

PÁLYÁZATI BESZÁMOLÓ A PRO PROGRESSIO ALAPÍTVÁNY
RÉSZÉRE

Készítette:

.....
Kotrocz Krisztián

Budapest, 2014.07.10.

1 BEVEZETÉS

A kutatás keretén belül kohézív talajok numerikus szimulációjával foglalkoztam. Diszkrét felépítésű anyagok modellezésével kapcsolatosan már évtizedek óta folynak kutatások. Próbálkozások voltak a mérnöki gyakorlatban gyakran alkalmazott végeleemes módszer (VEM vagy FEM – Finite Element Method) alkalmazására, az elért eredmények azonban azt mutatták, hogy ezzel a módszerrel csak korlátozottan modellezhető a talaj mozgása. Ennek oka az, hogy a végeleemes szoftverek az anyagot folytonos, homogén anyagmodellként szimulálják, így a szerkezet mozgását az egyes elemek deformációi határozzák meg. Ezzel szemben szemcsés anyagok esetén a mozgás alapvetően az egyes elemek egymáson való legördülésére, csúszására vezethető vissza, ezért az ilyen szerkezetű anyagok modellezésére a diszkrét elemes módszer (DEM – Discrete Element Method) tűnik a legalkalmasabbnak. Így a kutatásomban a Particle Flow Code (PFC) nevű szoftver két- és háromdimenziós változatával szimuláltam a kohézív talajok viselkedését.

A beszámoló első fejezetében röviden összefoglaltam a témával kapcsolatos szakirodalmi áttekintést, illetve bemutattam a diszkrét elemes módszert és a felhasznált kapcsolattípusokat. Végül a kutatás során elért eredményeimet ismertettem.

2 TARTALOMJEGYZÉK

1	BEVEZETÉS	2
3	SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
3.1	Talajok mechanikai paramétereinek bemutatása	4
3.2	A Diszkrét Elemes Módszer bemutatása	5
3.2.1	<i>Matematikai háttér</i>	5
3.2.2	<i>A diszkrét elemes modell részei</i>	7
4	NUMERIKUS NYÍRÓDOBOZOS SZIMULÁCIÓK	9
4.1	A nyíródobozos szimulációk beállításai	9
4.2	A nyíródobozos szimulációk eredményei	10
5	TALAJ-MEREV KERÉK KAPCSOLAT SZIMULÁCIÓK	12
5.1	Az elméleti összefüggések	12
5.2	A szimulációk eredményei	12
6	ÖSSZEFOGLALÁS	14

3 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

3.1 Talajok mechanikai paramétereinek bemutatása

A talajok súrlódásos tulajdonságainak jellemzésére alapvetően kétféle talajmechanikai paraméter szolgál: a kohézió és a belső súrlódási szög. Ennek a két jellemzőnek a mérésére több eljárás is elterjedt. Lehetőség van szántóföldi és laboratóriumi tesztek elvégzésére egyaránt, talán a legelterjedtebb mérési eljárás a nyírókeretes készülékkel végzett nyíródobozos vizsgálat. A kísérlet a laboratóriumi eljárások közé tartozik, a készülék kialakítását a következő ábra szemlélteti:



1. ábra. Nyírókeretes nyírókészülék.

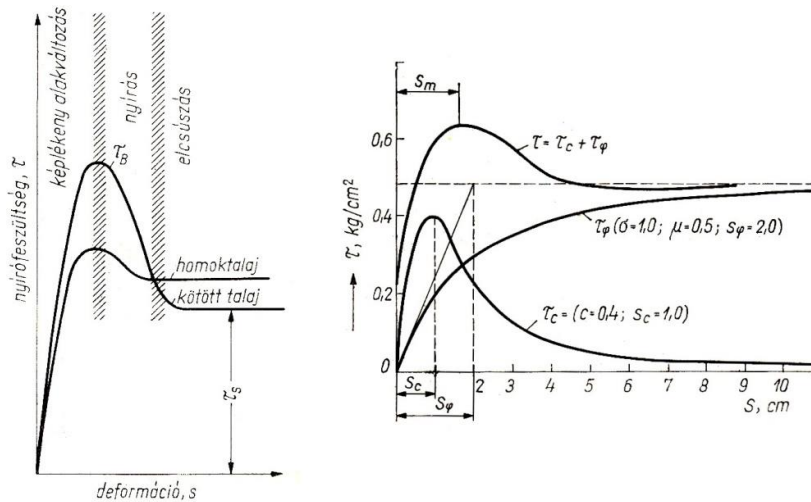
A mérés előtt a talajmintával fel kell tölteni a készüléket, majd adott függőleges előterhelést kell adni az anyagnak. Ezután a doboz felső felét az alsóhoz képest elmozdítjuk, amellyel a dobozban lévő talajmintát nyírásnak tesszük ki. A folyamat során mérjük a mozgó dobozfél elmozdításához szükséges nyíróerőt és az elmozdulás nagyságát is. A vizsgálat nagyon kis nyírási sebesség mellett zajlik, így statikus folyamatnak tekinthető.

