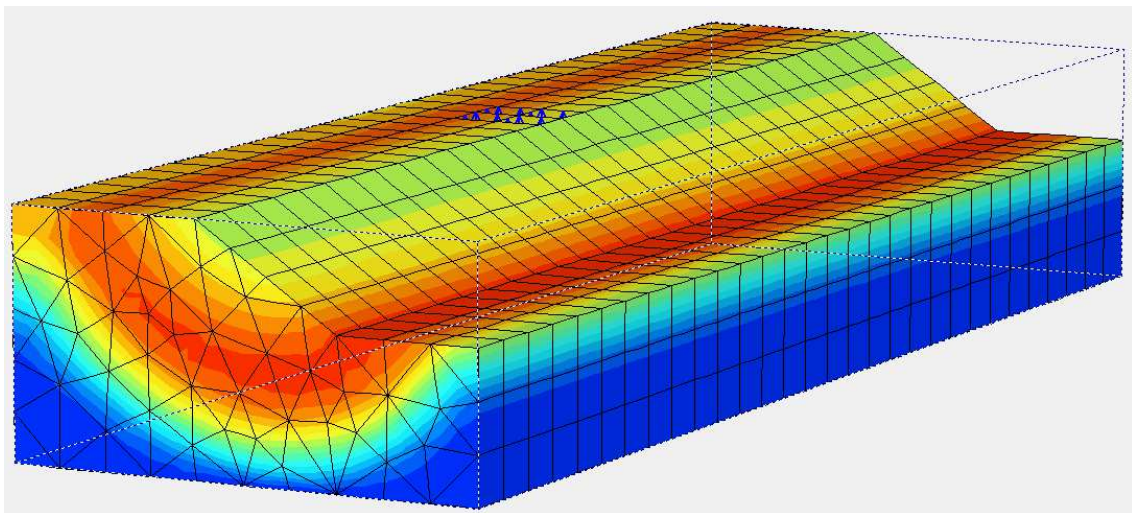
Az FS_{3D} és az FS_{2D} közötti eltérés grafikonon ábrázolva a teher hossza függvényében (23. ábra):



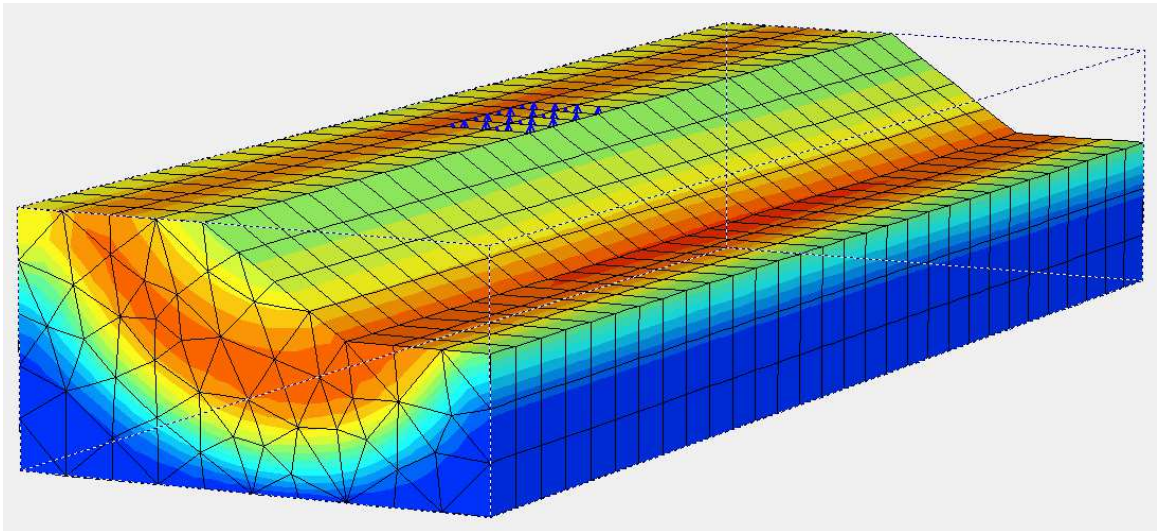
23. ábra: FS_{3D} és FS_{2D} közötti eltérés L_q függvényében homogén kohéziós talaj esetén

A grafikonokon is látszik, hogy az eltérés minimális, gyakorlatilag nincs különbség a 2D és a 3D modellezés eredményei között.

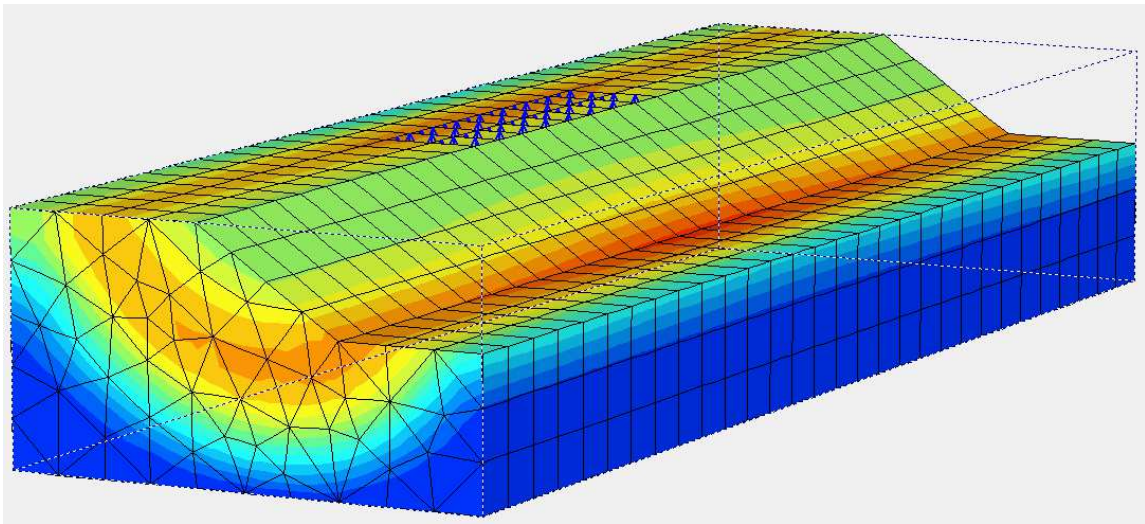
A háromdimenziós szoftverrel meghatározott csúszólapok a 24 – 27 ábrákon láthatók.



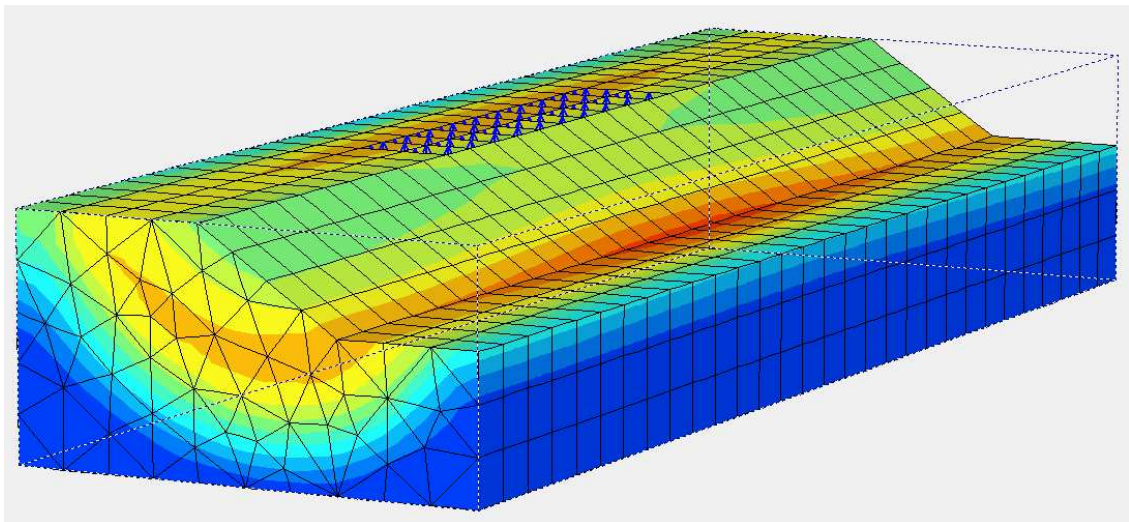
24. ábra: homogén kohéziós talaj, $L_q = 10\text{ m}$



25. ábra: homogén kohéziós talaj, $L_q = 20\text{ m}$



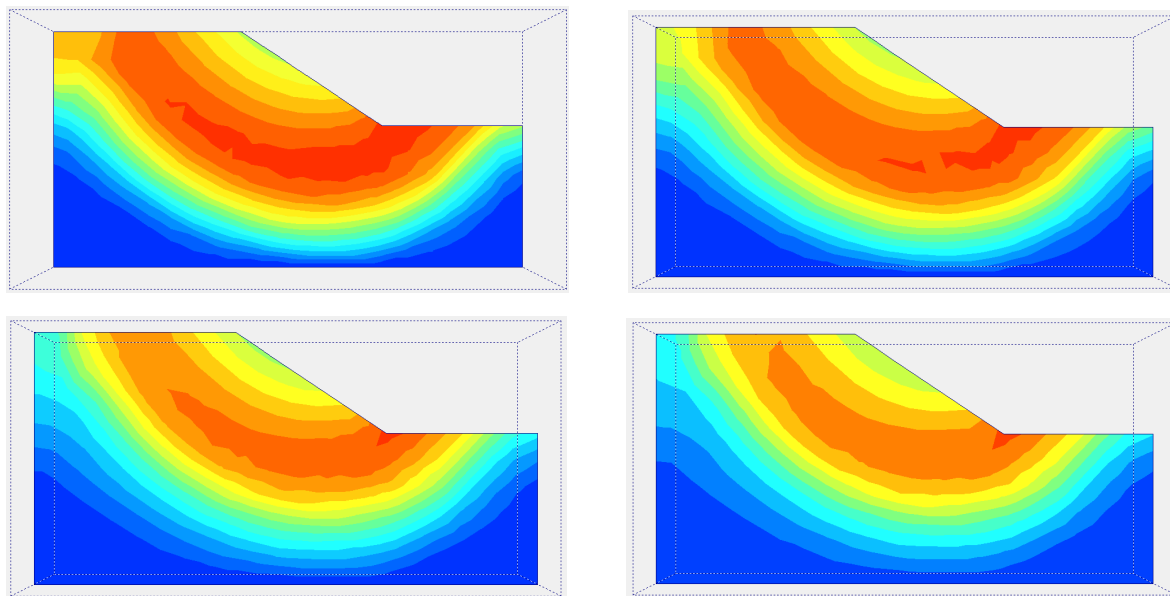
26. ábra: homogén kohéziós talaj, $L_q = 40\text{ m}$



27. ábra: homogén kohéziós talaj, $L_q = 50\text{ m}$

Jelen esetben is ugyanaz a tendencia figyelhető meg, mint homogén szemcsés esetben. A teher kezdetben lokális jellegű viselkedést mutat, nincs jelentős hatással a támadásponttól távolabb eső pontokra. A tönkremeneteli felület a rézsú teljes hosszán közel egységes. A teher hosszának növelésével a tönkremeneteli felület kiterjedése csökken, egyre inkább a közvetlenül terhelt zóna irányába. Azonban ez az átrendeződés nincs hatással a biztonsági tényező értékére.

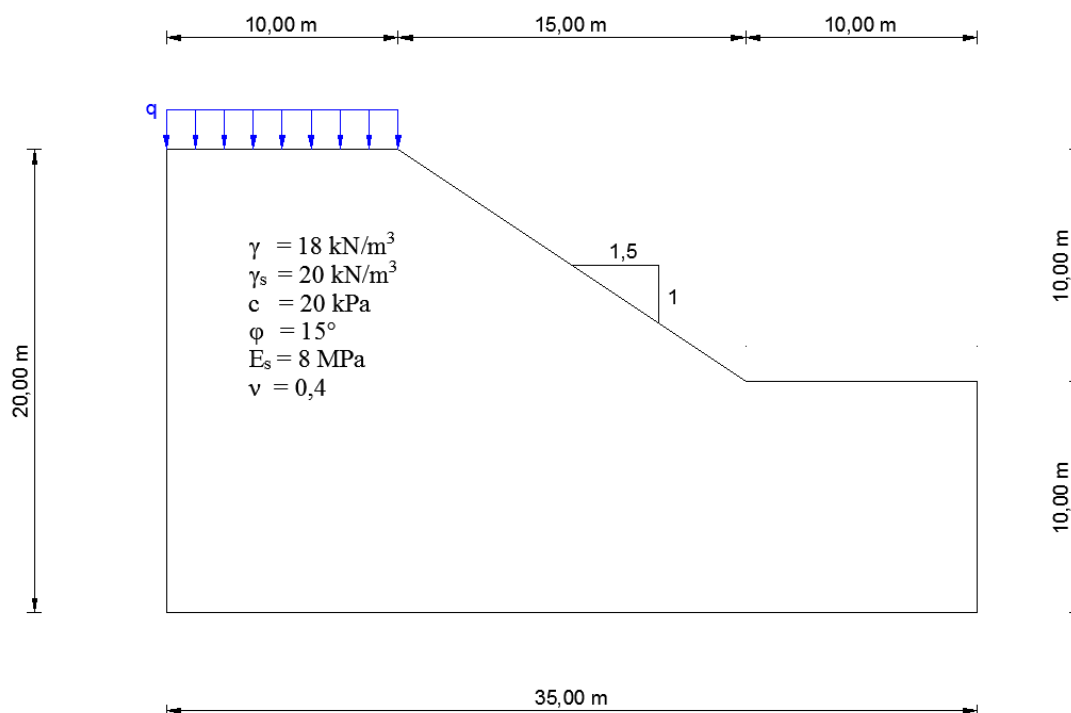
A kritikus keresztmetszetekben kialakuló csúszólapokat szemlélteti a 28. ábra.



