



Talaj-kultivátorszerszám kölcsönhatás modellezése diszkrétételes módszer alkalmazásával

MTA doktori értekezés tézisfüzete
A Magyar Tudományos Akadémia doktora
tudományos cím elnyeréséért benyújtott pályázathoz

Tamás Kornél



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Gép- és Terméktervezés Tanszék

**Budapest
2025**

1. Bevezetés

Napjainkban a globális felmelegedés hatásai egyre inkább előtérbe kerülnek a mezőgazdaságban, ezért a gyakori szárazságok miatt a nedvességmegőrző talajművelés fontossága felértékelődik (Acharya et al., 1998; Bekele et al., 2022).

Az egyre gyakoribb aszálykárok enyhítésére a talaj megforgatásán alapuló művelési módokat, mint például az ekével történő szántást, mindinkább kiváltja a művelés nélküli, illetve a minimális műveléssel történő talajművelés. Azonban a művelés nélküli növénytermesztés a gyakorlatban jelentős vegyszer alkalmazását teszi szükségessé, így a mechanikus talajművelés továbbra is kiemelkedő szereppel bír az adott növény termesztésére alkalmas talajszerkezet kialakításában.

A talajműveléssel járó energiafelhasználás jelentős költségekkel jár, elsősorban a jelenleg használatban lévő munkagépek üzemanyag fogyasztása miatt. Ezért a talajművelő szerszámok energiafogyasztásának csökkentése manapság kritikus probléma. Különösen a száraz időszakokban elengedhetetlen a talajforgatással nem járó módszerek előnyben részesítése.

Napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a környezetbarát talajművelési gyakorlatokra (Pratibha et al., 2019; Busari et al., 2015). A talajművelő szerszámok tervezésének elsődleges céljai közé tartozik az energiatakarékosság, a talajerózió elleni védekezés és a CO₂ kibocsátás csökkentése (Rádics & Jóri, 2010). A megfelelő talajművelési eszközök megtervezése és kiválasztása azonban jelentős kihívásokat jelent, tekintettel a talajtípusok változékonyságára.

Az elmúlt évek tapasztalatai alapján a számottevően megnövekedett száraz, csapadékszegény időszakok miatt a mezőgazdasági talajok esetén akkor beszélhetünk optimális talajszerkezetéről, amennyiben annak megvan a képessége a minél nagyobb mennyiségű víztartalom megőrzésére. Az elmúlt évszázadokban, évtizedekben számos talajművelési technológia és talajművelő szerszám került kifejlesztésre, azonban jelenleg a szántóföldi kultivátorok alkalmazása jelent megfelelő megoldást a csapadék befogadására és megőrzésére alkalmas talajszerkezet létrehozására, illetve karbantartására. A kultivátorok használata kevesebb energiát igényel, és következetesen költséghatékonyabb,

mint pl. a szántás. A kultivátornak, mint szántóföldi munkagépnek a legfontosabb része az úgynevezett kultivátorszerszám. Az optimális kultivátorszerszám geometria adott talajtípushoz történő kifejlesztése rendkívül idő és költségigényes folyamat a szántóföldi vizsgálatok eszközigénye miatt. Továbbá nem szabad figyelmen kívül hagyni azt sem, hogy a szántóföldi méréseket az arra alkalmas időjárási feltételek mellett lehet megfelelően végrehajtani.

Az előzőekben leírt fejlesztési folyamat megkönnyítése érdekében a kutatók korábban analitikus, majd numerikus modellekkel írták le a talaj és a talajművelő szerszám hatásmechanizmusát. Egy ilyen modellnek képesnek kell lennie azt a számos talaj- és környezeti körülményt figyelembe venni, ami megadja a lehetőséget a jelenség minél pontosabb leírására. A közelmúltban továbbfejlesztett numerikus módszereket alkalmaztak ennek a folyamatnak a kidolgozására, a laboratóriumi vizsgálatokon kívül, amelyek segítségével a mezőgazdasági mérnökök számítógépen szimulálhatják a talajművelést (Zachár et al., 2016).

A kultivátorszerszám vontatási ellenállása, mint az egyik legfontosabb mennyiségi jellemző nagy pontossággal meghatározható szántóföldi mérésekkel. A talaj és a kultivátorszerszám kölcsönhatás matematikai modellezése lehetőséget kínál a fent említett kihívások elméleti megoldására. Míg az analitikus modellek betekintést nyújtanak a talajművelő szerszám adott sebességgel történő mozgatásához szükséges vonóerő nagyságának az alakulásába (Gupta et al., 1989; Onwualu, 1998), csak korlátozott információkkal szolgálnak a talajon bekövetkező munkaminőségi változásokról. Bár a validált analitikus modellek megkönnyíthetik az optimális művelési mélység és sebesség meghatározását (Godwin et al., 2007), hiányzik belőlük a szerszámgeometria optimalizálásának képessége. Az analitikus és végeselemes (VEM) modellek napjainkban már megfelelően alkalmazhatók egy adott talajművelő szerszám vontatási ellenállásának a megbecsléséhez, de ezek a modellek korlátozottan, vagy egyáltalán nem adnak lehetőséget a talaj keveredésének a szimulálására (Fielke, 1999; Ibrahmi et al., 2014; Mouazen et al., 1999; Shen & Kushwaha, 2017; Abo-Elnor et al., 2003). A legújabb numerikus modellek a talaj-szerszám kölcsönhatás szempontjából a diszkrétéleemes módszert (DEM) alkalmazzák, amelyben a talajmodell merev, diszkrét szemcséket tartalmaz (Cundall, 1971;

Cundall & Strack, 1979). Hipotézisük szerint a lazítási folyamat során a talaj különálló részekre szakad, és így a DEM lehetővé teszi a talaj, mint rideg szemcsékből felépülő háromfázisú polidiszperz rendszer deformációjának pontos elemzésén keresztül annak a törésmechanikai modellezését.

A kutatásokban a DEM nemcsak a valós talajstruktúrának a modellezésére egy megfelelő módszer, hanem a mezőgazdasági talajokra jellemző függőleges, így mélységi és az adott területen kiterjedő vízszintes inhomogenitás modellezésére is alkalmas.

