



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

Automatikus módszerek feltárása diszkrét
elemes (DEM) talajmodellek és talajművelő
szerszám geometriájának optimalásához

TDK Dolgozat

Készítette
Szabó Bence

Konzulensek
Dr. Tamás Kornél
Horváth Dániel

2023. november

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Irodalomkutatás	4
2.1. A mezőgazdasági talajok talajmechanikai vizsgálatai	4
2.1.1. Penetrációs ellenállásmérés	4
2.1.2. Közvetlen nyírókísérlet nyíródobozban	4
2.2. A diszkrét elemes módszer	5
2.3. A talaj-szerszám kölcsönhatásának modellezhetősége	6
2.3.1. A digitális szerszámtervezési módszer elve és korlátai	6
2.3.2. Talaj-szerszám kölcsönhatás-vizsgálatok numerikus módszerekkel	6
2.4. A kultivátorszerszámokkal szemben támasztott követelmények	6
2.5. Talaj mozgásának mérése és modellezése	7
2.6. A genetikus algoritmusok alapvető működése	7
2.7. DEM modellek automatikus kalibrálása	9
2.8. A tudomány állása	10
3. Célok	10
4. Anyagok és módszerek I. - Talaj automatikus kalibrálása több fizikai mérés alapján	11
4.1. DEM szimulációs környezet felépítése	12
4.2. A genetikus algoritmus beállításai	12
5. Anyagok és módszerek II. - Automatikus szerszám-optimalizáció	17
5.1. DEM szimulációs környezet felépítése	17
5.2. Az automatikus szerszámtervezés folyamata	18
5.2.1. STL szerszámok felépítése	18
5.2.2. A genetikus algoritmus beállításai	19
5.2.3. A fitnessfüggvény	21
6. Eredmények	24
7. Konklúzió	28
8. Kitekintés	29

Rövidítésjegyzék

3D	Háromdimenziós
DEM	Discrete Element Method
CAD	Computer Aided Design
CFD-DEM	Computational Fluid Dynamics - Discrete Element Method
CP	Cone Penetration
FDM	Fused Deposition Modelling
FEM	Finite Element Method
GA	genetikus algoritmus
PyGAD	Python Genetic Algorithm
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
STL	Standard Tessellation Language

Jelölésjegyzék

T [N]	Nyíró irányú erő
τ [Pa]	Nyíró irányú feszültség
N [N]	Normál irányú erő
σ [Pa]	Normál irányú feszültség
A [m ²]	Keresztmetszet
η_{twist} [-]	Csavarási súrlódási együttható
η_{roll} [-]	Gördülési súrlódási együttható
σ_{coh} [Pa]	Normál irányú kohézió
τ_{coh} [Pa]	Nyíró irányú kohézió
ψ [rad]	Súrlódási szög
ρ [kg m ⁻³]	Szemcsesűrűség
R [m]	Elem sugara
E [Pa]	Rugalmassági modulus
k_n [N m ⁻¹]	Normál irányú rugómerevség
k_τ [N m ⁻¹]	Nyíró irányú rugómerevség
i	Futóindex
n	Számosság
CP [Pa]	Cone Penetration - Penetrációs ellenállás
$\bar{\delta}_{CP}$ [-]	Átlagos penetrációs ellenállás relatív hibája
$CP_{s,i}$ [Pa]	Szimulált penetrációs ellenállás
$CP_{m,i}$ [Pa]	Mért penetrációs ellenállás
f [-]	fitneszérték
$\bar{\delta}_\tau$	Átlagos nyírófeszültség ellenállás relatív hibája
h_t [m]	Talaj modellezett mélysége
h_w [m]	Modellezett talaj felső rétegvastagsága
h_{sz} [m]	Szerszám művelési mélysége
l_1 [m]	Modellezett talajvályú hossza
l_2 [m]	Modellezett talajvályúban történő mérési tartomány
b [m]	Modellezett talajvályú szélessége
A, B, C, D [m]	Generált szerszámgeometriát meghatározó pontok koordinátája
α [°]	Kultivátorszerszám ráillesztési szöge
β [°]	Kultivátorszerszám ráillesztési szöge
γ [°]	Kultivátorszerszám nyílásszöge
φ [°]	Kultivátorszerszám talpszöge
$\bar{F}_{v,xz}$ [N]	Szerszámra ható átlagos erő l_2 szakaszon
W_f [J m ⁻²]	Szerszám fajlagos munkája
$A_{sz,xz}$ [m ²]	Szerszám haladási irányába eső vetülete
C_V [-]	Térfogati fehér/barna arány
C_A [-]	Felületi fehér/barna arány
f_k [-]	Keveredés fitneszértéke
f_{C_V} [-]	Térfogati fehér/barna arány fitneszértéke
f_{C_A} [-]	Felületi fehér/barna arány fitneszértéke
f_{W_f} [-]	Szerszám fajlagos munkájának fitneszértéke
$> mc\%$	Gravimetrikus nedvességtartalom

1. Bevezetés

A talajművelés, mely során a talaj és egy talajművelő szerszám mechanikai kölcsönhatásba kerül, évszázadok óta a növénytermesztés fontos művelete. Ennek legfőbb célja, hogy a talajt olyan állapotba hozzuk, mely kedvezően hat a természetendő kultúrnövényeink fejlődésére, terméshozamára. A térségünkben aktuálisan kialakult energiaár- és élelmiszerár-növekedés, illetve a klímaváltozási és csapadékhiányos helyzet felhívja a figyelmet arra, hogy a talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatára és optimalizálására még nagyobb hangsúlyt kell fektetni. Ezen vizsgálatokban megérthetjük azokat a fizikai jelenségeket, melyek egy művelőszerszám tervezése során a talajművelő-szerszámmal szemben támasztott követelményeket részben meghatározzák. Korábbi kutatási eredmények arra mutatnak rá, hogy a művelőszerszám tervezett geometriája és a hozzá választott művelési paraméterek (például talajművelési sebesség, szerszámmélység) jelentősen befolyásolják a talajművelés eredményét. Optimális tervezés eredményeként csökkenthető a talajműveléshez szükséges energia és művelés közben az üvegházhatású gázok kibocsájtása. Növelhető a talaj művelés utáni vízmegtartó képessége. Valamint olyan talajállapot kialakítását segíti, mely kedvezően befolyásolja a kultúrnövények fejlődését.

Ezen okok miatt talajművelő szerszám és a talaj kölcsönhatásának vizsgálata napjainkban is intenzíven kutatott terület. A szakirodalomból kiderül, hogy a kutatók fizikai mérések (terepi, vagy laboratóriumi), valamint numerikus szimulációs eredmények alapján vonják le következtetéseiket. A fizikai mérések legnagyobb kihívásait, a tesztelendő szerszámgeometriák legyártása és azok különböző talajtípusokban történő tesztelése okozza. A numerikus szimulációk során pedig a legnagyobb feladatot a különböző talajmodellek kalibrálása jelenti. A talajmodell kalibrálása ugyanis ugyancsak fizikai mérések eredményei alapján lehetséges.

A talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatában a művelő szerszámra ható átlagos vontatási ellenállás mellett a művelés során a talaj mozgása és a kialakuló talajállapot is egy, a kölcsönhatást jellemző jelenség. A kialakuló talajmozgásokra vonatkozóan azonban jelenleg egyszerűbb a művelést követően kialakult talajállapot alapján lehet levonni a következtetéseket. A belső talajmozgásokra ugyanis nincsen rálátásunk a művelés közben.

A különböző művelőszerszámokra ható átlagos vontatási ellenállás kiszámítására már rendelkezésre állnak a tervezési gyakorlatban alkalmazható analitikus, empirikus és numerikus módszerek. A talaj mozgásának modellezése nagyobb kihívást jelent a kutatóknak. Egy lehetséges numerikus módszer a talaj mozgásának modellezésére a diszkrét elemes módszer (DEM).

2. Irodalomkutatás

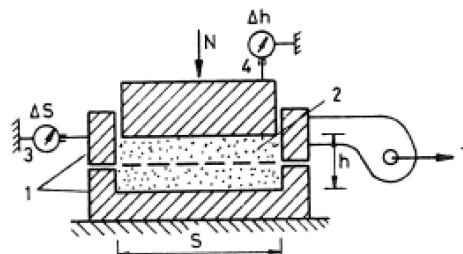
2.1. A mezőgazdasági talajok talajmechanikai vizsgálatai

2.1.1. Penetrációs ellenállásmérés

A talaj ellenállásának vizsgálatára egy elterjedt szabványos módszer a talaj penetrációs ellenállásának mérése. Az elterjedt függőleges irányú penetrációs ellenállásmérést a NEN 5140: 1996 szabvány írja elő. A mérés során függőleges irányban, szabványos geometriájú kúpos szárral hatolunk a talajba, miközben mérésre kerül a kúpra ható erő nagysága. A mért erő és a kúp mozgás irányú vetületi keresztmetszetének (szabványos esetben 2 cm^2 , 3.33 cm^2 , 5 cm^2 60° -os teljes kúpszöggel) a hányadosa adja a cone (kúp) indexet (CI). A CI alkalmas a talajtömörtség jellemzésére a vizsgált terület meghatározott pontjaiban a behatolási mélység függvényében. A mérési eredmények alapján következtethetünk a talaj tömörödöttségére. A talaj penetrációs ellenállása szántóföldi és laboratóriumi körülmények között is vizsgálható. A vizsgálat során kevesebb, mint 2 cm s^{-1} sebességgel kell a talajba hatolni.

2.1.2. Közvetlen nyírókísérlet nyíródobozban

A talajok nyírószilárdsága meghatározható közvetlen nyírókísérlet során [6]. Ez a legegyszerűbb eljárások egyike a talajok mechanikai vizsgálatában. A mérések elvégzéséhez egy nyíródoboz szükséges (2.1. ábra), mely egy alsó és egy felső egymásra helyezett keretből áll. Ezek egymáshoz képest vízszintesen elmozdíthatók.



2.1. ábra. A közvetlen nyírókísérlet eszköze [6].

A kereteket egymásra helyezik, majd talajjal megtöltik. A két keretfél úgy mozdul el egymáshoz képest, hogy a bennük lévő talajmintát felülről mérésenként különböző mértékű normál irányú erővel (N) megterhelik. A kísérleti eszköz szemcsés és kötött talajok vizsgálatára egyaránt alkalmas. A vizsgálat során mérjük a vízszintes nyíróerőt (T). A nyírt keresztmetszet alapján kiszámítható a nyírófeszültség.

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (2.1)$$

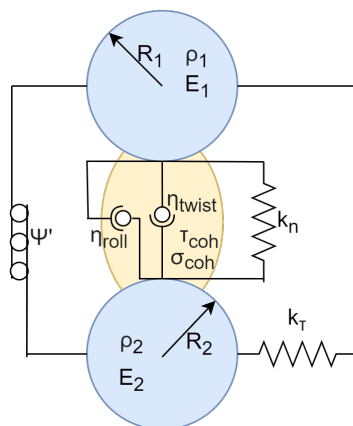
Egyetlen vizsgálat eredménye a nyírógörbe, melyen ábrázolva van az elmozdulás függvényében a mért nyíróerő (vagy nyírófeszültség). Ugyanazon mintát több különböző normál irányú terhelés mellett is szokás vizsgálni. A normál irányú erő (N) ismeretében számítható a halmazban a normál irányú feszültség is.

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2.2)$$

Egy mérési sorozat után ábrázolhatók egy diagramon belül a normálfeszültségek függvényében a maximális nyírófeszültségek. A pontokra illesztett egyenes meredeksége meghatározza a halmaz belső súrlódását, y tengelymetszete pedig a halmaz kohézióját.

2.2. A diszkrét elemes módszer

A diszkrét elemes módszer (DEM) egy szemcsés anyagok modellezésére alkalmas numerikus szimulációs módszer [4, 27, 1]. A talaj modellezhető szemcsés anyagként, így gyakran modellezik a talaj-szerszám kölcsönhatását is ezen módszer segítségével [32, 32, 35, 10, 21, 38, 36]. A módszer alkalmazása során az egyik legnagyobb kihívást a szemcsés anyag kalibrációja jelenti. Ezen folyamat során az a cél, hogy mikromechanikai jellemzőkkel definiált szemcsés anyagmodell (2.2. ábra) makromechanikai tulajdonságai minél jobban megközelítsék a fizikai mérések során meghatározott valós anyag makromechanikai tulajdonságait.



