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

Talaj-szerszám kölcsönhatás diszkrét elemes modelljének fejlesztése mesterséges intelligencia alkalmazásával

TDK Dolgozat

Készítették
Szabó Bence
Wágner Árpád

Konzulensek
Dr. Tamás Kornél
Kovács László
Grad-Gyenge László

2022. november

Tartalomjegyzék

1. Rövidítésjegyzék **1**

2. Bevezetés **2**
2.1. Áttekintés 2

3. Irodalomkutatás **4**
3.1. Talaj-szerszám kölcsönhatásának vizsgálati módszerei 4
3.2. Aktív nyomjelzős dinamikus elmozdulásvizsgálatok más tudományterületekről . . 7
3.3. DEM modellek automatikus kalibrálása 10

4. Szakirodalmi összefoglalás és kritikai elemzés **11**
4.1. Célkitűzés 12

5. Anyagok és módszerek I. - Fizikai mérések **13**
5.1. A saját laboratóriumi környezet bemutatása 13
5.2. A mérőeszközök kalibrációjának bemutatása 15
5.3. Pályabecslés mesterséges intelligencia modellekkel 21
5.4. A mérések menete 26

6. Anyagok és módszerek II. - DEM szimulációk **27**
6.1. Felépített szimulációs környezet 27
6.2. Paraméterérzékenység vizsgálatok 29
6.3. Genetikus algoritmus alkalmazása a szimulációk automatikus kalibrálásához . . . 31

7. Eredmények és azok elemzése **34**
7.1. Paraméterérzékenység-vizsgálatok eredményei 34
7.2. A fizikai mérések eredményei 38
7.3. A genetikus algoritmussal történt talajkalibráció eredménye 41

8. Összefoglalás **42**

9. Konklúzió **43**

10. Kitekintés **44**

11. Köszönetnyilvánítás **45**

1. Rövidítésjegyzék

1D	Egydimenziós
3D	Háromdimenziós
4D	Négydimenziós
AHRS	Attitude Heading Reference System
DEM	Discrete Element Method
CAD	Computer Aided Design
CFD-DEM	Computational Fluid Dynamics - Discrete Element Method
FDM	Fused Deposition Modelling
FEM	Finite Element Method
IMU	Inertial Measurement Unit
MEMS	Microelectromechanical Systems
NSGA-II	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
USB	Universal Serial Bus
PLA	Polylactic Acid
PVC	Polyvinyl Chloride
RFID	Radio Frequency Identification
LiDAR	Light Detection and Ranging
PyGAD	Python Genetic Algorithm
MARG	Magnetic, Angular Rate and Gravity *sensor*
SD	Secure Digital
STL	Stereolithography

2. Bevezetés

Történelmi leletek bizonyítják, hogy már időszámításunk előtt négyezer évvel is foglalkozott az ember talajműveléssel [23]. A megfelelő talajállapot gazdaságos fenntartására folyamatosan történnek kutatások hazánkban és a világ más országaiban is. A talajművelés kulcsfontosságú szerepet tölt be a termesztendő kultúrnövényeink fejlődésében. Ehhez a területhez köthető kutatások egyik iránya a talaj és a művelőszerszám kölcsönhatásának vizsgálata. Mivel a szerszámok és művelési paraméterek optimalizálásával csökkenthető a talajműveléshez szükséges energia és művelés közben az üvegházhatású gázok kibocsájtása, növelhető a talaj művelés utáni víztartási képessége. A megfelelő talajállapot létrehozásával pedig kedvezően befolyásolható a kultúrnövények fejlődése.

A talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálata intenzíven kutatott terület [45, 46]. Általános cél a szerszámgeometria és annak vontatási paramétereinek meghatározott feladatra történő optimalizálása. A jelenséget leíró pontos összefüggések nem ismertek, ezért a kutatók és tervezők fizikai mérések és numerikus szimulációk alapján vonják le következtetéseiket. A fizikai mérések legnagyobb kihívásait a tesztelendő szerszámgeometriák legyártása, illetve azok különböző talajtípusokban történő tesztelése okozzák. A numerikus szimulációk során pedig a legnagyobb feladatot a különböző talajmodellek kalibrálása jelenti, ez ugyanis szintúgy csupán fizikai mérések eredményei alapján lehetséges.

A talaj-szerszám kölcsönhatás kutatásáról szóló eredményeket áttekintve azt állapíthatjuk meg, hogy ezen vizsgálatokban a művelőszerszámra ható átlagos vontatási ellenállás mellett a művelés során a talajrészecskék haladása is fontos makromechanikai mennyiség. Azonban problémát jelent, hogy a talajművelés közben a talaj belső mozgásait fizikai vizsgálatok során kívülről nem lehet megfigyelni, ez nehezíti a talaj-szerszám kölcsönhatás közben a belső talajmozgás vizsgálatát. Így a talajművelő szerszámok tervezésénél [44] a talajmozgatásra vonatkozó tervezési követelményeknek egzakt meghatározása is körülményes.

A problémára egy megoldás lehet, hogy a talaj-szerszám kölcsönhatásban a talaj belső elmozdulásait diszkrét elemes módszeren (DEM) [5] alapuló szimulációk segítségével vizsgáljuk. Ezek alapján belátható, hogy a talaj-szerszám kölcsönhatás DEM modellezésénél a szerszámra ható talajellenállási erőn túl fontos a talaj elmozdulási tulajdonságait is kalibrálni.

További nehézséget okoz, hogy a DEM-ben modellezett talaj makromechanikai tulajdonságai a valós talaj makromechanikai tulajdonságaihoz úgy közelíthetők, ha a szemcsés talajmodellben kapcsolódó két elem közti fizikailag közvetlenül nem mérhető mikromechanikai paramétereket (mint például az elemek közti súrlódási tényezőt, kohéziót...) megfelelően választjuk meg [18]. Genetikus algoritmus segítségével azonban automatizálható a talajkalibrálási folyamat [38].

2.1. Áttekintés

Mielőtt részletesen ismertetnénk a szakirodalomban találtakat, áttekintést nyújtunk arról, milyen irányban végeztük szakirodalomkutatásunkat.

2.1.1. A talaj mozgásának vizsgálata fizikai talaj-szerszám kölcsönhatás során

A szakirodalomból kiderül, hogy fizikai mérések során a talaj mozgásának viselkedését különböző módszerekkel vizsgálták a talaj-szerszám kölcsönhatásában. Ezen módszerek négy fő csoportba sorolhatók. Megkülönböztethetők statikus [35, 14, 50] és dinamikus [29] mérések. Továbbá a talaj kialakult felszínét vizsgáló módszerek [14, 50, 47], valamint nyomkövetős vizsgálati módszerek [35, 29, 17, 30, 40]. Statikus mérésként hivatkozunk a továbbiakban arra,

amikor a talaj-szerszám kölcsönhatása előtti talajállapot/talajszerkezetet a kölcsönhatás után kialakult talajelmozdulásokkal hasonlítják össze. Dinamikus vizsgálatnak nevezzük, amikor a talaj-szerszám kölcsönhatása közben az idő függvényében vizsgálják a kutatók a talaj elmozdulásait. A talaj felszínének vizsgálata során általában valamilyen mechanikus [47] vagy digitális [14, 50] elvű szkennelési módszert alkalmaznak. Nyomkövetős vizsgálatok során pedig a talaj felszínére [50, 29, 22, 49] vagy a talajba [35, 17, 40, 31, 42] helyezett passzív vagy aktív testek elmozdulásai alapján vonnak le következtetéseket a talaj mozgására vonatkozóan. Passzív nyomkövető lehet bármilyen merev test (például tömör alumíniumkocka), aktív nyomkövető alatt pedig olyan merev testet értünk, mely valamilyen szenzorral van felszerelve.

2.1.2. Példák aktív nyomkövetős dinamikus elmozdulásvizsgálatokra a tudomány más területeiről

Aktív nyomkövető alkalmazására nem találtunk példát a talajelmozdulás vizsgálatokban talaj-szerszám kölcsönhatása közben, annak ellenére, hogy a tudomány számos más területén már alkalmaznak gyorsulásmértő-giroszkóp-magnetométer szenzorral szerelt nyomkövető eszközöket. Például sziklaomlás [10, 9, 8, 7], valamint vízen történő fák úszási viselkedésének vizsgálatára [43], továbbá víz alatti hordalék [34, 3, 1, 16, 26, 28, 27, 3], földcsuszamlás [12], gépekben áramló szemcsés közegek [21] vizsgálatára. Azonban csak nagyon kevés esetben alkalmazták az aktív nyomkövetővel mért adatokat a szenzor által bejárt pálya meghatározásához [7, 12].

2.1.3. A diszkrét elemes módszer alkalmazhatósága talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatára

A diszkrét elemes módszer (DEM) egy szemcsés anyagok modellezésére alkalmas numerikus szimulációs módszer [5, 37, 4]. A talaj modellezhető szemcsés anyagként, így gyakran modellezik a talaj-szerszám kölcsönhatását is ezen módszer segítségével [46, 46, 47, 17, 30, 49, 48]. A módszer alkalmazása során az egyik legnagyobb kihívást a szemcsés anyag kalibrációja jelenti. Ezen folyamat során a cél, hogy a mikromechanikai jellemzőkkel definiált szemcsés anyagmodell makromechanikai tulajdonságai minél jobban megközelítsék a fizikai mérések során meghatározott valós anyag makromechanikai tulajdonságait. A talaj anyagának kalibrálása jelenleg többnyire egy körülményes, lassú és empirikus folyamat. A DEM-ben ugyanis az anyag kalibrálása fizikai mérések (például nyíróvizsgálat, penetrációs vizsgálat) során meghatározott makromechanikai jellemzők (például nyírószilárdság, penetrációs ellenállás, elemek közötti súrlódási szög, látszólagos kohézió) alapján történik. DEM-ben a szemcsés anyag kalibrálása azonban csupán két elem között fellépő mikromechanikai jellemzők definiálásával lehetséges, melyek nem mérhetők közvetlenül fizikai mérések során. (A mikromechanikai jellemzőket a DEM-ben történő modellezésben kapcsolati paraméterek írják le.)

Talaj-szerszám kölcsönhatás során mért fizikai jellemzők alapján is lehetséges a talajmodell kalibrálása DEM-ben [46, 46, 36]. Például kultivátorszerszámra ható talajellenállás alapján. Azonban pontosabb talajmodell kapható, ha egyszerre több makromechanikai jellemzőre alapozva kalibráljuk a talajt. Kutatók további makromechanikai jellemzőket határoznak meg mérésekkel, és igyekeznek minél több makromechanikai jellemzőt egyazon talajmodellel megközelíteni a minél pontosabb DEM talajmodell létrehozásához.

2.1.4. A digitális szerszámtervezési módszer elve és korlátai

A szerszám-geometria, valamint a talajművelési peremfeltételek a szimulációk során széles körben parametrizálhatók. Amennyiben a szimulációkhoz szélesebb körben rendelkezésre áll ka-

librált talajmodell, belátható, hogy gyorsabb és költséghatékonyabb megoldást nyújthatnak a numerikus szimulációs módszerek a szerszám-geometria és művelési paraméterek optimalizálási feladatai során. Az optimalizálási feladatok pedig automatizálhatók (Például genetikus algoritmus alkalmazásával). Jelenleg ez még távolabbi cél, ugyanis nem állnak nagy mennyiségben rendelkezésünkre a szimulációkhoz azonos módszerekkel kalibrált széles körben elérhető talajmodellek (talajmodell-adatbázis). Problémát jelent az is, hogy a kalibrált talajmodellek nem modellezik a valós talaj fizikai jellemzőit egyszerre azonos pontossággal [46]. Például míg a talajban húzott szerszámra ható vontatási ellenállás egészen nagy pontossággal megközelíthető numerikus szimulációkban, nagyon kevés kutatásban számszerűsítik, hogy művelés közben a szimulált talajmodell mozgása mennyire egyezik a valós talaj mozgásaival [17, 30, 49]. A hozzárendelés ugyanis nem egyértelmű [20], például különböző paraméterkombinációkkal is modellezhető szimulációkban ugyanaz a vontatási ellenállás, különböző talajmozgások mellett.

3. Irodalomkutatás

3.1. Talaj-szerszám kölcsönhatásának vizsgálati módszerei

A művelés következtében kialakult talajfelszín befolyással bír a talaj vízelvezetésére és az erózió valamint a defláció kialakulására. Így több kutatás a kialakult talajfelszín statikus vizsgálatát helyezi előtérbe. Például Foldager és szerzőtársai [14] (2019) LiDAR alapú 3D szkenneléssel és analóg módszerrel is vizsgálták a talaj felszínén művelés következtében kialakult barázdák keresztmetszetét. Hangsúlyozzák, hogy az érintkezésmentes mérések pontosabb eredményt hoznak, továbbá a mérések felbontása is nagyobb. A kutatás témája azonban nem tér ki arra, hogy lehetne-e talaj-szerszám kölcsönhatása közben dinamikus talajfelszín vizsgálatot végezni LiDAR alapú 3D szkenneléssel.

Rahman és szerzőtársai [35] (2005) hígtrágya talajba juttatásának jobb megértése céljából vizsgálták a talaj belső elmozdulását. Ezen kutatásuk keretein belül következtetéseket vontak le arra vonatkozóan, hogy mekkora sűrűségű, milyen anyagú és mekkora méretű nyomjelzőket érdemes alkalmazni talajelmozdulás vizsgálatára. Különböző anyagból készült (fa, PVC, alumínium, acél) 10-20 mm élhosszúságú kocka alakú passzív nyomjelzőket ástak a talajba mátrix alakban a talaj felszínére merőleges síkban. Ezen sík normál irányába a nyomjelzők között állandó szerszámsebesség mellett különböző geometriájú kultivátorszerszámokat húztak el. A talaj-szerszám kölcsönhatás következtében elmozdult nyomjelzők pozícióját vizsgálták úgy, hogy azokat kiásták a talajból. Azt a következtetést vonták le, hogy nagyobb befolyással bír a nyomjelző anyaga az elmozdulás mértékére, mint a nyomjelző mérete. De a talaj aggregátum méretéhez hasonló méretűt célszerű választani. A nyomjelző sűrűségét érdemes minél közelebb választani a talaj sűrűségéhez. Nem vizsgálták azonban, hogy milyen befolyással bír a nyomjelző felületi érdessége annak elmozdulására, valamint azt sem vizsgálták, hogy a nyomjelző alakja miként befolyásolhatja annak elmozdulását.

Mivel az ökológiai növénytermesztésre nő a kereslet, a mechanikus gyomlálás vizsgálatának céljából is érdekes a talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálata. Znova és szerzőtársai [50] (2017) a nem kívánatos talajmozgások elkerülésére fókuszálva vizsgálták a talaj és aszimmetrikus szerszám interakcióját. Különböző szerszámsebességek mellett mérték a szerszámra ható talajellenállási erőket és közben két különböző módszerrel jellemezték a talajelmozdulásokat. Egyrészt vizsgálták 2D LASER szkenner segítségével a szerszám után hagyott barázdákat, másrészt a talaj felszínére kocka alakú passzív nyomjelzőket helyeztek és vizsgálták, azok hogyan mozdul-

tak el a művelés következtében. A mérési módszerük alkalmas volt a talajművelés közben a nemkívánatos talajmozgások minimalizálásához.

Solhjou [40] és szerzőtársai (2012) szántás nélküli talajművelés során magágy készítéséhez vizsgálták a talajnyitás közben a talaj-szerszám kölcsönhatást. Vizsgálatuk célja kideríteni, hogy milyen összefüggésben áll a szerszám beállított dőlésszöge a talaj mozgásával. A vizsgálatuk során talajban történő mozgásokat PVC anyagú 10 mm élhosszúságú kocka alakú passzív nyomjelzőkkel jellemezték. Előre, oldalirányban és függőlegesen is mérték a talajművelés következtében, a passzív nyomjelzők elmozdulását.

Spokas és szerzőtársai [42] (2007) 1D függőleges talajeloszlási empirikus modellt állítottak fel, hogy modellezzék a gyomnövények magjainak függőleges eloszlását a talajban különböző megmunkálási műveletek során. A modellezéshez vizsgálták a talaj elmozdulását talajba helyezett passzív nyomjelzők segítségével. Nyomjelzőkként 6 mm átmérőjű, 1090 $kg\,m^{-3}$ sűrűségű gyöngyöket alkalmaztak. Megállapították, hogy a 3 és 6 mm-es átmérőjű gyöngyök méretkülönbsége nem okoz számottevő eltérést az elmozdulásaikat tekintve. Felismerték, hogy ez az eredmény összhangban van Soriano és szerzőtársai [41] (1968) megállapításával, akik két növényfajnál nem figyeltek meg különbséget a magok eloszlásában a talajművelés után, annak ellenére, hogy a magok különböző méretűek voltak. Továbbá Rahman és szerzőtársai is arra az eredményre jutottak, hogy a passzív nyomjelzők méretkülönbsége nem számottevő jelentőségű a talaj elmozdulásának vizsgálatában. A szerzők továbbá megemlítik, hogy a műanyag és kerámia gyöngyök használatát korábbi kísérletek is igazolták a talajművelés okozta talajmozgás nyomon követésére.

Liu és szerzőtársai [22] (2007) a talajszerszám és a talajon lévő szalma (maradvány) kölcsönhatását vizsgálták. A talajon lévő szalmamaradék eloszlását és annak talajba beépülését befolyásolja a talajművelés típusa, sebessége, mélysége, a munkagép típusa, a talajviszonyok, a talajművelő-eszköz típusa, valamint a növényi maradványok (pl.: avar) magassága. A vizsgálat középpontjában a talaj és a szalma elmozdulását állították és összehasonlították talajvályúban mért eredményeket terepi mérések eredményeivel. Talajelmozdulás méréseikhez alumínium kocka passzív nyomjelzőket alkalmaztak. Azokat úgy ásták le, hogy a nyomjelzők felső felülete a talaj felső síkjával egy síkba essen, ugyanis a talaj felső rétegeinek elmozdulására voltak kíváncsiak. A passzív nyomjelzők helyzetének megállapításához keretes koordinátamérő eszközt készítettek.

A betakarítás után maradó növényi származadványok bedolgozása a talajba fontos mezőgazdasági művelet, hiszen a művelet elősegíti a természetes tápanyag visszajuttatását a talajba. Zeng és szerzőtársai [49] (2019) a talajt és az annak felületén lévő szalmaszálak mozgását talajvályúban vizsgálták művelés közben négy különböző geometriájú szerszám esetén. A talaj és a származadványok mozgásának vizsgálatához passzív nyomjelzőket alkalmaztak. Egyrészt a talajfelszín mozgásának jellemzéséhez a talaj felszínében úgy helyeztek el 10 mm élhosszúságú alumínium kocka nyomjelzőket, mint Gürsoy és szerzőtársai [17] (2017), hogy azok felső felülete a talaj felső síkjába esett. Másrészt a származadványok mozgásának megismeréséhez a talaj felszínére helyezett származadványokat is alkalmaztak passzív nyomjelzőként. A fizikai talajművelési folyamatot modellezték DEM-ben. Validálták DEM modelljüket méréseik alapján és DEM-et alkalmazva meghatározták a különböző szerszámok esetén az optimális művelési sebességeket. A talajművelő szerszám mozgása közben figyelték a talaj és a szalma együttes mozgását, a szerszám után maradt szalmafedést, a műveléshez szükséges kinetikus energiát, a szalma sebességét, gyorsulását elmozdulását és mozgásának trajektóriáját. Bár a szerzők kocka alakú nyomjelzőket alkalmaztak a fizikai mérések során, ezen nyomjelzőket a DEM modellezéskor gömb elemekkel közelítették.

Gürsoy és szerzőtársai [17] (2017) talajvályúban végeztek kísérleteket talaj elmozdulására. Mátrix alakban a felszínre, valamint 20 és 40 cm-es mélységbe helyeztek összesen 33 db 10 mm-es élhosszúságú alumínium kocka nyomjelzőt. Három különböző geometriájú kultivátorszerszámot húztak el a nyomjelzők között állandó szerszámsebesség mellett. Majd a mérések alapján DEM-ben is modellezték a nyomjelzők elmozdulásait. Érdekes, hogy bár kocka alakú nyomjelzőket alkalmaztak a fizikai mérések során, a nyomjelzőket a modellezéskor gömb elemekkel közelítették. A szimulált talajelmozdulások a legtöbb vizsgált esetben hasonló tendenciát mutattak, mint a mért értékek. Azonban a szimulációk és a mérések közötti átlagos és maximális talajelmozdulások összehasonlításakor csak néhány esetben volt 20% alatti relatív hiba.

Milkevych és szerzőtársai [30] (2018) 100 mm mélységig három sorban 500 mm szélességben helyeztek el összesen 33 darab 15 mm élhosszúságú kocka alakú alumíniumból készült nyomjelzőt. A nyomjelzők között pedig kultivátorszerszámot húztak el. Eredményként kirajzolták, melyik nyomjelző hova jutott a talajművelési teszt után. DEM-ben modellezték is a jelenséget. Nem hoztak létre a talajmodelljükön belül külön követett objektumokat, hanem a mátrixcsomóponthoz közeli koordinátán lévő elemet kerestek a szimulált halmazban és azok elmozdulását vizsgálták. Kvalitatív eredményeket tekintve hasonló elmozdulásokat produkáltak a modellben lévő nyomjelző elemek a valóságos alumíniumkockák elmozdulásához képest. Kvantitatív adatokat azonban nem közölnek a kutatók az elmozdulás eltérésekről.

Massha és szerzőtársai [29] (2020) öt darab 45 mm magas 8 mm átmérőjű henger alakú nyomjelzőt tűztek a talajvályúban lévő talaj felszínére. A kultivátorszerszám nyomjelzők közötti elhaladásáról felülről videofelvételt készítettek, majd a nyomjelzők által megtett pályákat képelemzés segítségével rajzolták ki. Ez volt az egyetlen kutatás amit találtunk, amiben trajektóriákat rajzoltak ki nyomjelzők által befutott pályáról talaj elmozdulásának vizsgálata során. Azonban a szerzők is megjegyzik konklúziójukban, hogy ezen mérési módszer hiányossága, hogy a talaj mélyebb rétegeiben nem tudunk meg semmit az elmozdulásokról.

