



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Gép- és Terméktervezés Tanszék

Kultivátorszerszám geometriájának automatizált optimalizálása és validálása

TDK Dolgozat

Készítette

Szabó Bence

Konzulensek

Dr. Tamás Kornél

Hudoba Zoltán

2024. november

Tartalomjegyzék

1. Áttekintés	3
1.0.1. Előzmények	4
2. Irodalomkutatás	5
2.1. Talajkímélő talajművelési módszerek jelentősége és aktualitása	5
2.2. Kultivátorszerszámok bemutatása	6
2.2.1. A kultivátorszerszámok felépítése és működési mechanizmusai . . .	7
2.2.2. Kultivátorok rugós felfüggesztése	7
2.2.3. Kultivátorszerszámok előnye gazdaságosság szempontjából	8
2.3. Diszkrételemes módszer (DEM) és alkalmazása a talajmodellezésben	8
2.3.1. DEM modell kalibrálása a talaj-szerszám kölcsönhatások vizsgálata- tok alapján	9
2.4. Talajművelő szerszámok tervezési és optimalizálási módszerei	10
2.5. Talaj felszíni geometriájának vizsgálata a talajművelés után	11
2.6. Blender Geometry Nodes alapú 3D modellezés	12
2.7. Genetikus algoritmusok elméleti alapjai az optimalizálásban	12
2.8. A szakirodalom hiányosságai	13
3. Célkitűzések	14
4. Anyagok és módszerek	15
4.1. Szerszámmodellek felépítése Blender Geometry Nodes segítségével	15
4.2. Az automatikus szerszámgeometria-optimalizálási környezet bemutatása és beállításai	17
4.2.1. A szerszám-optimalizálás algoritmusának áttekintése	17
4.2.2. DEM szimulációs környezet felépítése	19
4.2.3. Paraméterérzékenység vizsgálatok az időlépés optimalizálására von- tatási ellenállásmérés alapján	21
4.2.4. Alkalmazott talajmodell ismertetése (makro- és mikromechanikai paraméterek)	22
4.2.5. Szimulációk során gyűjtött adatok és vizsgált mennyiségek	23
4.2.6. Fitneszfüggvények felépítése és alkalmazása a geometria optimali- zázásában	25
4.2.7. Genetikus algoritmus paraméterezése	29
4.2.8. A geometriaoptimalizálási folyamatok geometriai peremfeltételei- nek bemutatása	30
4.2.9. Forgalomban lévő kultivátorszerszám tesztelése szimulációs környe- zetben	31

4.2.10. A szimulációk futási idejének optimalizálása	32
4.2.11. A szimulált talajvályú minimális hosszának meghatározása	33
4.3. Laboratóriumi mérések	34
4.3.1. Kultivátorszerszámok gyártási folyamatának bemutatása	34
4.3.2. Mérési környezet felépítése és mérési terv	35
4.3.3. Talaj felszínének 3D szkennelése	37
5. Eredmények	38
5.1. A geometriaoptimalizálási folyamatok eredményeinek elemzése és további fejlesztési irányok	38
5.2. Mérések során megfigyelt szerszámkopás	40
5.3. Mérések és szimulációk során kialakult talajprofilok	42
5.4. Felületmodell és testmodell teljesítményének összehasonlítása szimulált erő- adatok alapján	43
5.5. A mért talajnedvesség	44
5.6. A mért és szimulált talajellenállási erő	44
5.7. A talajmodell korlátainak és pontosságának vizsgálata	46
5.8. A szerszámok vizsgálata szimulációk alapján	47
6. Következtetések	48
7. Összefoglalás - saját munka bemutatása	50
8. Jövőbeli irányok és fejlesztési lehetőségek	51
8.1. További geometriai változatok vizsgálata	51
8.2. Alkalmazási lehetőségek kiterjesztése különböző szerszám-kombinációkra, illetve más szerszámokra	51
8.3. Különböző talajmodellek figyelembe vétele a szerszám hatékonyságának tesztelése során	51
8.4. Optimalizálást végző algoritmus fejlesztése, lecserélése	52
8.5. Számítást végző erőforrás lecserélése	52
9. Hivatkozások	54

Rövidítésjegyzék

3D	Háromdimenziós
2D	Kétdimenziós
CAD	Computer Aided Design
CFD-DEM	Computational Fluid Dynamics - Discrete Element Method
CP	Cone Penetration
CPU	Central Processing Unit
DEM	Discrete Element Method
FDM	Fused Deposition Modelling
FEM	Finite Element Method
GA	Genetikus Algoritmus
GEO	Golden Eagle Optimiser
GN	Geometry Nodes
GPU	Graphics Processing Unit
min-till	minimális mechanikai talajművelés
MPA	Marine Predator Algorithm
no-till	mechanikai talajművelés nélküli talajművelés
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol
PSO	Particle Swarm Optimisation
PyGAD	Python Genetic Algorithm
SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
STL	Standard Tessellation Language
TBPSO	Trust Based Particle Swarm Optimisation

Jelölésjegyzék

η_{twist} [1]	Csavarási súrlódási együttható	C_A [1]	Területi elemkoncentráció, fehér/nemfehér arány
η_{roll} [1]	Gördülési súrlódási együttható	$C_{A,s}$ [1]	Szimulált területi elemkoncentráció
σ_{coh} [Pa]	Normál irányú kohézió	$C_{A,max}$ [1]	Várt maximális területi elemkoncentráció
τ_{coh} [Pa]	Nyíró irányú kohézió	$C_{A,min}$ [1]	Várt minimális területi elemkoncentráció
ψ [rad]	Súrlódási szög	C_V [1]	Térfogati elemkoncentráció, fehér/nemfehér arány
ρ [kg m ⁻³]	Szemcsesűrűség	$C_{V,s}$ [1]	Szimulált térfogati elemkoncentráció
R [m]	Elem sugara	$C_{V,max}$ [1]	Várt maximális térfogati elemkoncentráció
E [Pa]	Rugalmassági modulus	$C_{V,min}$ [1]	Várt minimális térfogati elemkoncentráció
k_n [N m ⁻¹]	Normál irányú rugómerevség	R_{Coh} [N]	Felbomlott és összes kohéziós kapcsolat aránya
k_τ [N m ⁻¹]	Nyíró irányú rugómerevség	$R_{Coh,s}$ [N]	Szimulált felbomlott és összes kohéziós kapcsolat aránya
α [°]	Ráillesztési szög	$R_{Coh,max}$ [N]	Várt maximális felbomlott és összes kohéziós kapcsolat aránya
β [°]	Lazítószög	$R_{Coh,min}$ [N]	Várt minimális felbomlott és összes kohéziós kapcsolat aránya
β' [°]	Lazítószöget jellemző szög	f [1]	Fitneszérték
γ [°]	Nyílásszög	f_W [1]	Munka fitneszérték
h_0 [mm]	Szerszámmagasság	f_{C_A} [1]	Területi elemkoncentráció fitneszérték
h_1 [mm]	Szerszámtalp magasság	f_{C_V} [1]	Térfogati elemkoncentráció fitneszérték
h_2 [mm]	Szárnymagasság	$f_{F_{Coh}}$ [1]	Kohézió fitneszérték
b_0 [mm]	Munkaszélesség	Δt_{cr} [1]	Rayleigh féle kritikus időlépés
b_1 [mm]	Kapaszár szélesség	w_W [1]	Munka fitneszérték súlya
r_1 [mm]	Hegyrádiusz	w_{C_A} [1]	Területi elemkoncentrációs fitneszérték súlya
r_2 [mm]	Hátrádiusz	w_{C_V} [1]	Térfogati elemkoncentrációs fitneszérték súlya
G_n [mm]	G pont normál irányú eltolása	$w_{F_{Coh}}$ [1]	Kohézió fitneszérték súlya
G_t [mm]	G pont tangenciális irányú eltolása	$\bar{F}_{l_{b,2}}$ [N]	Szerszámra ható átlagos erő a vizsgált szakaszon
F_n [mm]	F pont normál irányú eltolása	W [J m ⁻²]	Szerszám munkája
F_t [mm]	F pont tangenciális irányú eltolása	W_s [J]	Szimulált szerszámmunka
W_{max} [J]	Várt maximális szerszámmunka		
W_{min} [J]	Várt minimális szerszámmunka		

1. Áttekintés

A talajvédelem központú talajművelési módszerek jelentősége az 1970-es évektől kezdve növekszik, a 2010-es évektől klímaközpontú talajművelési célokat kell kitűzni [9]. Ennek következményeként a hagyományos, forgatásos talajművelést egyre inkább felváltja a talajkímélő talajművelési módszerek, mint a "min-till" (minimális mechanikai talajművelés), és a "no-till" (mechanikai talajművelés nélküli talajművelés). A min-till módszer alkalmazása során a kultivátorszerszámok kiemelt szerepet kapnak, mivel ezek a szerszámok képesek úgy lazítani a talajt, hogy azt ne forgassák, ne keverjék, ezzel minimalizálva a talaj károsodását. A min-till talajművelés jelenleg egy intenzíven kutatott terület, melyben szerepet kap a művelőszerszámok (például a kultivátorszerszámok) geometriájának optimalizálása, is.

A szántóföldi kultivátorszerszámok legfeljebb 15 cm mélyre hatolnak a talajba. Ezeket tarlókántásra, magágykészítésre, sorközművelésre, lazításra, gyomirtásra, felszínalakításra alkalmazzák anélkül, hogy túlzottan keverné vagy forgatná a talajt. Ezen feladatokat optimális esetben minimális energiafelhasználással kell végrehajtania. Az ilyen szerszámok optimális geometriájának meghatározása rendkívül fontos kérdés, azonban a különböző geometriai kialakítások fizikai tesztelése költséges és időigényes folyamat. Mivel a szerszámokat le kell gyártani, és különböző talajtípusokban kellene kipróbálni különböző talajállapotok (nedvességtartalom, tömörödöttség, kötöttség) mellett.

A fizikai vizsgálatok empirikus modellek fejlesztéséhez vezethetnek, amelyek a – forgácsolószerszámokhoz hasonlóan – becsülhetik a szerszámok viselkedését. Léteznek analitikus módszerek is a talajművelő szerszámok talajban történő viselkedésének modellezésére, azonban ezek csak korlátozott módon, vagy egyáltalán nem képesek figyelembe venni a talaj inhomogén természetét és a szerszám összetett geometriáját.

Emiatt numerikus szimulációk alkalmazása javasolt, amelyek lehetőséget adnak a szerszám-geometria és a talaj heterogenitásának pontosabb figyelembevételére. Egyre szélesebb körben elfogadott a diszkrétéleemes módszer (DEM) szemcsés anyagok, így a talaj modellezésére is. A talaj-szerszám kölcsönhatásának vizsgálatához a legnagyobb kihívást a talaj modelljének minél pontosabb beállítása jelenti. Mivel a DEM modellezés során csak a szemcsés anyag két eleme közötti kapcsolati paraméterek (mikromechanikai jellemzők) definiálhatók, ezért a fizikai kísérletek során a valós halmazszintű viselkedést (makromechanikai jellemzőket) kell vizsgálni, majd a szimulációk során a kapcsolati paramétereket úgy kell beállítani, hogy a szimulált anyag hasonlóan viselkedjen a valós talajhoz.

Ha a talajmodell pontosan reprezentálja a talaj olyan fizikai tulajdonságait, mint a talajmozgás, a tömörödés, valamint a kohéziós és súrlódási jellemzők, amelyek kulcsszerepet játszanak a talaj-szerszám kölcsönhatásokban, az megfelelő alapot biztosít a talajművelő szerszámok talajban kifejtett hatásának szimulációs teszteléséhez. Ezáltal lehetőség nyílik a különböző szerszámgeometriák összehasonlítására és értékelésére. Egységes szempont-

rendszer alapján ezek a geometriák optimalizálhatók is, például genetikus algoritmusok (GA) segítségével, amelyek célja a lehető legjobban teljesítő szerszámgeometriák megtalálása.

Az optimalizálási folyamat automatizálása jelentős előrelépést hozhat a szerszámfejlesztésben. Ehhez 3D modellező szoftverek, DEM szimulációk és célfüggvény alapú teljesítményértékelés használható, ahol az eredmények folyamatosan vissza vannak csatolva a tervezési lépésbe. Ezzel a módszerrel különböző talajmodellekben számos szerszámgeometriát tesztelhetünk, és a legjobban teljesítő változatokat kiválaszthatjuk. Az optimalizált geometriák később fizikai mérésekkel ellenőrizhetők, hogy a szimulációk mennyire felelnek meg a valós viszonyoknak.

A dolgozatom célja az általam fejlesztett automatizált szerszámgeometria-optimalizálási módszerek bemutatása, valamint a tervezett szerszámok tesztelése valós fizikai környezetben. Részletesen ismertetem a használt szoftvereket, algoritmusokat és eszközöket, továbbá bemutatom az alkalmazott szimulációs és optimalizációs eljárásokat, kitérve a felmerülő korlátokra is. Elemzem a legjobban teljesítő geometriai változatokat. A legjobbnak bizonyuló szerszámokat legyártom, tesztelem és összehasonlítom a szimulációs eredményekkel. Végül levonom a következtetéseket, és felvázolom a módszer továbbfejlesztésének lehetséges irányait a pontosság további növelése érdekében.

1.0.1. Előzmények

Kutatásaimat a talaj-szerszám kölcsönhatásának vizsgálata területén 2021 nyarán kezdtem a talajfelszín alatti talajmozgások jellemzésével. 2023-ban kezdtem foglalkozni a talajművelő szerszám geometriájának automatizált optimalizálásával. Akkor egy kezdetleges szimulációs környezetet fejlesztettem, melyben egy négy háromszögelemre egyszerűsített 5 paraméterrel leírható szerszám optimalizálási folyamatát mutattam be. Akkor a geometriaoptimalizálási módszer működésének alapjainak lefektetésén volt a hangsúly. Jelen dolgozatban építék abban a dolgozatban bemutatott szimulációs környezet alapjaira, azonban szinte minden részletét újragondoltam, továbbfejlesztettem, finomítottam beleértve a szerszámmodellt, a fitness függvényt, az anyagbeállításokat. Szakirodalmi áttekintésemet pedig frissítettem és kiegészítettem még relevánsabb információkkal.

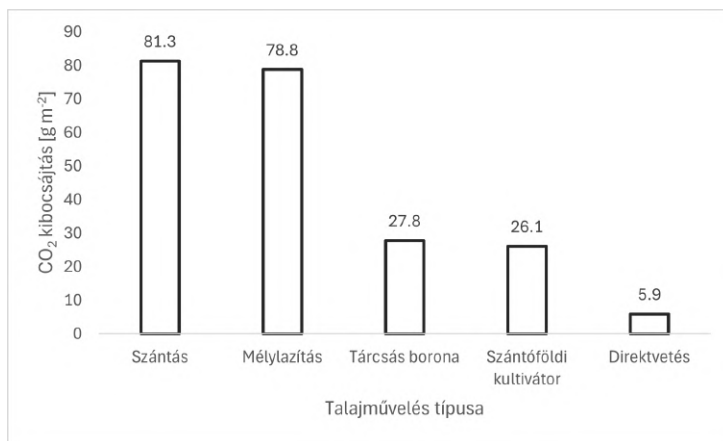
2. Irodalomkutatás

2.1. Talajkímélő talajművelési módszerek jelentősége és aktualitása

A növényközponrtú talajművelés célja olyan talajművelési gyakorlatok alkalmazása, amelyek elősegítik a növények optimális növekedését a termésátlag növekedésével. Azonban ez a megközelítés gyakran a talaj és a környezet kárára mehet, mivel a talaj tápanyagtartalmának kimerítésével és a talajszerkezet romlásával járhat.

Ezzel szemben a talajközponrtú talajművelési módszerek a talaj hosszú távú termékenységének megőrzésére és a talajpusztulás, erózió megelőzésére összpontosítanak. Ez a megközelítés elősegíti a talaj szerkezetének és biológiai aktivitásának fenntartását, azonban nem veszi figyelembe a talajművelés klímaváltozásra gyakorolt hatásait.

A klímaközponrtú talajművelés célja [9], hogy a mezőgazdasági tevékenységek során olyan gyakorlatokat alkalmazzanak, amelyek mérséklrik a talajra és a környezetre gyakorolt negatív hatásokat, és hozzájárulnak az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentéséhez. Ez a megközelítés a talaj szén-dioxid-kibocsátásának mérséklésére és szénmegkötő képességének növelésére törekszik. A 1. ábra például bemutatja, hogy különböző művelési módok esetén mennyi széndioxid kerül a légkörbe. A fenntartható mezőgazdaság célja, hogy mérsékelje a klímaváltozás negatív hatásait és elősegítse a károk helyreállítását.



1. ábra. A CO₂ kibocsátás (g/m²) különböző művelési módok esetén [33].

Az Európai Unió hosszú távú célkitűzései között szerepel a mezőgazdaság által károsított talajok helyreállítása, különös tekintettel a talajok biológiai aktivitásának növelésére [2]. Ez részben a mechanikai talajművelés minimalizálásával érhető el. A klímakímélő talajművelésben olyan technikák, amelyek intenzíven forgatják vagy keverik a talajt, mint például a szántás és tárcsázás, kerülendő. Ehelyett az olyan stratégiák, mint a minimális talajművelés (min-till) és a mechanikai talajművelés nélküli művelés (no-till) kerültek előtérbe. A min-till rendszer esetében csak sekély, legfeljebb 10 cm mély művelés történik

a vetőágy készítésére, míg a no-till rendszerben egyáltalán nincs mechanikai bolygatás, a tarlóba direktvetés történik.

A minimális talajműveléshez speciális kialakítású szerszámok szükségesek, amelyek minimális mértékben bolygatják a talajt, ezáltal segítik a talaj szerkezetének és vízmegtartó képességének megőrzését. Az ilyen eszközök közé tartoznak például a lúdtalp alakú kapák, késes lazítók és kapás vetőgépek, amelyek a talaj károsítása nélkül járulnak hozzá a növénytermesztéshez [46]. A dolgozat további fejezeteiben a kultivátorszerszámról lesz szó.

2.2. Kultivátorszerszámok bemutatása

A kultivátorozás a talajművelés egyik alapvető művelete [32], amely során a talajforgatás nélkül történik annak lazítása és gyommentesítése. A kultivátorozás célja továbbá a talajfelszín előkészítése, valamint a talaj tápanyag-ellátottságának elősegítése, például a műtrágya talajba dolgozásával. E művelet során csökkennek a felszíni egyenetlenségek, javul a talaj hő- és vízgazdálkodása, valamint a kapásnövények (pl. kukorica, napraforgó) sorai között a gyommentesítés és lazítás is megvalósul. A kultivátorok különböző típusai és funkciói lehetővé teszik a különféle talajművelési igényekhez való alkalmazkodást, így a megfelelő eszköz kiválasztása alapvető a sikeres talajkezeléshez.

A különböző kultivátor típusokat a művelés célja alapján és a művelési mélység függvényében különböztetjük meg [12, 20]:

A szántóföldi kultivátor ideális tarlókántásra és magágykészítésre, főleg sekély rétegben, legfeljebb 15 cm mélységben vontatják. A szántóföldi kultivátorok lehetnek függesztett, félig függesztett vagy vontatott kivitelűek. Kisebb mértékű talajkeverést végeznek, és elsődlegesen a felső talajréteg aprítására, lazítására szolgálnak.

A nehéz kultivátor különösen a nehéz talajviszonyokhoz tervezett eszköz, amely száraz talajok művelésénél is kielégítő eredményt ad. Mélyebb rétegekben (15-25 cm) is megfelelő munkát végez. A nyári és nyár végi művelési munkákhoz előnyösen használható.

A középmély lazítót olyan műveletekhez alkalmazzák, ahol az altalaj és a felső művelt réteg közötti kapcsolat javítása szükséges. A középmély lazító általában 25-50 cm mélységig lazítja a talajt. A művelet javítja a gyökerek behatolását a mélyebb talajrétegekbe, valamint javítja a talaj vízbefogadó képességét.

Mélylazító/altalajlazító: Ez a típus 50-90 cm mélységig lazít, és az altalaj tömörödését csökkenti. Alkalmazása különösen fontos azokon a területeken, ahol a sokéves öntözés és művelés következtében a talaj alsó rétegei is tömörödtek. A mélyebb talajlazítással növelhető a talaj vízbefogadó képessége és a növények gyökérzete is könnyebben hatol mélyebbre.

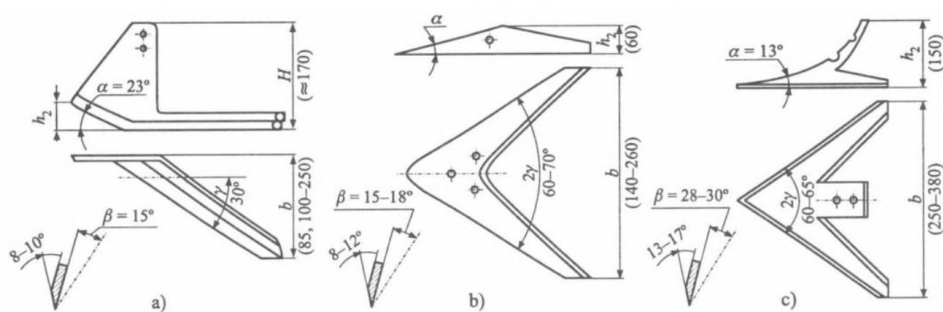
A szárnyas lazító 20-40 cm mélységig dolgozik. Az egyenletes lazítás érdekében nagyméretű lúdtalpkapával van felszerelve, és különösen hasznos szikes vagy savanyú erdőta-

lajok kezelésére. A forgatásmentes művelés miatt megőrzi a talajréteg természetes szerkezetét.

Sorközművelő kultivátor: Ezt a típust kifejezetten kapásnövények sorai közötti művelésre tervezték. Szántóföldi kultivátorhoz hasonlóan működik, de a művelőtagokat úgy helyezik el, hogy ne érintkezzenek a sorokban növő kultúrnövényekkel. A szerszámok túlfedéssel kerülnek felszerelésre (35-50 mm átfedéssel), ami biztosítja a tökéletesebb gyomirtást. A növényektől 6-35 cm-es távolságra dolgozik, így minimalizálva a sérülés kockázatát.

2.2.1. A kultivátorszerszámok felépítése és működési mechanizmusai

Feladattól függően különböző kultivátorgeometriákat alkalmaznak. Például saraboló és gyomirtó szerszámokat, lazítószerszámokat, töltögető és barázdahúzó szerszámokat. A sarabolószerszámok feladata a gyomirtás, lazítás. Ezen munkájukat egyidejű, kismértékű keveréssel végzik. Változataik láthatóak a 2. ábrán: az egyoldalas vagy L alakú, a kétoldalas vagy lúdtalp alakú, illetve a nyíl alakú kapák.



