



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék

IMU alapú elmozdulásmérő eszköz fejlesztése  
és ennek alkalmazása talajáramlások  
vizsgálatában, diszkrétéleemes modellek  
kalibrációjához

**TDK Dolgozat**

*Készítették*

Wágner Árpád

Szabó Bence

*Konzulensek*

Kovács László

Dr. Tamás Kornél

Hudoba Zoltán

2021. október

# 1. Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretnénk köszönetünket kifejezni mindazoknak, akik hozzájárultak munkánk sikeres megvalósításához: Köszönjük konzulensünknek, Kovács László úrnak hogy inspirált és segített minket munkánk során, valamint rendelkezésünkre bocsájtotta a kutatásaink és méréseink elvégzéséhez a BME Ipar 4.0 Technológiai központot. A BME Gép- és Terméktervezés Tanszékről köszönjük konzulenseinknek: Dr. Tamás Kornél Tanár úrnak, és Hudoba Zoltán Tanár úrnak, hogy inspiráltak és segítettek minket munkánk gépészeti és modellezési vonatkozásaiban. Továbbá köszönjük Grad-Gyenge László úrnak, hogy segítségünkre volt munkánk során a mesterséges intelligencia alkalmazásának lehetőségének feltárásában. Köszönjük Szász Tamásnak és Bogár Bálintnak hogy szakmai segítséget nyújtottak és idejüket áldozták robotos méréseink során közreműködésükkel. Köszönjük Kopasz István úrnak az eszközök összeállításához biztosított műhelyhasználati engedélyt, és az ott nyújtott szakmai segítséget. Köszönjük Pálincás Bálintnak a BME Mérnökgeológia és Geotechnika Tanszék technikusának a segítséget.

# Tartalomjegyzék

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Köszönetnyilvánítás</b>                                      |           |
| <b>2. Bevezetés</b>  | <b>1</b>  |
| 2.1. Mi a diszkrét elemes módszer? . . . . .                       | 2         |
| 2.2. Irodalomkutatás . . . . .                                     | 2         |
| 2.2.1. Példák szenzoros nyomkövetésre . . . . .                    | 2         |
| 2.2.2. Példák talajjelmozdulások vizsgálatára . . . . .            | 4         |
| 2.3. A probléma megfogalmazása . . . . .                           | 9         |
| 2.4. A célok megfogalmazása . . . . .                              | 9         |
| <b>3. Anyagok és módszerek</b>                                     | <b>10</b> |
| 3.1. A mérési környezet bemutatása . . . . .                       | 10        |
| 3.2. Az alkalmazott talajvizsgálati módszerek bemutatása . . . . . | 10        |
| 3.3. A mérés során alkalmazott eszközök bemutatása . . . . .       | 11        |
| 3.4. Az elmozdulásmérő eszköz bemutatása . . . . .                 | 15        |
| 3.4.1. A mérőrendszer áttekintése . . . . .                        | 15        |
| 3.4.2. Szoftver . . . . .  | 15        |
| 3.5. A mérőeszközök kalibrációja . . . . .                         | 19        |
| 3.5.1. Szenzorkalibráció . . . . .                                 | 23        |
| 3.5.2. Előfeldolgozás eredményeinek kalibrációja . . . . .         | 23        |
| 3.6. A mérések menete . . . . .                                    | 23        |
| 3.7. Szimulációk diszkrét elemes módszerrel . . . . .              | 25        |
| <b>4. Az eredmények bemutatása</b>                                 | <b>29</b> |
| 4.1. A penetrációs kísérletek eredményei . . . . .                 | 29        |
| 4.2. A kapcsolt mérés eredményei . . . . .                         | 30        |
| 4.3. A szimulációk során kinyert eredmények . . . . .              | 31        |
| <b>5. Kitekintés</b>   | <b>33</b> |
| <b>6. Összegzés</b>  | <b>34</b> |
| 6.1. Az elmozdulásmérő rendszer továbbfejlesztése . . . . .        | 34        |

## 2. Bevezetés

A különböző szemcsés anyagok számtalan helyen előfordulnak a mérnöki gyakorlatban. Többek között például a zúzottkövekre [9], a szemestakarmányokra [4] és a talajra [15] is tekinthetünk szemcsés anyagként, de a vegyiparban, illetve a gyógyszeriparban is gyakran előfordulnak különböző szemcsékből álló anyaghalmazok.

Az egyes szemcsés anyagok viselkedésének, és mechanikai tulajdonságainak ismeretére így nagy szükség van, hogy hatékonyan lehessen kezelni vagy megfelelő célra alkalmazni ezen anyagokat. Számos természeti jelenség is szemcsés anyagok tulajdonságainak ismeretén keresztül érthető meg. Ilyen jelenségek például a talaj-, illetve vízerózió vagy a lavinák mozgása.

A különböző szemcsés anyagokat többnyire gépek segítségével kezeljük [5] áramoltatjuk, forgatjuk, keverjük, tömörítjük, lazítjuk, rostáljuk, válogatjuk, egy helyre gyűjtjük, szétválasztjuk... Ezen folyamatok mindegyike a teljes halmaz mozgásával illetve az abból álló szemcsék elmozdulásával jár. Így a szemcsés halmazokon belül történő anyagáramlások megismerése különösen fontos a szemcsés anyagokat kezelő gépek tervezésénél is.

A szemcsés halmazok vizsgálatához köthető egyik intenzív kutatási irány a szemcsés halmaz áramlása során a halmazon belül fellépő elmozdulások, deformációk megismerésére irányul. Mivel egy szemcsés halmazon belüli elmozdulásokra nincs közvetlen rálátásunk, az azon belüli elmozdulások megismerése komoly problémát vet fel. Ezen probléma megoldását célozza dolgozatunk, mely csatlakozik a halmazon belüli elmozdulásokkal foglalkozó kísérleti és szimulációs kutatásokhoz.

Jelen kutatásunkban talajművelő szerszám mozgásának hatására a talajban történő elmozdulások jellemzését helyeztük középpontba [14], így irodalomkutatásunkat is ezen szál mentén végeztük.

Ezen dolgozatunk a tavaly már bemutatott „Szemcsehalmazon belüli elmozdulások mérésére alkalmazható gyorsulásmérő szenzor alapú mérőrendszer fejlesztése” című TDK dolgozat folytatásának tekinthető. Az akkor elkészített szoftverek egy része újra felhasználásra került, de a mérési szoftverrendszer új elemekkel is kiegészült. Ezen túl a hardver teljes áttervezésen esett keresztül, a tavaly megfogalmazott célok egyikének, a méretcsökkentésnek is eleget téve illetve egy másik szenzort használva. Az elkészült rendszerrel laboratóriumi méréseket is végeztünk a BME Ipar 4.0 Központjában, egy robotkar és egy kisméretű talajvályú segítségével.

## 2.1. Mi a diszkrét elemes módszer?

Mindenek előtt fontosnak tartjuk bemutatni, milyen módon lehet a szemcsés anyagokat numerikusan modellezni, valamint, milyen nehézségekkel jár ez a modellezési módszer. Tehát a diszkrét elemes módszer (DEM) egy numerikus szimulációs módszer, mely lehetővé teszi szemcsés anyagok modellezését. A DEM alkalmazható zúzottkő, talaj, szemestakarmányok, vagy akár falazott boltozatok modellezésére is. Ahhoz azonban, hogy alkalmazható legyen a módszer mérnöki feladatok megoldására, be kell állítani a modellbeli szemcsés anyag fizikai és mechanikai tulajdonságait. A nehézséget az okozza, hogy a szemcsés halmazok modellben beállítható anyagtulajdonságai nem közvetlenül mérhető mennyiségek a valóságban. Minden anyagra és annak minden állapotára (például különböző nedvességtartalmak esetét tekintve) új DEM modellt kell létrehozni fizikai mérések alapján. Ezt a folyamatot nevezik a modellbeli szemcsés anyag kalibrálásának. A kalibrálás jellemzően manuális, tapasztalat alapú folyamat. Számos kidolgozott mérési módszert alapján lehet kalibrálni modelleket. Egyik gyakran alkalmazott ilyen módszer, hogy valós szemcsés halmazba behatoló merev test ellenállását mérik. Majd ugyanezt modellezik DEM-ben és próbálják a valóságban tapasztalt jelenséget a modellben is reprodukálni. A DEM modellben a halmaz kalibrációja azért ennyire körülményes, mert a teljes halmaz tulajdonságait csupán két elem közti kapcsolati paraméterek segítségével lehet állítani. A diszkrét elemes modellezés alapjairól ír Bagi "A Diszkrét Elemek Módszere" című könyvében [1].

## 2.2. Irodalomkutatás

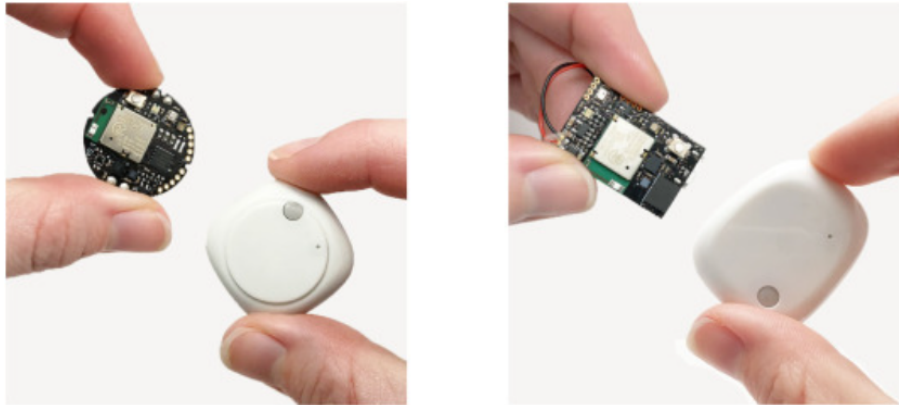
### 2.2.1. Példák szenzoros nyomkövetésre

Gyorsulásadatokból történő pozícióbecsléssel többen is kísérleteztek már, Madgwick és társai [6] akik egy viselhető eszközt készítettek emberi mozgások vizsgálatához. A munkájuk során elkészülteszközt forgalmazták is x-IMU néven, jelenleg ennek továbbfejlesztett változata, az NGIMU elérhető, azonban ez az eszköz a nehezen elérhető továbbá méretük és kialakításuk következtében nem alkalmasak a mi céljainkra.

Hasonló eszközt készítettek Dost és társai is [2] akik laboratóriumi körülmények között földcsuszamlásokat modelleztek és vizsgáltak, az eszközüket egyfajta „okos kavicsként” használva. Az ő eszközüik méreténél és formájánál fogva a mi céljainkra nem lenne megfelelő, hiszen az általuk használt eszköz legszélesebb pontján olyan széles, mint az általunk használt mérőeszköz házának átmérője, további védelmet igényelne, hogy ilyen körülmények között használni lehessen (az ő esetükben kavicsok belsejében helyezték el az eszközt a mérés során). Az általuk használt eszköz továbbá legfeljebb 100Hz frekvenciájú mintavételre képes, a miénk ennél gyorsabb is lehet. Azt is kifejtik továbbá, hogy az általuk

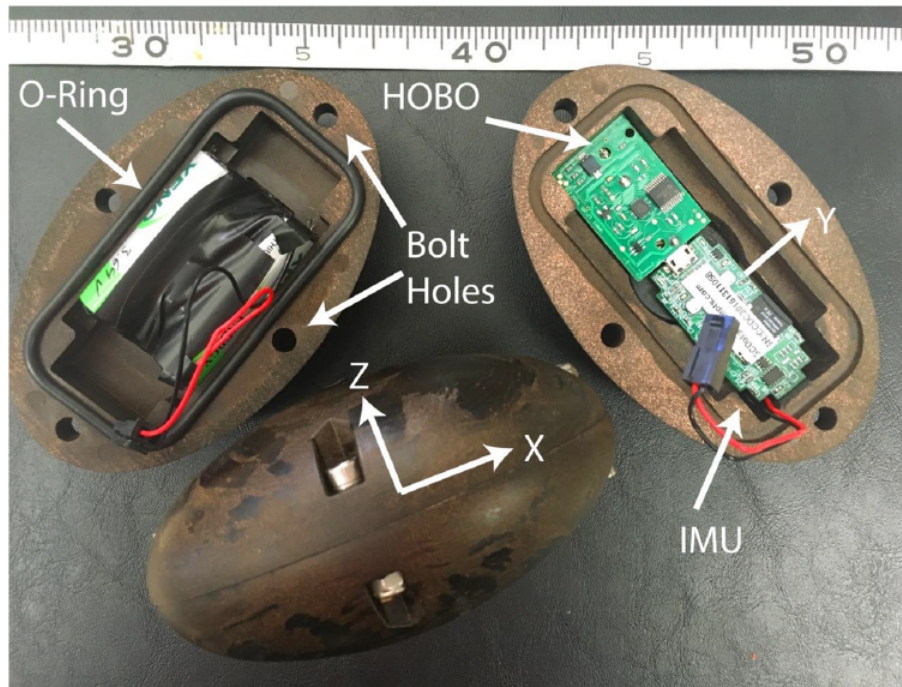
feldolgozott adatokból kapott elmozdulás az esetek túlnyomó többségében rövidebb, mint a valóságban.

