



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

Talaj-szerszám kölcsönhatás diszkrétételes modelljének kalibrációja Genetikus Algoritmussal szántóföldi mérések alapján

TDK Dolgozat

Készítette
Szabó Taddeus

Konzulensek
Dr. Tamás Kornél
Hudoba Zoltán

2023. november

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. A talaj fontossága	3
1.2. Jelen kutatás	3
2. Irodalomkutatás	4
2.1. Talajművelés modellezésének lehetőségei	4
2.2. A genetikus algoritmus bemutatása	5
2.2.1. A genetikus algoritmus sorrendje	5
3. Célkitűzés	7
4. Anyagok és módszerek	8
4.1. Fizikai mérések	8
4.2. Szimuláció	11
5. Eredmények	16
5.1. Szimulációs eredmények első fizikai mérés alapján	17
5.1.1. A legjobb eredmény első fizikai mérés alapján	17
5.1.2. A második legjobb eredmény első fizikai mérés alapján	19
5.1.3. A harmadik legjobb eredmény első fizikai mérés alapján	20
5.2. Szimulációs eredmények második fizikai mérés alapján	21
5.2.1. A legjobb eredmény második fizikai mérés alapján	22
5.2.2. A második legjobb eredmény második fizikai mérés alapján	23
5.2.3. A harmadik legjobb eredmény második fizikai mérés alapján	24
5.3. Szimulációs eredmények harmadik fizikai mérés alapján	25
5.3.1. A legjobb eredmény harmadik fizikai mérés alapján	26
5.3.2. A második legjobb eredmény harmadik fizikai mérés alapján	27
5.3.3. A harmadik legjobb eredmény harmadik fizikai mérés alapján	28
5.4. Szimulációs eredmények negyedik fizikai mérés alapján	29
5.4.1. A legjobb eredmény negyedik fizikai mérés alapján	30
5.4.2. A második legjobb eredmény negyedik fizikai mérés alapján	31
5.4.3. A harmadik legjobb eredmény negyedik fizikai mérés alapján	32
5.5. Szimulációs eredmények ötödik fizikai mérés alapján	33
5.5.1. A legjobb eredmény ötödik fizikai mérés alapján	34
5.5.2. A második legjobb eredmény ötödik fizikai mérés alapján	35
5.5.3. A harmadik legjobb eredmény ötödik fizikai mérés alapján	36
5.6. Szimulációs eredmények hatodik fizikai mérés alapján	37
5.6.1. A legjobb eredmény hatodik fizikai mérés alapján	38
5.6.2. A második legjobb eredmény hatodik fizikai mérés alapján	39
5.6.3. A harmadik legjobb eredmény hatodik fizikai mérés alapján	40
5.7. A talaj heterogenitásának modellben való leírhatóságának elemzése	41
6. Konklúzió	43
7. Kitekintés	44

Jelölésjegyzék

$\bar{l}$	Átlagos távolság a két görbe között [mm]
$F_{RelError}$	Vonóerő relatív hibája [N]
F_{sim}	Szimulált vonóerő átlaga [N]
F_{mert}	Fizikai mérések vonóerő átlaga [N]

Rövidítésjegyzék

DEM	Discrete Element Method
GA	Genetikus Algoritmus Genetic Algorithm
PyGAD	Python Genetic Algorithm
VEM	Végeselemes módszer
UI	Felhasználói felület User Interface
3D	Három dimenzió
stl	Standard Tessellation Language
CohFrictMat	Kohéziós súrlódásos anyagmodell
FrictMat	Súrlódásos anyagmodell

1. fejezet

Bevezetés

1.1. A talaj fontossága

A talaj szerkezetének kutatása kiemelkedően fontos és nélkülözhetetlen az emberiség és a környezet védelme szempontjából. A talaj a Föld egyik legfontosabb természeti erőforrása, amely közvetlenül vagy közvetetten befolyásolja az életünket, az élelmiszer-ellátást, az ökoszisztémák működését és a gazdaságot. Ezen okok miatt elengedhetetlenül fontos, hogy megértsük és tanulmányozzuk a talaj szerkezetét, és megfelelő intézkedéseket tegyünk a fenntartható használatára.

A talajminőség és szerkezet befolyásolja a növények növekedését és terméshozamát, ezáltal meghatározza az élelmiszertermelés hatékonyságát és mennyiségét.

Emellett a talaj élőhelyként is szolgál a mikroorganizmusok és a talajlakó élőlények számára. Ezek a szervezetek kulcsszerepet játszanak a talaj biológiai sokféleségének fenntartásában, valamint a talaj termékenységének és tápanyagciklusainak szabályozásában.

1.2. Jelen kutatás

Jelen kutatás a talajt mechanikai szempontból vizsgálja. Tanulmányozza a talajművelő szerszám és a talaj közti kölcsönhatást. Cél, a mezőgazdasági művelés hatékonyságának növelése és a kultúrnövények optimális fejlődésének elősegítése.

Olyan módszerekkel dolgoztam, amelyek lehetővé teszik a talajművelés modellezését. Az eredményeknek gyakorlati alkalmazása segíthet a mezőgazdasági szerszámok geometriájának és művelési paramétereinek tervezésében. Ilyen művelési paraméter például a szerszám mélysége a talajban és a vontatási sebesség. Ezek mellett az eredmények fizikai mérések validálására is felhasználhatók, például különböző szerszámgeometriával, nedvességtartalommal és vontatási sebességgel végzett mérések szimulációja során. Ezen eredmények alapján a kutatás hozzájárulhat a mezőgazdasági technológiák hatékonyabb és fenntarthatóbb tervezéséhez és fejlesztéséhez.

2. fejezet

Irodalomkutatás

2.1. Talajművelés modellezésének lehetőségei

Ucgul és szerzőtársai 2020-as cikkük alapján értelmeztem a talajművelés modellezésének lehetőségeit. [15]

Egy ekével való szántás során a talajt megfordítják és meglazítják, a vetőágyat előkészítik. Annak ellenére, hogy az ekével való szántásnak megvannak az előnyei, gyakran kritizálják lassú működése és a nagy vontatóerő igénye miatt. Sok másik, kevesebb energiát felhasználó művelési gyakorlat jelent meg alternatívaként [8], de olyan helyzetekben, ahol a talaj megfordítása szükséges, az eke továbbra is preferált választás maradt. Például Ausztráliában újraéledt az érdeklődés az ekés boronázás iránt, hogy növeljék a terméshozamot homoktalajokban, amelynek során a felső réteget eltemetik, és mélyebb talajt hoznak a felszínre, amely elősegíti a növények növekedését.

A növekvő energia- és munkaköltségek, valamint a hatékonyság szükségessége nagyobb farmokon azt eredményezik, hogy az ekés boronázást gyorsan kell elvégezni, amely során magasabb sebességeket alkalmaznak. Azonban a magasabb sebességeknek is megvannak a saját kihívásai. Szignifikánsan csökkentik a termő talajréteg mélységét és növelik a vontatóerőt, ennek eredményeként szükség van a fejlesztésekre. Az ekés borona az összes művelőeszköz közül az egyik legbonyolultabb alakzattal rendelkezik, és fejlesztése főként empirikus vagy fél-empirikus módszerekhez kapcsolódik.

Fizikai méréseket végezni időigényes és költséges. Ezen kívül az új ekék tervezése is költséges. Ha az ekés borona és a talaj kölcsönhatása modellezhető számítógépek segítségével, akkor a tervezési költség és az ahhoz szükséges idő csökkenthető.

Analitikai módszerek [1] és a végeselemes módszer (VEM) [4] általában alkalmasak a talaj-ekés borona kölcsönhatás modellezésére. Az analitikai modellek a talajszakadás erőit vizsgálják, de nem képesek a talaj mozgását modellezni. Bár vannak előnyei a VEM használatának, a valós talajban a folytonosság feltétele nem mindig érvényesül, így nem lehet megjósolni a talaj szerkezetének vagy mozgásának változásait.

Az empirikus/fél-empirikus, analitikai és VEM korlátait leküzdő módszer a diszkrét elembeli módszer (DEM). A DEM egy diszkrét numerikus módszer, amelyet a szemcsés anyagok modellezésére használnak. A talaj is tekinthető szemcsés anyagnak, ezért a módszer alkalmas a talaj-eszköz kölcsönhatás modellezésére is (pl. [2]). A DEM szemcsék közötti fizikai kapcsolatokat modellezi (kapcsolati modell), ahol sok részecskét használnak a talajtömeg reprezentálására. Mivel a talaj sok kis részecskéből áll, a DEM talaj modellezés fő korlátja a részecskék közötti kapcsolatok száma. Ezzel párhuzamosan a számítási idő is korlát. A számítógéptechnológia korábban nem volt alkalmas ilyen erőforrásigényes számítások elvégzésére, de a szoftver- és hardvertechnológia gyors fejlődésével a DEM most már alkalmazható granulált anyagok modellezésére. Mivel a valós talajrészecskék túl kicsik (<2 mm), a tényleges részecskeméretek használata jelenleg még mindig nem lehetséges, ezért általában a ténylegesnél nagyobb részecskeméretekkel dolgoznak a szimulációkban. Több tanulmányban alkalmazták a ténylegesnél nagyobb részecskeméreteket a DEM használatával (pl. [5], [3] illetve [9]). A DEM esetében az anyag modellezéséhez egy megfelelő - elemek közötti - kapcsolati modell és egy kalibrációs folyamat szükséges a szemcsés anyag tulajdonságainak meghatározásához. A DEM eredményeinek megbízhatósága a beállított kapcsolati modell pontosságával függ össze.

Tamás és Bernon [14] Yade szoftver segítségével végeztek DEM szimulációkat. Kutatásaik során a talajt Coh-FrictMat, a talajjal érintkező szerszámokat FrictMat anyagmodellel modellezték. Ezen anyagmodelleket alkalmasnak találták a talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatához.

Saunders [12] kísérleteiben vizsgálták a sebesség, művelési mélység és az ekék szélességének hatását a művelő erőkre és az árokprofilra. Emellett egy analitikus modellt is fejlesztettek amely vonóerőt alkalmazott. Ucgul és szer-

zótársai 2020-as tanulmányában [15] Saunders korábbi munkáját a DEM segítségével szimulálták, és a szimuláció eredményeit összehasonlították a kísérleti eredményekkel. A DEM által előrejelzett vonóerő eredményeket szintén összehasonlították Saunders analitikus eredményeivel. A vizsgálat azt bizonyította, hogy a kifejlesztett DEM-modell jól szimulálta a mért művelési mélységben a szerszámon ébredő erőket, valamint a szerszám mögött hagyott barázdaprofilokat.

2.2. A genetikus algoritmus bemutatása

A genetikus algoritmus egy számítógépes modellje a biológiai evolúciónak. A genetikus algoritmus alkalmas komplex keresési problémák megoldására, ehhez a számítógép memóriájában bináris karakterláncok vannak tárolva, amelyek idővel hasonló módon módosulnak, mint ahogy a természetes kiválasztás alatt az egyedek populációi fejlődnek. Bár a számítógépes környezet jóval egyszerűbb a természetes világnál, a genetikus algoritmus képes meglepően összetett problémák megoldására [6].

A következőkben a PyGad dokumentációja [7] alapján ismertetem a genetikus algoritmus részletesebb működését. Ahhoz, hogy a genetikus algoritmus működését megérthessük a következő fogalmakat kell ismerni:

- Generáció
- Populáció
- Egyed
- Gén
- Fitness érték
- Szülők
- Mutáció

A genetikus algoritmus hasonlóan a természet működéséhez, generációk során igyekszik eljutni a legjobb géneket tartalmazó egyedek létrehozásához.

Egy generáción belül értelmezhető a populáció, mely előre meghatározott számú egyedekből áll. Az egyedek változó tulajdonságait géneknek nevezzük. Ezek azok a paraméterek, melyeknek optimumát keresi az algoritmus.

Minden egyed tesztelésre kerül, mennyire felel meg az előre definiált elvárásoknak. Végül a megfelelés mértékét egy fitness érték határozza meg. A fitness értéke előre definiált célfüggvények alapján számítjuk. Minél nagyobb ez az érték, annál jobban teljesített az egyed. A generációban lévő összes egyed tesztelése után újabb generáció születik az előző populációk teljesítménye alapján. A jól teljesítő egyedek génjei részben öröklésre kerülnek a következő generáció egyedeiben.

2.2.1. A genetikus algoritmus sorrendje

Kezdeti populáció létrehozása: A genetikus algoritmusok a kezdeti populáció létrehozásával kezdődnek. Ez a populáció egy generáció egyedeiből áll, ahol egy-egy egyed a problémát reprezentáló paraméterek (gén) kombinációját tartalmazza. Ezek a paraméterek lehetnek például numerikus értékek, karakterláncok vagy bármi, amit optimalizálni szeretnénk.

Fitness értékek kiszámítása: Minden egyedhez kiszámítjuk a fitness értékét, ami azt mutatja meg, mennyire jó a megoldás, amit az egyed képvisel. A fitness érték általában egy szám, ami minél magasabb, annál jobb a megoldás.

Szülők kiválasztása: A következő lépésben a populáció egyedei közül kiválasztjuk azokat az egyedeket, amelyek alapján új generáció jön létre. A kiválasztás valószínűségi alapon történik, és a magasabb fitness értékkel rendelkező egyedeknek nagyobb esélyük van rá.

Keresztezés: A kiválasztott szülők génjeiből hoz létre új egyedeket, amelyek kombinálják a szülők paramétereit. Ez a folyamat a biológiai keresztezéshez hasonló, és az új generáció egy részét alkotja.

Mutáció: Az új generáció egy részén véletlenszerű változásokat hajtunk végre, ami új génvariációkat eredményez. A mutáció biztosítja a genetikus algoritmusok sokszínűségét és az esélyt arra, hogy új és jobb megoldások jöjjenek létre.

Új generáció létrehozása: Az új generációt a kiválasztott szülők és a mutált egyedek alkotják. Ezek az új egyedek képviselik a következő generációt, és a folyamat ismétlődik.

Más kutatásokban is használtak GA-t ahhoz, hogy minél jobb eredményt érjenek el DEM alkalmazásakor [10]. Ebben a kutatásban is automatizált módon állították be a DEM alkalmazott kapcsolati modell mikromechanikai jellemzőit genetikus algoritmus segítségével.

3. fejezet

Célkitűzés

A célok kitűzése során figyelembe vettem a szakirodalomkutatás során fellelt hiányosságokat. Nem találtam olyan kutatást, amelyben automatikusan kalibráltak DEM talajmodellt, talajművelő szerszám mögött hagyott barázda keresztmetszete és műveléshez szükséges vontatási ellenállás alapján.

