

# Talaj-eké-szármaradvány egymásra hatás diszkrét elemes szimulációjának paraméter érzékenységi vizsgálata

## Parameter sensitivity analysis of the soil-plough-stem interaction with discrete element method

PÁSTHY László<sup>1</sup>, Dr. TAMÁS Kornél<sup>2</sup>

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,  
Gép- és Terméktervezés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3  
<sup>1</sup>pasthy.laszlo@edu.bme.hu, <sup>2</sup>tamas.kornel@gt3.bme.hu

### Abstract

*The aim of this research was the development a discrete element method (DEM) model of a ploughing process with a two-body plough, in which the stem residues left by the harvesting process are taken into account. After the DEM model was prepared, a time step sensitivity analysis followed, and then the simulations were run with different parameters. The obtained results can be an appropriate starting point to calibrate the parameters of a more accurate soil DEM model, and the resulting force values can also be used for the design of real ploughs.*

**Keywords:** soil tillage, plough, soil-plough-stem interaction stem residues, DEM

### Kivonat

*A kutatás célja egy két testű ekével történő szántási folyamat diszkrét elemes (DEM) szimulációjának a kifejlesztése volt, amelyben figyelembe vannak véve a betakarítási folyamat révén visszamaradt szármaradványok. A modell előkészítése után egy időlépés vizsgálat következett, majd különböző beállítási paraméterekkel le lettek futtatva a szimulációk. A kapott eredmények megfelelő kiindulási alapot adnak egy pontosabb talaj modell paramétereinek kalibrációjához, továbbá a kapott erő értékek alkalmazhatók valós ekék tervezéséhez.*

**Kulcsszavak:** talajművelés, eke, talaj-eké-szár egymásra hatás, szármaradványok, DEM

## 1. Bevezetés

Napjainkban a népességnövekedés és az élelmiszerválság miatt egyre nagyobb szerepet kap a mezőgazdasági növénytermesztés. A növekvő minőségi és mennyiségi igények kielégítéséhez folyamatosan egyre hatékonyabb termelés technológiák kifejlesztésére és bevezetésére van szükség. A termésmennyiséget jelentősen befolyásolja többek között a talajművelés minősége, amely precíziós, nedvességtartalom megőrző talajművelési technológiák alkalmazásával nagymértékben javítható. Ezen talajművelési technológiák bevezetését kutatások és kísérletek előzik meg. A kísérletek idő és költségigényének csökkentése érdekében egyre szélesebb körben elterjedt a numerikus szimulációk alkalmazása, amelyek közül a talaj modellezéséhez az egyik legalkalmasabb eljárás a diszkrét elemes módszer (DEM).

A diszkrét elemes módszert szemcsés anyagok modellezésére fejlesztették ki [1] és a számos alkalmazási területei között szerepel a talaj [2], mezőgazdasági szemes termények [3], vegyipari, élelmiszeripari és gyógyszeripari anyagok, vasúti zúzottkövek [4], kőépítmények [5] modellezése. A számítás főbb lépései a vizsgált probléma dimenziójának (két- vagy háromdimenziós), megválasztása, a szemcsegeometria definiálása (kör/gömb, gömbökből/körökből felépített szemcsék vagy poliéder szemcsék), az érintkező szilárd testek geometriájának definiálása, a szemcsehalmaz tulajdonságainak definiálása a választott anyagmodellnek megfelelő mikromechanikai jellemzőkkel (sűrűség, normál és nyíró merevség, csúszási és gördülési súrlódási tényező, csillapítási tényező, normál és nyíróirányú szilárdság, hővezetési tényező, stb.), az időlépés meghatározása, a szemcsehalmaz létrehozása (gravitációs ülepítés, izotróp tömörítés, tartományba növesztés,

stb.), illetve a szimuláció futtatása, és végül az eredmények kiértékelése (sebesség, térfogatáram, erő, feszültség, hőmérséklet, kohézió, porozitás, stb. adatok lekérése, ábrák tanulmányozása).