Lavrinec és szerzőtársai (2018) inerciális mérőegység (IMU) segítségével (1. ábra) mértek nyomást és sebességet egy vízszintes csigaáramú pneumatikus továbbító gépben [5]. Ezekből meg tudták határozni a mérőeszközük pozícióját az idő függvényében. Két különböző geometriájú szenzort alkalmaztak vizsgálataik során. Meghatározták, milyen összefüggések állnak fenn a mért nyomás és a sebesség között, de nem rajzoltak ki a szenzorok által megtett útvonalakat.



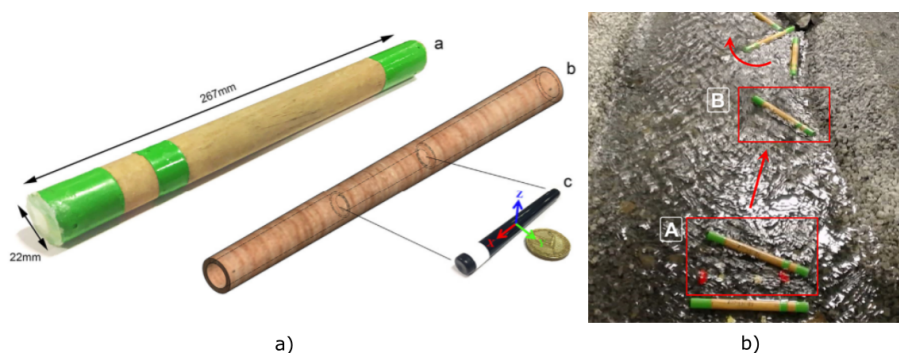
1. ábra. Lavrinec és szerzőtársai által alkalmazott szenzorok[5]

Pretzlav és szerzőtársai (2020) IMU-val és akkumulátorral szerelt okoskövel (2. ábra) készítettek méréseket 22 napos hóolvadás során [10]. Céljuk az volt, hogy megértsék a hordalékmozgást egy hegyi folyómederben. Regisztrálták a nyomjelző helyzetét az idő függvényében.



2. ábra. Pretzlav és szerzőtársai által alkalmazott nyomjelző[10]

Spreitzer és szerzőtársai (2020) fa pálcába helyeztek 9 szabadságfokú szenzort a 3. ábra szerint [13]. IMU-t gyorsulásmérőt, giroszkópot és magnetométert. A fa pálcát laboratóriumi körülmények között áramló vízben úsztatták, és meghatározták az eszköz által megtett útvonalat. Méréseiket kamera felvételek alapján validálták, és megfelelő pontosságúnak találták az eredményeiket a pályák mérési pontosságának tekintetében. A jövőben látnak lehetőséget arra, hogy valószínűségi modellt lehet állítani méréseik alapján az "okosfa" pályájának meghatározására.



3. ábra. Pretzlav és szerzőtársai által alkalmazott nyomjelző[13]

### 2.2.2. Példák talajelmozdulások vizsgálatára

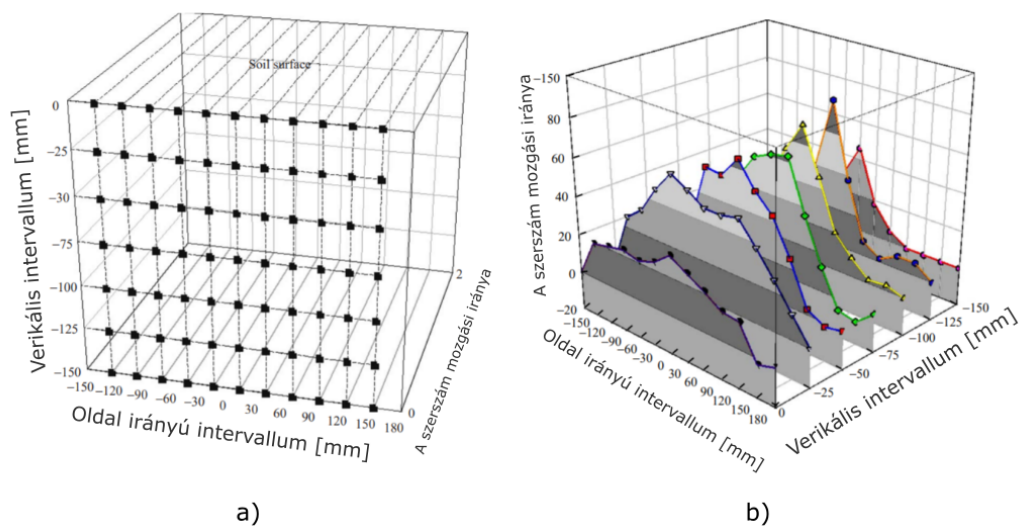
Több olyan publikáció megtalálható a különböző folyóiratokban, melyben kutatók többféle talajművelő kultivátorszerszám geometria (4) alkalmazása mellett vizsgálják a talaj felszínének, illetve belsejének elmozdulását. Ezek közül összegyűjtöttük

azokat, melyekben a kutatók talaj elmozdulásának jellemzésére valamilyen nyomjelzőt alkalmaztak. Külön kiemeljük azokat a cikkeket, melyekben ezt a jelenséget numerikusan is modellezték alapozva korábbi mérésekre.



4. ábra. Különböző kultivátorszerszám kialakítások. [3]

Rahman és szerzőtársai (2005) 10-20 mm élhosszúságú kocka alakú nyomjelzőket helyeztek szabályos mátrix formában a talajba a 5. a) ábra szerint [11].

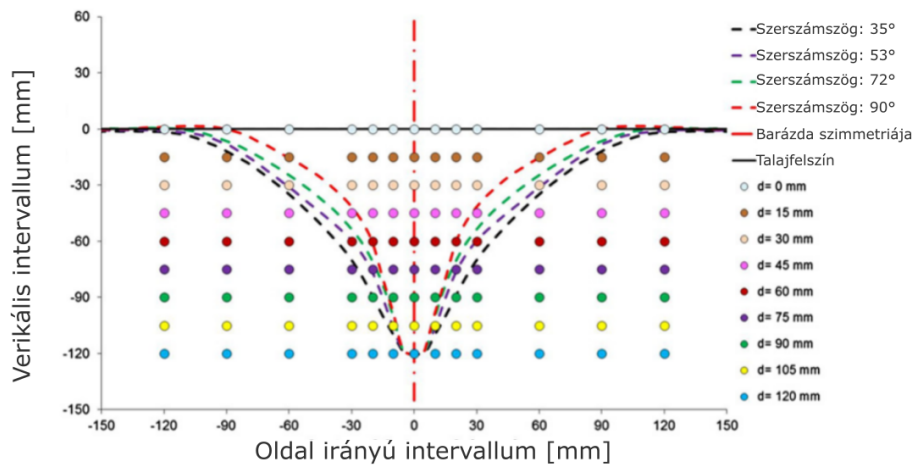


5. ábra. a) A nyomjelzők elrendezése Rahman és szerzőtársai kutatásaiban. b) Rahman és szerzőtársai által alkalmazott eredménymegjelenítési módszer. [11]

Nyomjelzőként mérésenként különböző anyagokat alkalmaztak (fa, PVC, alumínium, acél). Három különböző geometriájú kultivátorszerszámot húztak el a nyomjelzők között állandó szerszámsebesség mellett, és vizsgálták hova jutottak a szerszám elhaladtával a nyomjelzők. Arra a következtetésre jutottak, hogy nagy befolyással bírnak a nyomjelzők sűrűségei az eredményekre. Legjobbnak a 10mm méretű kockát találták a talajmozdulások vizsgálatára. A szerzők azonban nem foglalkoztak DEM modellezéssel. A 7. b) ábra bemutatja, milyen módon jelenítették meg eredményeiket.

Solhjou és szerzőtársai (2012) kocka alakú nyomjelzőket helyeztek a talajba 120 mm mélységig, mátrix alakban a 6 ábra szerinti elrendezésben [12].

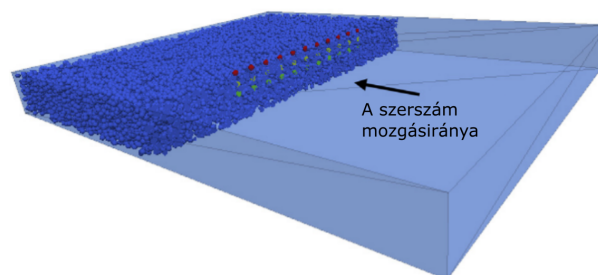




6. ábra. A nyomjelzők elrendezése Solhjou és szerzőtársai kutatásaiban.[12]

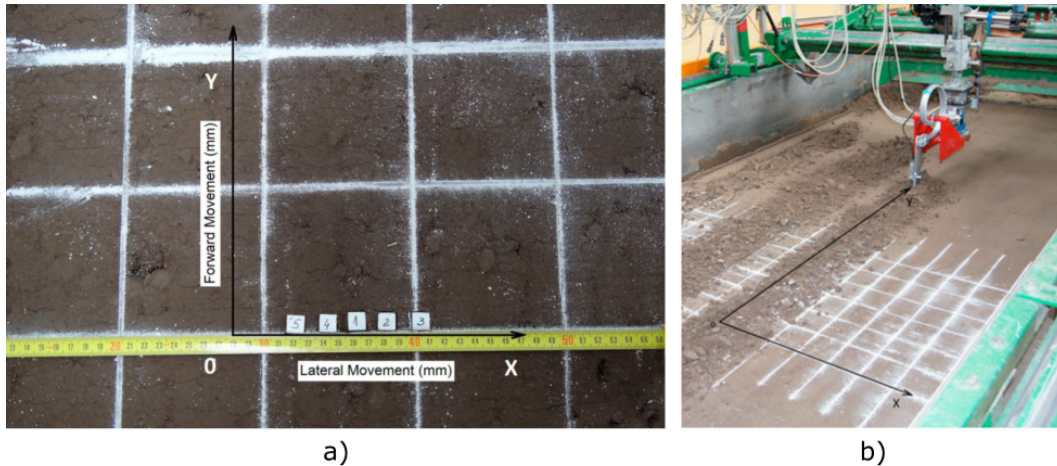
A talaj elmozdulásáról vontak le következtetéseket, különböző geometriájú szerszámok nyomjelzők közötti elhúzása után. Eredményként megállapították, hogy bizonyos zónákban a talaj vizsgált keresztmetszetén belül milyen eloszlással vannak jelen a különböző talajrétegekbe helyezett nyomjelzők. A szerzők ezen cikkükben nem foglalkoztak DEM modellezéssel.

Gürsoy és szerzőtársai (2017) talajvályúban végeztek kísérleteket talaj elmozdulására [3]. Mátrix alakban a felszínre, valamint 20 és 40 cm-es mélységbe helyeztek összesen 33 kocka alakú nyomjelzőt. Három különböző geometriájú kultivátorszerszámot húztak el a nyomjelzők között állandó szerszámsebesség mellett. Majd a mérések alapján a 7. ábra szerint DEM-ben is modellezték a méréseket. Érdekes, hogy bár kocka alakú nyomjelzőket alkalmaztak a fizikai mérések során, a nyomjelzőket a modellezéskor gömb elemekkel közelítették.



7. ábra. Gürsoy és szerzőtársai mérési elrendezésük alapján felépített diszkrét elemes modellje.[3]

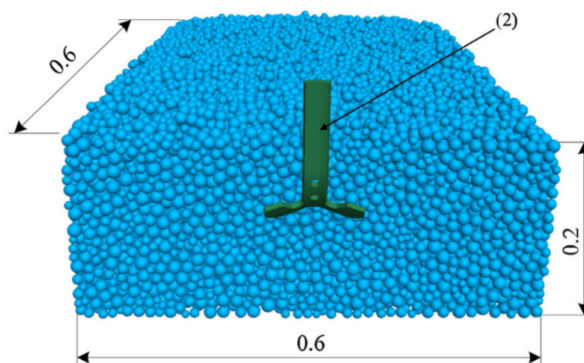
Znova és szerzőtársai (2018) cikkükben 5 db 1cm élhosszúságú kocka alakú nyomjelzőket helyeztek a talaj felszínére félig leásva [16]. Ez lázható a 8 a) ábrán.