2.2. ábra. Két diszkrét szemcse közötti kapcsolati modell. Az ábrán fel vannak tüntetve a modellt alkotó mikromechanikai jellemzők (kapcsolati paraméterek) kohéziós-súrlódásos anyagmodell esetén. η_{twist} [-]: Csavarási súrlódási együttható, η_{roll} [-]: Gördülési súrlódási együttható, σ_{coh} [Pa]: Normál irányú kohézió, τ_{coh} [Pa]: Nyíró irányú kohézió, ψ [rad]: Súrlódási szög, ρ [kg m⁻³]: Szemcsesűrűség, R [m]: Elem sugara, E [Pa]: Rugalmassági modulus, k_n [N m⁻¹]: Normál irányú rugómerevség, k_τ [N m⁻¹]: Nyíró irányú rugómerevség.

A talaj anyagának kalibrálása korábban többnyire egy körülményes, lassú és empirikus folyamat volt, az aktuális kutatások azonban egyre inkább előtérbe helyezik a DEM modellek tanuló algoritmusokkal történő automatikus kalibrációját [17]. A DEM-ben ugyanis az anyag kalibrálása fizikai mérések (például nyíróvizsgálat, penetrációs vizsgálat) során meghatározott makromechanikai jellemzők (például nyírószilárdság, penetrációs ellenállás, elemek közötti súrlódási szög, látszólagos kohézió) alapján történik. DEM-ben a szemcsés anyag kalibrálása azonban csupán két elem között fellépő mikromechanikai jellemzők definiálásával lehetséges. Ezek csak a modellben léteznek, így nem mérhetők közvetlenül fizikai mérések során. A mikromechanikai jellemzőket a DEM-ben kapcsolati paramétereknek is nevezzük.

Talaj-szerszám kölcsönhatás során mért fizikai jellemzők alapján is lehetséges a talajmodell kalibrálása DEM-ben [32, 32, 26], például kultivátorszerszámra ható talajellenállás vagy kialakult felszíngeometria alapján. Pontosabb talajmodell kapható azonban, ha egyszerre több makromechanikai jellemzőre alapozva kalibráljuk a talajt. Kutatók további makromechanikai jellemzőket határoznak meg mérésekkel és igyekeznek minél több makromechanikai jellemzőt egyazon talajmodellel megközelíteni a minél pontosabb DEM talajmodell létrehozásához.

2.3. A talaj-szerszám kölcsönhatásának modellezhetősége

2.3.1. A digitális szerszámtervezési módszer elve és korlátai

A szerszám-geometria, valamint a talajművelési peremfeltételek a szimulációk során széles körben parametrizálhatók. Amennyiben a szimulációkhoz szélesebb körben rendelkezésre áll kalibrált talajmodell, belátható, hogy gyorsabb és költséghatékonyabb megoldást nyújthatnak a numerikus szimulációs módszerek a szerszám-geometria és művelési paraméterek optimalizálási feladatai során. Az optimalizálási feladatok pedig automatizálhatók (például genetikus algoritmus alkalmazásával). Jelenleg ez még távolabbi cél, ugyanis nem állnak nagy mennyiségben rendelkezésünkre a szimulációkhoz azonos módszerekkel kalibrált, széles körben elérhető talajmodellek (talajmodell-adatbázis). Problémát jelent az is, hogy a kalibrált talajmodellek nem modellezik a valós talaj fizikai jellemzőit egyszerre azonos pontossággal [32]. Például míg a talajban húzott szerszámra ható vontatási ellenállás egészen nagy pontossággal megközelíthető numerikus szimulációkban, nagyon kevés kutatásban számszerűsítik, hogy művelés közben a szimulált talajmodell mozgása mennyire egyezik a valós talaj mozgásaival [10, 21, 38]. A hozzárendelés ugyanis nem egyértelmű [16], például különböző paraméterkombinációkkal is modellezhető szimulációkban ugyanaz a vontatási ellenállás, különböző talajmozgások mellett.

2.3.2. Talaj-szerszám kölcsönhatás-vizsgálatok numerikus módszerekkel

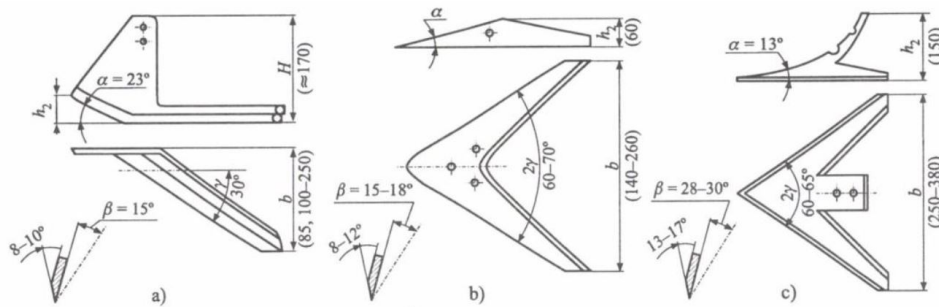
A talaj-szerszám kölcsönhatása fizikai mérésekkel [2] és numerikus szimulációkkal [19] is vizsgálhatók. Ilyen numerikus módszerek a finite element method (FEM)[5] a discrete element method (DEM) [33, 34] az smoothed particle hydrodynamics (SPH) [13, 37] és a computational fluid dynamics (CFD) [15]. Problémát okoz a fizikai vizsgálatok során, hogy csak korlátozott rálátásunk van a talaj belső rétegeinek mozgására és az eredmények többnyire kvalitatíven értékelhetők. Ez nehezíti a művelésben megmozgatott talaj-tömeg eloszlásának becslését, mely összefüggésben áll a műveléshez szükséges energiával is. Numerikus szimulációkban különböző pontossággal, de kvantitatív módon írható le a kölcsönhatás közben a modellezett talaj mozgása. A numerikus talajmodelleket viszont fizikai mérések során meghatározott, talajt jellemző makromechanikai tulajdonságok alapján kell kalibrálni.

2.4. A kultivátorszerszámokkal szemben támasztott követelmények

A kultivátorozás a talajművelés egyik fontos művelete [24]. Szerszáma a kultivátor, melyek feladata, hogy lazítsák, porhanyítsák és kis mértékben keverjék a talajt (például belekeverjék a talajba a talajfelszínre szórt műtrágyát), alakítsák a felszínt és mechanikai módon irtsák a gyomot. Fontos továbbá, hogy a művelés utáni felszín ormossága,

barázdáltsága kicsi legyen. A szerszámokra vonatkozó alapkövetelmény, hogy a sorközi művelésnél ne szórják be földdel a kultúrnövényt, eltömődésmentes legyen a munkavégzés és minimális legyen a gyomgyűjtő hatás.

Feladattól függően különböző kultivátorgeometriákat alkalmaznak. Például saraboló és gyomirtó szerszámokat, lazítószerszámokat, töltőgető és barázdahúzó szerszámokat. A sarabolószerszámok feladata a gyomirtás, lazítás. Ezen munkájukat egyidejű, kismértékű keveréssel végzik. Változataik láthatóak a 2.3. ábrán: az egyoldalas vagy L alakú, a kétoldalas vagy lúdtalp alakú, illetve a nyíl alakú kapák.



2.3. ábra. Kultivátorszerszámok: a) L alakú, b) nyíl alakú, c) lúdtalp alakú. Az ábrán lévő szögek jelentései: α : ráillesztési szög, β : lazítószög, γ : nyílásszög. [24]

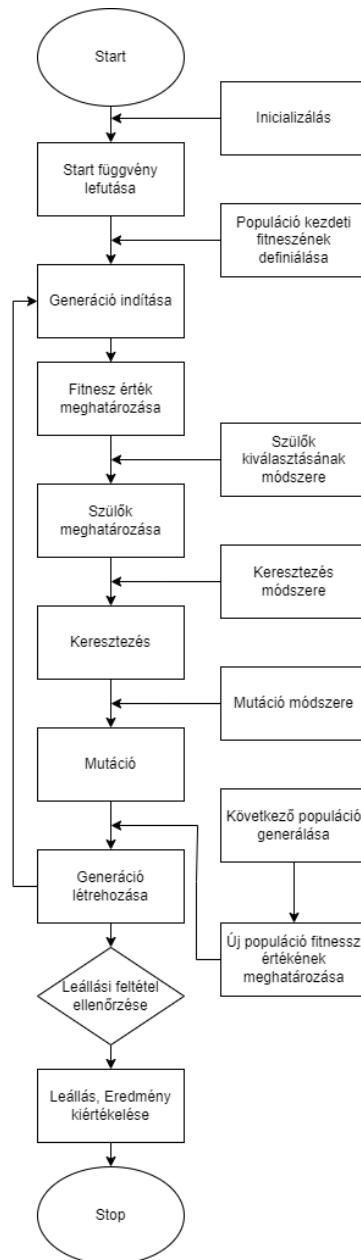
2.5. Talaj mozgásának mérése és modellezése

A szakirodalomból kiderül, hogy fizikai mérések során a talaj mozgását különböző módszerekkel vizsgálták a talaj-szerszám kölcsönhatásában. Ezen módszerek négy fő csoportba sorolhatók. Megkülönböztethetők statikus [25, 8, 39] és dinamikus [20] mérések, továbbá a talaj kialakult felszínét vizsgáló [8, 39, 35], valamint nyomjelzős illetve nyomkövetős vizsgálati módszerek [25, 20, 10, 21, 30]. Statikus mérésnek hivatkozunk a továbbiakban arra, amikor a talaj-szerszám kölcsönhatása előtti talajszerkezetet a kölcsönhatás után kialakult talajszerkezettel hasonlítják össze. Dinamikus vizsgálatnak nevezzük, amikor a talaj-szerszám kölcsönhatás közben az idő függvényében vizsgáljuk a talaj mozgását. A talaj felszínének vizsgálata során általában valamilyen mechanikus [35] vagy digitális [8, 39] elvű szkennelési módszert alkalmaznak. Nyomjelzős vagy nyomkövetős vizsgálatok során pedig a talaj felszínére, [39, 20, 18, 38] vagy a talajba [25, 10, 30, 22, 31] helyezett passzív vagy aktív testek mozgásai alapján vonják le a következtetéseket a talaj mozgására vonatkozóan. Nyomjelző lehet bármilyen merev test (például tömör alumíniumkocka), nyomkövető alatt pedig valamilyen szenzorral felszerelt testet értünk.

2.6. A genetikus algoritmusok alapvető működése

A genetikus algoritmus egy keresési technika [3]. Segítségével lehetőség van egy ismeretlen keresési térben lévő optimum megtalálására. A genetikus algoritmus működése - ahogy azt a neve is sugallja - az evolúcióbiológia működésének alapjaira épít. A genetikus algoritmusok működése különböző lehet, de vannak közös elemek és fogalmak, melyek

az alapvető működéshez szükségesek. A következő fogalmakat kell ismerni a genetikus algoritmusok alapvető működésének megismeréséhez:



2.4. ábra. A PyGAD algoritmusának folyamatábrája. [9]

Gén: A gének azok a paraméterek, melyek kombinációi alkotnak egy egyedet. A cél az optimalizálási folyamat során megtalálni azt a génkombinációt, mely a (fitneszfüggvény szerinti) legjobban teljesítő egyedet alkotja. Az eredmény tehát egy génkombináció.

Egyed: Egy egyed meghatároz egy génkombináció.

Populáció: Az egyedek összessége egy generációban (iterációban) az adott generációhoz tartozó populáció.

Generáció: Az egyedeket generációnként vizsgáljuk és értékeljük. Ez egy iterációnak felel meg az algoritmus működésében.

fitneszfüggvény: Az a függvény, mely képes jellemezni egy adott egyed teljesítőképességét az eredményei alapján.

fitneszérték: A fitneszfüggvény visszatérési értéke. Minél magasabb ez az érték, annál jobban teljesítő egyedet vizsgáltunk meg.

Szülők: Kiemelkedőbb fitneszértékkel rendelkező egyedek, melyek génjeit továbbörökítjük a következő generációban.

Mutáció: Újabb generáció elején a mutációs művelet során a jól teljesítő egyedek génjeit bizonyos mértékben változtatjuk.

Keresztezés: Újabb generáció elején a szülők génjeit kombinálva újabb egyedeket készítünk.

Inicializálás: Meghatározzuk az első generáció egyedeit génjeikkel. Sokszor véletlenszerű az inicializálás, hogy a keresési térben a gének egyenletesen legyenek elosztva.