A talajok súrlódási tulajdonságait nagyban befolyásolja a szemcseösszetétel, amely alapján a talajok az alábbi 3 különböző osztályba sorolhatók:

- Homoktalaj.
- Vályogtalaj.
- Agyagtalaj.

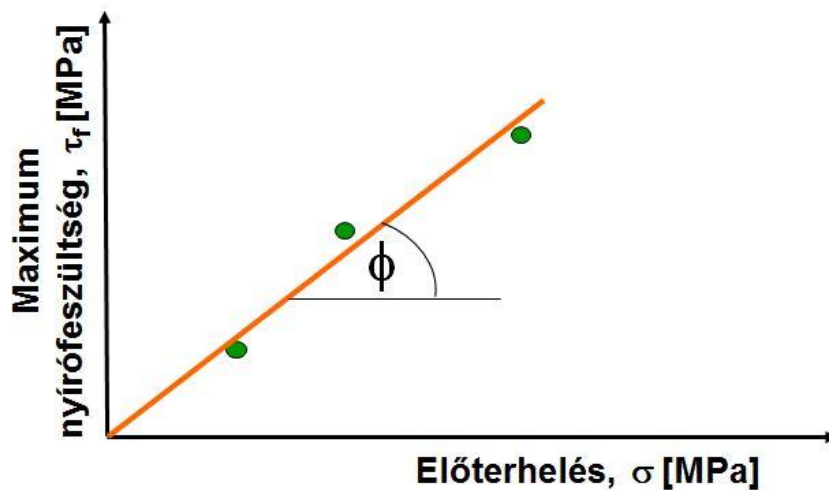
Az agyagtalajok nagy kohézióval rendelkeznek, tehát viszonylag nagy húzásnak is ellen tudnak állni. Ezzel szemben a homoktalajok kohéziója közelítőleg 0, tehát nem képesek húzóerőt felvenni. A nyíródobozos mérések eredményei azt mutatták, hogy különböző talajtípusok esetén jellegre más nyíróerő-elmozdulás görbe rajzolható fel. A 2. ábrán látható a két jellegzetes típus: a csúcsos és az aszimptotikus diagram. A homoktalajokra az aszimptotikus jellegű nyíróerő-elmozdulás görbe a jellemző, míg agyagtalajoknál a csúcsos diagramot kapjuk eredményül. Ennek az az oka, hogy a folyamat elején kohézív talajok esetén először „össze kell törni” a kohéziót, majd utána indulhat meg az

anyagminta tényleges nyírása (ld. a 2. ábrát). Ezért a folyamat elején nagyobb erőre van szükség a dobozfél elmozdítására, mint állandósult esetben.



2. ábra. Jellegzetes nyíródiagramok.

A kohézió és a belső súrlódási szög meghatározásához több különböző nagyságú előterhelés mellett kell felvenni a fenti diagramokat, majd a jellegzetes értékeket az előterhelés függvényében ábrázolva felrajzolható a talajra jellemző Coulomb-egyenes. Az egyenes meredekségéből a belső súrlódási szög értéke számítható ki, az egyenes és a függőleges tengely metszéspontja pedig a kohéziót adja eredményül (ld. az alábbi ábrát).



3. ábra. A Coulomb-egyenes felrajzolása.

3.2 A Diszkrét Elemes Módszer bemutatása

3.2.1 Matematikai háttér

A diszkrét elemes módszer lényege, hogy az anyagot egymástól különálló elemek halmazaként modellezzük. A teljes mozgási folyamatot kicsi dt időlépésekre bontjuk, majd minden egyes időlépésben meghatározzuk az elemek saját $\underline{u}^P(t)$ elmozdulás-vektorát, amelyekből felállítható a teljes rendszerre vonatkoztatott $\underline{u}(t)$ elmozdulás-vektor. A módszer előnye, hogy a véges elemes eljárásokkal ellentétben az egyes elemek elmozdulásainak semmilyen folytonossági követelménynek nem kell eleget

tenniük. A rendszer $\underline{u}(t)$ elmozdulás vektorának egyedül az alábbi mozgásegyenletet kell kielégítenie minden egyes időpillanatban:

$$\underline{\underline{M}}(t) \cdot \frac{d^2 \underline{u}(t)}{dt^2} = \underline{f}\left(t, \underline{u}(t), \frac{d\underline{u}(t)}{dt}\right).$$

