

Magaspartok állékonyságelemzése

Mérnökgeológiai modell alkotás és numerikus analízis egy magyarországi példán bemutatva

KÁPOLNAINÉ NAGY-GÖDE Fruzsina¹  – HORVÁTH-KÁLMÁN Eszter² 
TÖRÖK Ákos^{3*} 

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. E-mail: nagy-gode.fruzsina@edu.bme.hu, ORCID: 0009-0007-0606-6958

² Óbudai Egyetem, Ybl Miklós Építéstudományi Kar, Építőmérnöki Intézet, 1146 Budapest, Thököly út 74. E-mail: kalman.eszter@ybl.uni-obuda.hu, ORCID: 0009-0003-5199-3751

³ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. E-mail: torok.akos@emk.bme.hu, ORCID: 0000-0002-5394-4510

EREDETI KÖZLEMÉNY

Beérkezett: 2023. június 13. • Elfogadva: 2023. szeptember 11.

Online First megjelenése: 2023. október 10.

© 2023 A Szerzők



ÖSSZEFOGLALÓ

A meredek és instabil lejtők komoly műszaki problémákat okoznak, felszínmozgások miatt veszélyeztetnek településeket és infrastrukturális létesítményeket. A tanulmány egy kritikus régióban, a Balaton-part közelében elhelyezkedő magaspartok stabilitásának vizsgálatát foglalja össze. A bemutatott lejtő stabilitáselemzését különböző szoftverekkel – Plaxis, Geo5 és Slide2 – végeztük el, és összehasonlítottuk a kapott eredményeket állékonyság szempontjából. A modellezésből kiderült, hogy a magaspartok stabilitása nem éri el a szükséges biztonságot. Két fő azonosított tönkremeneteli módot lehetett elkülöníteni, melyek közül az egyik a talpponti, kissé alámetsző, összetettebb geometriával jellemezhető körcsúszólap, míg a másik a lejtő tetején az eróziós folyamatok miatt bekövetkező kisebb mozgás, lokális tönkremenetel. A számítások eredményeképpen a biztonság növelhető, megfelelően kialakított monitoring rendszerek segítségével.

KULCSSZAVAK

részű, lejtőstabilitás, szoftveres állékonyságelemzés

* Levelező szerző

1. BEVEZETÉS

Korábbi munkákban számos megközelítést hasonlítottak össze különböző numerikus módszerek¹ és analitikus eszközök² segítségével. A lejtők tönkremenetelének számítási módszerei és a várható kialakulásának becslése az utóbbi években gyorsan fejlődött, kimagaslóan a határegyensúlyi (LE)³ és a végeelemes (FE) analízis⁴ területen. Egyre nagyobb alkalmazási területe van az UAV segítségével rögzített felszíni topográfia készítésének⁵ vagy más távérzékelési technikák alkalmazásának.⁶

Ebben a tanulmányban a lejtők elemzését mutatjuk be FE és LE és valószínűségi módszerek alkalmazásával. A vizsgált lejtő a magyarországi Balaton-part közelében helyezkedik el. A tavat a vízszintek folyamatos, a partot a morfológia lassabb változásai jellemzik. Az éghajlatváltozás (például a csapadékesemények változásai – egyre hosszabb száraz időszakok és a csapadékos napok növekvő intenzitása), valamint az emberi beavatkozás szintén befolyásolja a stabilitást.

A vizsgált területen, amely egyre bővülő turisztikai célpont, az infrastruktúra és a rekreációs környezet megköveteli a lejtőstabilitás értékelését és a hibakockázat elemzését. Egy ilyen stabilitásvizsgálat eredményét mutatjuk be. A tanulmány a lejtő hosszú távú viselkedésére és a meghibásodások valószínűségi elemzésére összpontosít, majd javaslatot ad az esetleges helyszíni mozgásmérések alkalmazására. A Plaxis, a Geo5 és a Rocscience Slide2 programmal végzett numerikus számítások eredményei a vizsgált magasparti szakaszokon határozzák meg a földcsuszamlás kockázatát. A kutatás során kitértünk a numerikus eszközök alkalmazhatóságának elemzésére is. A modellezett rétegek és geometria a balatoni Magaspartot reprezentálja, de a kapott eredmények analógiaként más part menti lejtőkre is kiterjeszthetők. A tanulmány további eredménye a megfelelő biztonság fenntartása; az ilyen típusú parti lejtőkön rendszeresen monitoring és karbantartási munkákat kell végezni.

2. A VIZSGÁLATI HELYSZÍN

A vizsgált lejtő a Balaton közvetlen környezetében, a tómedence keleti területén, Balatonakaraty-tya és Balatonkenese határán helyezkedik el. Ezen a területen a lejtő stabilitásának a vasúti közlekedés miatt kiemelt jelentősége van, mivel a lejtőbe egy vasútvonal van bevágyva. Emellett a lejtő alján és tetején lévő üdülőterületet potenciális földcsuszamlások veszélyeztetik.

A vizsgált terület geometriai adatai összefoglalva: körülbelül 90 méter magas és 340 méter széles. A vizsgált keresztmetszeteket öt magfúrás (a legmélyebb 80 m hosszú) és CPTu vizsgálatok, továbbá egy szelvényben geofizikai mérés (60 m hosszú) adatait használtuk fel. A kibővített mérnökgeológiai modell felépítésében, mely 400 m x 800 m területet fed le, további archív magfúrások is figyelembe lettek véve. A modellezett szakasz (1. ábra) hozzávetőleges helyzete és a lejtő morfológiai részei szaggatott vonallal, a felszín alatti vizek pontvonallal, míg a vasúti pálya folyamatos vonallal vannak jelölve az ábrán. A helyszín geomorfológiai fejlődése egyedülálló,

¹ Eberhardt 2003.

² Utili–Crosta 2015.

³ Li et al. 2020.

⁴ Matthews–Farook–Helm 2014; Cami et al. 2018; Oberhollenzer–Tschuchnigg–Schweiger 2018.

⁵ Bar et al. 2020; Giordan et al. 2020.

⁶ Jaboyedoff et al. 2012; Menegoni–Giordan–Perotti 2020.