A kutatás célja, fizikai talaj-szerszám vizsgálatok során mért felszínprofil jellemzők (szerszám vontatási ellenállása és barázdakeresztmetszet) alapján diszkrételes talajmodell automatikus kalibrálása GA segítségével. A jelen kutatásban kitűzött célok pontokba szedve a következők:

1. Szántóföldi mérés elvégzése.
2. Szántóföldi mérés alapján DEM modell megalkotása.
3. A mérésben és a diszkrételes modellben létrejövő felszínprofilok összehangolása és kalibrációja GA alkalmazásával.
4. Szemcse alakhatásának vizsgálata a felszínprofil és a vontatási ellenállás alakulásához.
5. A talaj makromechanikai paramétereinek minél pontosabb leírása a DEM modell mikromechanikai paramétereivel.
6. Kalibráció sebességének növelése azzal, hogy a számítógép teljes kapacitását kihasználja.

Kutatásaim olyan céllal végzem, hogy kidolgozott módszerem segítségével könnyebben meghatározhassam a modell talaj mikromechanikai jellemzőit. Ezen keresztül képesek leszünk részletesebben tanulmányozni és megragadni a valóságos talajt és az ezzel kölcsönhatásba lépő eszközöket, ami fontos alapot szolgáltat a talajművelés fejlesztéséhez, ezáltal a mezőgazdasági folyamatok hatékonyabbá tételéhez is.

4. fejezet

Anyagok és módszerek

4.1. Fizikai mérések

2015 december 9.-én és 2016 szeptember 22.-én, szántóföldi mérések lettek elvégezve. A fő cél az volt, hogy megértsük, hogyan változik a talaj felszínprofilja, amikor különböző geometriájú kultivátor kapát húzunk át rajta. Ezen mérések során a talaj többféle makromechanikai paraméterét vizsgálták (4.1. ábra).



4.1. ábra. Méréshez használt három különböző geometriájú (balról jobbra: keskeny, közepes, széles) kultivátor kapa

Elsőként meghatározták a talaj nedvességtartalmát (2015 decemberében 6.6 V/V%, 2016 szeptemberében pedig 13 V/V%), emellett penetrációs vizsgálatot is végeztek (2015 decemberében 15 cm mélyen 1.82 Mpa volt az eredmény, 1.47 Mpa szórással. 2016 szeptemberében 15 cm mélyen 1.13 Mpa volt az eredmény, 0.95 Mpa szórással).

A talajművelés közben mérték, hogy mekkora a kultivátor szerszámra ható vontatási ellenállási erő. Ezeket a méréseket különböző sebességekkel is elvégezték. Ezek a mérések lehetővé tették, hogy jobban megértsék, hogyan viselkednek különböző geometriájú szerszámok különböző talajállapotok mellett.



4.2. ábra. A lézeres profilográf, amit a felszínprofil mérésére használtak

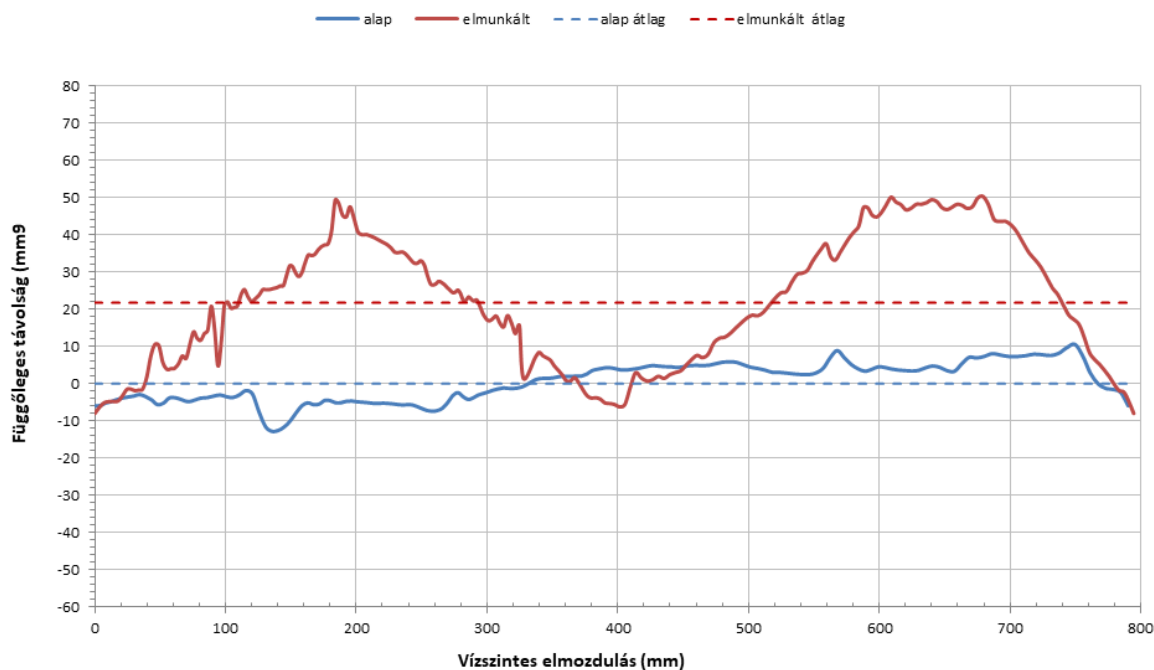
Minden mérés előtt és után készítettek egy felszínprofil, amelyből később részletes táblázatot állítottak össze. A felszínprofil mérésével lehetőség nyílik a talaj mozgásának tanulmányozására, amely elengedhetetlen tudás a megfelelő talajművelés kiválasztásához. A méréshez a 4.9. ábrán látható eszközt használták. Az eszköz lézeres elven működik, így méri a távolságot a sínen mozgó mérőfej és a talaj között. A méréseket három különböző geometriájú szerszámmal végezték el, amelyek a 4.1. ábrán is láthatók. [14]

A talaj automatikus kalibrálásához a következőkben bemutatott méréseket vettem alapul a DEM modellezés során. A 4.3. ábrán látható az egyik felszínprofil eredménye, amely jól mutatja a talaj alapját, vagyis a mérés előtti és a mérés utáni felszínprofil közti különbséget. A 4.4. ábrán pedig az egyik mérésben kapott szerszámról a vonóerő és a szerszám sebessége látható. A sebesség változása a diagramon azért figyelhető meg, mert a talaj heterogén anyag.

A mérés sorszáma: 02
Dátum: 2018. 08. 23.

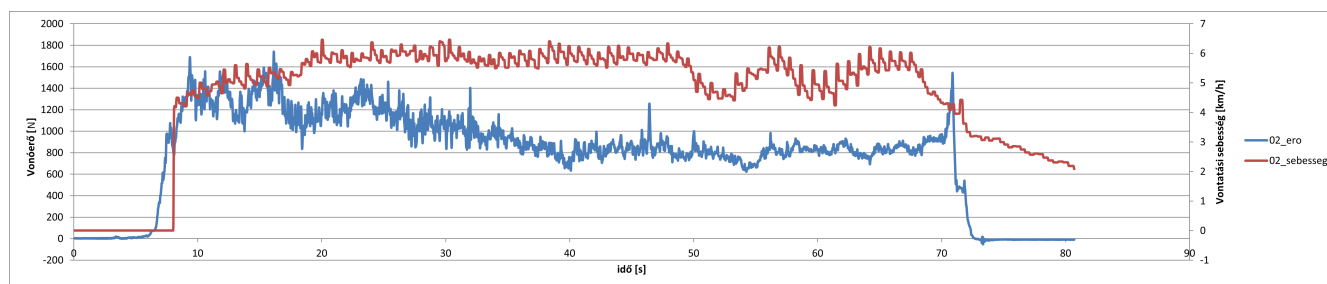
Talajprofil közepes kapa

Nedvesség: 6,6 V/V%
Átlagsebesség 5,6 km/h



4.3. ábra. Felszínprofil eredmények 6.6 V/V% talajnedvesség esetén. 5.6 km/h átlagsebességgel haladó kultivátor szerszám után

Összességében 18 szántóföldön végzett fizikai mérés állt rendelkezésemre. (2 féle nedvességtartalommal, 3 különböző geometriájú, szélességű kultivátor szerszámmal és 3 féle átlagsebességgel) Ebből a közepes méretű szerszámot használtam, amihez hat mérés társult. Három mérést 6.6%-os talajnedvességnél, 3 mérést 13%-os talajnedvességnél mértek. Mindegyik mérést más sebességgel készítették. A 4.1. táblázatban láthatók ezek a paraméterek.



4.4. ábra. Vonóerő (kék vonal) és sebesség (piros vonal) mérési eredmények 6.6 V/V% talajnedvesség esetén. 5.6 km/h átlagsebességgel haladó kultivátor szerszám után

4.1. táblázat. A közepes kultivátor szerszámhoz tartozó fizikai mérések eredményei

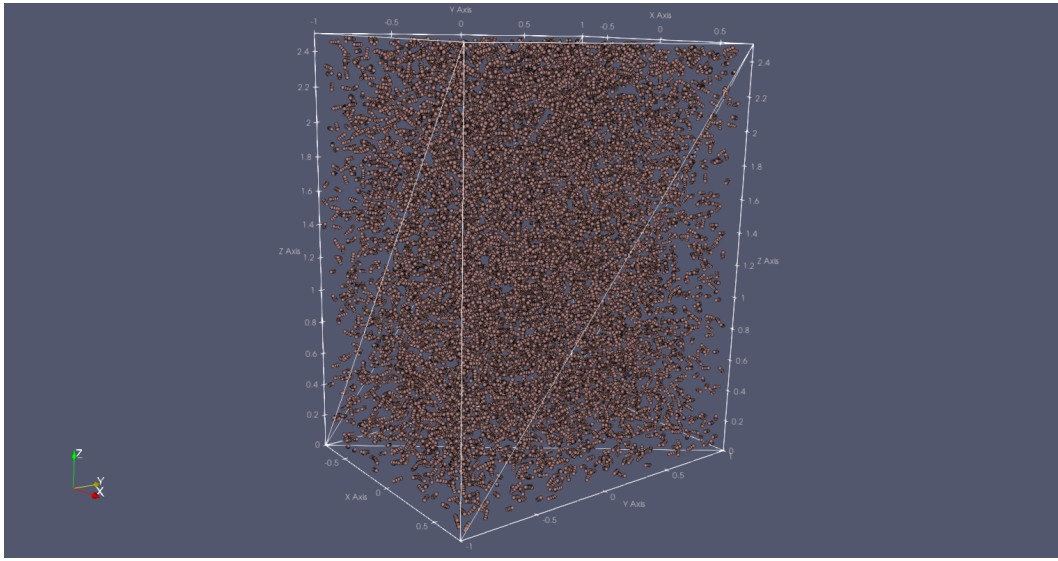
Talaj nedvességtartalma [V/V%]	Átlagos Sebesség [km/h]	Átlagos vonóerő [N]
6.6	5.6	970
6.6	7.3	2200
6.6	9.2	1900
13	5.8	1980
13	6.5	1990
13	8.8	2477

4.2. Szimuláció

A szimulációkat Yade-DEM szoftver segítségével hoztam létre. A szoftver linux rendszer alatt futtatható. Nem rendelkezik UI (User Interface) felülettel, így python programozási nyelvet alkalmazva alakítható ki saját szimulációs környezet. [7]

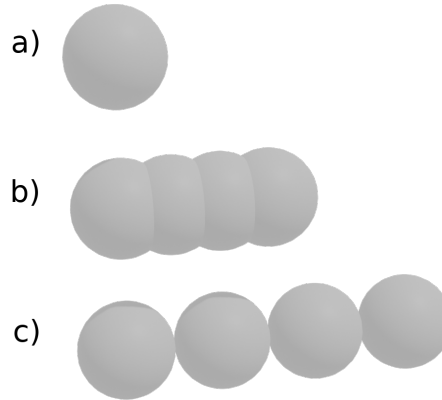
Az elkészült DEM szimulációt látványosan mutatja be ez a [video](#), illetve egy másik kameraszögből ez a [video](#). A folyamat könnyebb megértéséhez érdemes használni a [DEM szimuláció](#) leírását tartalmazó folyamatábrát, illetve a [GA-DEM](#) kapcsolata közötti folyamatábrát.

A saját szimulációs környezetemben egy másfél méter széles, két méter hosszú, két és fél méter magas talajvályút alakítottam ki, amiben 8000 szemcsét helyeztem el.



4.5. ábra. Szemcsék a talajvályúban az ülepítés során

Egy szemcse sugara 20 milliméter $\pm 30\%$ -os normál elosztásban. Ezekből a szemcsékből készültek a clumpok. A clumpok olyan egymáshoz ragasztott elemek, melyek együtt alkotnak egy szemcsét. A clumpok esetében az elemek metsződő részeiben a sűrűség nem duplázódik. A clumpokat a következőképpen készítettem el: Az összes szemcséhez további három darab azonos sugarú szemcsét illesztettem úgy, hogy azok egy sorba helyezkedjenek el, így 8000 darab a 4.6. ábrán látható clumból álló szimulációt kaptam. Az egy clumpon belül lévő szemcsetávolságot a genetikus algoritmus állította egy 0-100-ig terjedő skálán. A 100 azt az értéket jelenti, amikor a négy darab szemcse éppen csatlazik egymáshoz, a 0 pedig azt, amikor a négy szemcsének ugyanaz a középpontja, így egy gömböt alkotnak (4.6. ábra).

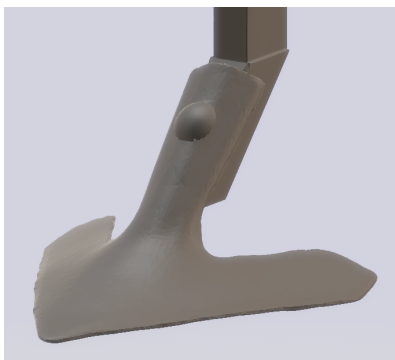


4.6. ábra. Clumpok, egy gömb átmérője $40\text{mm} \pm 30\%$, a) clump paraméter 0 b) clump paraméter 50 c) clump paraméter 100

A clumpokat a talajvályúban elhelyeztem, majd a gravitációt szimulálva addig ülepítettem, amíg a kiegyensúlyozatlansági erő tényezőt figyelembe véve a szemcsehalmaz már elért egy elfogatható stabil állapotot ($\text{unbalancedforce}() = 0.0013$). Ekkor levágtam a halmaz tetején lévő clumpokat, hogy lesimítsam a felszínt. Elhelyeztem a kultivátor szerszámot, amit egy stl kiterjesztésű fájlban kaptam meg, 3D szkennelés után (4.7. ábra). Az stl mérete a valóságot követve, 23 mm széles, 25 mm hosszú, 73 mm magas. Egy konstans értékre állítottam be a sebességét, amely a fizikai mérések alapján mért átlagsebesség volt. A szerszámot az alábbi alap paraméterekkel adom hozzá a szimulációhoz:

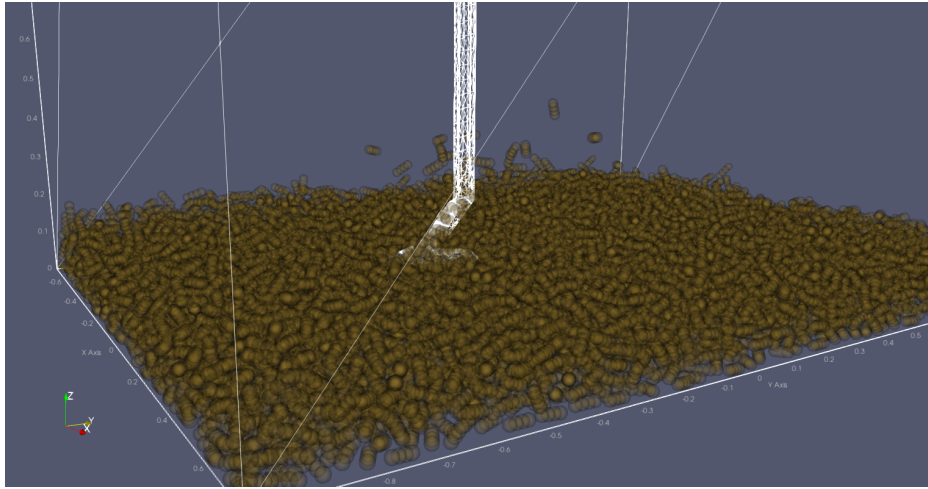
```
FrictMat (young=1e12 ,
poisson=0.3,
density=7850,
frictionAngle=0)
```

A kultivátor a szimuláció során végigment a szemcsehalmazon 15 cm mélységben (4.8. ábra). A talajvályú középső - egy méteres szakaszán - mértem a mozgás irányába eső szerszámmra ható vonóerőt.