Az egyenletben található $\underline{\underline{M}}(t)$ mátrix az elemek tömegét és tehetetlenségi nyomatékait, \underline{f} pedig az elemre ható erőket elemekre csoportosítva tartalmazza. Ezek az erők már a szerkezetet terhelő külső erők mellett a P -edik elemre a szomszédos elemekről átadódó kapcsolati erőket is figyelembe veszik. Az előbbieket alapján a terhelőerők nem csak az időtől, hanem az elemek elmozdulásaitól és sebességeitől is függhetnek. Matematikailag tehát minden időlépésben egy másodrendű differenciál-egyenletrendszer kell a programnak megoldania, amelyre többféle numerikus lehetőség is van. Az eljárások többsége csak elsőrendű differenciál-egyenletrendszer esetén alkalmazható, ezért első lépésben a mozgásegyenletet át kell alakítani elsőrendűvé. Ezután az i -edik időpillanatban ismert $\underline{u}_i(t)$ és $\underline{v}_i(t) = \frac{d\underline{u}_i(t)}{dt}$ adatokból kiindulva a mozgásegyenletet felírva a következő, tehát $i+1$ -edik időpillanatban kiszámítható $\underline{u}_{i+1}(t)$ és $\underline{v}_{i+1}(t)$ értéke is. A folyamatot ismételve a rendszer időbeli mozgása nagyon jól leírható. A PFC programcsomag az explicit Euler-módszer egy javított változatát, az ún. centrális differenciák módszerét használja fel a rendszer elmozdulás vektorának meghatározásához. Az $i+1$ -edik időpillanatban az elmozdulás vektor az alábbi összefüggéssel számítható:

$$\underline{u}_{i+1} = \underline{u}_i + \Delta t \cdot \underline{v}_{i+\frac{1}{2}}.$$

A mennyiségek jelentése: Δt az időintervallum hossza, $\underline{v}_{i+\frac{1}{2}}$ pedig a sebesség vektor az i -edik és az $i+1$ -edik időpillanat felezőpontjában. Kiszámításukra a következő egyenletekkel van lehetőség:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i.$$

$$\underline{v}_{i+\frac{1}{2}} = \underline{v}_{i-\frac{1}{2}} + \Delta t \cdot \underline{\overline{f}}\left(t; \underline{u}_i; \underline{v}_{i-\frac{1}{2}}\right).$$

A fenti összefüggésben található $\underline{\overline{f}}$ vektor a mozgásegyenletben szereplő mennyiségek segítségével határozható meg:

$$\underline{\overline{f}}\left(t; \underline{u}_i; \underline{v}_{i-\frac{1}{2}}\right) = \underline{\underline{M}}^{-1} \cdot \underline{f}\left(t; \underline{u}_i; \underline{v}_{i-\frac{1}{2}}\right).$$

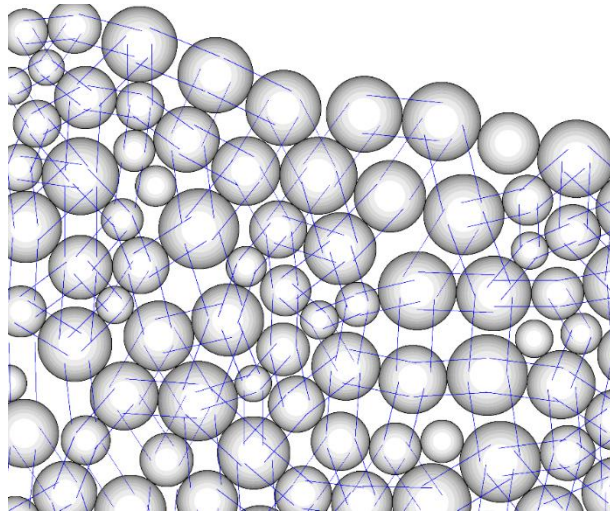
A számítás első lépésénél $\underline{v}_{0-\frac{1}{2}}$ nem értelmezhető, ezért ekkor a következő összefüggést célszerű alkalmazni:

$$\underline{v}_{0-\frac{1}{2}} = \underline{v}_0.$$

Az iterációs számítás végén így már meghatározható minden egyes időpillanatban a rendszer elmozdulása. A teljes folyamat alatt bekövetkezett mozgást pedig az időpillanatokban kapott elmozdulás-vektorok összegzéseként nyerjük.