Leállás: Addig futtatjuk az algoritmust, míg egy leállási feltétel nem teljesül. A leállás oka gyakran egy adott generációs szám elérése, vagy a kismértékű fitness növekmény.

A PyGAD egy kész genetikus algoritmus Python környezethez, mely alkalmazható különféle optimalizálási feladatok elvégzéséhez [9]. A dokumentációjában megtalálható folyamatábrát mutatja be a 2.4. ábra.

2.7. DEM modellek automatikus kalibrálása

Do és szerzőtársai [7] (2017) felismerték, hogy a gyakorlatban az empirikus módszerekkel történő manuális szemcsés anyag kalibráció nem alkalmazható nagy hatékonysággal. DEM modellek automatikus kalibrálására két különböző módszert mutatnak be. Az egyik módszer a genetikus algoritmus, a másik pedig a DIRECT optimalizálás [14]. A módszerük lényege, hogy DEM szimulációkban algoritmikusan mikromechanikai kapcsolati paraméterkombinációkat alkotnak (például algoritmussal változtatják az elemek közötti gördülési és a csavarási súrlódási együtthatót). Majd egy szimuláció lefuttatása után meghatározzák a megadott kapcsolati paraméterkombinációval, hogy milyen makromechanikai jellemzőkkel rendelkezik az ily módon beállított szemcsés anyag. Előre számszerűsítve definiálják milyen makromechanikai jellemzőt szeretnének elérni és addig ismétlik a paraméterek újragenerálását, amíg a megfelelő makromechanikai jellemzőt kellő pontossággal meg nem közelíti a modellezett anyaggal. Egy úgynevezett fitneszfüggvény határozza meg, mekkora az eltérés a cél és a szimulált legjobb makromechanikai paraméter között. Mindkét optimalizációs módszerrel sikerült a szerzőknek kvarchomok modellt felállítaniuk. Egy későbbi cikkükben Do és szerzőtársai [7] NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)-t alkalmazva oldották meg két ellentétes célfüggvényre épülő anyagmodell optimalizációs feladatot.

Mohajeri és szerzőtársai [22] genetikus algoritmus segítségével kalibráltak DEM modellt. Shultz féle nyíróvizsgálatok segítségével határozták meg szénpor makromechanikai jellemzőit. A mérések során kapott nyírófeszültségek alapján kalibrálták a modellt. Megjegyzik, hogy nagyon időigényes folyamat egy modell manuális kalibrálása. A genetikus algoritmussal történő kalibrálási módszer független a választott kapcsolati modelltől. A bevezetésükben bemutatják, hogy korábban milyen módszerekkel oldották meg DEM modellek automatikus kalibrálását.

Safranyik és szerzőtársai [28] is foglalkoztak már algoritmikusan történő DEM modell kalibrálásával. Ők nyíróvizsgálatok eredményei alapján kalibráltak talajmodellt.

2.8. A tudomány állása

A szakirodalomban nem találtam példát arra, hogy DEM-et és GA együttes alkalmazásával végeztek volna szerszám-geometria, vagy művelési paraméterek optimalizálását. Arra sem találtam példát, hogy több makromechanikai paraméter alapján állítottak volna be genetikusan algoritmust alkalmazva DEM talajmodellt.

3. Célok

A dolgozat olyan modellezési és optimalizálási módszerek bemutatását célozza, amely a következő kutatásaim megalapozását szolgálja. A dolgozatnak a kutatás korai fázisára való tekintettel nem célja minden módszer alkalmazását bemutatni. A kidolgozott módszerek önmagukban is eredménynek tekintendők. Ezek alapján jelen dolgozatban a következő célokat határoztam meg.

1. **Több, mérési elvben különböző makromechanikai jellemzőre történő automatikus talajkalibrálási módszer alapjainak megalkotása Yade-DEM szoftvert és genetikusan algoritmust alkalmazva.**
2. **Automatikus szerszám-geometria optimalizálási folyamatának megalapozása kultivátorszerszám esetében.**
3. **Olyan - a talajművelő-szerszám tervezésben alkalmazható - célfüggvények fejlesztése, melyek segítségével definiálni lehet művelés közbeni talajmozgásra és a művelés energiaszükségletére vonatkozó tervezési követelményeket DEM alkalmazásában.**

Kutatásaimat annak reményében végezem, hogy a kidolgozott algoritmizált talajművelő szerszám-optimalizálási módszer segítségével olyan talajművelő szerszámok geometriáját és művelési paramétereit lehet megtervezni, melyek energiahatékonyan hoznak létre megfelelő talajállapotot, és teljesítik az velük szemben támasztott követelményeket.

4. Anyagok és módszerek I. - Talaj automatikus kalibrálása több fizikai mérés alapján

Az irodalomkutatás során kiderült, hogy ahhoz, hogy talajművelő szerszám geometriáját megbízható eredmények mellett optimalizálni lehessen DEM-et alkalmazva, megfelelően kalibrált DEM talajmodellre van szükség, mely megbízhatóan képes modellezni a talaj-szerszám kölcsönhatásában a szerszámra ható vonóerőt, valamint a talaj mozgását a kölcsönhatás során.

A szerszámtervezési feladat elvégzéséhez alkalmazható a DEM. Egy DEM-ben megfelelően beállított talajmodell képes egyszerre modellezni a szerszám vontatási ellenállását, valamint a talaj mozgását. Így egy ideális DEM talajmodell elemei ugyanúgy mozognak, mintha a valós talaj mozogna talajművelés során. A talajmozgás modellezésének megfelelősége részben ellenőrizhető a modellezett és a valós talajon kialakult profil geometriájának összehasonlításával.

Ebben a fejezetben bemutatott módszer segítségével arra lehet keresni a választ, hogy vajon milyen fizikai vizsgálatok során mért makromechanikai jellemzők ismerete lehet szükséges ahhoz, hogy olyan DEM talajmodellt alkossunk, mely képes a talaj-szerszám kölcsönhatásában tapasztalt jelenségeket is modellezni.

A modellkalibrálási módszert arra alapozom, hogy több egyszerűbb talajmechanikai mérést végzek ugyanazon talajon. Ezen mérésekre DEM szimulációs környezetet építünk. A mérések során meghatározott makromechanikai jellemzőkre pedig automatikusan kalibrálom a talajmodellt. Az optimalizálási algoritmus (esetemben GA) segítségével a talajmodell mikromechanikai jellemzőit úgy állítom be, hogy megfelelően modellezze egyszerre a mért makromechanikai jellemzőket a szimulációkban. A vizsgálat célja az, hogy érthetővé váljon, melyek azok a - lehetőleg minél egyszerűbb - fizikai vizsgálatok, amelyekre kalibrálva a talajmodellt olyan modellt kapunk, mely a talaj-szerszám kölcsönhatásában tapasztalt jelenségeket megfelelően modellezi.

Ehhez szükség van ugyanazon talajon és talajállapotban elvégezni ezeket a vizsgálatokat. Szükséges kialakítani a szimulációs környezeteket, valamint be kell állítani azt, milyen célfüggvények mentén kalibráljuk a fizikai mérésekhez a szimulált talajt.

Kalibrálni kell a talajmodellt fizikai talaj-szerszám kölcsönhatása során mért makromechanikai jelenségek alapján (pl.: vontatási ellenállás, kialakult talajgeometria). Erre egy megfelelő eszköz lehet valamilyen talajművelő szerszám (például kultivátorszerszám) húzása a talajban, vagy alkalmazható horizontális penetrométer [11, 23] is.

Egyszerűbb fizikai mérés lehet penetrációs vizsgálat, nyíróvizsgálat, nyomóvizsgálat, keverődobos vizsgálat, rézsűszög vizsgálat. Problémát jelenthet, hogy nagy nedvességtartalmú (>35 mc%), vagy kötött talaj esetén a kis méretű keverődobos vizsgálat, illetve a rézsűszög vizsgálat - melyekben a talajt dinamikusán vizsgáljuk - nem alkalmazhatóak, mivel a talaj szemcséit összetartó kohézió túl nagy, és nem viselkedik szemcsés anyagként, így nem adnak megfelelő eredményt.

Ezt követően pedig össze kell hasonlítani az egyszerűbb mérések alapján kalibrált talajmodell viselkedését a talaj-szerszám kölcsönhatás alapján kalibrált talajmodell viselkedésével.

Egy feltételezés, hogy amennyiben ugyanazok a talajfizikai jelenségek hatásai dominálnának az egyszerűbb mérések és a talajművelés során is, ideális esetben a két módszerrel alkotott talajmodellnek azonosnak kellene lennie. Ezt a kialakított módszerrel mindenképpen vizsgálni szükséges a továbbiakban, melyre ezen kutatás nem tér ki.

Az épített modell alkalmas a 4.1. táblázatban felsorolt mikromechanikai paraméterek és változók kalibrálására.

4.1. táblázat. A kialakított környezetben kalibrálható mikromechanikai paraméterek

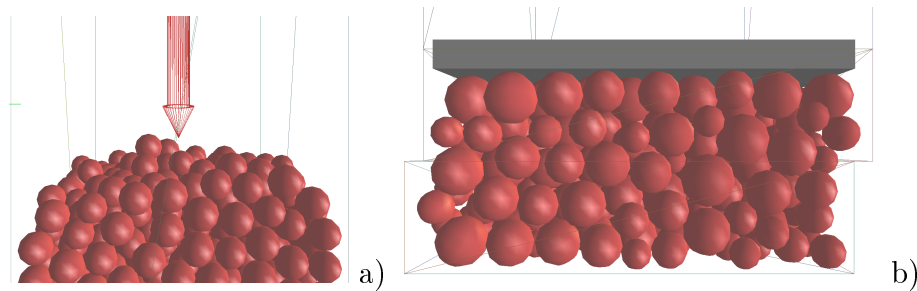
Jelölés	Megnevezés
η_{twist} [-]	Csavarási súrlódási együttható*
η_{roll} [-]	Gördülési súrlódási együttható
σ_{coh} [Pa]	Normál irányú kohézió
τ_{coh} [Pa]	Nyíró irányú kohézió**
ψ [rad]	Súrlódási szög
E [Pa]	Rugalmassági modulus
-	Gömb elemek kombinációiból (clumpokból) alkotott elemgeometria

* Gyakran $\eta_{twist} = \eta_{roll}$ és $\sigma_{coh} = 0.5 \cdot \tau_{coh}$

** Gyakran $\tau_{coh} = 0.5 \cdot \sigma_{coh}$

4.1. DEM szimulációs környezet felépítése

A kutatásom jelen fázisában két típusú mérésre alakítottam ki szimulációs környezetet, és genetikus algoritmust (GA) alkalmaztam arra, hogy automatikusan kalibrálhassam a talajmodellt a két mérés során rögzített adatsorokra. Ez a két mérés a penetrációs vizsgálat valamint a közvetlen nyíróvizsgálat (4.1. ábra).