2. ábra. Kultivátorszerszámok: a) L alakú, b) nyíl alakú, c) lúdtalp alakú. Az ábrán lévő szögek jelentései: α : ráillesztési szög, β : lazítószög, γ : nyílásszög [32].

A szerszámokkal szembeni alapkövetelmény, hogy eltömődésmentesen működjenek, a kultúrnövényeket ne szórják be földdel, és minimalizálják a gyomgyűjtő hatást. Különösen fontos követelmény az is, hogy a művelés utáni felszín egyenletessége megmaradjon, a barázdáltság alacsony legyen.

2.2.2. Kultivátorok rugós felfüggesztése

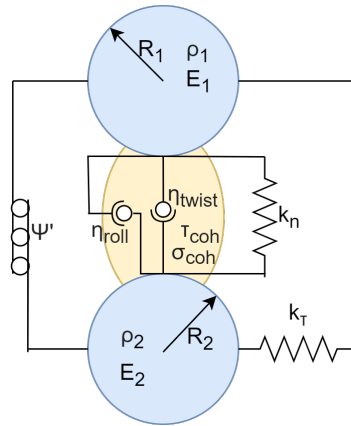
A kultivátorok rugós felfüggesztése javítja a talaj porhanyítási hatékonyságát, és a vonóerőigény is alacsonyabb lehet akár 10-15%-kal. A rugós rendszerek viszont egyenlőtlen munkamélységhez vezethetnek, mivel a fogak hátrahajlanak, így merev szárú felfüggesztés szükséges a kötöttebb talajok megmunkálásához. A rugós felfüggesztéssel rendelkező kapák további előnye még, hogy a növénymaradványokat jobban elhagyják, ezért nehezebben tömődnek el.

2.2.3. Kultivátorszerszámok előnye gazdaságosság szempontjából

A kultivátorozás különösen előnyös a forgatásos talajműveléssel szemben gazdaságosság szempontból is, mivel kisebb az energiaigény az azonos talajkeresztmetszet megműveléséhez. Ezzel a módszerrel kisebb költségek mellett művelhető a talaj, ami különösen fontos az energia- és üzemanyagárak emelkedését tekintve.

2.3. Diszkréttelemes módszer (DEM) és alkalmazása a talajmodellezésben

A diszkréttelemes módszer (DEM) egy numerikus szimulációs eljárás, amely kifejezetten szemcsés anyagok, így például a talaj modellezésére is alkalmas [8, 11]. A szemcsés anyagot gyakran egyszerűsítve gömbökkel modellezzük. A DEM-et gyakran alkalmazzák a talaj és a talajművelő szerszámok kölcsönhatásának vizsgálatára is. A módszer egyik legnagyobb kihívása a megfelelő anyagmodell kiválasztása és annak kalibrációja, mivel a szemcsés anyag tulajdonságait csak a modellben létező kapcsolati paraméterek (3. ábra) segítségével lehet beállítani, amelyek fizikai úton közvetlenül nem mérhetők. A kalibráció során ezeknek a modellbeli mikromechanikai tulajdonságoknak a beállításával lehet elérni, hogy a szemcsés anyagmodell makroszinten modellezze a valós szemcsés anyag viselkedését.



3. ábra. Két diszkréttelelem 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 modelljének mikromechanikai paramétereinek megtalálásához először makromechanikai jellemzőket kell mérni laboratóriumi vagy terepi vizsgálatok során. Ezeket a vizsgálatokat diszkréttelemes módszerrel szükséges modellezni, úgy, hogy ugyanazon fizikai

menntiségek váljanak vizsgálhatóvá a modellezett környezetben, mint a fizikai mérések során. A kalibrációhoz gyakran penetrációs, nyíróvizsgálatot vagy dinamikus, illetve statikus rézsűszögvizsgálatot, esetleg ezek kombinációját alkalmazzák [39, 47].

Problémát jelenthet azonban a paraméter-többsértelműség jelensége, amikor nem több különböző makromechanikai jellemző alapján történik a talaj kalibrációja [34, 4, 35]. Ez azt jelenti, hogy egyazon makromechanikai jellemző több különböző mikromechanikai paraméterkombinációval modellezhető.

2.3.1. DEM modell kalibrálása a talaj-szerszám kölcsönhatások vizsgálatok alapján

A talaj és a talajművelő szerszám kölcsönhatása során mérhető makromechanikai jellemzők alapján is kalibrálható a talaj. Például a talajban húzott szerszámmra ható vontatási ellenállás és a kialakult talajfelszín alapján. Vagy a talaj belső mozgásait jellemző mennyiségek alapján [31, 43, 17].

A talaj és a szerszám kölcsönhatásának vizsgálatánál lényeges, hogy olyan kapcsolati modell legyen kalibrálva, amely képes modellezni a talaj domináns fizikai jelenségeit, például az elemek közötti súrlódást, kohéziót, talajsűrűséget és tömörödést.

Jelenleg azonban kevés az olyan kalibrált talajmodell, amelyet széles körben alkalmazhatnánk, és hiányzik egy megbízható talajmodell-adatbázis is. Jelenleg úgy tűnik, minden alkalmazási esetre újabb talajmodell-kalibráció szükséges.

Az is probléma, hogy a kalibrált talajmodellek nem minden fizikai tulajdonságot modelleznek azonos pontossággal egyszerre. Például míg a vontatási ellenállás értékei nagy pontossággal modellezhetők, a talaj valós mozgását, amely művelés közben jelentkezik, kevés kutatás veszi figyelembe. A paraméter-többsértelműség jelensége miatt többféle paraméterkombináció is hasonló vontatási ellenállást eredményezhet a szimulációban, eltérő talajmozgás mellett.

Asaf és szerzőtársai (2007) talajművelés modellezéséhez DEM talajmodell paramétereit határozták meg különböző talajba hatoló szerszámokkal szemben mért erő-elmozdulás adatok alapján [6]. A mért adatokat összehasonlították numerikus eredményeikkel, melyek hasonlóságot mutattak egymással.

Nalawade és szerzőtársai (2023) hiszterézises rugós DEM talajmodellt kalibráltak alapvetően penetrométeres vizsgálatok alapján, majd validációként a modellt alkalmazták talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatában talajjellenállási erő és szerszám mögött kialakult barázda keresztmetszetének becslésére [30]. A szerszámot különböző mélységekben, és sebességek mellett húzták meg. A validációs eredmények alapján a relatív hiba a talajprofilok esetében 0,47 és 21,19% közé esett. A talajjellenállási erőkre vonatkozó relatív hiba értékek a szimulát és mért értékek között 1.7% és 7.21% közé estek. A kutatás eredményei megerősítik a hiszterézises rugós modell alkalmazhatóságát és pontosságát a talaj modellezésében.

2.4. Talajművelő szerszámok tervezési és optimalizálási módszerei

A talajművelő szerszámok optimalizálásával az előző században is sokan foglalkoztak. Ekkor leginkább a talaj és a szerszám kölcsönhatásában a szerszám vontatási ellenállás-szükségletének meghatározására koncentráltak. A talajművelő szerszámokra ható erők előre jelzéséhez mechanikai modelleket használtak.

Például Godwin és Spoor (1977) erő-előrejelzési modellt mutattak be különböző munkamélység/szélesség arányú kapákra vonatkozóan [16]. A Mohr-Coulomb törési kritériumot alkalmazták a talaj törési viselkedésének leírására. A modelljük megfelelő egyezést mutat a kísérleti adatokkal a vízszintes erőkomponensek tekintetében magas nyírási ellenállású talajban. Emellett cikkükben módszert javasolnak a kritikus szerszámmélység becslésére is, amely meghatározza, milyen szerszámmélység esetén változik meg a talaj törési mechanizmusa.

McKyes és Maswaure (1997) felismerték, hogy a talajművelő szerszám lazítóképessége leírható a talajsűrűség változásával [28]. Kutatásukban figyelembe vették a talajművelő eszköz geometriáját, az eredeti talajtulajdonságokat és a nedvességtartalmat is. Terepi kísérletet végeztek, amelyben sík talajművelő eszközök különböző geometriai paramétereinek (dőlésszög, szélesség, munkamélység) hatását vizsgálták a húzóerőigényre, a vágási hatékonyságra és a talajlazításra nedves agyagtalajban. Az eredmények szerint az alacsony húzóerő, a magas vágási hatékonyság és a hatékonyabb talajlazítás érdekében a legkedvezőbb egy körülbelül 30° -os dőlésszögű, keskeny kialakítású eszköz alkalmazása, amelynek mélység-szélesség aránya legalább 2:1. Méréseiket körülbelül 5 km h^{-1} sebességgel végezték.

A számítástechnika fejlődése tette lehetővé, hogy a talaj és szerszám kölcsönhatásának vizsgálatában numerikus szimulációkat alkalmazzanak [26]. Például véges elemes módszert (FEM) [18], Számítógépes áramlástani szimulációt (CFD) [22], illetve DEM-et.

Schmulevich. és szerzőtársai (2007) DEM-et használták a talaj-szerszám kölcsönhatás modellezésére [36]. Kutatásukban négy különböző penge alakját elemezték szimulációk és kísérletek segítségével, amelyek szoros összefüggést mutattak, különösen a vízszintes erőre vonatkozóan. A szimulációk arra is rámutattak, hogy a penge alatt áramló talaj befolyásolhatja a vertikális erőt, amelyet a klasszikus talajmechanikai elméletek nem vesznek figyelembe.

Hoseinian és szerzőtársai (2022) DEM-et alkalmaztak a "dual bent blade" talajművelő szerszám hatékonyságának javítására [19]. Különböző geometriai paraméterek, mint a munkaszélesség, a vágási szög és a szárny szög hatását vizsgálták a szerszám teljesítményére, beleértve a vontatási ellenállást és a talajelemek között szétszakadt és megmaradt kohéziós jellegű kötések arányát.

Tong és szerzőtársai (2020) DEM-et alkalmaztak öt különböző geometriával rendelkező mélylazító talaj-szerszámok kölcsönhatásának vizsgálatára [44]. A talajellenállás és

talajbolygatási tulajdonságok alapján keresték a legideálisabb szerszámot alacsonyabb energiafogyasztású mélylazító azonosításához.

Ucgul és szerzőtársai (2017) kutatásban egy 1/3 méretarányú ekét készítettek és teszteltek DEM-ben és valós talajvályúban is, ahol a vontatási erőt, a függőleges erőt és a talajmozgást vizsgálták, hogy optimalizálják az eke működését [45]. A tesztelt szerszám kormánylemezét ömledékrétegezéssel 3D nyomtatási technológiával (FDM) készítették el ABS anyagból.

Li és szerzőtársai (2016) valamint Sun és szerzőtársai (2020) egy új árokásó eszközt terveztek, amelyet a medvekarmok alacsony ellenállású jellemzői alapján alakítottak ki [38, 25]. DEM szimulációval, a talaj tulajdonságait figyelembe véve, validálták a bionikus árokásó lapát alacsony ellenállású tulajdonságait, és elemezték a különböző tényezők hatását, mint az eszköz szöge, forgási sebessége, előrehaladási sebessége és mélysége. Az eredmények azt mutatják, hogy a bionikus árokásó kisebb energiafogyasztást és alacsonyabb ellenállást mutat, mint a hagyományos árokásó lapátok. A bionikus árokásót le is gyártották fém 3D nyomtatással.

2.5. Talaj felszíni geometriájának vizsgálata a talajművelés után

A talaj felszínének a jellemzése profilmérővel régóta részét képezi a talajművelő szerszámok hatékonyságának vizsgálatának [16]. A mérési elv hátránya, hogy egyszerre egy vonalban képes csak letapogatni a talajfelszínt. Nem veszi figyelembe a profilban lévő esetleges alámetszéseket. Kevés adat áll rendelkezésre a kiértékeléshez, és a kiértékelés manuális munkát kíván. A profilmérő talajjal való érintkezése miatt a felszín deformálódhat, ami további mérési pontatlanságokat eredményezhet.

Az elmúlt években több kutatásban is foglalkoznak a kialakult talajfelszín pontosabb letapogatásával.

Jester és Klik (2005) talajfelszín egyenetlenségét mérték laboratóriumi esőszimulátorban kontakt (láncos profilmérő, tűs profilmérő) és nem kontakt (lézerszkennér, fotogrammetria) eszközökkel, különböző durvaságú talajfelszíneken, esőztetés előtt és után [21]. A módszereket összehasonlították az adatrögzítés, feldolgozási igény, felbontás, pontosság és a felszíni jellemzők ábrázolási képessége alapján, feltárva azok különböző alkalmazási területeit és korlátait.

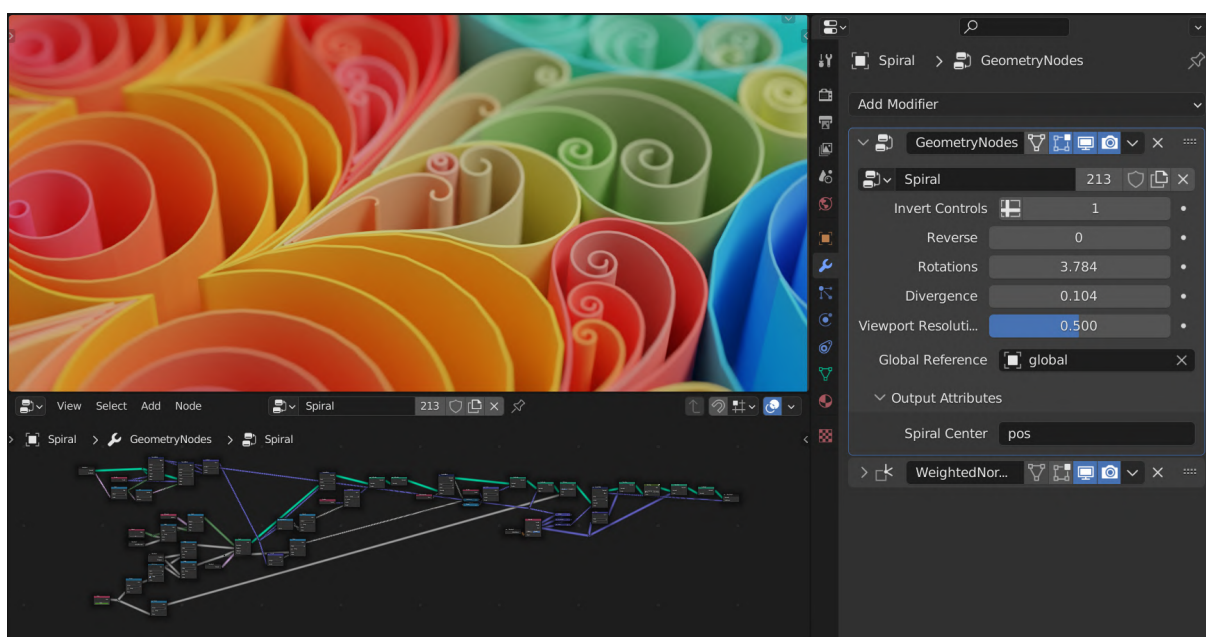
Foldager és szerzőtársai (2019) LiDAR alapú 3D szkenneléssel és analóg módszerrel is vizsgálták a talaj felszínén művelés következtében kialakult barázdák keresztmetszetét [13]. Hangsúlyozzák, hogy az érintkezésmentes mérések pontosabb eredményt hoznak, továbbá a mérések felbontása is nagyobb.

2.6. Blender Geometry Nodes alapú 3D modellezés

A Blender alapvető 3D modellező eszközei elsősorban kreatív és művészi 3D modellek, animációk készítésére optimalizáltak és különösen hasznos komplex felületek és organikus formák generálásához. A Blender procedurális modellező eszköze, a Geometry Nodes (GN) egy új fejlesztés a 3D modellezés terén [1]. Ez a csomópont-alapú modellező rendszer nagy rugalmasságot biztosít a modellek felépítéséhez, miközben paraméterekkel kontrollálhatók az épített háló alapú modell geometriája és méretei.

A modellezés elve az, hogy egy grafikus programozási felület segítségével építhetünk 3D geometriát. A szoftver kész függvényeket kínál csomópontoknak nevezett "panelek" formájában. Minden csomópont specifikus műveletet vagy függvényt képvisel (pl. forma létrehozása, transzformációk, ismétlés, torzítás), melyeket vizuálisan kapcsolunk össze egy grafikus felületen.

A 4. ábra bemutatja a Blender GN felhasználói felületét. A kép bal alsó részén a csomópontháló látható, ami alapján a kép bal felső részén a modellezett eredmény megjelenik. A jobb oldali panel pedig tartalmazza azokat a paramétereket, mellyel a geometria egyes sajátosságai rugalmasan állíthatók.



4. ábra. Blender GN felhasználói felülete [1].

2.7. Genetikus algoritmusok elméleti alapjai az optimalizálásban

A genetikus algoritmus egy keresési technika [5]. 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:

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

Egyed: Egy egyedet 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.

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

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

Szülők: Kiemelkedőbb fitnessértékkel 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 [14]. A dokumentációjában megtalálható számos működéssel kapcsolatos információ túl az algoritmust leíró folyamatára is.

2.8. A szakirodalom hiányosságai

A szakirodalom áttekintése során nem találtam olyan kutatást, amelyben a kultivátorszerszám 3D geometriáját parametrikus, organikus felületekkel írták volna le több, szabadon változtatható paraméterrel. Emellett nem találtam olyan kutatást sem, amely a szerszám-geometria optimalizálását automatikus módon, diszkrétételes módszer (DEM)

alkalmazásával végezték volna. Továbbá nem találtam olyan tanulmányt, amely a kultivátorszerszám után kialakuló talajfelszín geometriáját a DEM szimulációk alapján vizsgálták volna 3D-ben, és összehasonlította volna a fizikai kísérletek során mért felszínprofilokkal. Olyan kutatást sem találtam, ahol egy szerszámgeometria vizsgálata során figyelembe vették volna egyszerre a talajmozgásra, a felszínprofilra, a talajjellenállási erőre valamint az elemek közötti kohéziós kapcsolatok szétszakadására vonatkozó eredményeket. Az áttekintett kutatások között nem szerepelt olyan, amelyben 3D nyomtatással készült kultivátorszerszámokat alkalmaztak fizikai mérések elvégzéséhez.

3. Célkitűzések

Cél egy olyan parametrikus kultivátorszerszámmodell tervezése, mely képes modellezni kereskedelemben kapható szerszámok geometriáját, és lehetőséget nyújt geometriai optimalizációs folyamatra.

A cél, egy szimulációs környezet kialakítása, melyben kultivátorszerszám geometriája automatizáltan optimalizálható szerszám munkájának, a talaj tönkremenetelének és a talaj mozgásának figyelembevételével. További cél a szimulációs idő csökkentése.

Cél a kialakított szimulációs környezetben szerszámgeometriákat optimalizálni valós igények alapján.

Cél az optimalizáció során generált jól teljesítő szerszámok közül két prototípus legyártása FDM nyomtatással és azok fizikai környezetben történő tesztelése.

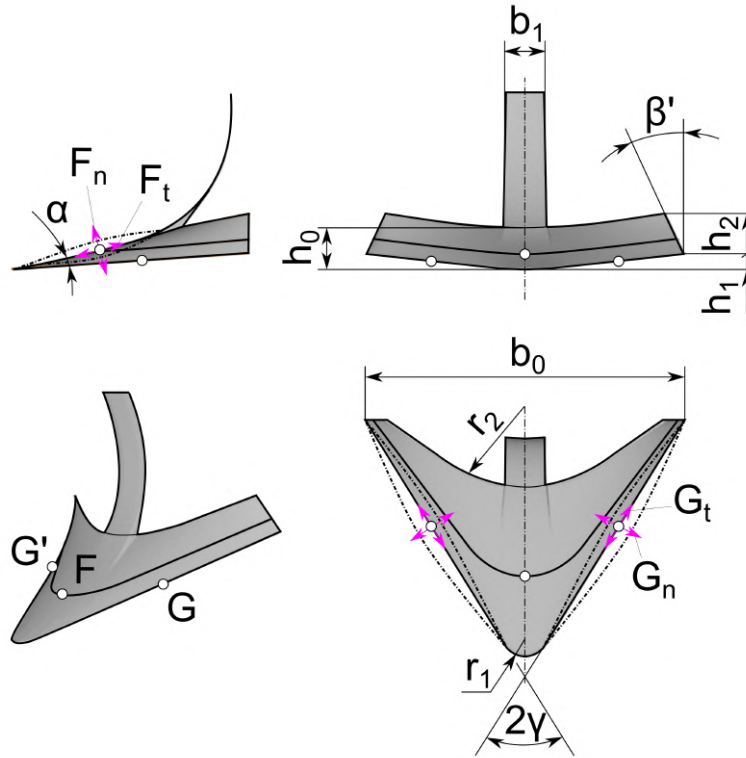
Cél a mérési eredmények összehasonlítása a szimulált eredményekkel.

Cél egy kereskedelemben kapható szerszám (Framest) teljesítményének vizsgálata és teljesítményének összehasonlítása a prototípuszerszámokéval.

4. Anyagok és módszerek

4.1. Szerszámmodellek felépítése Blender Geometry Nodes segítségével

A kultivátorszerszámok geometriájának optimalizálásához fejlesztettem egy parametrikus 3D modellt Blender GN 3D modellező eszköz segítségével. A Blenderben kifejlesztett 3D modell alapját a szakirodalomban megtalálható kultivátorszerszámok geometriái képezik, amelyeket továbbfejlesztettem és újabb elemekkel bővítettem. A modellezett szerszámgeometria 14 különböző paraméterrel definiálható. Ezek a paraméterek lehetővé teszik a szerszám geometriájának rugalmas szabályozását, amely így különböző talajtípusokhoz és művelési körülményekhez igazítható. Az 5. ábrán látható az általam fejlesztett 3D kultivátorszerszám modell, mely tartalmazza az egyes geometriai elemeket meghatározó paramétereket, mint a ráillesztési szöget (α), a lazítószöget (β'), a nyílásszöget (2γ), valamint a szerszám különböző szélességeit és magasságait (b_0 , b_1 , h_0 , h_1 , h_2), továbbá a hajlított geometriai elemekért felelős pontok eltolásait (G_n , G_t , F_n , F_t).



