MEZŐGAZDASÁGI TALAJOK SZIMULÁCIÓJA DISZKRÉT ELEMES MÓDSZER (DEM) SEGÍTSÉGÉVEL

DISCRETE ELEMENT SIMULATION OF AGRICULTURAL SOIL

Kotrocz Krisztián, PhD hallgató; Dr. Kerényi György, egyetemi docens
BME, Gép- és Terméktervezés Tanszék
H-1111, Budapest, Bertalan Lajos u. 1.

ABSTRACT: In this paper the cohesive soil-tool interaction was modelled by discrete element method. The model was built with circle elements and their contact. To define the contacts between the particles contact bonds and parallel bonds were used. Our goal was to measure the tool's draught force and to compare it with real measuring achievements.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a mezőgazdasági termelésben egyre nagyobb szerep jut a környezetbarát talajművelési technológiák kidolgozásának és fejlesztésének. A fejlesztés egyik iránya a talajművelő szerszámok vontatási ellenállásának csökkentése úgy, hogy a művelés minősége ne változzon kedvezőtlenül. Az eddigi kutatások inkább csak kísérleti jelleggel próbálták feltárni a kapák vontatási ellenállását, numerikus számításokkal csak a talaj rugalmas alakváltozásáig lehetett vizsgálni a jelenséget. A szimulációknál a cél a talajban létrejövő repedések, elmozdulások meghatározása, így kézenfekvő megoldásnak tűnik a diszkrét elemes modellezés felhasználása a probléma megoldására.

Célunk bemutatni, hogy a diszkrét elemes módszer segítségével létrehozott kétdimenziós modell is lehetőséget biztosít az egyes szerszámok vontatási ellenállásának összehasonlítására, megfelelően kalibrált anyagmodell esetén pedig akár a vontatási ellenállás pontos meghatározására is.

2. A DISZKRÉT ELEMES MÓDSZER

A gyakorlatban sokszor előfordulnak olyan problémák, amelyeknél diszkrét felépítésű szerkezet viselkedését kell leírni. Az ilyen esetekben a szerkezet mozgását nagyrészt nem az egyes elemek deformációi határozzák meg, hanem az elmozdulások értékei nagyban függnek a szemcsék egymáson való csúszásától, gördülésétől is. Ezért a diszkrét jelleget mutató anyagok modellezésére a véges elemes eljárások csak korlátozott módon használhatók fel, helyettük a diszkrét elemes módszer (DEM) alkalmazható.

Egy diszkrét elemes modell minden esetben a modellt alkotó elemekből, és az elemek között definiált kapcsolatokból épül fel. Cundall és Hart definíciója szerint egy numerikus eljárás akkor tekinthető diszkrét elemes modellnek, ha [1]:

- egymástól egyértelműen elkülöníthető elemekből épül fel,
- minden elem önálló elmozdulási szabadságfokkal rendelkezik oly módon, hogy a modell képes követni az elemek elmozdulásait és elfordulásait,
- az elemek közötti kapcsolatok felszakadhatnak, de a modell kezelni tudja az új kapcsolatok létrejöttét is.

2.1. A mozgásegyenlet

A diszkrét elemes modell definíciójából következik, hogy a véges elemes eljárásokkal ellentétben a diszkrét elemes modellek esetén az egyes elemek elmozdulásainak semmilyen folytonossági követelménynek nem kell eleget tenniük. A rendszer $\underline{u}(t)$ elmozdulás vektorának (amely az elemek $\underline{u}^P(t)$ elmozdulás vektoraiból állítható elő) egyedül az alábbi mozgásegyenletet kell kielégítenie [1]:

$$\underline{\underline{M}}(t)\cdot\frac{d^2\underline{u}(t)}{dt^2}=\underline{f}\left(t,\underline{u}(t),\frac{d\underline{u}(t)}{dt}\right). \qquad (1)$$

Az egyenletben található $\underline{\underline{M}}$ mátrix az elemek tömegét és tehetetlenségi nyomatékait, $\underline{f}$ pedig az elemre ható erőket elemekre csoportosítva tartalmazza. Ezek az erők nem csak a szerkezetet terhelő külső erőket jelentik, hanem

a *P*-edik elemre a szomszédos elemekről átadódó kapcsolati erőket is figyelembe veszik. Ezért a terhelőerők az időtől, az elemek elmozdulásaitól és sebességeitől egyaránt függhetnek.