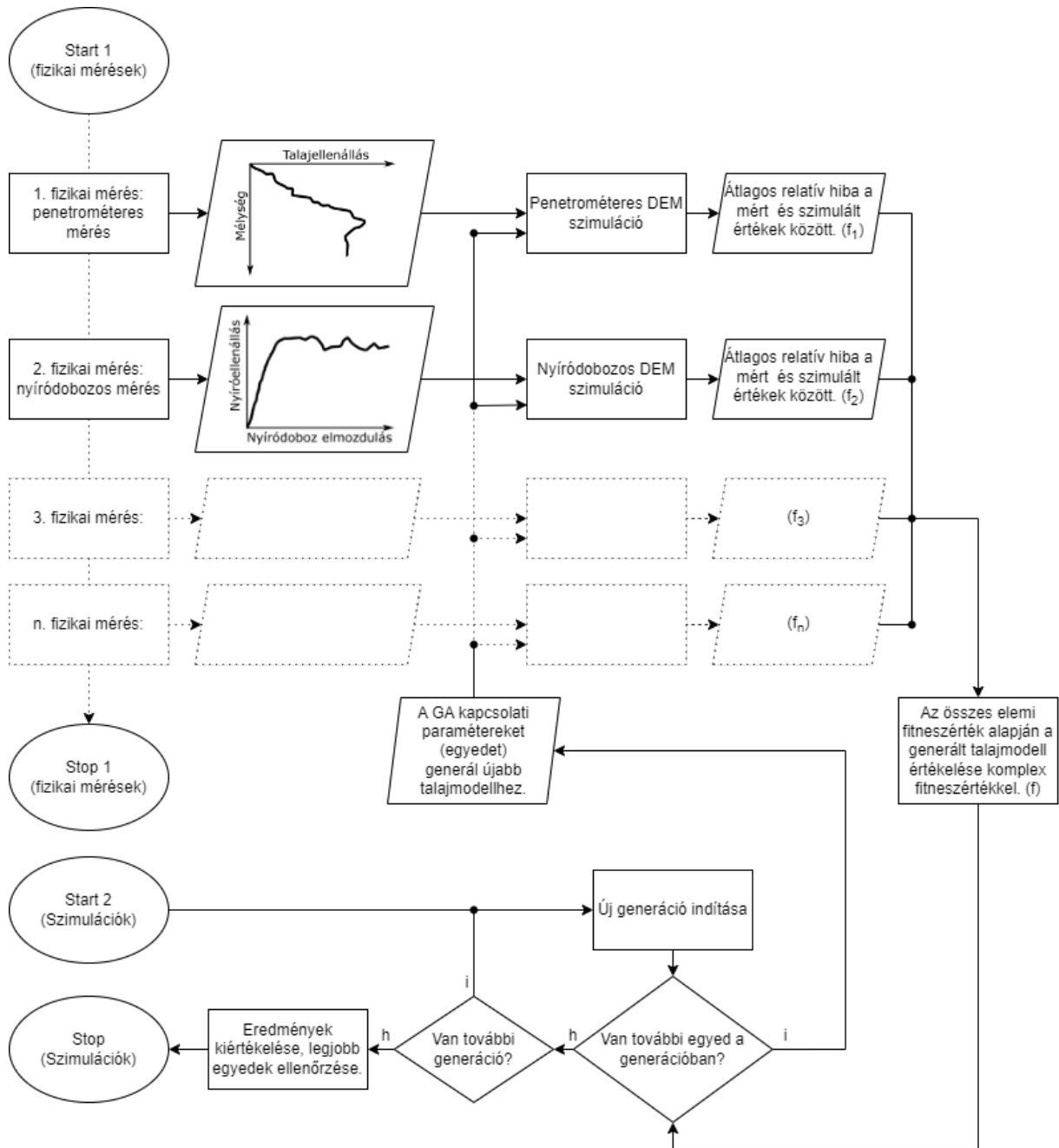


4.1. ábra. A kialakított DEM modell környezetek penetrációs és közvetlen nyírókísérlethez, a) penetrációs vizsgálat, b) közvetlen nyírókísérlet.

A DEM környezet úgy lett kialakítva, hogy könnyen paramétrezhetőek legyenek a kialakított méretek, vizsgálati sebességek, nyíróvizsgálat esetén az előterhelés értéke. Penetrációs mérés esetén pedig lehetőséget biztosítottam több különböző méretű kúp tesztelésére is.

4.2. A genetikus algoritmus beállításai

Az automatikus talajkalibrálási művelethez a Python programozási környezethez írt PyGad [9] könyvtárban megtalálható genetikus algoritmust alkalmaztam. A 4.2. ábrán látható folyamatábra bemutatja a GA-val történő automatikus talajkalibráció folyamatát több fizikai mérésre alapozva.



4.2. ábra. A DEM talajmodell automatikus kalibrálásának folyamata GA segítségével több fizikai mérés során mért makromechanikai talajjellemzők alapján.

A célfüggvény számítása során bemenetként szolgáltak a szimulációkhoz a mérési eredmények, azaz a nyírás során meghatározott nyírógörbe, valamint a penetrációs ellenállás a behatolási mélység függvényében. A szimulációk során folyamatosan rögzítésre kerülnek ugyanezen jellegű függvények. A szimuláció végeztével az x tengely mentén újramintavételezésre kerül mindkét görbe, majd pontonként kiszámításra kerül a két függvény közötti átlagos relatív hiba.

$$\bar{\delta}_{CP} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|CP_{s,i} - CP_{m,i}|}{CP_{m,i}} \quad (4.1)$$

Hasonlóan számítható a nyíróvizsgálatok során is a mért és szimulált adatsorok alapján az átlagos relatív hiba.

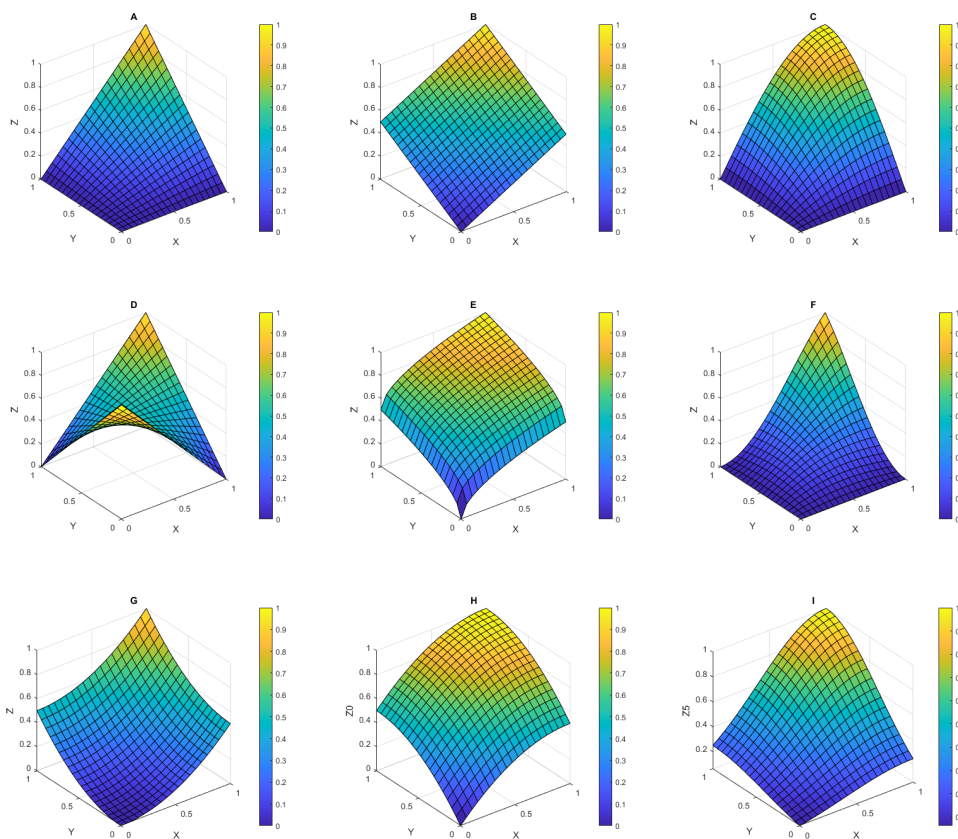
$$\bar{\delta}_\tau = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|\tau_{s,i} - \tau_{m,i}|}{\tau_{m,i}} \quad (4.2)$$

Tekinthetők a különböző vizsgálatok során kapott relatív hibaértékek elemi fitnessértékeknek, melyek jellemzik az adott szimuláció jóságát. Ez esetben minél kisebb a relatív hiba értéke a mért és a szimulált függvény között, annál közelebb vagyunk a megoldáshoz. Fontos figyelembe venni, hogy elvileg ez a szám a függvények közötti nagy eltérések esetén akár nagyobb is lehet, mint egy. Ez esetben a függvény értékét maximalizáltam egyben, hogy mindenképpen nulla és egy közé eső értékeket kapjak.

A PyGad genetikus algoritmus úgy van megírva, hogy a fitnessérték növekedésével egyre jobb eredményként tartja számon az adott megoldást. Emiatt a kapott relatív hibaértéket átszámítom a következő egyszerű képlettel:

$$f_i = 1 - \delta \quad (4.3)$$

Az elemi függvényértékeket ezt követően valamilyen módon egyetlen fitnessértékben ki kell fejezni ahhoz, hogy jellemezni tudjunk az adott mikromechanikai paraméterszettet, azaz az adott talajmodell jóságát. A 4.3. ábrán összegyűjtöttem néhány függvényt, amely szerint számítható két egymástól független relatív hiba kombinációja. A függvényeket x, y és z tengelyen is [0,1] intervallumban jelenítettem meg és úgy épülnek fel (kivéve Z_D), hogy egyre nagyobb X és Y bemeneti kombinációk esetén a bemenetekből számított Z érték tartson a vizsgált intervallum maximuma felé.



4.3. ábra. Normalizált kétváltozós függvények. a) $Z_A = X \cdot Y$
b) $Z_B = 0.5 \cdot (X + Y)$ c) $Z_C = \sin\left(X \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(Y \cdot \frac{\pi}{2}\right)$
d) $Z_D = (X \cdot Y) + (1 - X) \cdot (1 - Y)$ e) $Z_E = \sqrt{X} + \sqrt{Y}$ f) $Z_F = Z_C \cdot Z_D$
g) $Z_G = 1 - \frac{(-X^2 - Y^2 + 2)}{2}$ h) $Z_H = 1 - \frac{((1-X)^2 + (1-Y)^2)}{2}$
i) $Z_I = e^{-\left(\frac{(X-1)^2}{0.7} + \frac{(Y-1)^2}{0.7}\right)}$

A 4.3. ábrán látható függvények tovább kombinálhatók úgy, ha vesszük egymás szorzatát, vagy vesszük néhánynak az átlagát. Ezen műveletek alkalmazásával biztosítva marad, hogy a Z értékek nem kerülnek 1 fölé.

Például a Z_F függvényt két korábban definiált függvény (Z_C és Z_D) kombinációjából alkottam meg. Céлом az volt, hogy olyan fitnessfüggvényt definiáljak, mely nem csak azt jutalmazza egyre nagyobb értékkel ha az X és az Y egyre nagyobb, hanem jobban jutalmazza azokat az X és Y bemeneti értékeket, melyek aránya közel esik 0.5-höz. Továbbá az is cél volt, hogy Z_F értéke alacsony legyen, ha, X vagy Y értéke közel esik a nullához.

Feladatfüggő, melyik célfüggvényt lenne érdemes választani egy optimalizálási feladat során. Érdemes lehet összehasonlítani a célfüggvények hogyan teljesítenének a különböző feladatok esetén. Ez megtehető úgy, hogy egy fitnessfüggvényt mérnöki szemlélet alapú megítélés szerint kiválasztunk egy feladathoz. Ezen fitnessfüggvénnyel lefuttatjuk a GAt, majd minden egyed esetében kiszámoljuk más alternatív fitnessfüggvények segítségével is a fitnessértékeket. Ezt követően vizsgáljuk a helyes és a helytelen megoldásokat és összehasonlítjuk, melyik fitnessfüggvény, hogyan értékelte volna a megoldást. Helyes fitnessfüggvény választása esetén a jó megoldások magasabb pontszámot kapnak, a helytelen megoldások pedig alacsony pontszámon maradnak, vagy teljesen kinullázódnak.