A DEM módszerrel nemcsak a talajművelési folyamat, de a talaj felszínén található szármadarványok és a talajban maradt gyökér maradványok is figyelembe vehetők. Mao és szerzőtársai 2020-as kutatásukban például búza rostálási folyamatát modellezték diszkrételes módszerrel, amely során a szalmaszárakat és a búzaszemeket gömbökből összetett merev elemekként vették figyelembe [6]. Tamás és Bernon 2021-es publikációjukban pedig henger és gömb alakú elemek összekapcsolásával hoztak létre deformálható gyökér modelleket, és a viselkedésüket kultivátor kapás talajművelés szimuláció esetén vizsgálták [7].

A kutatás célja egy két ekeszárnyas szántási folyamat DEM szimulációjának paraméter érzékenységi vizsgálata volt, amelyben meghatározott szakaszon figyelembe vannak véve a betakarítási folyamat révén visszamaradt szármadarványok. A szimulációkhoz az Altair EDEM 2021 diszkrételes szoftver [8] lett alkalmazva. A kutatást három fő részre bontottuk. (1) Az első feladat a talaj és a szármadarványok diszkrételes modelljének megalkotása, valamint az ekék geometriájának létrehozása volt. (2) A következő cél a különböző szántási sebességek és a talajmodellben a szemcse-szemcse súrlódási tényezők, illetve a helyes időlépés megválasztásának vizsgálata volt. (3) A végső célunk az előzőekben említett paraméterérzékenységi vizsgálat eredményeinek a kiértékelése volt.

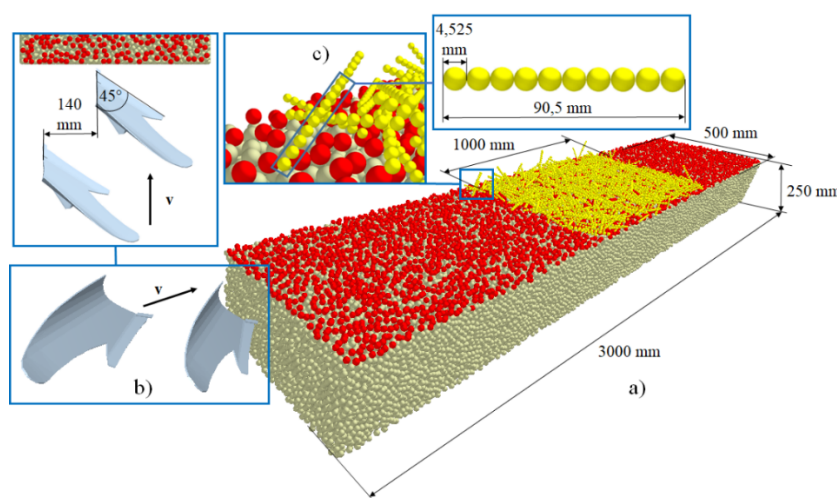
## 2. Szántási folyamat DEM modelljének létrehozása

### 2.1 A talaj-eké-szármadarvány DEM modellje

A modellalkotás első lépése a talajt modellező diszkrételes halmaz létrehozása volt. Ez gömb alakú elemek alkalmazásával és gravitációs ülepítéssel történt, amely során a DEM szoftver a megadott  $3 \times 0,5 \times 4$  m-es befoglaló méretű térrészletben, véletlenszerű helyzetben létrehozott szemcséket úgy, hogy azok egymással ne legyenek átfedésben, majd ezt követően a megadott irányú gravitációs erőter hatására a szemcsék a szimulációs idő előrehaladtával leülepedtek. A gravitációs ülepítést követően pedig eltávolításra kerültek a szimulációs térből a  $0,25$  m-es magasságon felül elhelyezkedő szemcsék, ezzel biztosítva a talaj modelljének egyenletes felszínét. Ezt követően annak érdekében, hogy a legfelső réteg elmozdulását követni lehessen a szimulációkban, törülésre került a talaj modell legfelső,  $10$  mm-es rétege, és helyette egy új, piros színnel jelzett réteg lett ülepítve azonos anyagtulajdonságokkal (1. ábra a).

A szármadarványokat hosszában  $10$  db gömb elemből összetett, úgynevezett clump elemekkel (1. ábra c) lettek modellezve, ahol az egy szármadarvány modellen belüli elemek egymáshoz képest nem tudtak elmozdulni. A szármadarványok a  $3$  m hosszú talaj modell középső  $1$  méterén lettek elhelyezve (1. ábra c), gravitációs ülepítéses eljárást alkalmazva hasonlóan Zeng és Chen 2019-es kutatásához [9].