Az inhomogén talajstruktúra modellezésén túl napjainkban egyre inkább elérhetővé vált a különböző DEM modellező szoftverekben a gömbtől eltérő bonyolultabb szemcseformák alkalmazása. Továbbá egyre inkább előtérbe kerül a talajban lévő „élő” biológiai, illetve szerves anyagok modellezése, mint például a növényi szármagadványok, növényi gyökerek, vagy a napjainkban nagy érdeklődésre számot tartó, az adott talajban előforduló bióta modellben történő leírása.

2. Célkitűzés

Az értekezésben a következő célokat fogalmaztam meg:

I.

- Vizsgálni a sebességfüggő szemcsekapcsolati viszkozus csillapítási együtthatók gömb elemekkel való diszkrételes modellezésének a lehetőségét a kultivátorszerszám talajban történő elmozdulása következtében a talajban létrejövő energiadisszipáció szimulálására. Ezzel leírva a DEM modellben a valós talajszemcsék sarkokat és éleket tartalmazó geometriájának hatását a szemcsehalmoz elmozdulásaira a gyakorlatban alkalmazott $0.5\text{--}4.1 \text{ m s}^{-1}$ sebességtartományban.
- Vizsgálni a kohézió mikroszkopikus eredetét és a kapcsolódó szimulációs módszert, illetve szimulálni a talaj nedvességtartalom hatásának a modellben történő leírását a nyomatékbiro ún. parallel bond kötési modellel és gömbökből létrehozott szemcsehalmazsal.

II.

- Megalkotni és kalibrálni a rétegelt szerkezetű talaj DEM modelljeit egy vályogos homok és egy agyagos vályogtalaj különböző mélységben megmért fizikai és mechanikai tulajdonságai alapján.
- Vizsgálni a növényi gyökök DEM talajmodellben történő alkalmazását, amihez első lépésben szükséges megmérni a gyökök mechanikai és fizikai tulajdonságait.
- Létrehozni és kalibrálni a gyökér és a talaj-kultivátorszerszám-gyökér kölcsönhatás DEM modelljét.
- Elemezni a talaj-kultivátorszerszám-gyökér kölcsönhatás DEM modelljében a szimulált gyökök számának és kohéziós paraméterének a kultivátorszerszám vontatási ellenállására gyakorolt hatását.

III.

- A talaj és a passzívan rezgő kultivátorszerszám közötti kölcsönhatás vizsgálata jelentős kutatási lehetőségeket rejt magában. Ezért cél egy változtatható rugómerevségű kultivátorszerszámmal végzett átfogó laboratóriumi talajvályús kísérlettel meghatározni nedvesített

homoktalajban a szerszám kényszerrezgésének frekvenciáját és amplitúdóját, valamint ezek hatását a vontatási ellenállásra.

- Megvizsgálni genetikus algoritmus (GA) segítségével a passzívan rezgő kultivátorszerszám DEM modelljében, illetve a talaj DEM modelljeiben alkalmazott mikromechanikai paraméterek kalibrációját, illetve azok alkalmazhatóságát.
- Összehasonlítani a laboratóriumi talajvályús vizsgálatokból és a DEM szimulációkból származó frekvenciákat és amplitúdókat FFT (fast Fourier transformáció) alkalmazásával, lehetővé téve a passzívan rezgő kultivátorszerszám művelés közben kialakuló rezgések frekvencia- és amplitúdóelemzését.

IV.

- Laboratóriumi talajvályús vizsgálatokat végezni egy saját fejlesztésű horizontális penetrométerrel.
- További cél a laboratóriumi talajvályús mérésben a saját fejlesztésű horizontális penetrométer penetrációs ellenállásával egyidőben megvizsgálni a szintén saját fejlesztésű elmozdulásmérésre alkalmas szenzor talajon belüli elmozdulásait.
- Összehasonlítani a mérési eredményeket a mérés alapján felépített, illetve kalibrált DEM modell szimulációs eredményeivel, továbbá megvizsgálni a módszer alkalmasságát a kultivátorszerszámok működésének az elemzéséhez.

V.

- Mivel a talaj és a kultivátorszerszám kölcsönhatás DEM szimulációinak a futási időigénye magas, ezért további cél egy moduláris grafikus feldolgozó egység (GPU-graphics processing unit) alapú DEM megoldó felépítése CUDA C++ nyelven, amely megbízhatóan használható nagyszabású talajszimulációk létrehozására, miközben a GPU gyorsításnak köszönhetően gyorsabban működik, mint a meglévő diszkrételes szoftverek.
- A GPU gyorsítás által kínált lényegesen alacsonyabb futási idő miatt a kutatás további célja annak a bemutatása, hogy a mikromechanikai DEM paraméterek hogyan kalibrálhatók evolúciós algoritmussal a laboratóriumi talajvályús mérések eredményei alapján.

3. Új tudományos eredmények, tézisek

3.1 Szemcskekapcsolati csillapítások és nyomatékbró kötése szerepe a talaj-kultivátorszerszám kölcsönhatás diszkrétéleles modelljében témakörre vonatkozó megállapítások

Ebben a kutatásban a kultivátorszerszám laboratóriumi talajvályús vizsgálatából (1. ábra) gyűjtött adatok és a létrehozott DEM szimuláció eredményeinek az összehasonlítása és kalibrációja történt. Az eredmények újdonsága a valós talajszemcsék szabálytalan, éles sarkú formáin alapuló energiadiSSIPáció szimulációja DEM-ben gömb alakú szemcsékből létrehozott halmazban a sebességfüggő viszkózus csillapítási együttható alkalmazásával, különböző nedvességtartalmakon.



1. ábra A laboratóriumi talajvályú és mérőkocsi a) három pont függesztése, b) a nedvesítés eszközei, c) a hidraulikus hajtás és d) a vibrációs tömörítő egység.

A laboratóriumi és a szimulációs vizsgálatok alapján kimondható az alábbi tézis:

1. tézis

A talaj és a kultivátorszerszám kölcsönhatás diszkrételes szimulációiban a parallel bond nyomatékíró szemcsekapcsolati modell parallel bond sugár aránytényezőjének az alkalmazásával, a talaj nedvességtartalmának hatása telítetlen és telített talajállapotok esetén egyaránt leírható.