Montgomery és szerzőtársai [31] (1999) a talaj eróziójának vizsgálata céljából vizsgálták a talaj és eke szerszám kölcsönhatását. A talaj elmozdulását passzív nyomjelzők segítségével vizsgálták. Nyomjelzőkként mátrix alakban a talajba helyezett lapos acélból készült 13 mm átmérőjű alátéteket alkalmaztak, melyek sűrűsége 1450 $kg\,m^{-3}$. Fémdetektor segítségével állapították meg, hol kell keresni a nyomjelzőket a talajban.

Sharifat és szerzőtársai [39] (1997) kultivátorszerszám, talajnyitó szerszám és talaj kölcsönhatását vizsgálta a talaj elmozdulása alapján. Különböző sebességekkel húzták a talajban a szerszámokat, különböző talajnedvességek és művelési mélységek mellett és ezeket hasonlították össze. Becsülték, hogy Kanadában összesen mekkora mennyiségű talajt mozgatnak meg kultiválás során. Leírásuk szerint nem minden megmozgatott talajmennyiségnek van haszna. Azaz törekedni kell arra, hogy a megfelelő célt elérjük a talajműveléssel, de fölöslegesen ne mozgassunk meg nagy tömegű talajmennyiséget, hogy minimalizáljuk a talajműveléshez szükséges energiát. Irodalomkutatásuk alapján már a 90-es évek elején volt példa arra, hogy talajelmozdulást passzív nyomjelzőkkel vizsgáltak. Nyomjelzőkként mátrix alakban a talajba helyezett polimer blokkokat (15x15x11 mm) alkalmaztak, melyek sűrűsége megegyezett a talaj sűrűségével. A mérések alapján a megmozgatott talaj térfogatát határozták meg.

A kormánylemez szerszám tervezése komplex feladat és többnyire tapasztalati adatok alapján történik. Ucgul és Saunders [47] (2020) a szerszám és a talaj kölcsönhatását modellezték DEM-ben. Szimulációs eredményeiket összehasonlították fizikai méréseik eredményeivel és analitikusan számított vonóerő eredményekkel, valamint összehasonlították a szerszám által hagyott barázda

keresztmetszeteket is. Azt a következtetést vonták le, hogy DEM-ben pontosabb becslés adható a szerszámra ható vonóerőre és a szimulált barázda-keresztmetszet is nagyon nagy hasonlóságot mutat a fizikai mérések során mért eredményekhez. Megállapították, hogy megfelelő pontossággal becsülhető a kormánylemez szerszám tervezésénél DEM alkalmazása mellett a szerszám-talaj kölcsönhatása.

Ucgul és szerzőtársai [48] (2018) korábbi fizikai mérések alapján különböző vágóél-geometriával rendelkező szerszám és a talaj kölcsönhatását modellezték DEM-ben és FEM-ben. A talaj elmozdulását, tönkremenetelét és a művelési erőt vizsgálták a művelés közben. A szerszámra ható erőt DEM-mel tudták pontosabban reprodukálni, azonban a talaj tönkremeneteli módját (azaz a repedéseket) jobban közelítette az általuk készített FEM (Finite Element Method) modell. Megjegyzik, hogy DEM-ben is elérhetőnek tartják a talaj repedéses tönkremenetelének pontosabb modellezését nagyobb talajszemcsék alkalmazásával.

3.2. Aktív nyomjelzős dinamikus elmozdulásvizsgálatok más tudományterületekről

Spreitzer és szerzőtársai [43] (2019) aktív nyomjelzővel, úgynevezett okosfával végeztek méréseket laboratóriumi környezetben. Kicsinyített folyómeder modellt készítettek, melyen IMU (Inertial Measurement Unit) alapú mérőeszközt farönkök úszási tulajdonságainak meghatározására alkalmaztak. A szenzorház tervezésénél hangsúlyt fektettek a sűrűségkompenzációra. Kutatásukból kiderül, hogy a gyorsulásmérő segítségével az adatgyűjtőre ható erők is meghatározhatók, így a szenzorház ütközései analizálhatók. A cikk részletesen ír az alkalmazott szenzor tulajdonságairól. Megemlíti a gimbal lock problémát, ami miatt a szerzők a kvaterniókkal történő számításokat alkalmazzák. Másik lehetőség az Euler szögekkel való számítások. Ezen módszer lehetővé teszi a szenzor tájolásának szemléltetését, de hibázhatnak. Ezek alapján levonható az a következtetés, hogy ha pontos kvantitatív adatokra van szükségünk kvaterniókkal kell számolni, míg ha kvalitatívan szeretnénk következtetéseket levonni, akkor az Euler szögekkel történő számítások szükségesek az eredmények vizuális megjelenítéséhez. Kvaternióból lehet átszámolni az Euler szögeket, azonban mindeközben adatvesztés történik. Az intelligens szenzorok mért adatainak értelmezésére és ellenőrzésére videofelvételeket készítettek a mérések közben és valószínűségi modellt állítottak fel a rönk által befutható trajektóriák értékelésére. A szenzorok működését mérések előtt vizsgálták, hogy azok azonos módon működnek-e. A kalibrálás során a szenzorokat háromszor ejtették le, a giroszkópot és magnetométert pedig úgy kalibrálták, hogy a szenzort 3x megforgatták fúrógép segítségével. Ezen kalibrációs kísérleteket minden tengelyen elvégezték. A cikk kitér egy „adateltolódás” nevű jelenségre is, ami mérési hibát okoz. A hiba egyértelmű, ha a szenzor nem mozog. Mozgás közben nehéz a hibát meghatározni [24]. Egyszerre csak egy szenzorral mértek. Regisztrálták, pontosan milyen pozícióba indították a kísérletet. A magnetométer működési elve miatt mérési eredmények zajt mutattak a mérőkörnyezetben lévő fém alkatrészek miatt. A szerzők leírták, hogy a giroszkóp és a magnetométer információi nélkül nagyon nehéz volt megkülönböztetni a lefelé irányuló mozgást és a helyben ringatózást. Az adatok kiértékeléséhez AHRS (Attitude Heading Reference System) algoritmust használtak. A szerzők javasolják, hogy komplexebb validálási módszer kell a szenzor kalibrálásánál. Ők csupán egy-egy tengely mentén kalibráltak, azonban javasolják, hogy a kalibrációt a szenzor komplex mozgása közben kell elvégezni. Konkrét javaslatuk azonban nincs arra, hogy hogyan lehetne ezt kivitelezni. Arra viszont felhívják a figyelmet, hogy nem fémes környezetben kell ilyen jellegű kalibrációt végezni.

Dost és szerzőtársai [12] (2020) laboratóriumi földcsuszamlás vizsgálatára alkalmaztak wifin kommunikáló IMU alapú gyorsulás,- és elfordulásmérő eszközt. 100 Hz-en gyűjtik az adatokat ±16g-s gyorsulás és ± 2000°s^{-1} szögelfordulás tartományban. Az eszköz 55 mm hosszú 10 mm átmérőjű hengerbe fér bele. A szenzor által bejárt pályát a gyűjtött adatok alapján Madgwick és szerzőtársai (2011) [24] módszerével számították. Teljeskörűen rekonstruálják a szenzor által bejárt pályát. 3D-ben vizuálisan megjelenítették a szenzor elfordulásait és pozícióadatait is az idő függvényében. Problémát jelent ennél a módszernél, hogy a számítások alapján a szenzor végpozíciója nem egyezik meg a valós szenzorpozícióval. A legkisebb mért eltérés a valós és a számolt távolság között körülbelül 0.05 m volt.

Akeila és szerzőtársai [1] (2010) okoskövet fejlesztettek, hogy vizsgálják folyók üledékének mozgását. Az okoskő alapját egy alacsony költségű gyorsulás és elfordulásmérő szenzor képzi, mely egy 4 cm-es átmérőjű gömb alakú szenzorházban kapott helyet. Ezen cikkükben részletesen beszámolnak arról, hogyan épül fel a mérőeszközük és azt milyen módon kalibrálták méréseikhez. A kalibráció során lineáris gyorsulás méréséhez egyenes pályán mozgó rázóasztalt, illetve forgó mozgások vizsgálatához manuálisan működtetett szervomotorokat használtak. Vizsgálatuk célja volt, hogy meghatározzák, a mintavételezési sebesség mennyire befolyásolja a mérés pontosságát. Arra jutottak, hogy egy 1 Hz-es szinuszjel 5%-os relatív hibahatáron belüli meghatározásához 10-12 mintavételezési pont szükséges. Vizsgálták továbbá, hogy 15 perces állandó szögsebességű, azonos tengely körüli forgatás esetén milyen mértékben csúszik el a mért szögelfordulás a valós szögelfordulástól. Azt az eredményt kapták, hogy az idő teltével a szögelfordulás hibája közel lineárisan nő és a mérési adatokon végzett szűrés segítségével a csúszás mértéke redukálható. A szenzort laboratóriumi „in-situ” vizsgálat során is alkalmazták. A szenzor mozgását videón rögzítették és a felvételekkel hasonlították össze a szenzor által mért gyorsulásadatokat.

Al-Obaidi és Valyrakis [2] (2021) okoskővel vizsgálták folyók üledékének mozgását. 3 cm átmérőjű gömb házba helyeztek el mikroelektromechanikus (MEMS) elven működő IMU-t. Az adatgyűjtő 200-1000 Hz-es mintavételezési tartományon működik és több mint egy órán keresztül képes adatot gyűjteni. A tervezésnél figyelembe vették azt is, hogy minél jobban kiegyensúlyozott legyen a mérőegység. A gyorsulásmérő, a giroszkóp és a magnetométer bizonytalanságát egyszerű fizikai mozgástesztek segítségével számszerűsítették. A szenzorok fúziós eredményei kicsi hibatartományban megbízhatónak tekinthetők. A szenzor kalibrációja során ejtési kísérletet vonalzó mellett végeztek, melyet kamerával rögzítettek. A felvételek segítségével is leírták a mozgást. A giroszkópot úgy kalibrálták, hogy a szenzort egy hengerbe helyezték olyan módon, hogy a szenzor a henger hosszanti tengelyével egybeessen. A hengert egy lejtőről legurították és az energiamegmaradás törvényéből kiszámolták a henger szögsebességét. A magnetométer kalibrálásához ismert erősségű és irányú mágneses mezőre van szükség. Az eredményeik azt mutatják, hogy az eszközbe épített szenzor képes érzékelni a nyugalmi és a szállítási fázist amellett, hogy képes a részecske sebességének és a megtett távolságnak pontos meghatározására is. A szerzők megjegyzik, hogy a szenzorkörnyezet megfigyelésén kívül egy ilyen aktív nyomkövető részecske több kutatási terület, például az ökohidraulika, a geotudományok valamint a földfelszíni veszélyek tanulmányozásának is hasznára válhat. Mindemellett a mérések olyan adathalmazokat szolgáltatnak, amelyek felhasználhatók a diszkrét elemes modellek (DEM) kalibrálására és diszkrét elemes modellezéssel kapcsolt áramlástani szimulációk (CFD-DEM) validálására is.

Pretzlav és szerzőtársai [34] (2020) célja az volt, hogy megértsék a hordalékmozgást egy hegyi folyómederben aktív nyomjelző segítségével mért adatok alapján. Saját fejlesztésű IMU-val, RFID taggal és gyorsulásmérő-giroszkóp szenzorral valamint akkumulátorral és SD (Secure Dig-

ital) kártyával szerelt okoskővel készítettek méréseket 22 napos hóolvadás során. Az adatgyűjtő okoskövet a mederbe helyezték, majd regisztrálták a nyomjelző helyzetét az idő függvényében. Méréseik alapján egy meglévő hordalékmozgási modellen módosítottak, hogy az pontosabban leírja a valóságot. Szenzorházukat nagy sűrűségű polimerből (nylon és rézpor keveréke) készítették. A szenzorház alakja egy ellipszoid, melynek három jellemző tengelyhossza 12.0, 7.2 és 6.4 cm. A szenzorház két félből áll, melyek között tömítőgyűrű biztosítja a szigetelést.

Caviezel és szerzőtársai [9] (2018) hegyről zuhanó sziklák mozgásait, trajektóriáit vizsgálták. Összehasonlítanak néhány szempont szerint különböző addig ezen a kutatási területen alkalmazott mérőműszert és bebizonyítják, hogy az adott feladatra a maguk által fejlesztett megoldás a legjobb. Nincs magnetométer a szenzorukban. Fém házba teszik be. USB-n (Universal Serial Bus) keresztül tudják kiolvasni az adatokat a kísérlet után, 2 GB adatot tudnak gyűjteni egy kísérlet alatt. Saját szenzort fejlesztettek, bemutatják, hogyan épül fel az általuk fejlesztett szenzor, már egy továbbfejlesztett változatot használnak ebben a kutatásban. Foglalkoznak a cikkben azzal, hogyan kalibrálták a szenzort. Szenzor által bejárt trajektóriákat határoztak meg és az eredményeket szimulációkban alkalmazzák DEM-ben. (Kőhullás szimulálására van speciális DEM szoftver.) A szenzor kalibrációját röviden írják le, mely során mindhárom tengely körül külön-külön, szabályozható szögsebességű korongon forgatták az eszközt. Mindeközben mérték a forgási sebességet és a centripetális erőt. Kutatásaik ezen szakaszában csak a nyomkövető szenzor kezdő és végpontját hasonlították össze a valóságban és a szimulációban, nem rajzoltak ki a méréseik alapján az eszköz által bejárt pályákat, csak szimulációs eredményeikben. Következő céljuk, hogy ezt megtegyék, azaz a teljes pályát tudják rekonstruálni méréseik alapján.

Caviezel és szerzőtársai [7](2019) már korábbi kutatásaikban [10, 9] célként tűzték ki, hogy teljes mértékben visszafejtsék a hegyoldalról zuhanó szikla mozgását. Ezen cikkükben sikerült elérniük céljukat. A vizsgált sziklába helyezett gyorsulásmérő és giroszkópos adatokat videogrammetriai és pilóta nélküli légi rendszerekkel végzett térképezési technikákkal kombinálták, hogy megértsék a sziklaforgásokat és a talajba való behatolás jellegét a sziklaomlás mozgásában. Eredményeikben 4D-ben ábrázolták hegyoldalról legördülő szikla mozgását. A szikla által érintett koordinátákon túl kirajzolt trajektória színével jelölték a kő sebességét is. Az eredmények numerikus sziklaomlási modellek kalibrálásához lesznek használva.

Gronz és szerzőtársai [16] (2016) a vízben lévő kövek mozgásának megismerésére készítettek okoskövet. Használták az aktív-passzív nyomjelzős terminológiát. Korábbi cikkükben ugyanis még csak passzív nyomjelzőt alkalmaztak a nyomjelző mozgásának lekövetésére, kutatásuk ezen fázisában eljutottak oda, hogy aktív nyomjelzőt készítettek. Bosch BMX055 IMU-t alkalmaztak az okoskőben, mely egy 8x55 mm-es fém hengerbe fért bele. Ezt ágyazták bele egy kőbe. A szenzorral gyűjtött adatokat wifin keresztül továbbítják. A szenzor tartalmaz egy aktív RFID tagot is, mely a kő azonosítására szolgál. A szenzorral mért adatokat nagy sebességű képi felvételekkel hasonlították össze korábbi passzív nyomjelzős mérései tapasztalataikra [6] támaszkodva.

Maniatis [27, 28, 26, 29] és szerzőtársai munkássága is számottevő az okoskövekkel végzett kutatások terén. 2013-ban jelent meg első publikációjuk ezen témában, melyben részletesen beszámolnak arról, milyen követelményeknek kell megfelelnie egy okoskőnek és miként lehetséges egy ilyen követ megtervezni illetve legyártani. A szenzort alapvetően vízalatti környezet feltérképezéséhez tervezik. A szenzorok 3D nyomtatott több különálló egységből álló vízálló házba helyezték el. Olyan szenzorházat is fejlesztettek, mely alakja megegyezik 3D szkennelt kövek alakjával. 2020-as publikációjukban leírják, hogy „in-situ” méréseket végeztek IMU alapú adat-

gyűjtő okoskővel. Vizsgálták víz alatt a szemcsére ható felhajtóerőt és az arra ható ellenállási erőt, valamint vizsgálták a szemcse alakhatását is a hordalékmozgás során.

Az általunk használt MEMS szenzorok kis méretük miatt széles körben elterjedtek, találunk ilyen eszközöket például okostelefonokban és drónokban is. Tudományos területen az egyik felhasználási területük az emberi lépések vizsgálata, melynek eredményeit például rehabilitációs vagy sporttal kapcsolatos kérdéseknél használhatják fel. Ilyen területen kutattak például Madgwick és társai [25], illetve Duong és társai is [13]. Az előbbi kutatások esetén a fő cél egy orientáció becslő megoldás létrehozása volt, de az összes esetben határoztak meg trajektóriákat is, azonban egyik esetben sem csak az IMU adatokat vették figyelembe, hanem mindig volt valamilyen kiegészítő adat. Madgwick esetében a lépések periodikusságát használták fel, illetve azt, hogy detektálható, mikor ért le a vizsgált alany lába a talajra és ezekkel lehet korrigálni a becsült értékeket. A másik esetben pedig LiDAR (Light Detection and Ranging) szenzorokkal egészítették ki a méréseket, hogy pontosabban meg tudják határozni a lépések trajektóriáját.

A mi esetünkben azonban ezek a megoldások nem alkalmazhatók. Az orientációt becslő szűrők bár fontos részét képzik a mi méréseinknek is, önmagukban nem elegek. Ezen túl mivel nekünk a talajon belül kell méréseket végeznünk, olyan megoldásokat nem tudunk alkalmazni, melyeknél az adatgyűjtő- vagy mérőeszközre rálátás szükséges, a lézeres távolságmérésnél ez azonban mindenképpen követelmény lenne.

Ezeken a kutatásokon túl mesterséges intelligencia lapú megoldásokkal is igyekeztek már IMU alapú elmozdulásbecsléssel. Nagy és társai [32] 2021-ben készült kutatásukban ingamozgásokat vizsgáltak ilyen módon. Ezek a mozgások azonban periodikusak, illetve arra a szerzők is rámutatnak, túltanulás következett be és így a tanító jellegű adatoktól eltérő bemenetek esetében a rendszer teljesítménye nem megfelelő.

3.3. DEM modellek automatikus kalibrálása

Do és szerzőtársai [11] (2017) felismerték, hogy a gyakorlatban az empirikus módszerekkel történő manuális szemcsés anyag kalibráció nem alkalmazható nagy hatékonysággal. DEM modellek automatikus kalibrálására két különböző módszert mutatnak be. Az egyik módszer a genetikus algoritmus, másik pedig a DIRECT optimalizálás [19]. A módszerük lényege, hogy DEM szimulációkban algoritmikusan mikromechanikai kapcsolati paraméterkombinációkat alkotnak (például algoritmussal változtatják az elemek közötti gördülési és a csavarási súrlódási együtthatót). Majd egy szimuláció lefuttatása után meghatározzák a megadott kapcsolati paraméterkombinációval milyen makromechanikai jellemzőkkel rendelkezik az íly módon beállított szemcsés anyag. Előre számszerűsítve definiálják milyen makromechanikai jellemzőt szeretnének elérni és addig ismétlik a paraméterek újra generálását, amíg a megfelelő makromechanikai jellemzőt kellő pontossággal meg nem közelíti a modellezett anyaggal. Egy úgynevezett fitneszfüggvény határozza meg, mekkora az eltérés a cél és a szimulált legjobb makromechanikai paraméter között. Mindkét optimalizációs módszerrel sikerült a szerzőknek kvarchomok modellt felállítaniuk. Egy későbbi cikkükben Do és szerzőtársai [11] NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)-t alkalmazva oldottak meg két ellentétes célfüggvényre épülő anyagmodell optimalizációs feladatot.

Mohajeri és szerzőtársai [31] genetikus algoritmus segítségével kalibráltak DEM modellt. Shultz féle nyírovizsgálatok segítségével határozták meg szénpor makromechanikai jellemzőit. A mérések során kapott nyírófeszültségek alapján kalibrálták a modellt. Megjegyzik, hogy nagyon időigényes folyamat egy modell manuális kalibrálása. A genetikus algoritmussal történő

kalibrálási módszer független a választott kapcsolati modelltől. A bevezetésükben bemutatják, hogy korábban milyen módszerekkel oldották meg DEM modellek automatikus kalibrálását.

Safranyik és szerzőtársai [38] is foglalkoztak már algoritmikusan történpő DEM modell kalibrálásával. Nyíróvizsgálatok eredményei alapján kalibráltak talajmodellt.