A szimulációs térben a talajmodell előtt  $2$  db egyharmad méretarányra kicsinyített eketést került elhelyezésre (1. ábra b). A kicsinyítés azért volt szükséges, mert a szimulációk eredménye felhasználásra került egy talajvályús mérőberendezés tervezéséhez is, ami a kicsinyített ekékhez hasonló méretű szerszám modellek vizsgálatára lesz alkalmas [10]. A szimulációk kiindulási állapotát az 1. ábra mutatja.



19. ábra. A talaj-eké-szármadarvány DEM modelljének kiindulási állapota, a) DEM halmaz a fő méretekkel, b) ekék elrendezése, c) szármadarványok modellje, (sárgás-barna szín jelöli a talajt, piros szín a talaj felső  $10$  cm-es rétegét, citromsárga pedig a szármadarványokat,  $v$  jelöli az eketestek sebességvektorát)

## 2.2 Anyagparaméterek

A futtatások során a talaj modellezésére a hiszterézises-rugós kapcsolati modellt alkalmaztuk a lineáris kohézió modelljével kiegészítve, hasonlóan Ucgul és szerzőtársainak 2014-es kutatásához [12]. A talaj DEM modelljének mikromechanikai beállítási paraméterei Wang és szerzőtársainak 2022-es publikációja alapján [11], a szármadarványok DEM modelljének mikromechanikai beállítási paraméterei pedig Mao és szerzőtársainak 2020-as publikációja szerint [6] kerültek beállításra.

Az 1. táblázat mutatja a szimulációk mikromechanikai anyagparamétereit. Az itt bemutatott paraméterek közül a különböző paraméter érzékenységi vizsgálatok során egy-egy kijelölt paraméter vagy paraméter pár került megváltoztatásra, ugyanakkor ezeken a változó paramétereken kívül a többi beállítási paraméter a táblázatnak megfelelően került megadásra.

1. táblázat. A talaj-eke-szármadarvány DEM modelljében alkalmazott beállítási paraméterek

Paraméter	Jelölés	Talaj szemcse	Szármadarvány y	Eke és fal geometria	Talaj szemcse - szármadarvány y	Talaj szemcse - eke vagy fal geometria	Szármadarvány y - eke vagy fal geometria	Forrás
Ekék sebessége [m/s]	$v$		-	0,8		-		választott
Szemcseméret eloszlás [-]	-	random				-		[12]
Átlagos szemcse sugár [mm]	$d$	7	4,525			-		[11]
Érintkezési sugár [mm]	$d_c$	7	6,7875			-		választott
Minimum átmérő az átlaghoz képest [-]	$d_{min}/d$	0,95	0,7757			-		[12]
Maximum átmérő az átlaghoz képest [-]	$d_{max}/d$	1,05	1,2243			-		[12]
Sűrűség [kg m <sup>-3</sup> ]	$\rho$	2500	260	7800		-		[7]
Normál rugalmassági modulus [Pa]	$E$	$2,50 \cdot 10^8$	$5,50 \cdot 10^8$	$2,10 \cdot 10^{11}$		-		[6]
Nyíró rugalmassági modulus [Pa]	$G$	$1,00 \cdot 10^8$	$1,96 \cdot 10^8$	$8,08 \cdot 10^{10}$		-		[6]
Poisson-tényező [-]	$\nu$	0,25	0,4	0,3		-		[6]
Ütközési tényező [-]	$e$	0,6	0,5	-	0,5	0,6	0,5	[11]
Csúszási súrlódási tényező [-]	$\mu$	0,6	0,3	-	0,35	0,6	0,3	[6], [11]
Tapadási súrlódási tényező [-]	$\mu_0$	0,7	0,3	-	0,35	0,7	0,3	[6], [11]
Merevségi tényező [-]	$s_f$	0,85	0,85	-	0,85			választott
Csillapítási tényező [-]	$d_f$		0,5	-	0,5			választott
Folyáshatár [Pa]	$R_{eh}$		534900			-		[11]
Energia sűrűség [J m <sup>-3</sup> ]	$E_d$	8000	0	-	0			[11]
Időlépés [s]	$\Delta t$							$6,735 \cdot 10^{-6}$ (Rayleigh-időlépés 50%-a) választott