28. ábra: $L_q = 10\text{ m}$ (balra fent), 20 m (jobbra fent), 40 m (balra lent) és 50 m (jobbra lent)

Megfigyelhető, hogy a kritikus csúszólap alakja nem változik. Viszont a kétdimenziós tönkremenetelhez képest jelentős eltérés fedezhető fel. Mindkét esetben alámetsző csúszólap alakul ki, viszont a térbeli esetben a csúszólap mélyebb, olyannyira, hogy eléri a modell határvonalait.

7.3 Homogén általános talaj ($\varphi > 0^\circ$ és $c > 0$ kPa)



29. ábra: rézsűgeometria homogén általános rézsű esetén

A 3. példában egy homogén, általános talajból álló rézsűt vizsgáltam. A talaj jellemzőit az 5. táblázat tartalmazza.

nedves térfogatsúly	γ	18 kN/m ³
telített térfogatsúly	γ_s	20 kN/m ³
kohézió	c	20 kPa
belső súrlódási szög	φ	15°
összenyomódási modulus	E_{oed}	17 MPa
Poisson - tényező	ν	0,4

5. táblázat

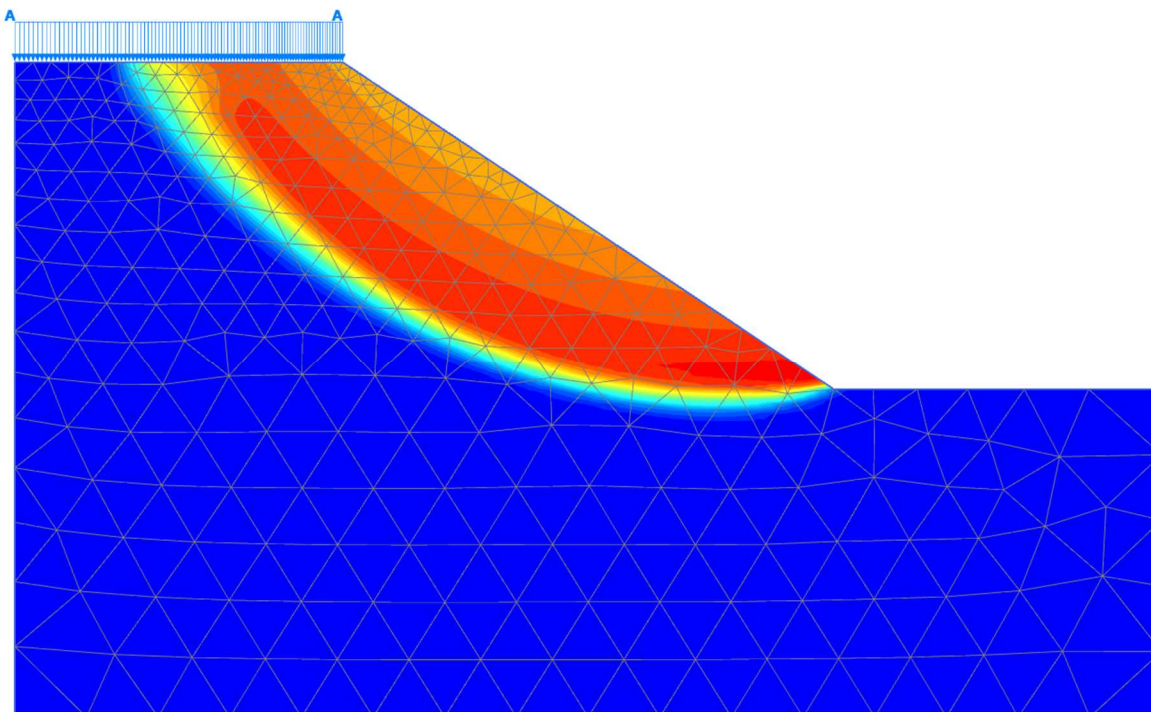
A 6. táblázat tartalmazza a kétdimenziós biztonsági tényezőt, valamint a 3D biztonsági tényezőket 10, 20, 40 és 50 m-es teherhossz esetén. A táblázatban a teher hossza L_q .

		FS
2D	Ordinary	1,29
	Bishop	1,31
	Janbu	1,26
	Spencer	1,33
	Morgenstern – Price	1,32
	VEM (Plaxis 2D)	1,32
3D	$L_q = 10$	1,46
	$L_q = 20$	1,45
	$L_q = 40$	1,44
	$L_q = 50$	1,44

6. táblázat

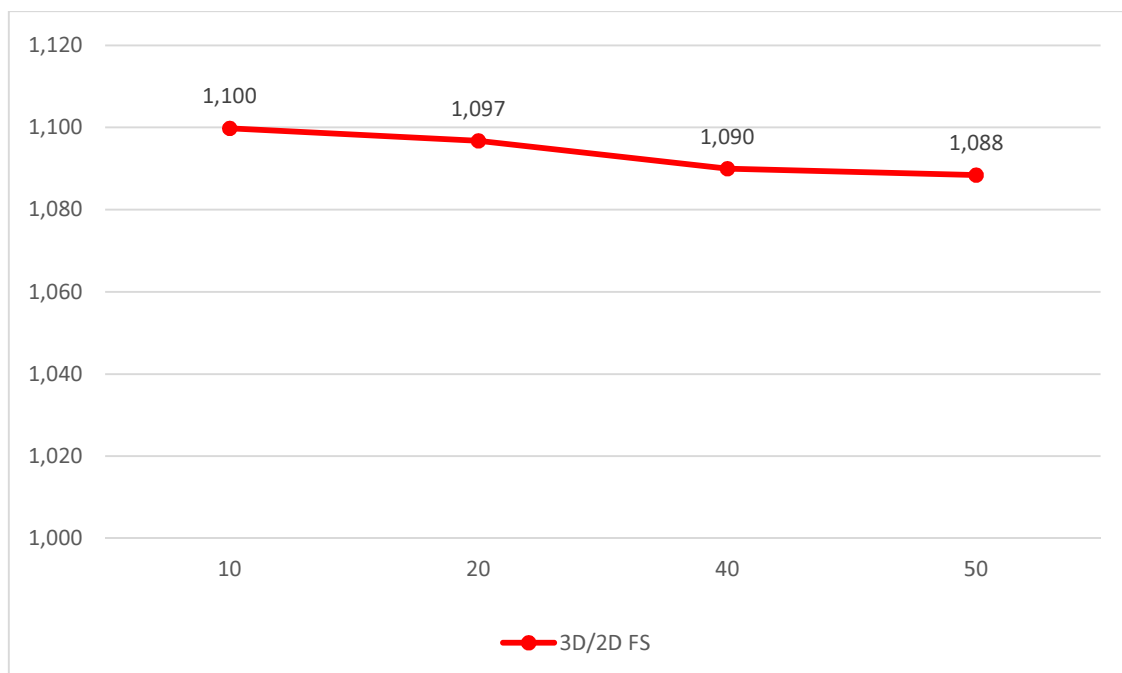
Észrevehető, hogy az előző példával ellentétben itt a 3D biztonsági tényező nagyobb mértékben tér el a kétdimenzióستól. Azonban a teherhossz változása csekély hatással van a biztonsági tényezőre.

A kétdimenziós szoftverrel meghatározott csúszólap a 30. ábrán látható. A tönkremenetel reális, mivel az alkalmazott talajjellemzők esetén általában körcsúszólap alakul ki.



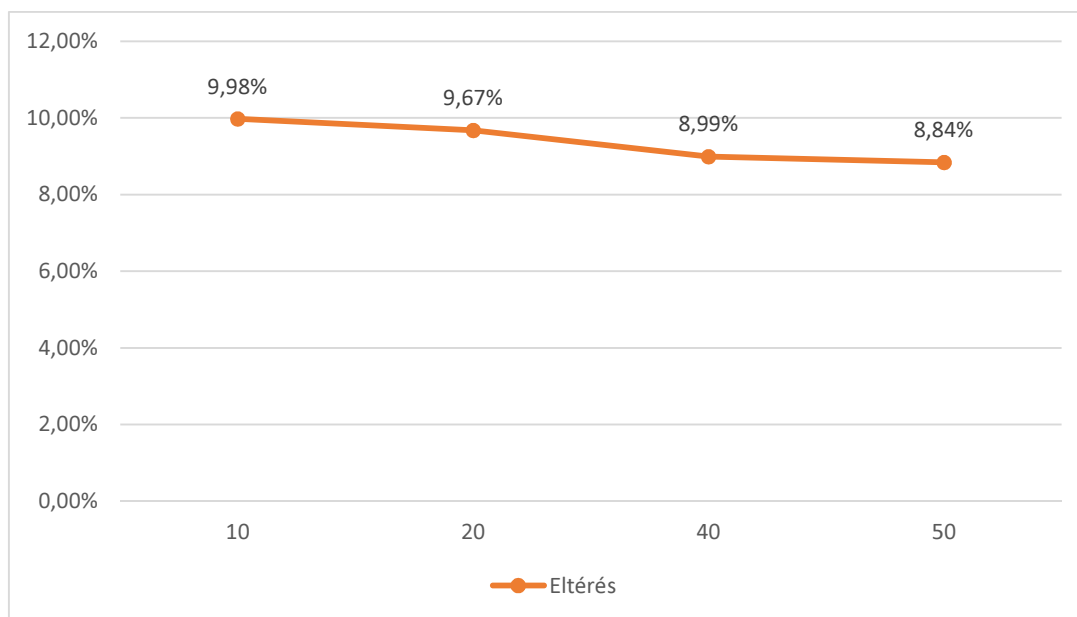
30. ábra: kritikus csúszólap, homogén általános talaj, 2D

Az FS_{3D}/FS_{2D} arányt grafikonon ábrázolva a teher hossza függvényében (31. ábra):



31. ábra: 3D/2D FS arány L_q függvényében homogén általános talaj esetén

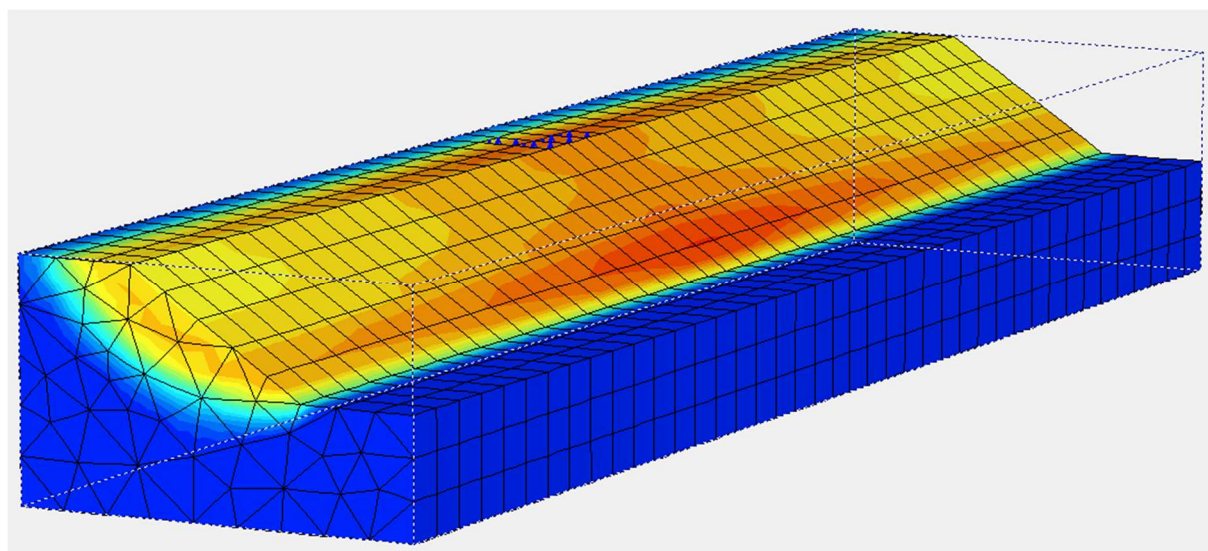
Az FS_{3D} és az FS_{2D} közötti eltérés grafikonon ábrázolva a teher hossza függvényében (32. ábra):



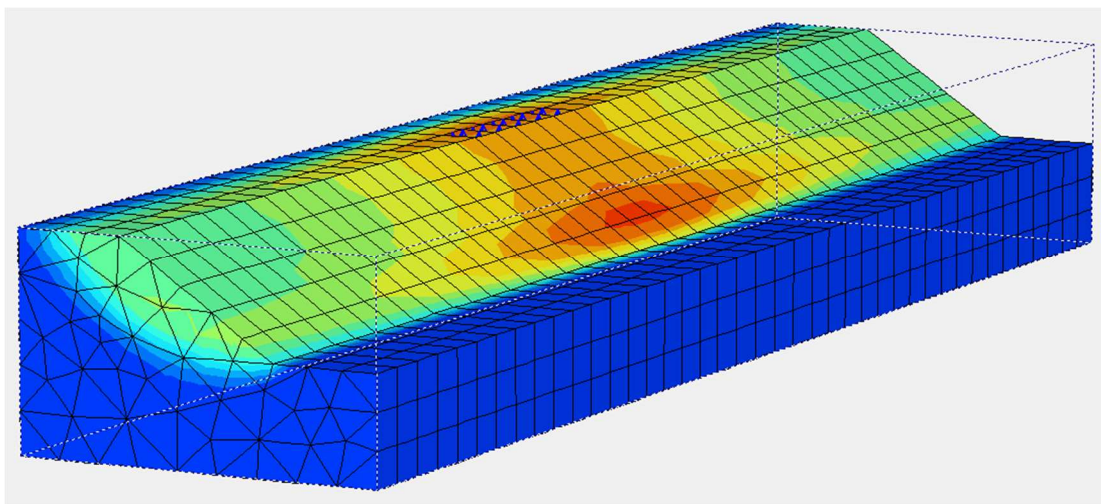
32. ábra: FS_{3D} és FS_{2D} közötti eltérés L_q függvényében homogén általános talaj esetén

Az eltérés közel 10%, ami a homogén kohéziós talajnál tapasztaltaknál magasabb. Itt is igazolódni látszik Chen & Chameau (1983) állítása, miszerint a térbeli modellezés hatása körcsúszólap esetén kevésbé jelentős.