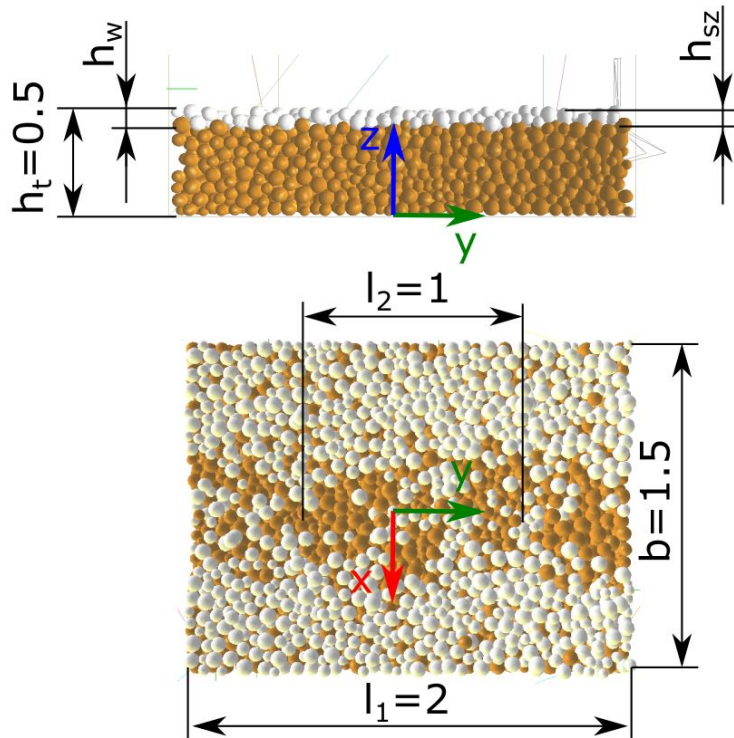
Külön kihívást jelent a megfelelő célfüggvény meghatározása abban az esetben, amikor kettőnél több elemi fitnessértékünk van. Súlyozással van lehetőség arra is, hogy bizonyos fizikai mérésekre történő rátanulást előnyben részesítsünk másoknál. Erre akkor lehet szükség, ha észrevesszük, hogy a talajmodell egy modellezendő makromechanikai tulajdonságra nehezebben tanul rá másoknál, vagy ha egyes célokat fontosabbnak tartunk másoknál. A súlyokat például három elemi fitnessérték esetében ilyen módon határozhatjuk meg:

$$f = f_1 \cdot 0.5 + f_2 \cdot 0.25 + f_3 \cdot 0.25 \quad (4.4)$$

5. Anyagok és módszerek II. - Automatikus szerszám-optimalizáció

5.1. DEM szimulációs környezet felépítése

A szimulációink során a Yade-DEM nyílt forráskódú szimulációs szoftvert alkalmaztam [29]. A szimulációkban a talajvályú méreteit az 5.1. ábra alapján állítottam be. A talajvályúba ülepített talajmodell felszínét 0.01 [m] mélységben fehérre színeztem, hogy vizsgálni lehessen a talaj felszínének keveredését kvantitatív és kvalitatív módszerekkel is. A szerszám vontatási sebessége egyenletes 1.8 m s^{-1} -ra lett állítva. Az 5.1. ábrán l_2 -vel jelölt szakaszon eliminálódnak a szerszám talajvályúba történő be,- és kilépéséből adódó tranziens hatások, így ezen a részen vizsgáltam a szerszámra ható erőt és a talaj keveredtségének mértékét. Az l_1, b, h_t a talajvályúban elhelyezkedő talajmodell befoglaló méretei. A h_w a talaj felső beszínezett rétegének vastagságát, h_{sz} pedig a szerszám mélységét határozza meg a legfelső elem koordinátája alatt. A szerszám nullpontja az 5.2. ábra alapján értelmezendő.



5.1. ábra. Az alkalmazott talajvályú jellemző geometriai méretei a szimulációk során. h_t [m]: Talaj modellezett mélysége, h_w [m]: Modellezett talaj felső rétegvastagsága, h_{sz} [m]: Szerszám művelési mélysége, l_1 [m]: Modellezett talajvályú hossza, l_2 [m]: Modellezett talajvályúban történő mérési tartomány, b [m]: Modellezett talajvályú szélessége.

Az 5.1. táblázatban összefoglaltam a kapcsolati paramétereket és egyéb szimulációs beállításokat. A talajvályút alkotó és a szerszám anyagát alkotó elemeknek, sűrűlódó anyagmodellt állítottam be, míg a talajt modellező elemeknél, sűrűlódó-kohéziós anyagmodellt alkalmaztam.

5.1. táblázat. Az alkalmazott talaj,- és szerszámmodell kapcsolati paramétereit és szimulációs beállításait a szerszám-optimalizálási módszer működésének tesztelése során.

Paraméter megnevezése	Paraméter értéke
Elemek típusa	gömb
Elemek száma	7000 [db]
Elemek sűrűsége	3250 [kg m ⁻³]
Mikromechanikai rugalmassági modulus	5 · 10 ⁶ [Pa]
Mikromechanikai Poisson-tényező	0.4[-]
Elemek sugara és szórása	0.03 ± 30% [m], normál eloszlás
Normál irányú kohézió	50000 [Pa]
Nyíró irányú kohézió	0.5·Normál irányú kohézió [Pa]
Elemek közötti súrlódási szög	22 [°]
Elemek közötti gördülési súrlódási tényező	0.01 [-]
Elemek közötti csavarási súrlódási tényező	0.01 [-]
Globális csillapítás az ülepítés során	0.8 [-]
Globális csillapítás a szimulációs mérések során	0 [-]
A falra és szerszámra vonatkozó sűrűség	7850 [kg m ⁻³]
A falra és szerszámra vonatkozó rugalmassági modulus	200 · 10 ⁹ [Pa]
A falra és szerszámra vonatkozó mikromechanikai Poisson-tényező	0.3 [-]
A falra és szerszámra vonatkozó súrlódási szög	0.2 [rad]
Időlépés	0.1·Rayleigh-féle becsült statikus időlépés [-]
Halmazban lévő kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányados	0.001 [-]
Szerszám vontatási sebessége	1.8 [m s ⁻¹]

5.2. Az automatikus szerszámtervezés folyamata

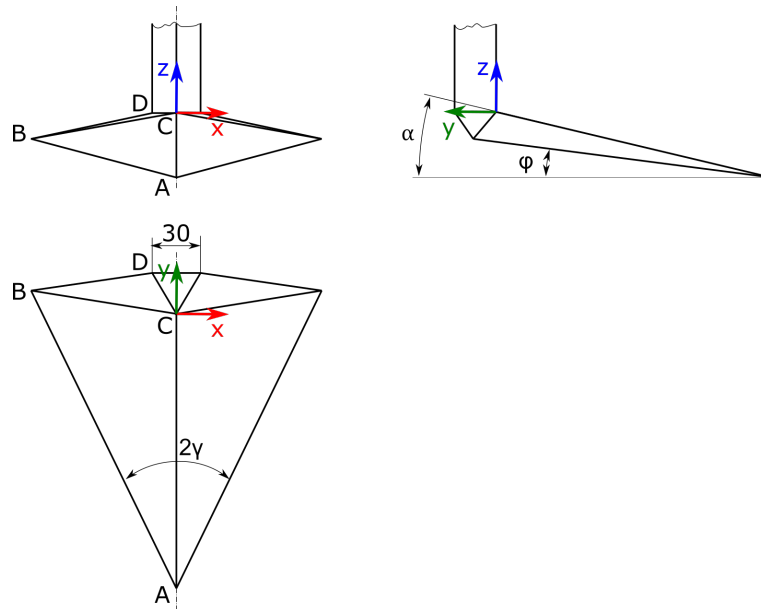
A kultivátorszerszám tervezést genetikus algoritmus és diszkrét elemes módszer segítségével automatizáltam.

A célfüggvény definiálása során azt vettem figyelembe, hogy mi egy kultivátorszerszám feladata és mit várunk el a működése során. A kultivátorszerszámot gyakran alkalmazzák arra, hogy a talaj felszínére szórt műtrágyát belekeverjék a talajba. Az pedig fontos lenne, hogy ezen műveletet lehetőleg minél kevesebb energiával meg lehessen tenni. Ezek alapján tehát két fő tervezési célt tűztem ki. Az első, hogy a talaj felső rétegét minél inkább belekeverjem az alsóbb talajrétegekbe. Második, hogy mindez lehetőség szerint minimális energiabefektetés mellett menjen végbe.

5.2.1. STL szerszámok felépítése

A Yade-DEM szoftver STL fájlokat képes kezelni [29]. Tehát .STL kiterjesztésű fájlban kell a szerszámot a szimulációba illeszteni. A kultivátorszerszám geometriáját jelen kuta-

tás során jelentősen leegyszerűsítettem úgy, hogy egy négy háromszög elemből álló szárral és egy négy háromszög elemből álló szimmetrikus dolgozó résszel rendelkezzen (5.2. ábra) [12, 32]. Egy olyan .STL kiterjesztésű szerszámmodell generátor programot írtam, mely képes definiált határok között olyan szerszámmodellt generálni, melynek szár része állandó geometriával rendelkezik, a dolgozó része pedig változik. Ez lehetővé teszi, hogy minden szimuláció során más-más geometriájú kultivátorszerszám kerüljön tesztelésre.



5.2. ábra. Az optimalizálandó kultivátorszerszám általános geometriája. Az ábrán feltüntetett szögek: α [°]: Kultivátorszerszám ráüllesztési szöge, β [°]: Kultivátorszerszám ráüllesztési szöge, γ [°]: Kultivátorszerszám nyílásszöge, φ [°]: Kultivátorszerszám talpszöge.

5.2.2. A genetikus algoritmus beállításai

A GA-t úgy állítottam be, hogy egy egyed összesen hat génnel rendelkezik. A GA génjei közé választottam a szerszám geometriáját leíró paraméterek közül ötöt, valamint a szerszám művelési mélységét. A genetikus algoritmus beállítási paramétereit pedig az 5.2. táblázatban foglaltam össze.

5.2. táblázat. A genetikus algoritmus beállításai.

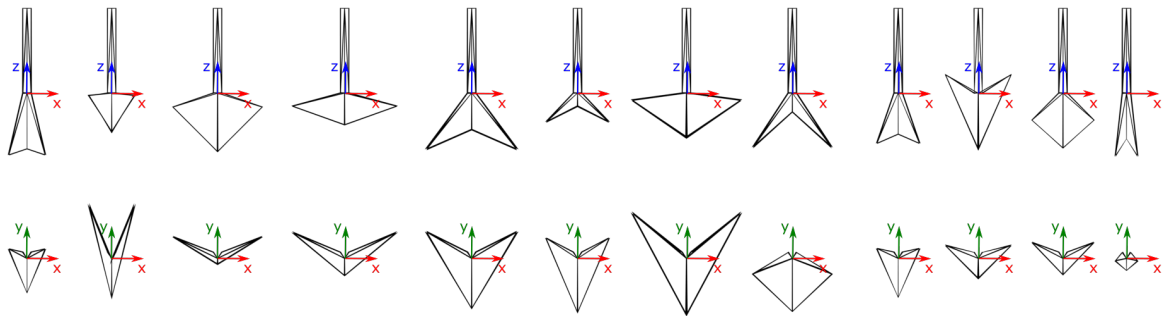
Paraméter megnevezése	paraméter értéke
Generációban lévő populáció száma	38 [db]
Generációk száma	10 [db]
Szülők száma	10 [db]
Gének száma	6 [db]
Gének mutációs valószínűsége	0.01 [-]

A géneket és azok tulajdonságait az 5.3. táblázat listázza. A táblázatban lévő jelölések az 5.2. ábra alapján értelmezhetők. A szerszám mélység a szerszám C pontja és a talajmodell legfelső eleme közötti távolságként van definiálva.

5.3. táblázat. A GA génjei és azok intervallumai.

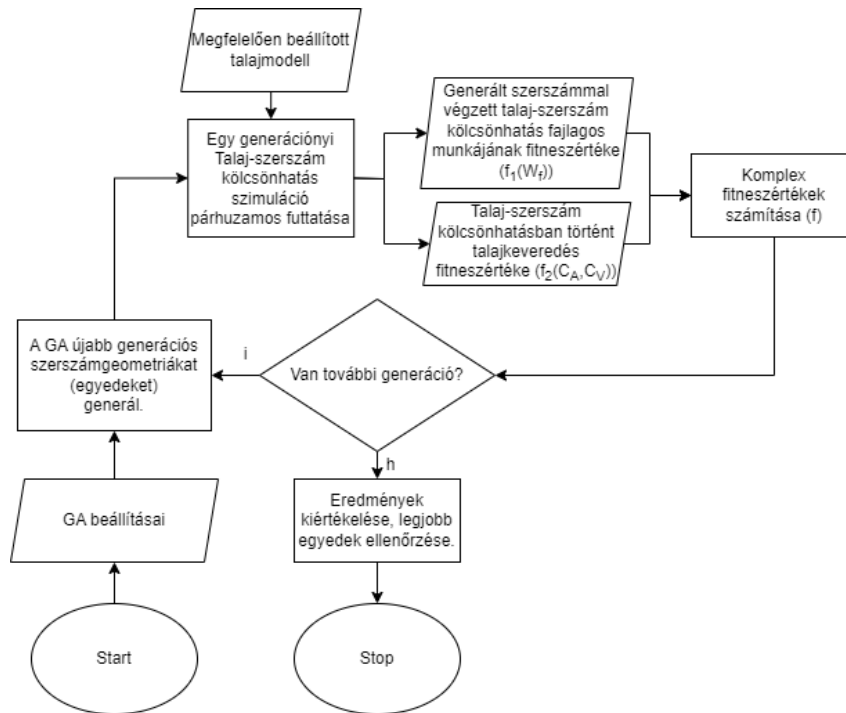
Paraméter megnevezése	paraméter jelölése	paraméter intervalluma [m]
Szerszám A pontjának y koordinátája	A_y	$[-0.3, 0]$
Szerszám A pontjának z koordinátája	A_z	$[-0.3, 0]$
Szerszám B pontjának x koordinátája	B_x	$[0.05, 0.3]$
Szerszám B pontjának y koordinátája	B_y	$[-0.1, 0.3]$
Szerszám B pontjának z koordinátája	B_z	$[-0.3, 0.1]$
Szerszám munkamélysége a talajban	h_{sz}	$[0.03, 0.08]$

Néhány, az 5.3. táblázat alapján GA-val generált tesztelendő szerszámot ábrázol az 5.3. ábra.