4. Szakirodalmi összefoglalás és kritikai elemzés

A szakirodalmat áttekintve az a következtetés vonható le, hogy habár számos passzív nyomjelzős vizsgálatot végeztek már kutatók talajban a legtöbb publikációban csak a passzív nyomjelző sűrűségét és méretének megválasztását támasztják alá. Nem találtunk olyan kutatást, melyben vizsgálták volna, hogy milyen befolyással bír a nyomjelző felületi érdessége annak elmozdulására, valamint arra sem találtunk példát hogy vizsgálták volna, a nyomjelző alakja miként befolyásolhatja annak elmozdulását. Pedig ezen tényezők hatással vannak a mérés eredményeire [33]. Fizikai mérések során a talaj belső elmozdulásainak statikus vizsgálata körülményes a nyomjelzők elásása és megkeresése, valamint helyzetük meghatározása miatt. Ráadásul elfordulásaik – mely fontos talajelmozdulási jellemző – nem is követhetők. Dinamikus vizsgálatra pedig a szakirodalomban még nem találtunk példát. Ugyanakkor numerikus szimulációkkal a talaj-szerszám kölcsönhatás közben történő belső talajelmozdulások könnyen vizsgálhatók [17, 30, 49]. Milkevych és szerzőtársai [30] a következőképp fogalmazták meg a hiányosságokat ezen kutatási területen:

„A kísérletek során a nyomkövetők helyzetének folyamatos, időfüggő mérése technikai szempontból bonyolult volt, ezért csak a nyomjelzők kiindulási és végpontjainak helyzetét rögzítették. Ez képezi a szerszám által indukált talajelmozdulás statikus méréseit. Mivel az ilyen mérések csak a végső elmozdulási állapotot teszik lehetővé, a dinamikus felvételek (mint például a nyomkövető pályák) elvesztése csökkentheti a modell teljes körű ellenőrzésének lehetőségét. Ezért, míg a talaj elmozdulására vonatkozó modellalapú következtetések meglehetősen jól igazoltnak tekinthetők, a nyomkövető nyomvonalakra vonatkozó következtetések további ellenőrzéseket igényelnek. E tekintetben a jövőbeni tanulmányokban foglalkozni kell a szerszám által kiváltott talajelmozdulás dinamikus méréseivel.”

A szakirodalomban irodalomkutatásunk alapján nem találtunk olyan...

... vizsgálati módszert, amelyben a talaj belső elmozdulásait fizikai talaj-szerszám kölcsönhatás során időben és térben egyszerre jellemeznék méréssel.

... talajmodell kalibrálásási módszert DEM-ben, mely talaj-szerszám kölcsönhatása közben a talaj belső mozgásait jellemző, aktív nyomkövető által bejárt trajektóriák alapján történne.

... megoldást, amely során talaj-szerszám kölcsönhatás fizikai vizsgálatának eredményei alapján kalibrálnának DEM talajmodellt genetikus algoritmussal.

... kutatást, melyben a talaj-szerszám kölcsönhatást laboratóriumban robotkarral végezték volna.

... olyan esetet, ahol egy MARG (Magnetic, Angular Rate and Gravity) szenzor adatait nem neurális hálón alapuló gépi tanulási módszerrel dolgozták volna fel pozícióadatok kinyerése céljából.

Azt szem előtt tartva, hogy kutatásaink eredményei alkalmazhatók legyenek a talajművelőszerszám- és műveléstervezésben és a bemutatott szakirodalom-kutatási eredményeink alapján határoztuk meg céljainkat.

4.1. Célkitűzés

A szakirodalom hiányosságaira fókuszálva hosszabb távú célunk olyan a talajművelő-szerszám- és műveléstervezésben alkalmazható módszert fejleszteni, mely kvantitatív módon mégis szemléletesen segít megérteni különböző talajtípusok belső mozgásait a talaj-szerszám kölcsönhatás során. Ezen globális cél eléréséhez jelen dolgozatban a következő célokat határoztuk meg:

1. **A talaj-szerszám kölcsönhatás közben a talajmozgás és a szerszámra ható talajellenállás vizsgálatához laborkörnyezet, és mérési terv valamint mérőeszközök fejlesztése és kalibrálása.**
2. **A kialakított laborkörnyezetben talaj-szerszám kölcsönhatás közben a szerszámra ható talajellenállás és a kölcsönhatást jellemző talajmozgás egyszerre történő kapcsolt mérése.**
3. **DEM-ben automatikus talajkalibrálási módszer kidolgozása a mért talajmozgást jellemző adatok és a talajművelő szerszámra ható ellenállásadatok alapján.**

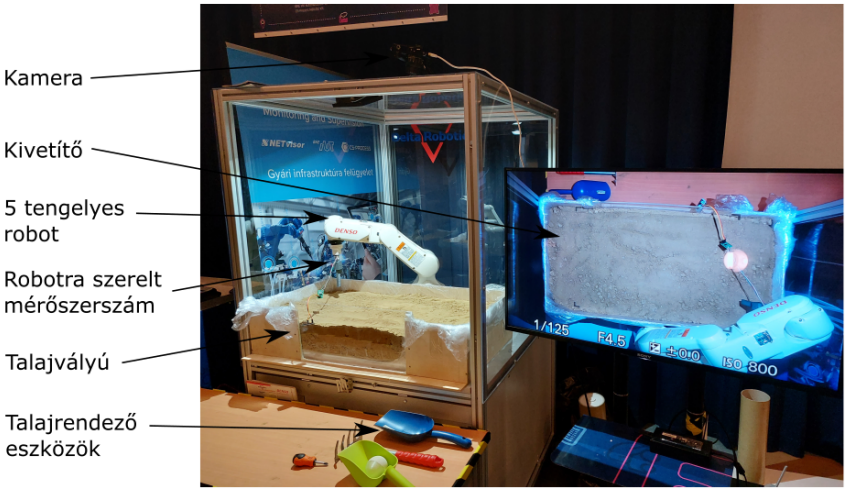
Kutatásainkat annak reményében végezzük, hogy a kidolgozott módszerek segítségével könnyebben lehet definiálni művelés közbeni talajmozgásokra vonatkozó tervezési követelményeket. Továbbá a módszer lehetővé teszi azt is, hogy ezen definiált követelményeknek meg lehessen felelni.

5. Anyagok és módszerek I. - Fizikai mérések

5.1. A saját laboratóriumi környezet bemutatása

5.1.1. A kialakított mérési környezet

Laboratóriumi méréseinket a BME Ipar 4.0 Technológiai Központjában végeztük. A mérések során a 1. ábrán látható DENSO gyártmányú 5 tengelyes robotkar segítségével mozgattunk különböző szerszámokat talajvályúban.



1. ábra. Mérési elrendezés talaj-szerszám kölcsönhatásának vizsgálatához.

A talajvályút úgy méreteztük, hogy lehetőleg minél jobban kihasználja a rendelkezésre álló teret a robot hatótávolságában. Így azt 900 mm hosszúra, 450 mm szélesre és 190 mm mélyre gyártottuk le 6 mm vastagságú rétegelt lemezből. A talajvályú az elülső oldalán rendelkezik egy átlátszó oldallal. Ennek segítségével vizsgálható a falhatás milyen közelségben érvényesül a fal és a szerszám között. A talajvályút mielőtt feltöltöttük talajjal, előtte fóliával béleltük, hogy az esetleges talajnedvesség a talajvályút ne károsítsa. A talajvályúba 130 mm magasságig száraz agyagos talajt [46] helyeztünk.

5.1.2. Alkalmazott talajvizsgálati módszerek

A talajvályúban a robotkar segítségével talaj-szerszám kölcsönhatását vizsgáltuk. Mértük a szerszámra ható talajellenállást és mértük aktív nyomkövető segítségével a talajelmozdulást.

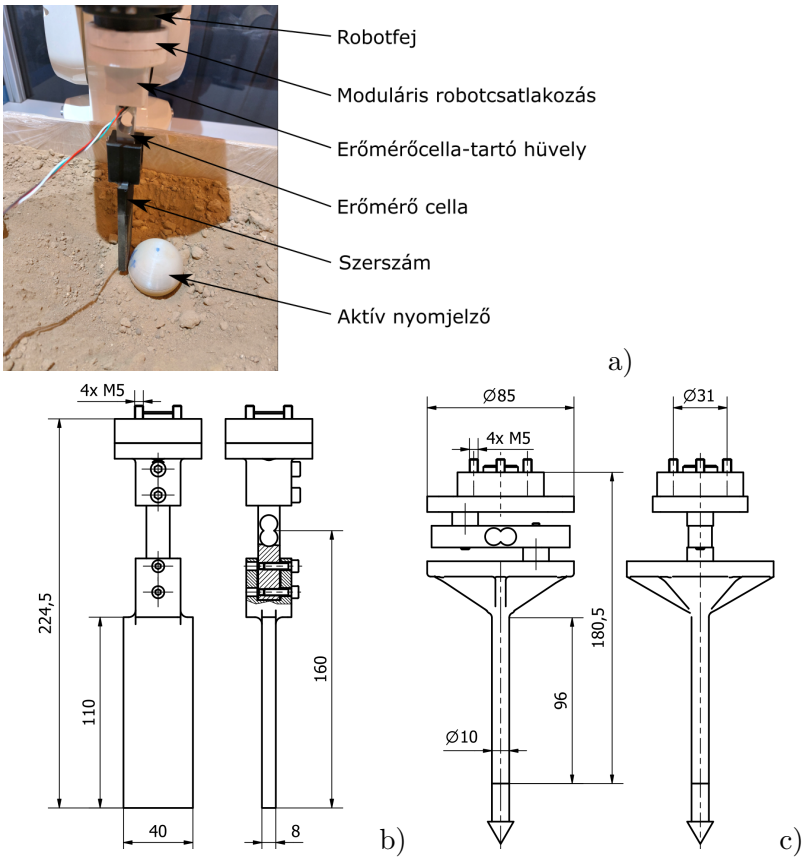
A robot segítségével vizsgáltuk a talaj penetrációs ellenállását. A vizsgálat során a talajba hatoló különböző méretű szabványos kúpos testek ellenállását vizsgáltuk. A kúpos testet a halmazba függőlegesen tolva mértük az erőt, amivel a test a halmazba hatol. Majd a kúp projektált keresztmetszetével elosztva az erőt kapjuk a penetrációs ellenállást. Ezen mérés jelentősége esetünkben, hogy megvizsgáljuk, hogy a talajvályúban lévő talajállapotot a mérések elvégeztével mennyire lehet közel azonos módon visszaállítani. Továbbá később ezen mérési adatok lehetőséget biztosítanak arra, hogy talajmodelleket kalibráljuk.

Kapcsolt mérést is végeztünk, mely során vizsgáltuk a talaj ellenállását egyszerű hasáb alakú szerszám vízszintes húzásával szemben. Közben pedig egy aktív nyomkövetőt helyeztünk a húzott szerszám elé. Ezen adatgyűjtő segítségével meghatározható a nyomjelző által bejárt pálya az idő függvényében. Később ezen mérési adatok lehetőséget biztosítanak arra, hogy DEM modelleket kalibráljuk a talaj-szerszám kölcsönhatást jellemző mért talajelmozdulás és a szerszámra ható talajellenállás alapján.

5.1.3. A robotkarra szerelhető általunk tervezett mérőeszközök

A talajvizsgálatok elvégzéséhez saját tervezésű eszközöket készítettünk. A mérőeszközök tervezésénél pedig törekedtünk a költséghatékonyságra. Az eszközök gyártásánál erősen támaszkodtunk additív gyártásra, azok szerkezetei ömledékrétegzéssel (FDM) készültek politejsavból (PLA). A talaj-szerszám kölcsönhatásának vizsgálatában fontos a szerszámot terhelő erők mérése. Így minden alkalmazott szerszámot egy hajlító igénybevétellel 5 kg-ig terhelhető erőmérő cellával szereltünk fel.

A penetrációs ellenállás mérését szabvány rögzíti (NEN 5140: 1996). A méréséhez szükséges egy hosszabb szárra szerelt szabványos kialakítású cserélhető mérőkúp. Ezzel függőlegesen 2 $cm\,s^{-1}$ sebességnél lassabban kell a talajba hatolni. Ezek tudatában alakítottuk ki saját berendezésünket, melyet a 2. c) ábra szemléltet. A moduláris robotcsatlakozáshoz egy erőmérőcella-tartó lapot erősítettünk, ehhez csavarral csatlakoztattuk távtartó gyűrűn keresztül vízszintesen az erőmérő cellát. Majd szintén egy távtartó gyűrű közbeiktatásával csatlakoztattuk a penetrométer szárát. A szár végére menetet nyomtattunk, hogy a mérőkúpok cserélhetők legyenek. A szár rész átmérőjét a legkisebb mérőkúp szárának átmérője szerint határoztuk meg.

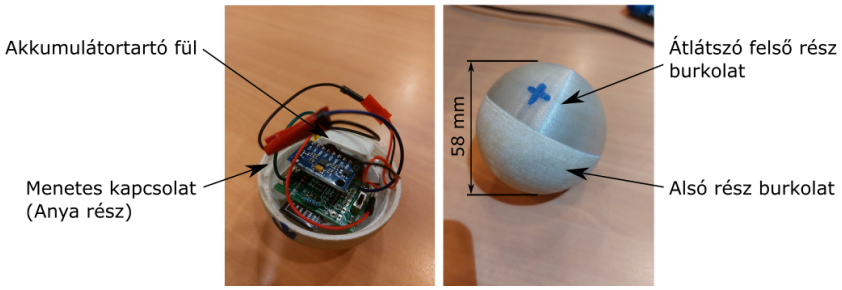


2. ábra. Tervezett szerszám penetrációs ellenállás méréséhez a) Fénykép az egyszerű húzott szerszámról. b) Az egyszerű szerszám összeállítási rajza. c) A penetrométer összeállítási rajza.

A vízszintesen húzott szerszámra ható talajellenállás méréséhez a moduláris robotcsatlakozáshoz egy erőmérőcella-tartó hüvelyt nyomtattunk, melybe függőleges helyzetbe rögzítettük a cellát. A cella ellenkező oldalára pedig felcsavaroztuk az alkalmazott szerszámot.

5.1.4. A talaj belső mozgásainak jellemzésére fejlesztett nyomkövető

A talaj mozgási tulajdonságainak jellemzésére saját tervezésű aktív nyomkövetőt készítettünk (3. ábra). Az aktív nyomkövető adatgyűjtő egysége tartalmaz egy gyorsulásmérő-giroszkóp-magnetométer szenzort. Az adatgyűjtő által rögzített adatok alapján célunk visszafejteni a szenzor által a mérés során bejárt trajektóriákat és elfordulásokat az idő függvényében.



3. ábra. Saját tervezésű nyomkövető eszköz.

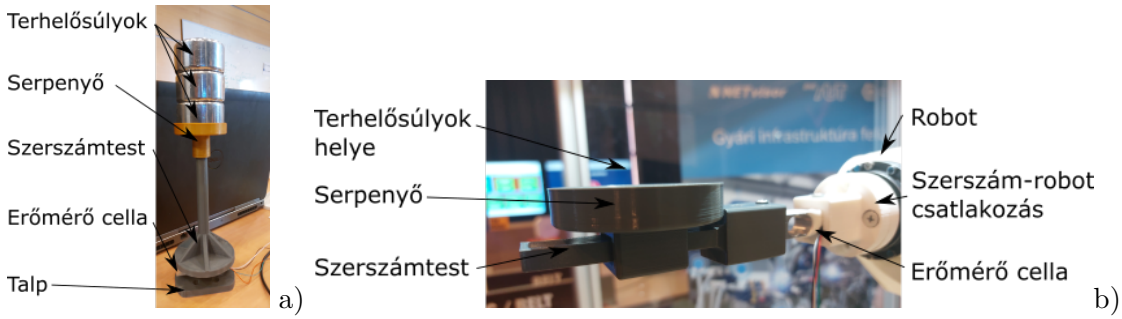
A nyomkövető házát gömb alakban határoztuk meg, melynek átmérője 58 mm lett, ugyanis később numerikus szimulációk során ezen forma egyszerűen modellezhető. A nyomjelző 3D nyomtatott háza két részre szedhető. A két rész közé menetes kapcsolatot terveztünk. A nyomjelző házának falát 4 mm vastagságúra vettük. Így az eszköz ellenáll a mérés közben fellépő igénybevételeknek. A ház belsejét pedig úgy alakítottuk ki, hogy az alkalmas legyen a benne lévő elektronika elhelyezésére. Külön figyelmet fordítottunk arra, hogy a mérőeszközben lévő szenzor a gömb középpontjába essen. A házon belül helyet kap egy akkumulátor tartó konzol is, melyet csavarkötéssel rögzítünk a házhoz. Követelmény volt az is, hogy az eszközt ne kelljen szétszedni ahhoz, hogy az elektronika visszajelzéseit LED-ek villogásából láthassuk. Így a ház egyik felét átlátszó anyagból készítettük. A 3D nyomtatási eljárás lehetővé teszi, hogy több mérőeszköz esetén a mérőeszközök nem átlátszó fele különböző színű anyagokból készüljenek, így könnyű azonosítani az egyes mérőeszközöket. Mivel nem nedves talajban végezzük jelen dolgozatban méréseinket, így nem tartottuk fontosnak a két fél közé helyezett szigetelést. Méréseinkhez elegendőnek tartottuk a két fél zárásakor azok megfelelő erővel történő előfeszítését. Az eszköz felületi érdességének irányultsága a 3D nyomtatási eljárás miatt nem előnyös, így mérés előtt a mérőeszköz házát kívülről megcsiszoltuk, hogy egyenletesebben eloszló felületi minőséget kapjunk.

5.2. A mérőeszközök kalibrációjának bemutatása

A mérések megkezdése előtt szükség volt a mérőeszközök kalibrálására. Az erőmérő cellát és az aktív nyomjelzőt is kalibráltuk. Továbbá meghatároztuk, a robotkar milyen sebességgel képes mozgatni a hozzá kapcsolt szerszámokat.

5.2.1. Az erőmérő cella kalibrálása

Az erőmérő cella kalibrálása során összeállítottuk a talajvizsgáló szerszámokat, beépítettük ezekbe az erőmérő cellát és ilyen módon végeztük a kalibrációt, mivel a polimer szerszámalkatrészek deformációja az erőmérő cella által mért értékekre befolyással lehetnek. (A kalibrációk elvégzéséhez további 3D nyomtatott eszközöket terveztünk és gyártottunk le 3D nyomtatással.)



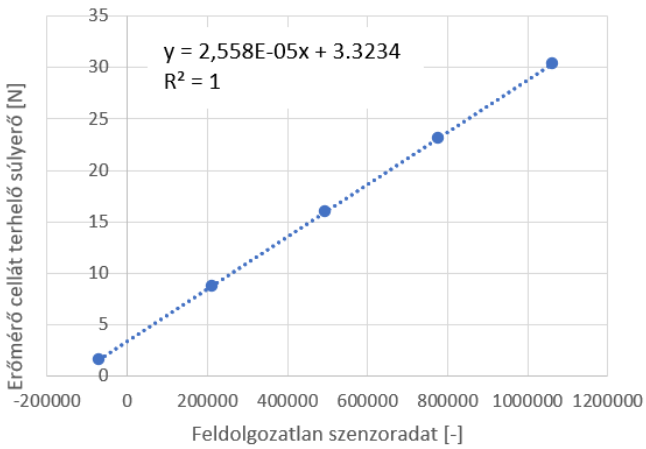
4. ábra. Kalibrációs eszközök: A penetrométer a) és a talajban húzott egyszerű szerszám b) felépítése kalibráció során.

Külön kalibrációt végeztünk az 1. típusú mérésnél alkalmazott penetrációs ellenállásméréshez szükséges eszköz (4. a) ábra), és a 2. mérésnél alkalmazott egyszerű hasáb alakú szerszám vízszintes húzásához szükséges eszköz esetében(4. b) ábra). Erre azért volt szükség, mivel más típusú terhelés éri a két mérési esetben az erőmérő cellát. Első esetben jobban nyírás, második esetben jobban hajlítás lép fel az erőmérő cella mérési pontjában. Ennek megfelelően olyan módon terheltük a kalibráció során is a cellát, mely megegyezik a mérések során fellépő terheléssel.

A kalibrációk során terheletlen állapotban valamint legalább négy különböző terhelőtömeg esetén az erőmérő cella által szolgáltatott erővel arányos értékeket rögzítettük. A terhelés függvényében az erőmérő cellából kiolvasott értéket ábrázolva mindkét esetben jól illeszkedő egyenest kaptunk.

Későbbi mérések során így bármely terhelés esetén a meghatározott kalibrációs egyenes egyenlete alapján számítható a cellát terhelő erő. A kalibráció során alkalmazott terhelőtömegeket mérleg segítségével határoztuk meg gramm pontossággal.

A penetrométer kalibrációjának esetében a cellát terhelő tömegeket átszámoltuk súlyerőre és annak függvényében ábrázoltuk a nyers szenzoradatokat. Így kaptuk az 5. ábra szerinti kalibrációs görbét.



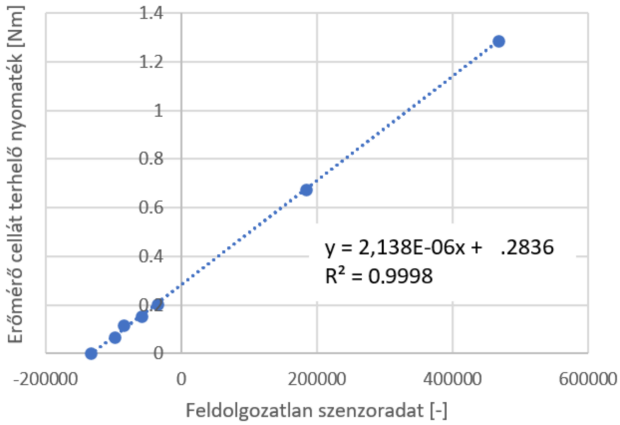
5. ábra. A penetrométerre szerelt erőmérő cella kalibrációs egyenese.

Az átszámítás képlete ez esetben a következő:

$$F_t = m \cdot g \tag{1}$$

Ahol F_t a terhelőerő N-ban, m a terhelőtömeg kg-ban, g a gravitációs állandó értéke ($9.81\,m\,s^{-2}$).

A hasáb alakú szerszám vízszintes húzásához szükséges eszköz esetében a cellát terhelő tömegeket átszámoltuk a cella mérőpontjában ható nyomatékra és annak függvényében ábrázoltuk a nyers szenzoradatokat. Ez figyelhető meg a 6. ábrán.



6. ábra. A hasáb alakú szerszámra szerelt erőmérő cella kalibrációs egyenese.