8. ábra. a) A nyomjelzők elrendezése Znova és szerzőtársai kutatásaiban. b) Znova és szerzőtársai által alkalmazott mérőberendezés.[16]

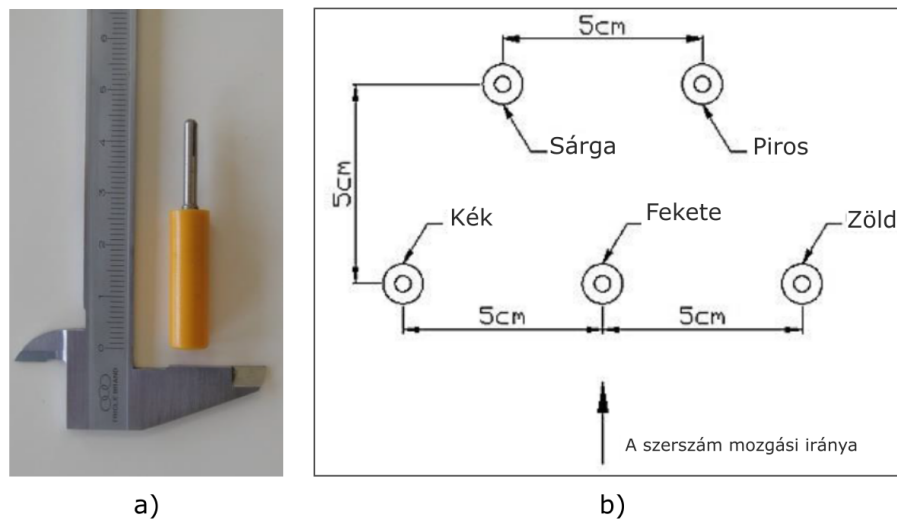
Vizsgálták a szerszám elhaladtával a nyomjelzők végleges pozícióját három különböző szerszámsebesség mellett. Megállapították, hogy egyre nagyobb sebességek mellett egyre jobban eltávolodnak a nyomjelzők kezdeti pozíciójuktól, de eredményeiket nem használták fel talajmodellezés céljából.

Milkevych és szerzőtársai (2018) Rahmen és szerzőtársaihoz hasonló kísérleteket végeztek [8]. 100 mm mélységig három sorban 500 mm szélességben helyeztek el összesen 33 darab 15mm élhosszúságú kocka alakú alumíniumból készült nyomjelzőt. A nyomjelzők között pedig szerszámot húztak el. Eredményként kirajzolták, melyik nyomjelző hova jutott a talajművelési teszt után. DEM-ben modellezték is a jelenséget a 9. ábra szerint. Nem hoztak létre a talajmodelljükön belül külön követett objektumokat, hanem a mátrixcsomóponthoz közeli koordinátán lévő elemet kerestek a szimulált halmazban, és azok elmozdulását vizsgálták. Ilyen módon is hasonló elmozdulásokat produkáltak a virtuális nyomjelző elemek a valóságos alumíniumkockák elmozdulásához.



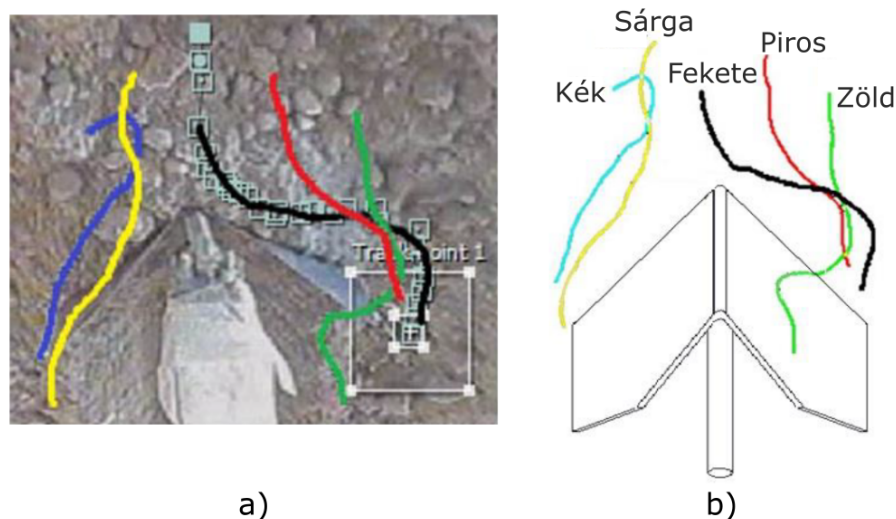
9. ábra. Milkevych és szerzőtársai modellje talaj-szerszám kapcsolatra DEM-ben. [8]

Massha és szerzőtársai (2020) öt darab 45 mm magas 8mm átmérőjű henger alakú nyomjelzőt tűztek a talajvályúban lévő talaj felszínére az 10. ábra szerinti elrendezésben [7].



10. ábra. Massha és szerzőtársai által alkalmazott a) nyomjelzőtüske. b) A nyomjelzőtüskék elrendezése a talajban a szerszám előtt.[7]

A kultivátorszerszám nyomjelzők közötti elhaladásáról felülről videofelvételt készítettek, majd a nyomjelzők által megtett pályákat képelemzés segítségével rajzolták ki. Ez látható a 11. ábrán.



11. ábra. A nyomjelzők elmozdulása a kultivátorszerszám előtt: a) Kamera nézet b) sematikus ábra. [7]

Ez volt az egyetlen kutatás amit találtunk, amiben trajektóriákat rajzoltak ki nyomjelzők által befutott pályáról talaj elmozdulásának vizsgálata során. A szerzők is

megjegyzik konklúziójukban, hogy ezen mérési módszer hiányossága, hogy a talaj mélyebb rétegeiben nem tudunk meg semmit az elmozdulásokról.

### **2.3. A probléma megfogalmazása**

A szakirodalomban nem találtunk olyan megoldást, amely során a talaj elmozdulását aktív nyomjelzők segítségével jellemeznék. A talaj belső elmozdulásai talajművelés közben ezidáig csak a passzív nyomjelzők kezdeti és végpozíciójával voltak jellemezve a talált szakirodalom szerint. Talajon belül a passzív nyomjelzők időbeli helyváltozása egyetlen esetben sem volt regisztrálva, így trajektóriák segítségével ezidáig nem jellemezték mérések alapján a talajban történő talajáramlásokat. Ebből kifolyólag olyan esetre sem találunk példát a szakirodalomban, ahol mérések alapján a talaj belső elmozdulásainak trajektóriái alapján lenne numerikusan talajmodell kalibrálva.

### **2.4. A célok megfogalmazása**

Általános célunk mérési módszert fejleszteni nem átlátható közegek belső elmozdulásának, áramlásainak vizsgálatára és numerikus modellezésére.

Ezért célunk, hogy megtervezzünk és gyártsunk egy olyan a közegbe helyezhető költséghatékony adatgyűjtő mérőberendezést, mely segítségével nem átlátható közeg belső mozgásai, áramlásai időben lekövethetők. Ehhez olyan adatgyűjtő eszközt fejlesszünk, melyet a közegbe helyezve annak mozgása alapján tudunk következtetéseket levonni közeg belső mozgásairól, áramlásairól.

További célunk, hogy alkalmazzuk a megtervezett mérőberendezést a gyakorlatban egy speciális esetben egy kapcsolt mérés során, mikor a talaj áramlását vizsgáljuk egy szerszám talajban történő húzása közben.

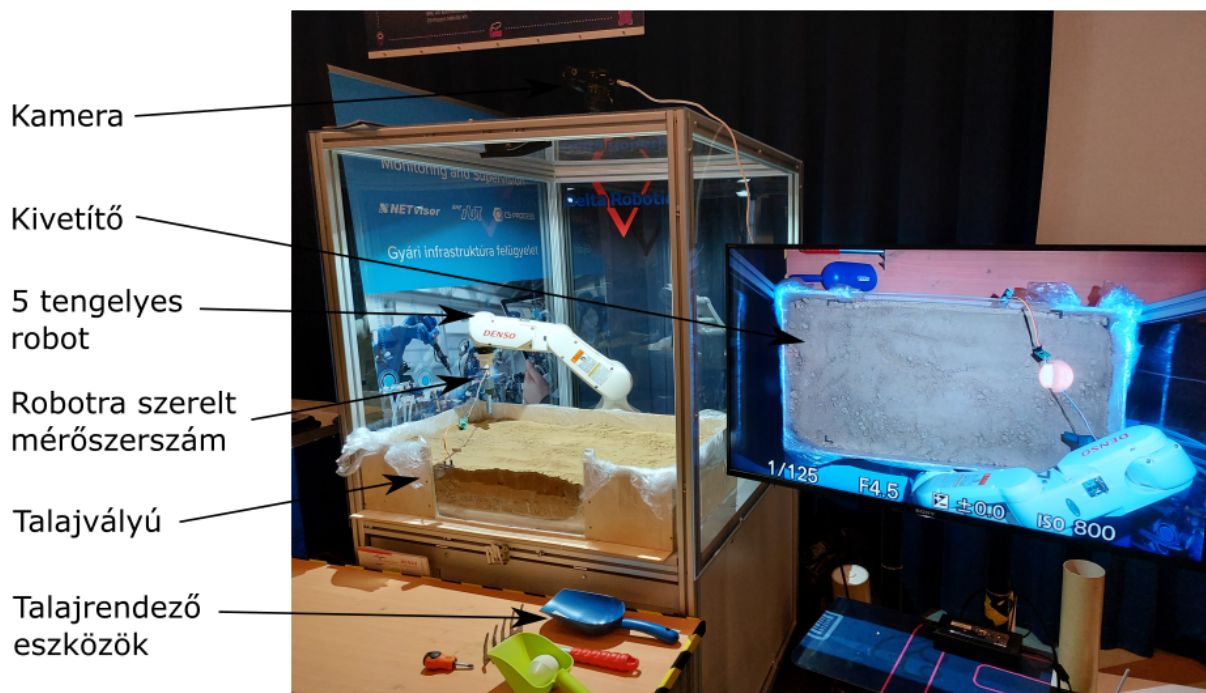
Valamint szeretnénk megalkotni egy olyan szimulációs környezetet DEM-ben mellyel lehetséges a talaj anyagának kalibrálása több eddig is alkalmazott paraméter mellett a mérőeszközünkkel mért talajon belüli elmozdulásjellemzők segítségével.

Végző célunk iránymutatást adni abban, miként alkalmazható mérőberendezésünk jövőbeli kutatások során fókuszálva a szemcsés anyagok kalibrálására mesterséges intelligencia alkalmazásával.

### 3. Anyagok és módszerek

#### 3.1. A mérési környezet bemutatása

Laboratóriumi méréseinket a BME Ipar 4.0 Technológiai Központjában végeztük. A mérések során egy DENSO gyártmányú 5 tengelyes robotkart alkalmaztunk. A robotkar segítségével talajvályúban végeztük talajvizsgálatokat. A talajvályút úgy méreteztük, hogy lehetőleg minél jobban kihasználja a rendelkezésre álló teret a robot hatótávolságában. Így azt 90 cm magasra, 45 cm szélesre és 19 cm mélyre gyártottuk le. A talajvályú 6 mm vastagságú rétegelt lemezből készült. Úgy készítettük el, hogy az az elülső oldalán rendelkezzen egy átlátszó oldallal. Ez elősegíti a talajáramlások megfigyelését vizsgálatok közben. Fontos azonban megjegyezni, hogy a talaj a fal közelében a falhatás miatt másként viselkedik. A talajvályút mielőtt feltöltöttük talajjal, előtte fóliával béleltük hogy az esetleges nedvesség a talajvályú anyagát ne károsítsa. A talajvályúba 13 cm magasságig száraz homokos talajt helyeztünk, melynek összetétele korábbi mérésből ismert: 93,28% homok, 4,66% iszap, valamint 2,06% agyag. A teljes mérési környezetet a 12. ábra szemlélteti.



12. ábra. A mérési környezet bemutatása.

#### 3.2. Az alkalmazott talajvizsgálati módszerek bemutatása

A talajvályúban a robotkar segítségével két különböző típusú talajjellenállás mérést és egyik esetben ezzel kapcsolt talajelmozdulás mérést végeztünk el:

1. Tamás [15] kutatásához hasonlóan mi is vizsgáltuk a talaj penetrációs ellenállását. A penetráció mérés elve azon alapul, hogy egy szabványos kúpos test (13) ellenállását tekintjük egy szemcsés halmazsal szemben. A kúpos testet a halmazba szúrva mérjük az erőt, amivel a test a halmazba hatol. Majd a kúp projektált keresztmetszetével fajlagosítva az erőt kapjuk a penetrációs ellenállást. Ezen mérés jelentősége esetünkben, hogy megvizsgáljuk, hogy a talajvályúban lévő talajállapotot a mérések elvégzésével mennyire lehet közel azonos módon visszaállítani. Továbbá később ezen mérési adatok lehetőséget biztosítanak arra, hogy numerikus szimulációs modelleket kalibráljunk.

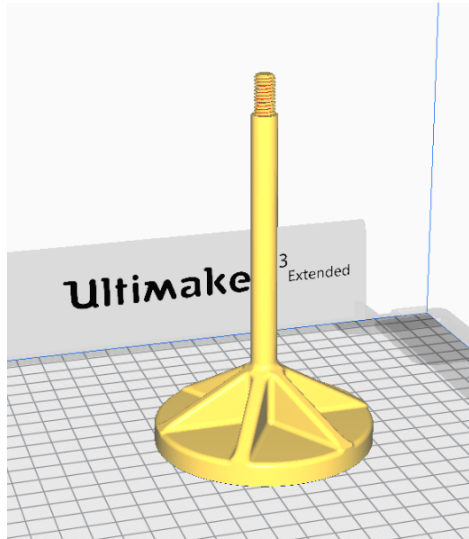


13. ábra. Szabványos 60°-os kúpszöggel rendelkező mérőkúpok penetráció méréséhez balról jobbra:  $2\text{cm}^2$ ,  $3,33\text{cm}^2$ ,  $4\text{cm}^2$  projektált keresztmetszettel.