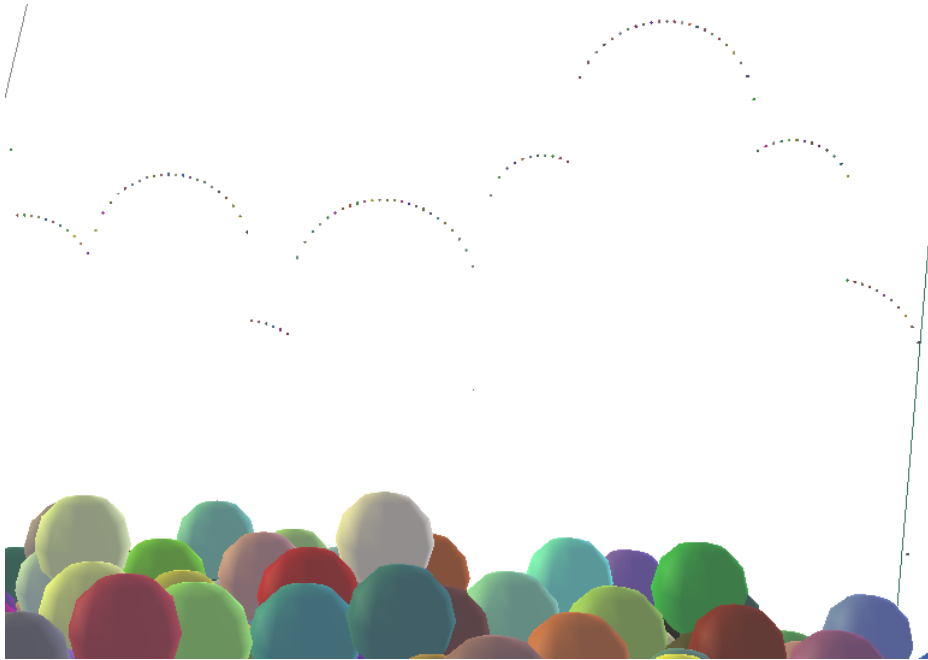
4.7. ábra. Kultivátor szerszám stl (közepes méretű)

Miután a kultivátor szerszám végig haladt a talajmodellben a szemcsék újra leülepedtek ($\text{unbalancedforce}() = 0.0013$). Ezután elindult a felszínprofil vizsgálata.



4.8. ábra. Kultivátor a szimulációban

A felszínprofil mérésének az ötletét a valós mérés inspirálta. A szimulált felszínprofil keresztmetszetének egy vonalban történő visszaadásához, a halmaz közepén 5 miliméterenként egy sorba leraktam egy-egy apró szemcsét (a szemcsék a "lézersugarat" szimulálják). Gravitációval elkezdtem leengedni őket. Amikor valamelyik apró "lézerszemcse" interakcióba lépett egy clumppal, akkor annak a szemcsének a pozícióját elmentettem. Miután mindegyik "lézerszemcséhez" hozzá tudtam rendelni egy x, z pozíciót, összehasonlítottam az eredményeket a fizikai mérések eredményével és a szimuláció véget ért 4.9.



4.9. ábra. Felszínprofil kirajzolása a szimulációban

Az eredmény kiértékeléséhez a fizikai mérések során készült felszínprofil grafikont újraszegmentáltam, hogy az is 5 miliméterenként legyen felszeletelve. A szimulált felszínprofil adatsorát mozgóátlag függvény segítségével simítottam.

```
moving_average(szimulaltFelszinprofilYErtekei , 6)
```

A két függvényt a minimum pontjuknál összeillesztettem, majd megnéztem a köztük lévő átlagos távolságot.

Egy szimuláció lefuttatása után a szimulációban a kultivátor szerszámra ható átlagos vonóerőt, illetve a szimulált és a fizikai mérés során kapott felszínek közötti eltérést kaptam eredményül egy-egy szám formájában.

Erre a kettő paraméterre építettem fel a GA-t. Ezt a két eredményt figyelembe véve változtatta a GA a talaj mikromechanikai paramétereit úgy, hogy ezek az eredmények egyre jobban hasonlítsanak a fizikai mérések során kapott makromechanikai paraméterekhez. Ehhez a GA egy fitness függvényt használ, melynek eredménye egy szám, ami minél nagyobb, annál jobban közelít a valósághoz. A fitness érték kiszámolását a következő fitness függvény írja le:

$$Fitness = \frac{1}{\frac{\bar{l}}{100} \cdot 0.3 + F_{RelError} \cdot 0.7} \quad (4.1)$$

A 4.1. képletben a jelölések jelentése a következő:

$\bar{l}$: Átlagos távolság a két görbe között

$F_{RelError}$: Vonóerő relatív hibája, melynek képlete:

$$F_{RelError} = \frac{|F_{szim} - F_{mert}|}{F_{mert}} \quad (4.2)$$

A 4.2. képletben a jelölések jelentése a következő:

F_{szim} : Szimulált vonóerő átlaga

F_{mert} : Fizikai mérések vonóerő átlaga

Kezdetben azt tapasztaltam, hogy az átlagos távolság a két görbe között nagyon jó eredményeket adott, viszont a vonóerő jelentősen eltért a fizikai mérés eredményeitől. Ahhoz hogy ezt az eltérést kompenzáljam, a fitness függvényben a két értéket súlyoztam. A 0.7-tel illetve a 0.3-mal való szorzás ezt a súlyozást valósítja meg. Ennek köszönhetően a GA a kalibráció során jobban figyelt arra, hogy a vonóerőre is kalibrálja a talajt. Ez a súlyozás elősegítette, hogy több olyan szimulációt kapjak, ahol az vonóerő is közel megegyezik a valósággal.

4.2. táblázat. A kezdeti kapcsolati paraméterek és szimulációs beállítások. ("Változó"-nak jelölöltem azokat a paraméterértékeket, melyeket a GA változtatott.) A paramétereket és a változók intervallumát a [11] kutatás alapján állítottam be.

Paraméter megnevezése	Paraméter értéke
Elem típusa	clump
Elemek száma	8000 [db]
Elemek sűrűsége	2700 [kg m ⁻³]
Rugalmassági modulus	5 · 10 ⁶ [Pa]
Poisson-tényező	0.4 [-]
Clumpot alkotó gömb sugara	0.02 [m]
Normálirányú kohézió [Pa]	változó [Pa]
Nyíróirányú kohézió	0.5·Normálirányú kohézió [Pa]
Elemek közötti súrlódási szög [°]	változó [°]
Elemek közötti gördülési súrlódási tényező	változó [-]
Elemek közötti csavarási súrlódási tényező	változó [-]
Globális csillapítás az ülepítés során	0.9 [-]
Globális csillapítás a szimulációs mérések során	0 [-]
A falra és a szerszámra vonatkozó sűrűség	7850 [kg m ⁻³]
A falra és a szerszámra vonatkozó Rugalmassági modulus	1 · 10 ¹² [Pa]
A falra és a szerszámra vonatkozó mikromechanikai Poisson-tényező	0.3 [-]
Időlépés az ülepítés során	0.5 · <i>PWaveTimeStep</i> () [-]
Időlépés a szimuláció során	0.1 · <i>PWaveTimeStep</i> () [-]
Halmazban lévő kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányados	0.0013 [-]
Szerszám vontatási sebességei	5.6, 5.8, 6.5, 7.3, 8.8, 9.2 [m s ⁻¹]

Amint az a 4.2. táblázatban is látszik négy változónk van, amiket a GA változtatott úgy, hogy az a valóságot minél jobban megközelítse.

A GA 5 vagy 10 generációt futott, ami azt jelenti, hogy körülbelül 200-400 különböző paraméterrel futott le a DEM szimuláció az egyes mérésekhez. Ezekből az eredményekből a legjobbkat mutatom be a következő fejezetben. A GA-t a következő paraméterekkel használtam:

```
ga_instance = GA(
num_generations=10, #5
    sol_per_pop=38,
    num_parents_mating=10,
    mutation_num_genes=3,
    mutation_percent_genes=0.01,
    num_genes=4,
    fitness_func=fitness_func ,
    gene_type=float ,
    gene_space =
        #frictionAngle
        [{'low': 10.00, 'high': 40.00},
        #normalCohesion
        {'low': 200000.00, 'high': 400000.00},
        #etaRoll_etaTwist
        {'low': 0.0001, 'high': 0.40},
        #szazalekos tavolsag a clumpok kozott
        {'low': 0.00, 'high': 100.00}],])
```

Az előző kódrészletben a "gene space" a négy paraméter lehetséges tartományát jeleníti meg. Ezeket a tartományokat előre meghatároztam és a GA ezen intervallumok között hozza létre az egyedekhez tartozó géneket.

A PyGad alapvetően egyszerre egy szimuláció futását támogatja, viszont ez nagyon lelassítja az automatikus kalibrálás futási idejét, ugyanis az általam létrehozott DEM szimuláció 38 maggal futtatva körülbelül 1-1.5 óra. Ez azt jelenti, hogy egy 5 generációs, generációnként 38 egyeddel rendelkező szimuláció körülbelül 240 óra alatt fut le, ami 10 napnak felel meg. Ahhoz, hogy az eredményeket kevesebb idő alatt megkapjam, a számítógép erőforrás kihasználását újragondoltam, optimalizáltam. Úgy módosítottam az algoritmust, hogy párhuzamosan 38 szimulációt legyen képes futtatni. Minden szimuláció párhuzamosan, külön magon fut. Minden generáció után a szimulációk eredményét egyszerre értékeli, amikor az összes végez. Egy szimuláció 7-8 óráig tart, de szimultán 38 szimuláció fut. Ez azt jelenti, hogy 5 generáció lefuttatása esetén, kevesebb, mint 2 napra van szükség. Ez a módosított algoritmus ezesetben ötször gyorsabb az eredetinel, ami időmegtakarítás szempontjából jelentős.

Természetesen egyszerre futó szimulációk száma tetszőlegesen módosítható (nem csak 38 lehet), de figyelembe kell venni a számítógép magjainak számát.

5. fejezet

Eredmények

Több száz szimulációt futtattam és nagyon sok jó eredményt kaptam. A következő oldalakon bemutatom a hat darab fizikai méréshez tartozó szimulációk talaj kalibrációs eredményét, illetve a legjobb megoldások mikromechanikai paramétereit. Az eredményeket úgy mutatom be, hogy először a fizikai mérés makromechanikai adatait gyűjtöttem össze, ezután a hozzá tartozó összes szimuláció eredménye látható. Végül a három legjobb eredmény részletesen. Az összes szimuláció és azok eredménye letölthető az [eredmények linken](#).

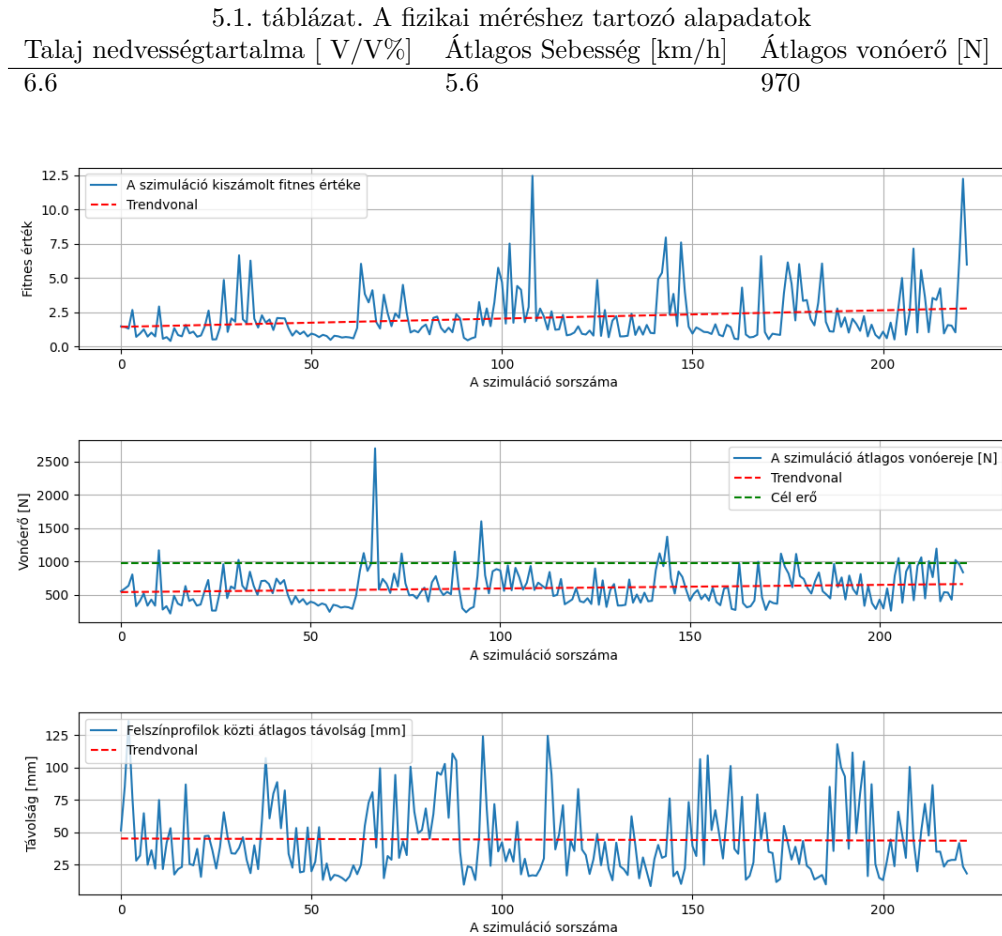
Az eredményt a fitness függvény írja le. Minél nagyobb a fitness értéke, annál közelebb van a valós méréshez az eredmény. Az eredmények vonóerő diagramjain megnézhetjük, mennyire van közel a szimulációban mért átlag vonóerő, a fizikai mérés során mért átlag vonóerőtől (diagramon "cél erő"). A felszínprofil diagramokon pedig minél közelebb került a távolság érték a nullához, annál jobban hasonlított a fizikai mérésben szereplő felszínprofilra.