- A vontatási ellenállás alacsonyabb azon szimulációkban, ahol a parallel bond sugár aránytényező értéke $\bar{\lambda}=0.0, 0.2$, hasonlóan a laboratóriumi talajvályús mérésekhez ($m_c=2\%, 15\%$). A kultivátorszerszám modell vontatási ellenállásának maximuma van a DEM-ben $\bar{\lambda}=0.5$ parallel bond sugár aránytényező alkalmazása esetén, hasonlóan a 30%-os térfogati nedvességtartalmú talajjal végzett talajvályús vizsgálathoz. Továbbá amikor a parallel bond sugár aránytényező $\bar{\lambda}=0.8$ értékre került beállításra, a DEM modellben alkalmazott gömb alakú szemcsék elfordulása lehetővé teszi az alacsonyabb vontatási ellenállás szimulációját hasonlóan a telített 35%-os nedvességtartalmú homoktalaj laboratóriumi talajvályús vizsgálatában megfigyelhető viselkedéséhez. Így a továbbfejlesztett modell felhasználható a talajban lévő nedvesség hatásának elemzésére a talaj és a kultivátorszerszám kölcsönhatásban.

(Tamás, 2018)

3.2 Növényi gyökerek szerepe a talaj-gyökér-kultivátorszerszám kölcsönhatás diszkrételes modelljében témakörre vonatkozó megállapítások

A tanulmány újdonsága növényi gyökerek alkalmazása a kombinált kalibrációval létrehozott, rétegelt diszkrételes szemcsehalmazban. Az 50 mm, 100 mm, 150 mm és 200 mm mélységből származó bolygatatlan talajminták laboratóriumi vizsgálatai eltérő fizikai és mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, ami igazolja a vizsgált szántóföldi talajok függőleges inhomogenitását. Ezeket a vizsgálatokat használtuk a vályogos homok és agyagos vályogtalaj rétegelt DEM modelljeinek a továbbfejlesztésére. A DEM modell alsó részében nagyobb kötési

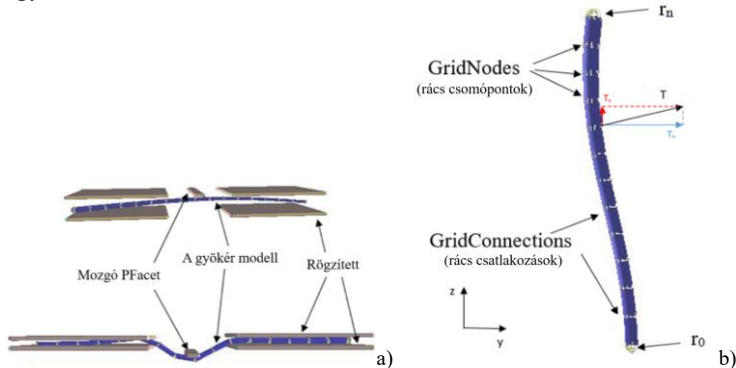
szilárdsággal és kisebb súrlódási szöggel rendelkező rétegek alkalmazása megvalósítható megközelítés a CPR (cone penetration resistance-kúp penetrációs ellenállása) mélységgel történő növekedésének szimulálására.

A vizsgálatok megerősítették, hogy a CPT (cone penetration test- kúpos penetrométeres vizsgálat) DEM modelljéhez a penetrométer sebességét (0.1 m s^{-1}) és vetített felületét (2.5 cm^2) validálni szükséges a kalibrálási folyamat előtt.

Létre lett hozva a növényi gyökerek szakadásra képes DEM modellje (2. ábra), amit valódi növényi gyökereken végzett laboratóriumi vágó vizsgálatok igazoltak. A gyökereket lekerekített végű összekapcsolt hengerek láncolataként szimuláltuk, amely modellezéséhez GridNodes és GridConnections elemeket alkalmaztunk (Effeindzourou et al., 2016).

A Yade DEM szoftver nem kezeli ezen rács elemek (GridElements) és az STL geometriák közötti kapcsolatot, amelyet a talaj-kultivátorszerszám DEM modellben alkalmaztunk, ezért a kultivátorszerszám modelljét ún. PFacet-et (szemcsefelület) elemekből (Effeindzourou et al., 2016) kellett felépíteni.

A létrehozott talaj-kultivátorszerszám-gyökér modellben a gyökerek talajerősítésre gyakorolt hatását a gyökerek számával együtt változó vontatási ellenállás is igazolta.



2. ábra A vágó vizsgálat a) szimulációja és a b) feszültségkomponensek a gyökér DEM modelljében. Ahol: r_n [m] az n-edik gyökéralkotó „node” azaz csomópont sugara, r_0 [m] az első gyökéralkotó „node” sugara, T_s nyírófeszültség [Pa], T_n normál feszültség [Pa], $\mathbf{T}$ feszültségvektor [Pa]. (GridNodes-rács csomópontok, Grid Connections-rács csatlakozások, PFacet-szemcsefelület)

A laboratóriumi és a szimulációs vizsgálatok alapján kimondható az alábbi tézis:

2. tézis

A megalkotott talaj-gyökér-szármagadvány kölcsönhatás diszkrételes modell alkalmas a mezőgazdasági talajokra jellemző függőleges, azaz mélységi (rétegelt) és vízszintes, azaz területi talajheterogenitás leírására. Bizonyítottam, hogy ezen létrehozott modellben a talajheterogenitás további állapotai válnak elemezhetővé a szakadásra képes növényi gyökök modellben történő alkalmazásával.