3.2.2 A diszkrét elemes modell részei

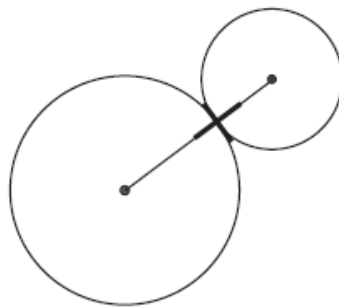
A fent bemutatott számítás elvégzéséhez szükség van az elemek közötti kapcsolati erők értékére is, amelyek a kapcsolat típusától és a kapcsolati paraméterek értékétől egyaránt függenek. Ezenkívül még egy nagy szerepe van a különböző kapcsolat-típusoknak. A legtöbb diszkrét elemes szoftver tökéletesen merev elemeket használ, így a különböző anyagok helyes modellezésére csak akkor van lehetőség, ha a megfelelő típusú kapcsolatot definiálunk az elemek között. Az eddigi kutatások szerint a kohézív talajok mozgásának szimulációjára két különböző kapcsolati modell egymás melletti alkalmazása esetén van lehetőség, amelyek a PFC szoftverben a *Linear* és a *Parallel Bond* nevet viselik.



4. ábra. A diszkrét elemes modell részei.

A Linear modell tulajdonképpen a Coulomb-súrlódásos kapcsolati modellt jelenti. Az 5. ábra alapján két kör vagy gömb alakú elem érintkezési pontjában adódhat át nyomóerő a két szemcse között. A nyomóerő irányát az érintkezési normális jelöli ki, tehát a két szemcse középpontját összekötő egyenes irányával egyezik meg. Az erre merőleges tangenciális (érintő) irányban az alábbi nagyságú súrlódó erő adódhat át egyik elemről a másikra:

$$F_{súrl} = N \cdot \mu.$$



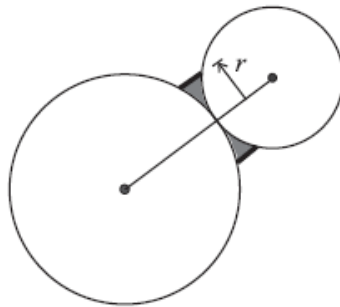
5. ábra. Az ún. "Linear" kapcsolati modell.

A képletben μ a két szemcse közötti súrlódási tényezőt, N pedig a nyomóerőt jelöli. Ez a kapcsolati modell az egyszerűsége miatt szinte minden számításban használatos, hátránya viszont, hogy a két elem között húzóerő és nyomaték nem tud átadódni. Hiszen húzó irányú erő hatására az elemek közötti kapcsolat megszűnik és a két szemcse egymástól függetlenül kezd el mozogni, nyomaték átadására pedig nyilvánvalóan a pontszerű érintkezés miatt nincs lehetőség.

A kapcsolat definiálásához az alábbi paraméterekre van szükség:

- μ [–] sűrűdési tényező.
- kn [N/m] normál-merevség.
- ks [N/m] nyíró-merevség.

A merevségi értékek erő/elmozdulás mértékegységűek, tehát minél jobban összeér a két elem (minél nagyobb a két elem közötti átfedés), annál nagyobb a kapcsolati erő értéke. Itt látszik, hogy milyen egyszerűen lehet tökéletesen merev elemek esetén kiszámítani az erő értékét, amely az iterációs számításban nagyon sokszor előfordul. Nem véletlen tehát, hogy a legtöbb diszkrét elemes szoftver merev elemekkel dolgozik. Említésre méltó még, hogy lehetőség van az elemek lokális csillapítási tényezőjének beállítására is, amellyel az energia-disszipáció jelensége modellezhető.



6. ábra. Az ún. "Parallel Bond" kapcsolati modell.

A másik kapcsolat-típus az ún. Parallel Bond modell, amely viszonylag friss kutatási eredmény, hiszen 2004-ben publikálták először. A modell lényege, hogy a két elem érintkezési pontjától $2r$ távolságra (ld. a 6. ábrát) egy-egy rugót helyezünk a szemcsék közé, amelyek normál és érintő irányban egyaránt képesek erőt átadni a szomszédos elemek között. Ebből következik, hogy húzó- és nyomóerő is felléphet a szemcsék között a kapcsolat felszakadása nélkül. Továbbá ezzel a modellel már nyomóerő is átadható az egyik elemről a másikra, hiszen a két erő között $2r$ nagyságú erőkar található. A kapcsolat definiálásához az alábbi paraméterekre van szükség:

- r [m] Parallel Bond rádiusz.
- pb_kn [Pa/m] normál-merevség.
- pb_ks [Pa/m] nyíró-merevség.
- $pb_nstrength$ [Pa] normál-szilárdság.
- $pb_sstrength$ [Pa] nyíró-szilárdság.

Látható, hogy a merevségi értékek mértékegysége ezúttal feszültség/elmozdulás alapú. Ennek az oka az, hogy a rugók rendelkeznek egy szilárdsági határértékkel, amelyet a kapcsolatban ébredő feszültség értéke nem haladhat meg, különben a kapcsolat felszakad és a rugók törlődnek az elemek közül. Mivel a szilárdság feszültség mértékegységű, így a kapcsolati erők egyszerű és gyors számításához feszültség/elmozdulás mértékegységű merevségre van szükség.