Fontos, hogy a felszínprofilokat a szimulált felszínprofil minimumánál, illetve a fizikai mérés során kialakult felszínprofil minimumánál illesztettem össze. Így ha DEM-ben nem a kapa után hagyott barázda közepére esett a minimum pont, akkor lehetséges, hogy ez a szám nem tükrözi a szimuláció eredményét.

Érdemes megnézni a trendvonalakat, mely jól mutatja azt, hogy generációról generációra hogyan közelítjük meg egyre jobban a valóságot. Ez a trendvonal minél meredekebb, annál drasztikusabb változás ment végbe az első és az utolsó generáció között. A fitness és erő diagramnál a trendvonal meredksége pozitív, míg a felszínprofilnál negatív. Amennyiben ezek a tendenciák megfigyelhetők, akkor az algoritmusnak sikerült konvergálnia az egyre jobb megoldások felé.

5.1. Szimulációs eredmények első fizikai mérés alapján

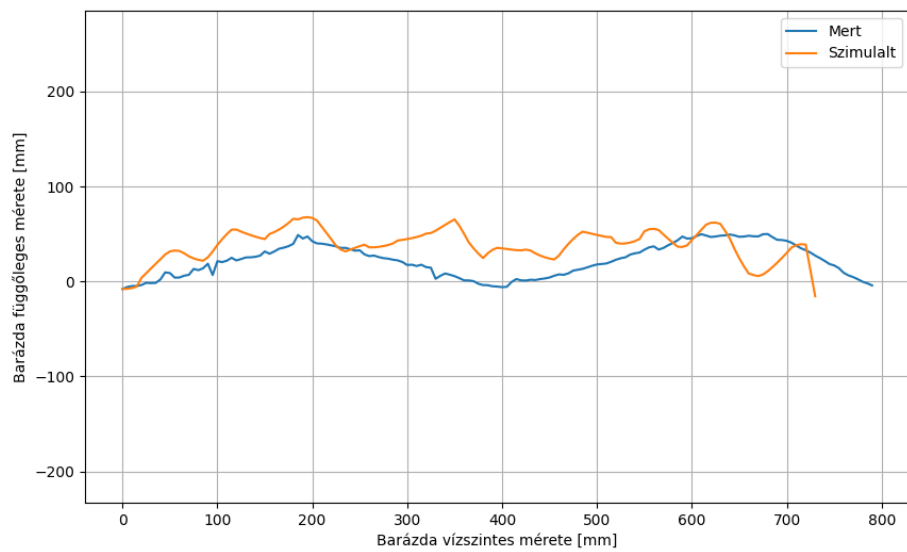
Az alábbiakban bemutatom az első fizikai mérések eredményeit. A 5.1. táblázatban látható a szántóföldi méréseken mért talaj nedvességtartalma és a kultivátor szerszám átlagos sebessége. Ezek az értékek határozták meg a DEM szimuláció bemeneti értékeit. A szerszámra ható átlagos vonóerő pedig meghatározta a vonóerő cél értékét, amire a GA konvergál. A szántóföldi mérésben mért felszínprofil a [felszínprofilok](#) linken keresztül lehet letölteni és megtekinteni.



5.1. ábra. Szimulált eredmények. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 5.6km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.1.1. A legjobb eredmény első fizikai mérés alapján

5.2. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek	
fitness [-]	12.46
vonóerő [N]	931
vonóerő relatív hibája [-]	0.042
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	17.00
koordinációs szám	7.94
Elemek közötti súrlódási szög [°]	17.86
Normálirányú kohézió [Pa]	178826
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.201
Clump paraméter [%]	3.04

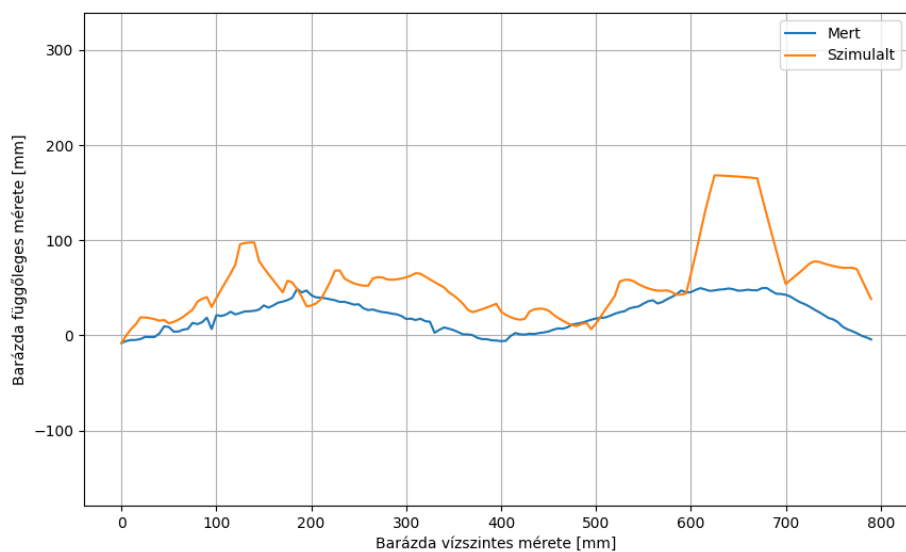


5.2. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 5.6km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.1.2. A második legjobb eredmény első fizikai mérés alapján

5.3. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

fitness [-]	12.24
vonóerő [N]	955
vonóerő relatív hibája [-]	0.016
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	23.59
koordinációs szám	7.76
Elemek közötti súrlódási szög [°]	31.13
Normálirányú kohézió [Pa]	173862
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.098
Clump paraméter [%]	2.64

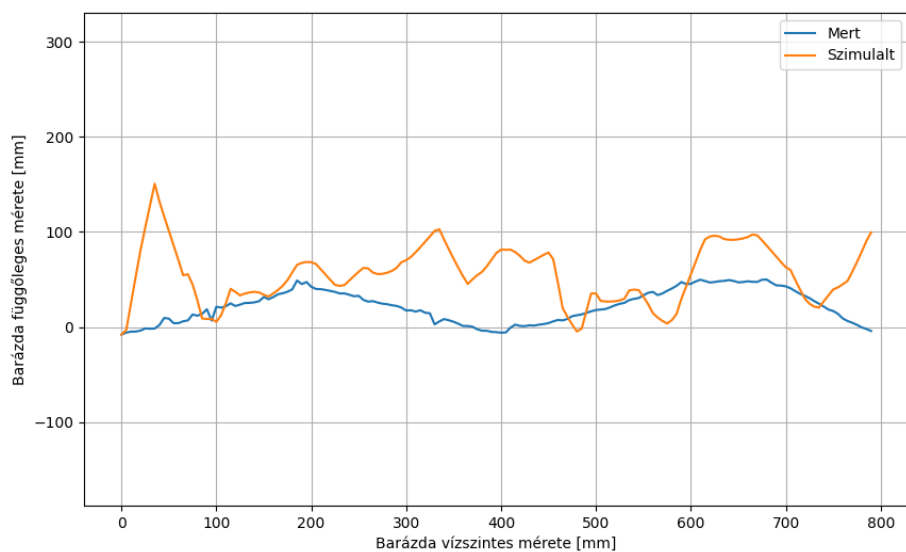


5.3. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 5.6km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.1.3. A harmadik legjobb eredmény első fizikai mérés alapján

5.4. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

fitness [-]	7.95
vonóerő [N]	929
vonóerő relatív hibája [-]	0.044
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	31.74
koordinációs szám	16.93
Elemek közötti súrlódási szög [°]	38.27
Normálirányú kohézió [Pa]	159668
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.107
Clump paraméter [%]	5.71



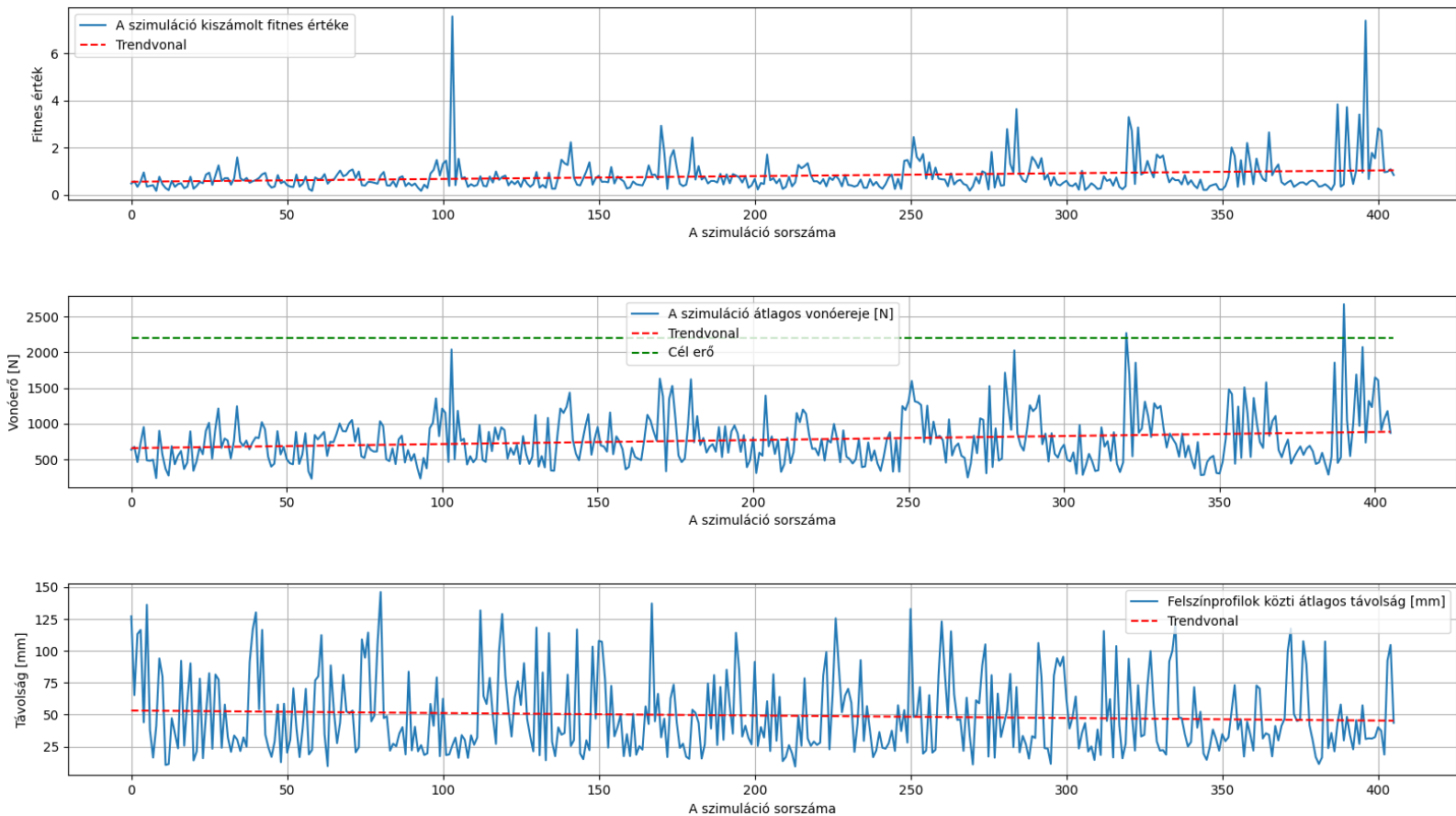
5.4. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 5.6km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.2. Szimulációs eredmények második fizikai mérés alapján

Az alábbiakban bemutatom a második fizikai mérések eredményeit. A 5.5. táblázatban látható a szántóföldi méréseken mért talaj nedvességtartalma és a kultivátor szerszám átlagos sebessége. Ezek az értékek határozták meg a DEM szimuláció bemeneti értékeit. A szerszámra ható átlagos vonóerő pedig meghatározta a vonóerő cél értékét, amire a GA konvergál. A szántóföldi mérésben mért felszínprofil a [felszínprofilok](#) linken keresztül lehet letölteni és megtekinteni.