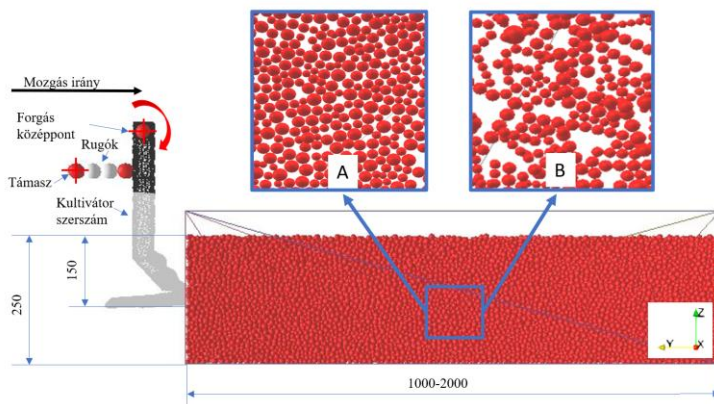
(Tamás & Bernon, 2021)

3.3 Talaj és passzívan vibráló kultivátorszerszám kölcsönhatás modellezése diszkrételes módszerrel témakörre vonatkozó megállapítások

Ez a kutatás igazolja a megfelelő szemcsegeometria megválasztását a valós talajszerkezet DEM modellben való szimulálására, illetve bizonyítja, hogy a megfelelő rugókonfigurációval megtámasztott kultivátorszerszám talajban való vontatása kisebb vonóerőt igényel egy merev szerszám vontatásához képest. A 16 rugós szerszám konfiguráció közel 6-9%-os vontatási ellenállás csökkenést mutatott mind a laboratóriumi talajvályús vizsgálatban és mind a DEM szimulációban.

A talaj passzívan vibráló kultivátorszerszámmal való kölcsönhatása azonban pusztán a mérési eredmények vizsgálatával nem volt energetikai szempontból elemezhető, ezért egy megfelelő pontosságú DEM modell került alkalmazásra (3. ábra), amely lehetővé tette a valós fizikai jelenség részletesebb elemzését.

A genetikus algoritmussal (GA) kalibrált DEM modell szimulációs eredményei alapján a mérés és a DEM között 0.1%-nál kisebb relatív hiba (RE) volt produkálható, amit a fast Fourier transzformáció (FFT) és a direkt nyíródobozos vizsgálatok eredményei is alátámasztanak.



3. ábra A DEM modell, amelyben egy gömb és egy clump elemekből álló szemcsehalmaz került alkalmazásra, (A)-gömbök, (B)-nyújtott clumpok.

A korábbi ún. manuális (a felhasználó tapasztalataira építő) módszerekkel ellentétben a DEM modell kalibrálása nagy pontossággal valósult meg, ami fontos szerepet játszik a jelen kutatásban kidolgozott módszertanban. Azonban ezt a pontosságot óvatosan kell kezelni, mivel a GA-val beállított modell paraméterek akkor alkalmazhatók megfelelően, amennyiben a DEM modell felépítése is elfogadhatóan közel áll a valós mérési elrendezés geometriájához. A GA kalibrációk eredményei rávilágítottak arra, hogy a DEM modellben alkalmazott paraméterek beállítási értékeire több olyan alkalmas mikromechanikai paraméter kombináció is megfelelő megoldást nyújthat, amely nagy pontossággal képes szimulálni a valós mérést.

A 3D szkennelt szerszámgeometria szabad elmozdulásra képes modellként történő alkalmazása a szimulációban lehetővé teszi a szerszám geometriájának és tehetetlenségi nyomatékának a leírását. Ami azért fontos, hogy a DEM modellben a valós jelenséget minél pontosabban reprodukálhassuk, így akár lehetséges a talajban a szerszámkopás szerszám rezgésére való hatását is elemezni.

Ellentétben a szakirodalomban fellelhető harmonikus gerjesztett rezgőmozgással, ahol a szerszám rezgése nincs szinkronban a talaj repedéseivel, az ebben a kutatásban alkalmazott kultivátorszerszám modellje lehetővé teszi, hogy egyenként tanulmányozzuk a szerszám és a szemcsehalmaz mozgási energiáját a teljes DEM modellben úgy,

hogy a szerszám modell rezgése szinkronban és összhangban történjen a talajmodell tönkremenetelével a talajrepedések létrejöttével.

Megjegyzendő azonban, hogy a GA alkalmazása a kalibrálási eljárásban nem kizárólag a folyamat felgyorsítását, hanem inkább annak az automatizálását szolgálja, így optimális kereséssel olyan paraméterkészleteket találhat, amelyeket a felhasználó manuális kalibrációs módszerekkel nagy valószínűséggel nem talál meg.

A kalibrációs folyamat időtartama nagyban függ a létrehozott DEM modell összetettségétől. Napjainkban a grafikus feldolgozó egységek (GPU-k) megnövekedett sebessége és a párhuzamosan futó szimulációs technikák jelentősen csökkenthetik a GA-hoz szükséges kalibrációs időt. Nem szabad figyelmen kívül hagyni továbbá azt sem, hogy a DEM és GA futtatások eredményei archiválhatók, illetve alapját képezhetik a jövőbeni mesterséges intelligencia alkalmazásoknak, ahol a mérnökök a már előzetesen létrehozott és rendelkezésre álló adatbázisok segítségével csupán néhány másodperc alatt meg tudják oldani ezt a kalibrációs problémát.

A laboratóriumi és a szimulációs vizsgálatok alapján kimondhatók az alábbi tézisek:

3. tézis

A kifejlesztett talaj és a passzív vibrációra alkalmas kultivátorszerszám genetikusan algoritmustal kalibrált diszkrétélelemes modelljével elemezhetővé válnak ezen kölcsönhatás olyan részletei is, amelyeket a laboratóriumi mérések nem tesznek lehetővé.

- A megalkotott diszkrétélelemes modellben a szemcsehalmazon túl a kultivátorszerszám modell tehetetlenségének beállításával és megfelelő kényszerek, illetve kezdeti feltételek alkalmazásával az szabad elmozdulásra képes testként szimulálható. Ez lehetővé teszi a passzívan vibráló kultivátorszerszám szimulációját a diszkrétélelemes modellben.

(Tamás, 2024)

4. tézis

Az alkalmazott kalibrációs eljárásban a szemcsekapcsolati paramétereken túl a szemcsék alakját is beállítási paraméterként szükséges figyelembe venni a talajszerkezet megfelelő modellezéséhez a talaj és a passzívan vibráló kultivátorszerszám DEM szimulációiban. A modell alkalmazásával a merev szerszámmal képest a mérésben tapasztalt 6-9% vontatási ellenállás csökkenés jó közelítéssel becsülhetővé válik.