1. ábra. Vizsgálati terület, morfológia és a felszín alatti vizek helyzete (fotó: Pesztericz Diána)

mivel a tópart több csúszási fázis következtében hátrahúzódott. Ennek ellenére a területet évszázadokkal ezelőtt beépítették, és a káresemények ellenére még mindig felkapott üdülőövezetnek számít, folyamatosan fejlődik. Az egyik jól dokumentált rézsúcsúszás 1914-ben történt, amikor a vasútvonal egy gözmozdonnyal és vonattal a tóba csúszott. A közelmúltbeli mozgások is jelzik a magaspart stabil-labil helyzetét. A hidrogeológia egyedülálló, mivel a vizsgált magasparttól kelet, délkelet irányban egy lefolyástalan terület alakult ki, melyre lehulló csapadékvizek a magaspart irányába ürülnek a talajrétegeken keresztül, azaz talajvizet táplálnak; emellett a talajvíz alsó horizontjainak és a tó vizének összetett kölcsönhatása is folyamatosan fennáll. A tó szintje az elmúlt 500 év feljegyzései szerint tíz méteres amplitúdóval ingadozott a vízszintszabályozást megelőzően. A talajvízszint közvetett kapcsolatban áll a csapadékkal. Ezek a körülmények gátolt kifolyású vízrétegek jelenlétéhez vezetnek, amelyek csökkentik a lejtők stabilitását. Jelenleg monitoring rendszer működik: talajvízfigyelő kutakkal és inklinométer mérési pontokkal a rézsű állékonyságának nyomonkövetése céljából.

A magaspart uralkodó üledéke miocén agyagos üledék, amely finom homokrétegekkel és homoklencsékkel taglalt. Ebben a litosztatigráfiai egységben, amelyet Tihanyi Formációnak neveznek, iszapos betelepülések is előfordulnak. A fedőrétegek egyes területeken löszből állnak, de a vizsgált szelvényben már lepusztult a lösztakaró.

Talajmechanikai szempontból az altalaj az agyag, az iszap és az iszapos homokos talajok fajtáit foglalja magában. A történelmi és újkori csúszások miatt már nem található meg a párhuzamos rétegek vagy az egységes rétegződés.⁷ A Tihanyi Formációt képviselő rétegek a torkolatok előterében rakódtak le. Ezekben a paleo folyómedrekben, torkolatokban változó lerakódási környezetet figyelhetünk meg, a Pannon-tónak nevezett paleo tóba érkező folyókon keresztül szállított folyami üledékektől a sekély tengeri üledékekig. A paleo tó szintjének változásai mellett a környezeti változások és az éghajlati ciklikusság is hozzájárult e medrek nem egységes litológiá-

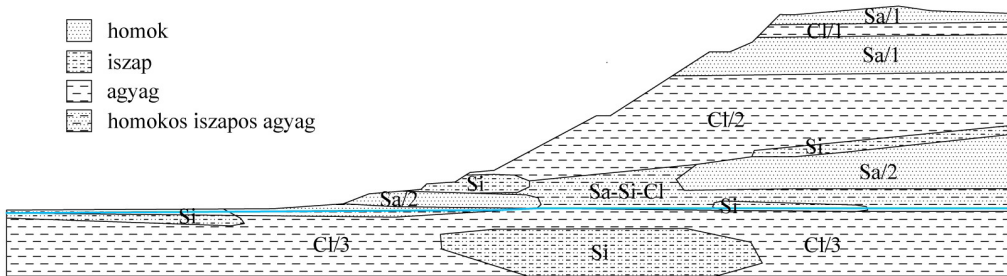
⁷ Kézdi 1952.



jához és rétegrendjéhez. Ennek eredményeként 15–30 méteres vízszintváltozásokat mutattak ki, amelyek a tó progresszióját és regresszióját jelzik (ami a tó partvonalának ciklikus elmozdulását eredményezte). Ez az eseménysorozat egészen addig folytatódott, amíg a Pannon-tó mintegy nyolcmillió évvel ezelőtt dél felé nem mozdult, és a szuffúzió ritkábbá vált. A lerakódott üledékek különböző szemcseméretűek, de a finomhomok- és agygrétegek dominálnak. A nyugodt üledékképződést rövid ideig tartó vízmozgásos események szakították meg, mm-es és cm-es méretű vékony finomhomok-lencsékét ülepítve.⁸

Mérnökgeológiai szempontból ez az üledékképződés kedvezőtlen. Az agygrétegek közötti homokrétegek vékony vízvezető rétegekként viselkednek és megkönnyítik a vízmozgást. Ez felszínmozgásokhoz vezet, különösen akkor, ha ezeket a homokrétegeket lósz borítja. A Pannon-medence üledékszerkezetének geológiáját és jellemzőit Sztanó⁹ és Koroknai¹⁰ részletesen ismerteti, melynek eredményei felhasználásra kerültek e tanulmány során.

A magleírások és a laboratóriumi vizsgálatokból kapott talajmechanikai paraméterek alapján egy „egyszerűsített” nyolcstrétegű modellt hoztunk létre (2. ábra).



2. ábra. Mérnökgeológiai modell, talajrétegek

(homok – Sa, kőzetliszt – Si, agyag – Cl, homokos kőzetlisztes agyag – Sa-Si-Cl, adatokat ld. 1. táblázat)

A korábbi talajvizsgálatok túlnyomó többsége a talaj osztályozására, nem pedig a szilárdságvizsgálatra összpontosított. Ennek eredményeként nem állt rendelkezésre elegendő laboratóriumi vizsgálati eredmény ahhoz, hogy a nyírószilárdsági paraméterekre eloszlásfüggvényt illesztünk, de a modellezéshez szükséges főbb paraméterek a laborvizsgálatokból összeállíthatók (1. táblázat).

3. A VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A lejtőstabilitási elemzést három különböző szoftverrel, három különböző számítási módszerrel végeztük el. Az első megközelítésben a Geo5 segítségével egy határegyensúlyi determinisztikus módszert alkalmaztunk. A második végeeselemes determinisztikus számítási módszer a Plaxis segítségével készült. Végül a Rocscience Slide2 valószínűségi elemzéssel is átszámítottuk.