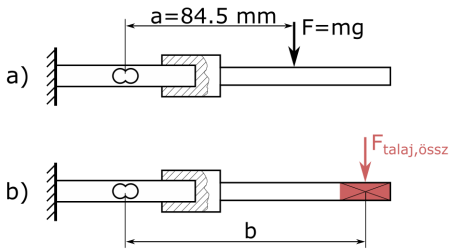
A számítások menete ez esetben a következő: A súlyerőt ugyancsak az előző esetben bemutatott képlet alapján határozzuk meg:

$$F_t = m \cdot g \tag{2}$$

A mérőcella mérő részében ható nyomatékot pedig az erő és az erő hatásvonalától a cella mérőrészéig tartó távolsággal szorozva kaptuk meg a 7. ábra szerint.

$$M = F_t \cdot a \tag{3}$$

A képletben M a nyomaték Nm-ben F_t a terhelőerő N-ban, és a az erőkar m-ben.



7. ábra. A vízszintesen húzott szerszám terhelései kalibráció a) és talajos mérés b) esetében. "a" jelöli a kalibráció során az erőkart, "b" pedig a mérés során fellépő erőkart.

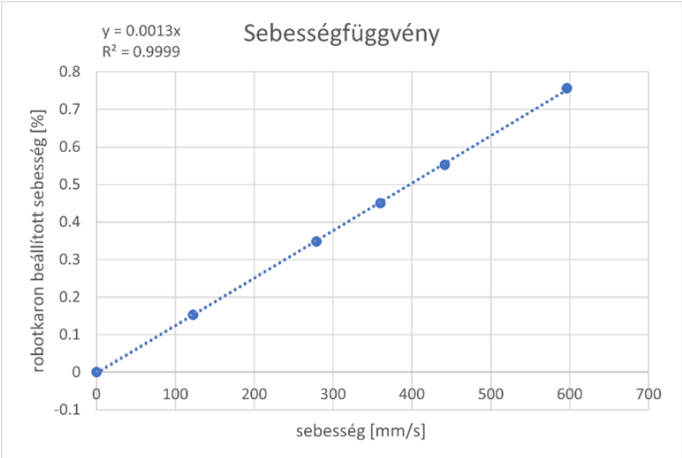
A mérések során mivel a szerszámra ható erőre van szükségünk, vissza kell számolni a kalibrációs egyenesről leolvasható nyomaték értéket erőre. A szerszámot vizsgálatok során a 7. b) ábrán pirossal jelzett felületen terheljük. Ezen felület középpontjában feltételezzük a szerszámot terhelő eredő erőt, melyet a következő képlettel kaphatjuk meg:

$$F_t = \frac{M}{b} \tag{4}$$

5.2.2. A robotkar sebességének meghatározása

A robotkar sebessége százalékosan állítható. Maximális mértékű gyorsulás és lassulás mellett mértük két pont között a megtett „s” utat, és a közben eltelt „t” időt. Feltételeztük, hogy ideális állandó sebességgel mozog a robot a két pont között. A következő képlettel számítottuk a robot sebességét. Az eredményt az 8 ábra mutatja.

$$v = \frac{s}{t} \tag{5}$$



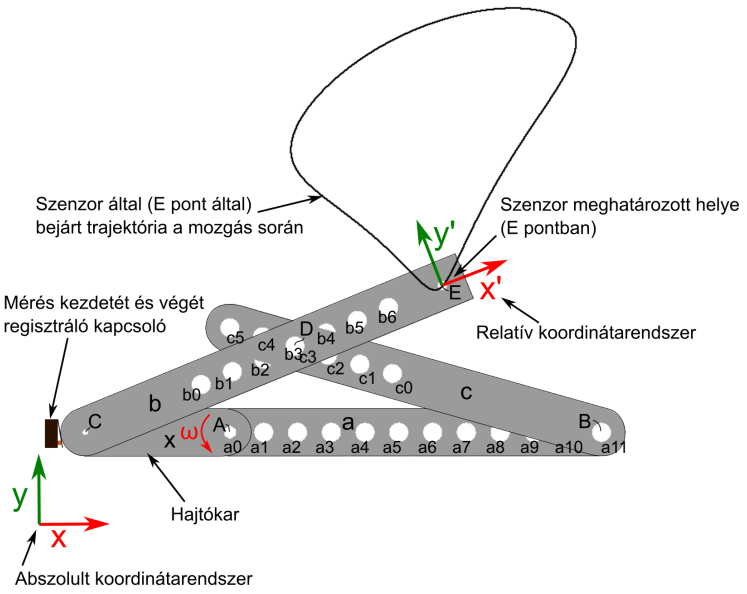
8. ábra. A robot sebességfüggése a beállított százalékos érték függvényében.

5.2.3. Az aktív nyomkövető tanítása

Az aktív nyomkövetőt kalibrálni szükséges ahhoz, hogy mért gyorsulás és elfordulásadatok alapján vissza tudjuk fejteni a nyomkövető által bejárt trajektóriát térben és időben. Az aktív nyomkövető kalibrációját mesterséges intelligencia segítségével végezzük.

Az aktív nyomkövető rendszer adatgyűjtő egysége által szolgáltatott adatokat mesterséges intelligenciával is feldolgozzuk. Az ilyen megoldások esetén az első lépés az, hogy a létrehozott modelleket betanítsuk. Ehhez az adatgyűjtő egységet kontrollált körülmények között olyan pályákon mozgatjuk meg, melyeket pontosan tudunk definiálni analitikus vagy numerikus módszerekkel. Így a becsült eredmények teljes mértékben összehasonlíthatók a várt pályaadatokkal. Bár a korábbiakban bemutatott robotkarral elvileg lehetséges volna ismert pályán mozgatni a szenzort, végül más utat választottunk, ugyanis számos robottal történő kalibrációs mérés után technikai nehézségekbe ütköztünk. A robotkar feje által megtett pályaadatokat ugyanis nem sikerült megfelelő pontossággal visszafejtenünk térben és időben. (A módszer egyébként hosszabb távon nem elvetendő.)

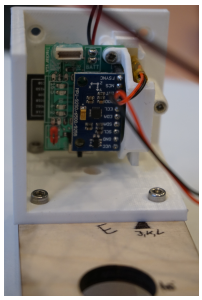
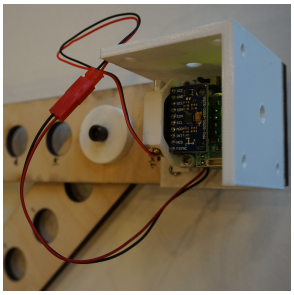
A kutatás jelen fázisában terveztünk és építettünk egy olyan négy karból álló mechanizmust, mely egyenletes körmozgást alakít át zárt görbén történő mozgásra, amint az a 9. ábrán látható. A mechanizmus egyik karjának meghatározott pontjára (E pont) helyezett szenzor (10. ábra) egy síkba eső szabálytalan alakú, de kiszámítható zárt görbéket ír le a mérés során.



9. ábra. A tervezett mechanizmus vázlatos rajza.

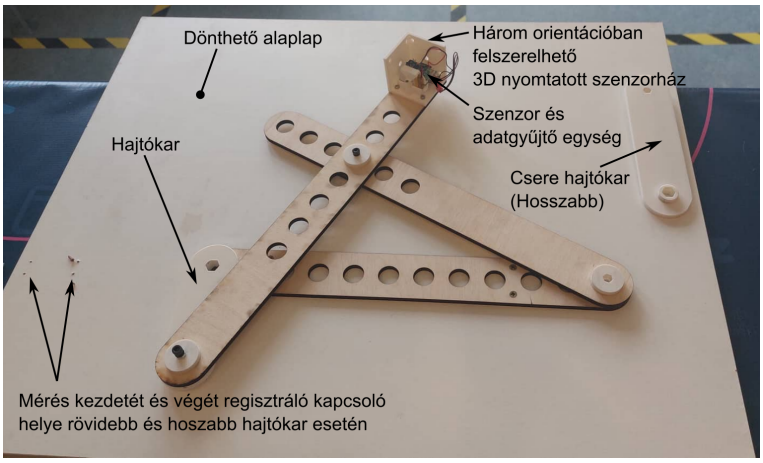
Ezzel az elrendezéssel gyűjtöttünk tanítóadatokat a mesterséges intelligencia modellek tanításához, a várt adatokat pedig generáltuk.

A mechanizmus karjait úgy terveztük meg, hogy annak karhosszai bizonyos határokon belül változtathatók legyenek. Így sokféle görbén mozgatható az adatgyűjtő eszköz. A mechanizmust egy alaplapra szereltük, melynek a vízszintessel bezárt szöge állítható. Biztosítottuk továbbá, hogy a szenzort az E pontra három féle orientációval is fel lehessen szerelni. Két különböző felszerelési példa látható a 10. ábrán. Így a szenzorral saját koordinátarendszeréhez viszonyítva a tér körülbelül 5/8-át be lehet járni.


a)

b)

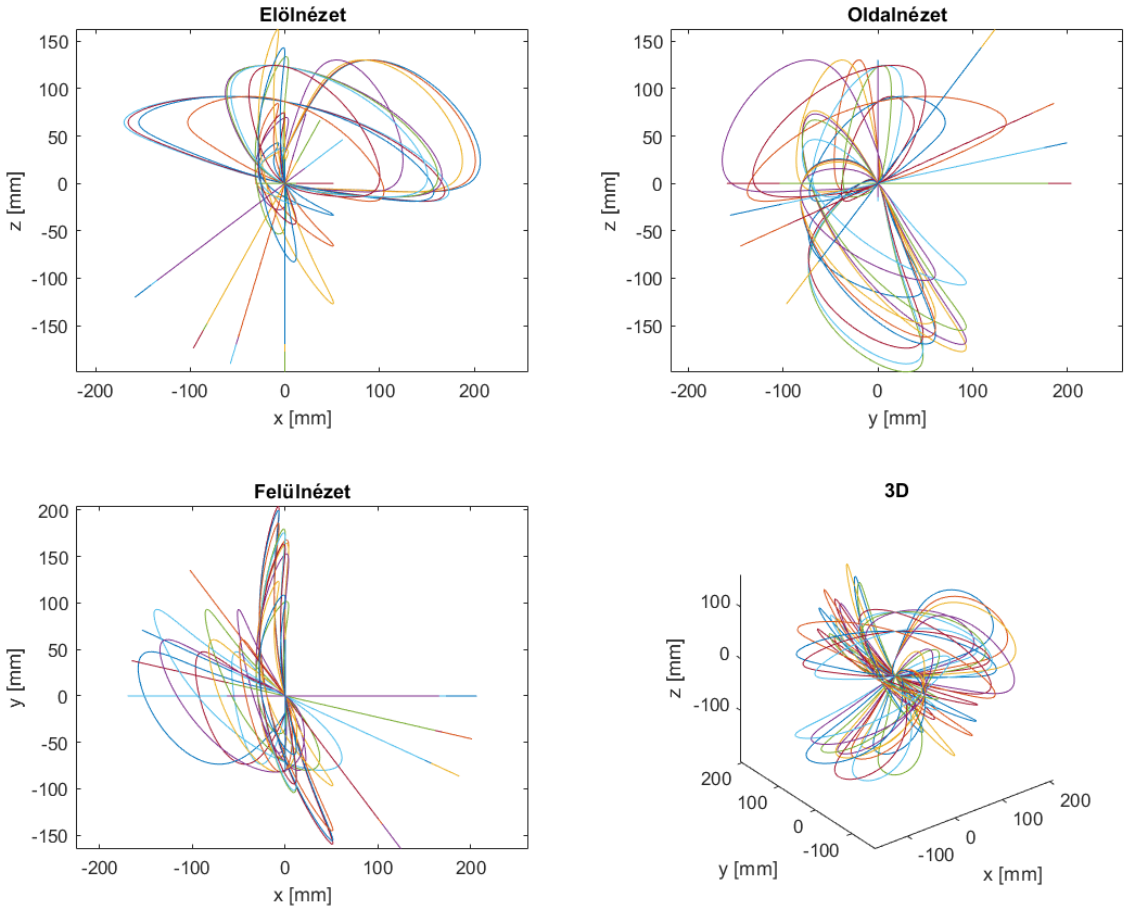
10. ábra. Az adatgyűjtő egység háza és annak rögzítése *(Látható, hogy az a) és a b) képen az adatgyűjtő egység más-más pozícióban van rögzítve.)*

A mechanizmus hajtókarját akkumulátoros fúrógép segítségével csavarbehajtó fokozatban forgattuk. A mérés kezdetét és végét a 9. és ábrán jelölt kapcsoló segítségével regisztráltuk, melyet a hajtókar nyom meg, így mértük a hajtókar periódusidejét. A mérés során feltételeztük, hogy a hajtókar egyenletes körmozgást végez.



11. ábra. Az épített mechanizmus fényképe.

Problémát jelent, hogy az adatgyűjtő a mechanizmussal történő mérések során a tér 3/8-át nem járja be. Ez jól látszik a 12. ábrán is, amin a méréseink során bejárt pályákat jelenítjük meg. A hiányzó térrészben gyűjtött adatokkal a mesterséges intelligencia alapú modelljeink a későbbiekben tovább taníthatók lesznek.



12. ábra. Matlab segítségével generált görbék, melyek a mesterséges intelligencia tanításánál a várt értékeket adják.

További problémát jelent, hogy a mechanizmus nem képes a szenzor forgatására és olyan mozgások generálására, amely nem egy síkra eső pontokból álló zárt pályát eredményez. Így a modellt nem tanítjuk meg azokra az esetekre, amikor a szenzor általános pályán és elforogva mozog. A jövőben cél, hogy általánosabb, a talajban történő szenzormozgásokhoz nagyon hasonló mozgásformákat generáljuk más módszerrel.

A mechanizmus „E” pontja által a mozgás során bejárt pályát Matlab segítségével modelleztük. Habár CAD rendszerek segítségével is lehetőség van mechanizmusok dinamikus vizsgálatára, egyszerűbbnek bizonyult a Matlab alkalmazása, mellyel nagyobb mennyiségű pályát rövidebb idő alatt lehet legenerálni a szenzor kezdőpontjához igazított abszolút koordinátarendszeren. Minden pálya a következő paraméterekkel generálható:

- Hajtókar hossza.
- Az „a” kar hossza, melyet meghatároz a karon lévő furat azonosítója.
- A „b” kar hossza melyet meghatároz a karon lévő furat azonosítója.
- A „c” kar hossza melyet meghatároz a karon lévő furat azonosítója.
- A szenzorház kezdeti orientációja.
- Az alaplap vízszintessel bezárt szöge.

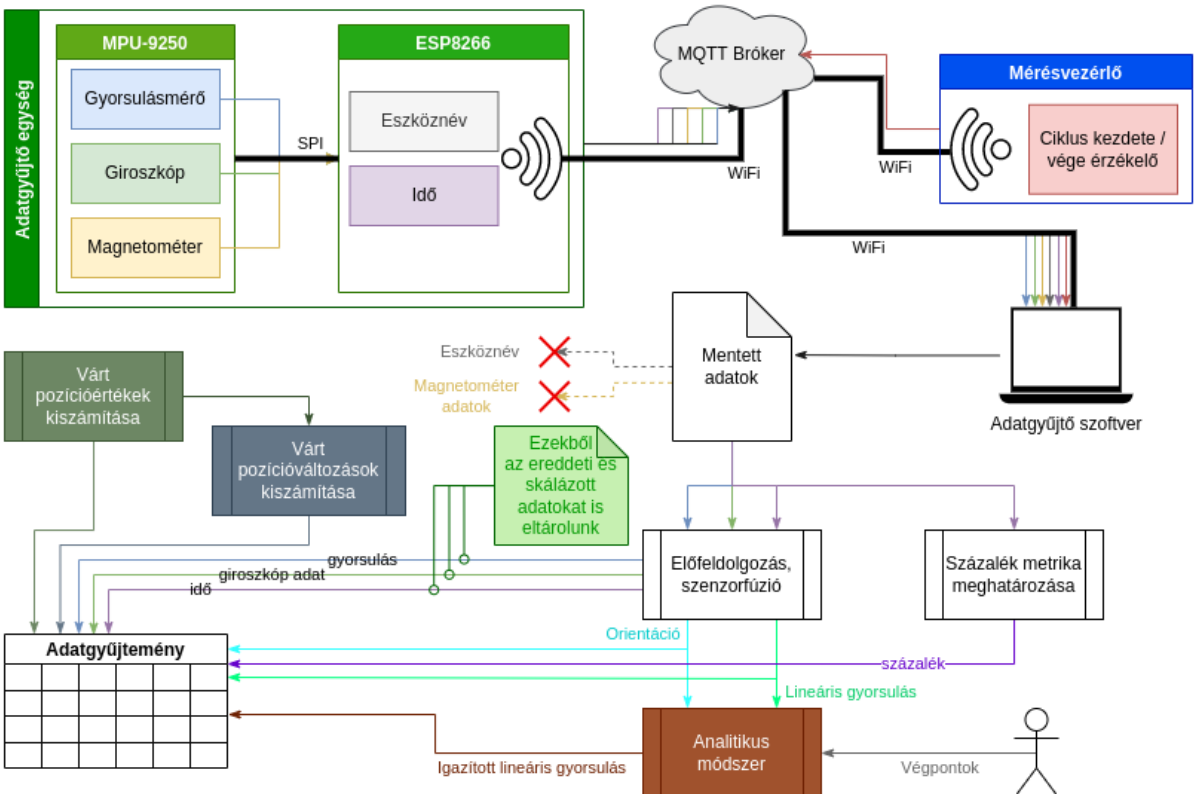
5.3. Pályabecslés mesterséges intelligencia modellekkel

Munkánk során többféle mesterséges intelligencia modellel is kísérleteztünk. Először különböző neuronhálók létrehozásával igyekeztünk az IMU által mért adatokból pozíciókat vagy adott időlépésekhez tartozó pozícióváltozásokat becsülni. Nagy mennyiségű modellt építettünk a különböző neurontípusok, architektúrák, optimalizáló- és veszteségszámító algoritmusok kombinációival, azonban ezekkel legfeljebb részeredményeket értünk el. Sok modell még a tanító adatok „viszontlátása” esetén sem tudott megfelelő minőségű kimenetet adni, így később áttértünk a gradient boosting technikára. Ennek lényege, hogy a tanítás során egyenként gyengén teljesítő modelleket kombinál iteratívan, melyek egy, a várt értékeket jól közelítő modellé állnak össze.

5.3.1. Adatok és metrikák

A felhasznált modellek többféle gyűjtött adatot, illetve metrikát (a gyűjtött adatokból származtatott adatok) használnak fel a becslésekhez, ezeket a 13. ábra szemlélteti.

A 13. ábrához érdemes megjegyezni, hogy a gyorsulásmérő, giroszkóp és magnetométer három dimenzióban szolgáltat adatot. Ezen túl feltűnő lehet, hogy két adattípust, a magnetométer adatokat valamint az eszköznevet nem használjuk. Utóbbi részben azért nem kerül felhasználásra, mert az egyelőre csak a jövőben tervezett fejlesztéseink miatt van benne, hiszen tervezünk több adatgyűjtő egységgel is méréseket végezni, jelenleg azonban csak egyet használunk. A magnetométer adatait pedig azért nem vesszük figyelembe, mert a tervezett valós mérések esetén mágnesezhető anyagból készülő testek (amire a magnetométer érzékeny) előbb közeledő, majd távolodó mozgásokat fognak végezni, amire jelenleg nem tudjuk felkészíteni a modelljeinket, így jobbnak láttuk ezeket az értékeket elhagyni.



13. ábra. Adatok és metrikák.

5.3.2. Különböző modellek vizsgálata

Az ábrán szemléltetett módon létrejövő adatgyűjteményből többféle modellt is építünk az XGBoost programkönyvtár felhasználásával. Az említett módon készülő modellek nagy előnye, hogy képesek automatikus metrikaszelekcióra, emiatt úgy döntöttünk, hogy sokféle adatot adunk át ezeknek inputként a releváns metrikák kiválogatását pedig a modellekre bízzuk.

Úgy döntöttünk továbbá, hogy olyan modellekkel foglalkozunk, melyek nem közvetlenül pozíciót, hanem adott időlépéshez tartozó elmozdulást becsülnek, mivel ezek az értékek jobban generalizálhatók.

A különböző modellek bemeneteinél az különbözött még, hogy nem minden létrehozott adatot adunk át ezeknek. Változtattuk, hogy az egyes modellek felhasználhatják-e a „százalék” metrikát valamint az analitikus módszerrel előállított eredményeket.

Ezen túl az adatokat még kétféleképp szerveztük. Az egyik esetben a gyorsulásmérő valamint a giroszkóp egyes tengelyeken mért adatai egymás „mellett”, külön oszlopokban szerepelnek („széles” modell, 1. táblázat), míg a másik esetben ezeket egyesítettük egy-egy gyorsulás és giroszkóp adat oszlopba („vékony” modell, 2. táblázat).

1. táblázat. A széles modell bemenetének elrendezése.