2.2. A centrális differenciák módszere

A megfelelő informatikai háttérnek köszönhetően a programok különféle numerikus módszereket használnak a mozgásegyenlet kezdetiérték-problémáinak megoldására. Több eljárás csak elsőrendű differenciál-egyenletrendszer esetén alkalmazható, a mozgásegyenlet (1) alapján viszont másodrendű. Ezért első lépésben egy helyettesítéssel át kell alakítani elsőrendűvé. Ezután az *i*-edik időpillanatban ismert $\underline{u}_i(t)$ és $\underline{v}_i(t)=\dfrac{d\underline{u}_i(t)}{dt}$ 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.

Az eljárások alapvetően két csoportba, az explicit és az implicit csoportba sorolhatók. Az általunk használt diszkrét elemes szoftver az explicit Euler-módszer egy javított változatát, az un. centrális differenciák módszerét használja fel a rendszer elmozdulás vektorának meghatározásához. Az *i+1*-edik időpillanatban az elmozdulás vektor az alábbi összefüggéssel számítható [1]:

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

A (2)-ben található 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. Kiszámításuk (3) és (4) segítségével történik:

$$\Delta t=t_{i+1}-t_i. \tag{3}$$

$$\underline{v}_{i+\frac{1}{2}}=\underline{v}_{i-\frac{1}{2}}+\Delta t\cdot\overline{\underline{f}}\left(t;\underline{u}_i;\underline{v}_{i-\frac{1}{2}}\right). \tag{4}$$

A (4)-ben található $\overline{\underline{f}}$ vektor a mozgásegyenletben szereplő mennyiségek segítségével határozható meg:

$$\overline{\underline{f}}\left(t;\underline{u}_i;\underline{v}_{i-\frac{1}{2}}\right)=\underline{\underline{M}}^{-1}\cdot\underline{f}\left(t;\underline{u}_i;\underline{v}_{i-\frac{1}{2}}\right). \tag{5}$$

A számítás első lépésénél $\underline{v}_{0-\frac{1}{2}}$ vektor értékének meghatározásához használható a következő összefüggés:

$$\underline{v}_{0-\frac{1}{2}}=\underline{v}_0. \tag{6}$$

Az eljárás segítségével így leírható a diszkrét elemek mozgása.

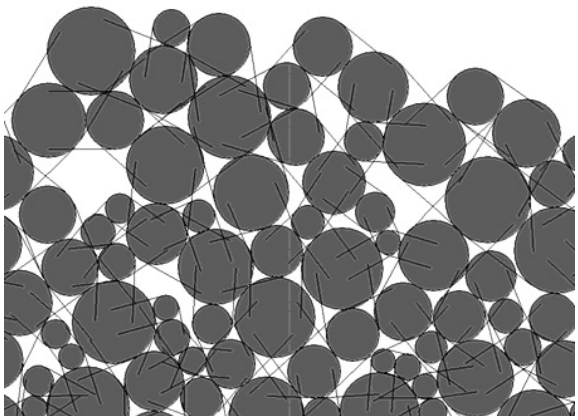
2.3. A Parallel Bond modell

A diszkrét elemes módszert felhasználó programok között az elemek deformálhatósága szerint kétféle típust különböztetünk meg:

- végtelen merev elemeket alkalmazó szoftverek,
- deformálható elemeket alkalmazó szoftverek.

Végtelen merev elemek esetén az elemeket nem lehet deformálni, így a vizsgálni kívánt rendszer mechanikai jellemzőit az elemek közötti kapcsolatok megfelelő modellezésével lehet beállítani. Ezért ilyen programok esetén különös jelentőséggel bír a diszkrét elemek közötti kapcsolatok helyes modellezése.