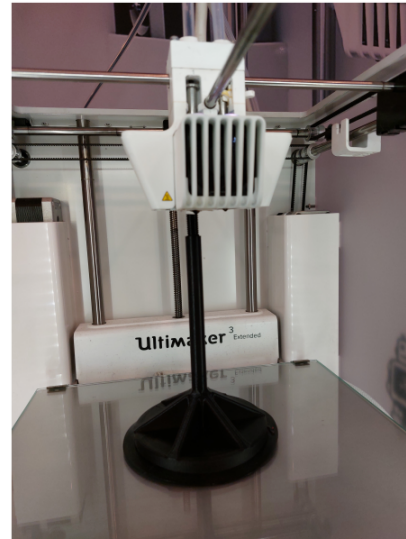
2. Kapcsolt mérést végeztünk. Vizsgáltuk a talaj ellenállását egyszerű hasáb alakú szerszám vízszintes behatolásával szemben. Közben pedig egy adatgyűjtő szenzort helyeztünk a húzott szerszám elé. Ezen adatgyűjtő segítségével meghatározható az adatgyűjtő egység által megtett pályája, és az általa megtett út az idő függvényében. Később ezen mérési eredményekre támaszkodva is lehetséges numerikus szimulációk során talajmodelleket kalibrálni.

### 3.3. A mérés során alkalmazott eszközök bemutatása

A talajvizsgálatok elvégzéséhez saját tervezésű eszközöket készítettünk. A mérőeszközök tervezésénél pedig törekedtünk a költséghatékonyságra. Az eszközök gyártásánál így erősen támaszkodtunk additív gyártásra, azok szerkezetei ömledékréteggel (FDM) készültek politejsavból (PLA). (14. ábra)



a)



b)

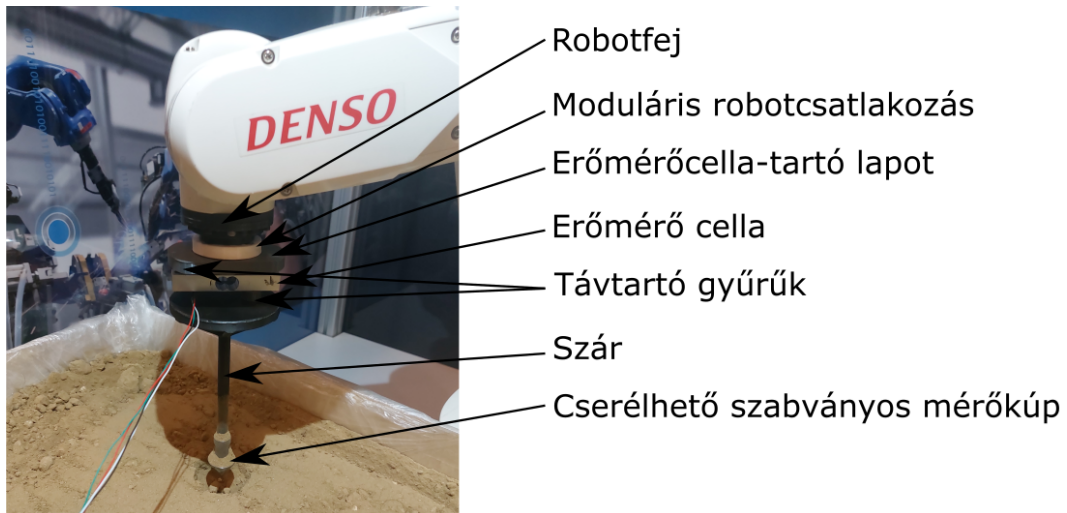
14. ábra. a) A nyomtatandó szerszámtest a szeletelőszoftverben. b) 3D nyomtatási folyamat.

Mivel méréseink során a talaj ellenállásának valamely módját vizsgáltuk a vizsgálathoz egy hajlító igénybevéttel 5 kg-ig terhelhető erőmérő cellát alkalmaztunk.

A robotfejre egy moduláris fejet terveztünk, hogy mindkét típusú talajellenállást mérő eszközt azonos módon tudjuk csatlakoztatni a robotra.

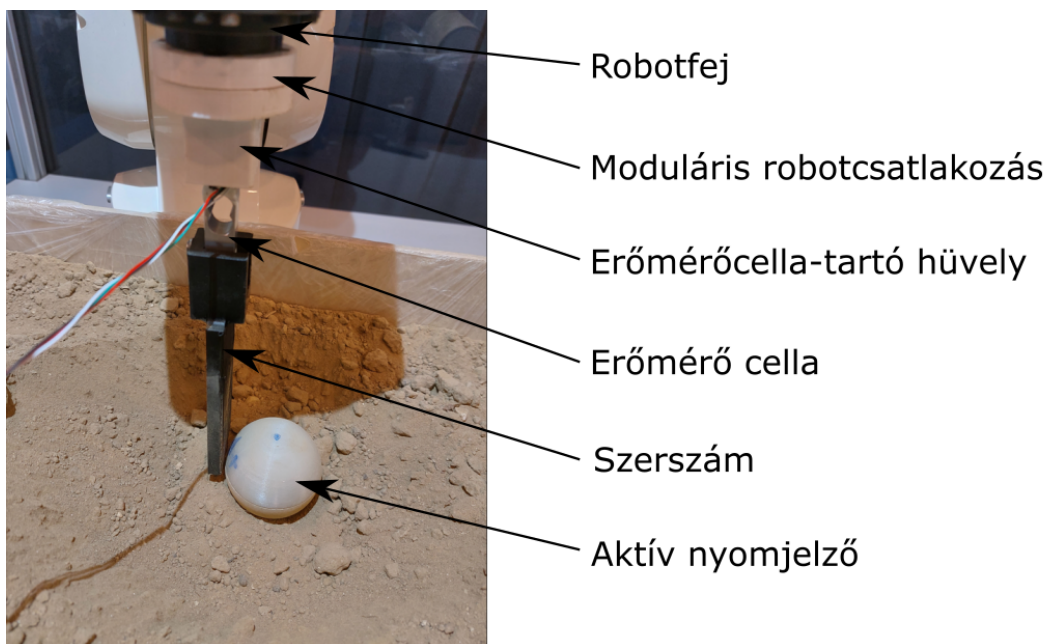
A penetrációs ellenállás mérését szabvány rögzíti. A méréséhez szükséges egy hosszabb szárra szerelt szabványos kialakítású cserélhető mérőkúp. Ezzel függőlegesen 2 cm/s sebességnél lassabban a talajba hatolunk.

Ezek tudatában alakítottuk ki saját berendezésünket, ahogy a 15. ábra mutatja. A moduláris robotcsatlakozáshoz egy erőmérőcella-tartó lapot erősítettünk, ehhez csatlakoztattuk távtartó gyűrűn keresztül csavarral 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.



15. ábra. A penetrométer mérőszerszám felépítése.

A vízszintesen húzott szerszámra ható talajellenállás méréséhez a moduláris robotcsatlakozáshoz egy erőmérőcella-tartó hüvelyt nyomtattunk, melybe függőleges helyzetbe rögzítettük a cellát. A cella másik felére pedig felcsavaroztuk az alkalmazott szerszámot. Mindez megfigyelhető a 16. ábrán.

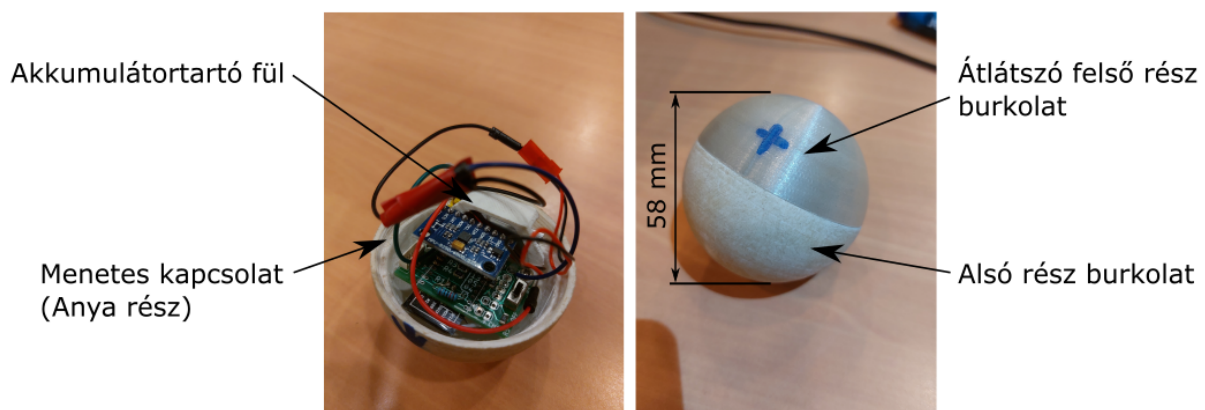


16. ábra. A vízszintesen a talajba húzott mérőszerszám felépítése.

A talaj áramlási tulajdonságainak jellemzésére saját tervezésű aktív nyomjelzőt készítettünk a 17. ábra szerint. A nyomjelző házát gömb alakban határoztuk meg, ugyanis később numerikus szimulációk során ezen forma egyszerűen modellezhető. A nyomjelző 3D nyomtatott háza két részre szedhető. A két rész közé menetes kapcsolatot létesítettünk. A nyomjelző házának falát 4 mm vastagságúra vettük. Így az eszköz ellenáll a mérés



közben fellépő igénybevételek. A ház belsejét pedig úgy alakítottuk ki, hogy az alkalmas legyen a benne szereplő elektronika elhelyezésére. Külön figyelmet fordítottunk arra, hogy a mérőeszközben lévő gyorsulásmérő szenzor a gömb középpontjába essen. A házon belül helyet kap egy akkumulátor tartó konzol is, melyet csavarkötéssel rögzítünk a házhoz. A nyomjelző külső mérete az elektronika méretéből adódóan 58 mm lett. 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. Elegendőnek tartottuk a két fél zárásakor azok megfelelő erővel történő meghúzását. 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.



17. ábra. Az aktív nyomjelző felépítése.

Bár az aktív nyomjelző házának tervezésekor felállított követelményjegyzék számos pontjának jól megfeleltünk, akad néhány, mely útmutatást ad az eszköz továbbfejlesztésének irányába: Ideális esetben az eszköz sűrűsége meg kellene hogy egyezzen a talaj sűrűségével, az eszköz tömegközéppontjának a geometriai középpontjával egybe kellene esnie, valamint dinamikai kiegyensúlyozatlanságot meg kellene szüntetni az eszköz összes tengelye mentén. Cél későbbiekben a nyomjelző külső méreteinek minimalizálása is.

## 3.4. Az elmozdulásmérő eszköz bemutatása

### 3.4.1. A mérőrendszer áttekintése

A mérés elvégzéséhez szükségünk volt egy eszközre, mely képes a saját elmozdulásának követésére. Az azonban nem elvárás, hogy ezt valós időben tegye, viszont autonóm módon, egy vezérlőegységgel vezetékmentes kapcsolaton keresztül együttműködve kell tudnia működni.

Az elmozdulás mérésére egy TDK IvenSense MPU-9250 típusú szenzort használunk. Ebben a szenzorban „egy csomagban” kapunk egy gyorsulásmérőt, giroszkópot és magnetométert is. Mivel minden résszenzor a tér mindhárom tengelyének irányában képes mérni, így egy 9 tengelyű eszkösről beszélhetünk. Ezen kívül a mérőeszköz rendszer még egy ESP8266 alapú mikrokontroller egység, mely beépített Wi-Fi funkcionalitással is rendelkezik.

A már említett követelményekre alapozva az a tervezői döntés született, hogy a mérőegységen futó program a lehető legegyszerűbb legyen, az adatgyűjtést segítse a vezérlő szoftver, a feldolgozás pedig ezektől elkülönülve egy feldolgozóprogram segítségével történjen.

### 3.4.2. Szoftver

Amint már említettem, az előző Tudományos Diákköri Konferencián bemutatott rendszer szoftvere közül volt, ami újrafelhasználásra került. Ilyen például az adatfeldolgozás egy része, az adatgyűjtés ugyanis úgy történt, hogy az ott kapott adatok a korábbi feldolgozószoftverben felhasználhatóak legyenek.

Így változatlan maradt a „SIBHA” (Second Integral Based Height Adjustment) algoritmus, amely segítségével a mért adatokat egy külön lemerített végponthoz igazítjuk. Ez úgy történik, hogy kiszámoljuk a becsült elmozdulást (kétszeres időalapú integrálással), majd megnézzük, milyen különbsége van ennek az utolsó eleme a mért végponttól. Ebből adódik egy hiba, amelynek egy konstans által meghatározott részével aztán minden adatelemet eltolunk. Ezt ismételjük addig, amíg a kapott végpont a valóshoz képest egy meghatározott hibahatáron belülre kerül.