5.5. táblázat. A fizikai méréshez tartozó alapadatok

Talaj nedvességtartalma [V/V%]	Átlagos Sebesség [km/h]	Átlagos vonóerő [N]
6.6	7.3	2200

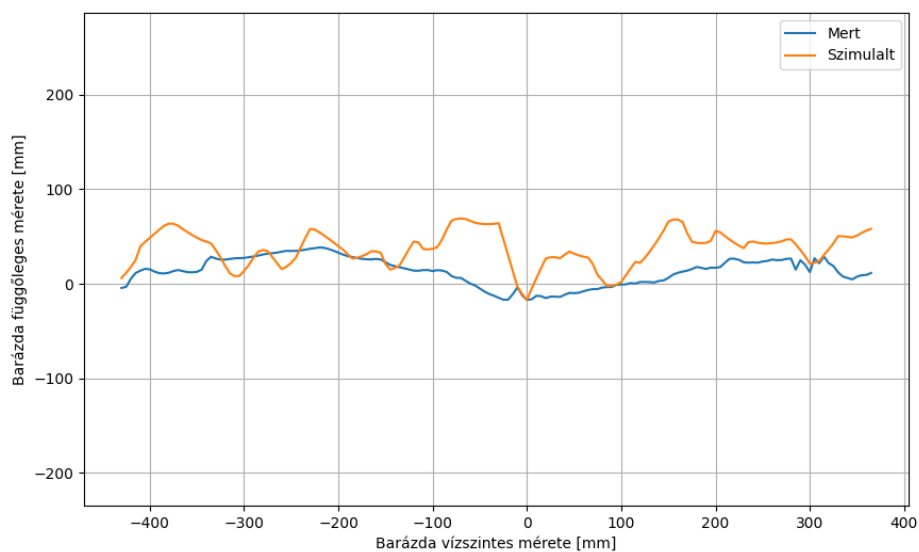


5.5. ábra. Szimulált eredmények. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 7.3km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.2.1. A legjobb eredmény második fizikai mérés alapján

5.6. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

fitness [-]	7.57
vonóerő [N]	2041
vonóerő relatív hibája [-]	0.078
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	25.94
koordinációs szám	8.04
Elemek közötti súrlódási szög [°]	28.50
Normálirányú kohézió [Pa]	362884
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.104
Clump paraméter [%]	0.92

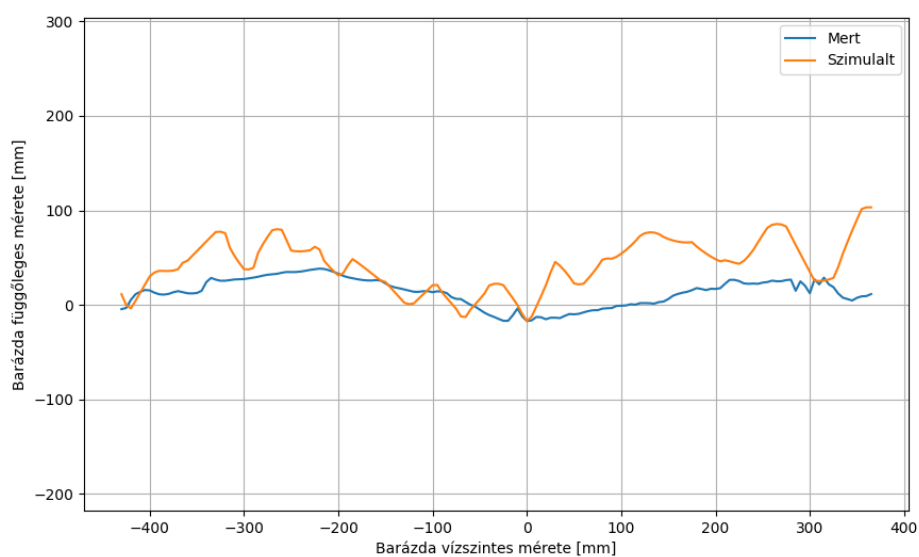


5.6. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 7.3km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.2.2. A második legjobb eredmény második fizikai mérés alapján

5.7. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

fitness [-]	7.39
vonóerő [N]	2074
vonóerő relatív hibája [-]	0.061
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	30.90
koordinációs szám	9.88
Elemek közötti súrlódási szög [°]	18.88
Normálirányú kohézió [Pa]	213720
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.384
Clump paraméter [%]	0.29

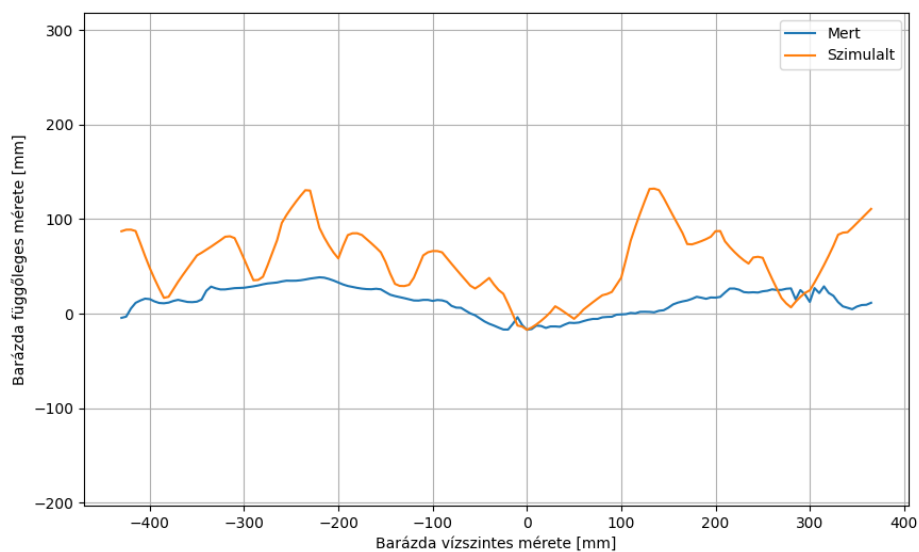


5.7. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 7.3km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.2.3. A harmadik legjobb eredmény második fizikai mérés alapján

5.8. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

fitness [-]	3.84
vonóerő [N]	1856
vonóerő relatív hibája [-]	0.185
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	43.64
koordinációs szám	8.09
Elemek közötti súrlódási szög [°]	31.64
Normálirányú kohézió [Pa]	348908
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.398
Clump paraméter [%]	0.92



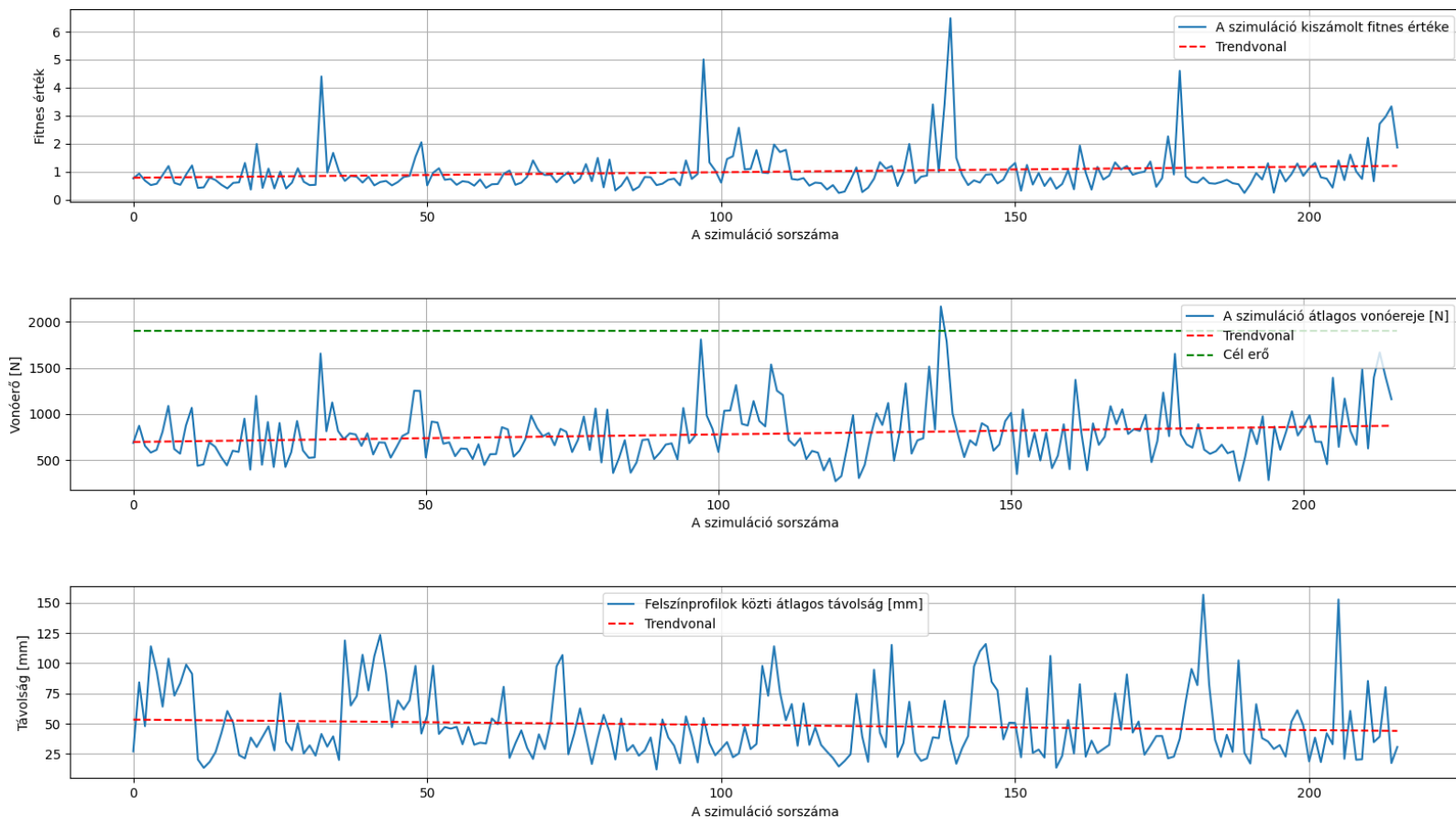
5.8. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 7.3km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.3. Szimulációs eredmények harmadik fizikai mérés alapján

Az alábbiakban bemutatom a harmadik fizikai mérések eredményeit. A 5.9. táblázatban látható a szántóföldi méréseken mért talaj nedvességtartalma és a kultivátor szerszám átlagos sebessége. Ezek az értékek határozták meg a DEM szimuláció bemeneti értékeit. A szerszámmra ható átlagos vonóerő pedig meghatározta a vonóerő cél értékét, amire a GA konvergál. A szántóföldi mérésben mért felszínprofilt a [felszínprofilok](#) linken keresztül lehet letölteni és megtekinteni.

5.9. táblázat. A fizikai méréshez tartozó alapadatok

Talaj nedvességtartalma [V/V%]	Átlagos Sebesség [km/h]	Átlagos vonóerő [N]
6.6	9.2	1900

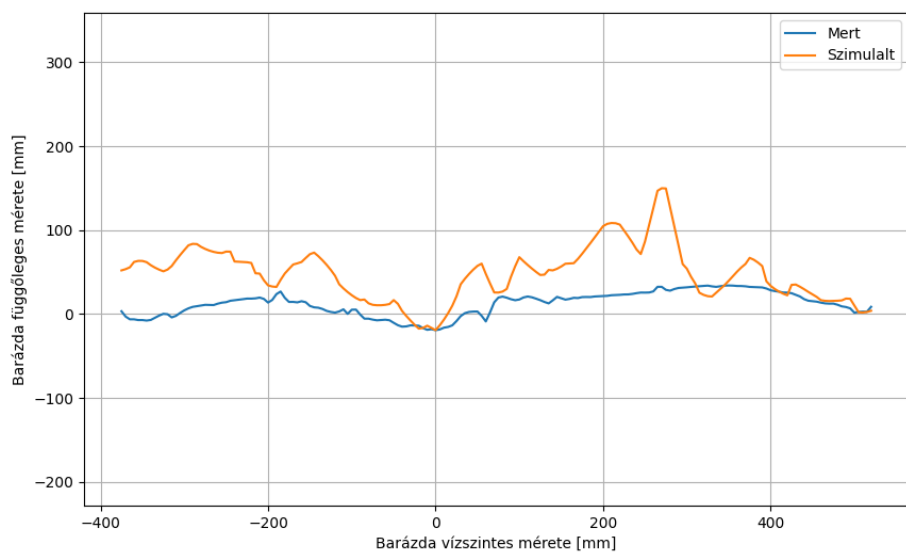


5.9. ábra. Szimulált eredmények. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 9.2km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.3.1. A legjobb eredmény harmadik fizikai mérés alapján

5.10. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

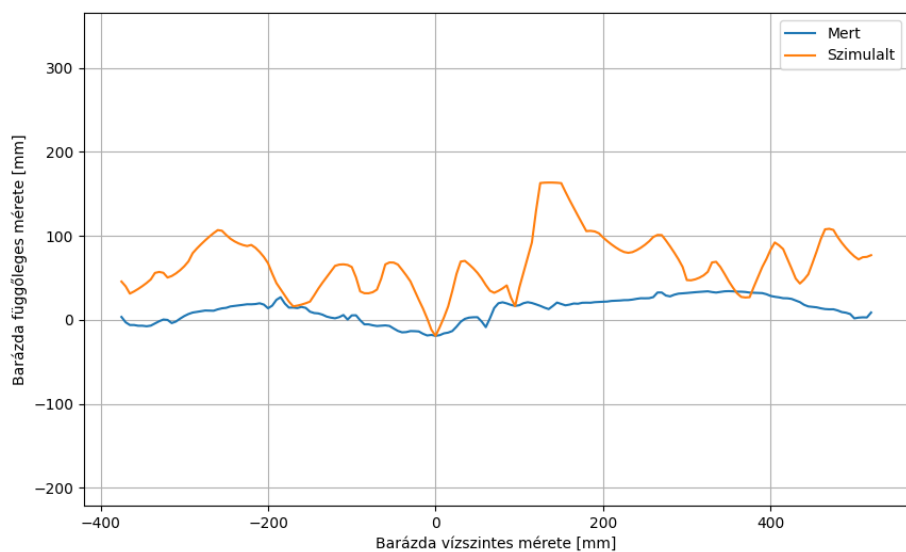
fitness [-]	6.48
vonóerő [N]	1787
vonóerő relatív hibája [-]	0.063
felületprofilok átlagos távolsága [mm]	36.63
koordinációs szám	18.12
Elemek közötti súrlódási szög [°]	34.10
Normálirányú kohézió [Pa]	390192
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.247
Clump paraméter [%]	3.07



5.10. ábra. Szimulált felületprofil összehasonlítása a fizikai felületprofillal. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 9.2km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.3.2. A második legjobb eredmény harmadik fizikai mérés alapján

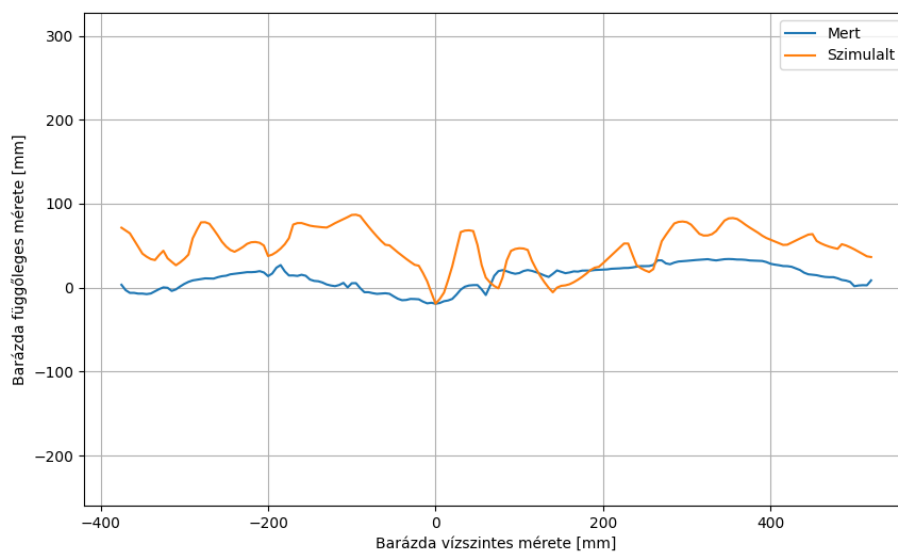
5.11. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek	
fitness [-]	5.01
vonóerő [N]	1808
vonóerő relatív hibája [-]	0.051
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	54.64
koordinációs szám	7.46
Elemek közötti súrlódási szög [°]	34.94
Normálirányú kohézió [Pa]	348645
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.089
Clump paraméter [%]	5.37



5.11. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 9.2km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.3.3. A harmadik legjobb eredmény harmadik fizikai mérés alapján