5. ábra. Blender alkalmazás segítségével épített parametrikus 3D kultivátorszerszám geometria. Az ábra tartalmazza a paramétereket, melyek pontosan meghatározzák a geometriát: α : ráillesztési szög, β' : lazítószöget jellemző szög, 2γ : nyílásszög, h_0 : szerszám magasság, h_1 : szerszám talp magasság, h_2 : szárny magasság, b_0 : munkaszélesség, b_1 : kapaszárszélesség, r_1 : hegyrádiusz, r_2 : hátrádiusz, G_n : G pont normál irányú eltolása, G_t : G pont tengenciális irányú eltolása, F_n : F pont normál irányú eltolása, F_t : F pont tengenciális irányú eltolása.

Ugyanakkor jelenleg a modell csupán egy felülettel rendelkezik, amelynek még nincs vastagsága. Ez a szimulációk során egyrészt hasznos, mert a kevesebb elemből álló szerszámgeometria tesztelése gyorsabb, másrészt ez egy geometriai egyszerűsítés, mely hat az eredményekre, ami problémát jelenthet, hiszen a valós szerszámok anyagi vastagságot igényelnek. Ezt a 3D modell továbbfejlesztésével lehetne kezelni, például a felület vastagságának bevezetésével.

A Blender egy rendkívül hatékony eszköz az ilyen nagy szabadságfokkal rendelkező organikus geometriák, illetve szabadfelületek alkotta parametrikus modellek készítésének a folyamatában. Külön jó, hogy Python szkriptekkel automatizálható a kész Geometry Nodesban készült szerszámgeometriák generálása. A háttérben futtatható szkriptek lehetővé teszik, hogy a bemeneti paraméterek alapján automatikusan generáljunk STL formátumú fájlokat a 3D modellt alkalmazva, amelyek közvetlenül felhasználhatók a szimulációkhoz.

A szerszám geometriájának felépítését a 6. ábrán látható logika szerint készítettem el a Blender Geometry Nodes eszköz segítségével, az alábbi lépések mentén:

I. Kezdetben pontokat definiáltam a térben, amelyek meghatározzák a szerszám működési felületének alapvető határait.

II. A pontokat éllel kötöttem össze, így három meridiángörbét alakítottam ki, amelyek a szerszám fő geometriáját meghatározzák.

III. A létrehozott éleket lekerekítettem.

IV. Az élék közé felületet feszítettem ki.

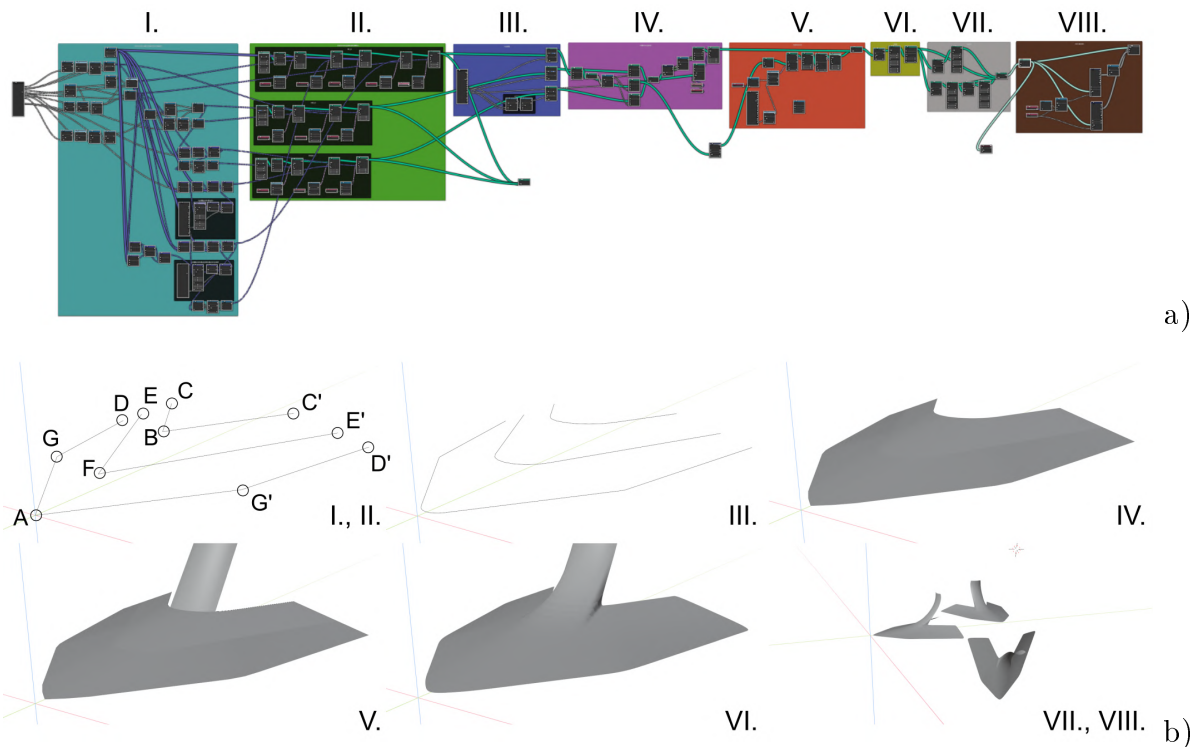
V. Elkészítettem a szerszám szárának modelljét.

VI. További simítást végeztem a felületen.

VII. Különböző nézeteket alakítottam ki a szerszámról, ezzel megkönnyítve a geometria áttekinthetőségét a tervezési folyamatban.

VIII. Végül lehetővé tettem a szerszám geometriai adatainak lekérdezését, például a szerszám felületének nagyságára vonatkozóan, amely fontos lehet a tervezési és optimalizálási folyamatokhoz.

A létrehozott szerszámgeometriát a Blender Geometry Nodes közel 140 csomópontja írja le. Ezek biztosítják a szerszámgeometria komplexitását és a modell rugalmasságát.



6. ábra. Az organikus felületek alkotta parametrikus kultivátorszerszám modelljének felépítésének logikája. a) A szerszámgeometriát leíró csomópontstruktúra. b) A szerszámgeometria alakulásának lépései.

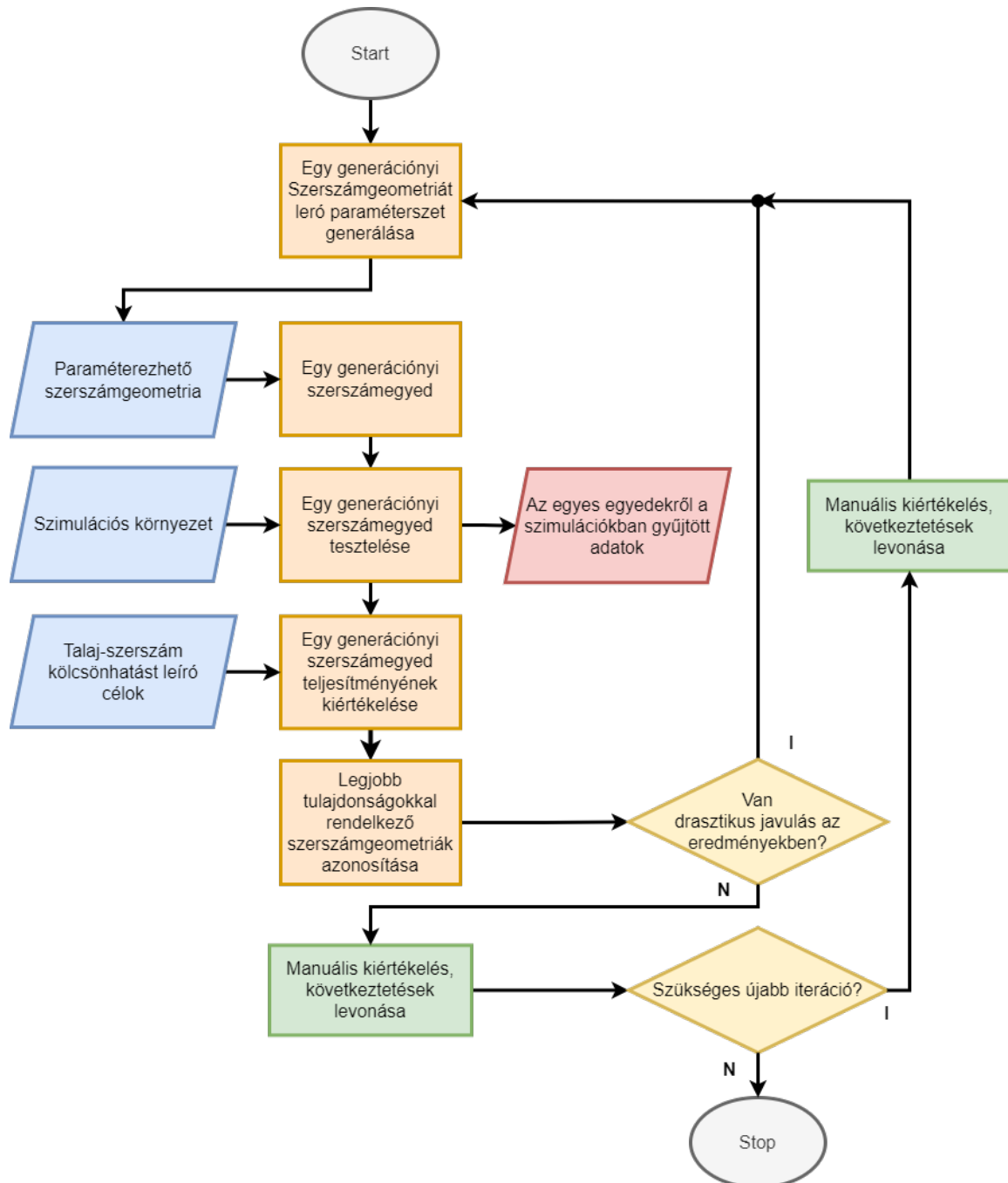
A 3D modell fejlesztésében egy következő lépés lehet a szimulációk eredményeinek felhasználásával esetleg újabb "alaksajátosság" bevezetése. A modell egy korlátja még, hogy a kapaszár szélessége a modell felépítéséből eredően kissé függ a kapa más geometriai elemeinek méretétől, így az egyes esetekben az a megadott névleges értéktől való néhány mm-es eltérést mutathat. Ez biztosan hatással van a szimulációs eredményekre.

4.2. Az automatikus szerszámgeometria-optimalizálási környezet bemutatása és beállításai

4.2.1. A szerszám-optimalizálás algoritmusának áttekintése

Szerszám-optimalizálási folyamat algoritmusát mutatja be a 7. ábra. A szerszámgeometria optimalizálásához szükséges egy 3D modell, amelyet egy paramétersor segítségével lehet állítani. Ezen modell alapján különböző szerszám-geometriai egyedek generálhatók. Ezt követően célok kerülnek meghatározásra a szerszám talajban kifejtett hatására vonatkozóan. A generált szerszámok szimulációs tesztelésen esnek át a diszkrét elemes módszer (DEM) alkalmazásával, és az eredmények alapján meghatározásra kerül, hogy melyik geometria teljesíti legjobban a definiált célokat. A jól teljesítő geometriák egyes geometriai jellemzőinek megtartásával, illetve kis mértékű módosításával újabb szerszám-

geometriák (egyedek) definiálására kerül sor. Ez az iteratív folyamat addig ismétlődik, amíg jelentős változás figyelhető meg a legjobb szerszámok teljesítményében. Amikor már nem észlelhető további fejlődés, az optimalizálás eredményeit ki kell értékelni, és le kell vonni a szükséges következtetéseket. Majd az optimalizációs folyamatba történő újabb paraméterek bevonásával, törlésével, meglévő paraméterek intervallumainak bővítésével az optimalizálási folyamat folytatható.



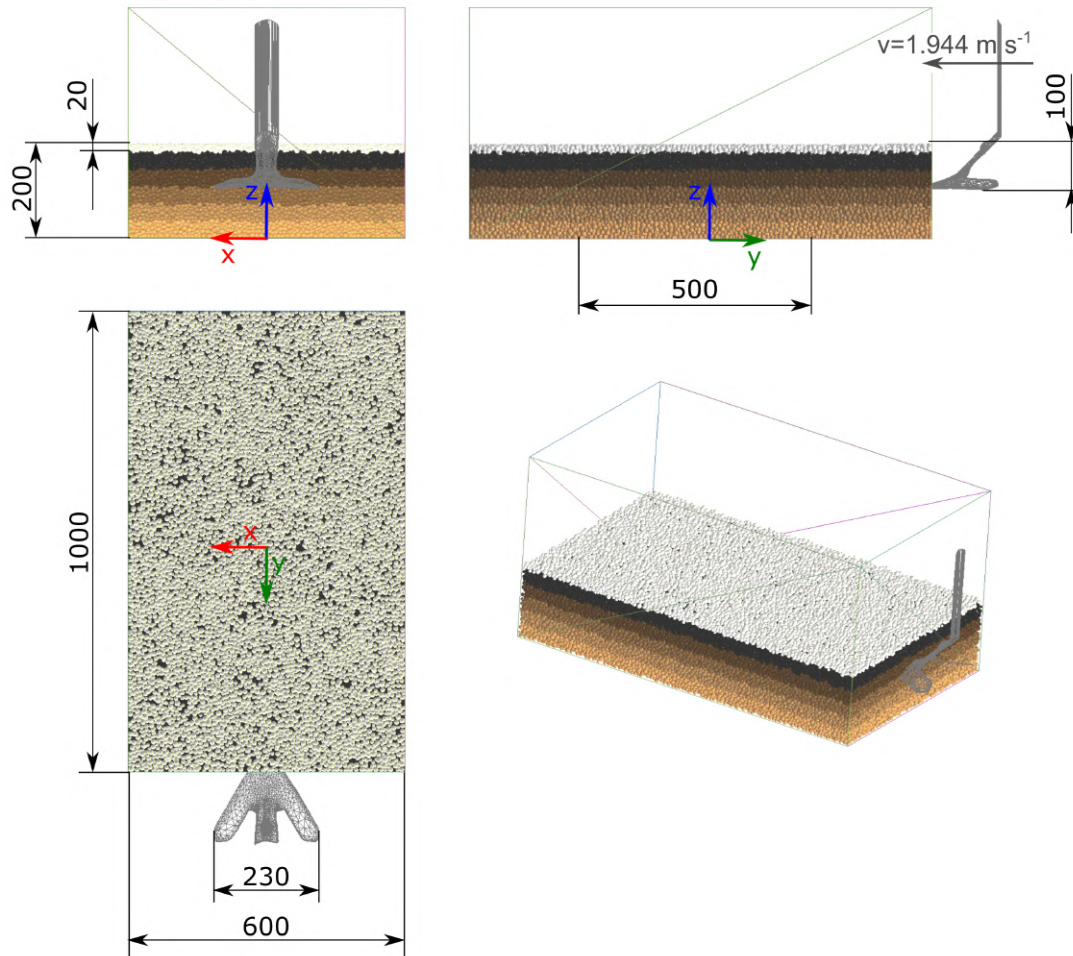
7. ábra. Szerszám-optimalizálási folyamat algoritmus. A narancssárga folyamatok automatizáltak, míg a zöldek manuálisak.

Ezt a tervezési illetve optimalizálási folyamat részben automatizáltam. A szimulációt Pythonban programozási nyelv alkalmazásával írtam meg. A parametrikus szerszám-geometriát a Blender [10, 1] GN 3D modellezőeszköze segítségével hoztam létre, míg a geometria-optimalizálást genetikussal (PyGad) hajtottam végre [15]. A szerszámokat diszkrét elemes módszerrel teszteltem Yade-DEM szimulációs környezetben [37]. A szerszámok teljesítményének értékeléséhez a szerszám feladata és a szerszámmal szemben elvárt követelmények alapján célfüggvényeket definiáltam. A manuális eredménykiértékelés során a Paraview [3, 7] és a Matlab [27] és MS Excel szoftverkörnyezetet alkalmaztam.

4.2.2. DEM szimulációs környezet felépítése

A Yade-DEM szoftver keretein belül végeztem a talaj-szerszám kölcsönhatásának vizsgálatát [37]. Ez a GUI nélküli szimulációs környezet, bár nem túl felhasználóbarát, jól alkalmazható kutatási projektekhez, mivel Python programozási nyelv segítségével közvetlenül programozható. Ez lehetővé teszi a szimulációkba saját függvények írását, amelyek segítségével széleskörű szemcsés anyagok modellezésére irányuló szimulációs feladatokat oldhatunk meg.

A szimulációs környezetet Tamás és Bernon javaslatai alapján alakítottam ki a 8. ábrán látható módon, hogy a talaj-szerszám kölcsönhatásának vizsgálata minél hatékonyabban megvalósítható legyen [42]. A vizsgálathoz egy 1000 mm hosszú, 600 mm széles és 500 mm magas tárolót hoztam létre, amelybe 150000 darab, 5 mm $\pm 30\%$ -os sugarú gömb alakú elemet helyeztem el. A gömböknek sűrűdásos kohéziós anyagmodell (CohFictMat) állítottam be, majd gravitációs ülepítés segítségével, a kohéziós kötések figyelmen kívül hagyásával, a gömböket a tárolóba ülepítettem, míg a kiegyensúlyozatlansági erőhányados (maximális érintkezésből adódó erő és a maximális testenkénti erő aránya a teljes halmazban) el nem érte a 0.01 értéket. Ezt követően eltávolítottam a doboz aljától mérve a 200 mm magasság fölötti elemeket, így összesen 142259 elem maradt a tárolóban. A törlés a megmaradt halmaz elemeinek kisebb mértékű mozgását eredményezi, így újra megvártam, amíg a kiegyensúlyozatlansági erőhányados 0.01-re csökkent. Ezt követően aktiváltam a kohéziós kapcsolatok kialakulását az érintkező elemek között. Az így létrehozott halmaz elemeit megszíneztem. A felső 20 mm-es réteg színét fehérre állítottam, majd a hátramaradó magasságot egyenletesen öt részre osztottam, amelyeket fekete és világosbarna színek között skáláztam, ezzel is elősegítve a későbbi kvantitatív és kvalitatív vizsgálatokat. Az így kialakított halmazt elmentettem, hogy minden szimuláció során azonos geometriával vizsgálhassam a talaj-szerszám kölcsönhatást, ezáltal csökkentve a számítási kapacitás igényt.



8. ábra. Szimulációs elrendezés szemléltetése. A képen látható halmazba éppen behatol a szerszám. Az ábrán lévő mennyiségek mm-ben értendők.

Mivel az általam tesztelt szerszámok szélessége megegyezett Tamás és Bernon által alkalmazottakkal, nem változtattam az általuk használt vályúszélességen sem. A vályúban a szerszámot 100 mm mélységben járattam, így 100 mm talajvastagság maradt a szerszám alatt. Tamás és Bernon vizsgálatai alapján ez a talajvastagság nem befolyásolta szignifikánsan az eredményeket. A szerszám sebességét a művelés sebességéhez igazítottam, így a szerszámot a doboz rövidebbik oldalaihoz képest középen, az y tengely mentén egyenletesen 7 km h^{-1} ($1,944 \text{ m s}^{-1}$) sebességgel húztam végig, amíg a szerszám hegye el nem érte a -0.4 y értéket. Ekkor a szerszámot eltávolítottam a szimulációból, majd újra várakoztam a halmaz ülepedésére, hogy további vizsgálatokat végezhessenek a szerszám által alakított halmazon. A talajmodell ülepedését addig folytattam, amíg a kiegyensúlyozatlansági erőhányados a 0.05 érték alá nem csökkent.

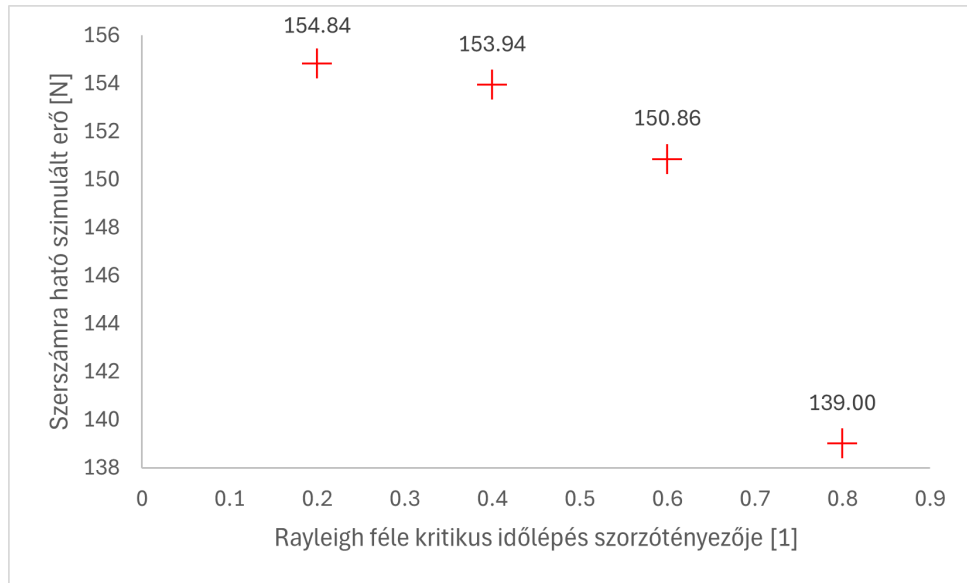
Fontosnak tartom megemlíteni, hogy a kezdeti ülepités során a globális csillapítást 0.2 -re állítottam, míg a talaj-szerszám kölcsönhatások vizsgálata alatt és azután 0 -ra kapcsoltam, mivel ezen szimulációs paraméternek semmilyen fizikai alapja nincsen. Csupán a szimulációs idő csökkentése céljából szokás 0 -nál nagyobb értéket alkalmazni.

4.2.3. Paraméterérzékenység vizsgálatok az időlépés optimalizálására vontatási ellenállásmérés alapján

A szimulációk időlépésének megfelelő kiválasztásához paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztem. A szimulációk során az tapasztalható, hogy a kisebb időlépések esetén az eredmények konvergálnak, ugyanakkor a szimulációs idő jelentősen megnő. Egy bizonyos időlépés felett pedig a szimuláció instabillá válik, ami a szemcsés halmazmodell "felrobbanásához" vezet.