Az előbb bemutatott kapcsolati típusok segítségével modelleztem a kohézív talajok viselkedését. Első lépésként numerikus nyíródobozos szimulációkat készítettem annak érdekében, hogy a kapcsolati paraméterek értékét valós talajnak megfelelően állítsam be. A következő fejezetben ismertetem a számítások eredményeit.

4 NUMERIKUS NYÍRÓDOBOZOS SZIMULÁCIÓK

4.1 A nyíródobozos szimulációk beállításai

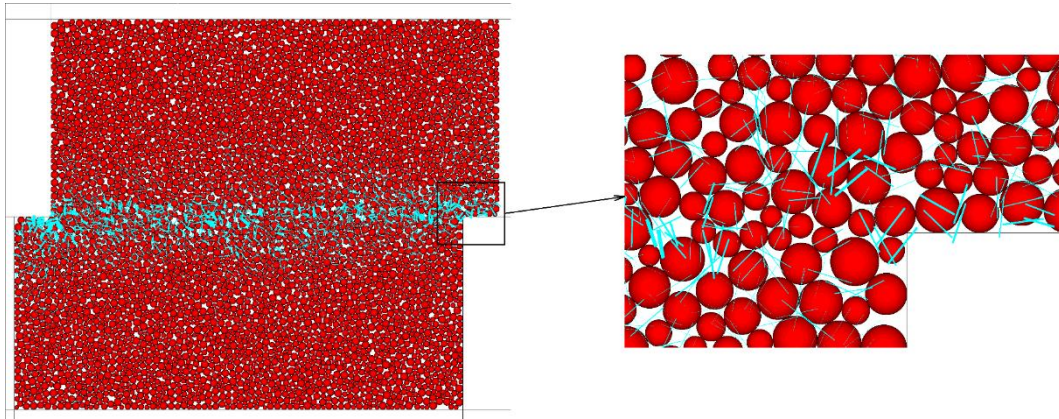
A numerikus nyíródobozos szimulációk segítségével azt vizsgáltam, hogy az anyagmodellem mennyire feleltethető meg valós kohézív talajnak. Ehhez először két- majd három-dimenzióban készítettem el a szimulációs programokat a PFC program által használt FISH programnyelven.

Első lépésben fal elemekből létrehoztam a dobozt, majd összesen 5000 db elemet generáltam. Az előre megadott porozitás elérésének megfelelően módosítottam az elemek rádiuszát, amelynek egy szintén előre definiált tartományba kellett esniük. A következő lépés a kapcsolati paraméterek definiálása volt, amely az előző fejezetben ismertetett összesen 8 db jellemző megadását jelentette. Ezek mellett számításba kell venni az elemek sűrűségét is, hiszen ez is befolyásolja a szemcsék mozgását. Az előbb említett beállításokat számszerűsítve az 1. táblázat tartalmazza.

Geometriai méretek		
Falak (a nyíródoboz és a merev kerék méretei)		
A doboz hossza	mm	300.0
A doboz magassága	mm	60.0
A doboz szélessége	mm	40.0
A kerék átmérője	mm	160.0
A kerék szélessége	mm	40.0
Elemek		
Az elemek száma	-	5000
Az elemek átmérője	mm	0.66...1.5
Mechanikai tulajdonságok		
Falak (nyíródoboz és merev kerék)		
Normál merevség	N/m	$1 \cdot 10^{20}$
Nyíró merevség	N/m	$1 \cdot 10^{20}$
Elemek		
Súrlódási együttható	-	0.5
Sűrűség	kg/m	1900
Elem normál merevség	N/m	$7 \cdot 10^6$
Elem nyíró merevség	N/m	$7 \cdot 10^6$
Parallel Bond normál	Pa/m	$7 \cdot 10^6$
Parallel Bond nyíró	Pa/m	$7 \cdot 10^6$
Parallel Bond normál	Pa	$2 \cdot 10^5$
Parallel Bond nyíró	Pa	$2 \cdot 10^5$
Parallel Bond rádiusz	-	0.5

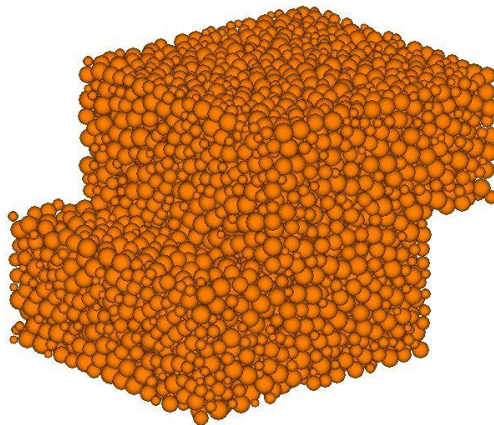
1. táblázat. A nyíródobozos szimulációk eredményei.