5.12. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek	
fitness [-]	4.60
vonóerő [N]	1653
vonóerő relatív hibája [-]	0.149
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	37.56
koordinációs szám	7.84
Elemek közötti súrlódási szög [°]	18.77
Normálirányú kohézió [Pa]	337684
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.225
Clump paraméter [%]	2.69



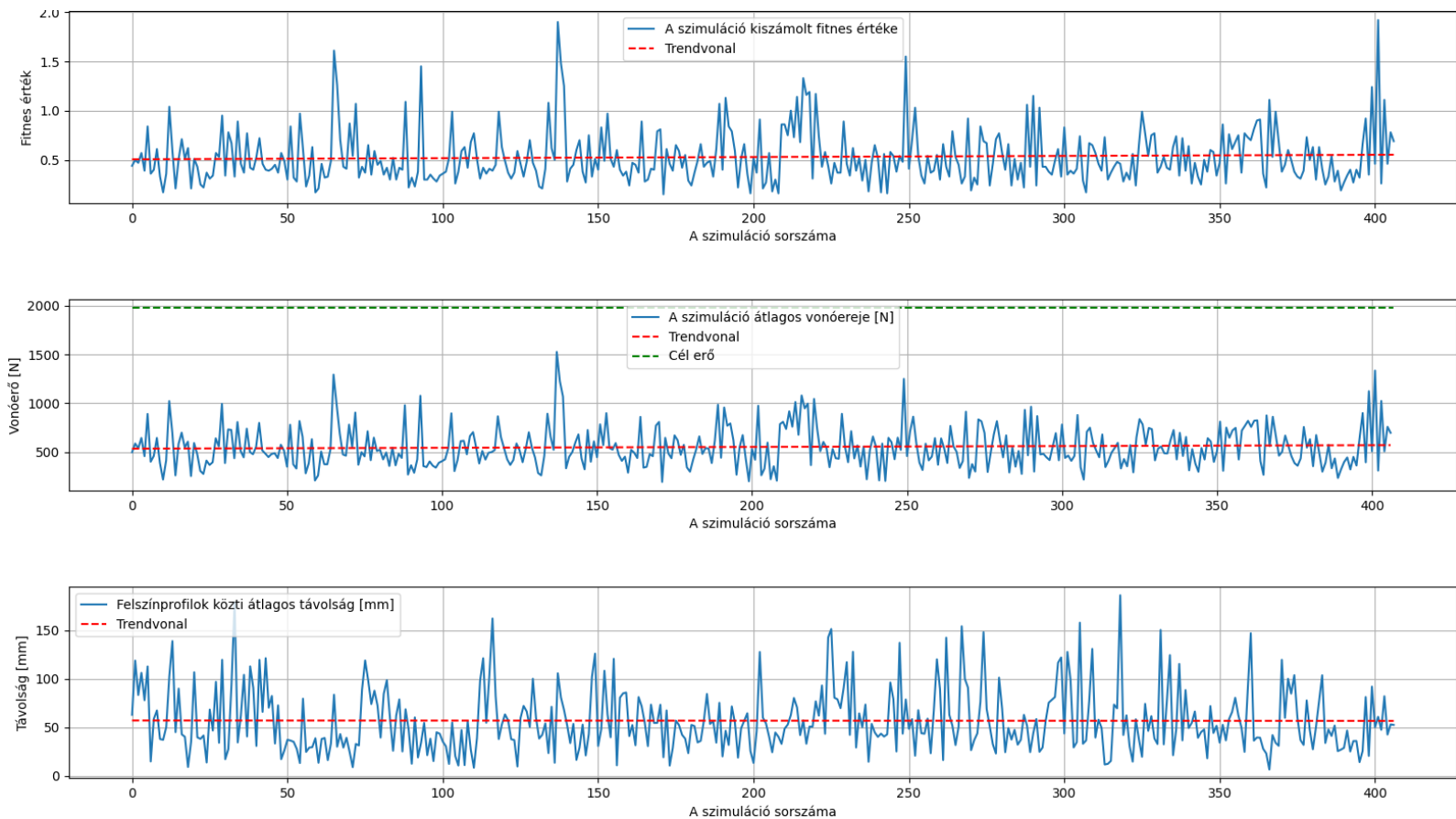
5.12. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 6.6 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 9.2km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.4. Szimulációs eredmények negyedik fizikai mérés alapján

Az alábbiakban bemutatom a negyedik fizikai mérések eredményeit. A 5.13. táblázatban látható a szántóföldi méréseken mért talaj nedvességtartalma és a kultivátor szerszám átlagos sebessége. Ezek az értékek határozták meg a DEM szimuláció bemeneti értékeit. A szerszámmra ható átlagos vonóerő pedig meghatározta a vonóerő cél értékét, amire a GA konvergál. A szántóföldi mérésben mért felszínprofil a [felszínprofilok](#) linken keresztül lehet letölteni és megtekinteni.

5.13. táblázat. A fizikai méréshez tartozó alapadatok

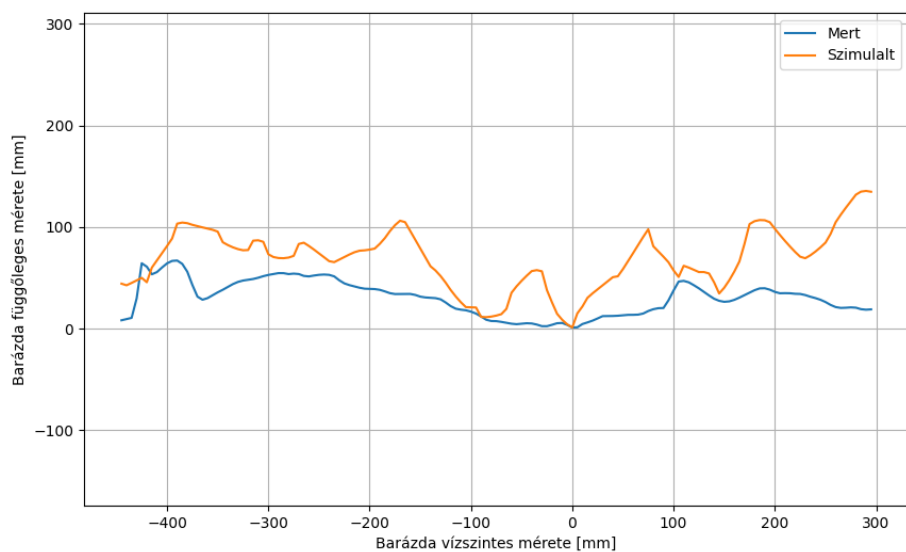
Talaj nedvességtartalma [V/V%]	Átlagos Sebesség [km/h]	Átlagos vonóerő [N]
13	5.8	1980



5.13. ábra. Szimulált eredmények. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 5.8km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.4.1. A legjobb eredmény negyedik fizikai mérés alapján

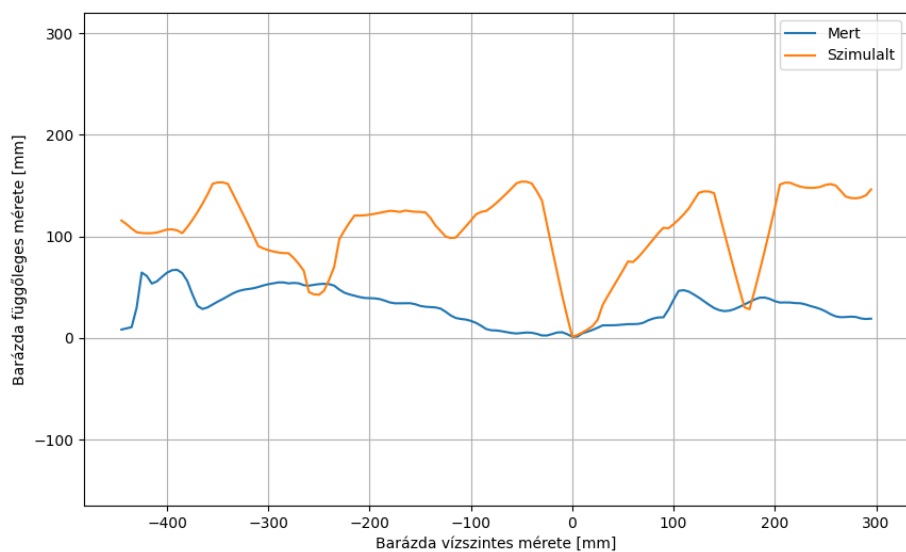
5.14. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek	
fitness [-]	1.92
vonóerő [N]	1335
vonóerő relatív hibája [-]	0.483
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	60.89
koordinációs szám	7.46
Elemek közötti súrlódási szög [°]	28.70
Normálirányú kohézió [Pa]	320512
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.127
Clump paraméter [%]	4.14



5.14. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 5.8km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.4.2. A második legjobb eredmény negyedik fizikai mérés alapján

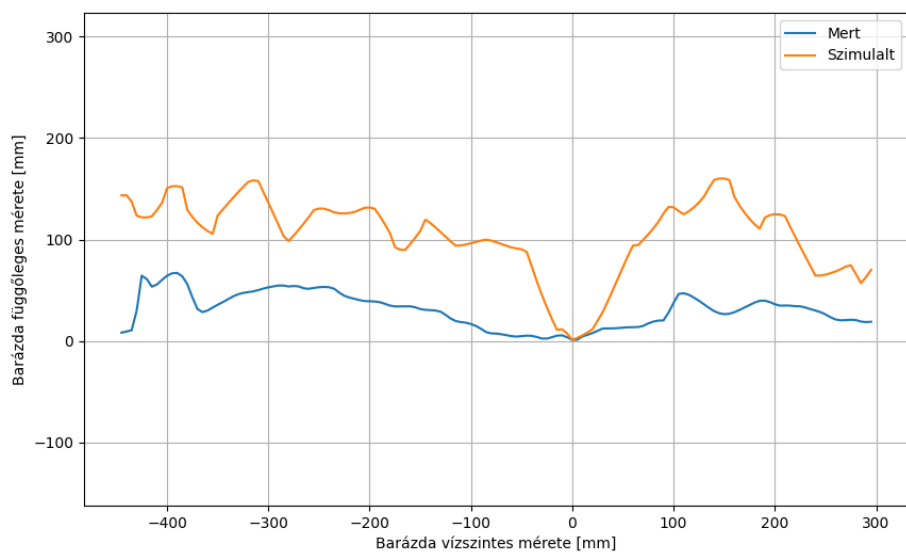
5.15. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek	
fitness [-]	1.90
vonóerő [N]	1527
vonóerő relatív hibája [-]	0.297
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	105.86
koordinációs szám	7.49
Elemek közötti súrlódási szög [°]	19.47
Normálirányú kohézió [Pa]	385723
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.287
Clump paraméter [%]	1.42



5.15. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 5.8km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.4.3. A harmadik legjobb eredmény negyedik fizikai mérés alapján

5.16. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek	
fitness [-]	1.61
vonóerő [N]	1294
vonóerő relatív hibája [-]	0.530
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	83.69
koordinációs szám	17.89
Elemek közötti súrlódási szög [°]	29.24
Normálirányú kohézió [Pa]	399564
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.126
Clump paraméter [%]	1.29



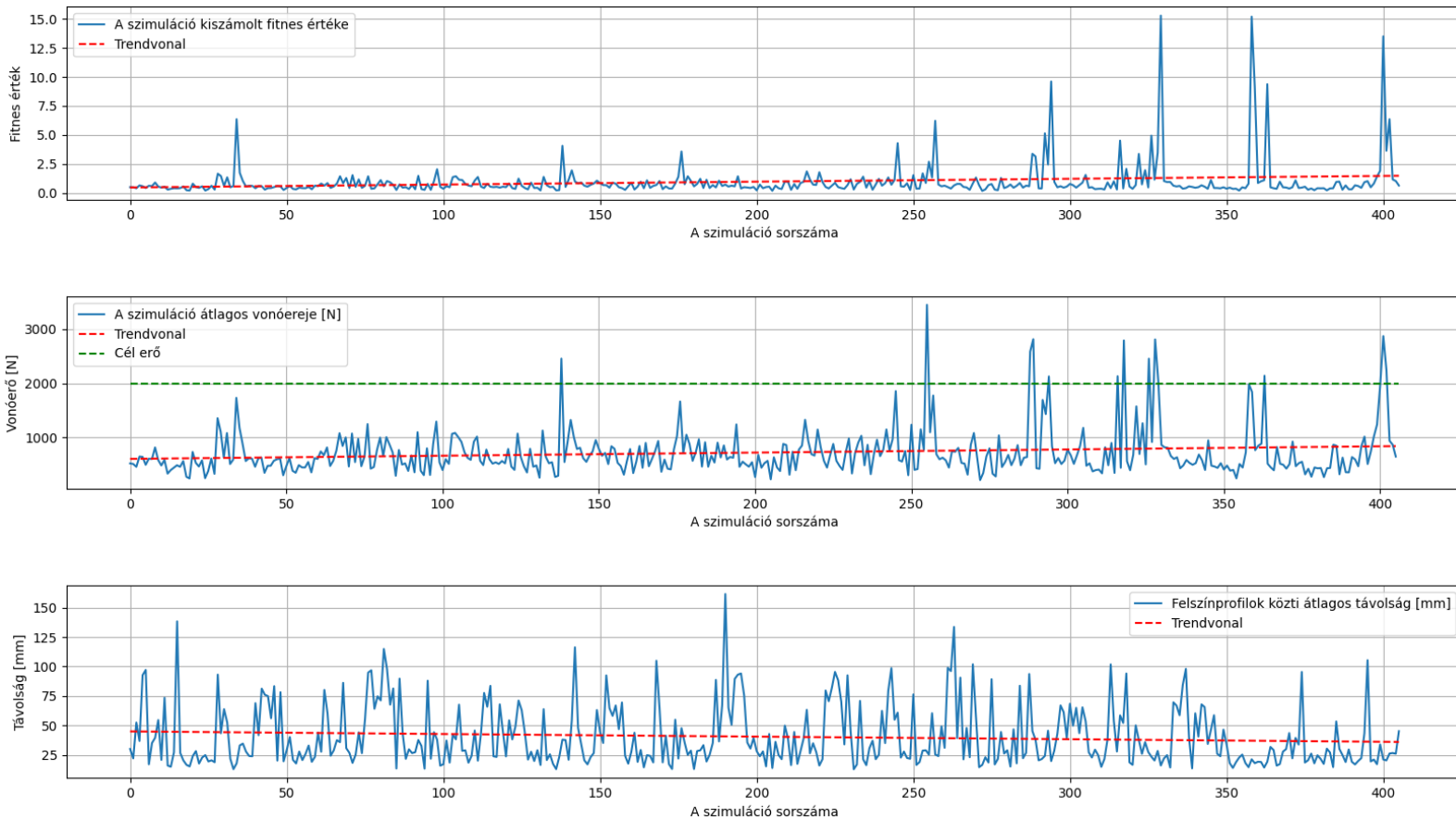
5.16. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 5.8km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.5. Szimulációs eredmények ötödik fizikai mérés alapján

Az alábbiakban bemutatom az ötödik fizikai mérések eredményeit. A 5.17. táblázatban látható a szántóföldi méréseken mért talaj nedvességtartalma és a kultivátor szerszám átlagos sebessége. Ezek az értékek határozták meg a DEM szimuláció bemeneti értékeit. A szerszámmra ható átlagos vonóerő pedig meghatározta a vonóerő cél értékét, amire a GA konvergál. A szántóföldi mérésben mért felszínprofilt a [felszínprofilok](#) linken keresztül lehet letölteni és megtekinteni.