Ezért célszerű olyan időlépést keresni, ahol nincsenek jelentős változások az eredményekben az időlépés csökkentésével a várható határértékhez képest, és a futási idők is rövidebbek. Ennek érdekében különböző időlépések beállításával végeztem szimulációs teszteket. A paraméterérzékenységi vizsgálat során mértem a szerszámmra ható átlagos erőt különböző időlépésszorozók esetén, és ezeket egymás függvényében ábrázoltam 9. ábra szerint. A szimuláció kritikus időlépése a 1. összefüggéssel van meghatározva egyes kapcsolati paraméterek alapján [37].

$$\Delta t_{cr} = \min_i \left(R_i \cdot \sqrt{\frac{\rho_i}{E_i}} \right) \quad (1)$$



9. ábra. Paraméterérzékenységi vizsgálat eredménye. A szerszámmra ható szimulált erő van ábrázolva a Rayleigh féle kritikus időlépés szorzótényezőjének függvényében.

Végül úgy döntöttem, hogy a $0.6 \cdot \Delta t_{cr}$ időállandó elegendő pontosságot biztosít a vizsgálatok elvégzéséhez. A diagramból az olvasható le, hogy az eredmények körülbelül 155 N értékben konvergálhatnak a 0 időlépésszorozóban. Ezen becsült határérték szerint a 0.6-os időlépésszorozó esetén az eredmény 1%-os hibahatáron belül esik. Az is megállapítható,

hogy egyre nagyobb időlépéseket választva a szimulációban mért szerszámra ható erőérték alulbecsült lesz a határértékhez képest.

4.2.4. Alkalmazott talajmodell ismertetése (makro- és mikromechanikai paraméterek)

A fizikai méréseket a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Műszaki Intézetének laboratóriumában található talajvályúban végeztem. Ez ugyanazt a homoktalajt tartalmazza, mint Tamás (2018,2021,2024) tanulmányaiban [40, 42, 41]. A talajvályúban lévő homoktalaj modellezését már korábban Tamás (2024) elvégezte körülbelül 3,96%-os nedvességtartalom esetén, 15 cm-es munkamélység és 0.62 m s^{-1} vontatási sebesség mellett [41]. Tamás (2024) a talajt talaj-szerszám kölcsönhatása során mért vontatási ellenállás alapján kalibrált genetikai algoritmust alkalmazva. Ez paraméter-többértelműséghez vezetett, azaz azonos vontatási ellenállás értéket eredményezett több különböző paraméterezett is. Ezért Tamás (2024) az így kapott talajmodellekkel direkt nyíródobozos szimulációs tesztek is végezt, és összehasonlította korábbi (2021) fizikai mérései eredményeivel [42]. Az ilyen módon kalibrált talajmodell paraméterei találhatóak a 1. táblázatban. A fizikai direkt nyíródobozos vizsgálatok során a kohézió értéke 6,4 kPa, a belső súrlódási szög pedig $32,3^\circ$ volt, 3,96%-os talajnedvesség-tartalom mellett [41]. A szimulált direkt nyíródobozos vizsgálatok eredményei, a 1. táblázatban található paraméterekkel kalibrált talajmodell esetén, 7.018 kPa kohéziót és $29,18^\circ$ -os belső súrlódási szöget mutattak. Ennek megfelelően ezen kutatásban nem foglalkoztam a talaj kalibrálásával, hanem alkalmaztam a 1. táblázatban található kalibrált talajmodellt.

1. táblázat. A talaj-szerszám kalibrálásának eredményei genetikai algoritmmal (GA) a gömbökből álló halmaz esetében, 0.62 m s^{-1} sebesség 15 cm szerszámmélység mellett. A táblázat azt a paraméterkombinációt tartalmazza, mely legközelebb áll a laboratóriumi direkt nyíródobozos vizsgálatok eredményeihez [41].

Mennyiség	Érték
Súrlódási szög [$^\circ$]	13.21312
Normál irányú kohézió [Pa]	42205.48
Nyíró irányú kohézió [Pa]	21102.74
EtaRoll = EtaTwist [-]	0.1052903
Vontatási ellenállás relatív hibája [%]	0.71

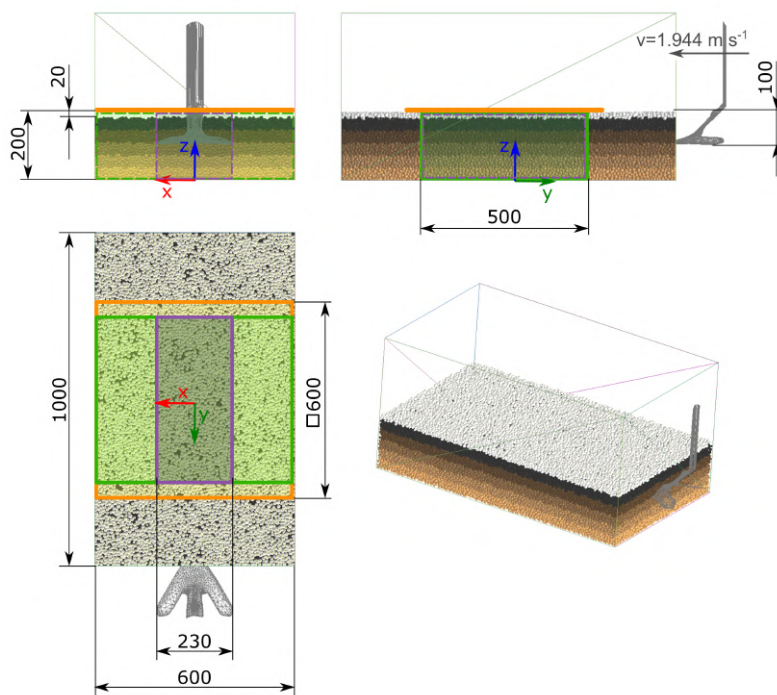
A 2. táblázatban összefoglaltam a kapcsolati paramétereket és egyéb szimulációs beállításokat. A talajvályút alkotó és a szerszám anyagát alkotó elemeknek, súrlódó anyagmodellt állítottam be, míg a talajt modellező elemeknél, súrlódó-kohéziós anyagmodellt alkalmaztam.

2. táblázat. Az alkalmazott talaj- és szerszámmodell kapcsolati paramétereit és szimulációs beállításait a szerszám-optimalizációk folyamán.

Paraméter megnevezése	Paraméter értéke	Forrás
Elemek típusa	gömb	-
Elemek száma	150000 [db]	-
Elemek sűrűsége	2700 [kg m ⁻³]	-
Mikromechanikai rugalmassági modulus	1 · 10 ⁷ [Pa]	-
Mikromechanikai Poisson-tényező	0.4 [1]	[41]
Elemek sugara és szórása	0.005 ± 30% [m], normál eloszlás	[41]
Normál irányú kohéziós erő	42205.48 [Pa]	[41]
Nyíró irányú kohéziós	0.5·Normál irányú kohéziós [Pa]	[41]
Elemek közötti súrlódási szög	13.21312 [°]	[41]
Elemek közötti gördülési súrlódási tényező	0.1052903 [1]	[41]
Elemek közötti csavarási súrlódási tényező	0.1052903 [1]	[41]
Globális csillapítás az ülepítés során	0.2 [1]	-
Globális csillapítás a szimulációs mérések során	0 [1]	-
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	30 [°]	-
Időlépés	0.6 · Δt _{cr} [1]	(kalibrált)
Halmazban lévő kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányados	0.01 [1]	-
Szerszám vontatási sebessége	7 [km h ⁻¹]	-

4.2.5. Szimulációk során gyűjtött adatok és vizsgált mennyiségek

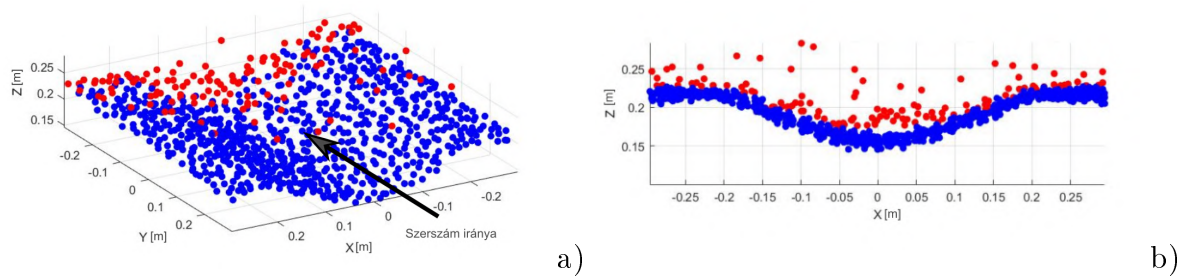
A talaj-szerszám kölcsönhatás DEM szimulációik során számos modellben megfigyelhető jelenséget vizsgáltam. A vizsgálat határait szemlélteti a 10. ábra.



10. ábra. A szimulációs elrendezés, kiegészítve a mérési határokkal. A narancssárga felület alatt a kialakult felszínt a zöld térfogatban a felbomlott és megmaradt kohéziós kapcsolatok arányát vizsgáltam, a lila térfogatban az elemek keveredését vizsgáltam. valamint ugyan-ezen y hosszön rögzítettem a szerszámra ható vonóerőket 74 alkalommal. Az ábrán lévő mennyiségek mm-ben értendők.

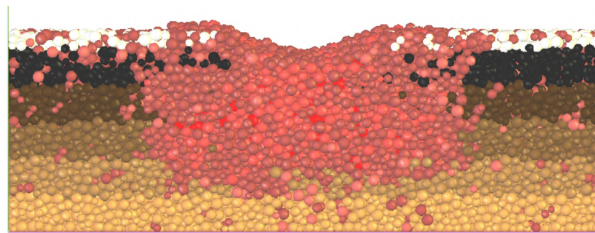
Vizsgáltam a szerszámra ható y irányba eső talajellenállási erőt a talajvályú azon szakaszán, ahol a szerszám talajvályúba történő be és kilépéséből fakadó tranziens jelenségek kevésbé hatnak az eredményekre. Így az 1000 mm hosszú vályúban a középső 500 mm-en kértem le az vonóerőt egyenletes időnként 74 alkalommal.

Vizsgáltam felülnézetből a talajvályúba rajzolható középső 600×600 mm-es négyzet alatt (10. ábra narancssárga felület) a szerszám után maradt felszín geometriáját (11. ábra), és azt, hogy milyen számban vannak az egyes színekre megfestett elemek a felszínen a megjelölt terület alatt.



11. ábra. A szerszám után maradt felszín geometriája a) 3D-ben és b) 2D-ben ábrázolva. Jól látszik a szerszám irányának megfelelően, hogy a 3D felszín letapogatásának vizsgálatának idejében egyes elemek még nem üledtek le a halmaz felszínére. Ezek a pirossal jelölt elemek, melyek értéke az átlaghoz képest nagyon eltér, utófeldolgozás során szűrésre kerültek. Az ábrán lévő mennyiségek m-ben értendők.

Vizgáltam az elemek közötti szétszakadt és a megmaradt kohéziós kapcsolatok számát az $y=[-0.25; 0.25]$ m illetve az $x=[-0.3; 0.3]$ m határok által kifeszített téglalap alatti térfogatban (10. ábra zöld térfogat). A 12. ábrán szemléltetem, hogy leginkább a kohéziós kapcsolatok a szerszám útjában szakadnak szét a szimuláció során.



12. ábra. Az ábra a talaj-szerszám kölcsönhatás során szétszakadt és megmaradt kohéziós kapcsolatokkal rendelkező elemeket mutatja. A halmazban a piros három árnyalata látható. A barnászörös elemek 1-3, a közép-vörösek 4-6, az élénk-vörösek 6-nál több kohéziós kapcsolatot veszítettek el. Eredeti színben megmaradtak azok, melyek nem veszítettek kohéziós kapcsolatot a szimuláció során. A vályú szélessége 0.6 m.

Vizgáltam az $y=[-0.25; 0.25]$ m illetve az $x=[-0.115; 0.115]$ m határok által kifeszített téglalap alatti térfogatban (10. ábra lila térfogat) a fehér/nemfehér színű elemek arányát.

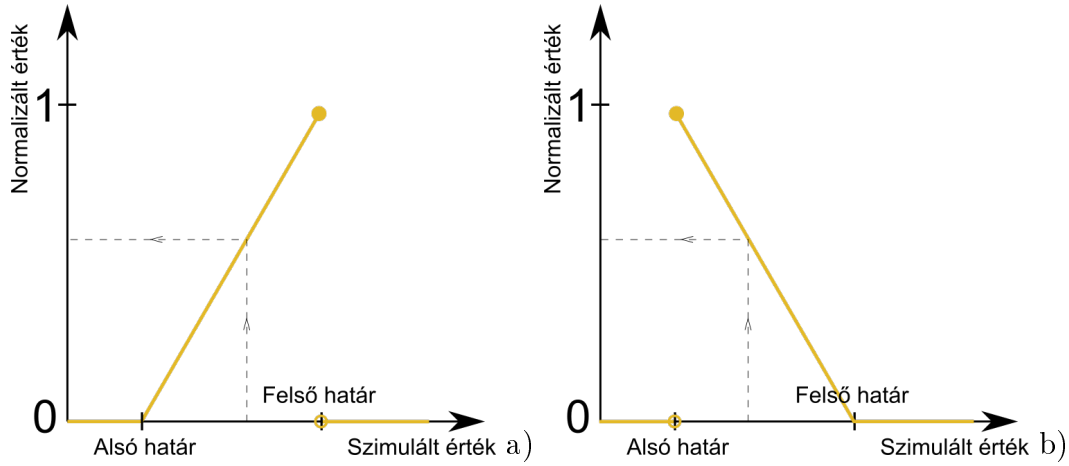
4.2.6. Fitneszfüggvények felépítése és alkalmazása a geometria optimalizálásában

Az optimalizálási feladat során a fitneszfüggvény arra szolgál, hogy értékelje az egyes tesztelt egyedek teljesítményét. Amennyiben az egyed jól teljesít, magasabb pontszámot kap, amennyiben rosszabbul, alacsonyabbat. Így összehasonlíthatóvá válnak az egyedek (szerszámgeometriák) teljesítménye egymással. Praktikussági okokból érdemes úgy meghatározni a fitneszfüggvényt, hogy az lehetőleg nulla és egy közötti számmal térjen vissza. Így jobban összegezhetővé és átláthatóvá válnak az eredmények.

A fitnessfüggvényemet több komponens alkotja, mivel egyszerre több követelménynek kell megfelelnie a szerszámnak. Így minden követelmény figyelembe lesz véve az értékelés során. Arra kell törekedni, hogy kezdetben lehetőleg azonos mértékben legyen figyelembe véve minden vizsgált követelmény. Később ezek át is súlyozhatók. Jelen optimalizálási feladat során négy célt definiáltam, mely célokat a szerszámnak minél inkább el kell érnie.

1. Legyen a szerszám munkája minimális.
2. Az elemek közötti szétszakadt és a szétszakadt + megmaradt kohéziós kapcsolatok aránya az $y = [-0.25; 0.25]$ m illetve az $x = [-0.3; 0.3]$ m határok által kifeszített téglalap alatti térfogatban (10. ábra) legyen maximális.
3. A felülnézetből a talajvályúba rajzolható középső 0.6×0.6 m-es négyzet alatt (10. ábra) a fehér és az egyéb elemek számának aránya legyen maximális.
4. Az $y = [-0.25; 0.25]$ m illetve az $x = [-0.115; 0.115]$ m határok által kifeszített téglalap alatti térfogatban (10. ábra) a fehér/egyéb színű elemek aránya legyen maximális.

Minden célhoz tartozik egy elemi fitnessfüggvény, ami az adott célt nulla és egy közötti számmal jellemez. Ezt úgy oldottam meg, hogy lefuttattam egy generációnyi, azaz 38 egyeddel rendelkező szimulációt. Vizsgáltam, hogy milyen szélsőséges határok között kapok eredményeket a különböző geometriák tesztelése során azokra a jellemzőkre (korábban definiált követelményekre), melyek a fitnessfüggvény alapját képezik. Például megvizsgáltam, hogy a 38 teszt közül mekkora volt a minimális, és a maximális szerszám által végzett munka. És így tovább megtettem ezt minden optimalizált mennyiséggel. Ezek alapján készítettem egy függvényt, mely lineáris interpoláció segítségével normalizálja a munkaértékeket nulla és egy közé (13. ábra). Azt az x határt, ami egyhez közelebb esik, az optimalizálás idejére kibővítettem 30%-kal minden elemi fitnessfüggvény esetén, hogy lehetőleg ne kapjak egy fölötti fitnessértéket. Ugyanis nulla alatti és egy fölötti fitnessérték számítása esetén 0-ra állítottam az értéket. A genetikus algoritmus pedig mindig a legmagasabb fitnessértékekkel rendelkező egyedek tulajdonságait (génjei) örökíti tovább a következő generációban.



13. ábra. Általános lineáris interpolációs függvény, mely alapján normalizáltam a fitness-függvényben szereplő értékeket. a) Abban az esetben alkalmazott függvény, ha mennyiség maximalizálása a cél (f_{CA} , f_{CV} , f_{Coh}). b) Abban az esetben alkalmazott függvény, ha mennyiség minimalizálása a cél (f_W).

Későbbi kiértékelés során az összes optimalizálási feladat eredménye alapján újradefiniálom az elemi fitnessfüggvények lineáris interpolációs határait. Az újradefiniálás során már nem bővítem, illetve nem vágom le a határokat, a nulla és egy közötti teret így azt biztosan kitöltöm minden jellemző esetén.

Fontos még ezen lineáris interpolációknál azt figyelembe venni, hogy az optimalizálási cél az, hogy maximalizáljunk, vagy hogy minimalizáljunk egy értéket. A genetikus algoritmus mivel mindig a fitnessérték maximalizálására törekszik, így az előjeleket az elemi fitnessfüggvények kialakításánál ennek megfelelően kell figyelembe venni (13. ábra).

A szerszám munkájának elemi fitnessértéke minimalizálandó.

$$f_W = \frac{-1}{W_{max} - W_{min}} \cdot W_s + \frac{1}{W_{max} - W_{min}} \cdot W_{max} \quad (2)$$

A felszínen lévő fehér/nemfehér elemek arányának elemi fitnessértéke maximalizálandó.

$$f_{CA} = \frac{1}{C_{A,max} - C_{A,min}} \cdot C_{A,s} - \frac{1}{C_{A,max} - C_{A,min}} \cdot C_{A,min} \quad (3)$$

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

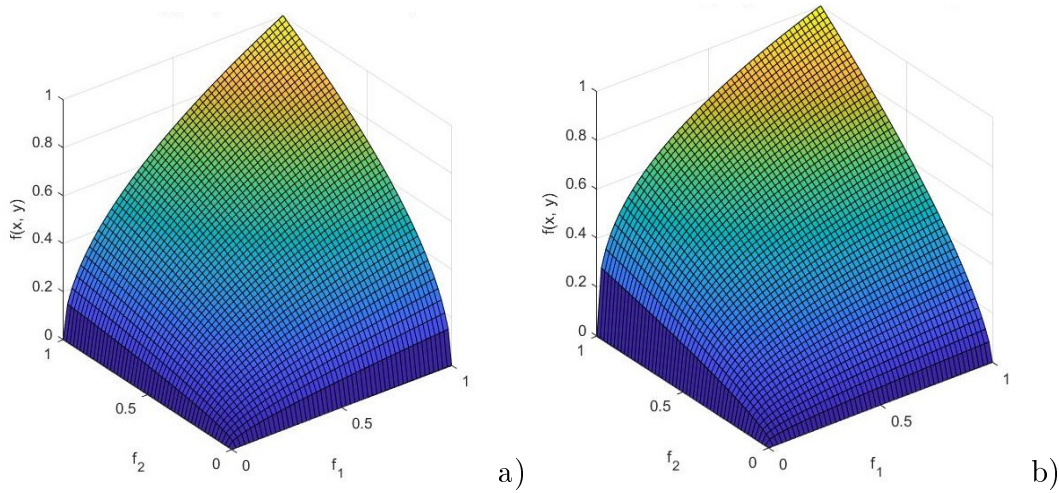
$$f_{CV} = \frac{1}{C_{V,max} - C_{V,min}} \cdot C_{V,s} - \frac{1}{C_{V,max} - C_{V,min}} \cdot C_{V,min} \quad (4)$$

A kohéziós kapcsolatok arányára vonatkozó elemi fitnessérték maximalizálandó:

$$f_{Coh} = \frac{1}{F_{Coh,max} - F_{Coh,min}} \cdot F_{Coh,s} - \frac{1}{F_{Coh,max} - F_{Coh,min}} \cdot F_{Coh,min} \quad (5)$$

Az optimalizálás során ezeket az elemi fitnessfüggvényeket valamilyen módon súlyozva, "összegezni" kell. Ehhez ebben a tanulmányban egy súlyozott átlagszámításra épülő formulát alkalmaztam. A fitnessértéket úgy kapjuk meg, hogy először minden egyes tényezőt a hozzárendelt súlyával hatványozunk, majd a kapott eredményt az összes súly összegének reciprokára emeljük. (Utóbbi lépés kihagyható, ha a súlyok összege egy.) Ezen súlyozott átlagszámítás két elemi fitnessérték esetén 2D-ben ábrázolható (14. ábra), így könnyebben értelmezhető az elemi fitnessértékek "összegezése", de több fitnessérték "összezésére" kiterjeszthető.

A 14. ábra szemlélteti a szimulációkban alkalmazott fitnessfüggvény kétváltozós alakját. A függvény természetesen több dimenziósra is kiterjeszthető.



14. ábra. Súlyozott 2D fitnessfüggvények ábrázolása a) $w_1 = w_2 = 0.5$ és b) $w_1 = 0.3$, $w_2 = 0.7$ esetén. A fitnessfüggvény a következő: $f = (f_1^{w_1} \cdot f_2^{w_2})^{\frac{1}{w_1+w_2}}$.

Jelen optimalizálási feladatban a korábban felsorolt elemi fitnessértékeket a 6. képlet "összezi" súlyozva.

$$f = \left(f_W^{w_W} \cdot f_{C_A}^{w_{C_A}} \cdot f_{C_V}^{w_{C_V}} \cdot f_{F_{Coh}}^{w_{F_{Coh}}} \right)^{\frac{1}{w_W + w_{C_A} + w_{C_V} + w_{F_{Coh}}}} \quad (6)$$

A 3. táblázat foglalja össze az optimalizációs folyamat során meghatározott és alkalmazott normalizált elemi fitnessértékek számításához használt intervallumhatárokat. Ezek a határok tartalmazzák a 30%-os bővítést, a korábbiakban kifejtettek szerint.

3. táblázat. A normalizált elemi fitnessértékek számításához használt intervallumhatárok értékei az optimalizálás során.