5.3. ábra. Különböző GA-val generált, tesztelendő szerszámok, melyek felső sorban előlnézetben, alsó sorban a hozzájuk tartozó felülnézetben vannak megjelenítve.

A szerszám-geometria, illetve művelés folyamatát írja le az 5.4. ábra. Érdeemes megjegyezni, hogy egyetlen generáció egyedeinek tesztelése párhuzamosan történik, így hatékonyabban kihasználható a számítógép erőforrása. Korlátot jelent azonban, ha túl kevés maggal rendelkezik a számítógép, melyen futtatni szeretnénk az optimalizálást.



5.4. ábra. GA-val és DEM-mel történő automatikus szerszám-optimalizáló folyamat.

5.2.3. A fitnessfüggvény

A fitnessfüggvény segítségével jellemzi a GA az éppen tesztelt szerszám jóságát.

Összegyűjtöttem azokat a talajmodellt és szerszámmodellt jellemző mennyiségeket, melyek alkalmasak lehetnek leírni a talaj megkeverését és a talajműveléshez szükséges befektetett energiát. A következő mennyiségeket tudom kinyerni a szimulációból:

Talajhoz tartozó mennyiségek:

- A mozgatott talaj kinematikus energiája.
- A mozgatott talaj összes energiája, mely tartalmazza a kinematikus energiát, a plasztikus elnyelt energiát (plastic dissipation), a csillapítási elnyelt energiát (damping dissipation) és a gravitációs munkát.
- A talaj keveredettsége a művelés következtében. (Ez későbbiekben kifejtésre kerül.)

A szerszámhoz tartozó mennyiségek:

- A talajmodellben húzott szerszámra ható vontatási irányba eső erőkomponens.
- A szerszám vontatási irányába eső vetületének felülete.

Úgy döntöttem, hogy a felsorolt értékekből a szerszámra ható vontatási irányba eső erőkomponens értékét vesszem figyelembe a műveléshez szükséges energiát jellemző fitnessfüggvény számításához. Egy átlagos vontatási ellenállást számoltam a modellezett talajvályú közepén lévő 1 m-es szakaszon és ez alapján számítottam ki a szerszám hasznos munkáját. Ezt a munkát fajlagosítottam a szerszám vontatás irányába eső vetületének felületével. Erre azért volt szükség, hogy a szerszám mérethatását lehetőleg kiküszöböljem. Azaz nagyobb méretű szerszám ugyanolyan eséllyel induljon, mint egy kisebb méretű. A

vetületszámításnál az 5.2. ábra szerinti ABC és ACD háromszögek XZ síkra eső vetületeinek kétszeresével számoltam.

$$W_f = \frac{\bar{F}_{v,xz} \cdot l_2}{A_{sz,xz}} \quad (5.1)$$

A talaj keveredtségének megállapításához a következő irányelvek mentén gondolkodtam. Fontos lenne, hogy a felső réteg minél inkább bekeverésre kerüljön az alsóbb rétegekbe és az is fontos lenne, hogy a felső réteg a szerszám által ne csak félretolásra kerüljön. Technikailag a szimulációban úgy oldottam meg a talajmodell felső rétegét alkotó elemek keveredésének vizsgálatát, hogy a felső réteget alkotó elemeket fehérre, az alsóbb rétegekben található elemeket pedig barnára színeztem. A talaj-szerszám kölcsönhatása után a keveredtség megállapításához figyelembe vettem a talaj felszínén a szerszám kétszeres szélességében a fehér/barna elemek arányát. Azt tekintettem jó megoldásnak, mikor ez az arány kicsi lett. Hiszen ha nagy maradt a barna felület a szerszám kétszeres szélességében a szerszám után, akkor a fehér elemek feltehetően mélyebb rétegekben megtalálhatók és nem csak oldalra lettek tolvá a szerszám által. Ezzel egyidejűleg vizsgáltam azt is, hogy a szerszám útjában, a szerszám szélességében, a talaj teljes mélységéig, mennyi a fehér/barna elemek aránya. A vizsgált szakasz a modellezett talajvályú közepén lévő 1 m volt ez esetben is. Itt pedig azt tekintettem helyes megoldásnak, ha ez az érték minél nagyobb. Ez azt jelenti ugyanis, hogy a fehér szemcsék a szerszám nyomvonalán belül maradtak. A fitnessfüggvényt ezen két arányból tehát úgy határoztam meg, hogy helytelen megoldást jelentő, alacsony értékkel térjen vissza a függvény, ha nagy mennyiségben fehér elemek maradnak a talaj felszínén, vagy ha túl kevés fehér elem marad a szerszám mögött hagyott barázdában és egyre jobb értéket adjon, ha az arányok javulnak.

Ahhoz, hogy az elemi fitnessértékeket össze tudjam hasonlítani egymással, a keveredésre vonatkozó arány értékeket és a fajlagos munka értékeket valamilyen módon normalizálni kell, hogy 0 és 1 közé kerüljenek. Szükséges ismerni viszont ehhez azt, hogy milyen intervallumokon belül alakulhatnak ezek az értékek. Tapasztalati úton jutottam ehhez az információhoz. Véletlenszerűen generált szerszámokkal lefuttattam 38 szimulációt és vizsgáltam, milyen intervallumok közé esnek a keveredésre vonatkozó arány és a fajlagos munka értékek. Ezeket az intervallumhatárokat meghatároztam és lineáris összefüggéssel 0 és 1 közé alakítottam. Abban az esetben, ha a definiált intervallumhatárokon kívüli értéket kaptam bármelyik szimulációs eredmény esetében, akkor 0 értéket vesz fel a normalizált elemi fitnessfüggvény. Ezen normalizált elemi fitnessfüggvények egy szimulációban a következők szerint számíthatók:

A fajlagos munka elemi fitnessértéke:

$$f_{W_f} = \frac{-1}{W_{f,max} - W_{f,min}} \cdot W_{f,s} + \frac{1}{W_{f,max} - W_{f,min}} \cdot W_{f,max} \quad (5.2)$$

A felszínén lévő fehér/barna elemek arányának elemi fitnessértéke:

$$f_{C_V} = \frac{1}{C_{V,max} - C_{V,min}} \cdot C_{V,s} - \frac{1}{C_{V,max} - C_{V,min}} \cdot C_{V,min} \quad (5.3)$$

A szerszám szélességében a talaj teljes mélységében lévő fehér/barna elemek arányának elemi fitnessértéke:

$$f_{C_A} = \frac{-1}{C_{A,max} - C_{A,min}} \cdot C_{A,s} + \frac{1}{C_{A,max} - C_{A,min}} \cdot C_{A,max} \quad (5.4)$$

A fajlagos munka intervallumhatárai:	$W_{f,min} = 20000 \left[\frac{J}{m^2} \right]$	$W_{f,max} = 80000 \left[\frac{J}{m^2} \right]$
A térfogati fehér/barna arány intervallumhatárai:	$C_{V,min} = 0.05 [-]$	$C_{A,max} = 0.15 [-]$
A felszíni fehér/barna arány intervallumhatárai:	$C_{A,min} = 0.27 [-]$	$C_{A,max} = 1.43 [-]$

Érdemes megjegyezni, hogy tapasztaltaim szerint a szimulált értékek ($W_{f,s}, C_{V,s}, C_{A,s}$) eloszlása nem egyenletes. Így később érdemes lenne gondolkodni azon, hogy a lineáris összefüggések helyett milyen más függvény alkalmazása lehet méginkább célravezetőbb az elemi fitnessértékek számítása során. Habár az is igaz, hogy a legjobb megoldásokat a fitnessfüggvény így is megtalálja. A fitnessfüggvény alakjának inkább abban van szerepe, hogy milyen úton és mennyire hatékonyan jut el a genetikus algoritmus a helyes megoldás felé és milyen sorrendet állít fel a helyes megoldások között.

Mivel két értékünk is van melyek a keveredést jellemzik, ezért előbb ezeket egy értékben egyesítettem az alábbi függvény alapján.

$$f_k = \sin \left(f_{C_V} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin \left(f_{C_A} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (5.5)$$

Ezt követően az f_k valamint az f_{W_f} elemi fitnessfüggvényekkel írható fel a végleges fitnessfüggvény.

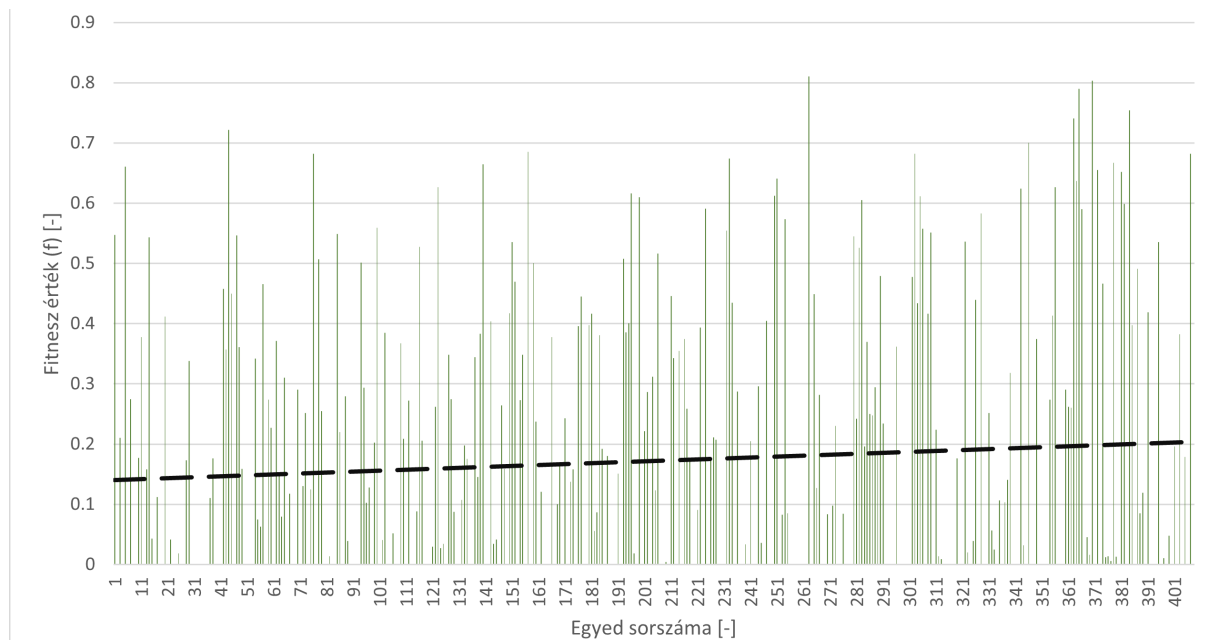
$$f = \sin \left(f_k \cdot \frac{\pi}{2} \right) \cdot \sin \left(f_{W_f} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (5.6)$$

6. Eredmények

Jelen kutatás aktuális eredményének tekinthetők azok a kialakított GA-val egybekötött szimulációs környezetek, melyekben lehetőség van a DEM talajt kalibrálni penetrációs ellenállásmérés valamint nyíródobozos vizsgálat segítségével egyszerre.

További eredménynek tekinthető az a GA-val egybekötött szimulációs környezet, mely lehetővé teszi az automatikus kultivátorszerszám optimalizálását a talaj keveredésének és a műveléshez szükséges energiájának a figyelembevételével.