Azonban vannak új szoftverkomponensek is. Erre azért volt szükség, mert bár a korábban használt Bosch BNO-055 típusú szenzor egy jó minőségű eszköz, nekünk mégsem teljesen megfelelő. Ez az IMU ugyanis egy -gyártói elnevezés szerint- okosszenzor, ami azt jelenti, hogy része egy mikroprocesszor is, aminek segítségével közvetlenül megtudhatunk tőle olyan értékeket például, mint a gravitációs komponens nélküli gyorsulás vagy az orientáció kvaterniók, vagy Euler-szögek formájában. Azonban sejthető, hogy egy ilyen mikroprocesszornak messze nincs olyan számítási kapacitása, mint akár egy Raspberry Pi eszköznek, főleg mint egy modern személyi számítógépnek és mivel az adatfeldolgozásnál nem elvárás a valósidejűség, így az a döntés született, hogy a szenzoradatok értelmezése

(avagy előfeldolgozása) is ezen a platformon történjen meg.

Emiatt az adatfeldolgozási folyamat is megváltozott a mi szempontunkból nézve, ezt alább részletezem.

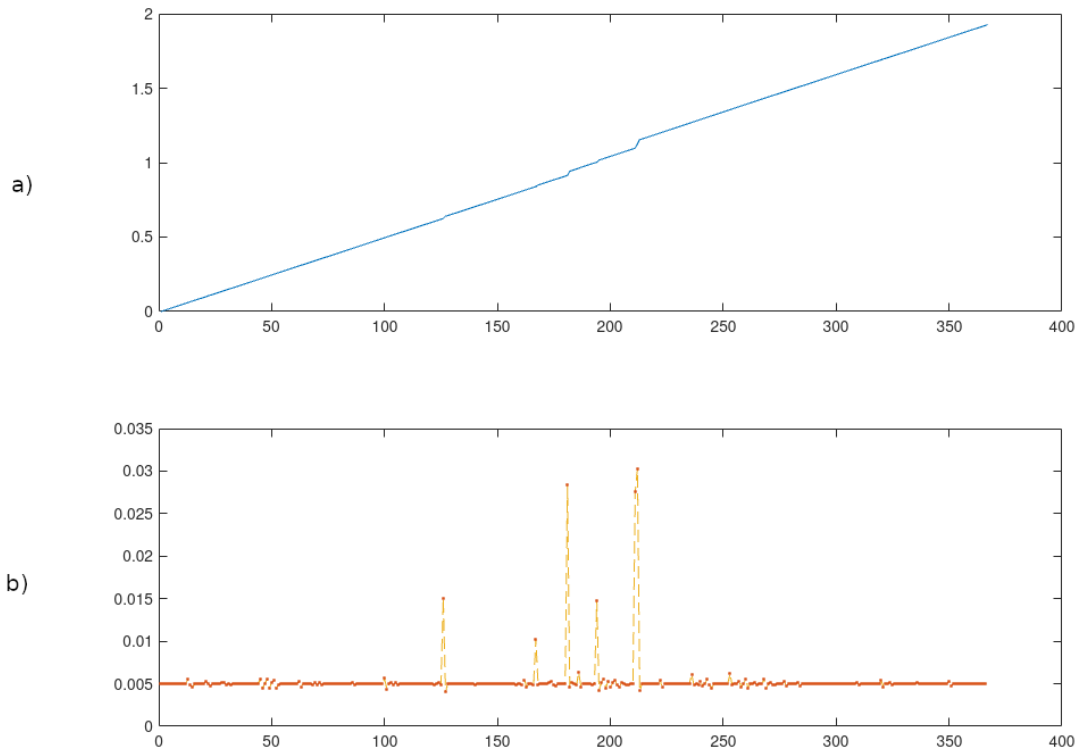
A mérés első lépése az adatgyűjtés. Mivel tervezői döntés alapján a mérőegység szoftvere minél egyszerűbb kell, hogy legyen, így annak a feladata az, hogy indítás után csatlakozzon egy előre meghatározott Wi-Fi hálózathoz, majd egy MQTT brókerhez is. Ezután kikapcsolásig az a feladata, hogy a szenzor adatait kiolvassa, majd továbbítsa azokat a megfelelő MQTT témára. A programban lehetséges befolyásolni a szenzorkiolvadások között eltelt legrövidebb időt, ilyen módon befolyásolható a mintavételezési sebesség.

A mérőegység által közvetített adatokat egy számítógépen futó Node JS alapú szerver fogadja úgy, hogy ez a szoftveregység is feliratkozik a megfelelő MQTT témára és amikor a bróker azon adatot továbbít, azt eltárolja. Ezen túl egy másik témára is feliratkozik, amelyen azt lehet jelezni, hogy egy mérés mikor kezdődik és fejeződik be. A teljes folyamat a mérés során a következő:

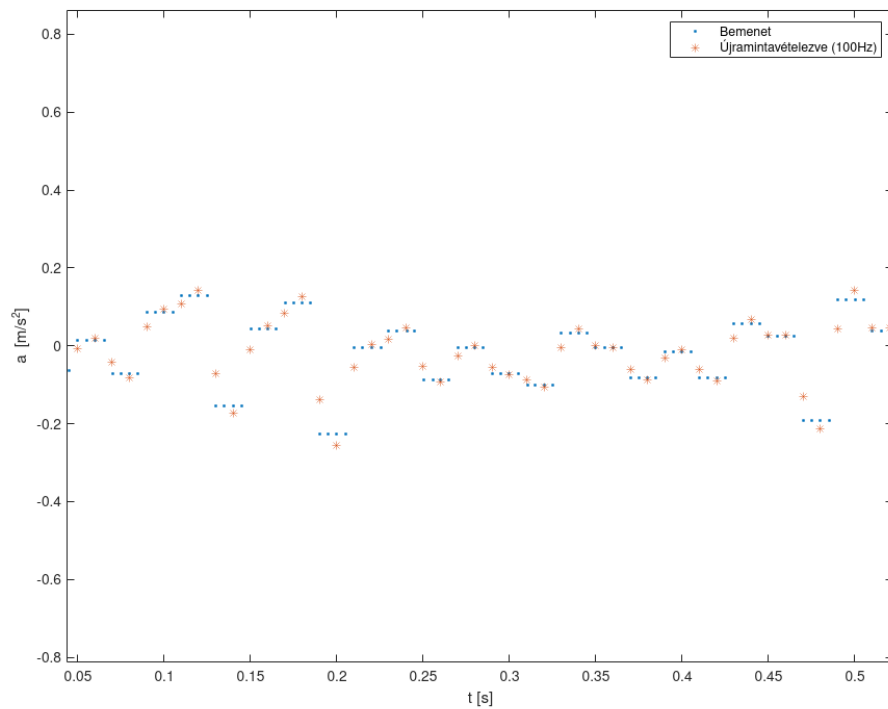
1. Jelzés érkezik, hogy elkezdődik a mérés
2. Folyamatos adatfogadás, azok átmeneti tárolása memóriában
3. Jelzés érkezik, hogy a mérés befejeződött, az átmenetileg elmentett adatok a háttértárra íródnak, a bejövő adatokat a szoftver ignorálja

Tehát a mérőegység adatait eltároltuk, azokat fel kell dolgozni. Azonban jelenleg csupán a gyorsulásmérő, giroszkóp és magnetométer adatait ismerjük, ezeket közvetlenül nem tudjuk hasznosítani.

Az első lépésként a kiugró értékek a hozzájuk legközelebb álló nem kiugró értékkel helyettesítésre kerülnek. Ezután következik a vett adatok újramintavételezése. Erre azért van szükség, mert a használni kívánt szenzorfüziós megoldás fix mintavételezési frekvenciát igényel a pontos működéshez, ez azonban a valóságban nem garantálható. Továbbá az adattovábbítás sem tökéletes, ugyanis bár a Wi-Fi kapcsolat stabil állapot biztosít, de az adatok gyors kiolvasása miatt nincs lehetőség például az elvesztett csomagok újraküldésére, így a szolgáltatásminőség (QoS) legfeljebb „legjobb szándék” (best effort) lehet. Maga az újramintavételezés azt jelenti, hogy a vett adatokat interpolálva „mintavételezünk” időben egységes lépésközönként.



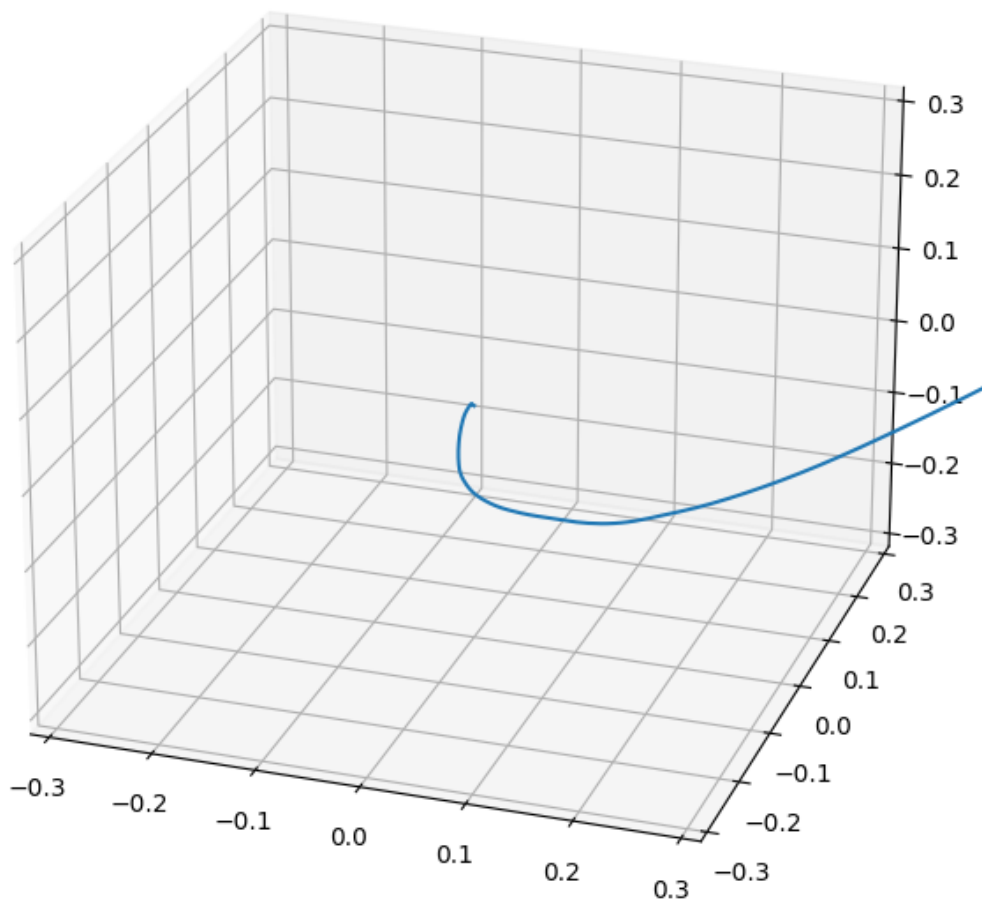
18. ábra. a) Az egyes mintavételek időpontja a mérés kezdete óta [s] b) Az egyes mintavételek között eltelt idő [s].



19. ábra. Az eredeti és az újramintavételezett adatok

Ezután végrehajtjuk a szenzorfüziót. Az egyszerűség kedvéért a Matlab „ahrsfilter” nevű eszközét használjuk erre. Ennek segítségével megkapjuk az orientációt, aminek segítségével már kiszámítható a gravitációs komponens nélküli gyorsulás is, még hozzá úgy, hogy a gyorsulásértékeket a kapott orientáció alapján elforgatjuk, majd kivonjuk belőle a gravitációs komponens, amelynek az értéke fix. Ezután a zajcsökkentés érdekében még aluláteresztő szűrőt alkalmazunk, majd a felesleges adatrészeket levágjuk, hogy a fennmaradó zaj minél kevésbé torzítsa a kapott eredményt.

Az így kapott adatokat végül a korábban már elkészült programba importáljuk és ott a SIBHA algoritmus felhasználásával a kívánt végponthoz igazítjuk.