A munka intervallumhatárai [$J\,m^{-2}$]:	$W_{min} = 38.07$	$W_{max} = 116.18$
A térfogati fehér/nemfehér arány intervallumhatárai [1]:	$C_{V,min} = 0.00087$	$C_{V,max} = 0.0409$
A felszíni fehér/nemfehér arány intervallumhatárai [1]:	$C_{A,min} = 0.178$	$C_{A,max} = 2.12$
A kohéziós kapcsolatok arányának intervallumhatárai [1]:	$F_{Coh,min} = 0.4579$	$F_{Coh,max} = 0.746$

a 4. táblázat tartalmazza azokat a súlytényezőket az egyes elemi fitnessértékekhez, melyekkel a végleges fitness érték a 6. képlet alapján számítva lett az optimalizáció során.

4. táblázat. Súlytényezők az egyes elemi fitnessértékekhez az optimalizáció során.

Jelölés	Megnevezés	Érték
w_W	Munka súlya	0.5
w_{C_A}	Területi elemkoncentrációs fitnessérték súlya	0.15
w_{C_V}	Térfogati elemkoncentrációs fitnessérték súlya	0.15
$w_{F_{Coh}}$	Kohézió fitnessérték súlya	0.2

4.2.7. Genetikus algoritmus paraméterezése

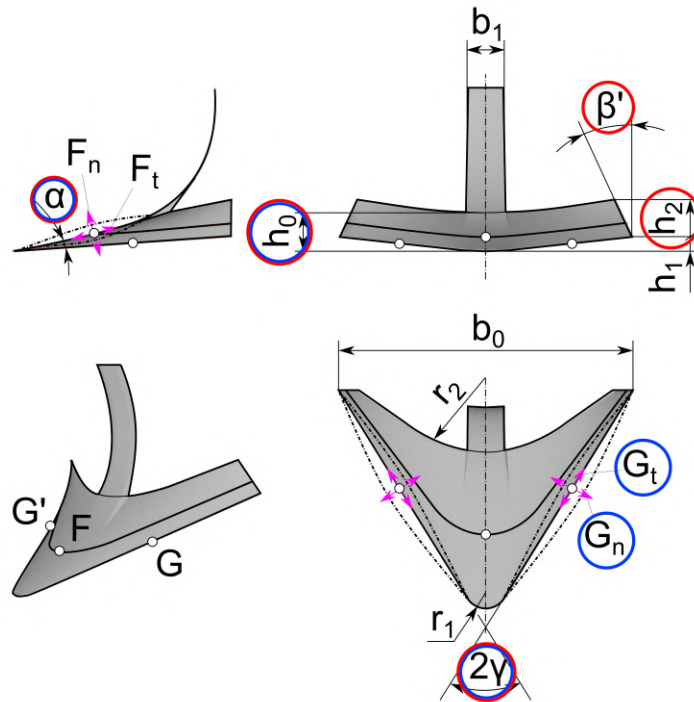
A genetikus algoritmus beállítási paramétereit az 5. táblázatban foglaltam össze. Jelenleg a generációban lévő populációszám az alkalmazott számítógép erőforrásának maximális kihasználtságához, és a genetikus algoritmus programjának korlátaival igazodik. A generációk számát ötre állítva, 13 órás generációnkénti futási idővel 65 óra alatt futott le egy optimalizációs kör. (Habár érdemes lehet még jobb eredmények elérése érdekében később nagyobbra állítva is teszteket futtatni.) A szülők száma, és a gének mutációs valószínűsége a PyGad dokumentációban javasolt példák alapján lett meghatározva [14]. A gének száma egy ökölszabály szerint a hatékony optimalizáció érdekében nem térhet el a generációban lévő populáció szám tizedétől nagy mértékben.

5. táblázat. A genetikus algoritmus beállításai.

Paraméter megnevezése	paraméter értéke
Generációban lévő populáció száma	38 [db]
Generációk száma	5 [db]
Szülők száma	7 [db]
Gének száma	5 [db]
Gének mutációs valószínűsége	0.01 [-]

4.2.8. A geometriaoptimalizálási folyamatok geometriai peremfeltételeinek bemutatása

Az általam definiált szerszámgeometriát 14 paraméter írja le, amelyek közül meghatároztam azokat, amelyeket optimalizálni kívántam. Egy automatizált optimalizálási folyamat során az optimalizálási paraméterek számának korlátozása szükséges, mivel a jelenlegi genetikus algoritmus egy generációban legfeljebb 38 egyedet hoz létre, amelyek párhuzamos szimulációval kerülnek tesztelésre egy 40 magos számítógépen, 2 magot a rendszer működésére fenntartva. Az algoritmus hatékonysága érdekében pedig az ökölszábat alkalmazva, az egy generációban lévő egyedek számának tizede mennyiségű kalibrálható paraméter kalibrálható. Ezen korlát miatt a több részfolyamatra bontottam a kalibrálási folyamatot. A viszonylag szűk intervallumtartományok miatt egy részfolyamatban egyszerre öt paramétert kalibráltam. Meghatároztam ezek optimalizálási tartományait, valamint a többi konstans paraméter értékét.



15. ábra. A geometriaoptimalizálási folyamatok során optimalizált paraméterek. Pirossal jelölt paramétereket az első és a harmadik folyamatban, a kézzel jelöltek a második folyamatban optimalizáltam.

Az egyes részfolyamatokban optimalizált paramétereket a 15. ábra szemlélteti, ahol az 1. és a 3. folyamat paraméterei pirossal, a 2. folyamaté kézzel vannak jelölve. A paraméterek pontos értékeit a 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat. Alkalmazott szerszámparaméterek az egyes geometria-optimalizálási folyamatok során. Ahol intervallumok vannak megadva, ott a genetikus algoritmus határozza meg a paraméter pontos értékét a megadott határok között.

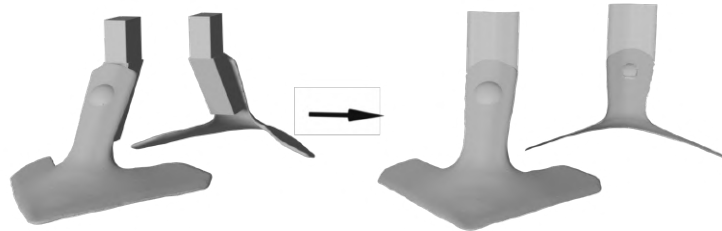
Jelölés	Megnevezés	1. foly.	2. foly.	3. foly.
α	Ráillesztési szög [°]	[10;25]	[10;25]	[10;25]
β'	Lazítószöget jellemző szög [°]	[45;90]	0	[5;30]
γ	Nyílásszög [°]	[28;45]	[28;45]	[28;45]
h_0	Szerszám magasság [mm]	[20;40]	[20;40]	[20;50]
h_1	Szerszámtalp magasság [mm]	0	0	0
h_2	Szárnymagasság [mm]	[10;60]	0	[0;50]
b_1	Kapaszárszélesség [mm]	35	35	35
b_0	Munkaszélesség [mm]	230	230	230
r_1	Hegyrádiusz [mm]	10	10	10
r_2	Hátrádiusz [mm]	30	30	30
G_n	G pont normál irányú eltolása [mm]	0	[-50;0]	0
G_t	G pont tangenciális irányú eltolása [1]	-0.547	[-0.58;0]	-0.5
F_n	F pont normál irányú eltolása [mm]	0	0	0
F_t	F pont tangenciális irányú eltolása [1]	0.5	0.5	0.5

Szendró (2000) megmutatja, hogy a kultivátorszerszám geometriai jellemzői általában milyen tartományokba esnek [32]. A nyíl alakú kapa (2. ábra b) munkaszélességére 140-260 mm-t, a kétszeres nyílásszögére 60-70°-ot, lazítószögére 15-18°-ot javasol. A lúdtalp alakú kapa (2. ábra c) ráillesztési szögét 13°-ban, lazítószögét 28-30°-ban határozza meg. Munkaszélességét 250-380 mm-re teszi, míg a kétszeres nyílásszöget 60-65°-ban határozza meg. Levezeti azt is, hogy a gyom és a szerszám γ szöget bezáró éle mentén fellépő súrlódási viszonyok miatt a γ szög értéke nem lehet nagyobb, mint 45°, és szilárdsági szempontokat figyelembe véve γ szög nem lehet kisebb 28-30°-nál. Részben ezen információkra alapozva határoztam meg a 6. táblázatban található konstans paramétereket és változó paraméterek intervallumhatárait. A szerszám szélességét 230 mm-ben határoztam meg, mert van olyan kereskedelembe kapható (Framest) szerszámunk, mely ezzel a munkaszélességgel rendelkezik. Így összehasonlítható ezen szerszám teljesítménye fizikai mérésekben, valamint 3D szkennelt változatának teljesítménye a szimulációkban is az általam optimalizált szerszámgeometriák teljesítményével.

4.2.9. Forgalomban lévő kultivátorszerszám tesztelése szimulációs környezetben

A kutatás során egy kereskedelmi forgalomban kapható (Framest) kultivátorszerszámot is teszteltem mind valós, mind szimulációs környezetben, melynek geometriája korábban be lett szkennelve [42]. A vizsgálat célja az volt, hogy összehasonlítsam a valós

szerszám teljesítményét az optimalizált szerszámokkal. A szkennelt geometriát egyszerűsítettem, csupán a szerszám felső felületét alkotó hálóelemeket tartottam meg, és ezt a módosított geometriát használtam a szimulációk során (16. ábra). A szimulációs feltételek megegyeztek az optimalizálás során alkalmazottakkal, és a szerszámok munkaszélessége is azonos volt, biztosítva az eredmények összehasonlíthatóságát.



16. ábra. Forgalomban kapható (Framest) szerszám szkennelt modellje, és egyszerűsített felületmodellje. A geometriai jellemzőket Tamás (2021) cikkje tartalmazza [42].

4.2.10. A szimulációk futási idejének optimalizálása

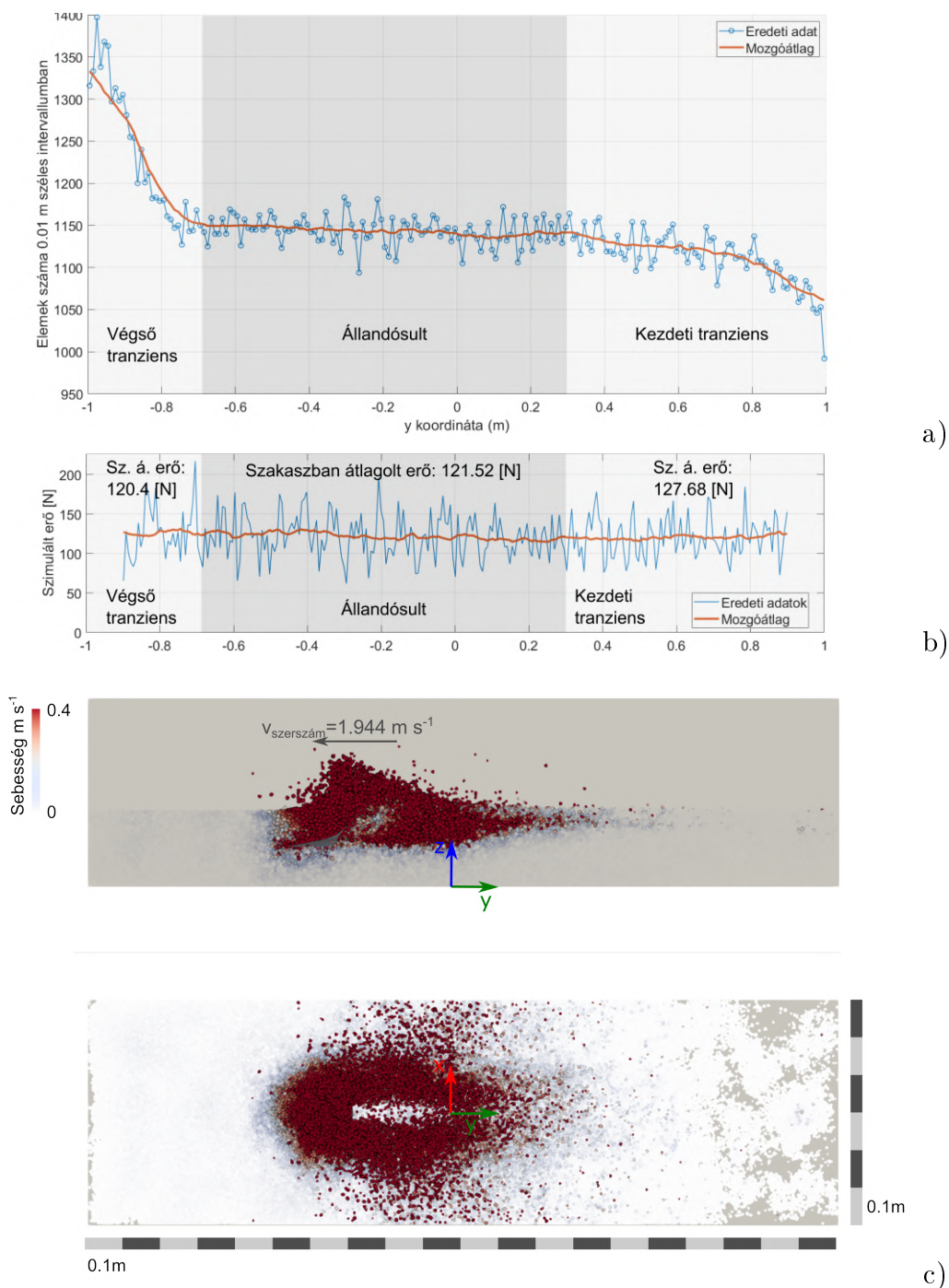
A szimulációs idő csökkentése érdekében az időlépést már optimalizáltam a 4.2.3. fejezetben bemutatott módon, azonban további optimalizálásokat is végeztem a futási idő csökkentése érdekében, miközben az eredmények pontossága változatlanul megfelelő maradt. Először is, a szimulációk során mindig ugyanazt a halmazt használok, így elkerülhető az újraülepítés minden kísérlet előtt. Ezen túl, jelentősen módosítottam a talajfelszín letapogatásának módszerét. Korábban gömb elemeket definiáltam x-y mátrix elrendezésben, és ezeket gravitációsan ülepítettem, vizsgálva, mikor érintkeznek a felszínnel. Ez a folyamat azonban erőforrás-igényes, mivel minden iterációban az összes mérőgömb és talajelem érintkezését figyelni kellett. Továbbá, a szimuláció futásideje függött a mérőgömbök kezdeti magasságától, ami az egyenetlen talajfelszínhez igazodott, ami egyes szimulációk elhúzódásához vezetett.

Egy új függvénnyel váltottam ki a modellbeli felszínszkennelést. Ennek bemenete a szkennelendő felszín határainak x,y koordinátái, és egy felbontás amivel ezt a felületet egyenlő téglalapokra bontja x és y oldal mentén is. Az így kialakult kis felszínelemek alatt keresi meg a függvény a legmagasabb pozícióval rendelkező elemet. Rögzíti annak koordinátáit és színét. Így később ezen adatok is feldolgozhatóak. Tovább gyorsítja a számításokat az, hogy z irányban is kizártam azokat az elemeket a számításból, amik biztosan nem alkotnak talajfelszínt. Az új függvény lehetővé tette a szimulációk közel azonos idő alatt történő lefutását is.

A fenti optimalizálások révén a 38 szimuláció párhuzamos futtatása a HP Z620 típusú számítógépen (amely 2 darab 2.8 GHz-es Intel Xeon(R) E5-2680 v2 processzorral rendelkezik, összesen 40 maggal) 30 óra helyett 13 óra alatt valósul meg.

4.2.11. A szimulált talajvályú minimális hosszának meghatározása

Különböző szerszámsebességek esetén be kell állítani a pontosabb szimulációs értékek meghatározásához a szimulált talajvályú minimális hosszát, ami meghatározza a vizsgálat hosszát is.



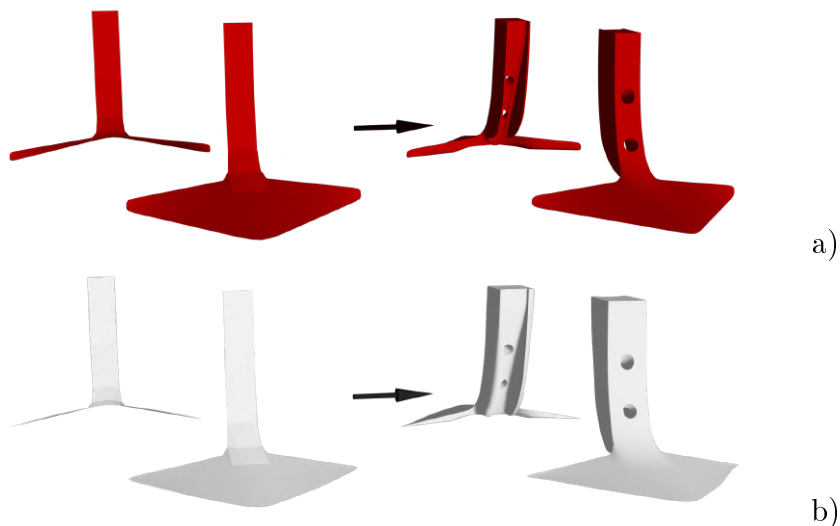
17. ábra. Transziens-állandósult állapot határainak meghatározását szemléltető ábrák. a) Elemek eloszlása y intervallumok szerint vontatásszimuláció után ülepített halmazban. b) Szerszámra ható talajellenállási erő. c) Elemek sebességeloszlása a vizsgálat állandósult szakaszának egy pillanatában.

A szimulációk során cél volt elérni, hogy legyen egy 0.6×0.6 m-es felület alatti térfogat, ahol vizsgálni lehet az kialakult állandósult állapotú szimulált talajfelszínt, és egyéb szimulált értékeket. Ehhez egy 2 m hosszú talajvályúba ülepítettem elemeket, majd végighúztam a szerszámot 1.944 m s^{-1} sebességgel. A talajvályú méreteken kívül minden más szimulációs beállítás követte a 4.2.2. fejezetben meghatározott beállításokat. A vizsgálatot a piros szerszámmal végeztem el (18. ábra a). Az eredményeket a 17. ábra szemlélteti. A diagramot úgy alkottam meg, hogy y hosszon felszeleteltem a halmazt 0.01 m-enként és megvizsgáltam, az ilyen módon létrehozott intervallumokba mennyi elem esik. Amikor ez állandósulni látszott, ott határoztam meg a tranziens-állandósult átmenetet. Azt az eredményt kaptam, hogy a leírt feltételek esetén 0.6 m a kezdeti tranziens szakasz, 1.1 m az állandósult szakasz (itt érdemes elvégezni a méréseket), és 0.3 méter a vályúvégből adódó tranziens szakasz. Ezen eredmények alapján 1.944 m s^{-1} -os szerszámsebesség esetén 0.6×0.6 m-es területen az állandósult állapot vizsgálható 1,6 m-es talajvályúhossz esetén. Vizsgáltam a szerszámra ható erő alakulását a teljes szakaszon, és azt az eredményt kaptam, hogy a -0.9 és 0.9 m közötti y koordináták között az erőértékekben nincs szignifikáns változás.

4.3. Laboratóriumi mérések

4.3.1. Kultivátorszerszámok gyártási folyamatának bemutatása

Két szerszámot választottam ki az optimalizálási eredmények alapján, melyek a fitness függvény szerint jól teljesítettek.



18. ábra. A "piros" és a "fehér" szerszám felületmodellje és testmodellje. A felületmodellt a szimulációkban, míg a testmodelleket 3D nyomtatás után a fizikai mérések során alkalmaztam.

Ezeket az csupán felső felülettel rendelkező szerszámokat átmodelleztem Blender szoftvert alkalmazva úgy, hogy tömör testek legyenek és lehessen nyomtatni őket 3D-ben a 18. ábra szerint. Az átmodellezésénél a FDM nyomtatásra vonatkozó tervezési irányelveket is figyelembe vettem.

A 19. ábra szerint a szerszámokat FDM nyomtatással gyártottam le. PETG anyagot választottam, és 100%-os kitöltést. A szerszámokat az alsó sík felületükre fektetve nyomtattam 0.08 mm-es rétegvastagságot alkalmazva. A szerszámok felületét a gyártást követően 160-es és 120-as csiszolóvászonnal kézzel megcsiszoltam. A csiszolt szerszámokat pedig lefestettem. Két féle festéket teszteltem, az egyik szerszámhoz temperát a másikhoz akrilfestéket alkalmaztam. A festésre azért volt szükség, hogy később a talajvályús mérések után a kopáskép látszódjon a szerszámon.

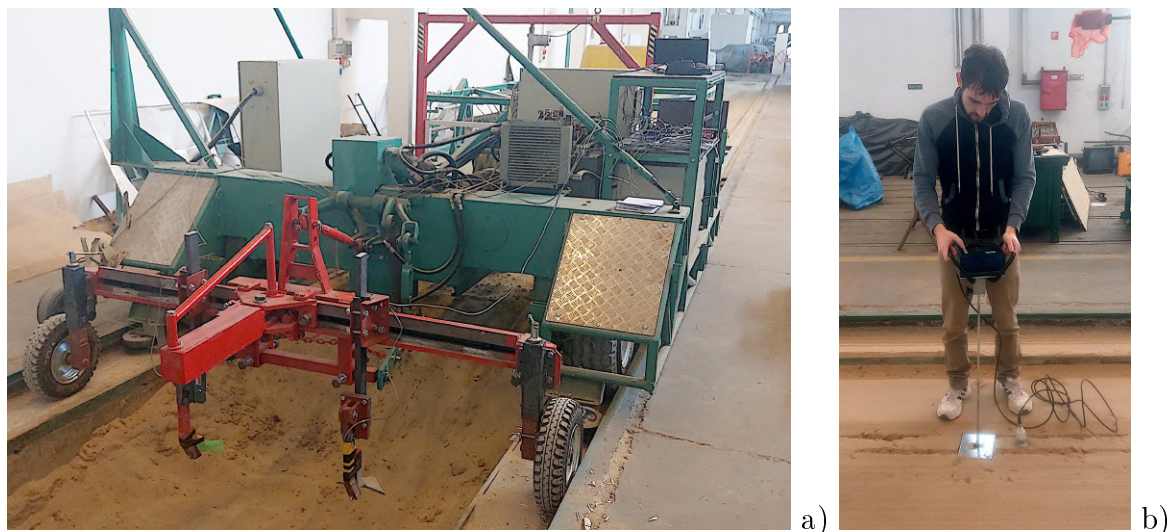


19. ábra. 3D nyomtatott szerszámok csiszolás és festés után. a) Piros szerszám, b) fehér szerszám.