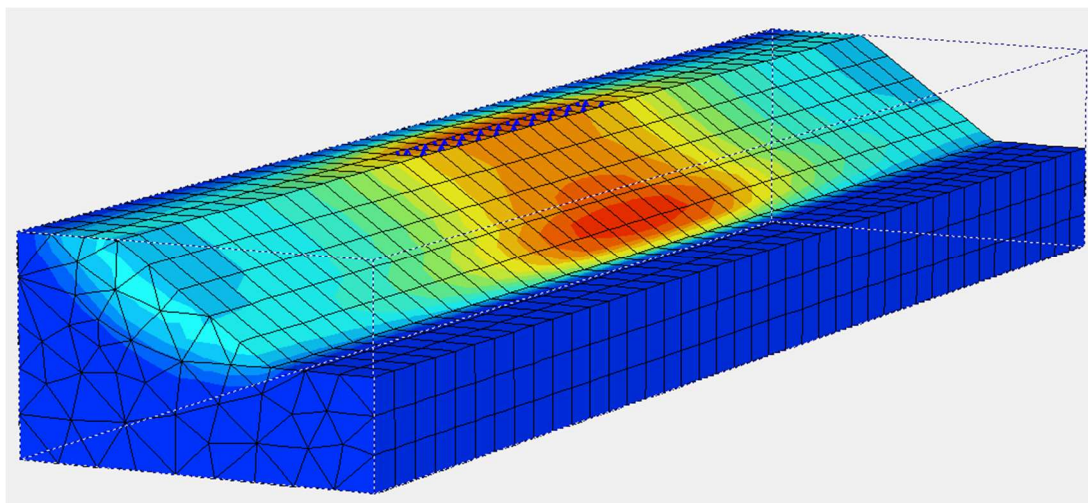
A háromdimenziós szoftverrel meghatározott csúszólapok a 33 – 36 ábrákon láthatók.



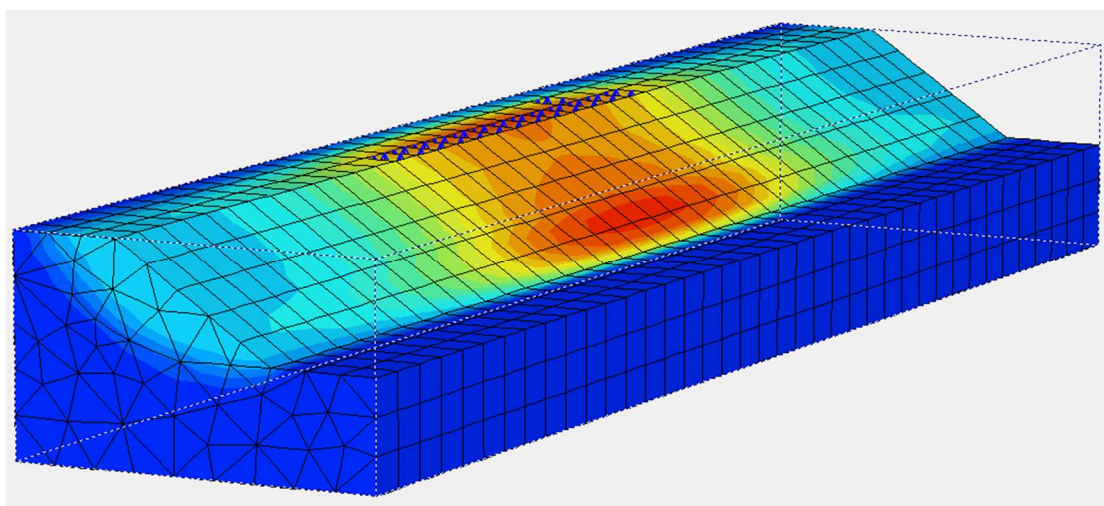
33. ábra: homogén általános talaj, $L_q = 10\text{ m}$



34. ábra: homogén általános talaj, $L_q = 20\text{ m}$



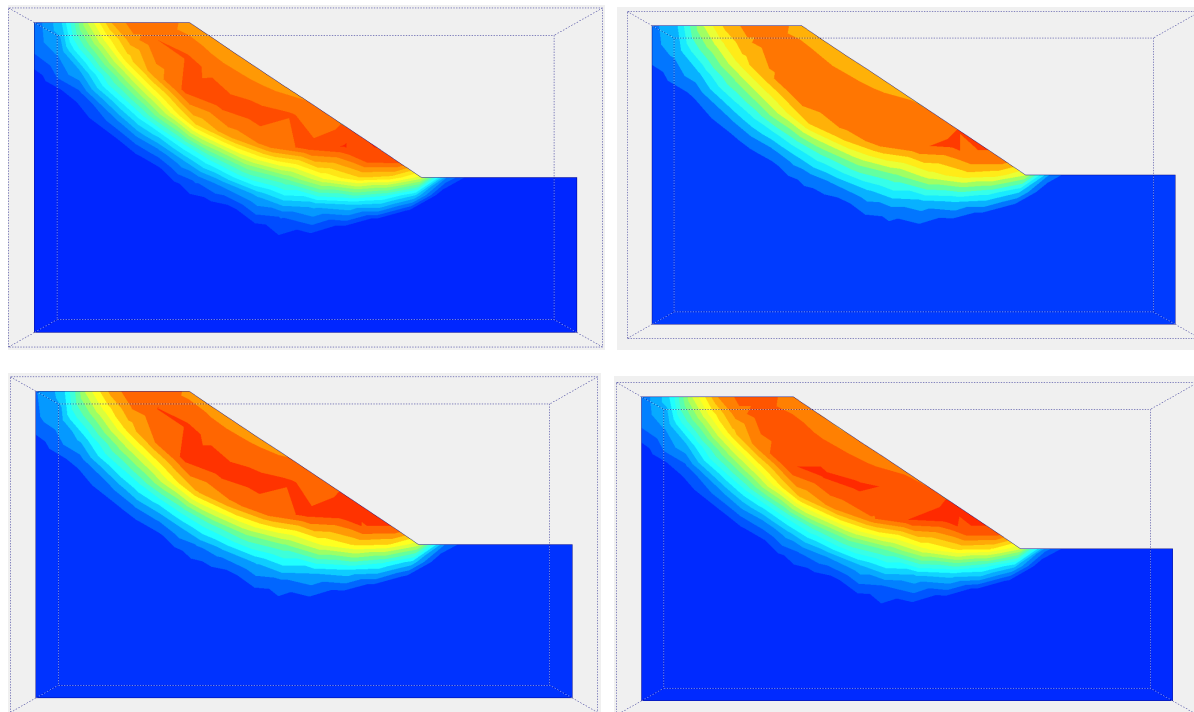
35. ábra: homogén általános talaj, $L_q = 40\text{ m}$



36. ábra: homogén általános talaj, $L_q = 50\text{ m}$

Jelen esetben is megfigyelhető az előző példánál tapasztalt tendencia, azaz a teher hatása kis kiterjedés esetén kevésbé befolyásolja a teljes rézsűn kialakuló csúszólap alakját. A teher hosszának növekedésével viszont a tönkremenetel eltolódik a lokális jelleg felé.

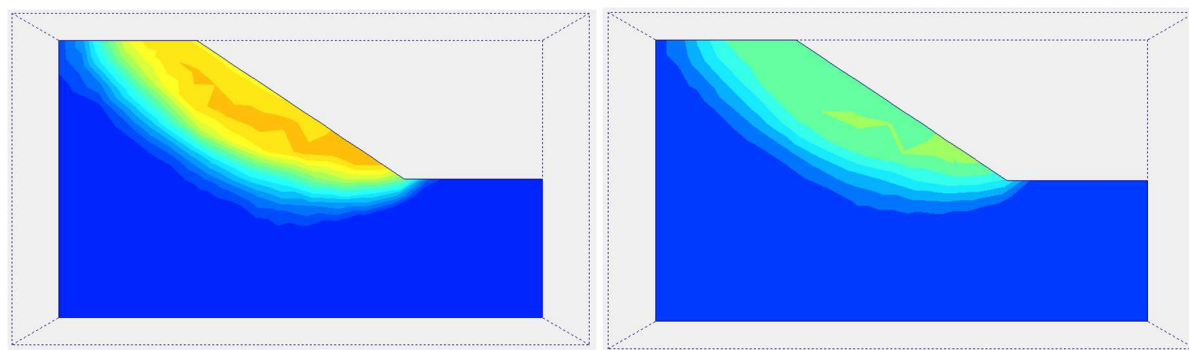
A kritikus keresztmetszetekben kialakuló csúszólapokat szemlélteti a 37. ábra.



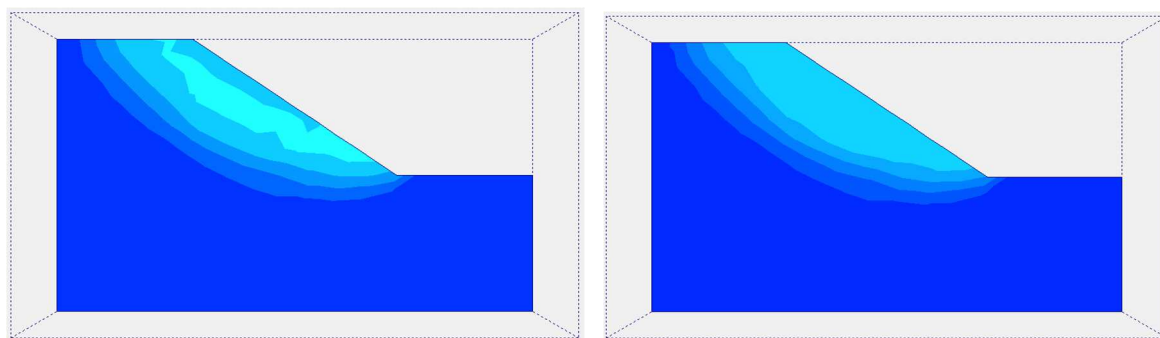
37. ábra: $L_q = 10$ m (balra fent), 20 m (jobbra fent), 40 m (balra lent) és 50 m (jobbra lent)

Látható, hogy a 2D és a 3D csúszólapok között nem figyelhető meg jelentős különbség. A térbeli eseteknél kialakult egy rövid alámetsző szakasz, de ez az eltérés adódhat abból, hogy a térbeli modellezés során durvább kiosztású végelem hálót alkalmaztunk a számítási idő csökkentése céljából. A durva kiosztás azonban nem eredményez eltérést a biztonsági tényező értékében.

Ennél a példánál érdemes megfigyelni a modell határoló lapjain kialakuló csúszólap alakulását a teher hosszának függvényében, mivel itt rajzolódik ki a leglátványosabban a teherhossz változásának hatása.

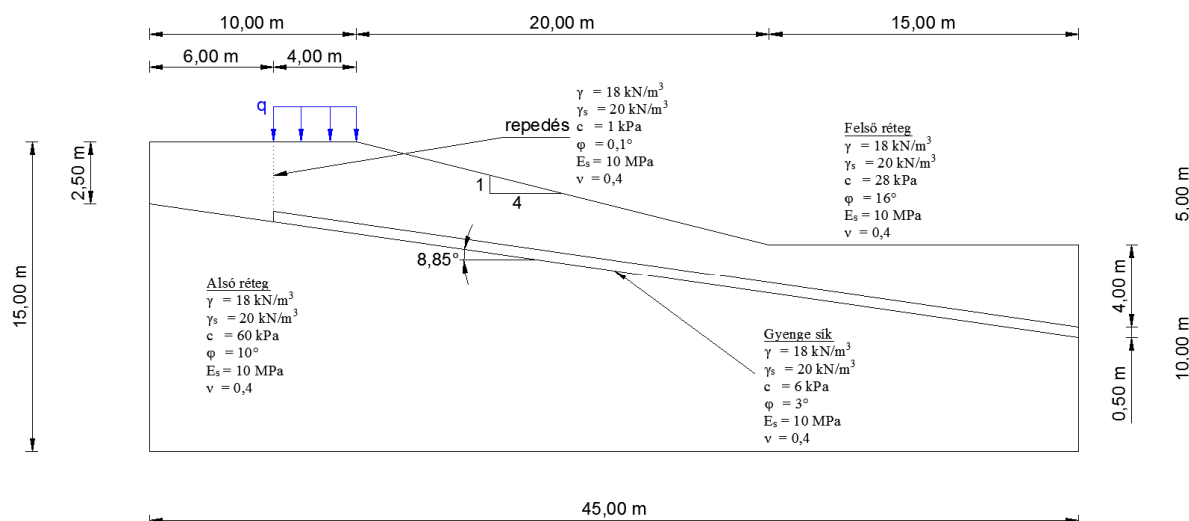


38. ábra: az oldallapokon kialakuló csúszólapok alakulása a teher kiterjedésének függvényében, $L_q = 10$ m (balra) és 20 m (jobbra)



39. ábra: az oldallapokon kialakuló csúszólapok alakulása a teher kiterjedésének függvényében, $L_q = 40$ m (balra) és 50 m (jobbra)