20. ábra. Az adatfeldolgozás végén előálló kimenet

subsectionHardver Amint a korábbiakból már részben kiderül, a hardver fő részei az alábbiak:

- TDK IveniSense MPU-9250 IMU
- ESP8266 alapú mikrokontroller egység
- Akkumulátor

- 3D nyomtatással készült gömb alakú ház

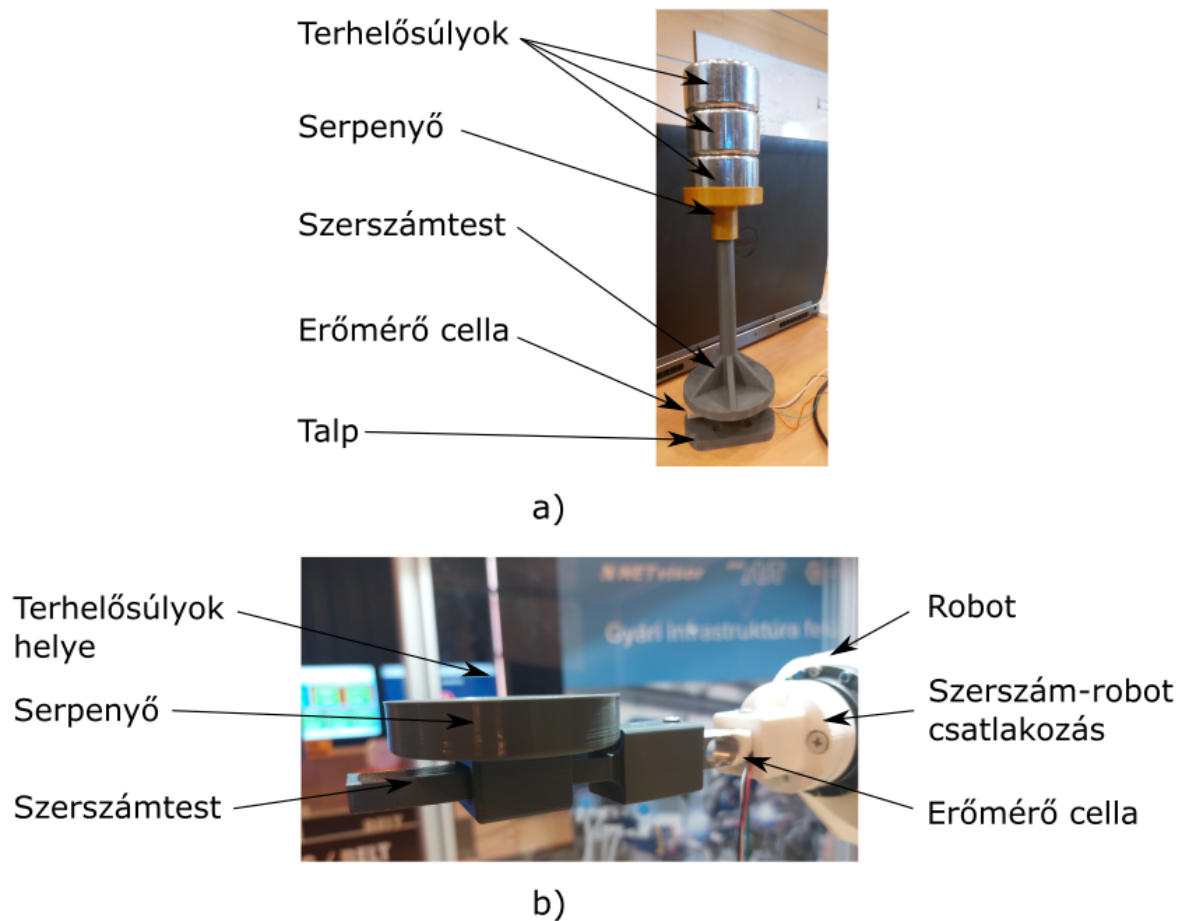
illetve egyéb működéshez szükséges eszközök. Az elektronikai eszközök csatlakozását egy saját fejlesztésű NYÁK biztosítja.

### **3.5. A mérőeszközök kalibrációja**

A mérések megkezdése előtt szükség volt a mérőeszközök kalibrálására. Az erőmérő cellát és az aktív nyomjelzőt is kalibráltuk.

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.)

Külön kalibrációt végeztünk az 1. típusú mérésnél alkalmazott penetrációs ellenállásméréshez szükséges eszköz (21. a) ábra), és a 2. mérésnél alkalmazott egyszerű hasáb alakú szerszám vízszintes húzásához szükséges eszköz esetében (21. 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.

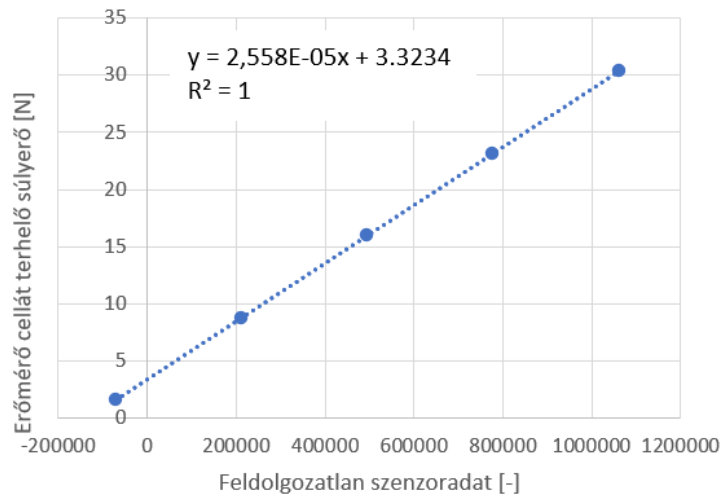


21. ábra. A penetrométer szerszám felépítése kalibráció során.

A kalibrációk során terheletlen állapotban valamint legalább 4 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 szenoradatokat. Így kaptuk az 22. ábra szerinti kalibrációs görbét.



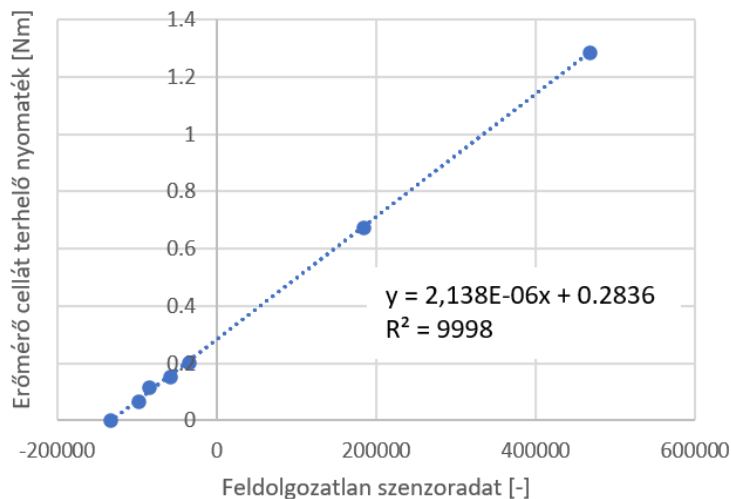
22. ábra. A penetrométerre szerelt erőmérő cella kalibrációs egyenese.

Az átszámítás képlete ez esetben a következő:

$$F_t = m \cdot g$$

Ahol  $F_t$  a terhelőerő N-ban,  $m$  a terhelőtömeg kg-ban,  $g$  a gravitációs állandó értéke ( $9,81m/s^2$ ).

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 23. ábrán.



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



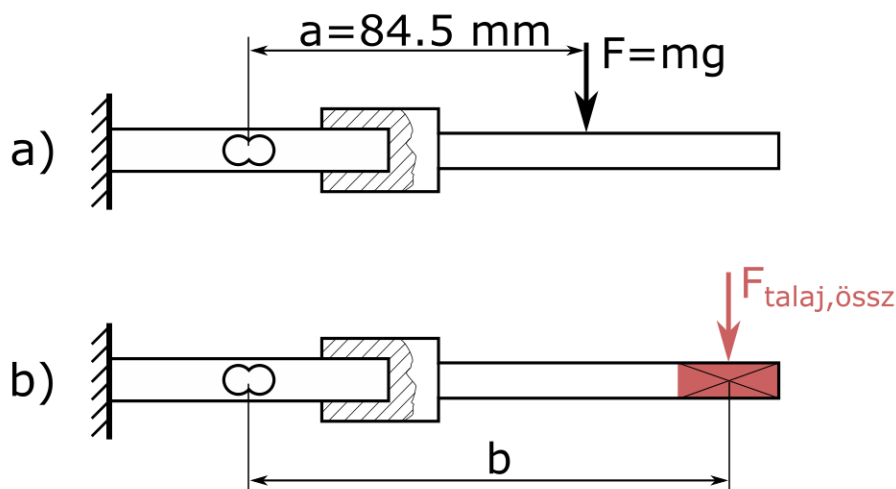
A számítások menete ez esetben a következő: A súlyerőt ugyancsak az előző esetben bemutatott képlet alapján határozzuk meg:

$$F_t = m \cdot g$$

A mérőcella mérő részében ható nyomatékot pedig az erő és az erő hatásvonalától a cella mérőrészéig tartó távolsággal szorozva kaptuk meg a 24. ábra szerint.

$$M = F_t \cdot a$$

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



24. 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 24. b) ábrán pirossal jelszett felületen terheljük. Ezen felület középpontjában feltételezzük a szerszámot terhelő eredő erőt, melyet a következő képlettel kaphatjuk meg:

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

Az elmozdulásmérő eszköz kalibrációjával kapcsolatban két dologról beszélhetünk: az egyik a felhasznált szenzor kalibrációja, a másik pedig az előfeldolgozás eredményeinek (tehát az orientáció és gravitációs komponens nélküli gyorsulás) kalibrációja.

### 3.5.1. Szenzorkalibráció

A gyorsulásmérő és a giroszkóp kalibrációja hasonló. Mindkettő azon alapszik, hogy veszünk adatokat egy ismert helyzetben (a valóságban ez azt jelenti, hogy a szenzor mozdulatlan) és megmérjük, hogy a vett adatok átlaga mennyiben tér el a kívánt helyzettől, majd a ezzel az értékkel minden vett adatot eltolunk. A mi esetünkben a kalibráció a mérés után, a már vett adatokból történik, ennek csupán annyi a feltétele, hogy legyen adatunk olyan esetből, amikor az adatgyűjtő eszköz egy helyben állt (a mi esetünkben legalább 100 adatot veszünk így, hogy kompenzálni tudjuk a szenzorok zaját). A magnetométer kalibrációja már összetettebb feladat, azonban a kísérleteink azt mutatták, hogy a mi céljainkhoz nincs szükség ennek elvégzésére, mivel erre akkor lenne igazán szükségünk, ha abszolút orientációra lenne szükségünk, esetünkben azonban a kezdeti orientáció mindig ismert és a mérések folyamán úgy helyezzük el a mérőeszközt, hogy a szenzor vízszintesen legyen.

### 3.5.2. Előfeldolgozás eredményeinek kalibrációja

Az előfeldolgozás kétféle értéket állít elő, az orientációt illetve a gravitációs komponens nélküli gyorsulást. Az előbbit kvaternió formában kapjuk meg, és úgy értelmezzük az adatokat, hogy mindig az eszköz kiindulási helyzetét vesszük a „nulla elforgatásnak”, azaz az  $[1\ 0\ 0\ 0]$  kvaternió  $([w\ x\ y\ z])$ . Ebből kiindulva előállítható egy „igazító” kvaternió olyan módon, hogy az első mért kvaternióból kivonjuk a nulla elforgatás számnégyesét. Az így előálló  $[w_a\ x_a\ y_a\ z_a]$  kvaterniót ezután minden mért elforgatásból kivonjuk, így megkapjuk az elfordulást a mérés világkoordináta-rendszerében (ami tehát  $[w_o - w_a\ x_o - x_a\ y_o - y_a\ z_o - z_a]$ , ahol  $q_o$  az kiindulási kvaternió).

A gravitációs komponens nélküli gyorsulás kalibrációja hasonlóan működne a korábban már említett gyorsulásmérő- és giroszkópkalibrációs eljáráshoz. Azonban mivel a SIBHA algoritmus éppen arra alapul, hogy a gyorsulásértékeket addig igazítjuk, amíg az azokból számolt végpont egy meghatározott helyzetbe nem kerül, így lényegében pontosan a kalibrációs feladatot hajtjuk végre, csak nem nulla értékhez, hanem a második integrál várt értékéhez igazítva.

## 3.6. A mérések menete

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 az 3.6. táblázat szerint. Mértünk  $2\text{cm}^2$ ,  $3,33\text{cm}^2$ , és  $4\text{cm}^2$  - es projektált keresztmetszettel rendelkező  $60^\circ$ -os kúpszöggel rendelkező mérőkúppal. Minden mérés előtt biztosítottuk, hogy a talaj állapota megközelítőleg azonos módon legyen visszaállítva. A penetrációs ellenállás mérések során  $65\text{ mm/s}$ -os sebességet

állítottunk be. és 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.

1. táblázat. A penetrációs ellenállás során alkalmazott kúpok mérete

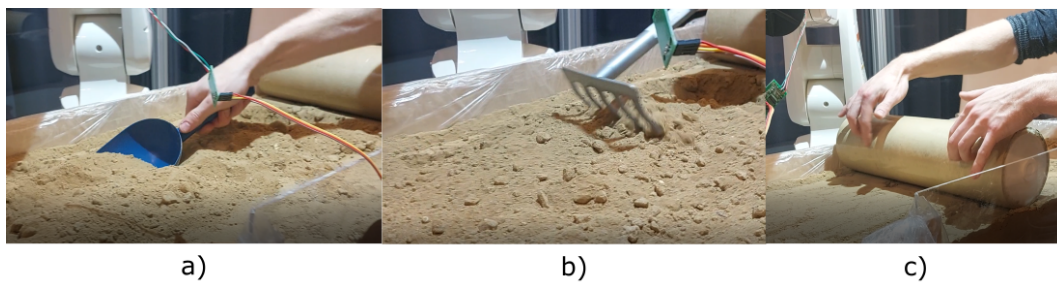
| Mérés sorszáma | Mérőkúp<br>mérete [ $cm^2$ ] |
|----------------|------------------------------|
| 4              | 3,33                         |
| 5              | 3,33                         |
| 6              | 3,33                         |
| 7              | 2                            |
| 8              | 2                            |
| 9              | 2                            |
| 10             | 4                            |
| 11             | 4                            |
| 12             | 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 rögzített adatokat. Összesen 12 mérést végeztünk négy mérési sorozatban a 3.6. táblázat alapján. Egy mérési sorozaton belül tehát háromszor mértünk azonos körülmények között. A mérési sorozatok közti különbség a beállított mérési sebesség változtatásából adódott. A talajban a 40mm 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.