5.17. táblázat. A fizikai méréshez tartozó alapadatok

Talaj nedvességtartalma [V/V%]	Átlagos Sebesség [km/h]	Átlagos vonóerő [N]
13	6.5	1990

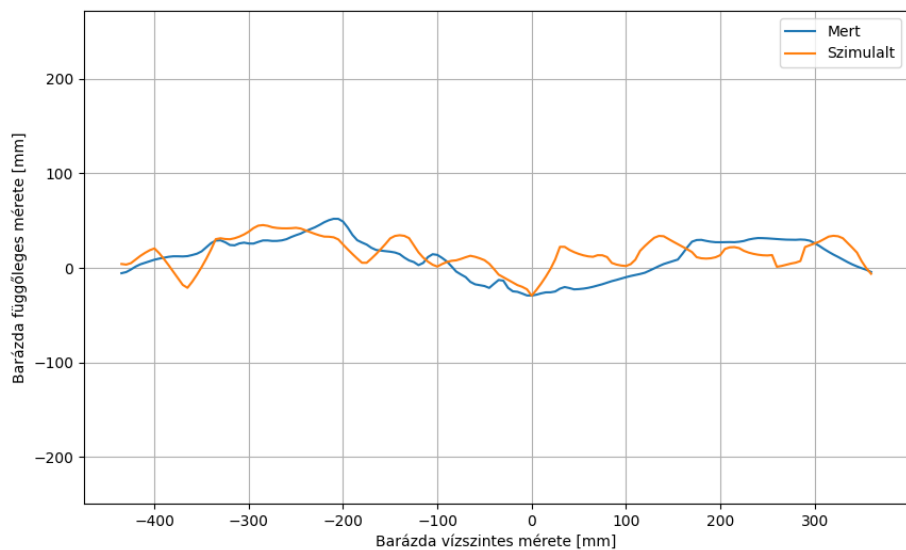


5.17. ábra. Szimulált eredmények. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 6.5km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.5.1. A legjobb eredmény ötödik fizikai mérés alapján

5.18. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

fitness [-]	15.30
vonóerő [N]	2041
vonóerő relatív hibája [-]	0.025
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	15.91
koordinációs szám	12.07
Elemek közötti súrlódási szög [°]	18.25
Normálirányú kohézió [Pa]	314973
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.226
Clump paraméter [%]	0.14

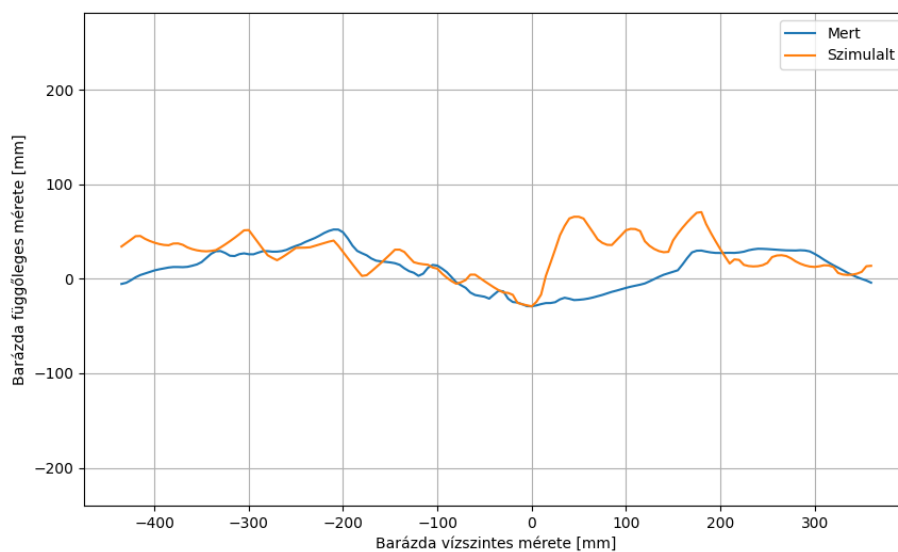


5.18. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 6.5km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.5.2. A második legjobb eredmény ötödik fizikai mérés alapján

5.19. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

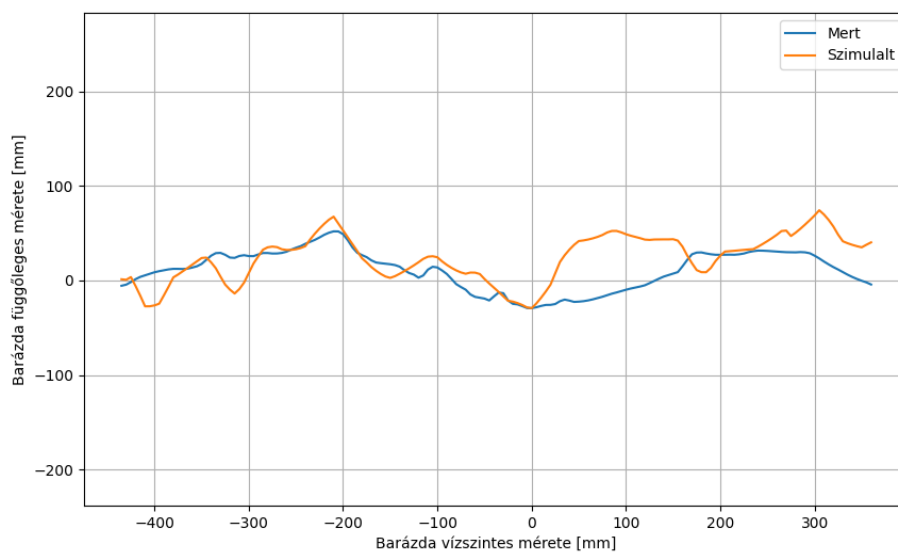
fitness [-]	15.21
vonóerő [N]	1983
vonóerő relatív hibája [-]	0.003
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	21.20
koordinációs szám	26.93
Elemek közötti súrlódási szög [°]	20.99
Normálirányú kohézió [Pa]	324915
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.365
Clump paraméter [%]	0.14



5.19. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 6.5km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.5.3. A harmadik legjobb eredmény ötödik fizikai mérés alapján

5.20. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek	
fitness [-]	13.51
vonóerő [N]	1959
vonóerő relatív hibája [-]	0.016
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	21.03
koordinációs szám	27.39
Elemek közötti súrlódási szög [°]	21.50
Normálirányú kohézió [Pa]	242287
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.20
Clump paraméter [%]	0.14



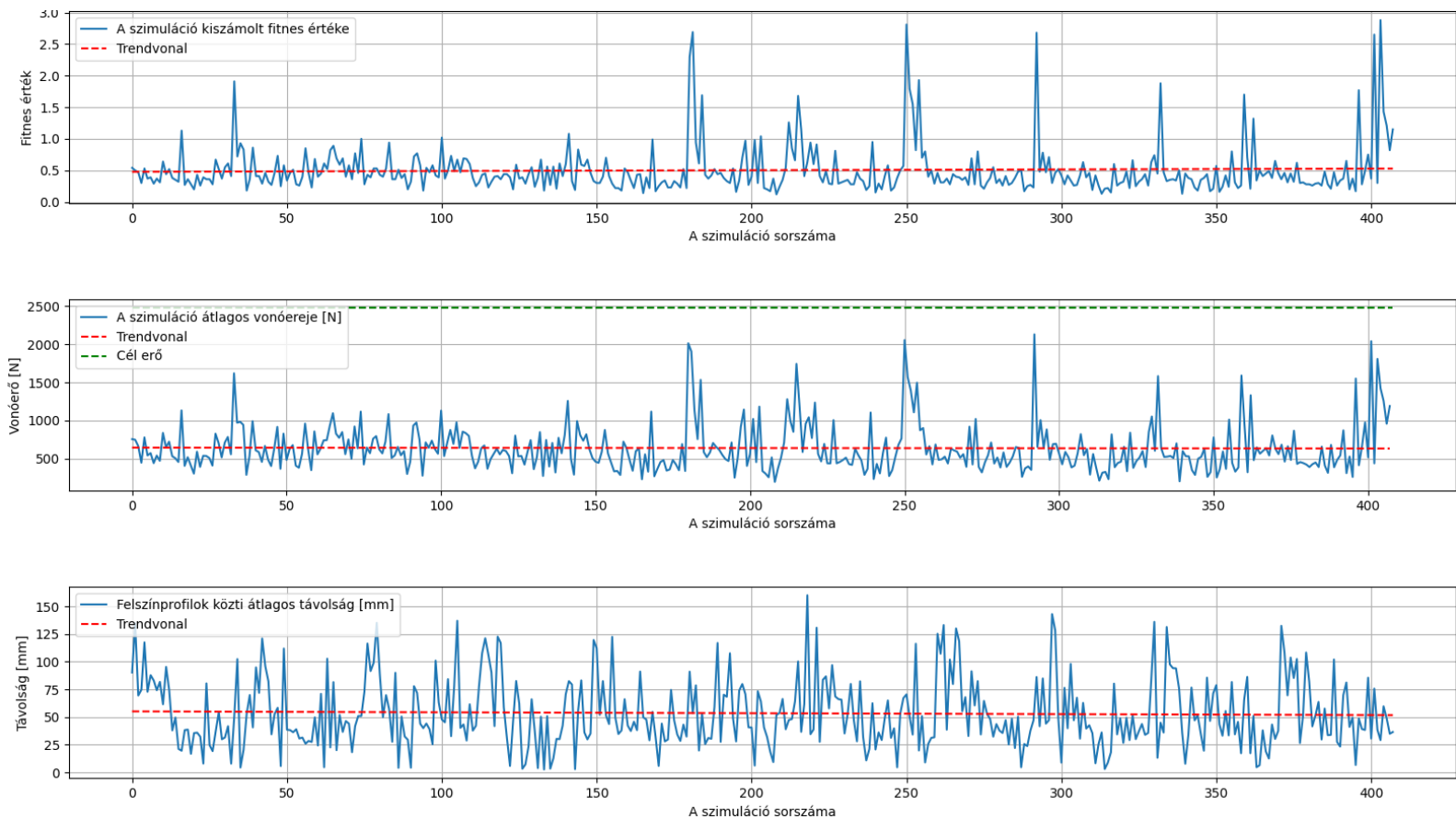
5.20. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 6.5km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.6. Szimulációs eredmények hatodik fizikai mérés alapján

Az alábbiakban bemutatom a hatodik fizikai mérések eredményeit. A 5.21. táblázatban látható a szántóföldi méréseken mért talaj nedvességtartalma és a kultivátor szerszám átlagos sebessége. Ezek az értékek határozták meg a DEM szimuláció bemeneti értékeit. A szerszámmra ható átlagos vonóerő pedig meghatározta a vonóerő cél értékét, amire a GA konvergál. A szántóföldi mérésben mért felszínprofilt a [felszínprofilok](#) linken keresztül lehet letölteni és megtekinteni.

5.21. táblázat. A fizikai méréshez tartozó alapadatok

Talaj nedvességtartalma [V/V%]	Átlagos Sebesség [km/h]	Átlagos vonóerő [N]
13	8.8	2477

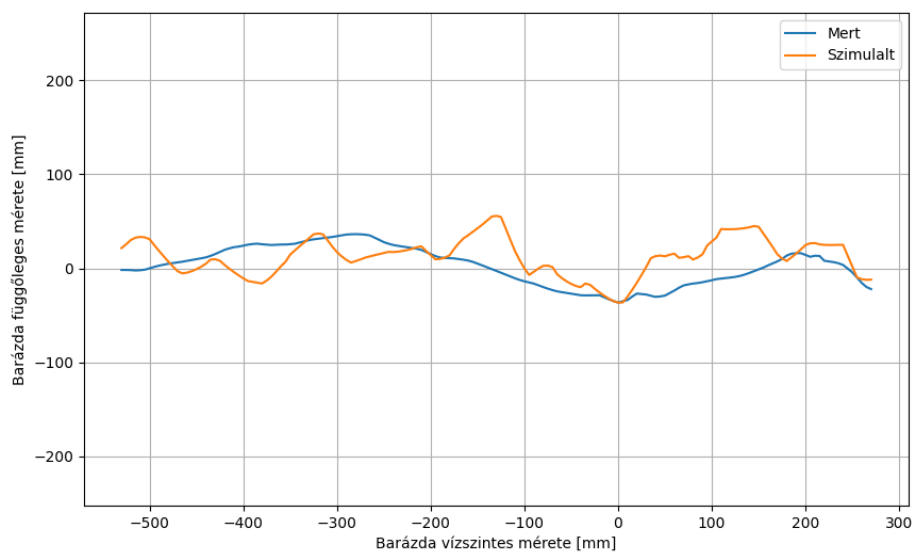


5.21. ábra. Szimulált eredmények. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 8.8km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.6.1. A legjobb eredmény hatodik fizikai mérés alapján

5.22. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

fitness [-]	2.88
vonóerő [N]	1807
vonóerő relatív hibája [-]	0.371
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	29.18
koordinációs szám	8.83
Elemek közötti súrlódási szög [°]	37.32
Normálirányú kohézió [Pa]	380540
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.204
Clump paraméter [%]	0.63

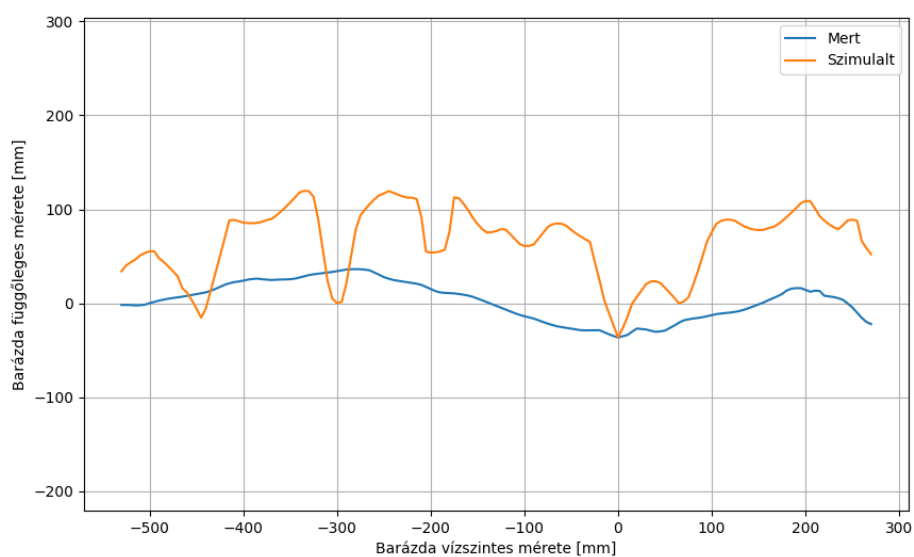


5.22. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 8.8km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.6.2. A második legjobb eredmény hatodik fizikai mérés alapján