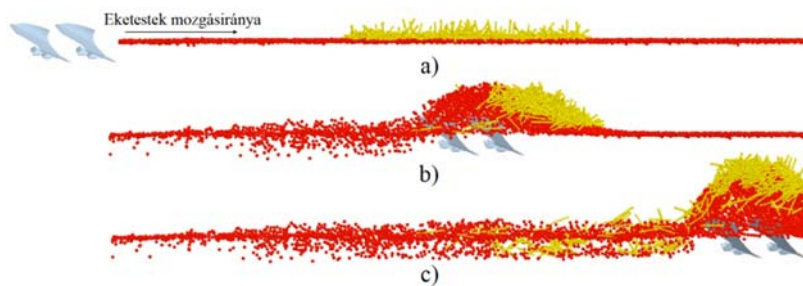
## 3. Eredmények

### 3.1 Időlépés vizsgálat

Az időlépés vizsgálat során a szimulációk a Rayleigh-időlépés 20%-án ( $2,694 \cdot 10^{-6}$  s), 30 %-án ( $4,041 \cdot 10^{-6}$  s), 40 %-án ( $5,388 \cdot 10^{-6}$  s) és 50 %-án ( $6,735 \cdot 10^{-6}$  s) lettek futtatva. A különböző időlépéseken futtatott szimulációk esetén nem adódtak jelentős eltérések az eketestekre ható erők között. A nagyobb időlépések esetén az eketestekre ható átlagos erő maximum 1,3 %-ban tért el a legkisebb időlépésen futtatott szimulációtól. Ezért a szimulációk időigényének csökkentése érdekében a továbbiakban úgy döntöttünk, hogy a szimulációkat a Rayleigh-időlépés 50 %-án, azaz  $6,735 \cdot 10^{-6}$  s időlépés alkalmazása mellett futtatjuk.

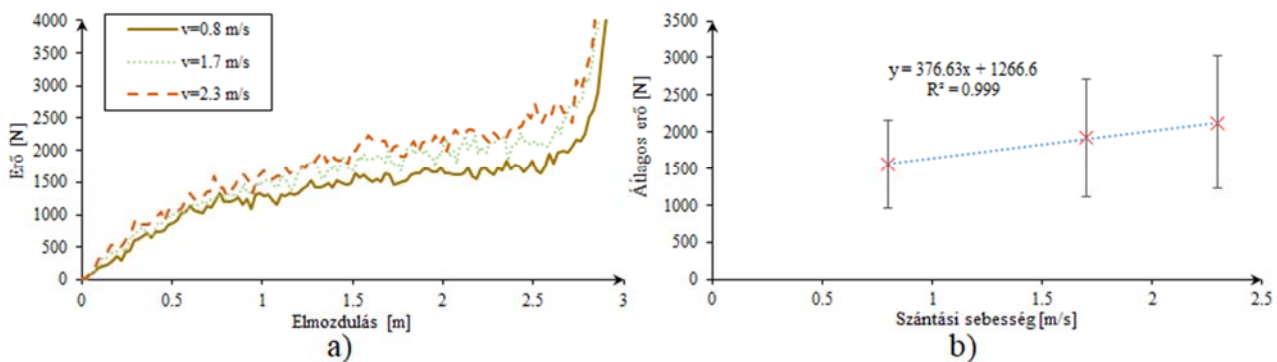
### 3.2 Szántási sebesség paraméter érzékenységi vizsgálat

A szántási sebesség vizsgálat során három különböző sebesség mellett lettek futtatva a szimulációk: 0,8 m/s, 1,7 m/s, 2,3 m/s.