4.3.2. Mérési környezet felépítése és mérési terv

A fizikai méréseket a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Műszaki Intézetének laboratóriumában található talajvályúban végeztem egy hidraulikus mérőkocsi segítségével (20. ábra) A mérések menetét a 7. táblázat foglalja össze. A szerszámokat miután végigvontattuk a talajvályúban a mérőkocsin lévő vibrációs tömörítőhenger segítségével lett visszaállítva a talaj állapota a következő méréshez. Azért, hogy ellenőrizzük a talaj visszaállításának helyességét minden mérés előtt végeztünk a szerszámok nyomvonalában penetrációs vizsgálatot, illetve mértük a talaj térfogati nedvességtartalmát Thetaprobe ML3 4-tűs penetrométerhez csatlakoztatható eszközzel. Egy mérési sorozat összesen három vizsgálatból állt. A penetrációs vizsgálatokat Eijkelkamp Penetro Viewer Vs, 6,08 típusú 34445101 szériaszámú eszközzel végeztük el, 5 cm²-es 60°-os szabványos kúppal. A

szerszámot 2 cm s^{-1} -os sebességnél lassabban szúrtuk a talajba. Az elterjedt függőleges irányú penetrációs ellenállásmérést a NEN 5140: 1996 szabvány írja elő.



20. ábra. a) Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Műszaki Intézetének laboratóriumában található talajvályú és mérőkocsi. a nyomtatott prototípus-szerszámokkal felszerelve. b) Penetrációs és talajnedvesség vizsgálat a következő mérés előtt de a talaj-helyreállítási folyamat után.

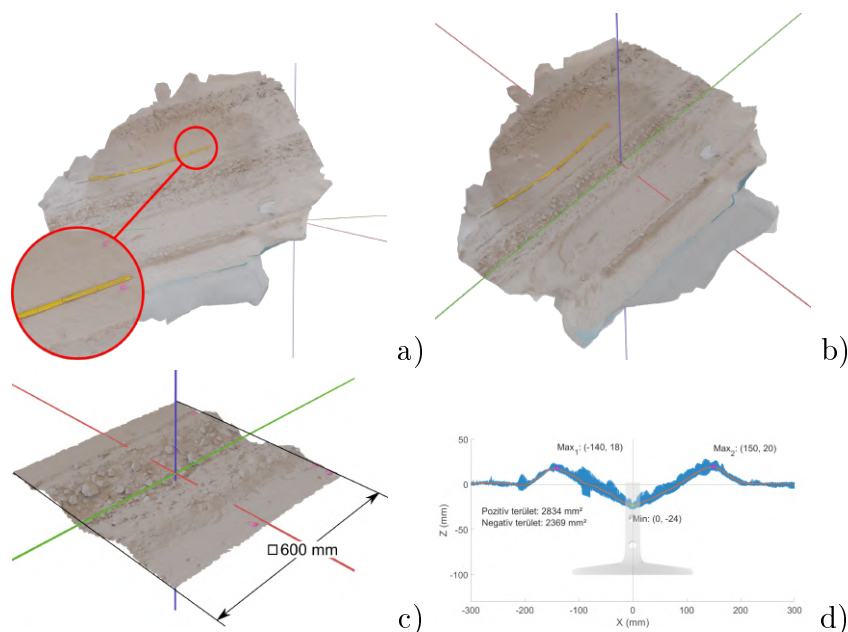
A szerszámokat nyúlásmérő bélyegekkel ellátott és kalibrált kapaszárokra szereltük fel. A sebességet a mérések során kezdetben lassúra állítottuk, hogy biztosan ne terheljük túl a 3D nyomtatott polimer szerszámokat. Végül teszteltük a szerszámokat a gép által megengedett legnagyobb sebességgel is. Három közel azonos feltételű mérés után a két szerszámot megcseréltük a kapaszárokon, hogy a kalibrációkból adódó esetleges eltéréseket felismerhessük. A szerszámok felszerelésénél vízmértékkel állítottuk be a szerszám alsó felületének vízszintességét.

7. táblázat. A talajvályúban végzett mérések.

Futam s.sz.	Tesztelt szerszámok	Sebesség	3D szkennelés	Penetrációs mérés előtt
1.	Piros és fehér	lassú	nem	igen
2.	Piros és fehér	lassú	nem	igen
3.	Piros és fehér	lassú	nem	igen
4.	Fehér és piros	lassú	nem	igen
5.	Fehér és piros	lassú	nem	igen
6.	Fehér és piros	gyors	igen	igen
7.	Forgalomban lévő szerszám	gyors	igen	igen

4.3.3. Talaj felszínének 3D szkennelése

A szerszámok után hagyott barázdának felszínét egyes esetekben 3D szkenneltem. Ehhez egy Samsung A52 telefon (szériaszám: R58R83ATHCE) kameráját alkalmaztam. 100 Fényképet készítettem egy 0.6×0.6 m-es talajfelületről, mely megegyezik a szimulációk során vizsgált talajfelület méretével. Majd a KIRI Engine telefonos alkalmazás ingyenes változatát alkalmaztam arra, hogy a képeket fotogrammetriát alkalmazva 3D modellé alakítsam. A képek alapján generált 3D modellt obj formátumban tölthettem le az alkalmazásból (26. ábra a). A mérete és az orientációja a modellnek korrigálásra szorult (26. ábra b). Ehhez Blendert alkalmaztam, és manuálisan forgattam be és méreteztem a szkennelt felszínt. A modell méretezésében segítségemre volt az, hogy a fényképek készítése során egy colstockot helyeztem el a vizsgált terület szélére. A forgatást pedig a szkennelt talajfelszín műveletlen, sík részei alapján igyekeztem vízszintesen beállítani. A modell nagyobb területet tartalmazott mint a vizsgált terület, így ezeket levágtam (26. ábra c). Az így kapott előfeldolgozott talajfelszínmodellt STL formátumba exportáltam Blenderből. Ezt követően Matlabban a 3D geometriát levetítve az xz síkra kirajzolódik 2D-ben a barázda keresztmetszete (26. ábra d). Ezt átlagosással egyszerűsítettem. Az egyszerűsített xz profilon vizsgáltam a lokális maximumok és a minimum pont pozíciókat, valamint az tengely és a profilgörbe között bezárt területeket. A területarányok jellemzik a vizsgált szerszám lazítóképességét.



21. ábra. A szkennelt talajfelszín feldolgozásának menete. a) A beszkennelt talajfelszín nyers 3D modellje Blenderben. Kiemelve látható, hogy a szkennelés során rózsaszín gölyökkal jelölve lett a vizsgált terület határa és egy collstock is elhelyezésre került mellette. b) A koordinátarendszerbe a szimulációkkal megegyező pozícióba és méretbe beforgatott 3D modell. c) Szkennelt geometria melyről a fölösleges részek eltávolításra kerültek. d) A Blenderből exportált STL modell az alapja későbbi matlabban történő kiértékelésnek.

5. Eredmények

5.1. A geometriaoptimalizálási folyamatok eredményeinek elemzése és további fejlesztési irányok

A három optimalizációs folyamat során összesen 670 különböző módon paraméterezett kultivátorszerszám-geometriát teszteltem. Az eredmények alapján pedig kiválasztottam két szerszámot, melyet le is gyártottam. Ezeket "piros" és "fehér" névvel illettem. Ezek geometriáit leíró paramétereket tartalmazza a 8. táblázat. A szerszámok geometriáját pedig a 18. ábrán korábban már bemutattam. A piros szerszám a szimulációk alapján a legjobban teljesítő. A fehér szerszám pedig a kiemelkedően jó munka fitness alapján került kiválasztásra.

8. táblázat. Az automatikusan tervezett szerszámok paraméterei és fitness értékei, melyek legyártásra és tesztelésre kerültek. A szimulációk alapján legjobban teljesítő szerszám (piros) és egy alacsony munkaigényű szerszám (fehér) lett kiválasztva.

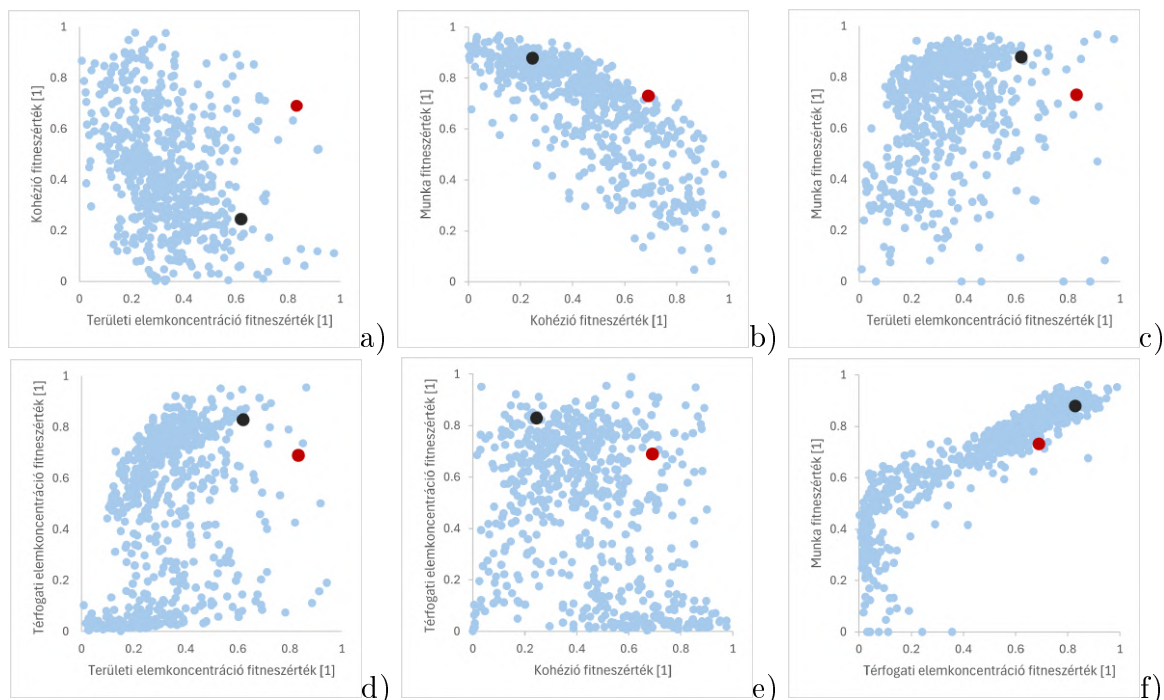
Jelölés	Megnevezés	Piros	Fehér
α	Ráillesztési szög [°]	11.2	10.4
β'	Lazítószöget jellemző szög [°]	86.5	0
γ	Nyílásszög [°]	39.7	40.9
h_0	Szerszámmagasság [mm]	28	23.4
h_1	Szerszám talp magasság [mm]	0	0
h_2	Szárnymagasság [mm]	11	0
b_1	Kapaszárszélesség [mm]	35	35
b_0	Munkaszélesség [mm]	230	230
r_1	Hegyrádiusz [mm]	10	10
r_2	Hátrádiusz [mm]	30	30
G_n	G pont normál irányú eltolása [mm]	0	-41
G_t	G pont tangenciális irányú eltolása [1]	-0.547	-0.24
F_n	F pont normál irányú eltolása [mm]	0	0
F_t	F pont tangenciális irányú eltolása [1]	0.5	0.5
f_W	Munka fitnessérték [1]	0.73	0.87
f_{C_A}	Területi elemkoncentráció fitnessérték [1]	0.83	0.62
f_{C_V}	Térfogati elemkoncentráció fitnessérték [1]	0.69	0.83
$f_{F_{Coh}}$	Kohézió fitnessérték [1]	0.69	0.25
f	fitnessérték [1]	0.75	0.65

Az 22. ábra diagramjai az optimalizációs feladat során generált összes szerszám szimulációs eredményének fitnessértékeit ábrázolják. Az egyes diagramok szemléltetik, hogyan változnak a különböző fitnessértékek egymás függvényében, ezáltal feltárva a fitnessér-

tékek közötti összefüggéseket és trendeket. A 22. ábrák alapján érdekes összefüggéseket tudunk levonni. A diagramokon jelöltem a kiválasztott szerszámokat is. Általában a jobb felső sarokhoz közel kell keresni az optimális megoldásokat.

A 22. b) diagramon a kohézió és a munka fitneszértékei között negatív korreláció figyelhető meg. A kohézió növekedésével a munka fitneszértéke általában csökken. Ez arra utal, hogy jellemzően nagyobb munka szükséges több kohéziós kapcsolat felbontásához.

A 22. f) diagramon a térfogati elemkoncentráció és a munka fitneszértékei között erős pozitív korreláció figyelhető meg, ahol a térfogati elemkoncentráció fitneszérték növekedése általában a munka fitneszértékének javulását eredményezi. A fitneszértékek magasabb tartományában a szerszámok teljesítménye stabilabb, míg az alacsonyabb értékeknél nagyobb szórás tapasztalható. Ez arra utal, hogy a hatékonyabb szerszámok paraméterei kevésbé változatosak.

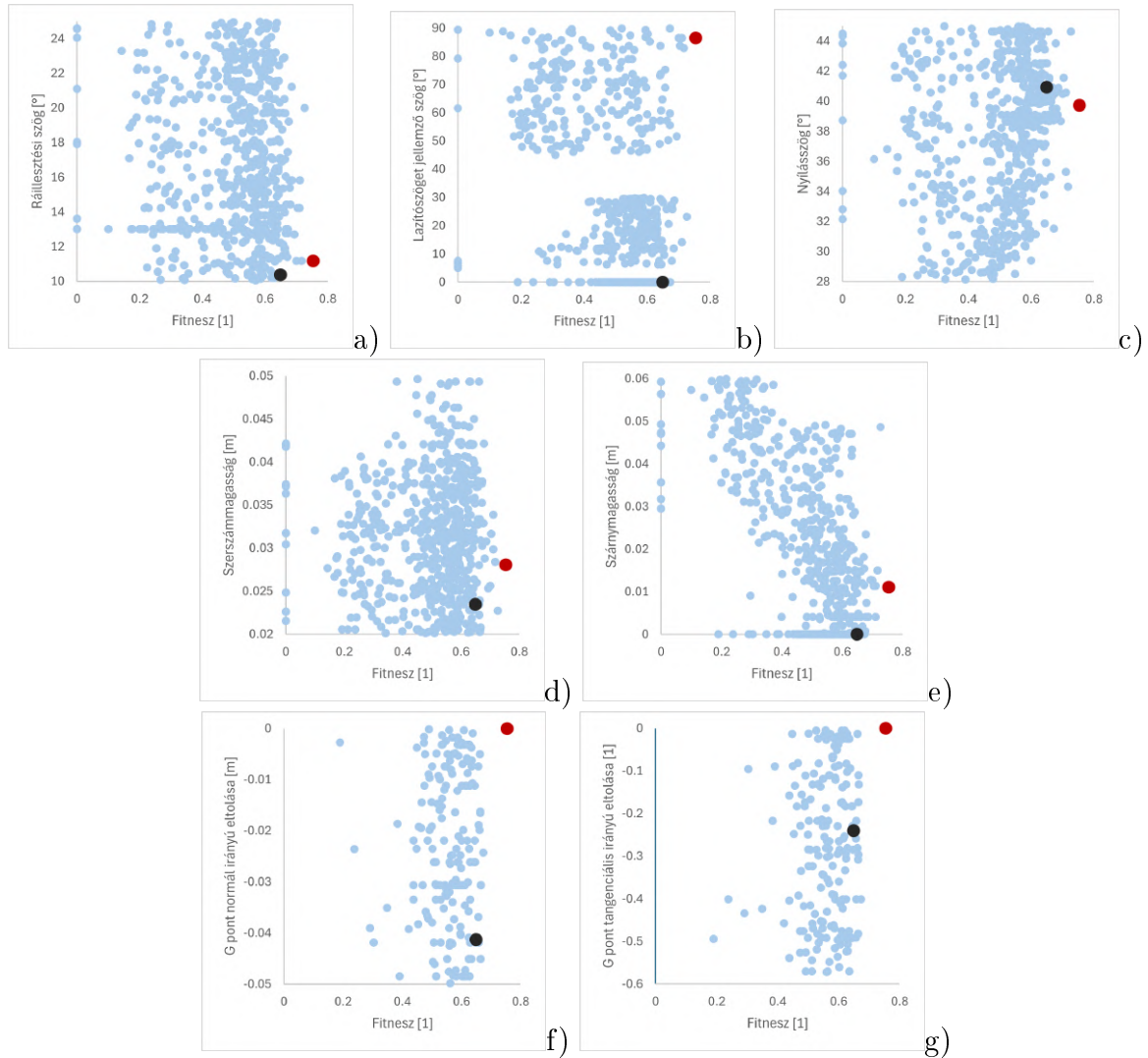


22. ábra. Az összes szimulált szerszám teljesítménye az elemi fitneszértékek alapján. A pirossal ● és szürkével ● jelölt pontok rendre a piros és a fehér szerszám teljesítménye a diagramokon.

Az 23. ábra diagramjai az optimalizáció során generált szerszámok fitneszértékeit ábrázolják az egyes optimalizált geometriai paraméterek függvényében, feltárva az egyes paraméterek hatását a fitneszértékekre. Az a) diagram alapján a ráillesztési szög önmagában nem befolyásolja jelentősen a fitneszt. A b) diagram szerint alacsonyabb lazítószögek kedvezhetnek a jobb fitneszértékeknek. A c) diagram mutatja, hogy a nagyobb ($38-45^\circ$) nyílásszögű szerszámok jellemzően jobban teljesítenek. A d) diagram szerint a szerszámmagasság széles tartományban hasonló fitneszértékeket eredményez, de 22 és 32 mm között

kiemelkedő teljesítmények is előfordulnak. Az e) diagram szerint a kisebb szárnymagasság jobb eredményekhez vezet, de a 0-ra állított szárnymagasság gyengébb teljesítményt ad. Az f) és g) diagramokon látható, hogy a G pont értékei egyenletesen oszlanak el, így nem mutatnak egyértelmű hatást a fitnessre.

További jól teljesítő szerszámok megjelenítése segítené az optimális paraméterrégiók pontosabb azonosításában.



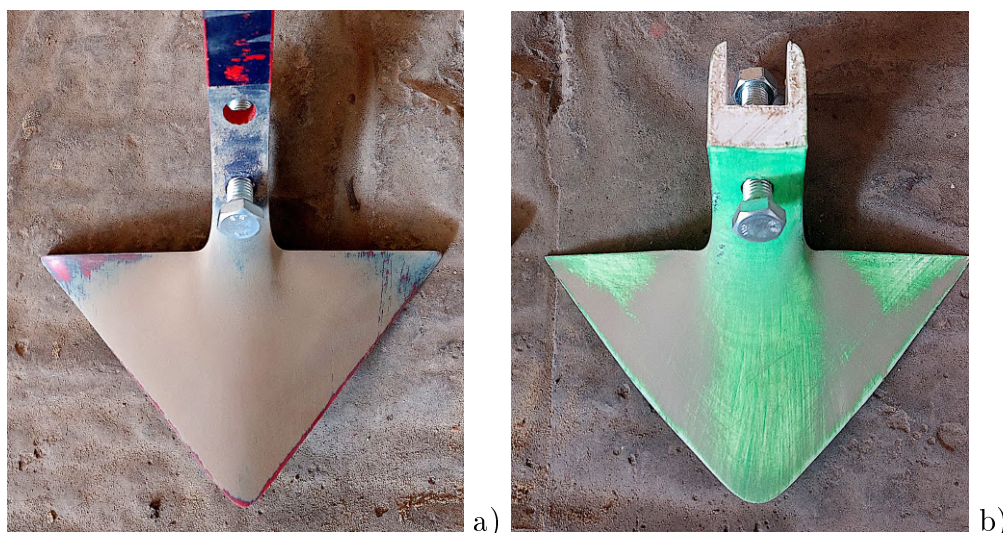
23. ábra. Az összes szimulált szerszám teljesítménye az egyes geometriai jellemzők alapján. pirossal ● és szürkével ● jelölt rendre a piros és a fehér szerszám teljesítménye a diagramokon.

5.2. Mérések során megfigyelt szerszámkopás

A szerszámok kopásának vizsgálata fontos információkat nyújt a szerszámok terheléséről, ami elengedhetetlen a szerszámok hatékonyságának és élettartamának javításához. Az alábbiakban bemutatom a mérések során észlelt kopási mintázatokat a vizsgált 3D

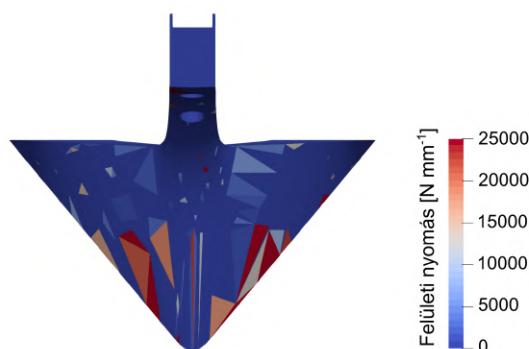
nyomtatott szerszámok esetében, és hipotetikusan elemzem azokat a jelenségeket, amelyek a szerszámfelületek különböző részein tapasztalt kopásért felelősek lehetnek.

A 24. ábrán a szerszámok kopási mintázata látható a mérések után. Mindkét szerszám esetében megfigyelhető, hogy a szerszáméleken a festék közel szimmetrikusan lekopott. A piros szerszám (24. ábra a) hátfelülethez közeli részein is lekopott a festék, ami azt jelzheti, hogy ezeken a területeken nagyobb súrlódás erő jelentkezett. A többi felületrész homokszemcsékkel szennyezett maradt, ami arra utalhat, hogy a nyomó irányú terhelés hatására a homokszemek a festett felületbe ágyazódtak, és ott maradtak. Ez a jelenség a fehér szerszámon (24. ábra b) is megfigyelhető, bár mérsékelt mértékben. A fehér szerszám esetében a hátfelülethez közeli részek kopása intenzívebb, míg a szerszámfelület közepén található egy olyan terület, amelyen sem jelentős festékkopás, sem homokszemcsék nem láthatók, ami arra utal, hogy ezen a részen a súrlódási erő dominánsabb lehetett, de nem volt annyira erős, mint a hátfelülethez közel.



24. ábra. A szerszámok kopásképe a mérések után. a) piros szerszám, b) fehér szerszám.