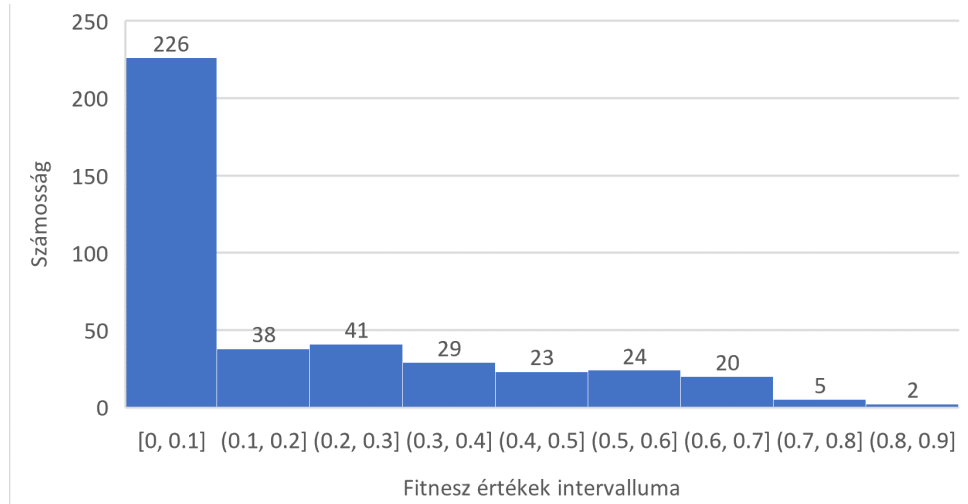
A 6.1. ábra azt szemlélteti, hogy a genetikus algoritmus által generált szerszám-geometria és művelési mélység paraméterkombinációk milyen fitnesszértékkel tértek vissza az egyes egyedek esetén. Az adatsorra illesztett trendvonal meredeksége jól szemlélteti, hogy a 10 generáció során az egyedfejlődés összességében pozitív, tehát átlagosan egyre jobban teljesítő kultivátorszerszámok születtek.



6.1. ábra. Fitnesszértékek alakulása az egyedek fejlődésével.

A 6.2. ábra hisztogramján látszik, hogy az összesen 408 egyed 55 %-a 0 fitnesszértékkel tért vissza. Csak nagyon kevés (1.7 %) esetben lett kiemelkedően jó (0.7-1 fitnesszérték között) a megoldás.

A hisztogramon bemutatott eredmények felhívják a figyelmet arra, hogy el kellene kerülni a 0 fitnesszértékkel visszatérő egyedek generálását. Így effektívebb lehetne a szerszámtesztelési folyamat, hiszen a szimulációs idő több mint fele biztosan helytelen megoldással indult. Megvizsgálva a 0 fitnesszértékkel visszatért geometriákat megállapítható, hogy melyek azok, melyek helytelen eredményt adnak. Már a szerszám geometriájának generálásakor figyelembe kellene venni olyan korlátozásokat, melyek biztosítják a biztosan helytelen megoldások elkerülését.



6.2. ábra. Fitneszértékek alapján készített hisztogram.

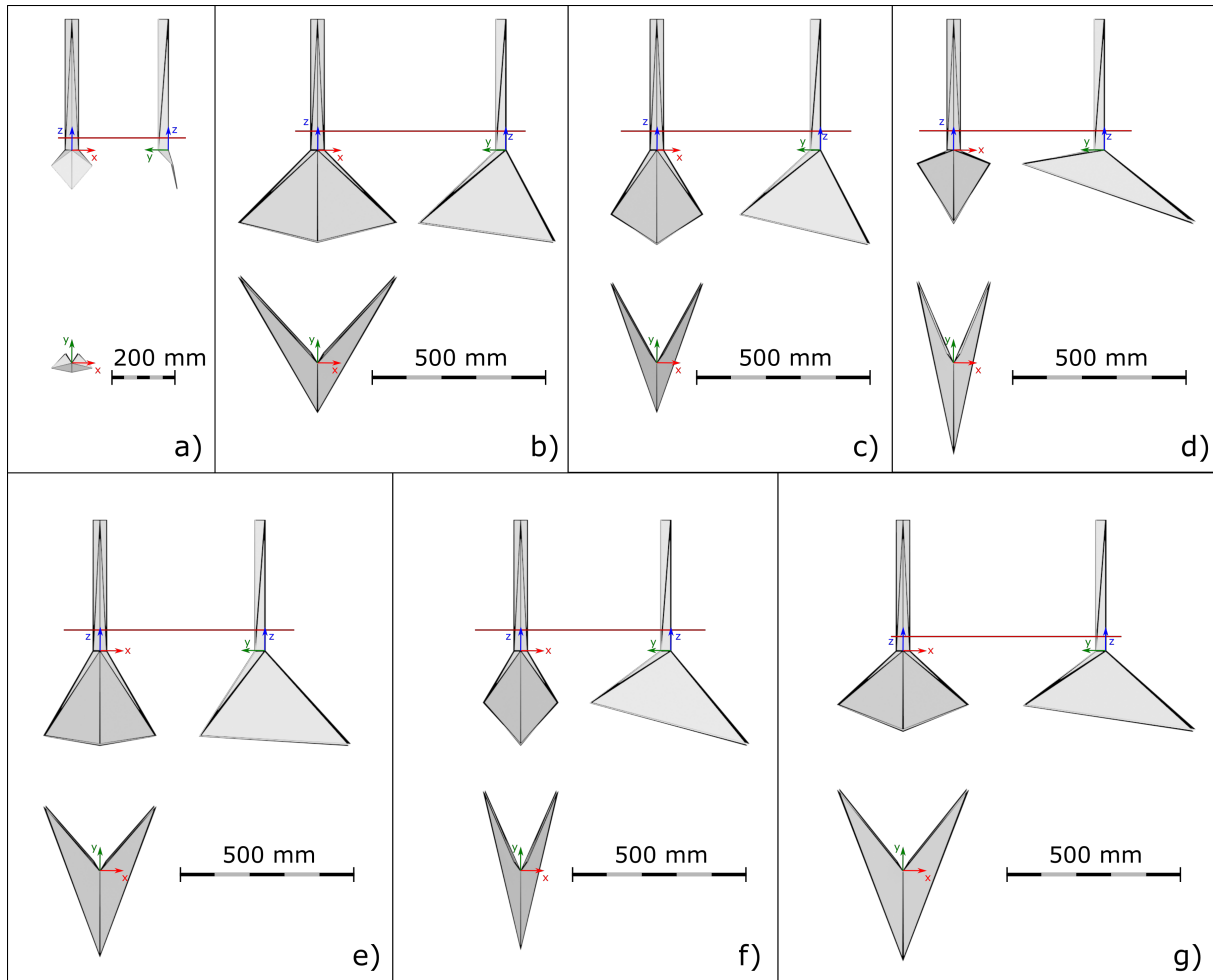
A 6.3. ábra mutatja be a legjobb fitneszértéket kapott egyedeket. Az a)-g) fitneszérték szerint csökkenő sorrendben vannak megjelenítve a célfüggvény szerint jól teljesítő egyedek. Az ábrán a vörös vonal a talaj felszínét jelöli a modellezett művelés során. A 6.1. táblázat tartalmazza a 6.3. ábrán látható szerszámok geometriai adatait és a szimuláció során rögzített néhány fontos szimulált fizikai mennyiséget, valamint a fitneszértékeket. Megfigyelhető, hogy a legjobb fitneszértékkel visszatért szimulációban alkalmazott a) szerszám geometriája jelentősen eltér a többi jól teljesítő szerszámok geometriájától. Felülete nagyon kicsi a többihez képest. Valószínűsítem, hogy mivel a szerszám mérete túl kicsi a szimulációk során alkalmazott elemek méretéhez képest, ez okozhatott problémát a keveredés fitneszértékének számítása során. Ezen szimuláció eredményét valószínűleg jelentősen befolyásolná, ha a talajmodellt alkotó elemek méretét csökkenteném. A geometria értékelése tehát ez esetben további vizsgálatra szorul.

6.1. táblázat. A célfüggvények alapján legjobban teljesítő kultivátorszerszám geometriai paraméterei és a hozzá tartozó szimulált fizikai mennyiségek és fitneszértékek.

Szerszámjellemező paraméter	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)
A_y [mm]	-27	-149	-149	-277	-259	-237	-272
A_z [mm]	-120	-281	-288	-223	-287	-287	-243
B_x [mm]	62	240	139	111	169	112	198
B_y [mm]	-15	267	246	251	200	246	251
B_z [mm]	-48	-223	-197	-41	-260	-158	-166
h_{sz} [mm]	35	54	54	56	58	58	42
$\bar{F}_{v,xz}$ [N]	304	2454	1612	658	1956	1375	1393
A_{xz} [cm ²]	84	719	439	254	539	353	516
W_f [J m ⁻²]	36004	34135	36730	25866	36254	38902	27022
f_{W_f} [-]	0.73	0.76	0.72	0.90	0.72	0.68	0.88
f_k [-]	0.69	0.66	0.67	0.55	0.61	0.61	0.50
f [-]	0.81	0.80	0.79	0.75	0.74	0.72	0.70

A többi (b)-g)) szerszámnak a fő geometriai jellegzetességei megegyeznek. Elölről-felülről nézve mind konvex. A korábban bevezetett jelölésrendszer szerint (5.2. ábra). A_y pontjuk

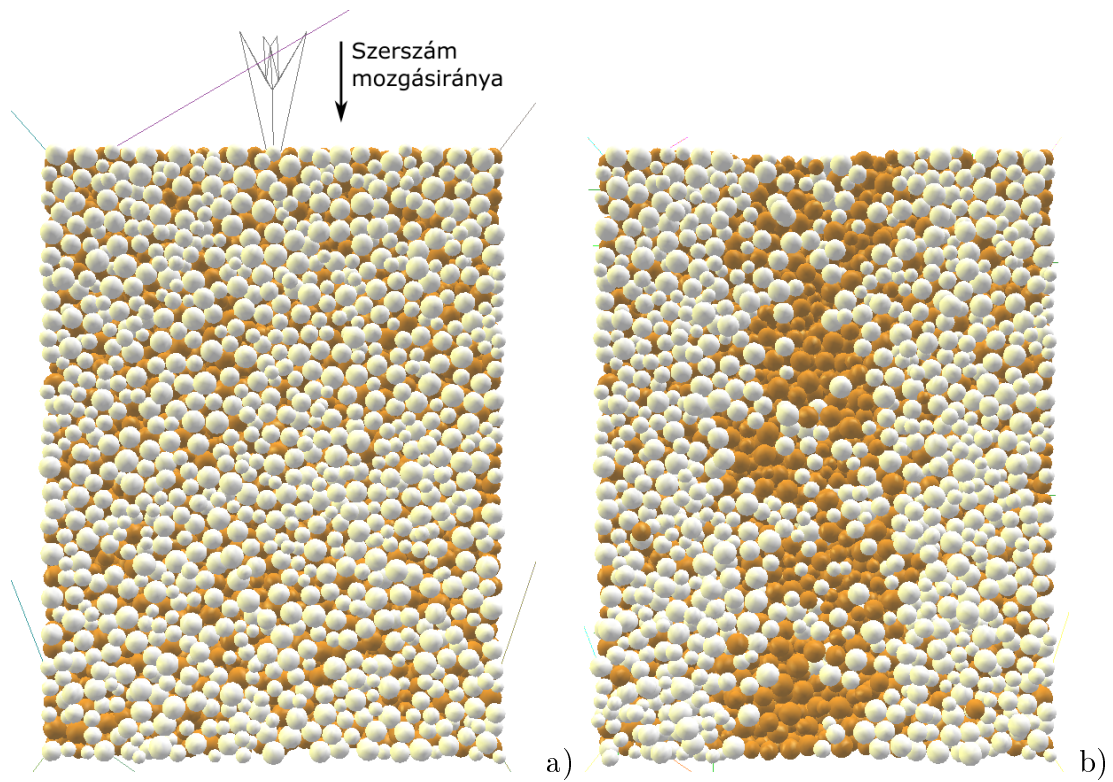
minden esetben kisebb a B_y -nál. A szerszámok A_z pontja minden esetben kisebb a B_z pontnál. B_y mindig pozitív és 200-251 mm közé esik. Az alkalmazott szerszámmélység pedig 42-58 mm kötött bizonyult optimálisnak. Megfigyelhető az is, hogy a c), d), f) szerszámok esetében viszonylag kis γ szöghöz nagyobb φ szög tartozik, míg nagyobb γ szögek esetén (b),g)) a φ szög csökkenő tendenciát mutat.



6.3. ábra. Azon szerszámok geometriája, melyek 0.7-1 közötti fitnessértékkel tértek vissza. A legjobb fitnessértéket kapott egyedek a)-g) között, amelyek fitnessérték szerinti csökkenő sorban vannak megjelenítve. Vörös vonal jelzi a talaj felszínét.

Érdeemes szem előtt tartani, hogy helytelen következtetések levonásához vezethet, ha a talajmodell nincs megfelelően beállítva.

Az egyes szerszámok által okozott talajbolygatás kvalitatív módon is vizsgálható a szimulációk végeztével. A b) szerszám esetén például a 6.4. ábra szerint alakult a talaj felszíne.