20. ábra. Talaj felső 10 cm-es rétege és a szármaradványok mozgása 2,3 m/s szántási sebességen az ekék a) 0 m elmozdulásánál, b) 1,8 m elmozdulásánál, c) 3 m elmozdulásánál, (piros szín jelöli a talaj felső 10 cm-es réteget, sárga pedig a szármaradvány elemeket)

Az ekepár hasonlóan mozgatta a talaj modelljét és a szármaradványokat a különböző szántási sebességek esetén (2. ábra). A kezdeti állapotot (2. ábra a) követően az ekék talajba hatolása után 1,2 m elmozdulásig feltorlódtak előttük a szemcsék, 1,8 m elmozdulásig pedig teljesen ellepte az ekéket a talajszemcsékből és szármaradványokból álló halmaz (2. ábra b). Egy valós szántási folyamatnál ez nem történhet meg, így megállapítható, hogy a beállítási paraméterek nem tökéletesek, finomításra szorulnak. Ezért a következőkben megvizsgáltuk, hogy hogyan befolyásolja a talaj szemcse súrlódási tényezője a simulációt.

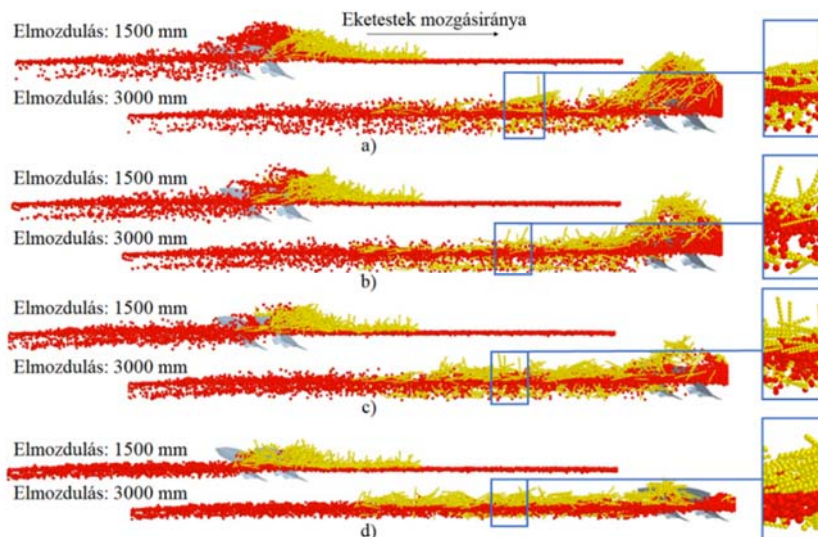


21. ábra. Szántási sebesség vizsgálat eredményei, a) erő-elmozdulás diagramok, b) szántási sebesség-átlagos erő diagram (az erő szórásait függőleges fekete szakaszok jelzik)

A különböző szántási sebességeken az ekeestekre ható erőket összegeztük és diagramon ábrázoltuk (3. ábra a). Megfigyelhető, hogy a szimulációk során folyamatosan nőtt az ekeestekre ható erő nagysága, ami annak köszönhető, hogy az ekeestek előtt folyamatosan egyre több talaj szemcse és szármaradvány torlódott fel. Az egyes szimulációk során az ekeestekre ható erőket átlagoltuk és a szántási sebesség függvényében ábrázoltuk (3. ábra b). A szántási sebesség és az átlagos erő között jó közelítéssel lineáris kapcsolat adódott.

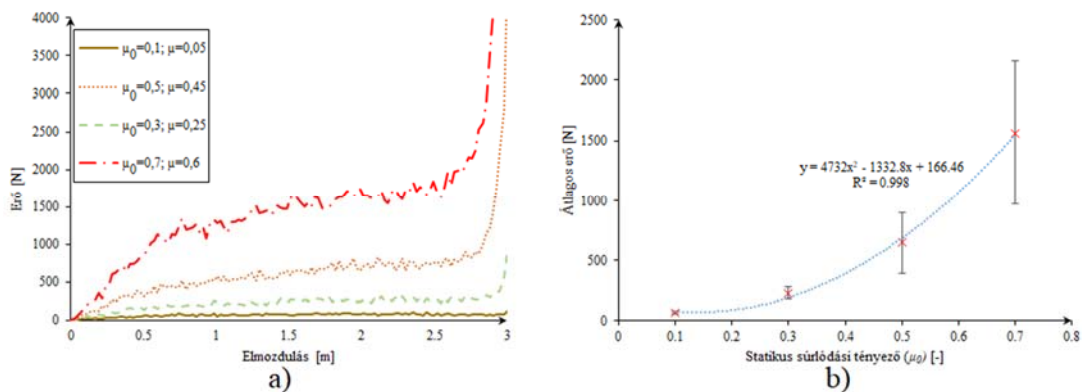
### 3.3 Talaj szemcse súrlódási tényező paraméter érzékenységi vizsgálat

