

# Költséghatékony laboratóriumi talajvizsgáló eszközök fejlesztése

## Developing cost-effective laboratory measurement devices for studying soil-tool interactions

*SZABÓ Bence<sup>1</sup>, WÁGNER Árpád<sup>2</sup>, KOVÁCS László<sup>2</sup> Dr. TAMÁS Kornél<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., MG épület 110, tel.: +36-1-463-2345, fax: +36-1-463-3510, gt3@gt3.bme.hu, www.gt3.bme.hu

<sup>2</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki Kar Automatizálási és Alkalmazott Informatikai Tanszék 1117 Budapest, Magyar tudósok krt. 2., Q. épület B.207. tel.: 463-2870, fax: 463-2871, adminisztracio@aut.bme.hu, www.aut.bme.hu

### Abstract

*At the current stage of our studies a laboratory environment consisting of cost-effective tools for the study of soil and tillage tool interactions was developed. We designed a modular tool set mountable onto a robotic arm and a path tracker system which makes the study of movements within the soil caused by the movement of a tillage tool possible. Successful laboratory soil tests were carried out using the aforementioned tools.*

**Keywords:** Soil-tillage, Soil movements, Soil-tool interaction, Laboratory soil measurement, Additive manufacturing

### Kivonat

*Kutatásunk jelen szakaszában költséghatékony eszközökből álló laboratóriumi környezetet alakítottunk ki a talaj és talajművelő szerszámok kölcsönhatásának vizsgálatára. Robotkarra szerelhető, moduláris szerszámcsoporthoz terveztünk, továbbá megterveztünk egy nyomkövető rendszert, amellyel a talajban történő mozgások vizsgálhatók a szerszám haladásának hatására létrejövő talajmozgás közben. Eszközeinkkel sikeres laboratóriumi talajvizsgálatokat végeztünk.*

**Kulcsszavak:** talajművelés, talajmozgás, talaj-szerszám kölcsönhatás, laboratóriumi talajvizsgálat, additív gyártás.

## 1. Bevezetés

A nagy múltú mechanikai talajművelés alkalmas megfelelő talajállapot előkészítéséhez úgy, hogy a kultúrnövények megfelelően fejlődhessenek. A művelő szerszám geometriája és a művelési paraméterek jelentős befolyással vannak a talajműveléshez szükséges energiára a művelés közben és a talajból a felszínre törő üvegházhatású gázok kibocsátásának mennyiségére, valamint a talajművelés után a talaj vízmegtartó képességére. Ezért a talaj és a művelőszerszám kölcsönhatásának vizsgálata elengedhetetlen a talajművelő szerszámok geometriájának és művelési paraméterek optimalizálásához.

### 1.1. Talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálati módszerei

A talaj-szerszám kölcsönhatás fizikai mérésekkel és numerikus szimulációkkal (például diszkrét elemes módszerrel (DEM)) is vizsgálható [1], [2]. Problémát okoz a fizikai vizsgálatok során, hogy csak korlátozott rálátásunk van a talaj belső rétegeinek mozgására és az eredmények többnyire kvalitatívan értékelhetők, pedig a művelésben megmozgatott talajtömeg szoros összefüggésben áll a talajműveléshez szükséges energiával. A numerikus szimulációk előnye, hogy segítségükkel kvantitatív módon leírható a kölcsönhatás közben a modellezett talaj mozgása. A numerikus talajmodelleket viszont fizikai mérések során meghatározott, talajt jellemző makromechanikai tulajdonságok alapján kell kalibrálni. Ilyen makromechanikai tulajdonságok például a talajban húzott szerszámon mért talajjellenállás, penetrációs ellenállás, illetve a talaj mozgási tulajdonságai.

## 1.2. Talaj-szerszám kölcsönhatás laboratóriumi vizsgálata robotkarral

Számos publikáció található arról, miként vizsgálják a talaj-szerszám kölcsönhatást laboratóriumi körülmények között más kutatók. Például lépegetőrobotok tervezéséhez a robot talpa és a talajvályúban lévő talaj kölcsönhatás vizsgálatában Vanderkop és szerzőtársai [3] saját fejlesztésű három szabadságfokú robotkarral különböző merevségű anyagokból additív módszerekkel gyártott korongok kölcsönhatásait elemezték. Scott és Saaj [4] hattengelyes ipari robottal valósítottak meg lépegetőrobot-lábmozgást és azzal végeztek talaj-szerszám kölcsönhatásvizsgálatokat. Mindkét kutatás kölcsönhatások közben a lábra ható erőt, és a talaj deformációját is vizsgálta. Yeomans és szerzőtársai [5] különböző talpgeometriákkal végeztek méréseket saját építésű háromtengelyes robotkarral. Yeomans és Saaj [6] megjelentették azt is, milyen pályán mozog egy lépegetőrobot talpa, miközben az a talajjal kölcsönhatásban van. Azonban nem találtunk olyan kutatást, melyben a talaj és a talajművelő szerszám kölcsönhatását ipari robotkarral szerelt szerszámok segítségével végezték volna.