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

| Mérés sorszama | Mérési sebesség<br>[m/s] |
|----------------|--------------------------|
| 10             | 0.12                     |
| 11             | 0.12                     |
| 12             | 0.12                     |
| 13             | 0.15                     |
| 14             | 0.15                     |
| 15             | 0.15                     |
| 16             | 0.23                     |
| 17             | 0.23                     |
| 18             | 0.23                     |
| 19             | 0.39                     |
| 21             | 0.39                     |
| 22             | 0.39                     |

Minden mérés előtt a talajt igyekeztünk azonos állapotba hozni a 25. ábrán. 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 végiggörgettünk a talaj felületén.



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

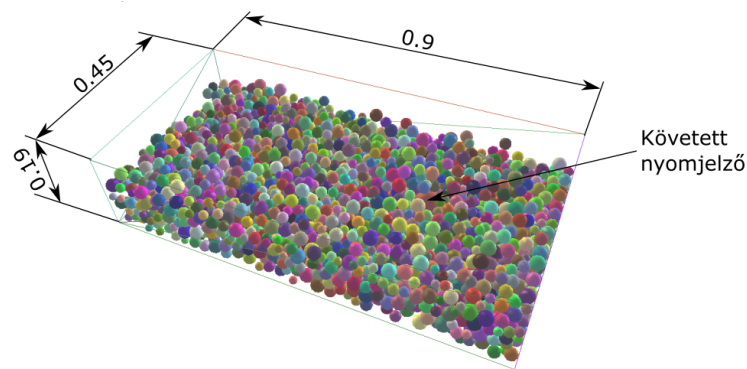
### 3.7. Szimulációk diszkrét elemes módszerrel

A diszkrét elemes módszert alkalmazva modellezhető a talaj, mint szemcsés anyag. Szimulációink során a YADE nyílt forráskódú szimulációs szoftvert alkalmaztuk.

Mind a talajellenállás mérések eredményei, mind a talaj áramlását jellemző kirajzolt trajektóriák lehetővé teszik a DEM talajmodellek kalibrálását. (Utóbbira az irodalomban eddig még nem záláltunk példát.)

A DEM modellünk felépítése melyen később a vizsgálatokat végeztük a következő módon történt:

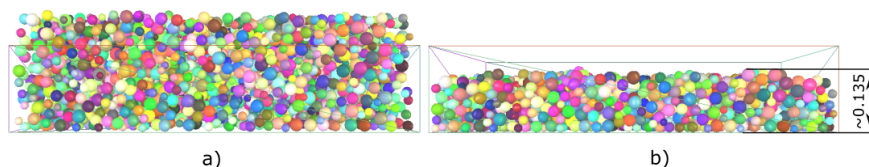
1. A modellünket 1:1 méretarányban alkottuk meg a 26). ábra szerint. Létrehoztunk egy akkora talajvályút, melyet a mérések során is alkalmaztunk. A modellben gömb alakú elemeket alkalmazva modelleztük a talajt. Az elemek méretei ( $r_{Mean}=0.035$ ) a az elemméretek szórását ( $r_{RelFuzz}=0.3$ ) értékben lettek meghatározva.



26. ábra. Méréseink alapján felállított szimulációs modell. A méretek m-ben értendők.

2. Generáltunk egy laza szemcsés halmazt, melyben belül elhelyeztük aktív nyomjelzőnket is a valóságnak megfelelő méretben és pozícióban.

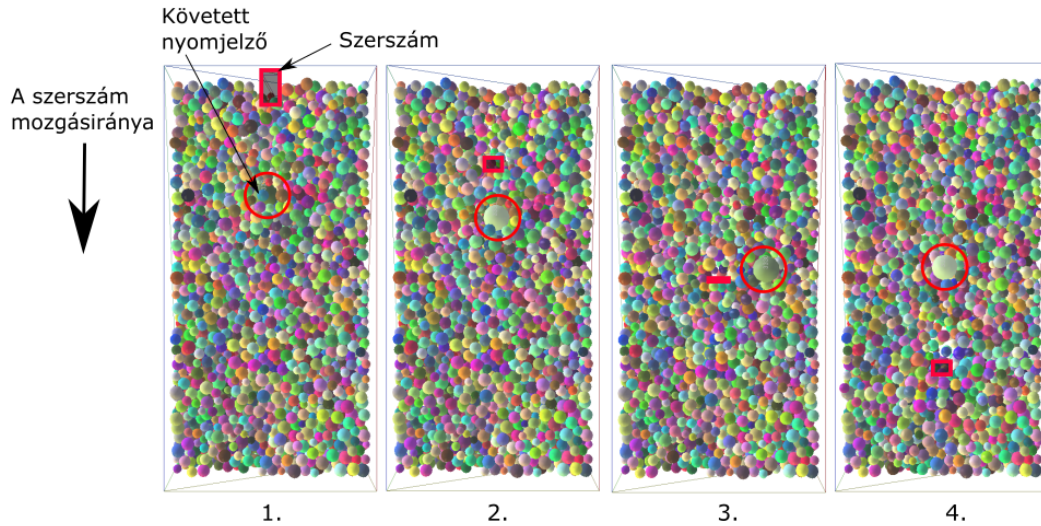
3. A generált laza halmazt a talajvályúba ülepítettünk. Így elértük, hogy legyen egy ülepített halmazunk, melyben szerepel a nyomjelzőnk, azonban azt nem tudtuk meghatározni pontosan a kezdeti beállításokkal, hogy hova essen a nyomjelzőnk középpontjának koordinátája. Ebből kifolyólag több ülepítési kísérlet után közel a valós méréseinkkel azonos pozícióba tudtuk ülepíteni a halmazzal együtt a nyomjelzőnket. Végül a halmazt felső elemeit letöröltük hogy megfelelő magasan legyen az ülepített halmaz a vályún belül. Minden szimulációs kísérlet során ezen generált halmazgeometrián végeztünk. Ez látható a 27. ábrán.



27. ábra. a) Az ülepítetlen halmaz modellje oldalnézetben, b) az ülepített halmaz modellje.

Modellt állítottunk kapcsolt méréseinkre, mikor vizsgáltuk a talaj ellenállását egyszerű hasáb alakú szerszám vízszintes behatolásával szemben. A fizikai méréseink során

alkalmazott szerszámgeometriát húztuk végig ugyanazon sebességgel modellünkben is. Közben regisztráltuk virtuálisan is ugyanazon értékeket, mint a fizikai méréseink során: a szerszámra ható erőt, valamint a modellben lévő nyomjelző koordinátáit és elfordulását. A kapcsolt mérés szimulációjának folyamatát mutatja be a 28. ábra.



28. ábra. A kapcsolt mérés szimulációjának folyamata felülnézetben.

A modellünkben lehetséges a mérések eredményeit alapul véve a a szemcsés anyag kapcsolati paramétereit úgy állítani, hogy a modellünk viselkedése közelítse a méréseink során alkalmazott talaj tulajdonságait. Jelen dolgozatunkban a szakirodalomban talált értékek alapján állítottuk be első modellünket a 3.7. táblázatban feltüntetett értékekkel.

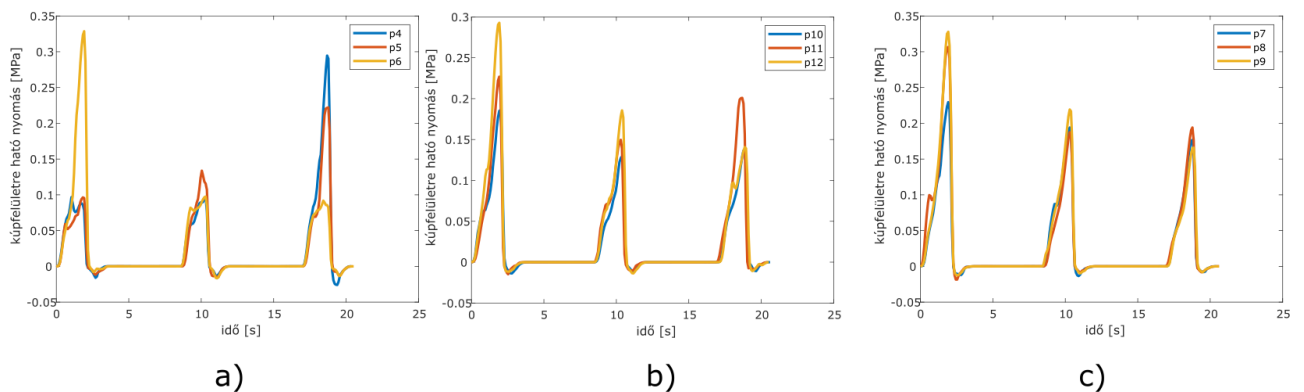
3. táblázat. Első modellünkbe beállított modellparaméterek.

| Mérés sorszáma   | Mérőkúp<br>mérete [ $cm^2$ ] |
|--|------------------------------|
| Szemcsék száma [db]  | 3300                         |
| Sűrűség [ $kg/m^3$ ]   | 2700                         |
| Elem típusa  | Ball                         |
| Rugalmassági modulus ( $E_c$ ) [Pa]                              | $5 \cdot 10^6$               |
| Poisson-tényező[-]   | 0.4                          |
| Generált szemcseméret [mm]                                       | 0.035                        |
| Normálirányú kohézió [Pa]  | $1 \cdot 10^4$               |
| Nyíróirányú kohézió [Pa]   | $1 \cdot 10^4$               |
| Belső súrlódási szög (P-W),[°]                                   | 30                           |
| etaRoll [-]  | 0.6                          |
| etaTwist [-]   | 0.6                          |
| Globális csillapítás [-] az ülepítés során                       | 0.8                          |
| Globális csillapítás [-] a szimulációs mérések során             | 0                            |
| A falra vonatkozó sűrűség [ $kg/m^3$ ]                           | 2700                         |
| A falra vonatkozó Rugalmassági modulus ( $E_c$ ) [Pa]            | $5 \cdot 10^6$               |
| A falra vonatkozó mikromechanikai Poisson-tényező( $\alpha$ )[-] | 0.4                          |
| időlépés   | $9.76 \cdot 10^{-5}$         |

## 4. Az eredmények bemutatása

### 4.1. A penetrációs kísérletek eredményei

A penetrációs kísérletek eredményeit mutatja be a 29. ábra. Az eredmények a következő képen 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 "tűskét" láthatunk. Ennek oka, hogy egy mérésen belül három különböző pontban mértük a talaj ellenállását. Ugyanazon mérést pedig 3 alkalommal ismételtünk meg. Jellemzően egy "tüske" növekvő szakaszához tartozik a szerszám talajba történő függőleges behatolása, csökkenő szakaszához pedig a szerszám kiemelése.



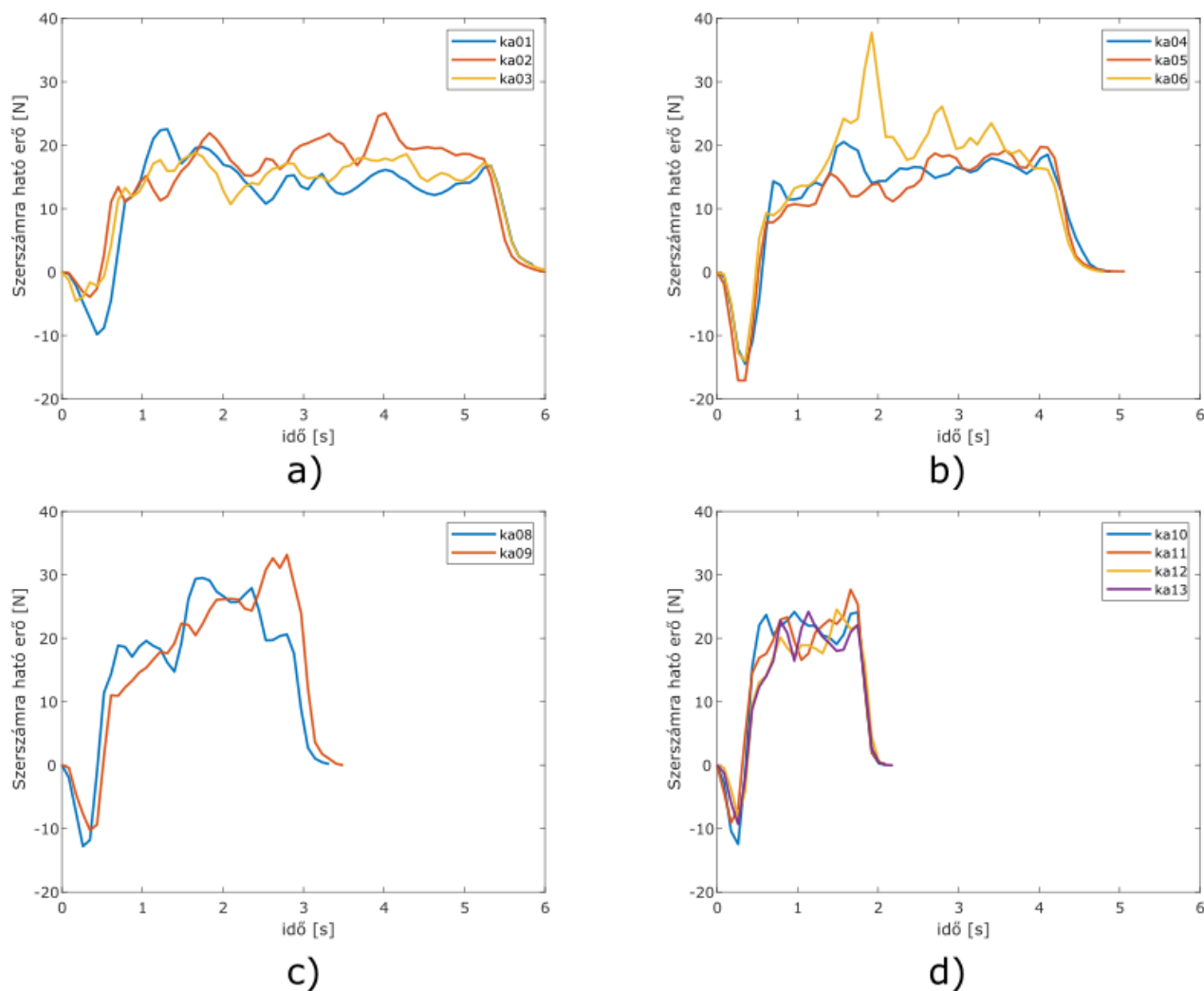
29. ábra. A penetrációs mérések eredményei: a)  $2\text{cm}^2$ -es mérőkúp esetén, b)  $3.33\text{cm}^2$ -es mérőkúp esetén, c)  $4\text{cm}^2$ -es mérőkúp esetén.