A talaj szemcse súrlódási tényező vizsgálat során négy különböző talaj szemcse statikus és gördülési súrlódási tényező pár alkalmazásával lettek szántási szimulációk futtatva. A statikus súrlódási tényező sorban a következő értékekre lett beállítva:  $\mu_0=0,7; 0,5; 0,3; 0,1$ . Ezzel arányosan a gördülési súrlódási tényezőt is változtattuk:  $\mu=0,6; 0,45; 0,25; 0,05$ . A 4. ábra mutatja a felső réteg és a szármaradványok helyzetét a szimulációk felénél és végénél a különböző súrlódási tényezők esetén.



22. ábra. A talaj 10 cm-es felső rétegének és a szármaradványoknak a mozgása a különböző szemcse súrlódási tényezőknél futtatott szimulációk esetén az eketesztek 1500 mm-es és 3000 mm-es elmozdulásánál, a)  $\mu_0=0,7$ ;  $\mu=0,6$ ; b)  $\mu_0=0,5$ ;  $\mu=0,45$ ; c)  $\mu_0=0,3$ ;  $\mu=0,25$ ; d)  $\mu_0=0,1$ ;  $\mu=0,05$  (piros szín jelöli a talaj felső 10 cm-es rétegét, sárga pedig a szármaradvány elemeket)

A súrlódási tényező csökkentésével sikerült lecsökkenteni az ekék előtt feltorlódozó szármaradványok mennyiségét. A 0,7 értékű statikus súrlódási tényezőről futtatott szimuláció esetén a diszkrét elemek szinte teljes mértékben ellepték mindkét ekét a szimuláció végére (4. ábra a), míg a 0,1 értékű statikus súrlódási tényezőről futtatott szimuláció esetén csak néhány olyan szármaradvány elem volt, ami átesett az ekék felett (4. ábra d). Emiatt kisebb súrlódási tényezők esetén a szármaradványok is rendezettebben kerültek bele az elülső eke által nyitott barázdába. Látható továbbá, hogy nagyobb súrlódási tényezők esetén kevésbé egyenes a szántási hosszban a felső 10 cm-ben elhelyezkedő talajszemcsék és a szármaradványok talajba keverése.



23. ábra. Szemcse súrlódási tényező vizsgálat eredményei, a) erő-elmozdulás diagramok, b) talaj szemcse statikus súrlódási tényező-átlagos erő diagram (az erő szórásait függőleges fekete szakaszok jelzik)

A különböző talaj szemcse súrlódási tényezőknél az eketesztekre ható erőket összegeztük és diagramon ábrázoltuk (5. ábra a). Megfigyelhető, hogy a talaj szemcse súrlódási tényező csökkentésével jelentősen csökken az eketesztekre ható erő. Az egyes szimulációk során az eketesztekre ható erőket átlagoltuk és a talaj szemcse súrlódási tényező függvényében ábrázoltuk (5. ábra b). A talaj szemcse súrlódási tényező és az átlagos erő között jó közelítéssel négyzetes (másodfokú függvény szerinti) kapcsolat adódott. Látható továbbá, hogy a súrlódási tényező növelésével nőtt az átlagos erő szórása, ami azzal magyarázható, hogy nagyobb súrlódási tényezők esetén a falhatás jelentősebben érvényesült, azaz amikor az eketesztek megközelítették a vályú végét, a rájuk ható erő nagyobb súrlódási tényezőknél számottevően nagyobb mértékben növekedett.