## 1.3. Talajmozgás vizsgálatának módszerei talaj és talajművelő szerszám kölcsönhatásokban

A szakirodalomból kiderül, hogy fizikai mérések során a talaj mozgását különböző módszerekkel vizsgálták a talaj-szerszám kölcsönhatás során. Ezen módszerek négy fő csoportba sorolhatók. Megkülönböztethetők statikus [7]–[9] és dinamikus [10] mérések. Továbbá a talaj kialakult felszínét vizsgáló módszerek [8], [9], [11], valamint nyomjelzős vagy nyomkövetős vizsgálati módszerek [7], [10], [12]–[14]. Statikus mérésneként hivatkozunk a továbbiakban arra, amikor talaj-szerszám kölcsönhatása előtti talajállapotot vagy talajszerkezetet a kölcsönhatás után kialakult talajállapottal vagy talajszerkezettel hasonlítják össze. Dinamikus vizsgálatnak nevezzük, amikor a talaj-szerszám kölcsönhatás közben vizsgálják a talaj mozgását az idő függvényében. A talaj felszínének vizsgálata során általában valamilyen mechanikus [11] vagy digitális [8], [9] elvű szkennelési módszert alkalmaznak. Nyomjelzős vagy nyomkövetős vizsgálatok során pedig a talaj felszínére [9], [10], [15], [16] vagy a talajba [7], [12], [14], [17], [18] helyezett passzív vagy aktív eszköz mozgásai alapján vonhatók le következtetések a talaj mozgására vonatkozóan. Nyomjelző lehet bármilyen passzív merev test (például tömör alumíniumkocka), nyomkövető alatt pedig olyan aktív eszközt értünk, mely valamilyen szenzorral van felszerelve.

## 1.4. Példák aktív nyomkövetős vizsgálatokra a tudomány más területeiről

Annak ellenére, hogy a tudomány számos más területén már alkalmaznak gyorsulásmérő-giroszkóp-magnetométer szenzorral szerelt nyomkövető eszközöket, aktív nyomkövető alkalmazására nem találtunk példát talajmozgás vizsgálatokban talaj-szerszám kölcsönhatás közben. Például sziklaomlás [19], vízfelszínen úszó fák viselkedésének vizsgálatára [20], továbbá víz alatti hordalék [21]–[24], földcsuszamlás [25], gépekben áramló szemcsés közegek vizsgálatára [26]. Azonban csak nagyon kevés esetben alkalmazták az aktív nyomkövetővel mért adatokat a szenzor által bejárt pálya meghatározásához [19], [25].

## 1.5. Célok

A kutatás jelenlegi céljaként tűztük ki, hogy laboratóriumi környezetet alakítsunk ki, melyben költséghatékony eszközökkel lehetséges a talaj és a talajművelő szerszám kölcsönhatásának vizsgálata. Fontos kritériumként határoztuk meg, hogy a kialakított laboratóriumi környezetben az idő függvényében a talaj mozgási tulajdonságai, a vontatott szerszámra ható erő és a talaj penetrációs ellenállása vizsgálhatók legyenek.

# 2. Anyagok és módszerek

## 2.1. A laboratóriumi környezet alapjául szolgáló öttengelyes robot

Saját laboratóriumi környezetünket a BME Ipar 4.0 Technológiai Központjában alakítottuk ki. A kialakított mérési környezet alapja egy DENSO VS-6556/6577 gyártmányú öttengelyes robotkar, melyre különböző szerszámokat terveztünk.

## 2.2. A talajvályú tervezése

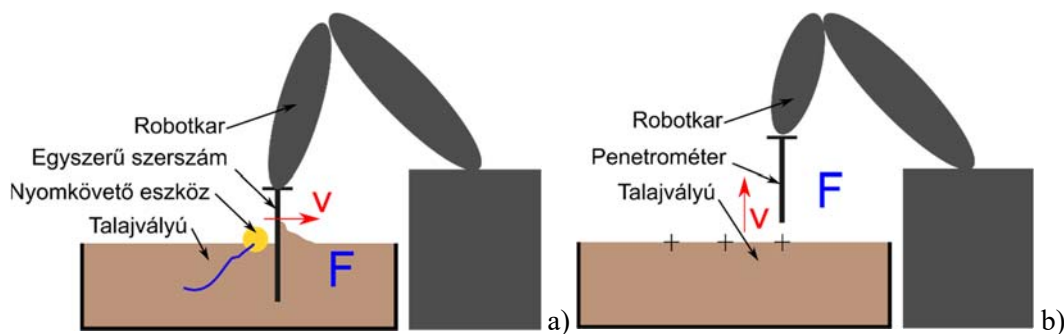
A robotkar elé talajvályút készítettünk, melyben elvégezhető a talajban a különböző vizsgálatok. A talajvályút úgy méreteztük, hogy lehetőleg minél jobban kihasználja a rendelkezésre álló teret a robotkar hatótávolságában, így azt 900 mm hosszúra, 450 mm szélesre és 190 mm mélyre terveztük 6 mm vastagságú

rétegelt lemezből. A talajvályú elülső oldalára átlátszó felületet terveztünk. Ennek segítségével vizsgálható, hogy a vizsgált talajban a falhatás milyen közelségben érvényesül. A talajvályú bélésére fóliát terveztünk.