Ezután az előterhelés megadásához illetve állandó értéknek tartásához az un. szervó-mechanizmus adaptálására volt szükség, hiszen a szimulációs falakra nem adható terhelés, azoknak csak a mozgásállapotát tudja a felhasználó beállítani. Ezért a doboz felső falának sebességét úgy kell a nyírás folyamán szabályozni, hogy a falra az elemekről átadódó kapcsolati erők összege az előterhelés értékével egyezzen meg.



7. ábra. Pillanatkép a kétdimenziós nyíródobozos szimulációról.

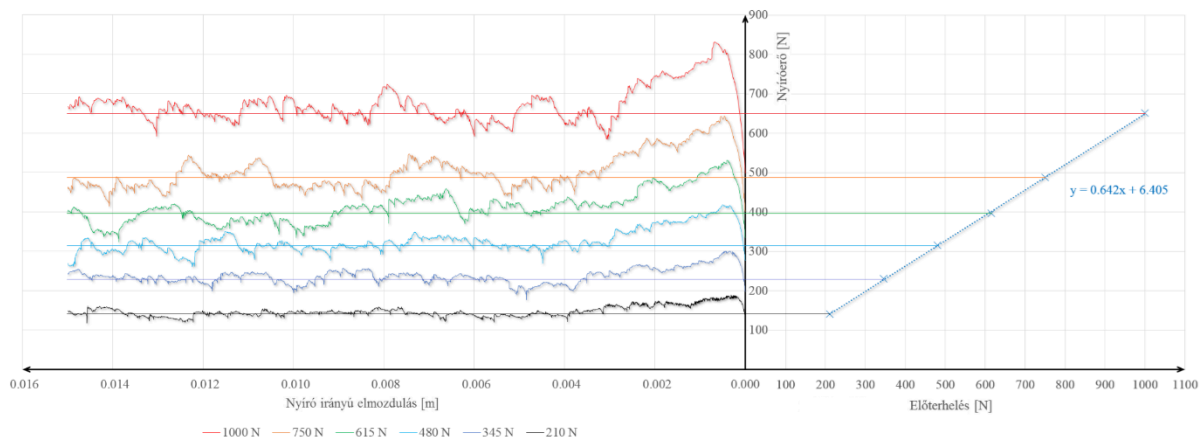
A fenti ábra egy pillanatképet ábrázol az egyik 2D-s szimulációról. Az ábrán jól látható a két dobozfél, valamint az elemek között kékekkel jelölt, a Parallel Bond rugókban ébredő/átadódó erők is, amelyek nagysága a kék vonalak vastagságával arányos. Az ábra alapján elmondható, hogy a legnagyobb húzóerők a nyírási zónában ébrednek, amely mindenképpen megfelel az előzetes elvárásoknak. A következő ábrán a 3D-s szimuláció esetén látható a geometria.



8. ábra. Pillanatkép a háromdimenziós nyíródobozos szimulációról.

4.2 A nyíródobozos szimulációk eredményei

A számítások eredményeit a 9. ábra segítségével lehet elemezni. Az ábra bal oldalán 6 különböző előterhelésnél kapott nyíróerő-elmozdulás görbe látható, amelyekből a szakirodalmi áttekintésben leírtaknak megfelelően szerkeszthető meg az anyagmodell Coulomb-egyenese (ld. az ábra jobb oldalát). Az egyenes egyenletéből pedig könnyen kiszámítható a két talajmechanikai jellemző: a kohézió és a belső súrlódási szög. A kapcsolati paraméterek változtatása során egyértelműen kijelenthető, hogy a két talajmechanikai jellemző értékére legnagyobb hatása az elemek merevségeinek (kn és ks) van. A merevségi értékek növelésével nő a belső súrlódási szög értéke is, amelynek a $15...35^\circ$ -os tartományba kell esni valós talaj szimulációjához.



9. ábra. A numerikus nyíródobozos szimulációk eredményei.

A következő lépés a kapcsolati paraméterek kalibrálása volt egy a szakirodalomból kiválasztott talajnak megfelelő értékekhez. Első lépésben a fenti következtetésnek megfelelően a kn és ks merevségi értékek nagyságrendjét kellett meghatározni annak érdekében, hogy a belső súrlódási szög a kívánt érték közelében legyen. A kalibrációs folyamat eredményét a 9. ábra mutatja be, amelyből az anyagmodell kohéziója és belső súrlódási szöge:

$$c = 1.78 \text{ kPa és } \phi = 32.7^\circ$$

Ezek elég közel vannak a választott $c = 1.7 \text{ kPa}$ és $\phi = 29.0^\circ$ értékekhez, tehát a kalibrációs számítások megfelelő pontosságúak.