$\mathbf{acc_x}$	$\mathbf{acc_y}$	$\mathbf{acc_z}$	$\mathbf{gyr_x}$	$\mathbf{gyr_y}$	$\mathbf{gyr_z}$	...	**metrika m-1**	**metrika m**
acc_{x_1}	acc_{y_1}	acc_{z_1}	gyr_{x_1}	gyr_{y_1}	gyr_{z_1}	...	metrika m-1_1	metrika m_1
acc_{x_2}	acc_{y_2}	acc_{z_2}	gyr_{x_2}	gyr_{y_2}	gyr_{z_2}	...	metrika m-1_2	metrika m_2
...	...	...	...	...	...	...	...	...
acc_{x_n}	acc_{y_n}	acc_{z_n}	gyr_{x_n}	gyr_{y_n}	gyr_{z_n}	...	metrika m-1_n	metrika m_n

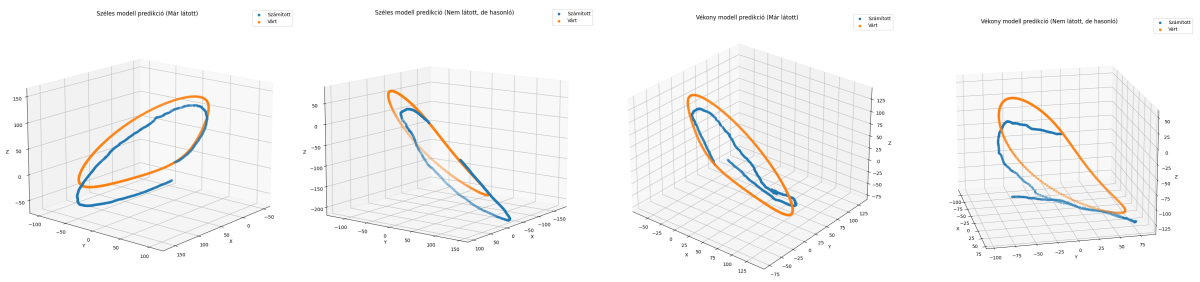
2. táblázat. A vékony modell bemenetének elrendezése.

acc	**gyr**	...	**metrika m-1**	**metrika m**
acc_{x_1}	gyr_{x_1}	...	metrika m-1_1	metrika m_1
acc_{x_2}	gyr_{x_2}	...	metrika m-1_2	metrika m_2
...	...	...	...	...
acc_{x_n}	gyr_{x_n}	...	metrika m-1_n	metrika m_n
acc_{y_1}	gyr_{y_1}	...	metrika m-1_1	metrika m_1
acc_{y_2}	gyr_{y_2}	...	metrika m-1_2	metrika m_2
...	...	...	...	...
acc_{y_n}	gyr_{y_n}	...	metrika m-1_n	metrika m_n
acc_{z_1}	gyr_{z_1}	...	metrika m-1_1	metrika m_1
acc_{z_2}	gyr_{z_2}	...	metrika m-1_2	metrika m_2
...	...	...	...	...
acc_{z_n}	gyr_{z_n}	...	metrika m-1_n	metrika m_n

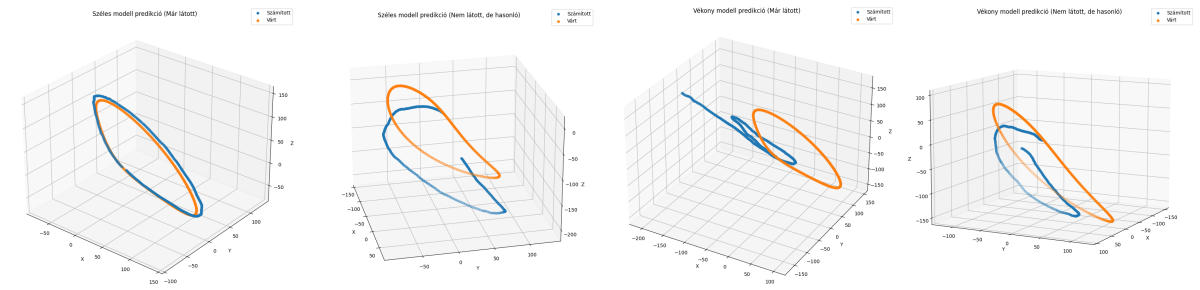
(Az 1. és 2. táblázatokban „n” az adatok, míg „m” a metrikák számát jelöli.)

5.3.3. Gyűjtött adatok alapján mesterséges intelligenciával becsült pályák

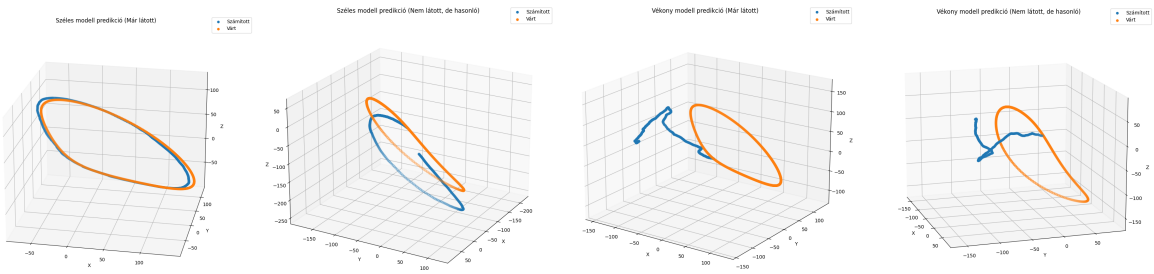
A különböző modellek eredményeit az alábbi ábrákon szemléltetjük. A kiértékeléshez kétféle adatot használtunk, az egyik egy olyan adathalmaz, mely a tanítóadatok között is szerepel (már látott), a másik pedig egy olyan eset, mely jellegre hasonlít a tanítóadatokhoz, de nem szerepelt a tanítóadatok között (nem látott, de hasonló).



14. ábra. A százalékot és analitikus eredményeket fel nem használó modell eredményei. (Az ábrán szereplő értékek mm-ben értelmezendők.)



15. ábra. A százalékot nem, de analitikus eredményeket felhasználó modell eredményei. (Az ábrán szereplő értékek mm-ben értelmezendők.)



16. ábra. A százalékot és analitikus eredményeket is felhasználó modell eredményei. (Az ábrán szereplő értékek mm-ben értelmezendők.)

Szembetűnő a különböző modellek teljesítménye közti különbség, valamint hogy az egyes modellek máshogy reagálnak a különböző bemenetekre. Látható például, hogy a széles modell abban az esetben képes a legpontosabb lenni, amikor minden előállított metrikát felhasznál, a vékony modell ugyanezen esetben azonban elbukik (még a akkor is, ha olyan adathalmazon kell predikálnia, mely része volt a tanítóadatoknak), de a másik két bemenet esetén jobban teljesít.

5.3.4. Pozícióbecslés továbbfejlesztési lehetőségei

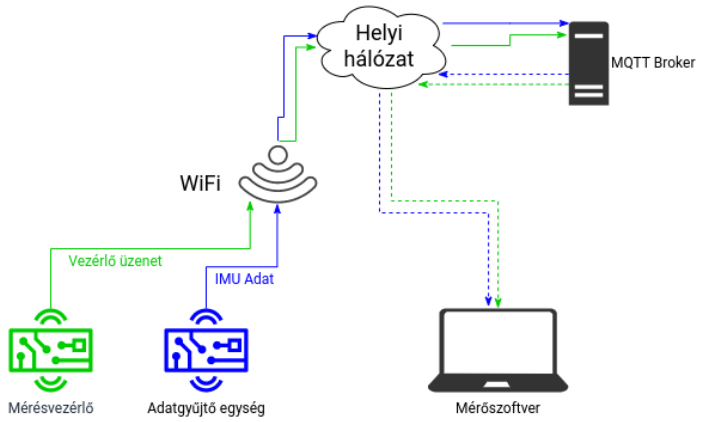
A létrehozott mechanizmussal és a bemutatott mérési elrendezéssel sokféle pályát tudunk mérni és az időzítésünk is pontos, azonban akadnak még problémák.

A mechanizmussal történő mérésnél felmerülő problémák a következők:

- csak zárt görbéket tudunk vizsgálni
- a vizsgált pályák egy síkba esnek
- a mechanizmussal való mérés során nem változik nagymértékben az adatgyűjtő eszköz orientációja
- bár többféle pályát is be tudunk állítani, azok továbbra sem elég véletlenszerűek
- a létrehozható pályák nem hasonlítanak a tervezett felhasználásnál várhatóan mérendő pályákhoz

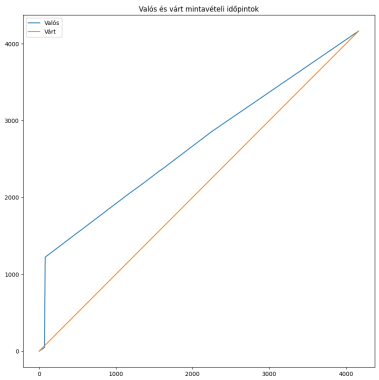
A felsorolt problémákra egy megoldás lehet, hogy egy olyan gépet tervezünk, ami három dimenzióban képes lesz mozgatni és forgatni az adatgyűjtő eszközt hasonló pályákon, mint amilyeneken az adatgyűjtő a talajban is mozoghat. A mozgatás során megtett pályát pedig képfelismeréses módszerrel tervezzük felismerni. Ilyen módon véletlenszerű pályákat létre lehet hozni.

A másik felmerülő probléma technikai jellegű. Jelenleg a mért adatok és a vezérlő üzenetek továbbítására is MQTT szabványt használunk. Ebből az következik, hogy minden egy MQTT brókerrel kommunikál és az küldi tovább a megfelelő adatokat a megfelelő célpontoknak, amint ez a 17. ábrán is látható.



17. ábra. A jelenlegi mérési elrendezés adatútjának sematikus bemutatása.

Azonban, amint ennek használata közben megtudtuk, ez a módszer nem a legalkalmasabb megoldás a mi esetünkben. A probléma abban rejlik, hogy az adatgyűjtő eszköz legalább 100 Hz frekvenciával veszi és továbbítja az adatokat, az MQTT bróker azonban úgy tűnik, nem volt ilyen igénybevételre felkészítve. Ennek következtében az adatok nem továbbítódnak egyenletesen, ami blokkolja azok gyűjtését is. Ez a jelenség látható a 18. ábrán.



18. ábra. A mintavételek időpontjainak akadása. (Mindkét tengely mértékegysége ms-ban értelmezendő.)

Ennek a megoldására kétféle megoldás tűnik lehetségesnek. Az egyik, hogy az adatgyűjtő egység is figyeli a mérésvezérlő üzeneteit és azokra reagálva csak akkor küldi el a vett adatokat, amikor erre utasítást kap. Ezzel azonban a probléma az, hogy egyrészt az adatgyűjtőnek időt kell arra szánnia, hogy vizsgálja, hogy van-e beérkező vezérlőüzenet, azonban mivel az általunk használt ESP8266 típusú mikrokontroller egység csak egy egymagos processzorral rendelkezik, így fennáll a lehetőség, hogy ez is hátráltatná az adatgyűjtést. Ezen túl az említett mikrokontroller egység beépített memóriája 36 kB körül van, ami ilyen mennyiségű adat mellett rövid időn belül betelhet.
A másik lehetőség, hogy nem MQTT használatával végezzük az adatok továbbítását, hanem például socket segítségével. Ilyen módon köztes szereplő nélkül kommunikálhat az adatgyűjtő egység a mérőszoftverrel.

A legvalószínűbb megoldás az, hogy a gyűjtött adatokat socket alapon, míg a vezérlőüzeneteket MQTT alapon fogjuk továbbítani.

5.4. A mérések menete

Az általunk kialakított laboratóriumi környezetben végeztük méréseinket a robotkar segítségével, ahogy azt korábbiakban bemutattuk. A penetrációs ellenállás mérése során összesen kilenc mérést végeztünk három mérési sorozatban. Egy mérési sorozaton belül tehát háromszor mértünk azonos körülmények között. A mérési sorozatok közti különbség az alkalmazott mérőkúpok méretének változtatásából adódott (3. táblázat). Mértünk 2 cm^2, 3.33 cm^2, és 4 cm^2-es projektált keresztmetszettel rendelkező 60°-os kúpszögű mérőkúppal. Minden mérés előtt biztosítottuk, hogy a talaj állapota megközelítőleg azonos módon legyen visszaállítva. A penetrációs ellenállás mérések során 65 $mm \cdot s^{-1}$-os sebességet állítottunk be. (Megjegyzendő, hogy ez a sebesség jelentősen nagyobb a szabványban előírt maximumhoz képest.) Megközelítőleg 11 cm mélységig hatoltunk a talajba. Közben pedig rögzítettük az erőmérő cella által mért értékeket. Egy mérésen belül a talajvályúban egy egyenesbe eső egymástól 200 mm-re lévő három pontban vizsgáltuk meg a penetrációs ellenállást.

3. táblázat. A penetrációs ellenállás során alkalmazott kúpok mérete.

Mérés sorszáma	Mérőkúp mérete [cm^2]
1, 2, 3	3,33
4, 5, 6	2
7, 8, 9	4

Kapcsolt mérésünk során vizsgáltuk a talaj ellenállását (szerszámra ható erőméréssel) egyszerű hasáb alakú szerszám vízszintes behatolásával szemben, valamint rögzítettük a szerszám útjába helyezett aktív nyomjelző által rögíztett adatokat. Összesen 12 mérést végeztünk négy mérési sorozatban a 4. táblázat alapján. A mérési sorozatok közti különbség a beállított mérési sebesség változtatásából adódott. A talajban a 40 mm széles szerszámot a talaj felszínétől számítva 5.5 cm mélyen húztuk el. A szerszám kiindulási pontja elé szimmetrikusan 20 cm-re helyeztük az 58 mm átmérőjű nyomjelzőt a talajba úgy, hogy azt 10 mm talaj fedje.

4. táblázat. A vízszintes talajellenállás-mérés (kapcsolt mérés) során alkalmazott mérési sebességek.

Mérés sorszáma	Mérési sebesség [$m\,s^{-1}$]
1, 2, 3	0.12
4, 5, 6	0.15
7, 8	0.23
9, 10, 11, 12	0.39

Minden mérés előtt a talajt igyekeztünk azonos állapotba hozni a 19. ábrán szemléltetett folyamattal. Ezt úgy tettük meg, hogy a talajvályúban lévő talajt lapát segítségével megbolygattuk, gereblye segítségével elegyengettük, majd egy a talajvályú szélességével rendelkező kívülről laminált, belülről kvarchomokkal töltött és ledugózott papírhengert végiggörgettük a talaj felszínén.

a) b) c)

19. ábra. A talaj állapotának visszaállítása a mérés elvégzése után. a) forgatás lapáttal, b) gereblyézés, c) hengerlés.

Később végeztünk hasonló méréseket egy másik robotkar segítségével is (20. ábra). A talajvályú előkészítése a korábban ismertetetthez hasonló, azonban ennél a robotkarnál jobban biztosított a talajmegművelő szerszám konstans sebességű mozgatása egy egyenes szakaszon.

20. ábra. Az újabb mérési elrendezés.

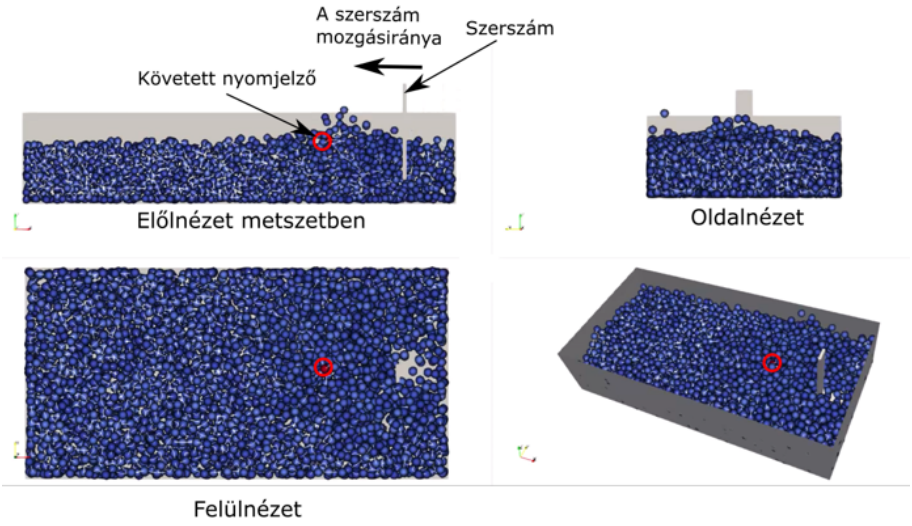
Ezen túl a mérési elrendezésen úgy módosítottunk, hogy az MQTT bróker egy Raspberry Pi egykártyás számítógépen fut és az adatgyűjtő egység, illetve a mérőprogramot futtató laptop is közvetlenül ehhez a számítógéphez csatlakozik vezeték nélküli kapcsolattal. Ennek következtében azt tapasztaltuk, hogy adatgyűjtés közben az akadozási probléma nagymértékben lecsökkent.

6. Anyagok és módszerek II. - DEM szimulációk

6.1. Felépített szimulációs környezet

Diszkrét elemes módszert alkalmazva modellezhető a talajművelő szerszám és a talaj kölcsönhatása. Szimulációink során a YADE nyílt forráskódú szimulációs szoftvert alkalmaztuk.

A szimulációs geometriai elrendezés és annak méretarányai 1:1-ben követi a fizikai mérések elrendezését (21. ábra). Tehát a talajvályú méretei, a szerszám-geometria a szerszám vontatási sebessége (egyenletes 0.39 $m\,s^{-1}$), a talajba helyezett nyomjelző mérete és annak kiindulási helyzete a szimulációban és a valós esetben megegyezik. Továbbá a 5. táblázatban összefoglaltuk azon kapcsolati paramétereket és szimulációs beállításokat, valamint azok értékét, melyek minden szimulációban be lettek állítva.



21. ábra. Szimulációs elrendezés.

1. Létrehoztunk egy akkora talajvályút, melyet a mérések során is alkalmaztunk. A modellben gömb alakú elemeket alkalmazva modelleztük a talajt.

2. Generáltunk egy laza szemcsés halmazt, melyen belül elhelyeztük az aktív nyomkövetőt is a valóságnak megfelelő méretben.

3. A generált laza halmazt a talajvályúba ülepítettünk. Így értük el, hogy legyen egy ülepített halmazunk, melyben megfelelő pozícióban van a nyomkövető. Több ülepítési kísérlet után közel a valós méréseinkkel azonos pozícióba tudtuk ülepíteni a halmazzal együtt a nyomkövetőt.

4. Végül a halmaz felső elemeit letöröltük hogy a valósághoz hasonlóan megfelelő magasan legyen az ülepített halmaz a vályún belül.

5. táblázat. A kezdeti kapcsolati paraméterek és szimulációs beállítások. ("Változó" -nak jelöltük azon paraméterértékeket, melyeket paraméterérzékenységi vizsgálatok során változtattunk.)

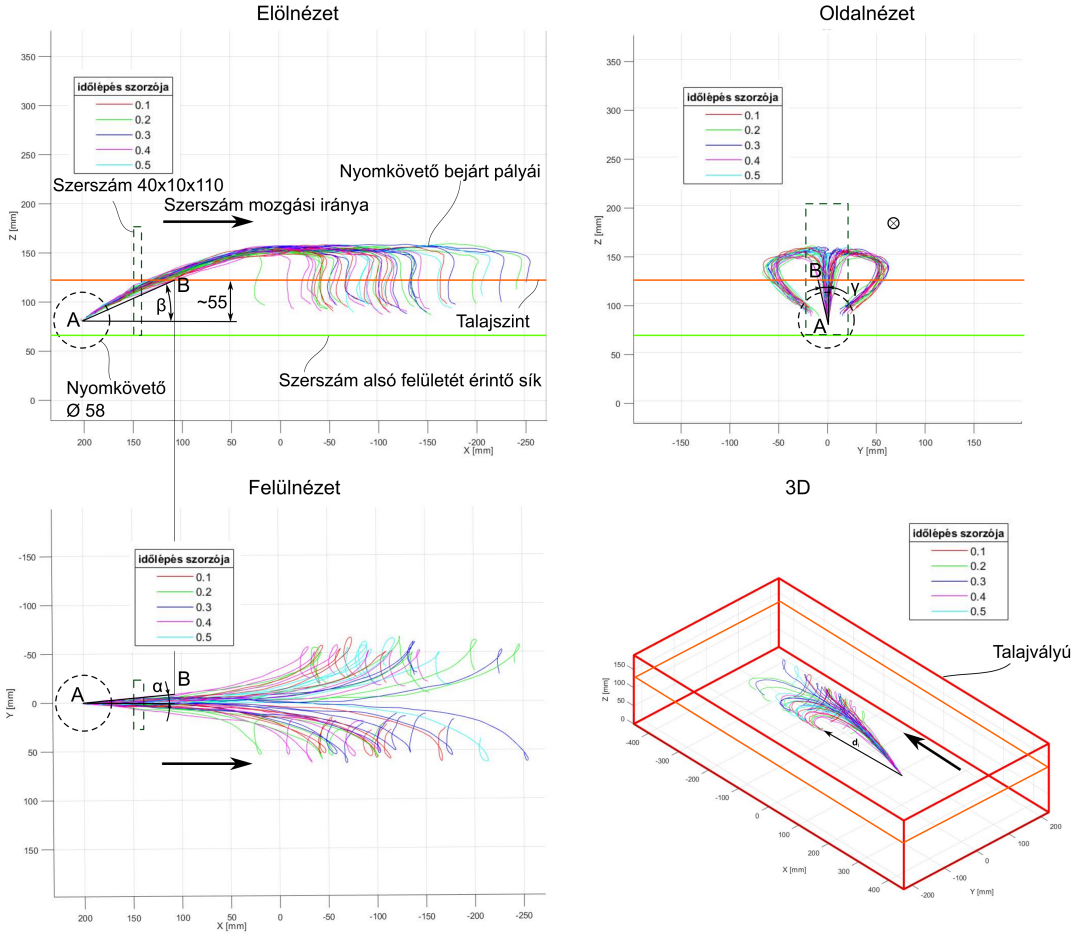
Paraméter megnevezése	Paraméter értéke
Elem típusa	gömb
Elemek száma	27378 [db]
Elemek sűrűsége	2700 [$kg\,m^{-3}$]
Rugalmassági modulus	$5 \cdot 10^6$ [Pa]
Poisson-tényező	0.4[-]
Generált szemcseméret	0.006 [m]
Normálirányú kohézió	változó [Pa]
Nyíróirányú kohézió	0.5·Normálirányú kohézió [Pa]
Elemek közötti súrlódási szög	változó [°]
Elemek közötti gördülési súrlódási tényező	változó [-]
Elemek közötti csavarási súrlódási tényező	változó [-]
Globális csillapítás az ülepítés során	0.8 [-]
Globális csillapítás a szimulációs mérések során során	0 [-]
A falra vonatkozó sűrűség	2700 [$kg\,m^{-3}$]
A falra vonatkozó Rugalmassági modulus	$1 \cdot 10^8$ [Pa]
A falra vonatkozó mikromechanikai Poisson-tényező	0.3 [-]
Időlépés	változó [-]
Halmazban lévő kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányados	változó [-]
Szerszám vontatási sebessége	változó [$m\,s^{-1}$]
Nyomkövetett elem sűrűsége paraméterérzékenységi vizsgálatokban	2700 [$kg\,m^{-3}$]
Nyomkövetett elem sűrűsége talajkalibrációk során	2700 [$kg\,m^{-3}$]

6.2. Paraméterérzékenység vizsgálatok

Felfigyeltünk arra a jelenségre, hogyha azonos peremfeltételekkel futtatunk egy szimulációt, akkor a DEM szimulációban a talajmodellbe elhelyezett nyomkövető a talaj-szerszám kölcsönhatás során nem azonos pályákat fut be. És bár ezek a pályák jellegre hasonlóak mégis viszonylag nagy szórással jellemzik a talajmodell elmozdulását.