⁸ Sztanó et al. 2005.

⁹ Sztanó et al. 2013.

¹⁰ Koroknai et al. 2020.



1. táblázat. A modellben felhasznált talajfizikai paraméterek (Sa – homok, Cl – agyag, Si – kőzetliszt)

	γ_{unsat} [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	E [MPa]	n	c [kN/m ²]	φ [°]
Sa/1 1. homokréteg	17	18	6	0,35	5–8	24
Cl/1 1. agyagréteg	19	20	10	0,3	50	22
Cl/2 2. agyagréteg	20	21	11	0,3	60	26
Si iszapréteg	18	19	8	0,4	25	18
Sa/2 2. homokréteg	17	18	10	0,35	1	20
Sa–Si–Cl homokos-iszapos agyagréteg	20	21	10	0,4	30	25
Cl/3 3. agyagréteg	21	22	16	0,3	80	34

A határegyensúlyi módszerekben a gravitáció hatására lecsúszásra hajlamos talajtömeg egyensúlyi helyzete kerül kiszámításra.¹¹ A módszer a tömeg mozgásának ellenálló erők, nyomatok vagy feszültségek, továbbá az instabil mozgást okozó erők, nyomatok és feszültségek összehasonlításán alapul. A Geo5 a lejtőstabilitást félköríves csúszólapok (Bishop-, Janbu- vagy Spencer-módszer) vagy poligonális csúszási felületek (Sarma-módszer) modellezésével számítja ki. A verifikációs elemzések klasszikus megközelítéseket alkalmaznak.¹² A programban a stabilitáselemzés két módszerrel történik, a klasszikus, a biztonsági tényező szerinti és a határállapotok elméletét követő elemzéssel.¹³

A vége-selemes módszerek alkalmazása a geotechnikai elemzésekben egyre gyakoribbá vált, mert számos előnyük van: a lejtők nagy pontosságú modellezése (összetett geometria, terhelési sorrendek, megerősítő anyag jelenléte, víz hatása, a talaj összetett viselkedésének törvényszerűségei) és a talajok deformációinak jobb szemléltetése.¹⁴ A Plaxis szoftvert széles körben használják geotechnikai problémák modellezésére, beleértve a lejtőstabilitási kérdéseket is.¹⁵ A Plaxis szoftverben a talaj szilárdsági paramétereinek csökkentésével végezhető lejtőstabilitási elemzés. Ezt a folyamatot φ -c (belső súrlódási szög – kohézió) redukciónak nevezik (Mohr–Coulomb-féle

¹¹ Duncan–Wright 2005; Uti–Crosta 2015.

¹² Sharma et al. 2012.

¹³ Görög–Török 2007.

¹⁴ Matthews–Farook–Helm 2014; Salunkhe et al. 2017.

¹⁵ Abbas 2015; Jacob 2018.



tönkremenettel jellemzett anyagok esetében alkalmazható). A megközelítésben a szilárdsági paramétereiket a számítások során csökkentik.¹⁶

A talaj szilárdsági paramétereit, a tan φ -t és a kohéziót, c -t, egymás után csökkentik, amíg a lejtő össze nem omlik. A teljes szorzó ΣMsf a bemeneti értékként megadott szilárdsági paraméterek és a csökkentett értékek hányadosa. ΣMsf a számítás kezdetén 1-re van állítva, mely biztosítja, hogy az összes anyagszilárdságot a nem csökkentett értékekre állítsa be. A talaj szilárdsági paraméterei így szisztematikusan csökkennek a 0,1-del egyenlő ΣMsf növekménnyel a tönkremenetelig. Az SF biztonsági tényezőt a rendelkezésre álló szilárdság és a tönkremeneteli szilárdság aránya adja. Ez megegyezik a ΣMsf értékével a tönkremenetelkor.¹⁷

A Rocscience Slide2 szoftverben valószínűségi elemzést végeztünk Latin–Hypercube mintavételi módszerrel és globális minimum elemzési típussal. A Slide2 programot széles körben használják valószínűségi regionális földcsuszamlásveszély értékelésére.¹⁸ A valószínűségi Latin–Hypercube-szimuláció a Monte-Carlo-szimulációhoz hasonló eredményeket ad, de kevesebb minta felhasználásával. A Slide2 minden egyes elemzési módszere (pl. Bishop- vagy Janbu-módszer) eltérő globális minimális csúszási felületet eredményezhet. A valószínűségi elemzést minden egyes, egy elemzési módszerből származó Globális Minimum csúszási felületen egymástól függetlenül végzik el. A megközelítés feltételezi, hogy a (determinisztikus) globális minimális csúszási felületre számított meghibásodás valószínűsége reprezentatív a meghibásodás valószínűségére. Általános mérnöki esetekben ez egy érvényes és ésszerű feltételezés. A számítás során használt véletlen változók a talajrétegek nyírószilárdsági paraméterei: kohézió és súrlódási szög. A geotechnikai számításokban használt paraméterek túlnyomó többsége normál vagy log-normális eloszlást követ.¹⁹ A normális eloszlást a geotechnikai mérnöki tevékenységben általában statisztikai elemzésre használják. Számos véletlen változó eloszlása megfelel ennek az eloszlásnak. Általában ezt használják a geotechnikai mérnöki valószínűségszámítási vizsgálatokhoz, kivéve bizonyos esetekben, amikor erős okok szólnak egy másik eloszlás megválasztása mellett.²⁰ Ezek alapján a valószínűségszámításhoz a paraméterek normál eloszlását feltételeztük. Az 1. táblázatban szereplő értékeket vettük átlagértékeknek. A minimális és maximális értékeket relatív értékként adtuk meg. A relatív minimum- és relatív maximumértékeknek legalább a szórás háromszorosával ajánlott megegyezniük annak érdekében, hogy teljes normális eloszlást határozzunk meg, amelynek az átlagérték körül szimmetrikusnak kell lennie.²¹

Midhárom szoftver számításai kompatibilisek az Eurocode7 szabvány előírásaival, tehát az eredményeket tervezés során is fel lehet használni. A GEO5 szoftverben a talajparaméterek oldalán vettük figyelembe a szabvány által előírt parciális tényezőket, ezért az elvárt kihasználtság már 100%. A Plaxis és Rocscience szoftverek esetében azonban parciális biztonsági tényezőt kapunk eredményül, aminek az Eurocode7 által előírt értéke 1,35.