- A kalibrációs eljárás alapján megállapítható, hogy a talaj és a passzívan vibráló kultivátorszerszám kölcsönhatás diszkrételes modelljének kalibrálása során a 90%-ban megnyúlt szemcseformát tartalmazó szemcsehalmazban kialakult textúra, döntő fontosságúnak bizonyult az alapvető fizikai jelenség diszkrételes modellben történő leírásához.

(Tamás, 2024)

5. tézis

A 16 rugós kultivátorszerszám konfiguráció esetén, mind a talajvályás vizsgálatban, mind a genetikusan algoritmustal kalibrált diszkrételes modellben a vontatási ellenállás csökkenése figyelhető meg. Ez a csökkenés a passzívan vibráló kultivátorszerszám mozgási energia növekedésével párhuzamosan a szemcsehalmazban létrejövő energiadisszipáció csökkenésének az eredménye.

(Tamás, 2024)

6. tézis

A modellezett passzívan vibráló kultivátorszerszám frekvenciája és csillapítási tényezője, valamint a szemcsehalmaz mikromechanikai paraméterei genetikusan algoritmustal nagy pontossággal beállíthatók. Mivel több paraméter kombináció is alkalmasnak bizonyult a vontatási ellenállás modellezésére, az aktuális talaj mechanikai paramétereikhez a még pontosabb

mikromechanikai modell beállítást további laboratóriumi- és szimulációs vizsgálatokkal szükséges meghatározni.

(Tamás, 2024)

7. tézis

A fast Fourier transzformáció alkalmazásával lehetővé vált a passzívan vibráló kultivátorszerszám valós és diszkrétéleemes modellben szimulált elmozdulása és vontatási ellenállása szerinti frekvencia arányainak az elemzése.

(Tamás, 2024)

8. tézis

A passzívan vibráló kultivátorszerszám diszkrétéleemes szimulációs eredményei alapján kimondható, hogy abban az esetben jön létre vontatási ellenállás csökkenés, amennyiben a merev szerszám hatására a szemcsehalmozban létrejövő mozgási energia nagysága közel azonos a rezgő kultivátorszerszám mozgási energiájának a nagyságával.

(Tamás, 2024)

9. tézis

A diszkrétéleemes szimulációs vizsgálatokban, ha a rugómerevséget és a csillapítási tényezőt változóként vesszük figyelembe, akkor a kezdeti adatokból meghatározhatóak a passzívan rezgő kultivátorszerszám optimális paraméterei. Ez a meghatározás a minimális vontatási ellenállás célként történő beállításával érhető el a genetikus algoritmus jószág függvénye szerint, ahol a kiindulási adatok a vizsgált talaj mechanikai tulajdonságait, valamint az alkalmazott talajművelő szerszám geometriai és tömegviszonyait rögzítik.

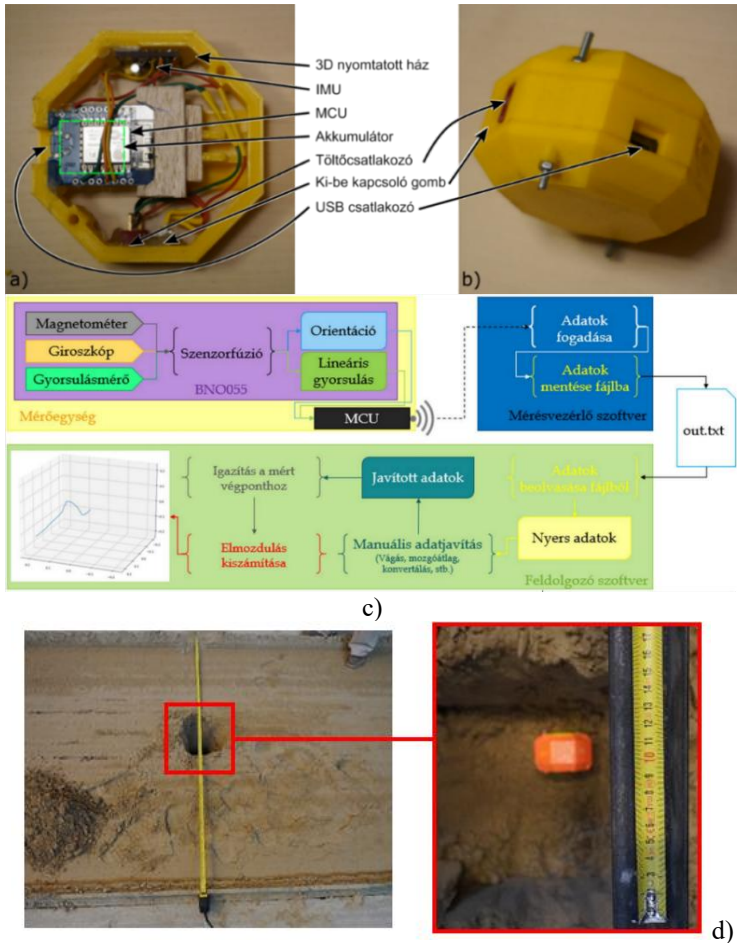
(Tamás, 2024)

3.4 Talaj belső áramlásainak mérése és szimulációja IMU szenzorral és DEM-mel témakörre vonatkozó megállapítások

A tanulmány ezen részterületének a legnagyobb újdonsága, hogy egy nedvesített homoktalaj diszkrételes paraméterkalibrációja során egyszerre négy különböző mérési eljárás eredményei is figyelembe lettek véve, ezáltal a vizsgált talajt többféle szempontból jól leíró modell került létrehozásra. A mérések egy egyedi fejlesztésű, és diszkrételes modellezéshez korábban még nem alkalmazott horizontális penetrométerrel, egy talajba helyezett elmozdulásmérő szenzorral (4. ábra), egy kultivátorszerszámmal és egy vertikális penetrométerrel történtek laboratóriumi talajvályú homok talajában. A szimulációk az Altair EDEM szoftverrel történtek gömb és clump elemek alkalmazásával. Az eredmények alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

A saját fejlesztésű horizontális penetrométer és a talajba helyezhető elmozdulásmérő szenzor megfelelő pontosságú információt adnak a talajellenállásról és a talaj belső elmozdulásairól a diszkrételes paraméterkalibrációhoz.