6.4. ábra. A talaj kialakult felszíne a d) szerszámmal végzett talajművelési szimuláció végeztével. a) A talaj-szerszám kölcsönhatása előtti talajállapot. b) A talaj-szerszám kölcsönhatása utáni talajállapot.

7. Konklúzió

A kutatás fő újdonságtartalma, hogy lefektettem az alapjait a genetikus algoritmussal történő kultivátorszerszám geometriájának és művelési mélységének optimalizálási módszeréhez.

- Az eredmények alapján a kidolgozott módszert alkalmasnak tartom arra, hogy segítségével komplex célfüggvények alapján, szerszám és művelési paraméterek optimalizálását végezzünk.
- A genetikus algoritmus egyre jobban teljesítő szerszámgeometriákat generál a célfüggvények alapján.
- A talaj keveredésének célfüggvénye összerakható két elemi célfüggvényből, amely megfelelő kvantitatív eredményeket adott a szimulációk végeztével a keveredésre, a kvalitatív eredmények alapján.
- Helytelen következtetések levonásához vezethet az optimalizált szerszámgeometriát illetően, ha a talajmodell nem megfelelően beállított.
- Jellegre hasonló szerszámgeometriák bizonyultak alkalmasnak a célfüggvények alapján történő geometria optimalizálása során a definiált talajművelési feladat elvégzéséhez.
- Annak ellenére, hogy a szakirodalomban található javaslatokhoz képest nagyobb elemmérettel végeztem szimulációkat, a gyakorlatban alkalmazott megoldásokhoz jellegre hasonló szerszámgeometriákat kaptam.
- A 6.3. ábrán b)-vel jelölt, 54 mm mélységben dolgozó szerszám bizonyult a legjobb GA által generált szerszámgeometriának. A definiált célfüggvények szerint ez a szerszám teljesítette a legjobban a minimális fajlagos munkavégzés mellett a talajkeverési feladat.
- A DEM-ben alkalmazott elemek optimális méretét és ebből adódóan az elemszámot vizsgálni szükséges. Keresni kell azt a maximális elemméretet, amely a szerszám geometriájának optimalizálási folyamatára minimális hatással bír. Ez ugyanis a legfontosabb tényező a szimulációs idő alakulásában.

8. Kitekintés

Komplex kultivátorszerszám tervezési folyamat során, több talajtípus alapján, több nedvességtartalom mellett szükséges DEM talajmodelleket kalibrálni. Olyan talajtípusokat kell modellezni, melyben a tervezendő szerszám várhatóan dolgozni fog. Az automatikus szerszám-optimalizálási folyamat során egy szerszámot több típusú talajhoz tartozó modellben is érdemes tesztelni. A szerszám-optimalizálási folyamat célfüggvényét pedig úgy kell beállítani, hogy az azt a szerszámot részesítse előnyben, amely több talajtípusban megfelelően teljesíti az elvárt követelményeket.

A kultivátorozást a gyakorlatban általában nem egyetlen szerszámmal végzik, hanem különböző szerszám-kombinációkkal. Például egy sorközben gyakran három szerszám dolgozik valamilyen elrendezésben egymáshoz képest. Ezek segítik egymás munkáját főleg a talajkeverési folyamat során. Egy ilyen feladat esetén további optimalizálandó változók adódnak. Például fontos lesz a szerszámok egymáshoz képest történő elhelyezkedése, illetve a kombinációt alkotó szerszámok geometriái is különbözőek lehetnek.

A szerszám-optimalizálás folyamán további fizikai jelenségekre is lehetne írni célfüggvényeket, melyeket figyelembe lehetne venni az egyes szerszámok fitness függvényével történő értékelésénél. Többek között azt, hogy hogyan alakul a talaj felszíne a művelés következtében az elvártakhoz képest.

A kutatás a jövőben ezt a fejezetet tekintve is számos feladatot ad még a végső cél eléréseig.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretném köszönetemet kifejezni mindazoknak, akik hozzájárultak munkám sikeres megvalósításához:

A BME Gép- és Terméktervezés Tanszékről köszönöm Dr. Tamás Kornél Tanár úrnak több éves konzulensi segítségét talaj-szerszám kölcsönhatás DEM modellezése területen. Köszönöm az Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszékről Horváth Dánielnek, aki DEM modellezése területen segíti munkámat, köszönöm a tőle kapott segítséget a nyíródobozos szimuláció felépítésében. Köszönöm Szabó Taddeusnak a programozási feladatokban nyújtott segítséget és inspirációt. Köszönöm Csordás Tamásnak a talajművelés során gyűjtött gyakorlati tapasztalatainak megosztását és javaslatait kutatásomhoz. Köszönöm Hudoba Zoltán Tanár úrnak talajművelés tudományban nyújtott segítségért. Köszönöm Orosz Ákosnak a mindenkori pozitív-kritikus hozzáállását és szakmai segítségnyújtását kutatásaimhoz. Köszönöm Szabó Nettinek a dolgotat végleges áttekintését, és javaslatait.

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2-I-BME-351 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

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

A kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.



Hivatkozások

- [1] A Anandarajah és M Yao. “Three-dimensional discrete element method of analysis of clays”. *Discrete Element Methods: Numerical Modeling of Discontinua*. 2002, 237–241. old.
- [2] Ozoemena A Ani és tsai. “Overview of soil-machine interaction studies in soil bins”. *Soil and Tillage Research* 175 (2018), 13–27. old.
- [3] Petra Aradi, József Gräff és György Lipovszki. *Számítógépes szimuláció*. URL: https://mogi.bme.hu/TAMOP/szamitogepes_szimulacio/ch05.html.
- [4] K Bagi. “A diszkrét elemek módszere”. *BME Department of Structural Mechanics, Budapest* (2007), 5–12. old.
- [5] H Bentaher és tsai. “Finite element simulation of moldboard–soil interaction”. *Soil and Tillage Research* 134 (2013), 11–16. old.
- [6] “BMEEOGTAT13 segédlet a BME Építőmérnöki Kar hallgatói részére”. 2004.
- [7] Huy Q Do, Alejandro M Aragón és Dingena L Schott. “A calibration framework for discrete element model parameters using genetic algorithms”. *Advanced Powder Technology* 29.6 (2018), 1393–1403. old.
- [8] Frederik F Foldager és tsai. “Lidar-based 3d scans of soil surfaces and furrows in two soil types”. *Sensors* 19.3 (2019), 661. old.
- [9] Ahmed Fawzy Gad. *PyGAD: An Intuitive Genetic Algorithm Python Library*. 2021. arXiv: 2106.06158 [cs.NE].
- [10] Songül Gürsoy, Ying Chen és Bo Li. “Measurement and modelling of soil displacement from sweeps with different cutting widths”. *Biosystems engineering* 161 (2017), 1–13. old.
- [11] Abbas Hemmat és tsai. “Influence of failure mode induced by a horizontally operated single-tip penetrometer on measured soil resistance”. *Soil and Tillage Research* 105.1 (2009), 49–54. old.
- [12] Daniel Horvath, Kornel Tamas és Tibor Poos. “Viscoelastic contact model development for the discrete element simulations of mixing process in agitated drum”. *Powder Technology* 397 (2022), 117038. old.
- [13] Man Hu és tsai. “Simulation of soil-tool interaction using smoothed particle hydrodynamics (SPH)”. *Soil and Tillage Research* 229 (2023), 105671. old.
- [14] Donald R Jones és Joaquim RRA Martins. “The DIRECT algorithm: 25 years Later”. *Journal of Global Optimization* 79.3 (2021), 521–566. old.
- [15] Subrata Karmakar és R Lal Kushwaha. “Dynamic modeling of soil–tool interaction: an overview from a fluid flow perspective”. *Journal of Terramechanics* 43.4 (2006), 411–425. old.
- [16] Andre Katterfeld és tsai. *Calibration of DEM parameters for cohesionless bulk materials under rapid flow conditions and low consolidation*. 2019.
- [17] Ghulam Kibriya és tsai. “Calibration of Micromechanical Parameters for the Discrete Element Simulation of a Masonry Arch using Artificial Intelligence”. *Infrastructures* 8.4 (2023), 64. old.
- [18] J Liu és tsai. “Soil-straw-tillage tool interaction: Field and soil bin study”. *Canadian Biosystems Engineering* 49 (2007), 2. old.
- [19] MN Lysych. “Review of numerical methods for modeling the interaction of soil environments with the tools of soil tillage machines”. *Journal of Physics: Conference Series*. 1399. köt. 4. IOP Publishing. 2019, 44014. old.

-
- [20] J Massah és tsai. “Modelling of Soil Displacement Resulting from Sweep during Tillage Operation Using Image Processing”. *Journal of Agricultural Science and Technology* 22.2 (2020), 415–424. old.
- [21] Viktor Milkevych és tsai. “Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method”. *Soil and Tillage Research* 183 (2018), 60–71. old.
- [22] JA Montgomery és tsai. “Quantifying tillage translocation and deposition rates due to moldboard plowing in the Palouse region of the Pacific Northwest, USA”. *Soil and tillage Research* 51.3-4 (1999), 175–187. old.
- [23] Mojtaba Naderi-Boldaji és tsai. “Use of a triple-sensor fusion system for on-the-go measurement of soil compaction”. *Soil and Tillage Research* 128 (2013), 44–53. old.
- [24] Szendrő Péter. *Mezőgazdasági gépszerkezettan*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 2000.
- [25] Shafiqur Rahman, Ying Chen és David Lobb. “Soil movement resulting from sweep type liquid manure injection tools”. *Biosystems Engineering* 91.3 (2005), 379–392. old.
- [26] Mohammad A Sadek és Ying Chen. “Feasibility of using PFC3D to simulate soil flow resulting from a simple soil-engaging tool”. *Transactions of the ASABE* 58.4 (2015), 987–996. old.
- [27] Mohammad A Sadek, Mehari Tekeste és Mojtaba Naderi. “Calibration of soil compaction behavior using discrete element method (DEM)”. *2017 ASABE Annual International Meeting*. American Society of Agricultural és Biological Engineers. 2017, 1. old.
- [28] Ferenc Safranyik, István Keppler és Adrienn Bablena. “DEM Calibration: a complex optimization problem”. *2017 international conference on control, artificial intelligence, robotics & optimization (ICCAIRO)*. IEEE. 2017, 198–201. old.
- [29] Vaclav Smilauer és tsai. “Yade documentation”. *arXiv preprint arXiv:2301.00611* (2023).
- [30] Aliakbar Solhjoui, John M Fielke és Jacky MA Desbiolles. “Soil translocation by narrow openers with various rake angles”. *Biosystems engineering* 112.1 (2012), 65–73. old.
- [31] Kurt Spokas és tsai. “SeedChaser: vertical soil tillage distribution model”. *Computers and Electronics in Agriculture* 57.1 (2007), 62–73. old.
- [32] Kornél Tamás és Louis Bernon. “Role of particle shape and plant roots in the discrete element model of soil–sweep interaction”. *Biosystems Engineering* 211 (2021), 77–96. old.
- [33] Kornél Tamás, István J Jóri és Abdul M Mouazen. “Modelling soil–sweep interaction with discrete element method”. *Soil and Tillage Research* 134 (2013), 223–231. old.
- [34] Mustafa Ucgul, John M Fielke és Chris Saunders. “Three-dimensional discrete element modelling of tillage: Determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil”. *Biosystems Engineering* 121 (2014), 105–117. old.
- [35] Mustafa Ucgul és Chris Saunders. “Simulation of tillage forces and furrow profile during soil–mouldboard plough interaction using discrete element modelling”. *Biosystems Engineering* 190 (2020), 58–70. old.
- [36] Mustafa Ucgul, Chris Saunders és John M Fielke. “Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge”. *Biosystems Engineering* 169 (2018), 199–208. old.
- [37] Marton Urban, Krisztian Kotroczy, Gyorgy Kerenyi és tsai. “Investigation of the soil-tool interaction by SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) based simulation.”
-

Power and Machinery. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: agriculture and engineering for a healthier life, Valencia, Spain, 8-12 July 2012. CIGR-EurAgEng. 2012.

- [38] Zhiwei Zeng és tsai. “Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM)”. *Soil and Tillage Research* 197 (2020), 104505. old.
- [39] Liubava Znova és tsai. “A new hoe share design for weed control: measurements of soil movement and draught forces during operation”. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science* 68.2 (2018), 139–148. old.