7.4 Gyenge sík



40. ábra: részsűgeometria gyenge sík esetén

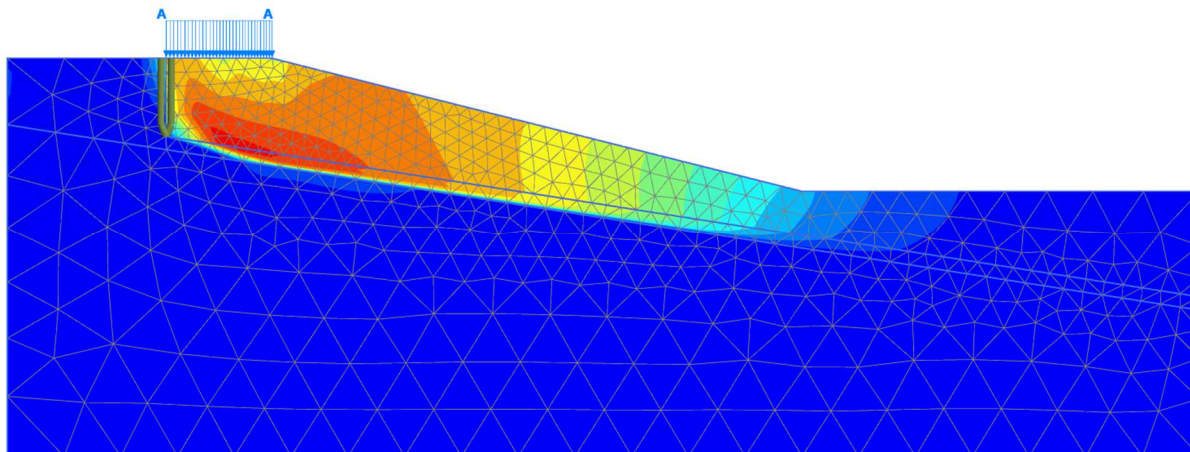
A 4. példában egy összetett talajrétegződésű rézsút vizsgáltam. A feltételezett repedésen (a végelelemes modellben interface elemként modelleztem) beszívargó víz hatására a két agyagréteg között kialakult egy alacsony nyírószilárdságú, gyenge sík, amely mentén a felső réteg lecsúszik. A q terhet a repedéssel határolt szakaszon belül működtettem, mivel a repedésen kívüli szakasz nincs hatással az állékonyságra. A térbeli vizsgálat során a repedést csak az adott teherhosszon aktiváltam, a közvetlenül nem terhelt felületeken nem.

A talajjellemzőket a 7. táblázat tartalmazza.

		felső réteg	alsó réteg	gyenge sík	repedés
nedves térfogatsúly	γ	18 kN/m ³	18 kN/m ³	18 kN/m ³	18 kN/m ³
telített térfogatsúly	γ_s	20 kN/m ³	20 kN/m ³	20 kN/m ³	20 kN/m ³
kohézió	c	28 kPa	60 kPa	6 kPa	1 kPa
belső súrlódási szög	φ	16°	10°	3°	0,1°
összenyomódási modulus	E _{oed}	21,4 MPa	21,4 MPa	21,4 MPa	21,4 MPa
Poisson - tényező	ν	0,4	0,4	0,4	0,4

7. táblázat

A kétdimenziós szoftverrel meghatározott csúszólap a 41. ábrán látható. A tönkremenetel az elvártak szerint alakul ki, mivel a felső réteg a gyenge síkon csúszik le. Megfigyelhető, hogy a talppont közelében kialakul a passzív földnyomás, a „hátlapon” viszont a tönkremeneteli felület a repedés mentén jön létre. A felső réteg nagy nyírószilárdsága miatt a repedés mögötti talajréteg önmagában is állékony marad, nem alakul ki aktív földnyomás. A cél az interface elem elhelyezésével az volt, hogy biztosíthassuk, hogy a peremfeltételek ne zavarják meg az eredményt.



41. ábra: kritikus csúszólap, gyenge sík, 2D

A 8. táblázat tartalmazza a kétdimenziós biztonsági tényezőt, valamint a 3D biztonsági tényezőket 10, 20, 40 és 50 m-es teherhossz esetén. A táblázatban a teher hossza L_q .

		FS
2D		1,54
3D	$L_q = 10$	2,02
	$L_q = 20$	1,99
	$L_q = 40$	1,95
	$L_q = 50$	1,93

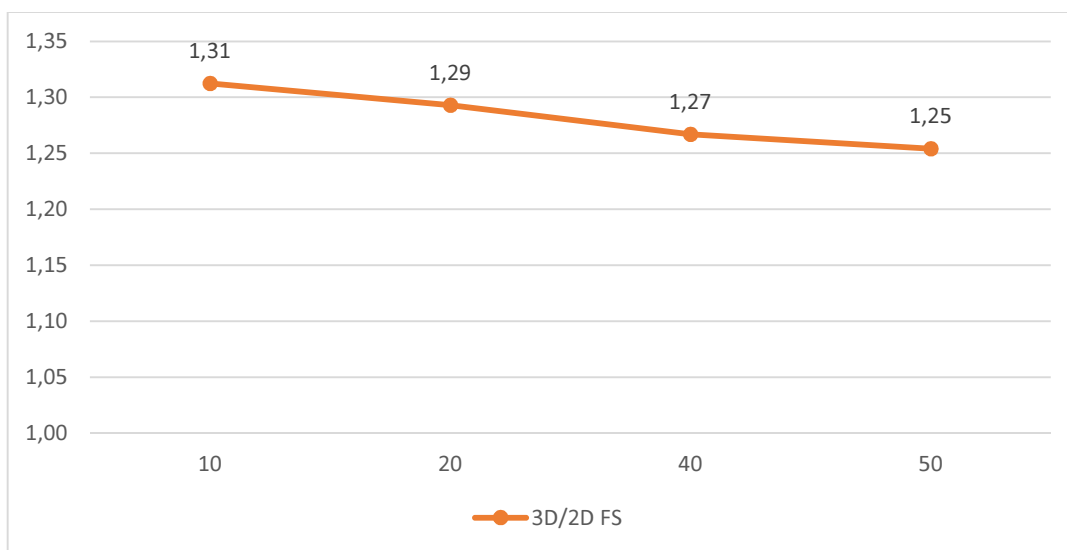
8. táblázat

A táblázatból látható, hogy a 3D biztonsági tényező jelentősen meghaladja a 2D biztonsági tényező értékét. Ez összhangban van Stark & Eid (1998) eredményeivel, valamint Chen & Chameau (1983) állításaival, melyek szerint síkcsúszólap esetén a 3D hatások sokkal jelentősebbek, és ezáltal magasabb biztonsági tényezőt eredményeznek, mint körcsúszólap esetén. Ez magyarázható azzal, hogy síkcsúszólap esetén a lecsúszó földtömeg oldalain fellépő erők fajlagosan nagyobb felületen fejtik ki hatásukat.

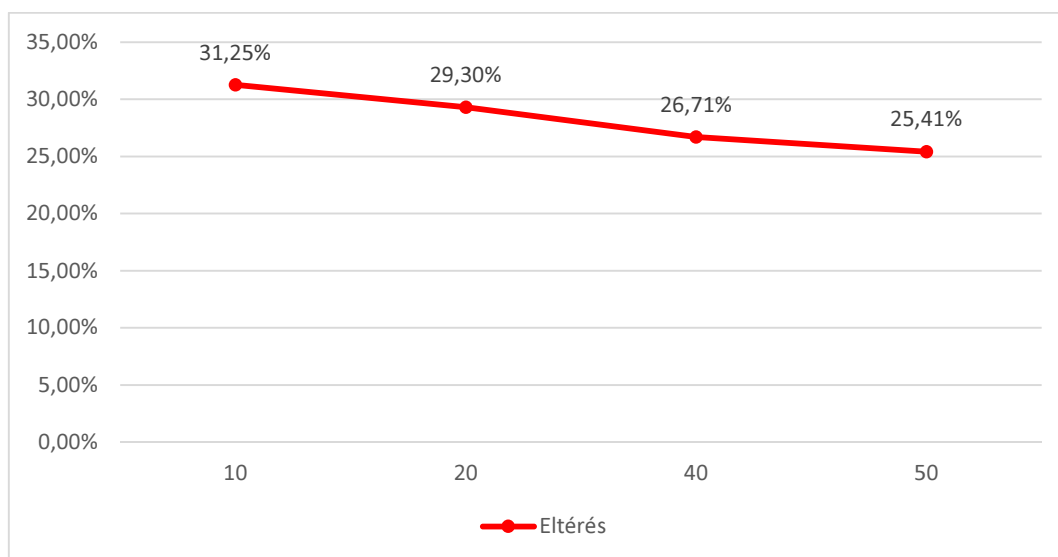
A biztonsági tényező is intenzívebben csökken. Ennek oka, hogy teher hosszának növelésével növekszik a lecsúszó földtömeg súlya, a térbeli hatások viszont gyakorlatilag konstansok (mivel ugyanakkora felületre hatnak). Tehát a tönkremenetelt okozó hatás növekszik, viszont a tönkremenetelt akadályozó, az oldallapokon fellépő hatások nem változnak.

Az FS_{3D}/FS_{2D} arányt a teher hossza függvényében a 42. ábra ábrázolja.

Az FS_{3D} és az FS_{2D} közötti eltérés a 43. ábrán látható.



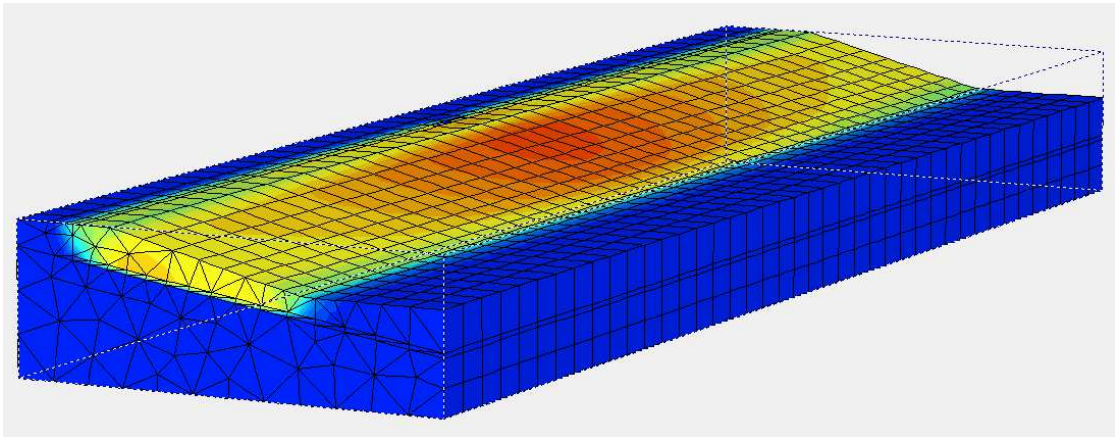
42. ábra: 3D/2D FS arány L_q függvényében síkcsúszólap esetén



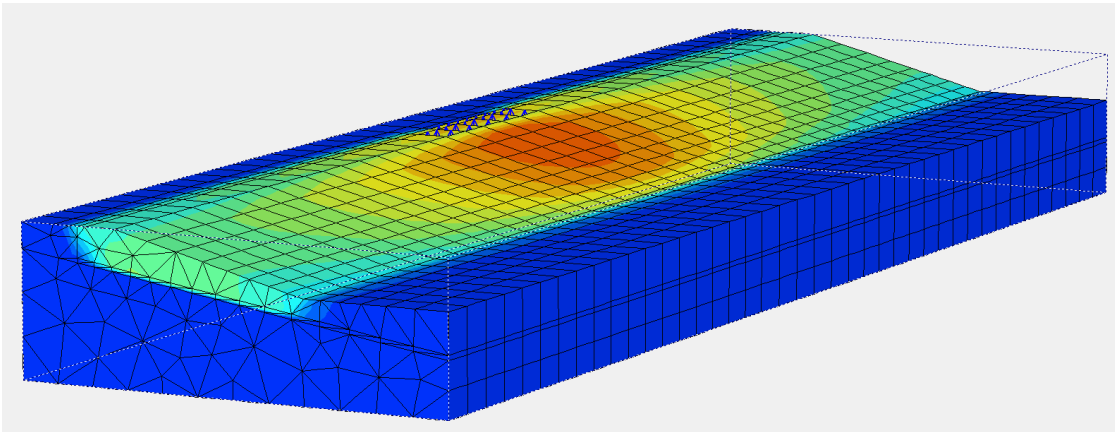
43. ábra: FS_{3D} és FS_{2D} közötti eltérés L_q függvényében síkcsúszólap esetén

Megfigyelhető, hogy a különbség jóval nagyobb, mint az előző példákban tapasztaltaknál, meghaladja a 30%-ot is.

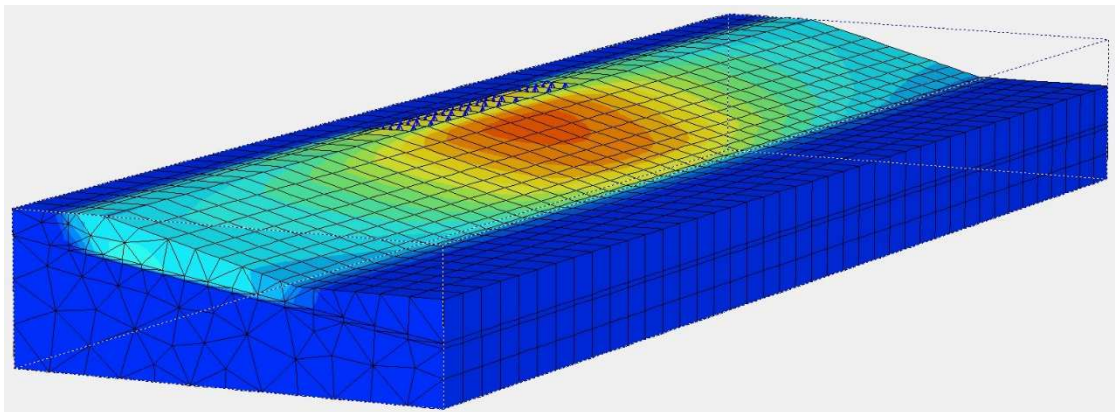
A háromdimenziós szoftverrel meghatározott csúszólapok a 44 – 47 ábrákon láthatók.