5.23. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek

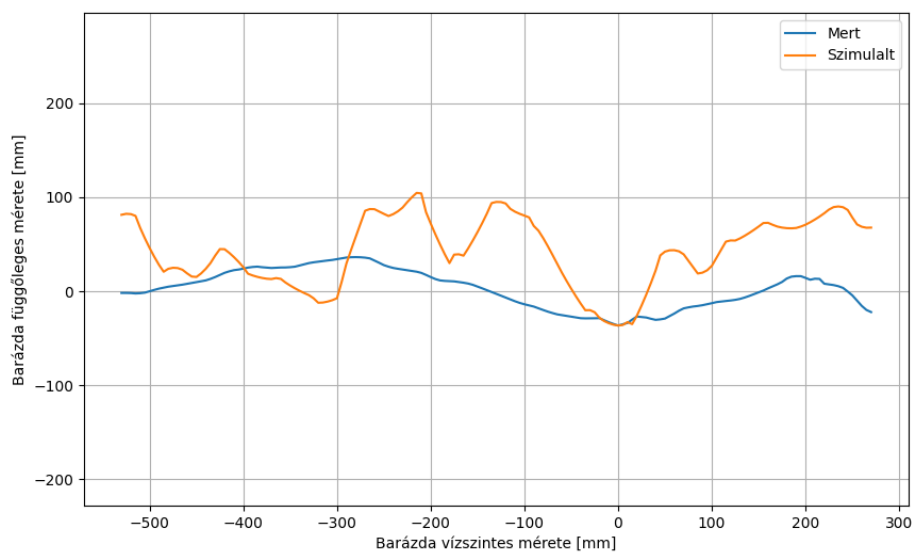
fitness [-]	2.81
vonóerő [N]	2054
vonóerő relatív hibája [-]	0.206
felzínprofilok átlagos távolsága [mm]	70.55
koordinációs szám	8.36
Elemek közötti súrlódási szög [°]	25.60
Normálirányú kohézió [Pa]	326372
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.193
Clump paraméter [%]	0.63



5.23. ábra. Szimulált felzínprofil összehasonlítása a fizikai felzínprofillal. 13 V/V%-os nedvességtasrtalmú talaj és 8.8km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

5.6.3. A harmadik legjobb eredmény hatodik fizikai mérés alapján

5.24. táblázat. Szimulációs eredmények és paraméterek	
fitness [-]	2.69
vonóerő [N]	1903
vonóerő relatív hibája [-]	0.301
felszínprofilok átlagos távolsága [mm]	53.65
koordinációs szám	8.77
Elemek közötti súrlódási szög [°]	25.40
Normálirányú kohézió [Pa]	382712
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.090
Clump paraméter [%]	0.63



5.24. ábra. Szimulált felszínprofil összehasonlítása a fizikai felszínprofillal. 13 V/V%-os nedvességtartalmú talaj és 8.8km/h sebességgel haladó közepes méretű kultivátor kapa esetén.

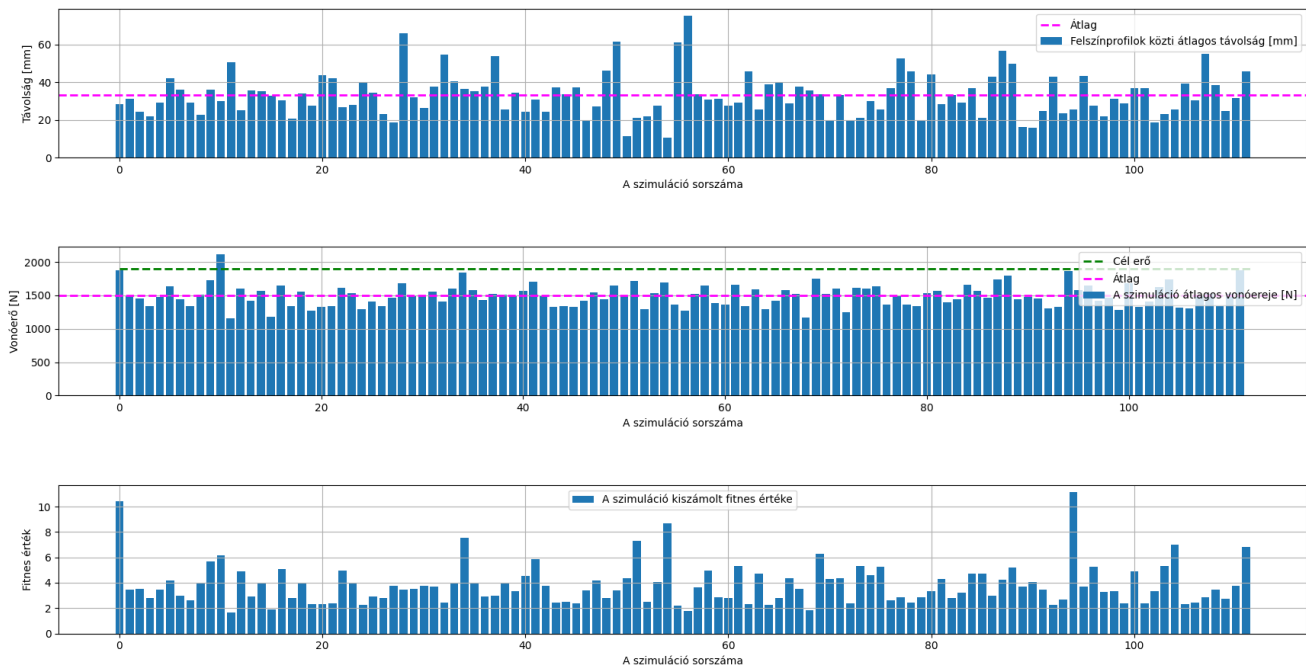
5.7. A talaj heterogenitásának modellben való leírhatóságának elemzése

Szabó és Wágner 2022-es TDK dolgozatában [13] rámutattak arra, hogy a Yade-DEM szimulációk során az azonos paraméterekkel futtatott szimulációk jellegre hasonlóak, de különböző eredményeket adnak.

Ezért fontosnak tartottam, hogy megnézzem az általam készített DEM szimulációban, mekkora lehet az eredmények szórása. Lefutattam 112 szimulációt ugyanazokkal a mikromechanikai paraméterekkel. (5.25. táblázat) (Ezek a kapcsolati paraméterek megegyeznek a harmadik fizikai mérés, harmadik legjobb megoldásával)

5.25. táblázat. Szimulációs paraméterek

Elemek közötti súrlódási szög [°]	18.77
Normálirányú kohézió [Pa]	337684
Elemek közötti gördülési és csavarási súrlódási tényező [-]	0.23
Clump paraméter [%]	2.69



5.25. ábra. A szórás eredményei

Több szimuláció azonos paraméterekkel történő futtatása során a szimulációkban mért átlagos vonóerő relatív hibájának korrigált tapasztalati szórása 13.64%, felszínprofil átlagos eltérésének korrigált tapasztalati szórása 11.41mm. A 5.26. táblázat összefoglalja az adatsor legfontasabb eredményeit.

5.26. táblázat. Szimulációs paraméterek

Felszínprofilok közti távolság átlaga	33.29
Felszínprofilok közti távolság minimumja	10.42
Felszínprofilok közti távolság maximumja	75.19
Felszínprofilok közti távolság szórása	11.41
Vonóerő átlaga	1499.30
Vonóerő minimumja	1157.26
Vonóerő maximumja	2119.20
Vonóerő szórása	166.75

Ezek az eredmények alátámasztják Szabó és Wágner állítását. A szimuláció eredményeiben ez a szórás közvetlen hatással van a GA működésére, ugyanis azonos bemeneti paramétereknél különböző fitness értéket kapunk, így a GA nehezebben kalibrál rá a fizikai mérésekre. A jelenség miatt érdemes minden GA által talált jó eredményét továbbvizsgálni. Továbbá lehetne azt is vizsgálni, hogy különböző kapcsolati paraméter kombinációk milyen hatással vannak a szórás eredményekre.

6. fejezet

Konklúzió

Jelen kutatásban egy szántóföldi mérést követően a mérésben vizsgált talaj-szerszám kapcsolat diszkrétételes modellje lett létrehozva a szerszám vontatási ellenállásának, illetve a talaj lazítás során létrejövő felszínprofil alakulásának alapján.

A kutatás legfőbb újdonsága, hogy Genetikus Algoritmus segítségével szántóföldi mérések makromechanikai anyagjellemzői alapján a modell talaj mikromechanikai paramétereit kalibráltuk automatikusan. A kutatásból a következő konklúziók vonhatók le:

1. A szántóföldi mérések el lettek végezve.
2. A szántóföldi mérések alapján olyan DEM szimulációs környezetet alakítottam ki, melyben vizsgálható a talaj-szerszám kölcsönhatása.
3. Hat fizikai mérési eredmény alapján beállítottam GA segítségével a talajmodelleket.
4. Egy fizikai mérést a talajmodell többféle mikromechanikai paraméter kombinációjával is le lehet írni.
5. Több szimuláció azonos paraméterekkel történő futtatása során a szimulációkban mért átlagos erő relatív hibájának korrigált tapasztalati szórása 13.64%, a szimulációkban mért felszínprofil átlagos eltérésének korrigált tapasztalati szórása 11.41 mm.
6. A felszínprofil legkisebb átlagos eltérése a fizikai és a szimulált talaj között 15.91 mm, míg a szerszámmra ható átlagerő relatív hibája a fizikai mérés és a szimuláció között 0.3%.
7. A kalibráció sebességét az ötszörösére gyorsítottam azzal, hogy lehetővé tettem, hogy a GA-ban egy generációban az egyedek párhuzamosan fussanak.

Ebben a kutatásban agyagos talajon, kétféle nedvességtartalommal végeztünk méréseket, illetve szimulációkat. Javasolt a jövőben más talajon és más nedvességtartalmú talajon kutatást végezni.

7. fejezet

Kitekintés

A jövőben érdemes vizsgálni a jó megoldásokat, többször azonos paraméterekkel lefuttatva.

A fizikai mérések során érdemes lenne a szerszám mögött hagyott barázda felületét 3D szkennelni. A szimulációkban pedig mátrix alakzatban elhelyezett gömbökkel vizsgálhatnánk a szerszám mögött kialakult barázda felületét, így pontosabb eredményekre juthatnánk a talaj felületének mozgása tekintetében. Csökkenthetnénk az elemek méretét a szimulációkban, ezzel a szemalak hatását jobban vizsgálhatnánk. Tesztelhetnénk további paraméterekkel generált clumpokat. A másik kettő kultivátor szerszámhoz tartozó 12 mérést is lehetne vizsgálni DEM-ben.

8. fejezet

Köszönetnyilvánítás

Szereném köszönetemet kifejezni mindenkinek, aki lehetővé tette azt, hogy már középiskolás éveim alatt részt vehessek ebben a kutatási tevékenységben:

A BME Gép- és Terméktervezés Tanszékről köszönöm Dr. Tamás Kornél Tanár úrnak, hogy megtanította a DEM alapjait és a rendszeres konzultációs segítséget. Emellett köszönettel tartozom Hudoba Zoltán Tanár Úrnak a BME Gép- és Terméktervezés Tanszékén a talajművelés tudományában nyújtott szakmai segítségéért, valamint bátyámnak, Szabó Bencének a szakmai támogatásért. Köszönöm a Győri SZC Jedlik Ányos Gépipari és Informatikai Technikum és Kollégium tanárainak az erős szakmai alapot a kutatások elkezdéséhez. Továbbá köszönöm a szüleimnek és nővéremnek, Csordás-Szabó Nettinek a további segítségeket.

A Kulturális és Innovációs és Minisztérium ÚNKP-23-5-BME-80 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

Irodalomjegyzék

- [1] J Arvidsson and T Keller. Comparing penetrometer and shear vane measurements with measured and predicted mouldboard plough draught in a range of swedish soils. *Soil and Tillage Research*, 111(2):219–223, 2011.
- [2] Z Asaf, D Rubinstein, and I Shmulevich. Evaluation of link-track performances using dem. *Journal of terra-mechanics*, 43(2):141–161, 2006.
- [3] James B Barr, Mustafa Ucgul, Jack MA Desbiolles, and John M Fielke. Simulating the effect of rake angle on narrow opener performance with the discrete element method. *Biosystems Engineering*, 171:1–15, 2018.
- [4] H Bentaher, A Ibrahmi, E Hamza, M Hbaieb, G Kantchev, A Maalej, and Walter Arnold. Finite element simulation of moldboard–soil interaction. *Soil and Tillage Research*, 134:11–16, 2013.
- [5] Elvis López Bravo, Engelbert Tijskens, Miguel Herrera Suárez, Omar Gonzalez Cueto, and Herman Ramon. Prediction model for non-inversion soil tillage implemented on discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 106:120–127, 2014.
- [6] Stephanie Forrest. Genetic algorithms. *A cm computing surveys (CSUR)*, 28(1):77–80, 1996.
- [7] Ahmed Fawzy Gad. Pygad: An intuitive genetic algorithm python library, 2021.
- [8] He Jin, Zhang Zhiqiang, Li Hongwen, and Wang Qingjie. Development of small/medium size no-till and minimum-till seeders in asia: A review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(4):1–12, 2014.
- [9] J Mak, Y Chen, and MA Sadek. Determining parameters of a discrete element model for soil–tool interaction. *Soil and Tillage Research*, 118:117–122, 2012.
- [10] M Javad Mohajeri, Huy Q Do, and Dingena L Schott. Dem calibration of cohesive material in the ring shear test by applying a genetic algorithm framework. *Advanced Powder Technology*, 31(5):1838–1850, 2020.
- [11] Dr. Tamás Kornél Oláh Zsófia, Rácz-Szabó Lilla. A talaj-kultivátorszerszám kölcsönhatás laboratóriumi vizsgálata és diszkrételemes szimulációja. 2017.
- [12] Christopher Saunders. Optimising the performance of shallow high-speed mouldboard ploughs. 2002.
- [13] Wágner Árpád Szabó Bence. Talaj-szerszám kölcsönhatás diszkrételemes modelljének fejlesztése mesterséges intelligencia alkalmazásával, 2022.
- [14] Kornel Tamas and Louis Bernon. Role of particle shape and plant roots in the discrete element model of soil–sweep interaction. *Biosystems Engineering*, 211:77–96, 2021.
- [15] Mustafa Ucgul and Chris Saunders. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*, 190:58–70, 2020.