Vizsgáltuk, hogy ha a talajt különböző kapcsolati paraméterkombinációval állítjuk be, milyen jellegűek lesznek a nyomkövető által befutott pályák. Vizsgáltuk az elemek közötti csavarási és gördülési súrlódási tényezők, az elemek közötti súrlódási kúp és a kohézió hatását. (A súrlódási tényezőknek irányultságtól függetlenül minden esetben azonos értékeket állítottunk be.) Továbbá vizsgáltuk, hogy a talajmodellben lévő kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányados és az időlépés milyen hatással van a nyomkövető bejárt trajektóriáira. Azonos paraméterkombinációval 10 szimulációt futtattunk. A kezdeti kapcsolati paramétereket és szimulációs beállításokat (6. táblázat) úgy határoztuk meg, hogy mérési eredményeink alapján beállítottunk egy

olyan szimulációt és talajmodellt, mely megfelelő pontossággal modellezte a szerszámra ható talajellenállási erőt. (Azonos erőérték egyébként különböző kapcsolati paraméterbeállításokkal is előállítható. Kutatásunkban keressük, hogy a talaj mozgása ezen esetekben mennyire eltérő lehet.) A 6. táblázatban megadtuk azt is, milyen értékekkel tértünk el az alapértékekhez képest a paraméterérzékenység-vizsgálatok során. Minden esetben az alapértékekhez képest egyetlen paraméter értékét állítottuk be másképp.



22. ábra. Magyarázóábra egy paramétervizsgálat során kapott eredmények értelmezéséhez. (A feltüntetett értékek [mm]-ben értendők.)

6. táblázat. A kezdeti kapcsolati paraméterek és szimulációs beállítások.

Paraméter megnevezése	Alapérték	Állított értékek
Elemek közötti súrlódási tényezők	0.06 [-]	0.01, 0.1325, 0.0255, 0.3775, 0.5
Elemek közötti súrlódási szög	9 [°]	5, 11.25, 17.5, 23.75, 30
Kohézió	0 [Pa]	3e5, 3.5e5 4e5 4.5e5 5e5
Kiegyensúlyozatlansági erőhányados	0.0134	0.0045, 0.0089, 0.0134 0,0178
Időlépés szorzó	0.5 [1]	0.1, 0.2, 0.3, 0.4 0.5
Szerszámsebesség	0.39 $[m\,s^{-1}]$	0.12, 0.15, 0.23, 0.39

A kapott eredmények alapján meghatároztunk néhány jellemzőt, mely segítségével könnyebb jellemezni a nyomkövető által bejárt trajektóriát konstans értékekkel. A 7. táblázatban foglaltuk ezeket össze. Ezen értékek alapján hasonlítottuk össze a szimulációban kapott görbéket.

7. táblázat. Nyomkövető trajektóriát jellemző konstans értékek.

Trajektóriajellemző megnevezése	Jele	Mértékegysége
Kezdeti emelkedési szög	β	[°]
Y irányú kezdeti kitérési szög	α	[°]
X irányú kezdeti kitérési szög	γ	[°]
Nyomkövető elmozdulásának hossza	d	[mm]
X irányú maximum kitérés	X_{max}	[mm]
Y irányú maximum kitérés	Y_{max}	[mm]
Z irányú maximum kitérés	Z_{max}	[mm]

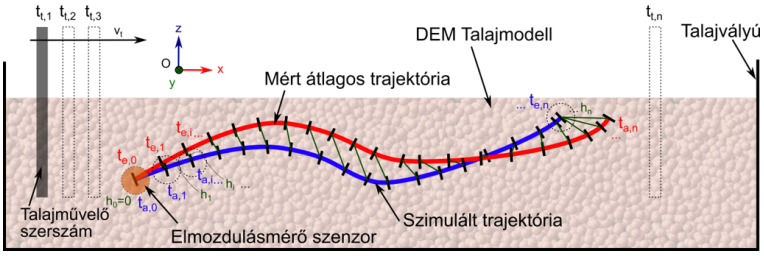
A 22. ábrán 50 a nyomkövető geometriai középpontja által érintett görbe jelenik meg. Öt különböző kezdeti peremfeltételekkel futtatott szimulációk eredményei látható. (Jelen esetben az időlépést állítottuk öt különböző értékre.) Az eredmények kiértékelésénél a nyomkövető által bejárt görbéket jellemző általunk definiált konstansokat átlagoltuk, és egyes esetekben kiszámoltuk ezek kétszeres szórását.

Az 22. ábrán feltüntetett "A" pont a nyomkövető geometriai középpontja a szimuláció kezdetén. "B" az a pont, melyet akkor érint a nyomkövető geometriai középpontja, mikor az Z irányban éppen eléri a talaj elméleti síkját. Az $\overrightarrow{AB}$ vektor vetületeinek az X,Y,Z tengelyekkel bezárt szögei határozzák meg α, β, γ értékét a 22. ábra szerint. A "d" konstans a nyomkövető végső elmozdulásvektorának hossza (lásd: 22. ábra 3D nézet). X_{max}, Y_{max} és Z_{max} a trajektória maximális kitérésének abszolút értéke a jelölésnek megfelelő tengelyen.

6.3. Genetikus algoritmus alkalmazása a szimulációk automatikus kalibrálásához

A szakirodalmi áttekintésünk során találtunk olyan kutatásokat melyben genetikus algoritmus alkalmazásával automatizálták a szemcsés anyag kalibrálását DEM-ben. Erre alapozva kezdtünk foglalkozni a talaj-szerszám kölcsönhatása közben történő talaj kalibrálásával genetikus algoritmust alkalmazva. A DEM talajmodellt a nyomkövető által bejárt pálya és a szerszámra ható ellenállási erő alapján kalibráltuk. Bemeneti adatokként méréseink szolgáltak. A nyomkövető szenzorral mért pályák közül választottunk egyet (etalongörbe), mely megítélésünk szerint megfelelően jellemezte a talaj mozgását a talaj-szerszám kölcsönhatása közben. Kalibrálás során az átlagos szerszámra ható talajellenállási erő, mint célérték és a nyomkövető által bejárt pálya mint időbeli célfüggvény szolgál bemenetként a genetikus algoritmusnak. Kalibrálás során ezen célokat igyekszik megközelíteni az algoritmus a kapcsolati paraméterek hangolásával.

Három kapcsolati paramétert hagytunk meg változtathatónak. Az elemek közti gördülési és csavarási súrlódási tényezőt együtt, azonos értékkel, 0.01-0.5 intervallumon belül illetve az elemek közötti súrlódási kúp értékét 5-30° intervallumon belül generálja a genetikus algoritmus. A többi kapcsolati paraméter értékét rögzítettük a 5. táblázatban összefoglaltak szerint.



23. ábra. Elvi ábra az etalongörbe és az aktuálisan szimulált görbe közötti távolság alakulása a szimuláció során az idő függvényében.

A talajkalibrációs cél, hogy olyan kapcsolati paraméterkombinációkat találjunk a genetikus algoritmus segítségével, amely esetén a talaj elmozdulását jellemző etalongörbe és a szimulált elmozdulásgörbe közötti átlagos eltérés (az adatgyűjtő időbeli helyzetét is figyelembe véve) minimális. Mindeközben, a szerszámra ható átlagos talajellenállási erő relatív hibáját legfeljebb 25%-ban határoztuk meg.

Az mért görbe (etalongörbe) és az aktuálisan szimulált görbe közötti átlagos távolságot a következő egyenlet írja le az n. időlépésben az 23. ábra alapján:

$$H(n) = \frac{1}{i} \cdot \sum_{i=1}^{n} h_i = \frac{1}{i} \cdot \sum_{i=1}^{n} \sqrt{(x_{a,i} - x_{e,i})^2 + (y_{a,i} - y_{e,i})^2 + (z_{a,i} - z_{e,i})^2} \tag{6}$$

A 6. képletben a jelölések jelentése a következő:

H: átlagos távolság a két görbe között

h: két görbe közötti távolság az i. időpillanatban

i: mérési pontok száma

n: összes mérési pont száma

$\mathbf{x_{a,i}}$, $\mathbf{y_{a,i}}$, $\mathbf{z_{a,i}}$**:** szimulált nyomjelző aktuális pozíciója t_i időpillanatban

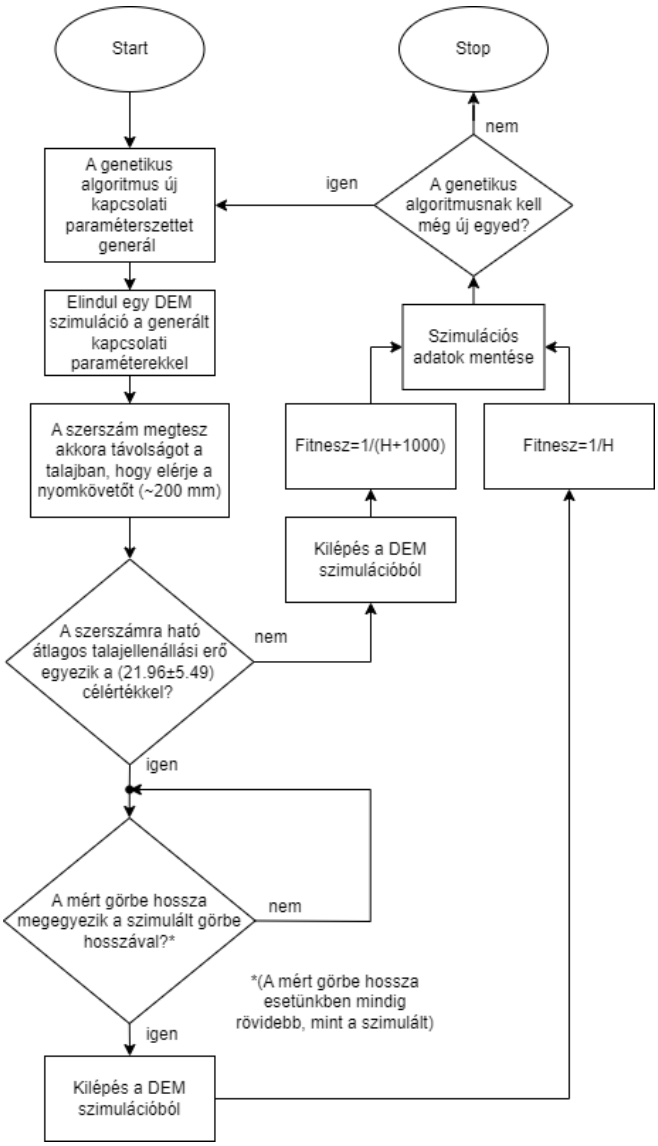
$\mathbf{x_{e,i}}$, $\mathbf{y_{e,i}}$, $\mathbf{z_{e,i}}$**:** etalongörbe időben megfeleltethető aktuális koordinátája (t_i időpillanatban)

A genetikus algoritmus egy úgynevezett fitnesz érték segítségével jellemzi a különböző kapcsolati paraméterekkel generált talajmodelleket. Minél nagyobb ez az érték, annál kisebb az eltérés a 23. ábrán is látható mért és szimulált trajektóriák között. A fitnesz érték meghatározásához azonban nem elegendő csak a görbék közötti távolságot figyelembe venni, hanem a szerszámra ható átlagos talajellenállási erővel is számolni kell.

Az automatikus kalibrációhoz a PyGAD (Python Genetic Algorithm) könyvtár függvényeit alkalmaztuk [15]. Némi tapasztalás után a következő paraméterekkel állítottuk be az algoritmust:

```
ga_instance = pygad.GA(num_generations=5,
        sol_per_pop=20,
        num_parents_mating=7,
        mutation_num_genes=2,
        mutation_percent_genes=0.01,
        num_genes=2,
        fitness_func=fitness_func ,
        gene_type=float ,
```

```
gene_space = [{'low': 5, 'high': 30},
{'low': 0.01, 'high': 0.5}])
```



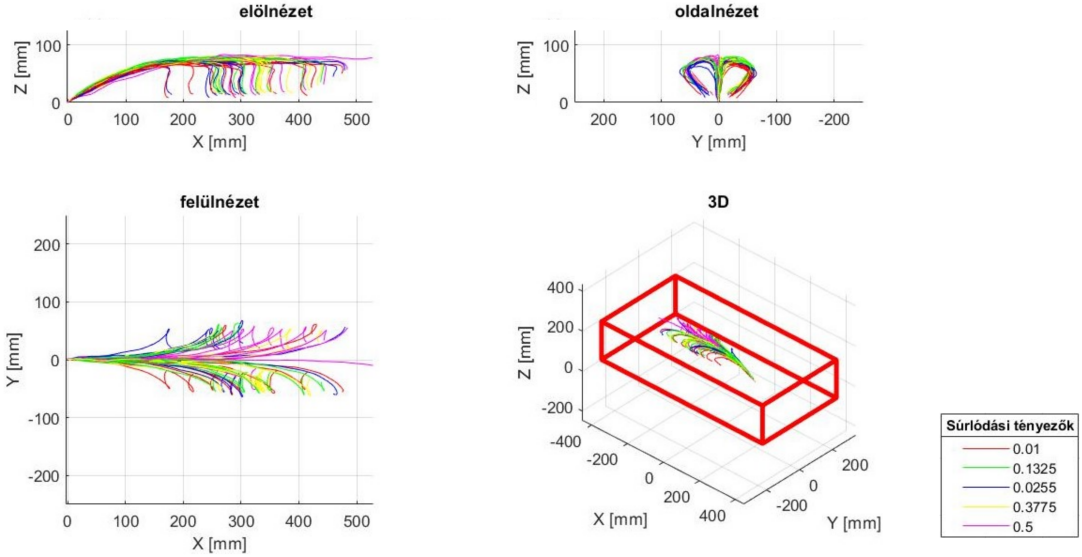
24. ábra. A genetikus algoritmussal történő talajmodell kalibráció DEM-ben.

7. Eredmények és azok elemzése

7.1. Paraméterérzékenység-vizsgálatok eredményei

Ezen fejezetben bemutatjuk a szimulációk paraméterérzékenység-vizsgálatának eredményeit. Azaz, hogy a talaj és egyszerű szerszám kölcsönhatása során miként változik a nyomkövető által bejárt pálya, ha a modellezett talajt különböző kapcsolati paraméterekkel állítjuk be. A paraméterérzékenységi vizsgálatok eredményei alátámasztják, hogy azonos peremfeltételekkel futtatott szimulációk különböző eredményeket adnak a nyomkövető elmozdulás tekintetében, így később érdemes lehet valószínűségi modellt felállítani a nyomjelző pályájának modellezéséhez.

Vizsgálataink rámutatnak arra, hogy a súrlódási tényezőnek, az időlépésnek és a kiegyensúlyozatlansági erőhányadosnak a vizsgált tartományon belül elhanyagolható hatása van a nyomkövető mozgására. Ellenben a elemek közötti súrlódási szög és a kohéziós tényező állításának látványos hatása van a nyomkövető pályájára.

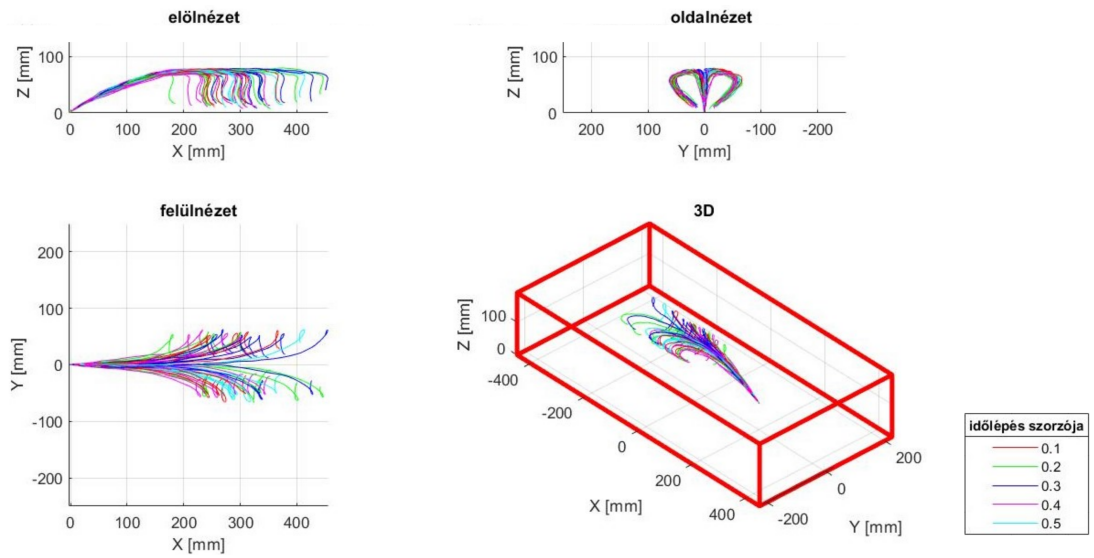


25. ábra. A súrlódási tényező hatása a nyomkövető mozgására.

A 25. ábrát és a 8. táblázatot megfigyelve azt a következtetést vontuk le, hogy a súrlódási tényezők állítása nem befolyásolja szignifikánsan a vizsgált paramétertartományban a nyomkövető szimuláció közben bejárt pályáit. Továbbá nem találtunk méréseink alapján jellemző tendenciát a súrlódási paraméterek és a nyomkövető pályája között.

8. táblázat. A súrlódási tényező hatása a nyomkövető mozgására.

Elemek közötti súrlódási tényező	α [°]	β [°]	γ [°]	d [mm]	X_{max} [mm]	Y_{max} [mm]	Z_{max} [mm]
0.01 [-]	2.58	25.20±2.02	5.41	323±196	305±138	56±8	69±6
0.1325 [-]	1.82	27.21±3.00	3.49	328±120	286±88	58±6	76±6
0.0255 [-]	2.68	24.96±2.68	5.73	312±190	324±96	58±12	71±8
0.3775 [-]	1.47	25.25±3.62	3.08	351±114	264±86	54±6	77±6
0.5 [-]	1.25	24.58±4.82	2.79	389±162	269±74	50±28	78±6

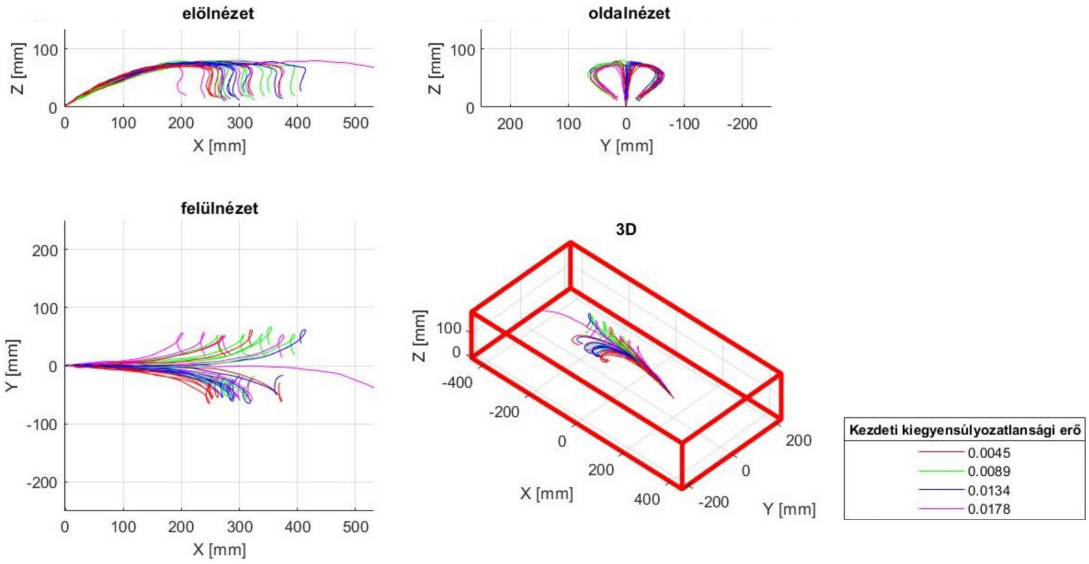


26. ábra. Az időlépés hatása a nyomkövető mozgására.

A 26. ábrát és a 9. táblázatot megfigyelve azt a következtetést vontuk le, hogy az időlépés a vizsgált tartományban nincs nagy befolyással a nyomkövető szimuláció közben bejárt pályáira.

9. táblázat. Az időlépés hatása a nyomkövető mozgására.