Ezt a kopási jelenséget elvileg szimulációval is nyomon lehetne követni. A szerszám egyes felületeire ható terhelések ugyanis normál- és nyíróirányú komponensekre bonthatók és lekérhetőek. Azonban egy adott időpillanatban viszonylag kevés elem lép kölcsönhatásba a szerszámmal, így egyetlen időpillanat nem ad elegendő információt a szerszám teljes terhelési állapotának megértéséhez (25. ábra). Ezért a jövőben érdemes lehet több időpillanatban mért terhelési adatokat összegezni egy ábrán, ami teljesebb képet nyújthatna a szerszám terhelési mintázatáról. Ennek megvalósítása azonban további programozási feladatokat igényel.



25. ábra. Szerszámon ébredő felületi nyomás egy vizsgált pillanatban (piros szerszám 1.27 m s^{-1} -os sebesség mellett).

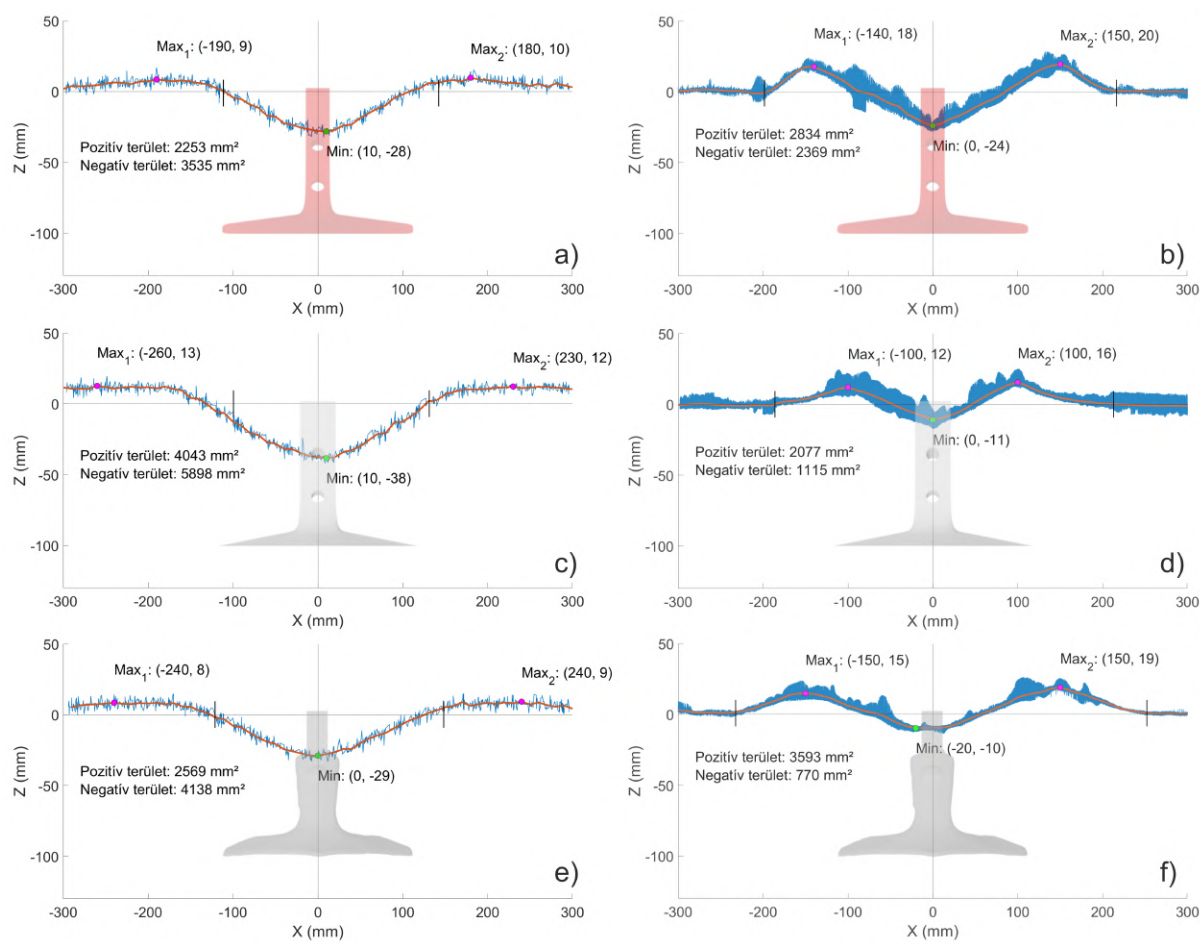
5.3. Mérések és szimulációk során kialakult talajprofilok

A talajprofilok vizsgálata a különböző szerszámgeometriák esetén lehetőséget ad a talaj és szerszám közötti kölcsönhatások mélyebb megértésére, valamint a szerszámok munkaminőségének értékelésére. A 26. ábrán bemutatott talajprofilok a szimulációk (a, c, e) és a valós mérések (b, d, f) eredményeit ábrázolják, amelyekből következtetéseket vonhatunk le a szerszámok működéséről és hatékonyságáról. Az elemzést úgy végeztem el, hogy a kezdeti talajfelszín a $y=0$ tengelyhez igazodjon.

A szimulációk során megfigyelhető, hogy a talajprofil pozitív értékű szakasza ellapult, és az I. és II. síknegyedben lévő maximumok nem mutatnak kiugró értékeket a többi pozitív értékhez képest.

Érdemes megjegyezni, hogy a szimulált profilok jellege (26. ábra a, c, e) lényegében hasonló maradt a különböző szerszámgeometriák esetén. Elképzelhetőnek tartom, hogy ez az alkalmazott talajmodell viszonylag alacsonyra állított 13.21° -os elemek közötti súrlódási szögével magyarázható. Előfordulhat ugyanis emiatt, hogy a szimulációban alkalmazott gömb alakú elemek nem képesek egymásba kapaszkodva nagy rézsűszöget kialakítani. A talajprofil pontosabb szimulációjához érdemes lehet nem gömb alakú elemekkel (például clumpokat) alkalmazni. Illetve fontos lehet már a talajkalibrálási szakaszban figyelembe venni a kialakuló talajprofil.

A valós mérések során (26. ábra b, d, f) a különböző geometriájú szerszámok eltérő profilú barázdákat alakítottak ki. Az azonos munkaszélesség mellett, de eltérő geometriával rendelkező szerszámok különböző szélességű barázdákat hoztak létre. A legszélesebb barázdát a Framest szerszám alakította ki, amely egyben a legnagyobb lazultságot is eredményezte. Ez a lazultság a pozitív és negatív területek arányában mutatkozik. A különbségek pedig valószínűleg a művelt részen kialakult talajsűrűség változásából fakadnak.



26. ábra. Az ábra különböző szerszámgeometriák talajprofiljait mutatja be, mind szimulációs, mind valós mérési eredmények alapján. Az a), c), és e) ábrák a szimulációk során kapott talajprofilokat ábrázolják, míg b), d), és f) ábrák a mérések alapján készült talajprofilokat szemléltetik. Az egyes ábrák a következő szerszámokat és haladási sebességeket ábrázolják: a) és b) a piros kapa talajprofilja 1.27 m s^{-1} sebességnél, c) és d) a fehér kapa talajprofilja 1.27 m s^{-1} sebességnél, e) és f) a Framest kapa talajprofilja 1.85 m s^{-1} sebességnél.

5.4. Felületmodell és testmodell teljesítményének összehasonlítása szimulált erőadatok alapján

Az alábbiakban a felületmodell és a testmodell teljesítményeit vetem össze a szimulált vontatási ellenállások alapján. A 9. táblázat eredményei szerint a vontatási ellenállás értékének különbsége a két modell között függ a sebességtől. Alacsonyabb sebességek esetén jelentősen nagyobb hibákat kaptam mint nagyobb sebességek esetén. Ez arra utalhat, hogy a sebesség csökkenésével fokozottabban érvényesülnek a geometriai különbségek hatásai.

A fehér szerszám esetében a szár vastagabbra lett modellezve, ami magyarázatot adhat a felületmodell és a testmodell teljesítménye közötti jelentős eltérésre. A Framest

kapánál a relatív hiba 9.92%-ra adódik. Továbbá, az eredményekből az is látszik, hogy alacsonyabb sebességeknél nagyobb eltérések mutatkoznak a modellek teljesítményében.

A jövőben érdemes lehet úgy továbbfejleszteni a GN 3D szerszámmodellt, hogy a szimulációkban testmodellel lehessen tesztelni.

9. táblázat. Felületmodell és testmodell teljesítményének összehasonlítása szimulált erő-adatok alapján. A relatív hibát a testmodellen szimulált erőhöz képest határoztam meg.

Szerszám	Szerszámsebesség [m s ⁻¹]	Felületmodellen szimulált erő [N]	Testmodellen szimulált erő [N]	Relatív hiba [%]
piros	1.944	123.33	119.65	3.07
piros	0.32	81.15	94.76	14.37
fehér	1.944	103.02	120.11	14.22
fehér	0.32	72.92	96.47	24.41
Framest	0.32	80.69	89.58	9.92
Framest	1.944	107.91	105.66	2.12

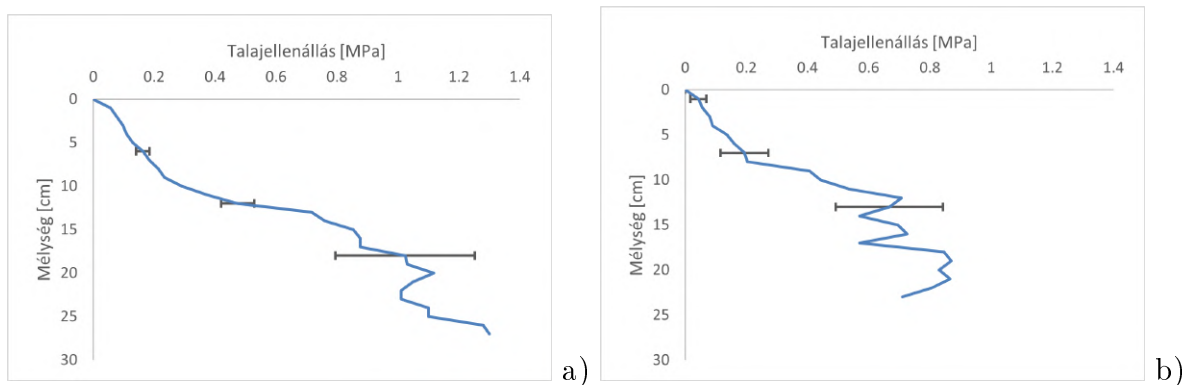
5.5. A mért talajnedvesség

A talaj nedvességtartalma kulcsfontosságú tényező a mérési vizsgálatok eredményeinek értelmezéséhez, mivel a talaj víztartalma közvetlenül befolyásolja annak tulajdonságait. A térfogati talajnedvesség összesen 21 alkalommal lett mérve, különböző helyeken a szerszámok nyomvonalában. A nedvességmenték átlaga 3%-ra adódott, 1.54%-os szórással. A kis szórás jelzi, hogy a talajnedvesség a mérési helyszínen viszonylag egyenletes volt. Ez a nedvességtartalom alacsonynak számít.

5.6. A mért és szimulált talajjellenállási erő

A mérések során több szerszámsebesség mellett is teszteltük a szerszámokat. Mivel az optimalizálási folyamatot nagyobb sebességen végeztük, ezért azon mérési eredmények kiértékelésére koncentrálok a jelen dolgozatban, melyek a legnagyobb sebességhez tartoznak. Ennél a sebességnél lettek a talajfelszínadatok is rögzítve.

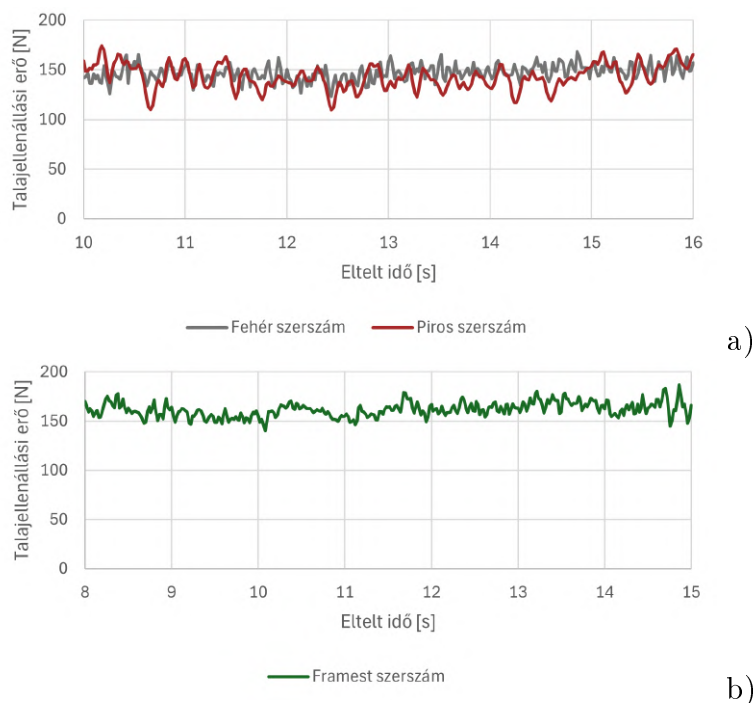
A talaj visszatömörítésének sikerességét minden vizsgálat előtt a penetrométerrel mért adatok alapján értékeltük. A 27. ábrán láthatók az átlagos penetrációs ellenállás-értékek és azok szórása három külön mérés adatsora alapján. Ezek az értékek jellemzik az 1.27 m s⁻¹ sebességgel húzott piros és fehér szerszámok (27. ábra a), valamint az 1.85 m s⁻¹ sebességgel alkalmazott Framest szerszám előtti talajállapotot (27. ábra b). Jól látható ezen diagramokon, hogy nincsen nagy eltérés a talajjellenállás adatokban a két mérés között, így a szerszámok teszteléséhez tartozó eredmények összehasonlíthatóak egymással.



27. ábra. A penetrációs ellenállás átlagos értékei és szórása három-három mérés adatai alapján, melyek az 1.27 m s^{-1} sebességgel húzott piros és fehér szerszámok (a), valamint az 1.85 m s^{-1} sebességgel alkalmazott Framest szerszám (b) előtti talajállapotot jellemzik.

A 7. táblázatban szereplő "lassú" mérések esetében meghatároztam az átlagerőket, majd azokat az adott szerszámokhoz tartozóan újra átlagoltam. Ezenkívül kiszámítottam a "lassú" mérések átlagsebességének átlagát is. Az így kapott erőértéket a 10. táblázatban szereplő szimulált értékekkel hasonlítom össze.

A nagy sebességek esetében nem állt rendelkezésre több mérési adat, ezért az erő- és sebességértékeket a 28. diagramokon bemutatott mért erők átlagolásával határoztam meg. Az így kapott átlagértékek kerültek rögzítésre a 10. táblázatban.



28. ábra. A szerszámokon mért talajellenállási erő. a) $1,27 \text{ m s}^{-1}$ vontatási sebesség mellett mért talajellenállás a fehér és piros szerszámok esetén, b) $1,85 \text{ m s}^{-1}$ vontatási sebesség mellett mért talajellenállás a Framest szerszám esetén.

A 10. táblázatban összehasonlíthatók a mért és szimulált erőértékek, azonos szerszámgeometriák és szerszámsebességek esetén. Látszik, hogy a relatív hiba mindkét szerszám esetében a $0.32 [m s^{-1}]$ sebességnél adódott a legkisebbre, ami arra utal, hogy a szimulációs modell kisebb sebességek esetén megbízhatóan becsüli a talajellenállási erő értékét. Ezenkívül megfigyelhető, hogy a piros és a fehér szerszám alacsony sebességnél egymáshoz képest is hasonlóan teljesítenek a fizikai mérések során, mint a szimulációkban. Nem meglepő az eredmény tudva azt, hogy a talajkalibrációt Tamás (2024) $0.62 [m s^{-1}]$ sebességnél végezte el [41]. A vizsgálataim alapján nem működik a modell nagy sebességek esetén, javaslatom szerint a talajmodellt újra kell kalibrálni, ha nagyobb sebességgel vontatott szerszámok esetén szeretnénk optimalizációs feladatot futtatni.

10. táblázat. Szimulált és mért átlagos erőértékek összehasonlítása nagyobb sebességek esetén. A relatív hibát a mért erőhöz képest határoztam meg.

Szerszám	Szerszámsebesség [$m s^{-1}$]	Mért erő [N]	Szimulált erő [N]	Relatív hiba [%]
piros	1.27	160.8	92.78	42.30
fehér	1.27	153.45	120.56	21.43
Framest	1.85	159.75	109.43	31.49
piros	0.32	98.08	94.76	3.38
fehér	0.32	105.28	96.47	8.37

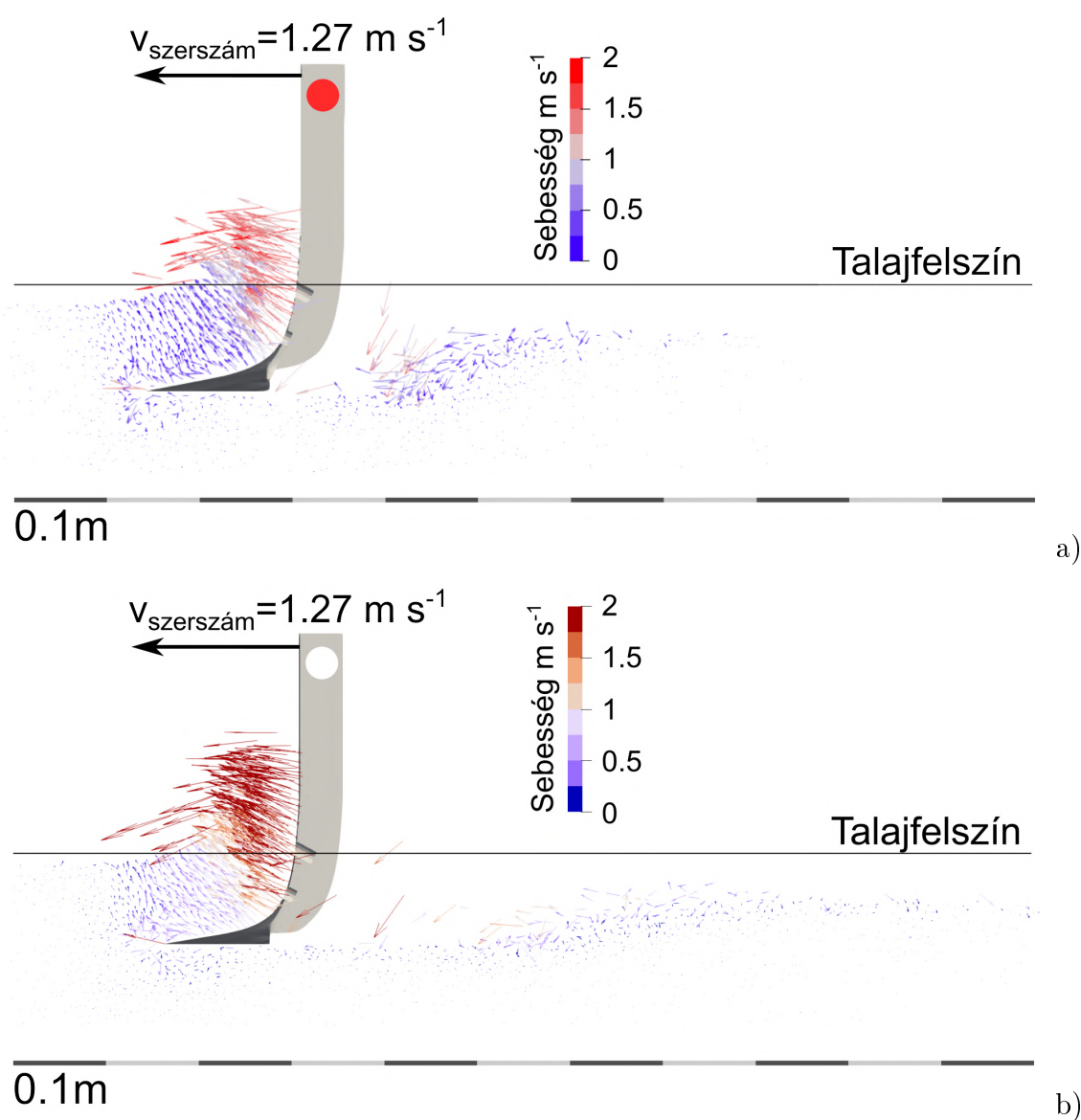
5.7. A talajmodell korlátainak és pontosságának vizsgálata

A jelenleg alkalmazott talajmodell egyik problémája a szimulációk során, hogy a súrlódásos-kohéziós (CohFrictMat) anyagmodell, amelyet a Yade-DEM szoftverben alkalmazunk, gömb elemek használata esetén nem képes a talaj tömörödésének jelenségét megfelelően kezelni. Amikor a talajra nyomó igénybevétel hat, az elemek közelednek egymáshoz az erőhatás alatt, azonban az erőhatás csökkenésével a halmaz térfogata végül nem változik az erőhatás közlése előtti állapothoz képest. Ez azt jelenti, hogy a modell nem tudja produkálni a talajtömörödés folyamatát. Továbbá, ezen talajmodellel nem lehet szimulálni azt a jelenséget sem, hogy a különböző módon tömörödött talajok feltörése egy adott szerszámmal milyen eredményeket hoz.

A talajtömörödés és talajlazítás jelenségének modellezése kulcsfontosságú a talajművelő szerszámok geometriájának optimalizálásában. A szerszámok egyik fő célja, hogy elkerüljék a talaj káros tömörítését, mivel ez negatív hatással lehet a talaj szerkezetére és talaj termékenységre. Az olyan talajmodellek fejlesztése, amelyek képesek kezelni a tömörödés folyamatát, alapvetően hozzájárulnának a szimulációk pontosságának növeléséhez, és ezáltal a szerszámok hatékonyabb optimalizálásához.

5.8. A szerszámok vizsgálata szimulációk alapján

A szimulált sebességeloszlásokat vizsgáltam a szimulált szerszámok esetében 1.27 m s^{-1} sebesség mellett. A szerszám szimmetriasíkja körül lettek megjelenítve az elemek sebességvektorai. A vektorok mérete, és színe a sebesség nagyságával arányos, iránya meg-egyezik az elemek sebességének irányával. A fehér és a piros szerszám előtt kialakuló sebességmező nagyon hasonló. Jól láthatók azonban a szerszámok mögött kialakuló se-
bességeloszlási különbségek. A fehér szerszám mögött (29. ábra b) 0.5 m s^{-1} sebességgel mozgó elemek 0.75 m -re is vannak, míg a piros szerszám esetében (29. ábra a) ilyen ele-
mek csak 0.45 m -ig figyelhetők meg. Ez azt jelenti, hogy a szimulációkban a piros szerszám
mögött rövidebb idő alatt alakul ki a végleges talajfelszín a fehér szerszámhoz képest.