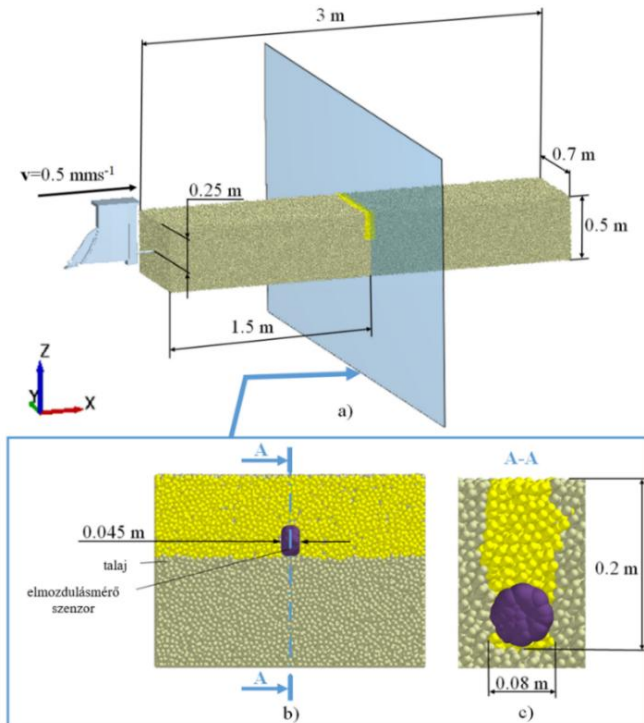
A talaj diszkrételes modelljének létrehozásához megvizsgálásra került gömb és clump elemek alkalmazása. A paraméterkalibráció során kiderült, hogy az alkalmazott hiszterézises rugós kapcsolati modell, szemcseméret és szemcse geometria esetén gömb elemek alkalmazásával jobb egyezés érhető el a mérések és szimulációk között. A clump elemek hosszúkás alakja miatt egymásba akadva túlzott mértékben feltorlódtak a szerszámok és mérőeszközök előtt, amivel a mértnél nagyobb talajellenállást, vontatási ellenállást és elmozdulást eredményeztek.



4. ábra Az elmozdulásmérő szenzor, a) belső és b) külső felépítése, c) adatok kinyerése és feldolgozása, illetve a d) szenzor elhelyezése a talajban.

A horizontális penetrométerrel és talajba helyezett elmozdulásmérő szenzorral végzett mérések alapján, a sűrűdési paraméterek beállításával kalibrált DEM modell (5. ábra) a kultivátorszerszámos szimuláció esetén felülbecsülte a vontatási ellenállást.

A kultivátorszerszámmal végzett szimulációk alapján megállapítható, hogy a nagyobb sűrűségű szemcsék nagyobb mértékben feltorlódnak a szerszám előtt, ezáltal nagyobb vontatási ellenállást eredményeznek, ugyanakkor a nagyobb tehetetlenség miatt kevésbé veszik át a kultivátorszerszám sebességét, így kisebb sebességgel mozognak.



5. ábra Horizontális penetrométer és talaj elmozdulásmérő kiindulási állapota a gömb alakú szemcséből álló talajmodell esetén, a) DEM halmaz méretei és a horizontális penetrométer elhelyezése, b) elmozdulásmérő szenzor a DEM halmaz oldalirányú középmetszetében, c) elmozdulásmérő szenzor méretei (a horizontális penetrométer sebességét v vektor jelöli).

A vertikális penetrométeres szimulációk eredményei minden mélység esetén a mérési eredmények szórásmezőjén belül adódtak, ezzel eredményesen validálva lett a gömb elemekkel kalibrált paraméterkombináció. Megállapítható tehát, hogy a gömb elemekkel

létrehozott talajmodell megfelelő pontossággal követi a vizsgált talaj belső elmozdulásait és szimulálja a talajművelő szerszámok vontatási ellenállását.

A laboratóriumi és a szimulációs vizsgálatok alapján kimondhatók az alábbi tézisek:

10. tétel

Megalkottam egy olyan a diszkrétéleemes modell kalibrálására alkalmas módszertani eljárást, amely a szemcsehalmozokon belüli mozgások, illetve a vízszintes talajellenállás vizsgálatára együttesen alkalmas.

(Tamás et al., 2023); (Wágner et al., 2023); (Páthy et al., 2024)

11. tétel

A kifejlesztett horizontális penetrométer és a talajban elhelyezett elmozdulásmérő szenzor kellően pontos információt tud adni a talaj horizontális penetrációs ellenállásáról és a talaj belső elmozdulásairól az adott kutatásban használni kívánt diszkrétéleemes modell szemcsegeometriájához alkalmazott szemcsekapcsolati paraméterek kalibrálásához.

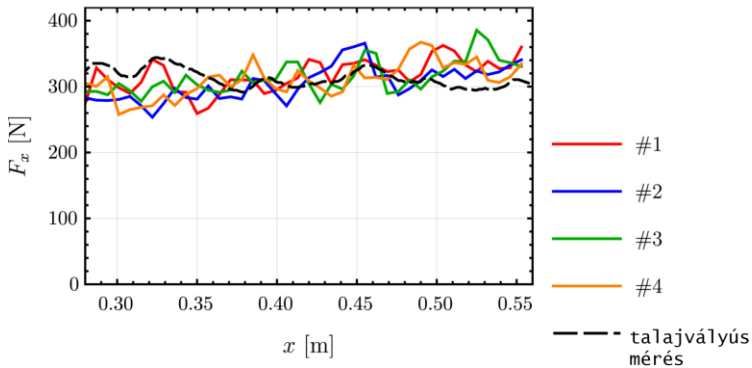
(Tamás et al., 2023); (Wágner et al., 2023); (Páthy et al., 2024)