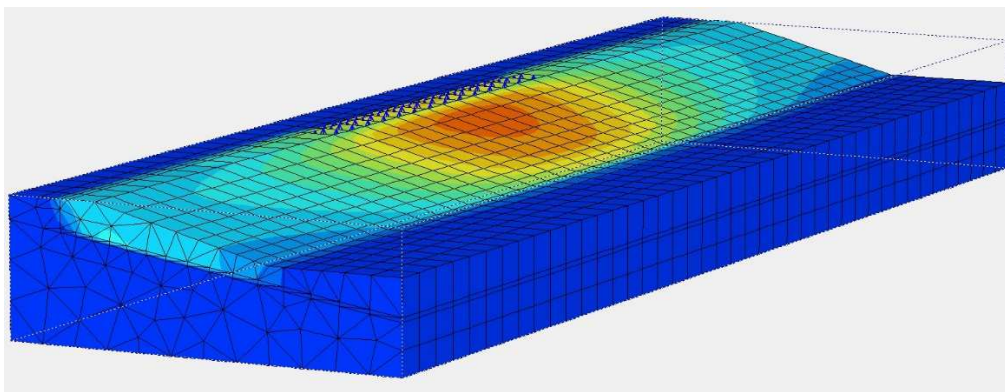
44. ábra: gyenge sík, $L_q = 10\text{ m}$



45. ábra: gyenge sík, $L_q = 20\text{ m}$



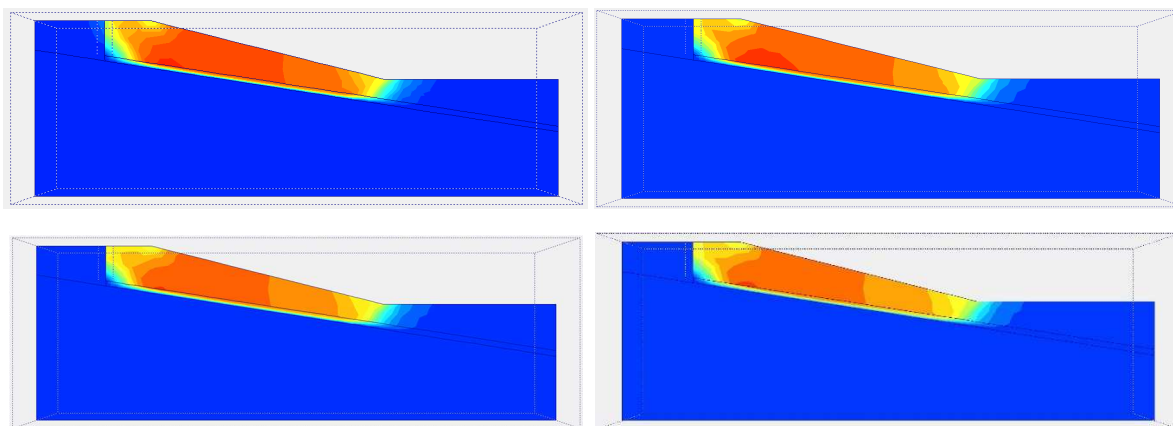
46. ábra: gyenge sík, $L_q = 40\text{ m}$



47. ábra: gyenge sík, $L_q = 50$ m

A teher hossza itt is ugyanúgy befolyásolja a tönkremeneteli zóna kiterjedését, mint az előző példákban, tehát a terhelt felület növekedésével a tönkremenetel kiterjedése csökken.

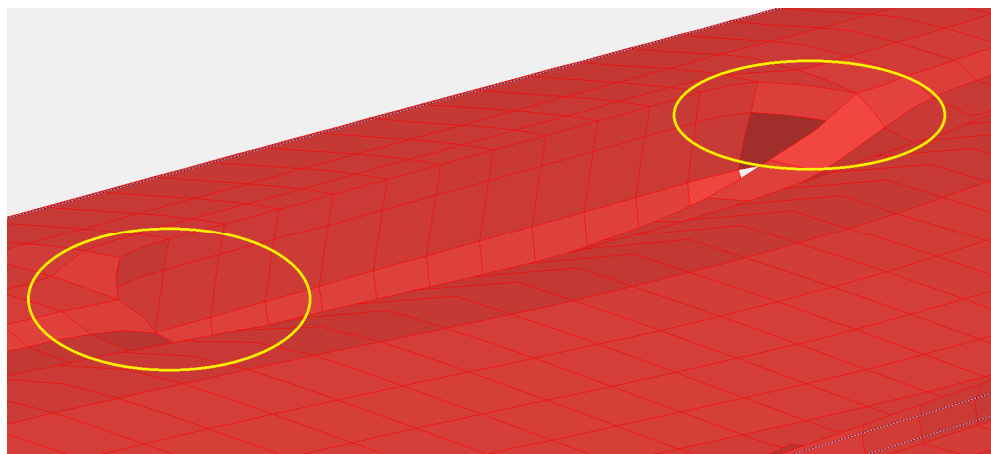
A kritikus keresztmetszetekben kialakuló csúszólapokat szemlélteti a 48. ábra.



48. ábra: $L_q = 10$ m (balra fent), 20 m (jobbra fent), 40 m (balra lent) és 50 m (jobbra lent)

Látható, hogy a csúszólapok nem változnak jelentősen a növekvő teherhossz hatására.

Érdekes jelenség figyelhető meg a csúszólapok oldalainak kialakulásakor. Ideális, homogén esetben a csúszólap oldalai függőlegesek, mivel ekkor a legkisebb a fajlagos felület, azaz így lesz a legkisebb a nyírószilárdság. Ezt szemlélteti a 49. ábra.



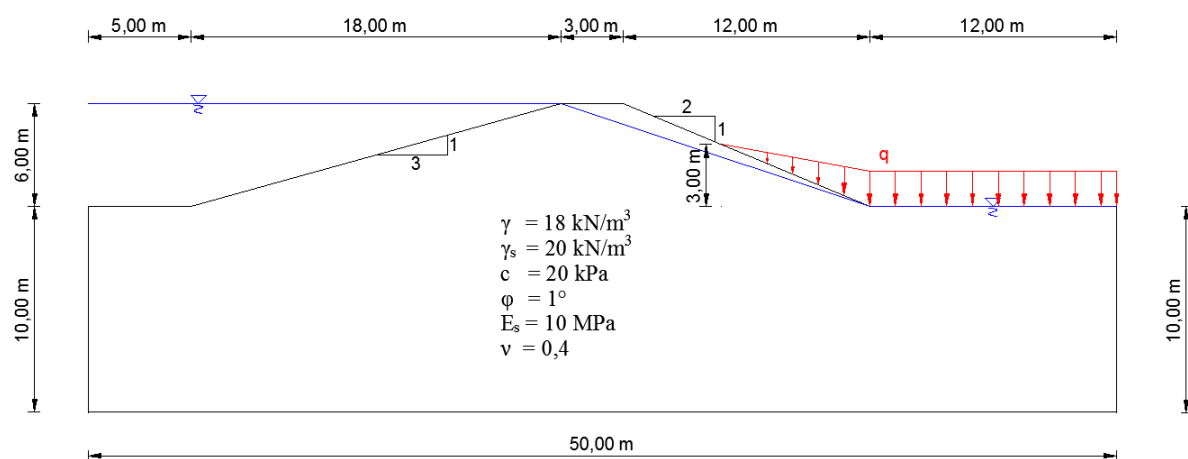
49. ábra: függőleges oldallapok kialakulása

Továbbá az ábráról az is látszik, hogy a repedés hatására a hátlap függőleges, azaz nem alakul ki az aktív földnyomás.

7.5 Bordás megtámasztás

Az 5. példában egy valós problémát modelleztem. Bordás megtámasztást akkor szoktunk alkalmazni, amikor a gátak biztonsági tényezője a víznyomás miatt lecsökken $FS = 1,00$ körüli értékre, tehát a tönkremenetel határára kerül a szerkezet. Ekkor megerősítés szükséges, amely az egymástól szabályos távolságokra elhelyezett bordákkal oldható meg.

A vizsgált modellben a bordákat megoszló terhelésként modelleztem. A helyettesítő megoszló terhelés értéke a 2D analízis során $q = 17,5$ kPa, a 3D vizsgálat során $q = 35$ kPa, mivel a borda szélessége 2 m. A bordákat 4 m-enként helyeztük el. A 3D modell oldalain a lokális biztonság növelésére magasabb talajszintet adtam meg azon okból kifolyólag, hogy a tönkremenetelt a bordákkal megerősített zónára korlátozzam. A talaj 2 m magas.



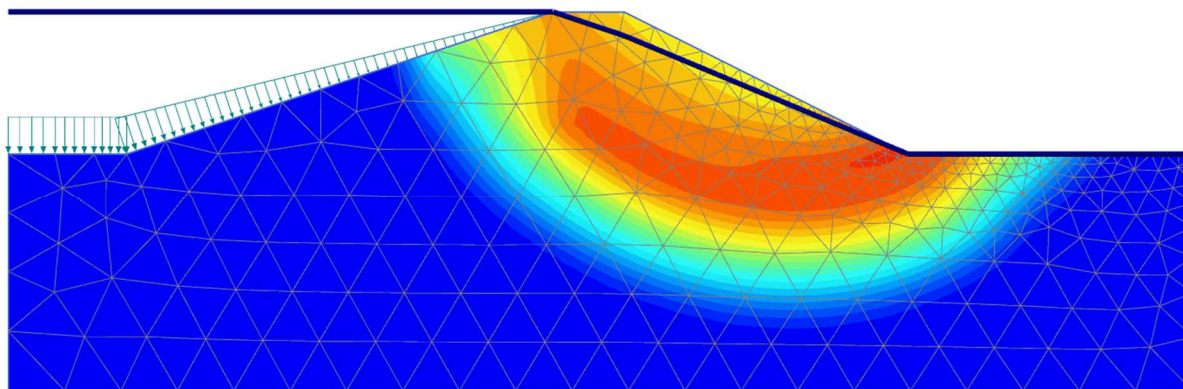
50. ábra: bordás megtámasztással megerősített gát geometriája

A talajjellemzőket a 9. táblázat tartalmazza.

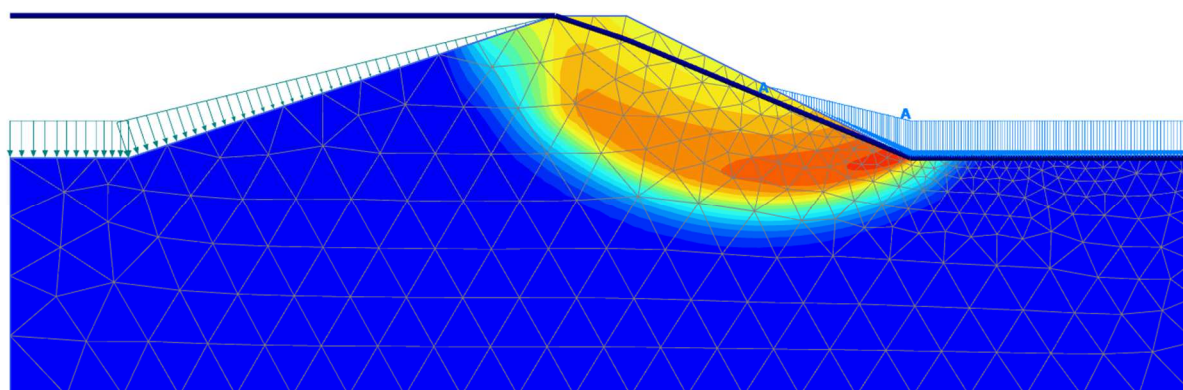
nedves térfogatsúly	γ	18 kN/m ³
telített térfogatsúly	γ_s	20 kN/m ³
kohézió	c	20 kPa
belső súrlódási szög	φ	1°
összenyomódási modulus	E_{oed}	21,4 MPa
Poisson - tényező	ν	0,4

9. táblázat

A bordás megtámasztás nélküli viszonyokat mutatja az 51. ábra, az 52. ábra pedig a bordás megtámasztással kialakuló csúszólapot mutatja. Mindkét esetben körcsúszólap alakul ki. A különbség látványos, a bordás megtámasztás ugyanis jelentősen csökkenti a csúszólap méretét, a megtámasztás nélkül alámetsző csúszólap talppontivá válik.