29. ábra. A szimulált elemmozgás a szerszámok körül a szerszám szimmetriasíkja körül 1.27 m s^{-1} mellett. a) Piros szerszám esetén, b) fehér szerszám esetén.

6. Következtetések

- A Blender Geometry Nodes eszköze alkalmas arra, hogy organikus felülettel rendelkező, széles paramétertartományban állítható kultivátorszerszámokat modellezzen.
- Minden szimulációban vizsgált mennyiség (szerszámra ható talajjellenállás, felszakadt kohéziós kapcsolatok száma, elemek elrendeződése) esetében szükséges meghatározni, hogy milyen hosszú talajvályú szükséges az állandósult állapot eléréséhez a vizsgált értékek pontosabb becslése érdekében.
- Az erőmérések során a tranziens állapotban az erőértékek kis eltérést mutattak 1.944 m s^{-1} művelési sebességnél, így erőmérésekhez rövidebb talajvályú is elegendő lehet.
- Az időlépés hatásának vizsgálata alapján $\Delta t_{cr} \cdot 0.6$ időlépésnél a relatív hiba 1% alatt van az erőmérésekben. További vizsgálat szükséges annak érdekében, hogy meghatározzuk az időlépés hatását az elemek mozgására különböző szerszámsebességek esetén.
- A szimulációban az egyszerűsített egyfelületű és a 3D nyomtatott szerszámgeometriák között az erőértékek szempontjából legfeljebb 14,2% relatív hibát figyeltem meg.
- A szimulációk futásideje optimalizálva lett a szimulációs algoritmusok fejlesztésével.
- A 3D nyomtatott szerszámok alkalmasak a talajművelő szerszámok geometriájának fizikai tesztelésére laza szerkezetű talajokban. További vizsgálatok szükségesek azonban a talaj és a nyomtatott felület közötti súrlódási viszonyokkal kapcsolatban. Fontos lenne a szimulációkban alkalmazott súrlódási tényező hatásának vizsgálata is.
- A megfestett 3D nyomtatott szerszámok kopása a fizikai mérések során a kialakult kopáskép alapján vizsgálható.
- A fényképek alapján generált 3D modell jó eredményeket adott a barázda leképezésére, és olcsó, kellő pontosságú szkennelési eljárásként alkalmazható.
- A szimulációk során fordított arányosságot figyeltünk meg a kohéziós kapcsolatok számának felbomlása és a szerszám talajjellenállása között, amelynek van optimuma a célfüggvény alapján.
- A genetikusan algoritmus alkalmazása a szimulációkban egyre jobban teljesítő szerszámgeometriák elérését eredményezte a célfüggvények alapján.
- A következő valós mérések során pontosabban kell illeszteni a nyomtatott szerszámokat a szárhoz, pontosabb mérési eredmények elérése érdekében.

- Érdemes lenne a következő valós méréseknél a szárazakat önmagukban is végighúzni a talajvályúban, hogy azok hatását külön is vizsgálni lehessen.
- A 3D nyomtatott szerszámok lazítóhatása elmaradt a Framest szerszám lazítóhatásától. Ennek oka lehet, hogy az alkalmazott modell nem képes megfelelően modellezni a talajlazultságot, így ezt a jövőbeni optimalizálás során figyelembe kellene venni.
- A szimulált szerszámra ható talajellenállás értékek minden esetben alulbecsülték a mért adatokat.
- A szerszám sebességének szignifikáns hatása van a kialakuló talajfelszínre a szimulációk során, ezért érdemes lenne a fizikai méréseknél a sebesség hatását felszínszenveléssel is vizsgálni.
- A relatív hiba a piros és a fehér szerszám esetében is a $0.32 [m s^{-1}]$ sebességnél adódott (rendre 3.38, 8.37%) a legkisebbre más mérésekhez képest. Tehát a szimulációs modell kisebb sebességek esetén megbízhatóan becsüli a talajellenállási erő értékét. Hasonló hibahatárú becslésekre jutottak vontatási ellenállások esetén Nalawade és szerzőtársai (2023) [30] is.
- A vizsgálataim alapján nem működik a talajmodell nagy sebességek esetén, javaslatom szerint újra kell kalibrálni, ha nagyobb sebességgel vontatott szerszámok esetén szeretnénk optimalizációs feladatot futtatni.
- A jövőbeli kutatások során érdemes kihasználni mélyebben a Paraview posztprocesszási lehetőségeit.
- Az alkalmazott talajmodell nem képes a szerszám után kialakuló barázda profiljának modellezésére. Ehhez szükséges lehet a kalibrációs koncepció újragondolása, illetve teljesen új kapcsolati modell alkalmazása.
- Problémát jelenthet, hogy az alkalmazott talajmodell $0.65 m s^{-1}$ sebességnél lett kalibrálva, míg a geometriaoptimalizálás $1.944 m s^{-1}$ művelési sebességen történt. Egy sejtés, hogy a kalibráció érzékeny lehet a művelési mélységre is.
- A szakirodalom alapján a jövőben hiszterézises rugós talajmodell alkalmazása javasolt, amely lehetővé tenné a szerszám után kialakuló talajfelszín modellezését gömb elemek használata esetén.

7. Összefoglalás - saját munka bemutatása

A dolgozatban szereplő teljes kutatás alapvetően saját ötlet alapján készült, melyet leginkább a szakirodalomban talált hiányosságok, és témavezetőm, Dr. Tamás Kornél inspirált. A talajvályús mérések során kaptam segítséget Hudoba Zoltántól a mérőberendezések kezelésében, és a mérések koordinálásában.

Ezen kutatásom során áttekintettem a talajművelő szerszámokra vonatkozó tervezési módszereket, valamint a DEM alkalmazását talaj-szerszám kölcsönhatás terén. Kutattam a mai talajművelési irányelveket és célokat. Áttekintettem a kultivátorszerszámok típusait, és azok jellemző geometriáját. Létrehoztam egy organikus felületekből álló 14 paraméterrel leírható szerszámot a Blender Geometry Nodes eszközével. Létrehoztam egy szimulációs környezetet, melyben genetikus algoritmus segítségével lehet talajművelő szerszám geometriáját optimalizálni. Paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztem a szimulációk megbízhatóságának tesztelése érdekében. Az optimalizálási feladat elvégzéséhez célfüggvényeket alkottam. Az optimalizálás során 670 különböző geometriát teszteltem és értékeltem. A szimulációk alapján jól teljesítő szerszámgeometriákat FDM nyomtatóval legyártottam, megcsiszoltam, lefestettem. Ezeket laboratóriumi körülmények között teszteltem. Mértem a szerszámra ható talajjellenállási erőt, és 3D szkenneltem a szerszámok után kialakuló talajfelszínt. A tesztelt geometriák között szerepelt egy már forgalomban lévő (Framest) szerszám is. A tesztelt sebességeknek megfelelően újabb szimulációkat végeztem. A szimulációs eredményeimet összehasonlítottam a mérési eredményekkel. Vizsgáltam az alkalmazott talajmodell teljesítményét a mért adatok alapján. Vizsgáltam mérések során a szerszám kopását, és javaslatot tettem arra, miként lehetne ezt vizsgálni későbbi szimulációk alapján is. Vizsgáltam, hogy mekkora eltérés adódhat a szimulációk során a szerszám-geometria egyszerűsítéséből. Vizsgáltam a szimulációk alapján a szerszámok körül kialakult sebességmezőt. Levontam a következtetéseimet a szimulációk és a mérési eredmények alapján az alkalmazott módszerekre és eredményekre vonatkozóan. A konklúziók között meghatároztam a kutatás rövid távú fejlesztési irányait, a hosszú távú fejlesztési irányokat pedig a kitekintésben részleteztem.

8. Jövőbeli irányok és fejlesztési lehetőségek

8.1. További geometriai változatok vizsgálata

A kutatás jelenlegi szakaszában csupán néhány szerszámgeometriát leíró paraméterkombináció optimalizálása történt meg. A jövőbeli fejlesztések során érdemes lenne olyan, eddig nem vizsgált paraméterkombinációk optimalizálására is fókuszálni, amelyek új geometriai variációkat eredményezhetnek. Ezeket az újabb kombinációkat a dolgozatban bemutatott hasonló módszerekkel lehetne értékelni és összehasonlítani eddigi eredményekkel. Fontos lehet vizsgálni a szerszám működését különböző munkamélyiségeken, beleértve a sekélyebb és mélyebb talajművelési körülményeket is. Továbbá, javasolt a szerszám előrellentését is paraméterként kezelni, hogy megértsük, milyen mértékben befolyásolja ez a szerszám talajra gyakorolt hatását.

8.2. Alkalmazási lehetőségek kiterjesztése különböző szerszámkombinációkra, illetve más szerszámokra

A jelen kutatás során az optimalizációs folyamatban nem került figyelembevételre, hogy a kultivátorszerszámok jellemzően nem önmagukban, hanem többedmagukkal, egymás után elhelyezve dolgoznak a talajban. Például egy szerszám elöl, kettő pedig hátul, vagy más elrendezésben helyezkedik el. Ennek figyelembevétele különösen fontos lehet a szerszámok után maradó talajprofil geometriájának szempontjából, hiszen az egyenletes talajfelszín biztosítása általában erős követelmény a húzott szerszámok után.

A geometria-optimalizáció kiterjeszthető nemcsak a más talajművelő eszközökre, hanem akár más szemcsés anyagokat kezelő szerszámokra, illetve gépekre is.

8.3. Különböző talajmodellek figyelembe vétele a szerszám hatékonyságának tesztelése során

Érdemes lenne egy adott szerszámot nemcsak egyetlen talajmodellben vizsgálni, hanem több különböző talajmodellben egymás után tesztelni. A szerszám teljesítményének kiértékelése több talajtípusban végzett tesztelés alapján lehetőséget nyújtana arra, hogy a gazdák által várhatóan használt különböző talajtípusokat is figyelembe vegyük az optimalizáció során.

Egy másik érdekes kutatási irány lehetne ugyanazon talajtípust modellező, de különböző paraméterekkel (például más geometriájú elemekkel, úgynevezett „clumpokkal”) leírt talajmodellek összehasonlítása. Ez lehetőséget adna arra, hogy megvizsgáljuk, hogyan teljesítenek az egyes szerszámok különböző talajmodellekben, és vajon az eredmények összhangban vannak-e egymással. Azonos geometriájú szerszámok különböző talajmodellekben történő vizsgálata megmutathatná, hogy az eredmények konzisztens módon ugyan-

arra a következtetésre vezetnek-e, vagy a modellezési eltérések jelentős hatással vannak a szerszám teljesítményének megítélésére. Ez a kérdés azért is fontos, mert segíthet tisztázni, hogy a szerszámok teljesítményét milyen mértékben befolyásolják a talajmodellezési módszerek.

8.4. Optimalizálást végző algoritmus fejlesztése, lecserélése

A jelenleg alkalmazott genetikus algoritmus (GA) korlátja még, hogy egy generációban nem tud 38 egyednél többet generálni. Ez egy következő fejlesztés során viszonylag kis erőforrásigénnyel fejleszthető. Ezen korlát eliminálása több mint 5 paraméter optimalizálását tenné lehetővé.

Tovább gyorsíthatná az optimalizálási folyamatot az, ha genetikus algoritmus helyett más algoritmust, például "particle swarm optimalizációt" (PSO) alkalmaznánk. Kibriya és szerzőtársai (2023) megmutatták ugyanis, egy paraméterkalibrációs feladaton keresztül, hogy a PSO algoritmus gyorsabban talál helyes megoldásokat a GA-nál [24]. Megmutatták azt is (2024), hogy az általuk továbbfejlesztett "trust based particle swarm optimalizáció" (TBPSO) még gyorsabban hoz eredményeket más általuk tesztelt algoritmusokhoz (Marine Predator Algorithm (MPA), Golden Eagle Optimiser (GEO)) képest is [23].

8.5. Számítást végző erőforrás lecserélése

Úgy is csökkenthető a szimulációk futásának ideje, hogy modernebb CPU-val (processzorral) rendelkező számítógépre cseréljük a jelenlegit. Azonban egy további gyorsítási lehetőség a szimulációs számítások GPU-n (videokártyán) történő végrehajtása lenne, a jelenlegi CPU-alapú megközelítés helyett. Bár a Yade-DEM szoftver jelenleg nem támogatja a GPU-alapú gyorsítást, Nagy és szerzőtársai eredményei azt mutatják, hogy a DEM szimulációk időtartama jelentősen csökkenthető, akár néhány óráról néhány percre is [29].

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 területén. Köszönöm Hudoba Zoltán Tanár úrnak a laboratóriumi mérésekben nyújtott segítséget, és szakmai tapasztalatainak megosztását.

Köszönöm Szabó Taddeusnak a programozási feladatokban nyújtott segítséget és inspirációt. Köszönöm Csordás Tamásnak a talajművelés során gyűjtött gyakorlati tapasztalatainak megosztását és javaslatait kutatásomhoz. Köszönöm Dr. Orosz Ákosnak a mindenkori pozitív-kritikus hozzáállását és szakmai segítségnyújtását kutatásaimhoz. Köszönöm Pásthly Lászlónak a mindenkori segítséget a DEM modellezésben. Köszönöm az Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszékről Horváth Dánielnek a DEM modellezésben a segítséget. Köszönöm Dolowschiák Lilinek és Csordás-Szabó Nettinek a dolgozat lektorálását.

Ezt a dolgozatot a Magyar Tudományos Kutatási Alap (NKFIH FK-146067) támogatta.

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24-2-BME-329 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



9. Hivatkozások

Hivatkozások

- [1] Introduction & Blender Manual — docs.blender.org. https://docs.blender.org/manual/nb/3.5/modeling/geometry_nodes/introduction.html. [Accessed 07-11-2024].
- [2] Min-till és no till növénytermesztési technológia takatónövényekkel, ami több, mint zöldítés... de takarónövényben vadkár??? — vadkarinfo.hu. [https://https://bit.ly/3Z7962Z](https://bit.ly/3Z7962Z). [Accessed 07-11-2024].
- [3] James Ahrens, Berk Geveci, and Charles Law. ParaView: An end-user tool for large data visualization. In *Visualization Handbook*. Elsevier, 2005. ISBN 978-0123875822.
- [4] Mohsin Ajmal, Thomas Roessler, Christian Richter, and André Katterfeld. Calibration of cohesive dem parameters under rapid flow conditions and low consolidation stresses. *Powder Technology*, 374:22–32, 2020.
- [5] Petra Aradi, József Gräff, and György Lipovszki. Számítógépes szimuláció.
- [6] Z Asaf, D Rubinstein, and I Shmulevich. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2):227–242, 2007.
- [7] Utkarsh Ayachit, Andrew Bauer, Berk Geveci, Patrick O’Leary, Kenneth Moreland, Nathan Fabian, and Jeffrey Mauldin. Paraview catalyst: Enabling in situ data analysis and visualization. In *Proceedings of the First Workshop on In Situ Infrastructures for Enabling Extreme-Scale Analysis and Visualization (ISAV 2015)*, pages 25–29, November 2015.
- [8] K Bagi. A diszkrét elemek módszere. *BME Department of Structural Mechanics, Budapest*, pages 5–12, 2007.
- [9] Márta Birkás. *Talajművelők zsebkönyve*. Mezőgazda Lap- és Könyvkiadó kft., 2010.
- [10] Blender Online Community. *Blender - a 3D modelling and rendering package*. Blender Foundation, Stichting Blender Foundation, Amsterdam, 2018.
- [11] Peter A Cundall and Otto DL Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *geotechnique*, 29(1):47–65, 1979.
- [12] Gerber Gábor Ferdinánd. *Talajművelés gépeinek megismerése, működésük*. Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2008.

- [13] Frederik F Foldager, Johanna Maria Pedersen, Esben Haubro Skov, Alevtina Evgrafova, and Ole Green. Lidar-based 3d scans of soil surfaces and furrows in two soil types. *Sensors*, 19(3):661, 2019.
- [14] Ahmed Fawzy Gad. Pygad: An intuitive genetic algorithm python library, 2021.
- [15] Ahmed Fawzy Gad. Pygad: An intuitive genetic algorithm python library. *Multimedia Tools and Applications*, pages 1–14, 2023.
- [16] RJ Godwin and G Spoor. Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 22(3):213–228, 1977.
- [17] Songül Gürsoy, Ying Chen, and Bo Li. Measurement and modelling of soil displacement from sweeps with different cutting widths. *Biosystems engineering*, 161:1–13, 2017.
- [18] Kerényi György. *Talaj vágásának modellezése végeelem módszerrel*. Disszertáció, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 1997.
- [19] Seyed Hasan Hoseinian, Abbas Hemmat, Ali Esehaghbeygi, Gholamhossein Shahgoli, and Alireza Baghbanan. Development of a dual sideways-share subsurface tillage implement: Part 2. effect of tool geometry on tillage forces and soil disturbance characteristics. *Soil and Tillage Research*, 215:105200, 2022.
- [20] Kocsis István. *Talajművelő gépek szerkezete, szerelése*. Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2008.
- [21] Werner Jester and Andreas Klik. Soil surface roughness measurement—methods, applicability, and surface representation. *Catena*, 64(2-3):174–192, 2005.
- [22] Subrata Karmakar and R Lal Kushwaha. Dynamic modeling of soil–tool interaction: an overview from a fluid flow perspective. *Journal of Terramechanics*, 43(4):411–425, 2006.
- [23] Ghulam Kibriya, János Botzheim, Ákos Orosz, and Katalin Bagi. Automatic calibration of a discrete element model of a masonry arch by swarm intelligence methods. *Computers & Structures*, 299:107401, 2024.
- [24] Ghulam Kibriya, Ákos Orosz, János Botzheim, and Katalin Bagi. Calibration of micromechanical parameters for the discrete element simulation of a masonry arch using artificial intelligence. *Infrastructures*, 8(4):64, 2023.
- [25] Bo Li, Ying Chen, and Jun Chen. Modeling of soil–claw interaction using the discrete element method (dem). *Soil and Tillage Research*, 158:177–185, 2016.

- [26] MN Lysych. Review of numerical methods for modeling the interaction of soil environments with the tools of soil tillage machines. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1399, page 044014. IOP Publishing, 2019.
- [27] The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts. *MATLAB version 9.10.0.1613233 (R2021a)*, 2021.
- [28] E McKyes and J Maswaure. Effect of design parameters of flat tillage tools on loosening of a clay soil. *Soil and Tillage Research*, 43(3-4):195–204, 1997.
- [29] Dániel Nagy, László Pásthly, and Kornél Tamás. Development of a gpu-based dem solver for parameter optimization in the simulations of soil-sweep tool interactions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227:109482, 2024.
- [30] Rohit Dilip Nalawade, Krishna Pratap Singh, Ajay Kumar Roul, and Abhishek Patel. Parametric study and calibration of hysteretic spring and linear cohesion contact models for cohesive soils using definitive screening design. *Computational Particle Mechanics*, 10(4):707–728, 2023.
- [31] László Pásthly, Bence Szabó, and Kornél Tamás. Measuring and modelling of soil displacement from a horizontal penetrometer and a sweep using an imu sensor fusion and dem. *Soil and Tillage Research*, 244:106207, 2024.
- [32] Szendrő Péter. *Mezőgazdasági gépszerkezettan*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 2000.
- [33] DC Reicosky. Tillage-induced co₂ emission from soil. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 49:273–285, 1997.
- [34] Christian Richter, Thomas Rößler, Günter Kunze, Andre Katterfeld, and Frank Will. Development of a standard calibration procedure for the dem parameters of cohesionless bulk materials—part ii: Efficient optimization-based calibration. *Powder Technology*, 360:967–976, 2020.
- [35] Thomas Roessler, Christian Richter, André Katterfeld, and Frank Will. Development of a standard calibration procedure for the dem parameters of cohesionless bulk materials—part i: Solving the problem of ambiguous parameter combinations. *Powder Technology*, 343:803–812, 2019.
- [36] I Shmulevich, Z Asaf, and D Rubinstein. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil and Tillage Research*, 97(1):37–50, 2007.

- [37] Vaclav Smilauer, Vasileios Angelidakis, Emanuele Catalano, Robert Caulk, Bruno Chareyre, William Chevrement, Sergei Dorofeenko, Jerome Duriez, Nolan Dyck, Jan Elias, et al. Yade documentation. *arXiv preprint arXiv:2301.00611*, 2023.
- [38] Jianfeng Sun, Huaming Chen, Zaiman Wang, Zhiwu Ou, Zhou Yang, Jieli Duan, et al. Study on plowing performance of edem low-resistance animal bionic device based on red soil. *Soil and Tillage Research*, 196:104336, 2020.
- [39] Bence Szabó, Taddeus Szabó, and Kornél Tamás. Calibration of discrete element-method soilmodels based on penetrometer and direct shear. 2024.
- [40] Kornel Tamas. The role of bond and damping in the discrete element model of soil-sweep interaction. *Biosystems engineering*, 169:57–70, 2018.
- [41] Kornél Tamás. Modelling the interaction of soil with a passively-vibrating sweep using the discrete element method. *Biosystems Engineering*, 245:199–222, 2024.
- [42] Kornél Tamás 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.
- [43] Kornél Tamás, Zsófia Oláh, Lilla Rácz-Szabó, and Zoltán Hudoba. Investigation of soil-sweep interaction in laboratory soil bin and modelling with discrete element method. In *ECMS*, pages 421–428, 2018.
- [44] Jin Tong, Xiao-Hu Jiang, Yue-Ming Wang, Yun-Hai Ma, Jun-Wei Li, and Ji-Yu Sun. Tillage force and disturbance characteristics of different geometric-shaped subsoilers via dem. *Advances in Manufacturing*, 8:392–404, 2020.
- [45] Mustafa Ucgul, Chris Saunders, and John M Fielke. Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough. *Biosystems Engineering*, 155:44–54, 2017.
- [46] JW Warren. The “min till” revolution and the culture of innovation. *Vulnerability and adaptation to drought: the Canadian prairies and South America*. University of Calgary Press, Calgary, pages 107–132, 2016.
- [47] Long Zhou, Yubin Lan, Jianqun Yu, Yang Wang, Dongxu Yan, Kai Sun, Wenjun Wang, and Yulong Chen. Validation and calibration of soil parameters based on eepa contact model. *Computational Particle Mechanics*, 10(5):1295–1307, 2023.