3.5 Talaj és kultivátorszerszám kölcsönhatás DEM szimulációi GPU gyorsítással témakörre vonatkozó megállapítások

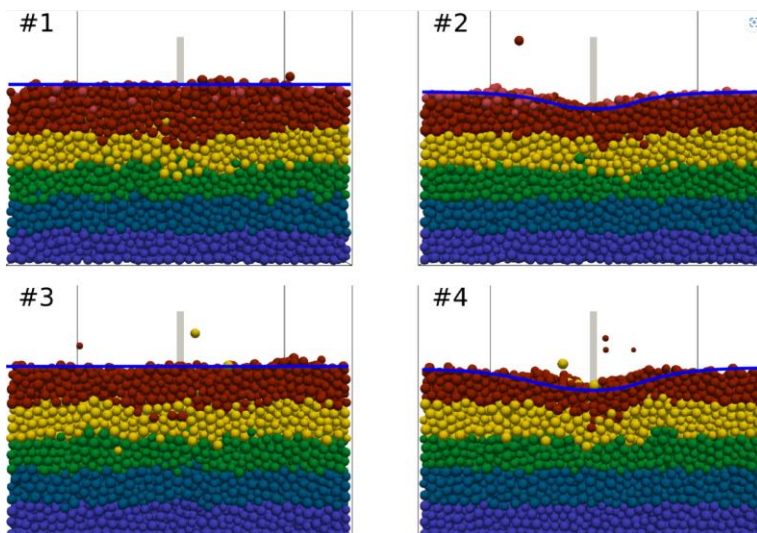
A GPUDEM-mel a tízedére csökkenthető a futási idő más szoftverekhez képest, amely elsősorban GPU-s gyorsításnak köszönhető. Más GPU-s DEM szoftverekkel ellentétben a GPUDEM általánosan használható, bármilyen problémára, illetve különböző méretű és anyagú szemcse is alkalmazható. Az alacsony futási időn túl további célkitűzések is megvalósultak:

A lényegesen alacsonyabb futási idő lehetővé tette több mint 10000 db szemcse alkalmazását és a szemcsekapcsolati paraméterek optimalizációját is, amely segítségével sikerült reprodukálni egy kultivátorszerszám vontatási ellenállásának a mérését nedves homoktalajban. A dolgozatban csak egy egyszerű példa került bemutatásra, de természetesen több mérésre együttesen is lehetséges a paraméteroptimalizáció, a fitness függvény megfelelő definiálásával.

A DEM-es szakirodalomban jellemzően Euler-módszert használnak, azonban ezt a választást a legtöbb esetben nem indokolják. A kutatás eredményeként bemutatásra került, hogy minden időlépési séma elsőrendben pontos, ha nem teljesül a folytonossági feltétel. Ez a kalibráció több alkalmas modell beállítási paramétert eredményez (6. ábra), amelyek megfelelőségét a mennyiségi kalibráción túl a halmaz elmozdulások figyelembevételével rangsorolni szükséges (7. ábra).



6. ábra A talaj és kultivátorszerszám kölcsönhatás eredményeként fellépő vontatási ellenállások (F_x) különböző paraméterekkel.



7. ábra A kultivátorszerszám modell munkáját követően létrejövő felszínprofil (kék vonal). Az egyes alábrák az eredményeket a gépi vontatási ellenállás kalibráció eredményeként megfelelőnek bizonyult paraméterkészletekkel ábrázolják. A különböző színek a kezdeti szemcsemagasság alapján mutatják a rétegeket.

A laboratóriumi és a szimulációs vizsgálatok alapján kimondható az alábbi tézis:

12. tézis

Az egyedi fejlesztésű GPUDEM diszkrétéleemes szoftver alkalmazásával, amely a grafikus kártyák jelentős számítási kapacitására támaszkodik, megnyílt a lehetőség a talaj és kultivátorszerszám kölcsönhatás szimulációinak, illetve az evolúciós algoritmussal történő kalibráció idejének és az abban alkalmazható szemcseméretnek a több mint tízedére való csökkentésére. Az így létrehozott modellekben a talajszemcsék mozgásai, illetve azoknak a szerszám felületével való érintkezésének a viselkedése a valós talajok szemcseméretéhez közelebb álló szemcseméretekkkel vizsgálhatók.

(Nagy et al., 2024)

13. tézis

A továbbfejlesztett talaj és kultivátorszerszám kölcsönhatás modellje GPU-s gyorsítással néhány óra alatt kalibrálható nagyszámú egyed létrehozásával és evolúciós algoritmus alkalmazásával. Ez a kalibráció több alkalmas beállítási paraméterkombinációt eredményez, amelyek megfelelőségét a mennyiségi kalibráción túl a halmaz elmozdulások figyelembevételével rangsorolni szükséges.

(Nagy et al., 2024)

4. Az eredmények gyakorlati alkalmazásának lehetőségei

A kifejlesztett talaj-kultivátorszerszám kölcsönhatás modellje a fejlesztés kezdeti fázisában kiválthatja a költséges laboratóriumi, illetve szántóföldi vizsgálatokat. Az eredmények jól mutatják, hogy a laboratóriumi nedvesített homoktalajra, illetve a szántóföldi talajokra jellemző talajheterogenitás kezelhetővé válik a DEM modellben, akár a növényi gyökök szimulációival, így a talajnedvesség megőrzését előtérbe helyező fejlesztések alkalmas eszközeként használható.

Az is megállapítható, hogy a létrehozott modellben nemcsak a szerszám geometriája optimalizálható, hanem akár annak a rugalmasan megtámasztott változatai is vizsgálhatók. Ezek a szimulációs vizsgálatok azt sugallják, hogy ha a szerszámot megtámasztó rugóban alkalmazott rugómerevséget és a csillapítási tényezőt változóként kezeljük, akkor a kezdeti adatokból meghatározhatóak a passzív rezgésre alkalmas kultivátorszerszám optimális paraméterei, amely a lehetővé teszi egyéb rugalmasan megtámasztott talajművelő eszköz fejlesztését. Mivel az alkalmazott DEM modell alkalmazhatóságát jelentősen befolyásolja az előzetes kalibráció minősége, a kutatásaim során kifejlesztett gyorsulásmérésen alapuló szenzorfüzió alkalmazása további mezőgazdasági halmazok vizsgálatát, illetve DEM modellben történő kalibrációját is elősegítheti.