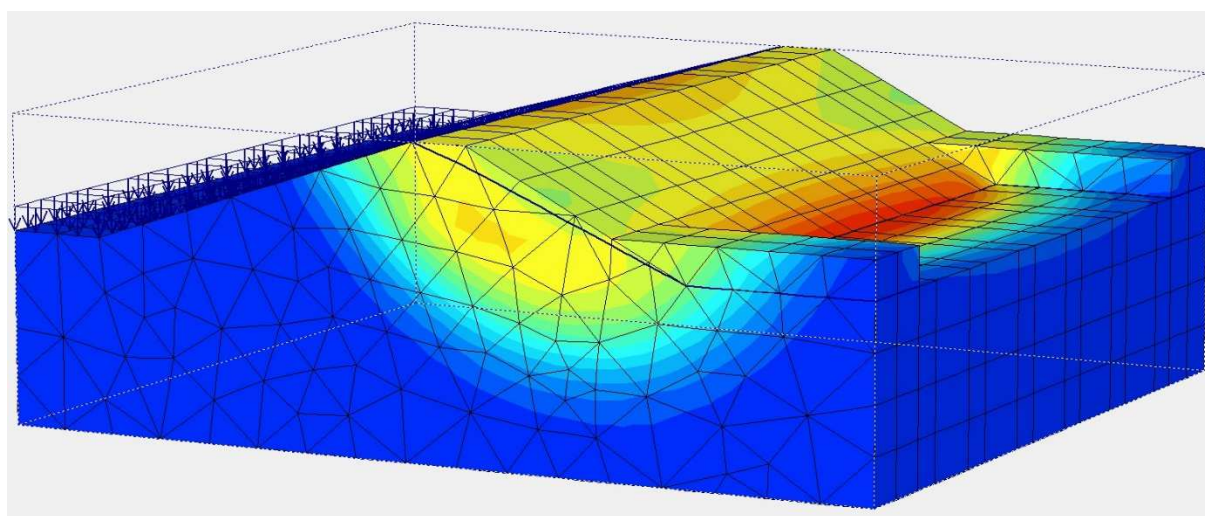


51. ábra: kritikus csúszólap, bordák nélkül, 2D

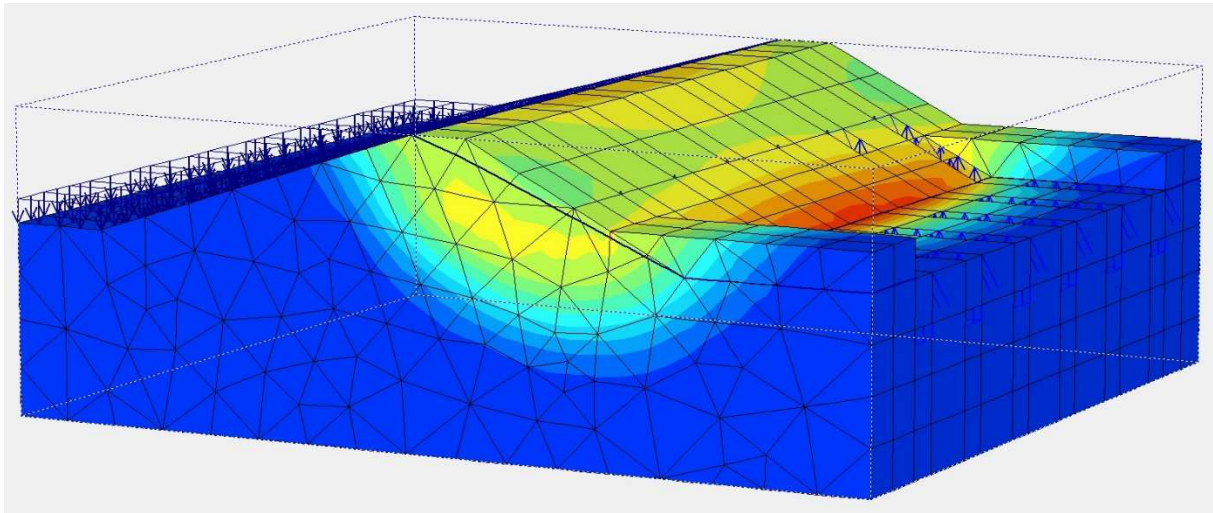


52. ábra: kritikus csúszólap, bordákkal, 2D

A 2D biztonsági tényező bordák nélkül $FS = 1,00$, bordákkal $FS_{2D} = 1,12$. A 3D biztonsági tényező magasabb, bordák nélkül $FS = 1,09$, bordákkal $FS_{3D} = 1,18$. Tehát az eltérés jelentős. Az eredményekből látszik, hogy a térbeli vizsgálat szerint a rézsű nem megy tönkre.

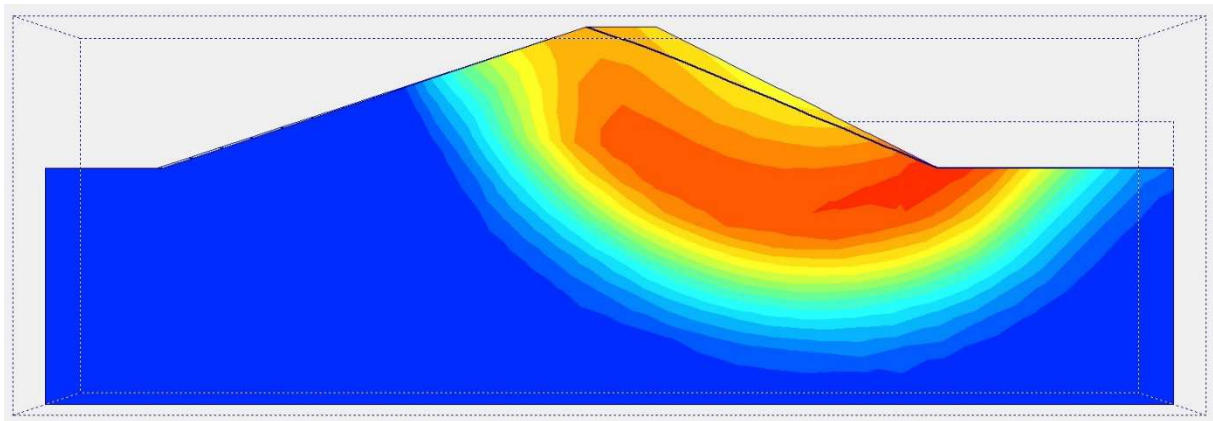


53. ábra: 3D tönkremenetel, bordák nélkül

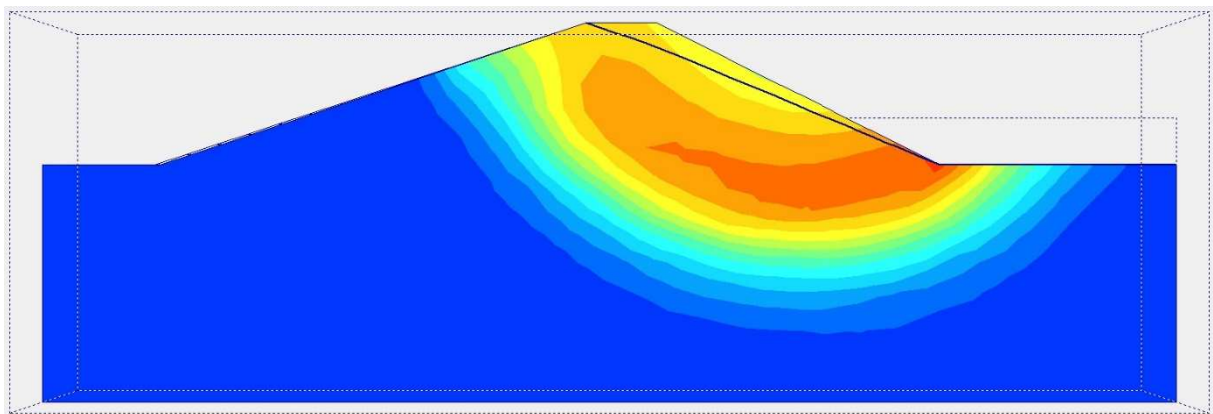


54. ábra: 3D tönkremenetel, bordákkal

A középben lévő keresztmetszet:



55. ábra: középső keresztmetszet (3D), bordák nélkül

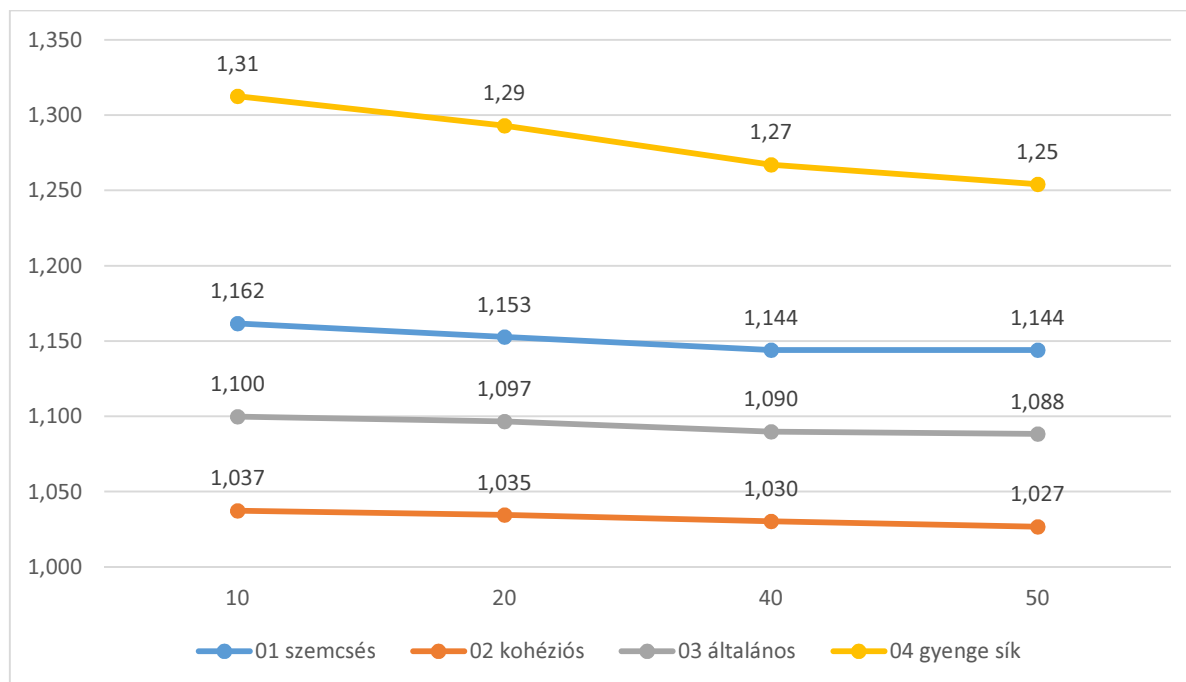


56. ábra: középső keresztmetszet (3D), bordákkal

Látható, hogy a csúszólap inkább a bordák nélküli esetre hasonlít, de kevésbé alámetsző, mint a 2D esetben. Viszont itt is megfigyelhető a csúszólap kiterjedésének csökkenése.

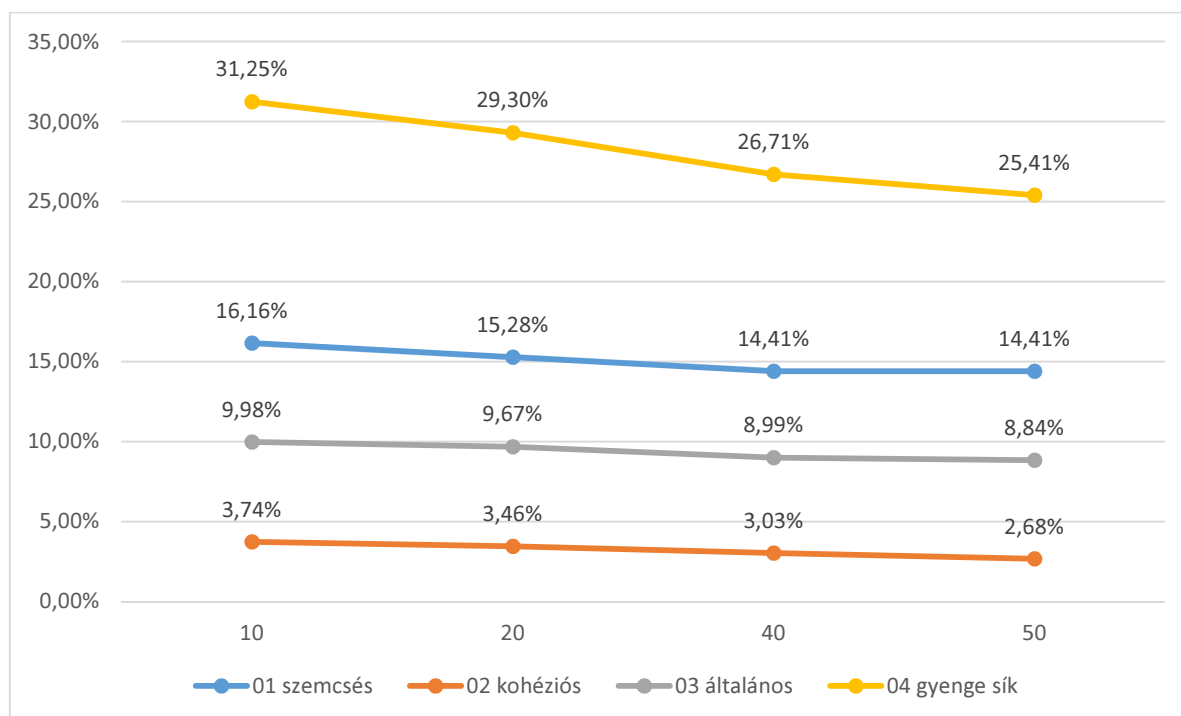
7.6 Összehasonlító vizsgálatok eredményeinek összegzése

Az első 4 példa eredményeit összefoglalva az 57. ábra mutatja.



57. ábra: 3D/2D FS arány L_q függvényében

A százalékos eltérés az 58. ábrán látható.



58. ábra: százalékos eltérés L_q függvényében

A grafikonok szemléletes képet mutatnak a 3D biztonsági tényező alakulásáról, a különböző talajtípusokat egy diagramon ábrázolva.