¹⁶ Chang–Huang 2005; Sun 2017; Kaushal–Vinod 2019.

¹⁷ Fawaz–Farah–Hagechade 2015.

¹⁸ Hadjigeorgiou–Kyriakou–Papanastasiou 2006.

¹⁹ Bond–Harris 2008.

²⁰ Kádár–Nagy 2017.

²¹ www.rocsience.com/help/slide2/slide_model/project_settings/Probabilistic_Analysis.htm (Utolsó megtekintés: 2023. 06. 01.); Uzielli et al. 2006.



4. AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A Geo5 szoftverrel végzett számítások azt mutatták, hogy a kihasználtság a partél lokális csúszási felületei mentén 101–103%, míg a globális csúszási felületek mentén 97–104%. A számítások során alkalmazásra kerültek a parciális tényezők, így az elvárt minimum biztonsági tényező értéknek 1,35-nak kellene lenni. A számított biztonsági tényező értékek ennek nem felelnek meg, a lokális stabilitás alacsony, míg a globális stabilitás még éppen elfogadható. Ez alól kivétel a Fellenius / Petterson módszer, mely szerint a globális (geometriailag a teljes magaspart szelvényt érintő tönkremenetel) biztonsági tényező sem éri el a minimum szintet.

A Plaxis a korábban bemutatott számítási módszer szerint mindig a legvalószínűbb megbínbódást észleli. Ez azt jelenti, hogy a lejtő tetején helyi eróziókat azonosít, ami jó összhangban van a helyszíni megfigyelésekkel, azaz a helyszínen talált eróziós nyomokkal. Ebben az esetben a számított biztonsági tényező 1,18 volt. Ez az alacsony FoS az alacsony kohéziójú homokréteg jelenlétéhez kapcsolódik. Ez a réteg gyenge és könnyen kimerül benne a nyírószilárdság. A kohéziós érték növelésével tudtuk megvizsgálni a globális tönkremeneteli mechanizmust, amelynek biztonsági tényezője 1,29 érték. A csúszási felület geometriája a gyengébb talajrétegek helyzetétől függően összetett alakú. Mindkét esetben a biztonsági tényező érték 1,35 alá esik (Eurocode 7).

A Slide2 programmal folytatott számítás azt is megmutatta, hogy a globális minimum analízisből meghatározott elmozdulási sík egybeesik a lokális csúszási felülettel (3. ábra).

A kutatás során a Bishop-féle egyszerűsítés eredményeit mutatjuk be. Láthatjuk, hogy mind a determinisztikus, mind pedig a valószínűségi számítások alapján meghatározott biztonsági tényező 1,245. A determinisztikus biztonsági tényező, FS (determinisztikus), a globális minimum csúszási felületre az általános (nem valószínűségi alapú) lejtőstabilitási elemzésből számított biztonsági tényező. A „mean” biztonsági tényező a valószínűségi elemzésből kapott átlagos biztonsági tényező. Általában a „mean” biztonsági tényezőnek közel kell lennie a determinisztikus biztonsági tényező, FS (determinisztikus) értékéhez. Megfelelően nagy számú minta esetén a két értéknek közel azonosnak kell lennie. Az egyenlőséget sikerült elérni, tehát a minták száma elegendő volt.

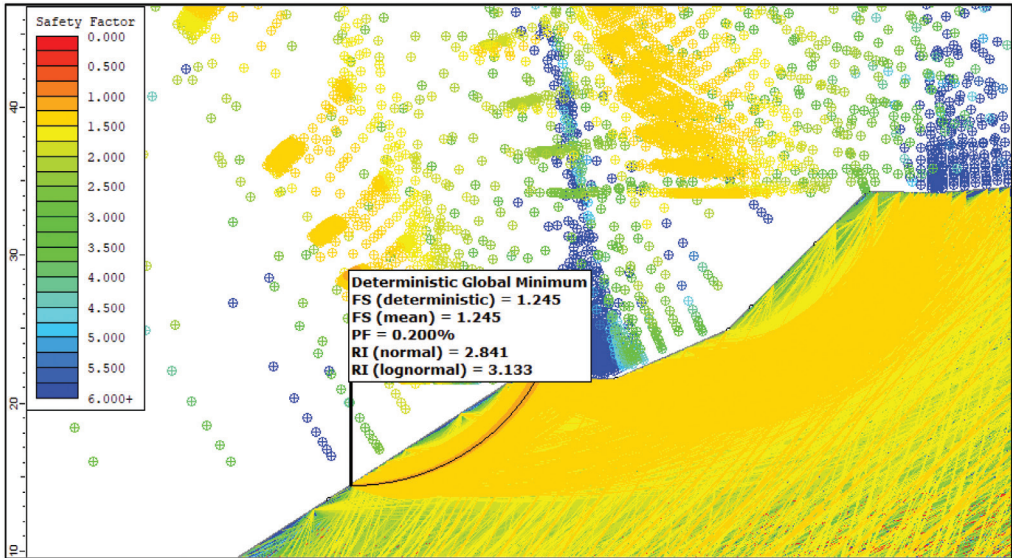
A Bishop-módszer alapján meghatározott, 1,4-nél kisebb biztonsági tényezővel rendelkező csúszási felület a 4. ábrán látható. Itt megjegyezzük, hogy Janbu-egyszerűsítés alapján a legalacsonyabb biztonsági tényezővel rendelkező globális csúszási felület biztonsága is csak 1,27 volt. Tehát a Slide2 programmal számított biztonsági tényező értékek nem érik el az Eurocode7 szerint elvárt 1,35-os értékeket sem a lokális, sem a globális stabilitás esetében.

A három szoftver számításai alapján a csúszási felületek alakja és helyzete hasonló.