A megalkotott GPUDEM-mel több szemcse szimulálható megadott idő alatt, mint a legtöbb DEM szoftverben. Ez lehetővé teszi a szemcseméret csökkentését és a talaj pontosabb modellezését. A talajművelés szimulációja során minden esetben fontos, hogy a szemcsék mérete a geometriához képest megfelelően kis méretű legyen. Ez megadja a lehetőségét a talaj-kultivátorszerszám kölcsönhatás tribológiai vizsgálataira is. A talajparaméterek kalibrálása DEM alkalmazása során számos esetben fontos, hiszen a DEM a valóságosnál nagyobb szemcséket alkalmaz, amelyek alakja is eltérő lehet. A GPUDEM a jövőben egy megfelelő eszköz lehet más típusú talajok DEM paramétereinek a meghatározására is.

5. Az értekezés alapjául szolgáló saját közleményeim jegyzéke

Nagy, D., Pásthly, L., Tamás, K., 2024. Development of a GPU-based DEM solver for parameter optimization in the simulations of soil-sweep tool interactions. *Comput. Electron. Agric.* 227, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109482>

Pásthly, L., Szabó, B., Tamás, K., 2024. Measuring and modelling of soil displacement from a horizontal penetrometer and a sweep using an IMU sensor fusion and DEM. *Soil Tillage Res.* 244, 106207. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106207>

Tamás, K., 2024. Modelling the interaction of soil with a passively-vibrating sweep using the discrete element method. *Biosyst. Eng.* 245, 199–222. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.06.006>

Tamás, K., Kovács, G., Wágner, Á., Hudoba, Z., Szabó, B., Kovács, L., 2023. Horizontális penetrométer és talajelmozdulás-mérő fejlesztése talajmodellek kalibrációihoz. *Mezőgazdasági Techn.* 64, 2–7.

Tamás, K., Bernon, L., 2021. Role of particle shape and plant roots in the discrete element model of soil–sweep interaction. *Biosyst. Eng.* 211, 77–96. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.09.001>

Tamás, K., 2018. The role of bond and damping in the discrete element model of soil-sweep interaction. *Biosyst. Eng.* 169, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.001>

Wágner, Á., Szabó, B., Kovács, L., Tamás, K., Grad-Gyenge, L., 2023. The development of a soil-movement measurement system to create more precise numeric soil models, in: 1st Workshop on Intelligent Infocommunication Networks, Systems and Services (WI2NS2). Budapest University of Technology and Economics, pp. 83–88.

6. A t  zisz  zetben el  fordul   irodalmi hivatkoz  sok jegyz  ke

Abo-Elnor, M., Hamilton, R., Boyle, J.T., 2003. 3D Dynamic analysis of soil  tool interaction using the finite element method. *J. Terramechanics* 40, 51  62.

Acharya, C.L., Kapur, O.C., Dixit, S.P., 1998. Moisture conservation for rainfed wheat production with alternative mulches and conservation tillage in the hills of north-west India. *Soil Tillage Res.* 46, 153  163.

Bekele, B., Habtemariam, T., Gemi, Y., 2022. Evaluation of Conservation Tillage Methods for Soil Moisture Conservation and Maize Grain Yield in Low Moisture Areas of SNNPR, Ethiopia. *Water Conserv. Sci. Eng.* 7, 119  130.

Busari, M.A., Kukal, S.S., Kaur, A., Bhatt, R., Dulazi, A.A., 2015. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 3, 119  129.

Cundall, P. A., 1971. A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system. *Proc. Int. Symp. Rock Mech.* 8, 129  139.

Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *G  otechnique* 29, 47  65.

Effeindzourou, A., Chareyre, B., Thoeni, K., Giacomini, A., & Kneib, F., 2016. Modelling of deformable structures in the general framework of the discrete element method. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(2), 143-156.

Fielke, J.M., 1999. Finite Element Modelling of the Interaction of the Cutting Edge of Tillage Implements with Soil. *J. Agric. Eng. Res.* 74, 91  101.

Godwin, R.J., O'Dogherty, M.J., Saunders, C., Balafoutis, A.T., 2007. A force prediction model for mouldboard ploughs incorporating the effects of soil characteristic properties, plough geometric factors and ploughing speed. *Biosyst. Eng.* 97, 117  129.

Gupta, P.D., Gupta, C.P., Pandey, K.P., 1989. An analytical model for predicting draft forces on convex-type wide cutting blades. *Soil Tillage Res.* 14, 131–144.

Ibrahmi, A., Bentaher, H., Maalej, A., 2014. Soil-blade orientation effect on tillage forces determined by 3D finite element models. *Span. J. Agric. Res.* 12, 941–951.

Mouazen, A.M., Nem  nyi, M., Schwanghart, H., Rempfer, M., 1999. Tillage Tool Design by the Finite Element Method: Part 2. Experimental Validation of the Finite Element Results with Soil Bin Test. *J. Agric. Eng. Res.* 72, 53–58.

Onwualu, A., 1998. Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools. *Soil Tillage Res.* 48, 239–253.

Pratibha, G., Srinivas, I., V. Rao, K., M.K. Raju, B., Shanker, A.K., Jha, A., Uday Kumar, M., Srinivasa Rao, K., Sammi Reddy, K., 2019. Identification of environment friendly tillage implement as a strategy for energy efficiency and mitigation of climate change in semiarid rainfed agro ecosystems. *J. Clean. Prod.* 214, 524–535.

R  dics, J.P., J  ri, I.J., 2010. Development of 3E tillage system and machinery to challenge climate change impacts. *Period. Polytech. Mech. Eng.* 54, 49.

Shen, J., Kushwaha, R.L., 2017. *Soil-Machine Interactions: A Finite Element Perspective*, 1st ed. Routledge.

Zach  r, A., Keppler, I., Oldal, I., 2016. Investigation of the Applicability and Efficiency of Different Mathematical Modeling and Numerical Simulation Methods for Soil-Tool Interaction. *J. Comput. Appl. Mech.* Vol. 11., 77–94.