## 4. Összegzés

A kutatás célja egy két testű ekével történő szántási folyamat DEM szimulációjának paraméter érzékenységi vizsgálata volt, amelyben figyelembe voltak véve a betakarítási folyamatot követően visszamaradt szármadarványok. Először létrehozásra került a talaj diszkrételes modellje. Ezt követően elhelyezésre kerültek a modellterben a talajfelszín meghatározott területén a szármadarványok modelljei, majd az ekék geometriája. A következőkben egy időlépés vizsgálat következett, majd különböző beállítási paraméterek mellett le lettek futtatva a szimulációk. Az időlépés vizsgálat során a vizsgált tartományban ( $2,694 \cdot 10^{-6} \text{ s} - 6,735 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ ) nem adódott jelentős különbség az eketestekre ható erők között, ugyanis a nagyobb időlépések esetén az eketestekre ható átlagos erő maximum csak 1,3 %-ban tért el a legkisebb időlépésen futtatott szimulációtól. A definiált szemcse geometriákat és mikromechanikai anyagparamétereket alapul véve a különböző szántási sebességeken (0,8 m/s; 1,7 m/s; 2,3 m/s) futtatott szimulációkból kiderült, hogy az eketestekre ható erő lineárisan függ a szántási sebességtől. A különböző talaj szemcse súrlódási tényezőknél ( $\mu_0=0,7; 0,5; 0,3; 0,1; \mu=0,6; 0,45; 0,25; 0,05$ ) futtatott szimulációk során pedig négyzetes összefüggés adódott az eketestekre ható erő és a talaj szemcse súrlódási tényező között. Megállapítottuk továbbá, hogy nagyobb súrlódási tényezők esetén kevésbé egyenletes a szántási hossz a felső talajszemcsék és a szármadarványok talajba keverése. A kapott eredmények felhasználhatók egy pontosabb talaj modell paramétereinek kalibrációjához, ami hozzájárul a talaj vízmegtartó képességének növelésével kapcsolatos kutatások előrehaladásához. A kapott erő értékek alkalmazhatók továbbá valós ekék és laboratóriumi talajvályús mérőberendezések tervezéséhez.

## Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült, valamint a BME-NVA-02 számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

## Irodalmi hivatkozások

- [1] P. A. Cundall és O. D. L. Strack, „A discrete numerical model for granular assemblies”, *Geotechnique*, 1979, doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47.
- [2] K. Tamás, I. J. Jóri, és A. M. Mouazen, „Modelling soil–sweep interaction with discrete element method”, *Soil and Tillage Research*, köt. 134, o. 223–231, 0 2013, doi: 10.1016/j.still.2013.09.001.
- [3] Á. Kovács, „Modelling of maize plant by the discrete element method”, *Kukorica növény feldolgozásának modellezése diszkrét elem módszerrel*, 2019, Elérés: 2021. szeptember 1. [Online]. Elérhető: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/13329>
- [4] J. I. González, E. Oñate, és F. Salazar, „Numerical analysis of railway ballast behaviour using the Discrete Element Method”, *Monograph CIMNE*, 2018.
- [5] B. Katalin, „A diszkrét elemek módszere”, *BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék*, 2007.
- [6] H. Mao, Q. Wang, és Q. Li, „Modelling and simulation of the straw-grain separation process based on a discrete element model with flexible hollow cylindrical bonds”, *Computers and electronics in agriculture*, köt. 170, o. 105229, 2020.
- [7] K. Tamas és L. Bernon, „Role of particle shape and plant roots in the discrete element model of soil–sweep interaction”, *Biosystems Engineering*, köt. 211, o. 77–96, 2021.
- [8] „Discrete Element Modeling - DEM Software | Altair EDEM”. <https://www.altair.com/edem/> (elérés 2021. szeptember 11.).
- [9] Z. Zeng és Y. Chen, „Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction”, *Biosystems Engineering*, köt. 180, o. 25–35, 2019.
- [10] L. Pásthly, „Laboratóriumi talajvályú és mérőocsi tervezése”, Diplomamunka, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2022.
- [11] X. Wang, Q. Zhang, Y. Huang, és J. Ji, „An efficient method for determining DEM parameters of a loose cohesive soil modelled using hysteretic spring and linear cohesion contact models”, *Biosystems Engineering*, köt. 215, o. 283–294, 2022.
- [12] M. Ucgul, J. M. Fielke, és C. Saunders, „Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil”, *Biosystems Engineering*, köt. 121, o. 105–117, 2014.