Időlépés szorzó	α [°]	β [°]	γ [°]	d [mm]	X_{max} [mm]	Y_{max} [mm]	Z_{max} [mm]
0.5 [1]	1.92	24.11±2.60	4.22	293±78	312±76	57±8	75±6
0.4 [1]	2.63	24.42±1.64	5.70	307±160	307±134	57±10	74±6
0.3 [1]	1.53	25.68±1.44	3.16	352±118	269±74	56±10	76±4
0.2 [1]	3.15	25.11±4.26	6.86	280±92	325±94	54±8	74±6
0.1 [1]	1.70	25.85±2.08	3.58	325±100	282±90	58±10	76±4

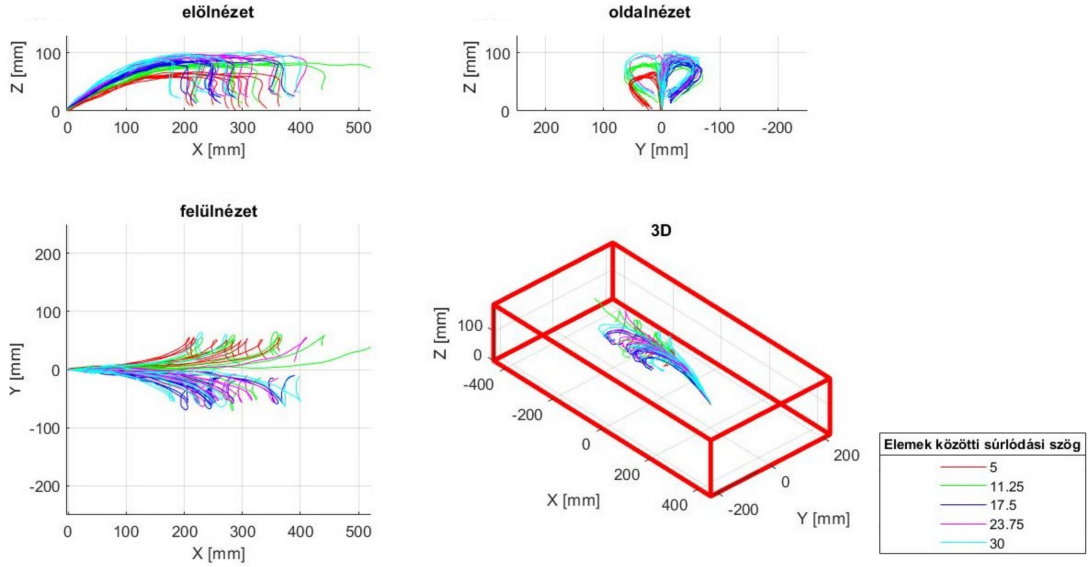


27. ábra. A kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányados hatása a nyomkövető mozgására.

A 27. ábra szemlélteti, hogy a nyomkövető pályáira nagyon kis befolyással bír a kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányados. Az adatok szórásában (10. táblázat) azonban észrevehető, hogy jellemzően kisebb szórása van a nyomkövető teljes elmozdulásnak (d), ha kisebb kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányadost állítunk be. Azonban a kisebb kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányados beállítása nagy mértékben megnöveli a szimulációs időt.

10. táblázat. A kezdeti kiegyensúlyozatlansági erőhányados hatása a nyomkövető mozgására.

Kezdeti kiegyensúlyozatlansági erő	α [°]	β [°]	γ [°]	d [mm]	X_{max} [mm]	Y_{max} [mm]	Z_{max} [mm]
0.0045[-]	2.95	26.29±4.22	5.92	290±88	402±0	58±10	74±6
0.0089[-]	1.97	24.03±1.92	4.44	331±86	402±0	56±10	76±6
0.0134[-]	1.70	25.85±2.08	3.58	325±100	404±10	58±10	76±4
0.0178[-]	1.99	24.67±1.96	4.19	329±216	421±98	54±16	75±6

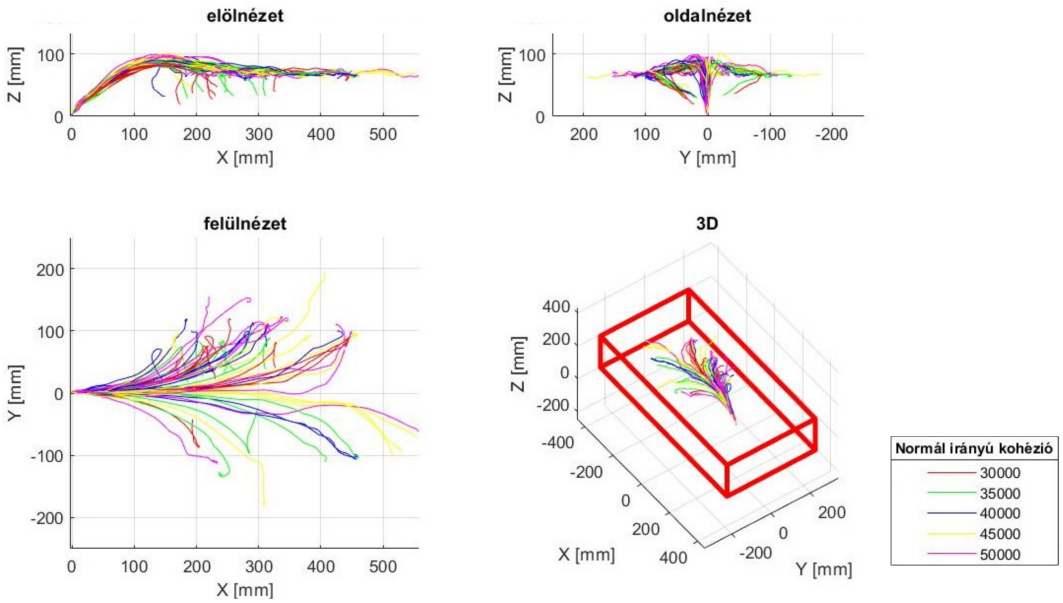


28. ábra. Az elemek közötti súrlódási szög hatása a nyomkövető mozgására.

A 28. ábra mutatja, hogyan alakultak a nyomkövető pályái az elemek közti súrlódási szög változtatása mellett. Figyelemre méltó, hogy minél nagyobb értéket állítunk be ezen paraméternek, annál nagyobb lesz a β szög. Ez leolvasható a 11. táblázatból is. Hasonlóan a mérőegység elért legmagasabb Z koordinátája is növekszik a paraméter növelésével.

11. táblázat. Az elemek közötti súrlódási szög hatása a nyomkövető mozgására.

Elemek közötti súrlódási szög	α [°]	β [°]	γ [°]	d [mm]	X_{max} [mm]	Y_{max} [mm]	Z_{max} [mm]
5 [°]	3.09	24.36±3.54	6.98	280±108	324±106	53±4	63±8
11.25 [°]	1.85	27.33±4.52	3.57	338±188	298±102	57±16	80±6
17.5 [°]	3.80	30.28±2.40	6.45	278±114	327±116	60±10	85±8
23.75 [°]	2.12	32.35±3.66	3.43	295±106	309±108	57±6	94±4
30 [°]	3.57	35.50±4.42	5.06	276±142	329±144	59±10	95±10

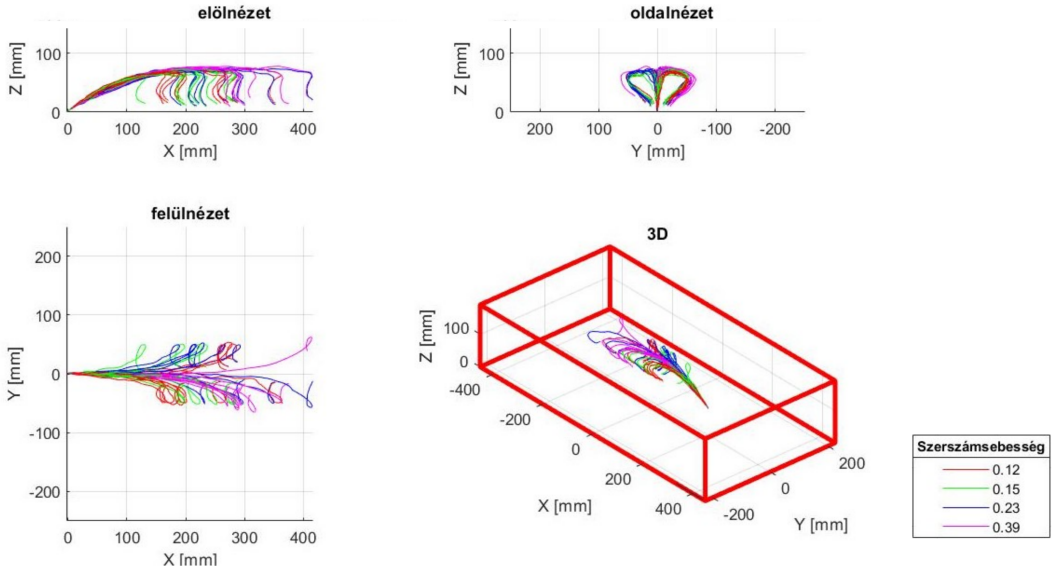


29. ábra. A kohéziós tényező hatása a nyomkövető mozgására.

A kohézió növelésével a β szög (12. táblázat) kis mértékű növekedést mutat. A 29. ábrán látható, hogyan alakultak a nyomkövető pályái a kohézió változtatása mellett. Megfigyelhető, hogy ha a kohézió nő a halmazban a nyomkövető az X tengely mentén messzebbre jut, és egyre kisebb eséllyel esik vissza a nyomkövető a szerszám mögött hagyott árokba. Látszik is a 29. ábrán, hogy nem csökken a nyomkövető Z koordinátája nagy mértékben a szimuláció során. Nagyobb kohézió nagyobb elmozdulásokat eredményez, és az elmozdulások szórása jelentősen megnő olyan esetekhez képest, amikor nincs a halmazban kohézió.

12. táblázat. A kohéziós tényező hatása a nyomkövető mozgására.

Kohézió	α [°]	β [°]	γ [°]	d [mm]	X_{max} [mm]	Y_{max} [mm]	Z_{max} [mm]
30000 [MPa]	4.41	40.39±5.02	5.12	308±218	329±142	86±30	85±4
35000 [MPa]	4.06	42.12±6.76	4.63	305±178	322±124	97±36	87±4
40000 [MPa]	4.83	43.25±4.18	5.21	325±218	324±150	102±26	89±6
45000 [MPa]	2.29	44.57±2.46	2.31	435±218	289±126	114±82	91±10
50000 [MPa]	4.47	44.32±4.00	4.65	374±186	299±106	116±52	93±10



30. ábra. A szerszámsebesség hatása a nyomkövető mozgására.

A szerszámsebességet ha növeljük a 0.12-es szerszámsebesség kivételével az α, β, γ szögek csökkenő tendenciát mutatnak (13. táblázat). A 30. ábrán látható, hogyan alakultak a nyomkövető pályái a szerszámsebesség változtatása mellett. Megfigyelhető, hogy ha a szerszámsebesség nő a halmazban a nyomkövető elmozdulásai egyre nagyobbak és az egyes tengelyeken elért maximum értékek is.

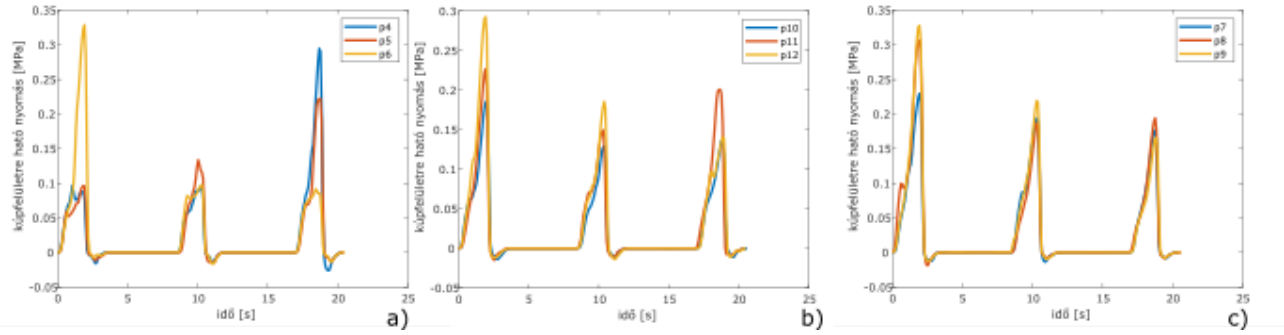
13. táblázat. A szerszámsebesség hatása a nyomkövető mozgására.

Szerszámsebesség	α [°]	β [°]	γ [°]	d [mm]	X_{max} [mm]	Y_{max} [mm]	Z_{max} [mm]
0.12 $[m\,s^{-1}]$	2.25	26.95±3.26	4.30	236±128	362±126	51±4	70±6
0.15 $[m\,s^{-1}]$	2.90	27.60±2.18	5.56	225±92	378±94	50±2	69±8
0.23 $[m\,s^{-1}]$	2.10	26.24±3.82	4.29	274±140	332±126	51±4	72±4
0.39 $[m\,s^{-1}]$	1.70	25.85±2.08	3.58	325±100	282±90	58±10	76±4

7.2. A fizikai mérések eredményei

7.2.1. A penetrációs mérések eredményei

A penetrációs kísérletek eredményeit mutatja be a 31. ábra. Az eredmények a következőképpen értelmezendők. Három mérési sorozatot mutatunk be az alkalmazott mérőkúpok mérete szerint csoportosítva a méréseket. Az idő függvényében jelenítettük meg a diagramokon a mért erő alapján számolt talajra ható nyomás értékét. Egy diagramon belül mérésenként három "tüskét" láthatunk. Ennek oka, hogy egy mérésen belül három különböző pontban mértük a talaj ellenállását. Ugyanazon mérést pedig három alkalommal ismételtünk meg. Jellemzően egy "tüske" növekvő szakaszához tartozik a szerszám talajba történő függőleges behatolása, csökkenő szakaszához pedig a szerszám kiemelése.



31. ábra. A penetrációs mérések eredményei: a) 2 cm^2-es , b) 3.33 cm^2-es , c) 4 cm^2-es mérőkúp esetén.

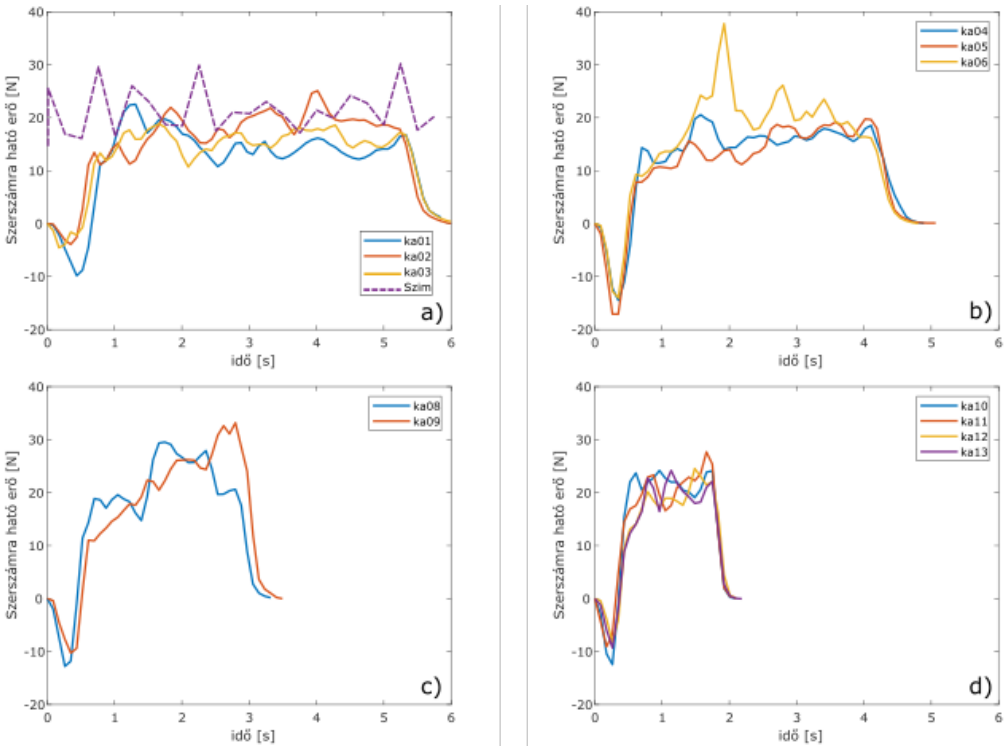
Megfigyelhető a 14. táblázatban is, hogy a legkisebb mérőkúp esetében többnyire kisebb penetrációs ellenállásokat mértünk. (Az átlagos kúpfelületre ható maximális nyomás átlagértéke mellett feltüntettük az adatok egyszeres szórását.) A nagyobb mérőkúpok esetében viszont függetlenebbnek tűnik az alkalmazott kúpmérettől a penetrációs ellenállások értékei, és azok szórása kisebb. Az 2 cm^2-es kúpméretnél a kilenc mérésből három kiugró értéket kaptunk, és ugyan ez a megállapítás igaz a többi kúppal mért mérésekre is. Több esetben kiugró erőértékeknél azt a feljegyzést tettük a mérés során, hogy egy nagyobb rögbe ütközött fel a mérőkúp, melyet azt követően maga előtt tolt a szerszám annak kiemeléséig. Ezen mérésünk egyik célja volt, hogy megvizsgáljuk, vissza tudjuk-e állítani a talajt közel azonos állapotba két mérés között. Levonhatjuk azt a következtetést a diagramok alapján, hogy a talajt többnyire sikerült a mérések után azonos állapotba hozni.

14. táblázat. A penetrációs ellenállásmérés eredményei.

Mérőkúp mérete [cm^2]	Átlagos kúpfelületre ható maximális nyomás [MPa]
4	0.183±0.053
3,33	0.121±0.058
2	0.161±0.096

7.2.2. A kapcsolt mérések erdményei - húzott szerszám, és a talaj mozgása

A kapcsolt mérés során a vízszintesen a talajban húzott szerszámra ható erőt mértük az idő függvényében, valamint a talajba, a szerszám elé ásott aktív nyomjelző pályájáról gyűjtöttünk adatot az adatgyűjtő segítségével.



32. ábra. A húzott szerszámra ható erő: a) 0.12 $m\,s^{-1}$-os sebesség esetén, b) 0.15 $m\,s^{-1}$-os sebesség esetén, c) 0.23 $m\,s^{-1}$-os sebesség esetén, d) 0.39 $m\,s^{-1}$-os sebesség esetén.

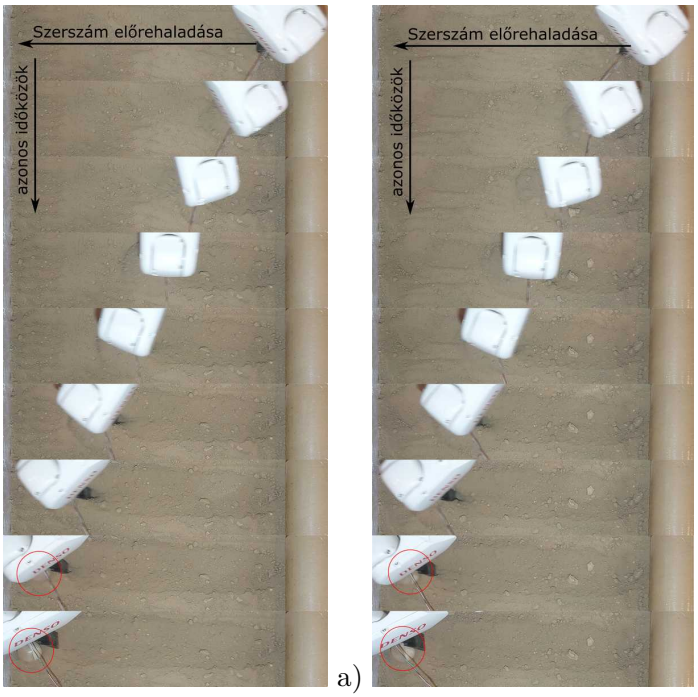
Az 32. ábrát tekintve, összesen négy mérési sorozatot láthatunk négy különböző szerszámsebességgel. Az eredményeket a 15. táblázatban is összefoglaltuk. Megfigyelhető a mérések kezdetén a diagramokban az erőértékeket tekintve egy negatív kezdeti szakasz. Ezen a szakaszon tolta bele a robot a talajba a szerszámot. Az átlagolt értékek számításánál a 15. táblázatban csak az állandósult erőértékeket vettük figyelembe. Érdekes, hogy a sebesség növelésével a 32. árba b) és c) diagramját összehasonlítva kis mértékű szerszámra ható erőnövekedés tapasztalható. Tovább növelve a sebességet azonban kis mértékű erőcsökkenésre lehetünk figyelmesek (32. árba c) és d)). Valamint megfigyelhető különösen a 32. árba b), c) és d) esetében, hogy a szerszám előrehaladtával a rá ható erő növekedett. Valószínűleg a rövid mérési szakaszon (600 mm) nem állandósult a szerszám által maga előtt tolt talajmennyiség.

15. táblázat. A vízszintes talajellenállás-mérés eredményei.

Mérési sebesség [$m\,s^{-1}$]	Szerszámra ható átlagos erő és kétszeres szórásadatok [N]
0.12	16.35±5.92
0.15	17.19±8.68
0.23	22.04±11.36
0.39	20.38±6.22

A mérések során megfigyeléseink szerint a nyomjelző ütközött a szerszámmal, miközben a szerszám a talaj felszínére tolta azt. A robottal húzott szerszám pillanatképeit ábrázolja a 33. ábra.

Több esetben a szenzor a szerszámot megkerülve a maga mögött hagyott vályúba visszaesett. Ez azonban nem látszik az erőadatokat tekintve.



33. ábra. A húzott szerszám közben készült felvételek. a) és b) egy-egy külön mérést ábrázol. Mind a két bemutatott esetben a nyomkövető a felszínre bukott.