Érdekes megfigyelés, hogy a legkisebb mérőkúp esetében többnyire kisebb penetrációs ellenállásokat mértünk. A nagyobb mérőkúpok esetében viszont függetlennek tűnik az alkalmazott kúpmérettől a penetrációs ellenállás értéke. Az  $2\text{cm}^2$ -es kúpméretnél a kilenc mérésből 3 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.



## 4.2. A kapcsolt mérés eredményei

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.



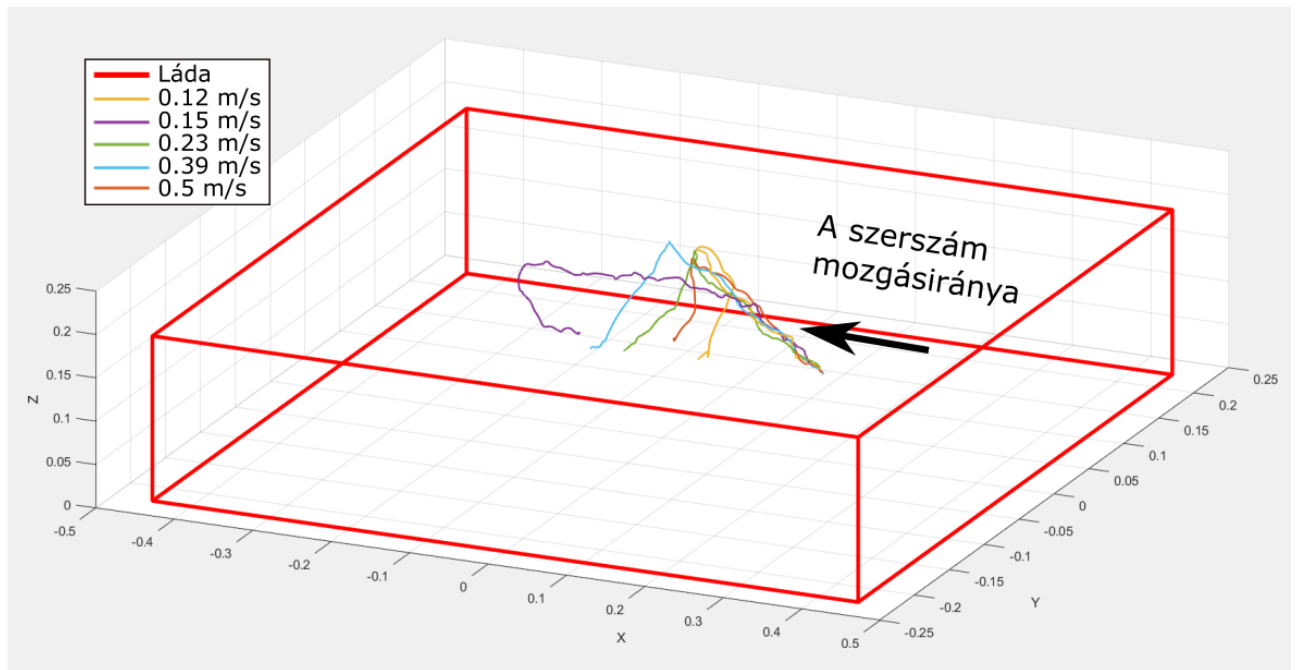
30. ábra. A húzott szerszámra ható erő: a) 0.12 m/s-os sebesség esetén, b) 0.15 m/s-os sebesség esetén, c) 0.23 m/s-os sebesség esetén, d) 0.39 m/s-os sebesség esetén.

Az 30. ábrát tekintve, összesen négy mérési sorozatot láthatunk. Négy különböző szerszám sebességgel végeztük a méréseket. Megfigyelhető a mérések kezdetén a diagramokban az erőértékeket tekintve egy negatív kezdeti szakasz. Ezen a szakaszon tolta bele a robot a talajba a szerszámot. Érdekes, hogy a sebesség növelésével a 30. árba b) és c) diagramját összehasonlítva kis mértékű szerszámra ható erőnövekedés tapasztalható. Tovább növelve a sebességet azonban kis mértékű erőcsökkenésre lehetünk figyelmesek (30. árba c) és d)). Valamint megfigyelhető különösen a 30. 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. A mérések során megfigyeléseink szerint a nyomjelző ütközött a szerszámmal, miközben a szerszám a talaj felszínére toltta azt. Ez azonban nem látszik az erőadatokat tekintve.

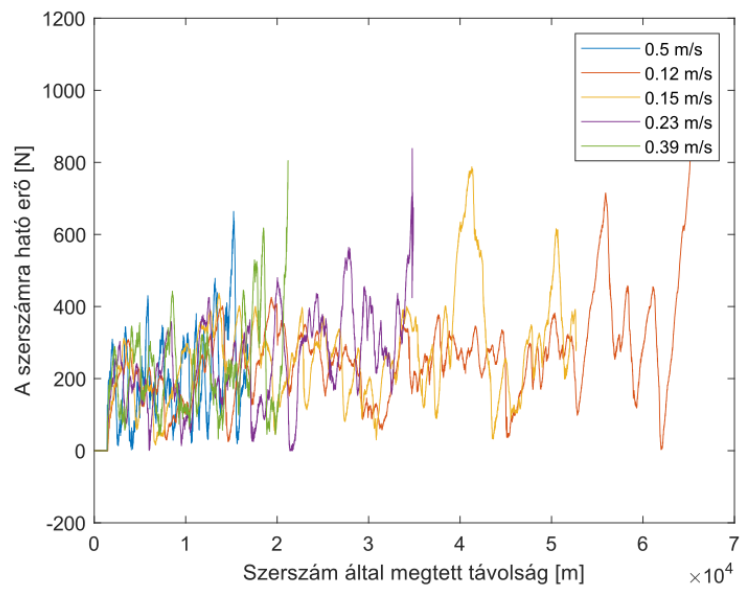
### 4.3. A szimulációk során kinyert eredmények

A szimulációk során a korábban a 3.7. táblázatban bemutatott kezdeti paraméterlistát alkalmaztuk a talaj modellezéséhez. A 2. típusú mérést szimuláltuk, mikor a szerszámot vízszintesen húzzuk a talajban. Öt szimulációt futtattunk le azonos ülepített halmazgeometriában. Az 5 szimuláció során a fizikai mérésekhez hasonlóan a szerszám sebességét állítottuk. Az így nyert eredményeket mutatjuk be a 31. és a 32. ábrán. Megfigyelhető, hogy a szimulációban jelentősen befolyásolta a nyomjelző által bejárt útvonalat a szerszám sebességének változása.



31. ábra. A különböző sebességekkel szimulált szerszámmozgás hatására a nyomjelző által bejárt pálya.

A szimulációban a szerszámra ható erő alakulása körülbelül egy nagyságrenddel nagyobb értékeket mutat. Jellegre azonban hasonló a görbék menete.



32. ábra. A különböző sebességek esetén a szimulált szerszámra ható erő, annak elmozdulása függvényében.

## 5. Kitekintés

A nem átlátható közegen belüli elmozdulások, áramlások feltárására a szakirodalomban tapasztalataink alapján még számos kiaknázatlan lehetőség rejlik. A bemutatott módszer sok lehetőséget nyit meg a halmazelmozdulás alapú szemcsés anyag kalibrációjához.

A vegyiparban, gyógyszeriparban, mezőgazdaságban, hadiparban és űrkutatásban is szükség lehet nem átlátható közeg elmozdulásainak, áramlásainak vizsgálatára. A talaj modellezésével lehet optimalizálni a talajművelő szerszámok geometriáját már a tervezés során. De alkalmazható a talajmodellezés a honvédségi járművek-talajjal történő interakciójának vizsgálatához is. Továbbá alkalmazható lehet a talajmodellezés más bolygók talajának vizsgálata során is az űrkutatásban.

A bemutatott módszert az eszközöket és a modellt is nagyon sok pontban lehetséges továbbfejleszteni. Például az adatgyűjtő eszköz tovább kicsinyíthető. Mérések során több adatgyűjtő eszközzel is lehetne mérni egyszerre. Az adatgyűjtő dinamikai kiegyensúlyozatlanságának problémája is megoldásra vár. A mérések utáni trajektóriaalapú modellkalibráció várhatóan precízebbé teszi a szemcsés anyagok modellezését.

## 6. Összegzés

Összeállítottunk egy mérési módszert nem átlátható közegek belső elmozdulásának, áramlásainak vizsgálatára és numerikus modellezésére.

Megterveztünk és gyártottunk egy olyan adatgyűjtő mérőberendezést amely segítségével nem átlátható közeg belső mozgásai, áramlásai időben lekövethetők. Így mérések során lehetséges következtetéseket levonni a közeg belső mozgásairól, áramlásairól.

Alkalmaztuk a megtervezett mérőberendezést a gyakorlatban egy speciális esetben kapcsolt mérés során, mikor a talaj áramlását vizsgáljuk egy szerszám talajban történő húzása közben.

Valamint megalkottunk egy olyan szimulációs környezetet DEM-ben mellyel lehetséges a talaj anyagának kalibrálása több eddig is alkalmazott paraméter mellett a mérőeszközünkkel mért talajon belüli elmozdulásjellemzők segítségével.

Végül iránymutatást adtunk, miként alkalmazható mérőberendezésünk jövőbeli kutatások során talajmodellek kalibrálásához.

### 6.1. Az elmozdulásmérő rendszer továbbfejlesztése

Bár a hardverrel kapcsolatban sikerült megvalósítanunk az előző dolgozatban említett méretcsökkentést, célunk az eszköz további fejlesztése. Egyrészt elképzelhető további méretcsökkentés, de ez jelenleg nem tartozik a prioritásaink közé. Egyik tervünk, hogy többféle formájú eszközházzal is kísérletezzünk (mivel ezek 3D nyomtatással készülnek, ez a jelentőségéhez képest egy valószínűleg könnyen kivitelezhető feladat).

A feldolgozást tekintve azt mondhatjuk, hogy a szoftver jelenleg széttagolt. Ez fejlesztéskor és a kísérletek végrehajtásakor logikus lehet, hiszen ilyen módon kihasználhatók a különböző programnyelvek és környezetek előnyei továbbá egyszerű lehet komponensek lecserélése vagy újak behozatala. A tényleges adatfeldolgozás során azonban ez a felépítés nehézkessé teszi a programrendszer használatát. Emiatt terveink között szerepel, hogy a szoftvert egységesítsük és a végfelhasználó képes legyen a teljes mérést levezényelni az adatgyűjtés vezérlésétől a kiszámolt trajektória megjelenítéséig. Továbbá cél az is, hogy minél több lépést automatikusan el tudjon végezni a program, például legyen képes megtalálni a pontot, amikor a mozgás elkezdődött és vágja le a felesleges adatelemeket önállóan.

Ezentúl már folyamatban vannak olyan kísérletek is, amelyek az itt tárgyalt algoritmikus (és humán inputot igénylő) adatfeldolgozás helyett mesterséges intelligencia segítségével becsülnék a trajektóriát ugyanezen bemeneti adatok alapján.

## Hivatkozások

- [1] K Bagi. A diszkrét elemek módszere. *BME Department of Structural Mechanics, Budapest*, pages 5–12, 2007.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Shafiqur Rahman, Ying Chen, and David Lobb. Soil movement resulting from sweep type liquid manure injection tools. *Biosystems Engineering*, 91(3):379–392, 2005.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Kornel Tamas. The role of bond and damping in the discrete element model of soil-sweep interaction. *Biosystems engineering*, 169:57–70, 2018.
- [15] 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.
- [16] 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.