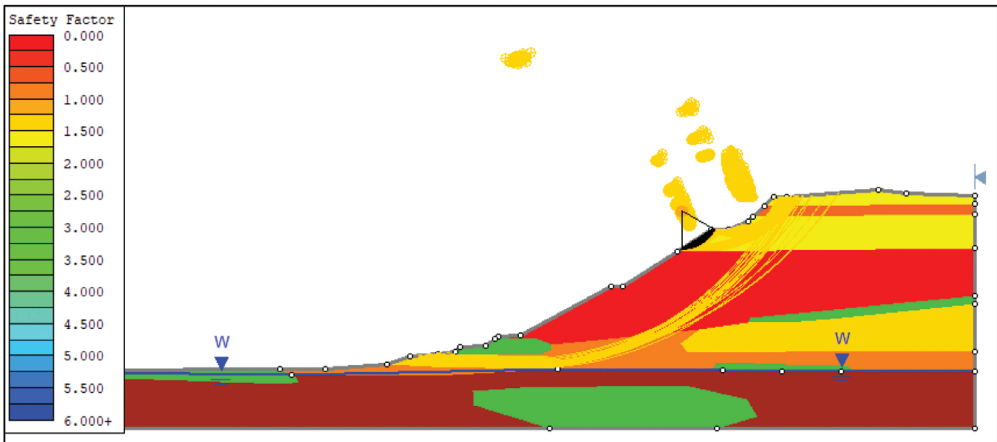
Megvizsgáltuk, hogy a véletlen változók hogyan befolyásolják a biztonsági tényező értékét. A véletlen változók korrelációs együtthatóját a 2. táblázat foglalja össze. A modell a felső homokrétegek paramétereire a legérzékenyebb. E talajparaméterek (amelyek a modellgeometriában két réteghez vannak rendelve) 88%-os (kohézió) és 45%-os (súrlódási szög) korrelációja mellett a többi rétegparaméter 6% alatti hatása alacsony. A tönkremeneteli módok és a tönkremeneteli kritériumok statisztikai elemzései is azt mutatják, hogy az alkalmazott szoftverek eredményei jó összhangban vannak, az érzékenységi elemzés pedig a tönkremenetel modellparamétereiktől való függését azonosította.

Az RI (Reliability Index – megbízhatósági index) és a PF (Probability of Failure – tönkremeneteli valószínűség) értékek a 3. ábrán láthatók. A lejtő biztonsága érdekében a megbízhatósági index értéke minimum 3 kell legyen. A megbízhatósági index kiszámításakor (4. ábra) a legjobb





3. ábra. Globális minimum csúszási sík



4. ábra. Bishop-analízis során felvett modell
(színek: piros – agyag; zöld – iszap; sárga – homok; kék – talajvíz) (FoSmax = 1,4)

illeszkedést a normál eloszlás adja, melyhez tartozó megbízhatósági index értéke 2,84. Így a vizsgált lejtő a valószínűségszámítás alapján nem tekinthető biztonságosnak.

A tönkremeneteli valószínűség az $FS < 1$ eredményt adott elemzések számának és az összes elemzés számának hányadosa, ami a vizsgált magaspart szakasz esetében 4,28%. Tehát az 1000 elemzésből körülbelül 43 esetben volt labilis ($FS < 1,0$) a lejtő.

A három szoftver, a Plaxis, a Geo5 és a Slide2 azt mutatta, hogy a lejtő tetején valószínűbb a lokális tönkremenetel. A globális csúszási felületre számított biztonsági tényező szintén 1,35 alatt



2. táblázat. Valószínűségi változók korrelációs együtthatója (a rétegek elhelyezkedését a 2. ábra mutatja)

Talajrétegek / A valószínűségi változók korrelációs együtthatója		Sa/1 1. homok- réteg	CI/1 1. agyag- réteg	CI/2 2. agyag- réteg	Si iszap- réteg	Sa/2 2. homok- réteg	Sa-Si-CI homokos- iszapos agyag- réteg	CI/3 3. agyag- réteg
Bishop- módszer	kohézió	0,88	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02
	belső súrlódási szög	0,44	0,03	0,04	0,02	0,03	0,06	0,02

van, így az Eurocode7 szerint nem tekinthető biztonságosnak. A fő eredmények megegyeznek, de a csúszási felületek és a biztonsági tényezők között vannak kisebb eltérések.

A három számítási programmal kapott eredmények összegzése alapján megállapítható:

A Plaxis szoftver segítségével egy lokális tönkremeneteli mechanizmust 1,18-os biztonsági tényezővel és egy globálisat 1,29-os értékkel detektáltunk. A véges elemek miatt a csúszások geometriája nagyon összetett. Kutatásunk alapján ez a modell áll legközelebb a valósághoz, mivel követi a talajrétegek geometriáját. Ebben a modellben a gyenge talajlencsék helyzete és viselkedése is jól meghatározható. A Geo5-ben kör és poligonális csúszásfelületeket kaptunk, és a felhasználó kézi optimalizálással akár ezek geometriáját is szerkesztheti.

A Geo5 további előnye, hogy a program egy adott csúszási felületre több klasszikus számítást is elvégez. Következésképpen a kapott eredmény nem egyetlen érték, hanem a kihasználtságtartomány a választott csúszási felületre.

A Slide2 valószínűségi alapú számítása a talajparaméterek szempontjából a legérzékenyebb. Ezeket a paramétereket statisztikai alapon adjuk meg; ezért a talajfizikai paraméterek szórását is figyelembe vesszük, ami az előző két szoftverrel szemben komoly előnyt jelent. Ennek eredményeképpen sokkal több variáció létezik a csúszási felület geometriájára vonatkozóan, ami újabb tönkremeneteli módokat tárhat fel, amelyeket az előző két szoftver nem észlelt. A valószínűségi számítás minden egyes számított paraméterváltozathoz megrajzolja a csúszási felületet és megadja a biztonsági tényezőt. Az 5. ábrán ezek közül csak néhány jellemzőt emeltünk ki.