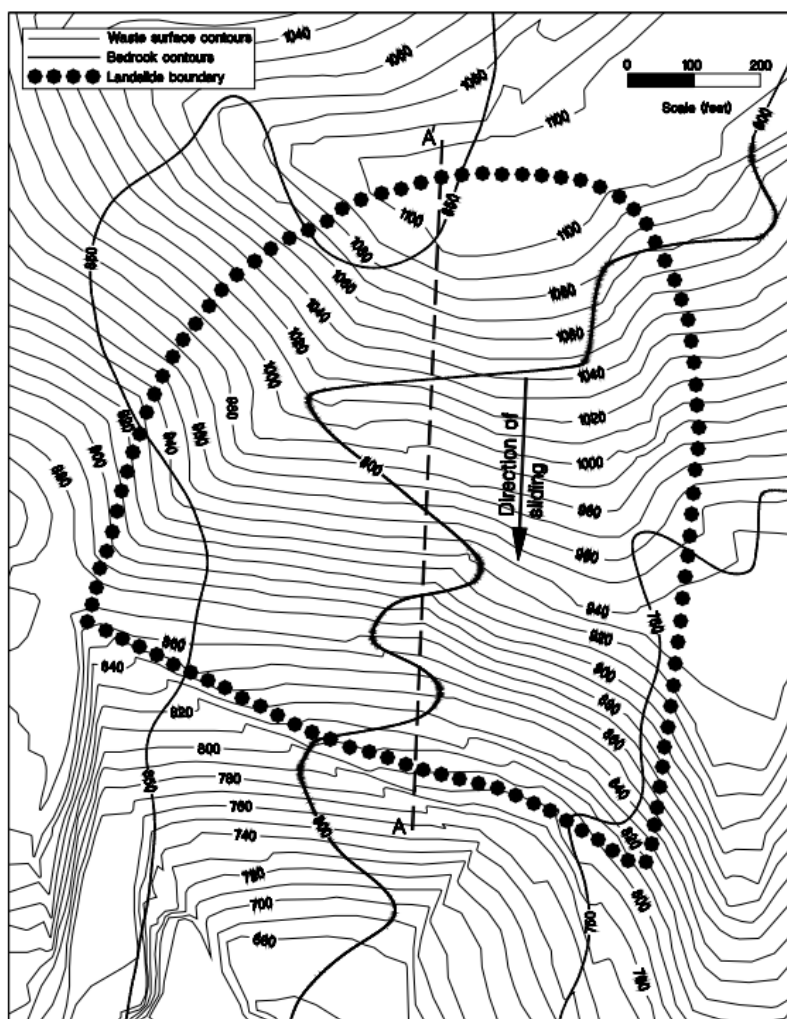
Látszik, hogy a 3D hatásokra a körcsúszólapos tönkremenetel kevésbé érzékeny, az eltérés maximum 10%. Szemcsés talaj esetén az eltérés 15% körüli.

Síkcsúszólapos tönkremenetel esetén a térbeli hatások sokkal jelentősebbek, az eltérés elérheti akár a 30%-ot is.

8. Esettanulmányok

A következő két esettanulmány a 3D állékonyságvizsgálat gyakorlati alkalmazását hivatott bemutatni. Mindkét eset Stark & Eid *Performance of three-dimensional slope stability methods in practice* (1998) c. publikációjából származik.

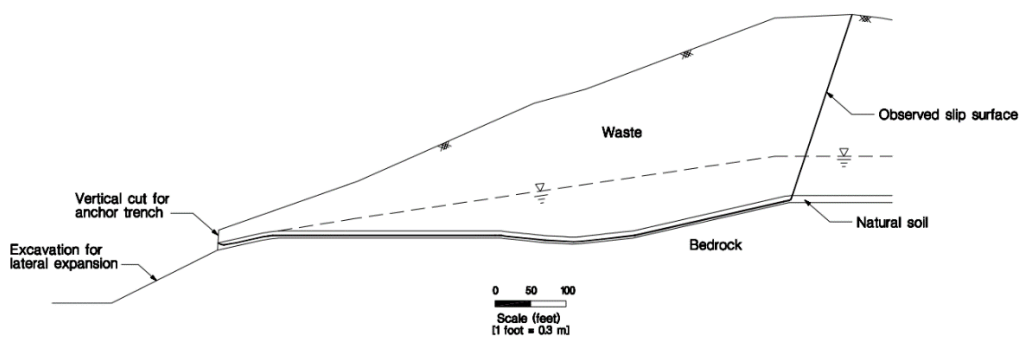
8.1 1. esettanulmány: hulladéklerakó tönkremenetele, Cincinatti (Stark & Eid, 1998)



59. ábra: helyszínrajz, Cincinatti (Stark & Eid 1998)

Ez az esettanulmány bemutatja, hogy back-analízis esetén a háromdimenziós megközelítés pontosabb eredményt ad a visszaszámolt nyírószilárdsági paraméterekre, mint a kétdimenziós módszerek.

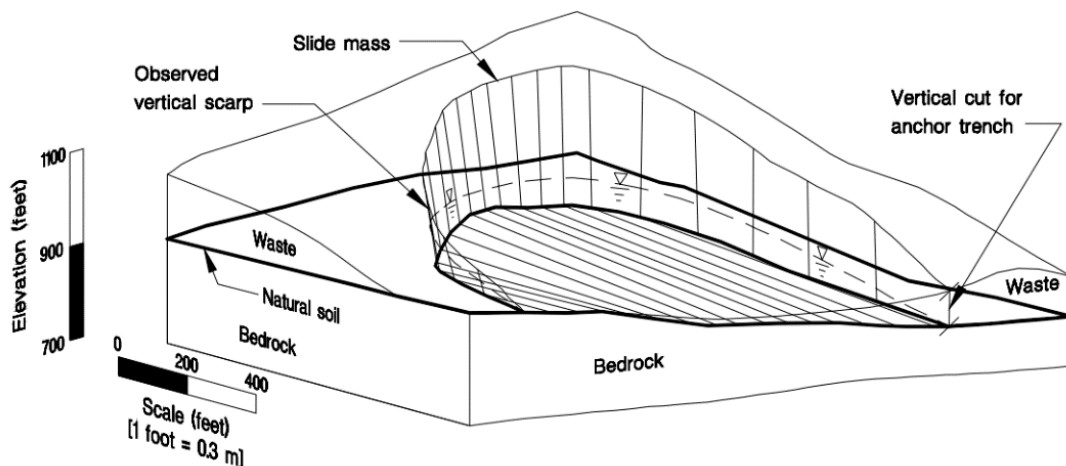
Az itt tárgyalt tönkremenetel az USA történetének egyik legnagyobb földcsúszása, közel 1,1 millió m^3 hulladék mozdult meg. A hulladéklerakót kemény kőzetre tervezték, viszont a hulladék és a kőzetréteg között kialakult egy vékony talajréteg, gyenge nyírószilárdsági jellemzőkkel. A tönkremenetelt oka, hogy a rézsú talpánál bevágást létesítettek, hogy le tudják fektetni a tervezett geoműanyag réteget. Az eltávolított földtömeg miatt a hulladék elvesztette állékonyságát, és lecsúszott. A helyszíni beszámolók szerint a rézsú egyetlen nagy tömbként mozdult el. A gyenge sík jelenlétéből és a tömbként történő mozgásból egyértelműen síkcsúszólapos tönkremenetelt feltételeztek, amelyet később megerősített a tény, hogy a lecsúszó földtömeg hátsó húzott oldala az aktív földnyomásnak megfelelően alakult ki.



60. ábra: síkcsúszólap egy közbelső keresztmetszetben (Stark & Eid 1998)

Mivel a rézsút újra kívánták építeni, így szükséges volt meghatározni a gyenge sík nyírószilárdsági jellemzőit. A hulladék becsült jellemzői: nedves térfogatsúlya $10,2 \text{ kN/m}^3$, kohéziója 41 kPa és a belső súrlódási szöge 35° . A back-analízis során a gyenge sík kohézióját 0 kPa -nak feltételezték.

Stark & Eid (1998) háromdimenziós vizsgálatot hajtott végre a CLARA/W szoftvert alkalmazva, síkcsúszólap feltételezésével. A CLARA/W szoftver az oszlopok módszerét használja a vizsgálat során. A vizsgálat során feltételezett csúszólap a 49. ábrán látható.



61. ábra: a 3D vizsgálat során modellezett csúszólap (Stark & Eid 1998)

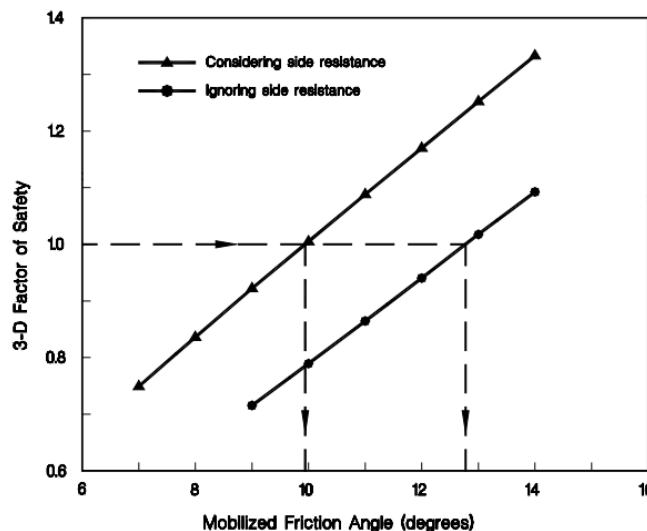
A függőleges oldallapok mentén egy fiktív réteget feltételezett, melynek térfogatsúlya megegyezik hulladék térfogatsúlyával, belső súrlódási szöge 0° , kohéziója pedig az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$c_i = K_0 \sigma'_v \tan \varphi'$$

ahol σ'_v az átlagos hatékony függőleges feszültség a csúszólap függőleges oldalán, φ' a hulladék hatékony belső súrlódási szöge, K_0 pedig a nyugalmi földnyomási tényező (Jáky: $K_0 = 1 - \sin \varphi'$).

A visszszámolt belső súrlódási szög meghatározásakor kétféleképpen járt el: elsőként figyelembe vette az oldalakon ébredő ellenállást a már ismertetett fiktív réteg alkalmazásával, majd pedig elhanyagolta az oldalak ellenállását (ez az eset gyakorlatilag megfelel a kétdimenziós vizsgálat feltételeinek).

Az oldallellenállás figyelembe vételekor a gyenge sík belső súrlódási szöge 10° -ra adódott, ami jó egyezést mutat a laboratóriumi vizsgálatok eredményeivel. Az oldallellenállás elhanyagolása esetén a belső súrlódási szög értéke $12,8^\circ$, ami körülbelül 30%-kal becsüli túl a valós értéket.



62. ábra: a visszszámolt belső súrlódási szög, a 3D hatások figyelembe vételével és a 3D hatások elhanyagolásával (Stark & Eid 1998)

Belátható tehát, hogy ha a kétdimenziós vizsgálat eredményeiből kiindulva szeretnénk kivitelezni a rézsű rekonstrukcióját, akkor a biztonság kárára tévednénk, mivel a valósnál nagyobb nyírószilárdságot feltételeznénk a számítás során. Így fennállna egy újabb tönkremenetel veszélye.

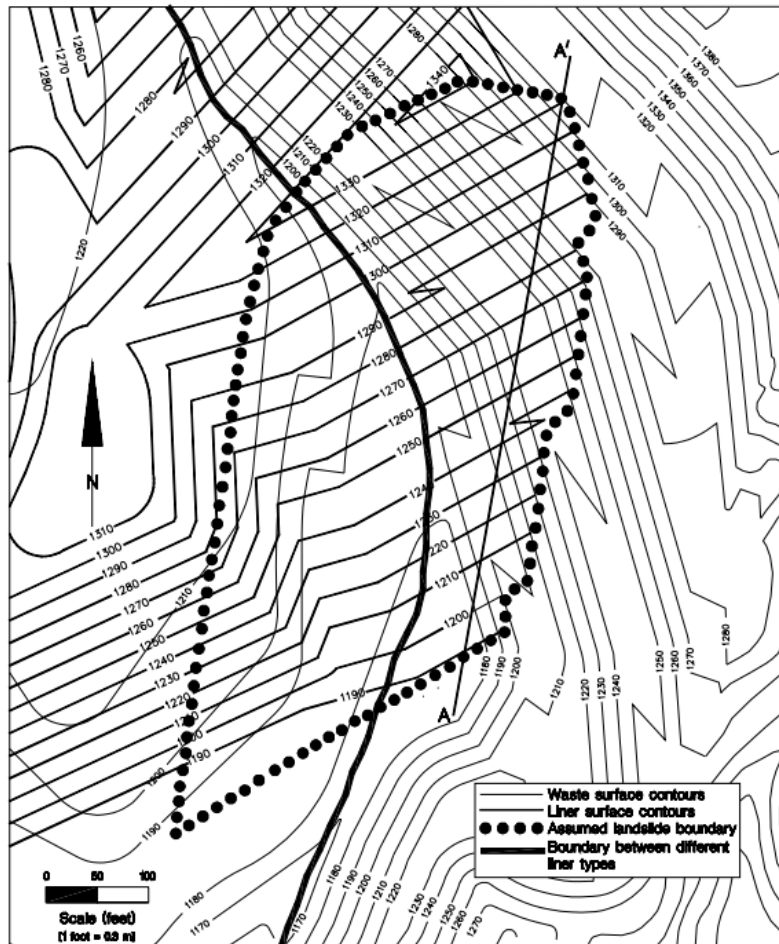
Tehát a példa igazolja, hogy a háromdimenziós eljárás pontosabb eredményt ad a back-analízis során, és a biztonság javára közelít, szemben a kétdimenziós módszerrel.