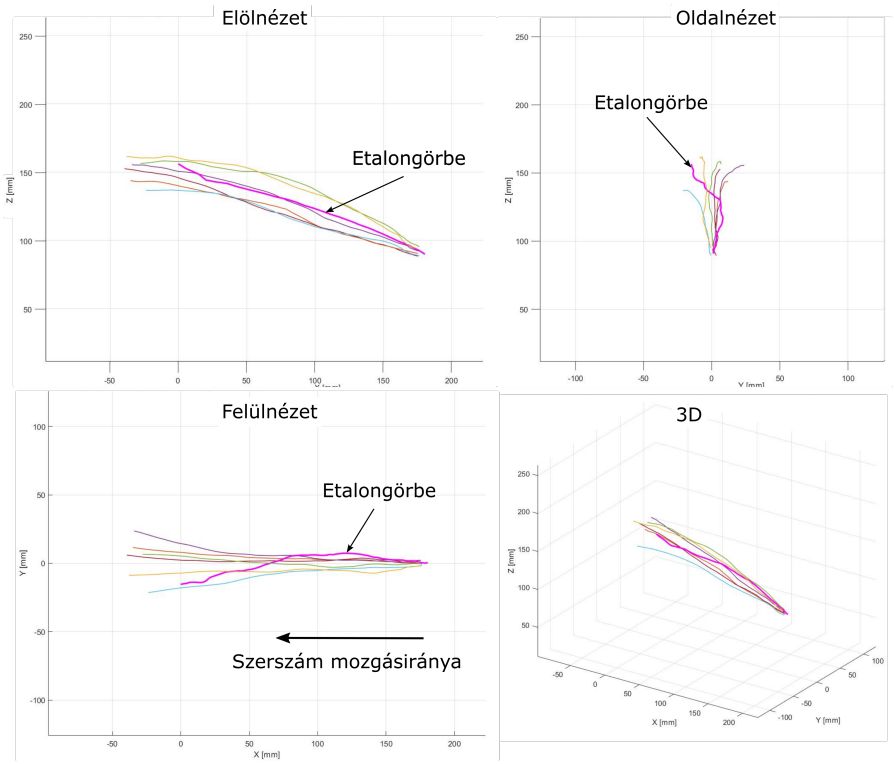
7.3. A genetikus algoritmussal történt talajkalibráció eredménye

A genetikus algoritmussal történő kalibráció során a 34. ábrán mutatott görbéket szimuláltuk. Azokat jelenítettük meg a generált görbeseregből, melyek az etalongörbét megközelítették, és a szimuláció során a 0.39 $m\,s^{-1}$-mal mozgatott szerszámra ható átlagos erő 25%-os relatív hibasávon belül megközelítette a 21.955 N-os célt. A szimulációkhoz tartozó generált kapcsolati paramétereket, és a szimuláció során meghatározott jóságot jellemző adatokat a 16. táblázatban tüntettük fel. Az eredmények alapján következtetésként levonható, hogy több megfelelő megoldás is létezik. Az elemek közötti súrlódási szög paraméterei kisebb szórást mutatnak.

16. táblázat. A genetikus algoritmussal méréseinknek megfelelően beállított talajok kalibrált változó paraméterei.

Szimuláció ID	súrlódási tényezők [-]	súrlódási szög [°]	átlagos szerszámra ható erő [N]	erő relatív hibája [-]	görbék közti átlagos távolság
40	0.05	12.77	20.60	0.06	18.98
45	0.23	13.03	28.84	0.31	14.39
47	0.06	11.39	19.90	0.09	19.23
59	0.42	8.27	18.22	0.17	14.91
63	0.03	27.63	24.76	0.13	18.96
91	0.38	11.61	27.22	0.24	12.06

Később érdemes lenne vizsgálni az így kapott paraméterekkel több szimulációt futtatva, hogyan alakulnak a 22. ábrán definiált görbejellemzők átlag és szórásértékei.



34. ábra. Az etalongörbe és a kalibráció során kapott görbék.

8. Összefoglalás

A kutatásaink során számos feladatot végeztünk el céljaink eléréséhez. Áttekintettük a szakirodalmat talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatok tekintetében, kerestünk más szakterületeken alkalmazott MARG szenzorral történő nyomkövetésre példákat. Utánajártunk, miként lehet DEM szimulációkban a szemcsés anyag kalibrálását automatizálni. Laboratóriumi környezetet alakítottunk ki talaj-szerszám kölcsönhatások vizsgálatához. Ehhez kétféle, robotra szerelhető erőmérő cellával szerelt szerszámot terveztünk. Továbbá megterveztünk egy, a talaj mozgásának jellemzésére alkalmas nyomkövető eszközt. A robotra szerelhető mérőeszközöket kalibráltuk, a nyomkövető mérőrendszer mesterséges intelligencia modelljeit pedig betanítottuk mérések során vett mért, illetve generált várt adatokkal, hogy azok képesek legyenek az adatgyűjtő egység által bejárt pálya becslésére. Az említett tanításhoz terveztünk egy mechanizmust, amely segítségével tanítóadatokat gyűjtöttünk, a mechanizmus működését Matlab szoftverrel modelleztük és szimuláltuk. Az elmozdulásbecslő rendszer teljesítményét azonos módon vett adatokkal vizsgáltuk. A kialakított laboratóriumi környezetben kétfajta talajellenállási és talajmozgási mérést végeztünk. A talaj-szerszám kölcsönhatást vizsgáltuk DEM-ben is. Paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztünk arra, hogy miként befolyásolják a beállított szimulációs és kapcsolati paraméterek a talajmodellbe helyezett nyomkövetett elem pályáját. Ezt követően genetikus algoritmust alkalmazva mért gyorsulásadataink alapján becsült pályához és mért talajellenálláshoz közelítve kalibráltunk talajmodellt, mely egyszerre mindkét makromechanikai jellemzőt igyekszik ismert pontossággal modellezni.

9. Konklúzió

A kutatásunkban a talaj és a szerszám egymásra hatását vizsgáltuk laborkörülmények között, amelynek a diszkrételemes modelljét is létrehoztuk. Kutatásainknak újdonsága a talaj belső mozgásainak jellemzése, illetve diszkrét elemes modellezése. Fizikai mérések esetén az adatgyűjtő egység által bejárt pályák becsléséhez sikeresen alkalmaztunk mesterséges intelligenciát. Genetikus algoritmust alkalmazásával jó közelítéssel kalibráltunk diszkrét elemes talajmodellt. A kalibrációnál szem előtt tartottuk a talaj kvantitatív és kvalitatív jellemzőit.

Kutatásaink során a következő eredményeket és következtetéseket fogalmaztuk meg:

- A talaj-szerszám kölcsönhatás közben a talajmozgás és a szerszámra ható talajellenállás vizsgálatához laborkörnyezetet létrehoztuk, mérőeszközöket megterveztük és kalibráltuk.
- A saját laborkörnyezetben talaj-szerszám kölcsönhatás közben a szerszámra ható talajellenállást és a kölcsönhatást jellemző talajmozgást együttesen mértük.
- A genetikus algoritmus alkalmas DEM talajmodellek kalibrálására talaj-szerszám kölcsönhatás közben.
- Mesterséges intelligencia tanításához épített mechanizmussal bemenő adatokat gyűjtöttünk, illetve várt adatokat generáltunk Matlab programmal.
- Különböző bemeneti adatokból dolgozó mesterséges intelligencia modellek teljesítményét értékeltük a szakirodalomban fellelhető korábbi kutatások tükrében.
- DEM modellezés során a talaj mozgását jellemző nyomkövetett elem pályái azonos peremfeltételek esetén nem voltak azonosak, csak jellegre voltak hasonlóak. Azonban a szerszám mozgására merőleges vetületben jellemző pályák rajzolódtak ki a különböző paraméterek esetén.
- Adott mikromechanikai paraméterbeállítások mellett a szemcsék közötti súrlódási szög 5°-30°-ra történő növelésével a nyomkövetett elem kezdeti elmozdulásának szöge is 24.36°-ról 35.50°-ra nőtt.
- Adott mikromechanikai paraméterbeállításokkal a szerszámsebesség 0.15-0.39 $m\,s^{-1}$-ra történő növelésével a nyomkövetett elem elmozdulása 225 mm-ről 325 mm-re nőtt.
- DEM modellek paraméterérzékenységi vizsgálatai alapján kimondható, hogy a kohézió van legnagyobb hatással a nyomkövető talajban történő elmozdulásaira.
- Genetikus algoritmussal történő DEM kalibráció során azonos célértékek eléréséhez különböző kapcsolati paraméterkombinációkat kapunk, melyek megfelelően modellezik a talajt.

Azonban meg kell jegyezni, hogy mesterséges intelligenciával történő pontosabb pályabecslésekhez további tanítóadatok gyűjtése szükséges.

10. Kitekintés

A jövőben is foglalkozni szeretnénk jelen kutatással. Célunk, hogy eredményeink és a kidolgozott módszereink tökéletesítésével a szerszám- és műveléstervezési gyakorlatban alkalmazható módszert adjunk a tervezők kezébe. Ehhez feladatok sora áll még előttünk melyek közül a legfontosabbakat összegyűjtöttük:

- A paraméterérzékenységi vizsgálatokat szélesebb beállításstartományban el szeretnénk végezni.
- Érdemes lenne bővíteni a szimulációt penetrációs vizsgálatokkal. Így a genetikus algoritmus olyan talajmodellt készítene, melynek a penetrációs ellenállása is közel esne a mért értékekhez.
- A DEM szimulációban érdemes lenne a jövőben a jelen nyomkövető egység STL modelljével a méréseket végezni. Így jobban modellezhetnénk a valóságot. Továbbá vizsgálni kellene a talaj és a nyomkövető egység közötti súrlódási viszonyokat, hogy később az modellezhető legyen.
- A nyomkövető szenzorral további tanítóadatokat kell gyűjteni, melyek jobban hasonlítanak a talajban történő nyomkövető elmozdulásához.
- A fizikai nyomkövető egység fejlesztése hosszabb távon szükséges. Fontos lenne, hogy annak mérete csökkentve legyen, hogy a súlypontja középre essen, valamint a sűrűsége megegyezzen a talaj sűrűségével. Valamint fontos lenne annak dinamikai kiegyensúlyozása is.
- Az algoritmikus talajkalibráció optimalizálásával jelentős mennyiségű idő takarítható meg, így a jövőben foglalkozni kell ilyen irányú vizsgálatokkal.
- Ahhoz, hogy a talajművelő szerszám- és műveléstervezésben a DEM egyszerűbben és megbízható eredmények mellett alkalmazható legyen különböző talajok több különböző nedvességtartalom melletti vizsgálatára van szükség talaj-szerszám kölcsönhatás közben. Ezen vizsgálatok alapján lenne lehetőség DEM talajadatbázis felállítására.

11. Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretnénk köszönetünket kifejezni mindazoknak, akik hozzájárultak munkánk sikeres megvalósításához: A BME Gép- és Terméktervezés Tanszékről köszönjük konzulensünknek, Dr. Tamás Kornél Tanár úrnak, és Hudoba Zoltán Tanár úrnak, hogy inspiráltak és segítettek munkánk gépészeti és modellezési vonatkozásaiban. Köszönjük Kovács Lászlónak szakmai segítségét, továbbá hogy rendelkezésünkre bocsájtotta a kutatásaink és méréseink elvégzéséhez a BME Ipar 4.0 Technológiai központot. Köszönjük Grad-Gyenge Lászlónak szakmai segítségét a mesterséges intelligencia alkalmazásaiban. Köszönjük Dr. Charaf Hassan Dékán úrnak. Köszönjük Tenkely Leventének, hogy segítségünkre volt a genetikus algoritmus alkalmazásának és lehetőségeinek feltárásában. Köszönjük Orosz Ákosnak a mindenkori pozitív-kritikus hozzáállását, és szakmai segítségnyújtását kutatásainkhoz. Köszönjük Szabó Taddeusnak, hogy segítségünkre volt a genetikus algoritmus implementálásában. Köszönjük Szász Tamásnak és Bogár Bálintnak hogy szakmai segítséget nyújtottak robotos méréseink során közreműködésükkel. Köszönjük Kopasz István úrnak az eszközök összeállításához biztosított műhelyhasználati engedélyt, és az ott nyújtott szakmai segítséget. Köszönjük Pálinkás Bálintnak a BME Mérnökgeológia és Geotechnika Tanszék technikusának a segítséget. Köszönjük Nagy Ákos és Németh Vilmos segítségét, hogy rendelkezésünkre bocsájtották a BME 5G laboratórium eszközit méréseinkhez.

A kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-21-2-II-BME-240 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

A kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

Innovációs és Technológiai Minisztérium

Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal

Új Nemzeti Kiválóság Program

Hivatkozások

[1] Ehad Akeila, Zoran Salcic, and Akshya Swain. Smart pebble for monitoring riverbed sediment transport. *IEEE Sensors Journal*, 10(11):1705–1717, 2010.

[2] Khaldoon Al-Obaidi and Manousos Valyrakis. A sensory instrumented particle for environmental monitoring applications: Development and calibration. *IEEE Sensors Journal*, 21(8):10153–10166, 2021.

[3] Zaid Alhusban and Manousos Valyrakis. Assessing sediment transport dynamics from energy perspective by using the instrumented particle. *International Journal of Sediment Research*, 37(6):833–846, 2022.

[4] A Anandarajah and M Yao. Three-dimensional discrete element method of analysis of clays. In *Discrete Element Methods: Numerical Modeling of Discontinua*, pages 237–241. 2002.

[5] K Bagi. A diszkrét elemek módszere. *BME Department of Structural Mechanics, Budapest*, pages 5–12, 2007.

[6] K Becker, O Gronz, S Wirtz, Manuel Seeger, C Brings, T Iserloh, MC Casper, and Johannes B Ries. Characterization of complex pebble movement patterns in channel flow–a laboratory study. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(1):63–85, 2015.

[7] Andrin Caviezel, Sophia E Demmel, Adrian Ringenbach, Yves Bühler, Guang Lu, Marc Christen, Claire E Dinneen, Lucie A Eberhard, Daniel von Rickenbach, and Perry Bartelt. Reconstruction of four-dimensional rockfall trajectories using remote sensing and rock-based accelerometers and gyroscopes. *Earth Surface Dynamics*, 7(1):199–210, 2019.

[8] Andrin Caviezel, Sophia E Demmel, Adrian Ringenbach, Bühler Yves, Guang Lu, Marc Christen, Claire E Dinneen, Lucie A Eberhard, Daniel von Rickenbach, and Perry Bartelt. Epic imagery for four-dimensional trajectory reconstruction of real-scale rockfall experiments. In *Geophysical Research Abstracts*, volume 21, 2019.

[9] Andrin Caviezel and Werner Gerber. Brief communication: Measuring rock decelerations and rotation changes during short-duration ground impacts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(11):3145–3151, 2018.

[10] Andrin Caviezel, Michael Schaffner, Lukas Cavigelli, Pascal Niklaus, Yves Bühler, Perry Bartelt, Michele Magno, and Luca Benini. Design and evaluation of a low-power sensor device for induced rockfall experiments. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(4):767–779, 2017.

[11] Huy Q Do, Alejandro M Aragón, and Dingena L Schott. A calibration framework for discrete element model parameters using genetic algorithms. *Advanced Powder Technology*, 29(6):1393–1403, 2018.

[12] J. B. Dost, O. Gronz, M. C. Casper, and A. Krein. The potential of smartstone probes in landslide experiments: how to read motion data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(12):3501–3519, 2020.

[13] Huu Toan Duong and Young Soo Suh. A human gait tracking system using dual foot-mounted imu and multiple 2d lidars. *Sensors*, 22(17), 2022.

[14] 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.

[15] Ahmed Fawzy Gad. Pygad: An intuitive genetic algorithm python library, 2021.

[16] Oliver Gronz, Priska H Hiller, Stefan Wirtz, Kerstin Becker, Thomas Iserloh, Manuel Seeger, Christine Brings, Jochen Aberle, Markus C Casper, and Johannes B Ries. Smartstones: A small 9-axis sensor implanted in stones to track their movements. *Catena*, 142:245–251, 2016.

[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] Dániel Horváth, Tibor Poós, and Kornél Tamás. Modeling the movement of hulled millet in agitated drum dryer with discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162:254–268, 2019.

[19] Donald R Jones and Joaquim RRA Martins. The direct algorithm: 25 years later. *Journal of Global Optimization*, 79(3):521–566, 2021.

[20] Andre Katterfeld, Corne Coetzee, Timothy Donohue, Australia Johannes Fottner, Andrew Grima, Alvaro Ramirez Gomez, Dusan Ilic, Rimantas Kačianauskas, Jan Necas, TU Ostrava, et al. Calibration of dem parameters for cohesionless bulk materials under rapid flow conditions and low consolidation, 2019.

[21] A Lavrinec, O Orozovic, K Williams, MG Jones, G Klinzing, W Clark, and Z Wang. Observations of dense phase pneumatic conveying using an inertial measurement unit. *Powder Technology*, 343:436–444, 2019.

[22] J Liu, Y Chen, DA Lobb, and RL Kushwaha. Soil-straw-tillage tool interaction: Field and soil bin study. *Canadian Biosystems Engineering*, 49:2, 2007.

[23] MultiMedia LLC. Talajművelés, 1999.

[24] Sebastian O. H. Madgwick, Andrew J. L. Harrison, and Ravi Vaidyanathan. Estimation of imu and marg orientation using a gradient descent algorithm. pages 1–7, 2011.

[25] Sebastian O. H. Madgwick, Andrew J. L. Harrison, and Ravi Vaidyanathan. Estimation of imu and marg orientation using a gradient descent algorithm. In *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, pages 1–7, 2011.

[26] Georgios Maniatis, Trevor Hoey, Rebecca Hodge, Dieter Rickenmann, and Alexandre Badoux. Inertial drag and lift forces for coarse grains on rough alluvial beds measured using in-grain accelerometers. *Earth Surface Dynamics*, 8(4):1067–1099, 2020.

[27] Georgios Maniatis, Trevor Hoey, and Joseph Sventek. A new method for rapid prototyping of purpose-specific sensor enclosures: Example application and implications for data coherence. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2(4):761–779, 2013.

[28] Georgios Maniatis, Trevor B Hoey, Marwan A Hassan, Joseph Sventek, Rebecca Hodge, Tim Drysdale, and Manousos Valyrakis. Calculating the explicit probability of entrainment based on inertial acceleration measurements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 143(4):04016097, 2017.

[29] J Massah, H Etezadi, B Azadegan, and SR Hassan-Beygi. Modelling of soil displacement resulting from sweep during tillage operation using image processing. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(2):415–424, 2020.

[30] Viktor Milkevych, Lars J Munkholm, Ying Chen, and Tavs Nyord. Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method. *Soil and Tillage Research*, 183:60–71, 2018.

[31] JA Montgomery, DK McCool, AJ Busacca, and BE Frazier. Quantifying tillage translocation and deposition rates due to moldboard plowing in the palouse region of the pacific northwest, usa. *Soil and tillage Research*, 51(3-4):175–187, 1999.

[32] Balázs Nagy. Marg sensor based position estimation for periodic movements. *Recent Innovations in Mechatronics*, 7(1.), May 2021.

[33] Ákos Orosz, Vasileios Angelidakis, and Katalin Bagi. Surface orientation tensor to predict preferred contact orientation and characterise the form of individual particles. *Powder Technology*, 394:312–325, 2021.

[34] Kealie LG Pretzlav, Joel PL Johnson, and D Nathan Bradley. Smartrock transport in a mountain stream: bedload hysteresis and changing thresholds of motion. *Water Resources Research*, 56(11):e2020WR028150, 2020.

[35] Shafiqur Rahman, Ying Chen, and David Lobb. Soil movement resulting from sweep type liquid manure injection tools. *Biosystems Engineering*, 91(3):379–392, 2005.

[36] Mohammad A Sadek and Ying Chen. Feasibility of using pfc3d to simulate soil flow resulting from a simple soil-engaging tool. *Transactions of the ASABE*, 58(4):987–996, 2015.

[37] Mohammad A Sadek, Mehari Tekeste, and Mojtaba Naderi. Calibration of soil compaction behavior using discrete element method (dem). In *2017 ASABE Annual International Meeting*, page 1. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017.

[38] Ferenc Safranyik, István Keppler, and Adrienn Bablena. Dem calibration: a complex optimization problem. In *2017 international conference on control, artificial intelligence, robotics & optimization (ICCAIRO)*, pages 198–201. IEEE, 2017.

[39] K Sharifat and RL Kushwaha. Soil translocation by two tillage tools. *Canadian Agricultural Engineering*, 39(2):77–84, 1997.

[40] Aliakbar Solhjou, John M Fielke, and Jacky MA Desbiolles. Soil translocation by narrow openers with various rake angles. *Biosystems engineering*, 112(1):65–73, 2012.

[41] A Soriano, E Zeiger, E Servy, and A Suero. The effect of cultivation on the vertical distribution of seeds in the soil. *Journal of Applied Ecology*, pages 253–257, 1968.

[42] Kurt Spokas, Frank Forcella, David Archer, and Donald Reicosky. Seedchaser: vertical soil tillage distribution model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 57(1):62–73, 2007.

[43] Gabriel Spreitzer, Joseph Gibson, Max Tang, Jon Tunnicliffe, and Heide Friedrich. Smartwood: Laboratory experiments for assessing the effectiveness of smart sensors for monitoring large wood movement behaviour. *Catena*, 182:104145, 2019.

[44] Péter Szendrő and János Bánházi. *Mezőgazdasági gépszerkezettan*. Szaktudás Kiadó Ház, 2003.

[45] Kornel Tamas. The role of bond and damping in the discrete element model of soil-sweep interaction. *Biosystems engineering*, 169:57–70, 2018.

[46] 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.

[47] Mustafa Ucgul and Chris Saunders. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*, 190:58–70, 2020.

[48] Mustafa Ucgul, Chris Saunders, and John M Fielke. Comparison of the discrete element and finite element methods to model the interaction of soil and tool cutting edge. *Biosystems Engineering*, 169:199–208, 2018.

[49] Zhiwei Zeng, Xu Ma, Ying Chen, and Long Qi. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (dem). *Soil and Tillage Research*, 197:104505, 2020.

[50] Liubava Znova, Bo Melander, Aleksander Lisowski, Jacek Klonowski, Jaroslaw Chlebowski, Gareth TC Edwards, Søren Kirkegaard Nielsen, and Ole Green. A new hoe share design for weed control: measurements of soil movement and draught forces during operation. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 68(2):139–148, 2018.