Eredményeink jó összhangban vannak Arunnak és munkatársainak²² az eredményeivel. A lejtő stabilitásvizsgálatainak összehasonlítását is elvégeztük, ami alapján kimondható, hogy a Plaxis 2D eredményei a véges elemeknek köszönhetően valószínűbb tönkremeneteli geometriát adnak, mint a klasszikus módszereket alkalmazó Geo5 szoftver.

A Slide2 korábbi alkalmazása is bizonyította, hogy a valószínűségi regionális földcsuszamlás-veszély-értékeléshez ez a szoftver mennyire praktikus eszköz.²³ Ez a tanulmány összhangban van Hadjigeorgiou²⁴ vizsgálatával is.

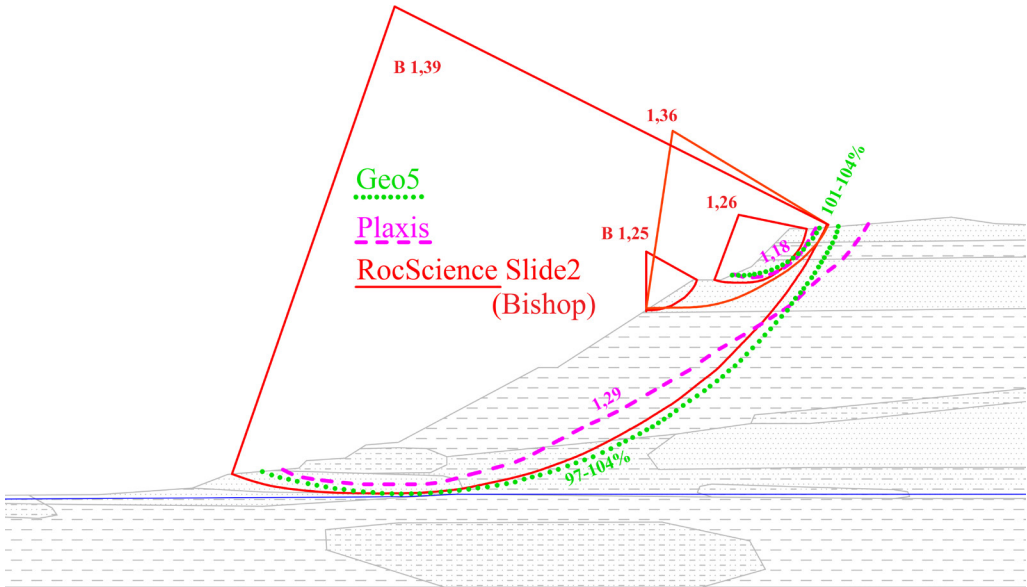
Az idézett tanulmányban a Bishop-féle egyszerűsített határegyenlet-módszert alkalmazták egy délnyugat-ciprusi útpadka meghiúsodásának értékelésére, különböző lejtőtörési forgató-

²² Arun et al. 2020.

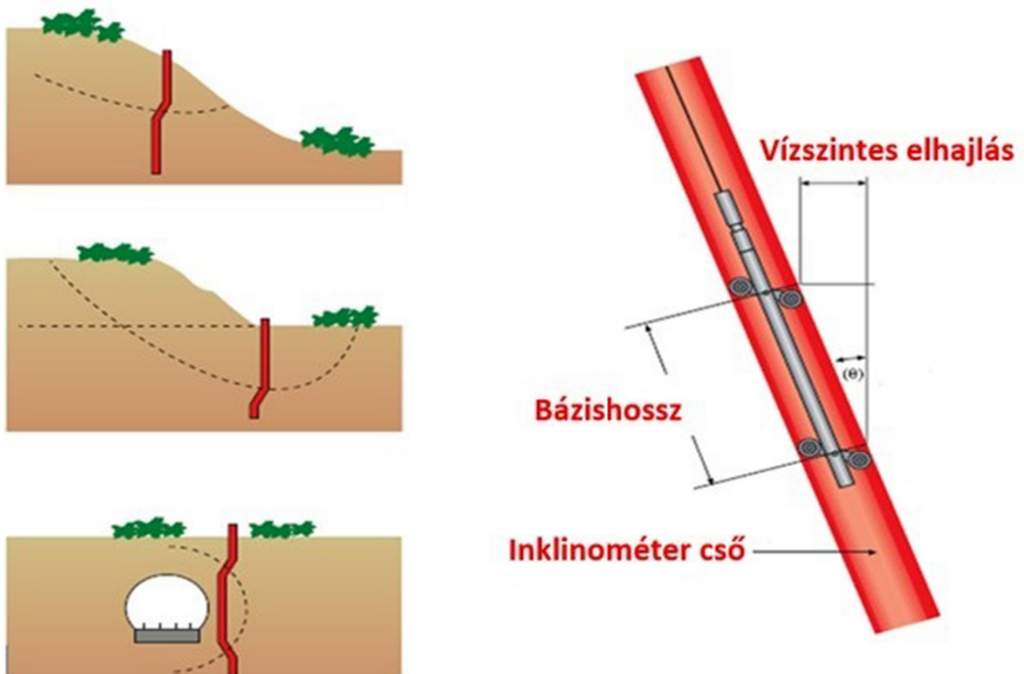
²³ Acciaro 2018.

²⁴ Hadjigeorgiou–Kyriakou–Papanastasiou 2006.





5. ábra. A három számítás eredményeképpen kapott rézsúállékonyság biztonsági tényező összesítése



6. ábra. Inklinométer alkalmazása rézsúállékonyság nyomonkövetése során (Soil Instruments Ltd. nyomán)

könyveket bemutatva. A jelenlegi tanulmány is azt sugallja, hogy az Islam²⁵ által publikált eredményekhez hasonlóan a SLIDE2 a legátfogóbb lejtőstabilitás-elemző szoftver, amely a Limit Equilibrium Methodot alkalmazza.

Ezen eredmények fényében a lejtő instabil. A lejtő állékonyságának folyamatos nyomonkövetése érdekében geotechnikai monitoring eszközök telepítése és mérése nélkülözhetetlen. A részű folyamatos elmozdulásának detektálása érdekében inklinométer telepítése szükséges.