8.2 2. esettanulmány: hulladéklerakó tönkremenetele, Dél-Kalifornia (Stark & Eid, 1998)

Ebből az esetből világosan látszik a 3D vizsgálat elvégzésének fontossága, ugyanis így meghatározható a földcsúszás várható iránya. Ez az a kritikus irány, amelynél a legkisebb a földtömegre vonatkozó biztonsági tényező. Továbbá ez a tönkremenetel szemléletes példája annak, hogy a 2D

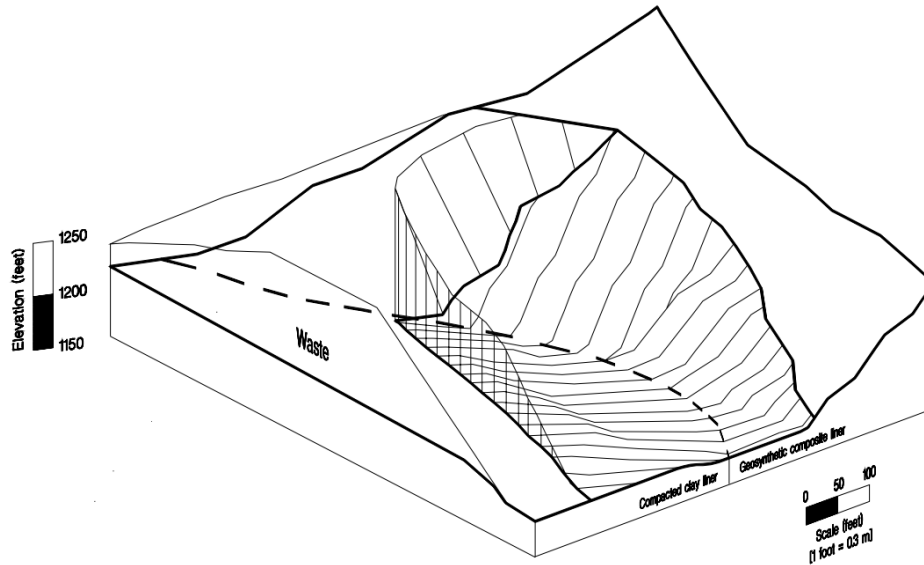
módszerekkel végzett, egyébként megfelelő tervezés eredményei is félrevezetőek lehetnek, ha nem számolunk a térbeli jellemzőkkel, inhomogenitással.

A helyszínrajzon látható pontozott vonallal határolva a lecsúszó földtömeg. Látható, hogy a hulladék kétféle altalajon fekszik: nyugat felé egy tömörített agyagrétegen és kelet felé egy geoműanyag rétegen. A két réteg közötti határ a helyszínrajzon vastag vonallal van jelölve. A helyszíni vizsgálatokból kiderült, hogy a három réteg (hulladék, tömörített agyag, geoműanyag) más-más dőlésszöggel és dőlésiránnyal rendelkezik. Ezen körülményekből kifolyólag nem lehetséges megfelelő pontosságú 2D vizsgálatot végrehajtani, mivel ezeket a jellemzőket nem lehet egyetlen keresztmetszetben modellezni.



63. ábra: helyszínrajz, Dél-Kalifornia (Stark & Eid 1998)

Laboratóriumi vizsgálatok alapján a hulladék nedves térfogatsúlya $10,2 \text{ kN/m}^3$, kohéziója 5 kPa , belső súrlódási szöge 35° . A tömörített agyagréteg kohéziója $12,8 \text{ kPa}$, belső súrlódási szöge 19° . A geoműanyag kohéziója 0 kPa , belső súrlódási szöge 13° .



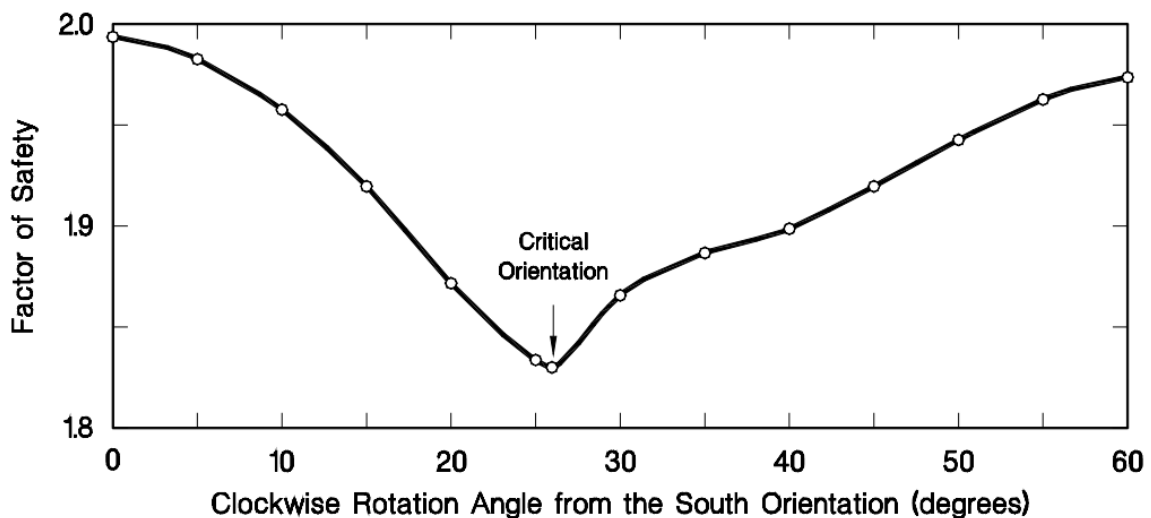
64. ábra: a 3D vizsgálat során modellezett csúszólap (Stark & Eid 1998)

Stark végrehajtott egy háromdimenziós vizsgálatot, mely során a CLARA/W szoftverrel vizsgálta a feltételezett csúszólapot. A szoftver az oszlopok módszerét alkalmazva adott egy közelítő értéket a legalacsonyabb biztonsági tényezőre. Az 52. ábrán látható csúszólap függőleges oldalain fellépő ellenállást egy fiktív réteg alkalmazásával modellezte. A fiktív réteg térfogatsúlya megegyezik hulladék térfogatsúlyával, belső súrlódási szöge 0° , kohéziója pedig az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$c_i = K_0 \sigma'_v \tan \varphi'$$

ahol σ'_v az átlagos hatékony függőleges feszültség a csúszólap függőleges oldalán, φ' a hulladék hatékony belső súrlódási szöge, K_0 pedig a nyugalmi földnyomási tényező (Jáky: $K_0 = 1 - \sin \varphi'$).

Az ábrán látható, hogy a mozgás várható iránya a déli iránytól az óramutató járásával megegyezően 26° -nál adódik, mivel itt a legkisebb a biztonsági tényező, értéke 1,83.



65. ábra: 3D biztonsági tényező a dél iránytól való elfordulás függvényében (Stark & Eid 1998)

A vizsgálat eredménye jó egyezést mutatott a valós kialakult viszonyokkal. Ezért a háromdimenziós vizsgálat javasolt, amennyiben a jelenlegi esettanulmányban bemutatott összetett topográfiai viszonyok fennállnak, mivel ilyen komplex problémákat már nem vagyunk képesek megfelelő pontossággal kétdimenziósként modellezni.

9. Konklúzió

Mint ahogyan várható volt, a 2D és a 3D állékonyságvizsgálattal kapott biztonsági tényező nem egyezik meg. A vizsgált példákban a 3D biztonsági tényező rendre nagyobb volt, mint a 2D.

A dolgozatban az alábbi megállapításokra jutottam:

1. Szemcsés rézsű esetén a 3D és a 2D biztonsági tényező nem egyezik meg, ha a rézsűre külső terhelés hat.
2. Igazoltam, hogy körcsúszólap esetén a 3D hatások kevésbé jelentősek, ellentétben a síkcsúszólapal, amelynél a 2D és a 3D biztonsági tényező közötti eltérés akár 30% is lehet.
3. A külső terhelés hosszának változása szemcsés talaj, valamint körcsúszólapos tönkremenetel esetén kevésbé van hatással a 3D biztonsági tényező értékére (a változás 1-2%), síkcsúszólap esetén viszont jelentősebben befolyásolja a 3D biztonsági tényező változását (~5%) a modellezett viszonyok mellett.
4. A külső terhelés mindegyik esetben hasonló viselkedést mutatott. $L_q = 10$ m esetén a teher nem befolyásolta jelentősen a rézsű globális tönkremenetelét, lokális jellegű működést mutatott. A teher hosszának növelésével arányosan csökken a tönkremeneteli felület nagysága. Nagy teherhossz esetén a rézsű lokálisan, a közvetlenül terhelt zónában megy tönkre.
5. Egyszerű geometria esetén nem célszerű 3D vizsgálatot végezni, mert az eltérés kisebb, mint 5%. Azonban jó, ha a tervező, illetve a szakvéleményt készítő személy nem feledkezik meg arról, hogy itt egy közelítést alkalmaz.
6. A 2D analízis a tervezés során könnyebben alkalmazható, mert alábecsüli a biztonsági tényezőt, így a biztonság javára közelít.
7. A 3D vizsgálatot akkor célszerű alkalmazni, amikor már bekövetkezett tönkremenetelekből számoljuk vissza a talajjellemzőket (back-analízis). Illetve megfelelő pontossággal kizárólag a háromdimenziós modellezés képes kezelni az inhomogenitásokat, esésváltozásokat.
8. Jelentős többletinformációt adhat a 3D vizsgálat, mert segítségével meghatározható a várható rézsűcsúszás iránya, összetett, bonyolult felszíni viszonyok esetén is.

10. További kutatási lehetőségek a témában

- Rézsűhajlás változásának hatása a 3D biztonsági tényezőre, összehasonlítása a 2D modellezés eredményeivel.
- A felszíni teherintenzitás változásának hatása a 3D biztonsági tényezőre.
- Korábbi publikációkban közölt, 2D-re vonatkozó mintapéldák modellezése 3D-ben és az eredmények összehasonlítása.

- Valós tönkremenetel vizsgálata 3D-ben, a csúszólapon lévő nyírószilárdsági paraméterek visszaszámolása (back-analízis) 3D és 2D megfontolások alapján, az eredmények összehasonlítása.
- Szivárgás és egyéb vízmozgás hatása a 3D biztonsági tényezőre.
- Kvázi-statisztikus vizsgálat hatása a 3D biztonsági tényezőre.

11. Köszönetnyilvánítás

Köszönetem szeretném kifejezni konzulenseimnek, dr. Takács Attila adjunktusnak és dr. Nagy László egyetemi docensnek, amiért hasznos tanácsokkal és meglátásokkal segítettek a munkám során.

12. Irodalomjegyzék

Albataineh, N. (2006): Slope stability analysis using 2D and 3D methods. Doctoral dissertation, The University of Akron.

Azadmanesh, M.; Arafati, N. (2012): A Comparison on Slope Stability Analysis of Aydoghmoosh Earth Dam by Limit Equilibrium, Finite Element and Finite Difference Methods. IJCEBM, pp. 115.

Baba, K.; Bahi, L.; Ouadif, L.; Akhssas, A. (2012): Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods Applied to a Railway in the Moroccan Rif. Open Journal of Civil Engineering, 2(1), pp. 27-32.

Cala, M.; Flisiak, J.; Tajdus, A. (2006): Slope stability analysis with FLAC in 2D and 3D. In Proceedings of the Fourth International FLAC Symposium on Numerical Modeling in the Geomechanics, Madrid, Paper, pp. 01-02.

Chang, Y. L.; Huang, T. K. (2005): Slope stability analysis using strength reduction technique. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 28(2), pp. 231-240.

Deschamps, R.; Yankey, G. (2006): Limitations in the back-analysis of strength from failures. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 132(4), 532-536.

Fredlund, D. G. (1984): Analytical methods for slope stability analysis. In Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides, pp. 229-250.

Fredlund, D. G.; Krahn, J. (1977): Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, 14(3), pp. 429-439.

Fredlund, M. D.; Lu, H.; Fredlund, D. G.: Three-Dimensional Limit Equilibrium Slope Stability Benchmarking.

Geo-Slope International Ltd. (1999): Teaching Guide for the SLOPE/W Student Edition.

Gitirana Jr, G.; Santos, M. A.; Fredlund, M. D. (2008): Three-Dimensional Analysis of the Lodalen Landslide. In GeoCongress 2008@ Geosustainability and Geohazard Mitigation, pp. 186-190

Griffiths, D. V.; Lane, P. A. (1999): Slope stability analysis by finite elements. Geotechnique, 49(3), pp. 387-403.

Hammah, R. E., Yacoub, T. E., Corkum, B., & Curran, J. H. (2005): A comparison of finite element slope stability analysis with conventional limit-equilibrium investigation. In Proceedings of the 58th Canadian Geotechnical and 6th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conferences—GeoSask.

Hungr, O.; Salgado, F. M.; Byrne, P. M. (1989): Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis. Canadian Geotechnical Journal, 26(4), pp. 679-686.

- Kalatehjari, R.; Ali, N. (2013): A Review of Three-Dimensional Slope Stability Analyses based on Limit Equilibrium Method. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18. pp. 119-134.
- Kondalamahanthy, A. K. (2013): 2D and 3D Back Analysis of the Forest City Landslide (South Dakota).
- Krahn, J. (2004): Stability modeling with Slope/W. An Engineering Methodology. Calgary, Canada, Geo-Slope/W international LTD.
- Lam, L.; Fredlund, D. G. (1993): A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(6), pp. 905-919.
- Michalowski, R. L.; Drescher, A. (2009): Three-dimensional stability of slopes and excavations. *Geotechnique*, 59(10), pp. 839-850.
- Rocscience Inc. (2004): Application of the Finite Element Method to Slope Stability.
- Stark, T. D. (2003): Three-Dimensional Slope Stability Methods in Geotechnical Practice. Invited Contribution to Proceedings of University of Minnesota 51st Annual Geotechnical Engineering Conference, Minnesota Geotechnical Engineering Group, Minneapolis, MN, February, 2003, pp. 41 – 74.
- Stark, T. D.; Eid, H. T. (1998): Performance of three-dimensional slope stability methods in practice. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, 124(11), pp. 1049-1060.
- Stark, T. D.; Monson, W. R. (1995): Three dimensional slope stability. A paper submitted to Proceedings of: National Science Foundation Grantees Meeting, Reno, Nevada.
- Takács, A. (2010): Földművek (BMEEGTAT14) gyakorlati segédlet. Gyakorlati segédlet a BME Építőmérnöki Kar nappali tagozatos BSc hallgatói részére.