A fentiek szerint beállított anyagmodell így már megfelelő arra, hogy a talaj-merev kerék szimulációkat lefuttassuk, és az eredményeket elméleti és/vagy mérési eredményekkel hasonlítsuk össze.

5 TALAJ-MEREV KERÉK KAPCSOLAT SZIMULÁCIÓK

A talaj-kerék szimulációk során első lépésben a kereket tökéletesen merev anyagként modelleztem, amely két okra vezethető vissza. Egyrészt a korábbi kutatások kimutatták, hogy megfelelően nagy abroncsnyomás esetén a kerék merevként viselkedik, másrészt pedig a szimulációs programok sokkal egyszerűsödnek, hiszen csak a talajmodell kalibrálásával kell foglalkozni. Lehetőség van ugyan deformálódó abroncs modellezésére is, de ez egy későbbi kutatás tárgyát fogja képezni.

Talaj-merev kerék kapcsolat modellezésénél a kerék függőleges terhelés hatására bekövetkező süllyedésének, a talaj-deformációjának meghatározása volt a célom. A számítások eredményeit elméleti adatokkal hasonlítottam össze.

5.1 Az elméleti összefüggések

A XX. században nagyon sok kutatás folyt a talaj-gumiabroncs kapcsolat megfelelő leírására vonatkozóan. Az egyik legnagyobb amerikai kutatóközpontban Bekker irányításával vizsgálták a kerék süllyedését is. A mérési eredményeket összesítve az alábbi egyenletet dolgozták ki a süllyedés mértékére:

$$z = \left[\frac{3 \cdot N}{(3-n) \cdot b \cdot k \cdot d^{0,5}} \right]^{2 \cdot n+1}.$$

A képletben található mennyiségek jelentései az alábbi táblázatban találhatóak meg.

Jelölés	Mértékegység	Megnevezés
z	m	A kerék süllyedése
N	N	A kerékre ható függőleges terhelés
n	-	Talajtól függő állandó
b	m	A kerék szélessége
d	m	A kerék átmérője
k	Pa · m ⁻ⁿ	Talajtömörödési tényező
k _c	Pa · m ⁻⁽ⁿ⁻¹⁾	
k _φ	Pa · m ⁻ⁿ	

2. táblázat. A Bekker formulában található mennyiségek értelmezése

A táblázat alján lévő k_c és k_ϕ tényezők a talaj kohéziójától és belső súrlódási szögétől függő állandók, amelyekből az alábbi egyenlet segítségével felírható a talajtömörödési tényező értéke:

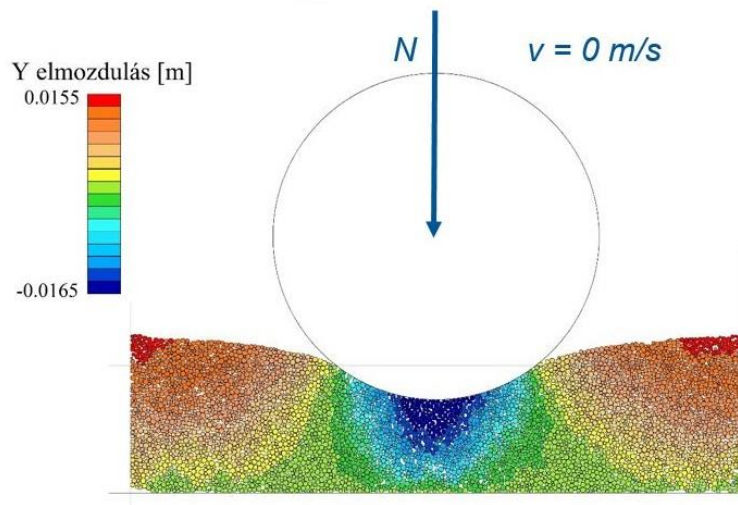
$$k = \frac{k_c}{b} + k_\phi.$$

A szakirodalomban a talajtól függő állandók, tényezők értékére vonatkozóan lehet mérési eredményeket találni, így adott geometriájú kerék adott terhelés hatására bekövetkező süllyedésének elméleti értéke kiszámítható.