Az inklinométer eszköz lehetővé teszi a talajtömegben kialakuló mozgások folyamatos követését. A nemzetközi szakirodalom alapján kimondható, hogy a geotechnikai monitoring rendszer elemei, értve ez alatt az inklinométerek, extenzométer, piezométer eszközöket, időben hamarabb tudják mutatni az esetleges elmozdulásokat, a mozgások tendenciáját (6. ábra). Azaz előre jelezni képesek egy lehetséges nagyobb elmozdulást, ezzel jelentősen csökkentve a kockázatokat. A lejtő nem megfelelő állékonyságából fakadó kockázatok csökkentésének legmegbízhatóbb eszköze a valós idejű geotechnikai monitoring rendszer.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A számítógépes modellezési eredményeink azt mutatják, hogy a magasparti lejtők lejtőstabilitásának elemzésére mindhárom szoftver, a Plaxis, a Geo5 és a Slide2 is alkalmas, de eltérő eredményeket ad. A vizsgálat során bemutatott modellszámítások kisebb különbségeket mutattak az eredményekben. A modellekben azonos talajrétegződést, geometriát és talajfizikai paramétereket használva eltérő geometriájú tönkremeneteli felületeket kaptunk. A lokális tönkremenetel biztonsági tényezője a Plaxis szoftverrel számítva 1,18, míg a Slide használatával a kapott értékek 1,16 és 1,36 között voltak. A Geo5-tel végzett modellezés segítségével 101–104%-os lejtőkihasználtságot lehetett kiszámítani.

A globális tönkremenetel biztonsági tényezője a Plaxisban 1,29, míg a Slide szerint a számított minimális SF értéke 1,27. Eközben a Geo5 szoftver 97–104%-os kihasználtságot rendelt a lejtőhöz. A megbízhatósági index 3 alatt van, ami azt jelenti, hogy a lejtő nem stabil, nem biztonságos. A lejtő tönkremenetelének a valószínűsége 4,28%.

A tanulmányunkban bemutatott modellek a lejtő egyszerűsített stabilitásával foglalkoznak. A lejtő pontos állapotának vizsgálatához elengedhetetlen a monitoring rendszer alkalmazása, a lejtő folyamatos elmozdulásának rögzítése és egy mozgásra és csúszásveszélyre figyelmeztető rendszer kialakítása.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3-II-BME-58 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapjának támogatásával készült.

²⁵ Islam et al. 2014.



IRODALOMJEGYZÉK

- Abbas 2015 Abbas, J. M.: 2D-FEM FOR ASSESSMENT OF SLOPE STABILITY. *Diyala Journal of Engineering Sciences* 8 (2015) 2. 48–84, DOI: 10.24237/djes.2015.08207
- Acciaro 2018 Acciaro, M. D.: *Probabilistic regional landslide hazard assessment for the Enguri dam (Jivari, Georgia)*. Open Access Master's Thesis, Michigan Technological University, 2018. <https://doi.org/10.37099/mtu.dc.etr/640>
- Arun et al. 2020 Arun, K. U. – Jisna, P. – Simon, R. – Mathews, O. A. – Anju, E. M.: A Comparison Study on Stability of Kuranchery Slopes Using GEO5 and PLAXIS 2D Software. *International Journal of Research in Engineering, Science and Management* 3 (2020) 3. 4.
- Bar et al. 2020 Bar, N. – Kostadinovski, M. – Tucker, M. – Byng, G. – Rachmatullah, R. – Maldonado, A. – Pötsch, M. – Gaich, A. – McQuillan, A. – Yacoub, T.: Rapid and robust slope failure appraisal using aerial photogrammetry and 3D slope stability models. *International Journal of Mining Science and Technology* 30 (2020) 651–658.
- Bond–Harris 2008 Bond, A. – Harris, A.: *Decoding Eurocode 7*. Taylor & Francis, London 2008.
- Cami et al. 2018 Cami, B. – Javankhoshdel, S. – Bathurst, R. J. – Yacoub, T.: Influence of mesh size, number of slices, and number of simulations in probabilistic analysis of slopes considering 2D spatial variability of soil properties. *IFCEE 2018, Advances in Geomaterial Modeling and Site Characterization*, GSP 295 (2018) DOI: 10.1061/9780784481585.019
- Chang–Huang 2005 Chang, Y-L. – Huang, T-K.: Slope stability analysis using strength reduction technique. *Journal of the Chinese (Institute of Engineers)* 28 (2005). 10.1080/02533839.2005.9670990.
- Duncan–Wright 2005 Duncan, J. M. – Wright, S. G.: *Mechanics of Limit Equilibrium Procedures. Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons, Inc, New Jersey 2005.
- Eberhardt 2003 Eberhardt, E.: *Rock Slope Stability Analysis – Utilization of Advanced Numerical Techniques*. University of British Columbia, Canada, Short Course note, 2003.
- Fawaz–Farah–Hagechade 2014 Fawaz, A. – Farah, E. – Hagechade, F.: Slope stability analysis using numerical modelling. *American Journal of Civil Engineering* 2 (2014) 3. 60–67.
- Giordan et al. 2020 Giordan, D. – Adams, M. – Aicardi, I. – Alicandro, M. – Allasia, P. – Baldo, M. – De Berardinis, P. – Dominici, D. – Godone, D. – Hobbs, P. – et al.: The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 79 (2020) 8–10. 3437–3481.
- Görög–Török 2007 Görög, P. – Török, Á.: Slope stability assessment of weathered clay by using field data and computer modelling. A case study from Budapest. *Natural Hazards and Earth System Science* 7 (2007) 3. 417–422.
- Hadjigeorgiou–Kyriakou–Papanastasiou 2006 Hadjigeorgiou, J. – Kyriakou, E. – Papanastasiou, P.: A road embankment failure near Pentalia in Southwest Cyprus. In: *The South African Institute of Mining and Metallurgy, International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering*. 2006.