Az elemek között kialakuló kapcsolatok pontszerűen kicsik, így két szomszédos elem között nyomatékok nem, csak erők adódhatnak át. Az ilyen jellegű kapcsolat normál- és érintőirányban egyaránt egy rugóval, és egy csillapítással modellezhető, amelyek definiálásához szükség van rugómerevségi és csillapítási tényező értékekre normál- és érintőirányban.



1. ábra. A Parallel Bond kötés szemléltetése

A talaj kohéziós jellegét az un. Parallel Bond, tehát a párhuzamosan kötött diszkrét elemek modelljével lehet közelíteni [2], [3]. Az 1. ábrán látható módon a fent leírt pontszerű kapcsolat mellett az elemek között egymással párhuzamos rugók vannak beépítve, amelyek merevségén túl megadható egy szilárdsági

határérték is. Ha a kötésben részt vevő elemek elmozdulása nagy, akkor a kötés igénybevétele átlépheti a szilárdsági határértéket, amely miatt a kötés felszakad, a két elem egymástól független mozgást végez.

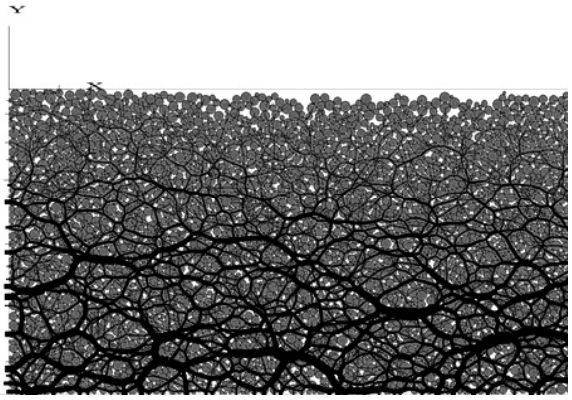
3. AZ ELVÉGZETT SZIMULÁCIÓS SZÁMÍTÁSOK

A véges elemes eljárásokhoz hasonlóan az első lépés a kiindulási geometria felvétele volt. Már az 1980-as 1990-es években végzett diszkrét elemes szimulációk során kiderült, hogy szabályos halmazok esetén helytelen eredményre jutunk. Ezért különböző sugarú köröket helyeztünk el egy téglalapban véletlenszerűen. A körök geometriai és mechanikai jellemzőit az 1. táblázatban tüntettük fel.

1. táblázat. A szimulációk beállítási paraméterei

Megnevezés	*Érték*	*Mérték-egység*
Elem típus	Ball	-
Elemek sűrűsége	1850	kg/m^3
Elemek száma	8000	db
Elemek sugara	5,6-21	mm
Időlépés	$1 \cdot 10^{-3}$	s/step
Gravitációs gyorsulás	9,81	m/s^2
Kapcsolati paraméterek		
Normál merevség	$2 \cdot 10^7$	N/m
Nyíró merevség	$1 \cdot 10^7$	N/m
Normál csillapítási tényező	0,7	-
Nyíró csillapítási tényező	0,7	-
Súrlódási tényező az elemek között	0,5	-
Súrlódási tényező az elemek és a szerszám között	0,6	-
Parallel Bond paraméterek		
Parallel Bond rugók távolsága/elemsugár	2	-
Parallel Bond normál merevség	$4 \cdot 10^9$	Pa/m
Parallel Bond nyíró merevség	$2 \cdot 10^9$	Pa/m
Parallel Bond normál szilárdság	$2 \cdot 10^6$	Pa
Parallel Bond nyíró szilárdság	$1 \cdot 10^6$	Pa

Mivel az így létrehozott elemek között átfedések voltak, ezután egy ülepítési folyamattal egyensúlyi helyzetbe hoztuk a rendszert. Az ülepítés végén kapott nyugalmi állapotot szemlélteti a 2. ábra, amelyen feltüntettük az elemek között ébredő kontakt-erőket is. Az erők nagyságával arányos a vonalak vastagsága, így az ábrán jól megfigyelhető a gravitáció miatt kialakuló fa-struktúra.