5.2 A szimulációk eredményei

A szimulációk beállításai és a kezdeti geometria létrehozásának folyamata megegyezik a nyíródobozos vizsgálatoknál leírtakkal. Az 1. táblázat tartalmazza a geometriai és mechanikai jellemzők

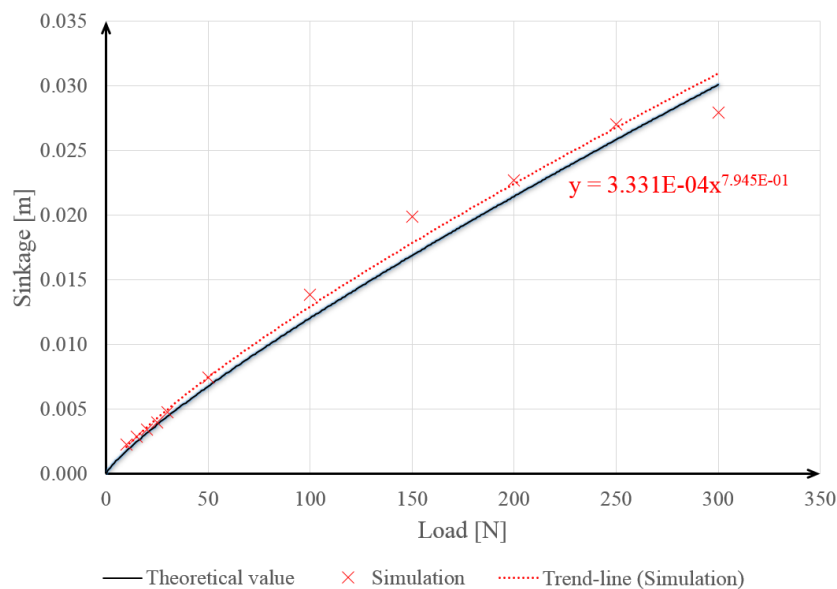
beállításait egyaránt. A kereket merev fal elemként modelleztem, az eredményeket a következő ábrák segítségével mutatom be.



10. ábra. A talaj-kerek kapcsolati szimulációk eredményei.

A 10. ábrán a talajszemcsék függőleges elmozdulásai láthatók. Az ábra alapján kijelenthető, hogy a legnagyobb elmozdulása a kerék alatti szemcséknek van. A kerék talajba nyomódásának következménye, hogy az oldalfalak mellett megemelkedik a talajmodell, amelyet a pozitív irányú elmozdulások jeleznek.

Különböző függőleges terhelések hatására meghatároztam a kerék süllyedésének értékét, amelyet az elméleti értékkel hasonlítottam össze. A 11. ábra alapján kijelenthető, hogy a szimuláció nem csak jellegre, hanem számszerűen is helyesen szimulálja a kerék süllyedési folyamatát, hiszen a folytonos elméleti értékhez nagyon közel van a szimulációs eredményekre illesztett görbe. Ez azt jelenti, hogy a szimulációs eredmények 15%-os relatív hibán belül vannak az elméleti értékhez képest, amely folyamatosan változó anyagok esetén jó értéknek mondható.



11. ábra. A kerék süllyedésének összehasonlítása az elméleti értékkel.

6 ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás keretein belül a talaj-merev kerék kapcsolatát vizsgáltam diszkrét elemes módszer segítségével. Célom olyan talajmodell létrehozása volt, amellyel könnyen modellezhető a fenti kapcsolat, lehetőséget nyújtva ezáltal a drága szántóföldi kísérletek helyettesítésére.

Első lépésben a szakirodalom alapján kiválasztottam azokat a talajmechanikai jellemzőket, amelyek a legnagyobb mértékben befolyásolják a talaj súrlódásos viselkedését, majd a Particle Flow Code diszkrét elemes programcsomag segítségével valós talajnak megfelelő anyagmodellt készítettem. Ehhez szükség volt az elemek között megfelelő kapcsolati típusok kiválasztására, majd a kapcsolati paraméterek kalibrálására. Ezért numerikus nyíródobozos szimulációk segítségével modelleztem a talaj nyírását, és a valós mérésekhez hasonlóan kiértékeltem a kapott eredményeket. Az anyagmodell Coulomb-egyenesének felrajzolása után az egyenes egyenletéből meghatároztam a talajmodell kohézióját és belső súrlódási szögét. Célom olyan kapcsolati beállítások alkalmazása volt, amely a szakirodalomban megtalálható talajmechanikai jellemzőkkel rendelkező talajnak felel meg. Meghatároztam azokat a kapcsolati paramétereket is, amelyek a legjobban befolyásolják a kohézió, illetve a belső súrlódási szög értékét.

A következő lépés a talaj-merev kerék kapcsolat vizsgálata volt, a kerék függőleges terhelés hatására bekövetkező süllyedését szimuláltam a kalibrált kapcsolati jellemzőkkel felruházott anyagmodellem segítségével. A számítások eredményei azt mutatják, hogy a kerék süllyedésének értéke 15%-os relatív hibával közelíti az elméleti értéket, amely a talajmechanikai számítások esetén nagyon jó értéknek mondható.