- Islam 2014 Islam, S. – Hussian, A. – Khan, Y. A. – Chowdhury, M. A. I. – Haque, B.: Slope Stability Problem in the Chittagong City, Bangladesh. *Journal of Geotechnical Engineering* 1 (2014) 3. 13–25.
- Jaboyedoff et al. 2012 Jaboyedoff, M. – Oppikofer, T. – Abellán, A. – Derron, M. H. – Loye, A. – Metzger, R. – Pedrazzini, A.: Use of LIDAR in landslide investigations. A review. *Natural Hazards* (2012) 61. 5–28.
- Jacob 2018 Jacob, A. – Thomas, A. A. – Aparna, G. A. G. – Arshiq, M. P.: Slope stability analysis using Plaxis 2D. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* 5 (2018) 4. 3666–3668.
- Kaushal–Vinod 2019 Kaushal, J. – Vinod, S.: Stability analysis of slope using diverse parameters, techniques and softwares: A review. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research* 6/6 (2019) 1–4. doi:10.1729/Journal.22520.
- Kádár–Nagy 2017 Kádár, I. – Nagy, L.: Comparison of Different Standards Based on Computing the Probability of Failure of Flood Protection Dikes. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 61 (2017) 1. 146–153.
- Kézdi 1952 Kézdi Á.: A Balaton északkeleti peremén bekövetkező mozgások vizsgálata. *Hidrológiai Közöny* 32 (1952) 11–12. 403–408.
- Koroknai et al. 2020 Koroknai, B. – Wórum, G. – Tóth, T. – Koroknai, Zs. – Fekete-Németh, V. – Kovács, G.: Geological deformations in the Pannonian Basin during the neotectonic phase: New insights from the latest regional mapping in Hungary. *Earth-Science Reviews* 211 (2020) 103411.
- Li et al. 2020 Li, S. – Cami, B. – Javankhoshdel, S. – Corkum, B. – Yacoub, T.: Considering Multiple Failure Modes in Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. Two Methods. In: *GeoVirtual2020 Congress*. Calgary 2020.
- Matthews–Farook–Helm 2014 Matthews, C. – Farook, Z. – Helm, P.: Slope stability analysis–limit equilibrium or the finite element method. *Ground Engineering* 48 (2014) 5. 22–28.
- Menegoni–Giordan–Perotti 2020 Menegoni, N. – Giordan, D. – Perotti, C.: Reliability and Uncertainties of the Analysis of an Unstable Rock Slope Performed on RPAS Digital Outcrop Models. The Case of the Gallivaggio Landslide (Western Alps, Italy). *Remote Sensing* 12 (2020) 10. 1635. <https://doi.org/10.3390/rs12101635>
- Oberhollenzer–Tschuchnigg–Schweiger 2018 Oberhollenzer, S. – Tschuchnigg, F. – Schweiger, H. F.: Finite element analyses of slope stability problems using non-associated plasticity. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 10 (2018) 6. 1091–1101.
- Salunkhe 2017 Salunkhe, D. P. – Chvan, G. – Bartakke, R. P. – Kothavale, P. R.: An Overview on Methods for Slope Stability Analysis. *International Journal of Engineering Research & Technology* 6 (2017) 3. 528–535.
- Sharma et al. 2012 Sharma, R. K. – Kumar, V. – Sharma, N. – Rathore, A.: Slope Stability Analysis Using Software GEO5 and C Programming. In: *International Conference on Chemical, Ecology and Environmental Sciences (ICEES'2012)*. Bangkok 2012.
- Sztanó et al. 2005 Sztanó, O. – Magyar, I. – Müller, P. – Katona, L. – Babinszki, E. – Magyar, Á.: Sedimentary cycles near the coast of Lake Pannon, Late Miocene, Hungary. In: *12th RCMNS Congress: Patterns and processes in the Neogene of the Mediterranean region*. Universität Wien, Wien 2005. 227–230.
- Sztanó et al. 2013 Sztanó, O. – Magyar, I. – Szónoky, M. – Lantos, M. – Müller, P. – Lenkey, L. – Katona, L. – Csillag, G.: Tihany Formation in the surroundings of Lake



- Balaton. Type locality, depositional settings and stratigraphy. *Földtani Közlemény* 143 (2013) 1. 445–468.
- Sun et al. 2017 Sun, C. – Chai, J. – Xu, Z. – Qin, Y.: 3D Stability Charts for Convex and Concave Slopes in Plan View with Homogeneous Soil Based on the Strength-Reduction Method. *International Journal of Geomechanics* 17/5 (2017) [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000809](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000809)
- Uti–Crosta 2015 Uti, S. – Crosta, G. B.: Analysis Tools for Mass Movement Assessment. In: Shroder, J. F. – Davies, T. (eds): *Landslide Hazards, Risks and Disasters*. Elsevier, Amsterdam 2015. 441–465.
- Uzielli et al. 2006 Uzielli, M. – Lacasse, S. – Nadim, F. – Phoon, K-K.: Soil variability analysis for geotechnical practice. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*. Singapore 2006. DOI: 10.1201/NOE0415426916.ch3
- www.rocsience.com/help/slide2/slide_model/project_settings/Probabilistic_Analysis.htm (Utolsó megtekintés: 2023. 06. 01.)

Slope Stability Assessment of High Banks

Engineering Geological Model and Numerical Analyses, an Example from Hungary

SUMMARY

Steep and unstable slopes often collapse and cause disasters, endangering settlements and linear infrastructures. The present paper provides an overview of the stability of high banks that border the largest Central European lake, Lake Balaton in Hungary. The stability analyses were performed using different software – Plaxis, Geo5 and Slide2 – and the calculated results, the obtained safety factors were compared. The modelling revealed that the stability of the high lakeside banks does not reach the required safety. Two major failure modes were identified: i) deep seated curved sliding surface with complex geometry and ii) shallow sliding surface at the top of the slope linked to erosional processes. With the help of obtained results the safety of slopes can be increased and an appropriate monitor system can be implemented.

KEYWORDS

slope, stability, modelling with software

Open Access nyilatkozat: A cikk a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>) feltételei szerint publikált Open Access közlemény, melynek szellemében a cikk bármilyen médiumban szabadon felhasználható, megosztható és újraközölhető, feltéve, hogy az eredeti szerző és a közlés helye, illetve a CC License linkje és az esetlegesen végrehajtott módosítások feltüntetésre kerülnek. (SID_1)