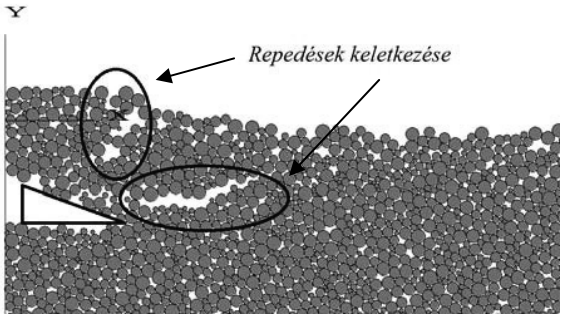


2. ábra. Az egyensúlyi helyzet

A kultivátor kapát kétdimenziós esetben egy egyszerű ék segítségével modelleztük. Ezután beállítottuk az első táblázatban található Parallel Bond értékeket, majd különböző művelési mélység, vontatási sebesség és lazítási szög mellett minden időlépésben rögzítettük az ékre ható művelési irányú erő nagyságát, amely megegyezik a kapa vontatási erőszükségletével. A szimulációk segítségével lehetőségünk nyílt vizsgálni a fent említett 3 paraméter (művelési mélység, vontatási sebesség, lazítási szög) vonóerőre gyakorolt hatását. A kapott eredményeket a 3.-6. ábrák segítségével mutatjuk be.

4. AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

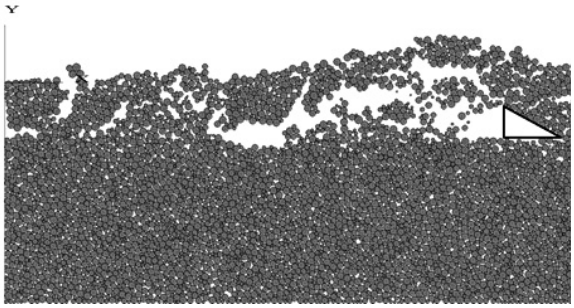
A 3. és 4. ábrán jól megfigyelhető a talajszemcsék kohéziós kapcsolata, hiszen a lazítás során rögképződési folyamat játszódik le.



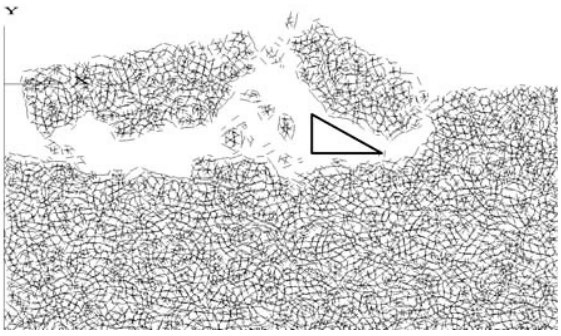
3. ábra. A lazítás és rögképződés folyamata (Művelési mélység: 30cm, Vontatási sebesség: 3m/s, Lazítási szög: 20°, Időlépés: 184.000)

Az 5. ábrán az elemek között lévő párhuzamos kötések, illetve azok eloszlása látható. Megfigyelhető, hogy a szerszám közvetlen környezetében ezek a kapcsolatok felszakadnak, belső repedés keletkezik a művelési mélységben. Ez a repedés elindul a felszín felé, majd amikor eléri azt, egy több

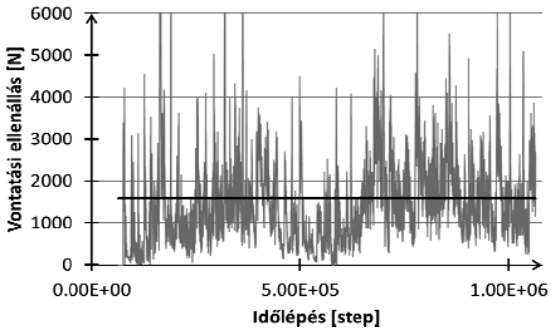
szemcséből álló un. klaszter alakul ki, amely egy nagyobb rögnek feleltethető meg. A szimulációkból kiderül, hogy az elemek önállóan, illetve klaszterekbe rendeződve is elég nagy elmozdulásokra és elfordulásokra képesek.



4. ábra. A lazítás és rögképződés folyamata (Művelési mélység: 30cm, Vontatási sebesség: 3m/s, Lazítási szög: 30°, Időlépés: 1.064.000)



5. ábra. A Parallel Bond kapcsolatok felszakadása a szimuláció során (Művelési mélység: 30cm, vontatási sebesség: 1m/s, lazítási szög: 30°, Időlépés: 1.704.000)



6. ábra. A számítás végén kapott vontatási ellenállás (Művelési mélység: 30cm, vontatási sebesség: 3m/s, lazítási szög: 30°)

A 6. ábrán látható a mért vontatási erőszükséglet 30cm-es munkamélység, 3m/s vontatási sebesség és 30°-os lazítási szög mellett. Megfigyelhető, hogy a kapott görbe nagyban hasonlít egy talajvályús mérés eredményére [4]. A görbe kiugró pontjai valószínűleg a repedések keletkezésénél jelentkeznek, hiszen a repedés további terjedéséhez már kisebb erő is elegendő. Az ábrán bejelöltük az erőszükséglet átlagát is, hiszen dinamikus vizsgálat mellett ennek az értéknek van a legnagyobb szerepe. Az értékek közelítőleg megegyeznek az [4]-ben található adatokkal, ha figyelembe vesszük azt, hogy kétdimenziós szimulációkról van szó. Ez azt jelenti, hogy a kultivátor kapaként modellezett ék egységnyi, tehát 1m szélességű. Így a görbén kapott értékeket kb. harmadolni kell ahhoz, hogy a gyakorlatban használt 30-35cm széles művelő elem vontatási erőszükségletét kapjuk meg. Ezt figyelembe véve a szimulációk eredményeit a 2. táblázatban foglaltuk össze.

2. táblázat: Az átlagos vonóerő értékei

Beállítások	*Átlagos vontatási erőszükséglet [N]*
Művelési mélység: 30cm Vontatási sebesség: 3m/s Lazítási szög: 30°	526,7
Művelési mélység: 30cm Vontatási sebesség: 1m/s Lazítási szög: 30°	190,7
Művelési mélység: 30cm Vontatási sebesség: 3m/s Lazítási szög: 20°	296,7
Művelési mélység: 20cm Vontatási sebesség: 3m/s Lazítási szög: 20°	233,3

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Az elvégzett számítások alapján elmondhatjuk, hogy a diszkrét elemes eljárás kétdimenziós esetben megfelelően modellezi a kultivátor kapa talajra kifejtett hatását. A szimulációk jól közelítik a valós, kohézív talajok viselkedésének jellegét, amelyet a Parallel Bond kapcsolat értékeinek helyes beállításával lehet elérni. Elmondható, hogy a kapott vontatási ellenállás értékek közelítőleg megfelelnek egy valós talajvályús mérési eredménynek, de a szimulációs paraméterek finomításával szükség van a modellezés pontosítására.

6. IRODALOM

[1] Bagi Katalin, BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék, Budapest, 2007, ISBN 978-963-420-929-4 www.epito.bme.hu/me/dolgozok/feltoltesek/kbagi/dem.pdf

[2] Tamás K., Jóri J.I.: A talaj-szerszám kapcsolat diszkrét elemes vizsgálata. Mezőgazdasági Technika LI: (5) pp. 2-5.

[3] Simulation on mechanical behaviour of cohesive soil by Distinct Element Method. Journal of Terramechanics 43 303-316, 2006.

[4] Kapatestek összehasonlító vizsgálata. FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet, Gödöllő, 2008.05.24.