### 2.3. Talaj-szerszám vizsgálatokhoz tervezett eszközök és mérési tervek

Robotkarral elvégezhető, céljaink szerinti talaj-szerszám kölcsönhatás-vizsgálatok végrehajtásához három saját eszköz megtervezésére van szükség. Egy vízszintesen a talajban húzható, egyszerű, hasáb alakú szerszámra, mely a robotkarral csatlakoztatható. Egy penetrométerre, mely szintén a robotkarral csatlakoztatható, illetve egy nyomkövető adatgyűjtő eszközre, mely a talajba helyezve információt szolgáltat és továbbít saját mozgásáról a mérés során. A mérőeszközök tervezésénél törekedtünk a költséghatékonyságra. Az eszközök szerkezeti elemeit úgy terveztük meg, hogy azok additív gyártással készülhessenek ömledéktrétegzéses technológiával (FDM) politejsavból (PLA). A talaj és a szerszám kölcsönhatásának vizsgálatában fontos a szerszámot terhelő erők mérése. Így minden robotkarral szerelhető alkalmazott szerszámot egy hajlító igénybevétellel 5 kg-ig terhelhető erőmérő cellával szereltünk fel.

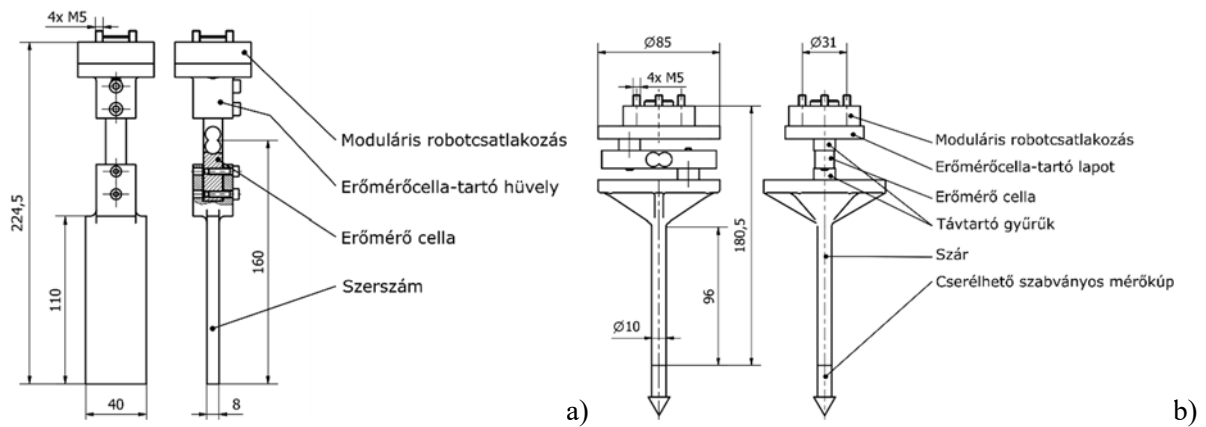
Kétféle mérési tervet dolgoztunk ki (1. ábra). Először az 1. a) ábra szerint a talajvályúban a robotkar segítségével az egyszerű alakú szerszámot vízszintesen – lehetőség szerint egyenes sebességgel – mozgatva a talajban mértük a szerszámra ható talajellenállást, közben pedig egy aktív nyomkövetővel gyűjtöttünk talajt jellemző mozgásadatokat. Ezen adatgyűjtő segítségével meghatározható a nyomkövető által bejárt pálya az idő függvényében. Másodszor az 1. b) ábra szerint a robotkar segítségével vizsgáltuk a talaj penetrációs ellenállását, azaz függőlegesen a talajba hatoló különböző méretű szabványos kúpos testek ellenállását.



1. ábra. A kétféle mérési terv. a) Egyszerű szerszám vízszintes húzása közben szerszámellenállás-mérés és talajelmozdulást jellemző adatok gyűjtése. b) Talaj penetrációs ellenállásának mérése.

### 2.4. A robotkarral szerelhető eszközök

A penetrációs ellenállás mérését szabvány rögzíti (NEN 5140: 1996). A méréséhez szükséges egy hosszabb szárra szerelt szabványos kialakítású menettel cserélhető mérőkúp. Ezzel függőlegesen  $2 \text{ cm s}^{-1}$  sebességnél lassabban kell a talajba hatolni. Ezek tudatában terveztük meg saját berendezésünket, az 2. b) ábra szerint. A moduláris robotcsatlakozáshoz egy erőmérőcella-tartó lapot terveztünk, ehhez csavarral csatlakoztattuk távtartó gyűrűn keresztül, vízszintesen az erőmérő cellát. Szintén egy távtartó gyűrű közbeiktatásával csatlakoztattuk a penetrométer szárát. A szár végére menetet nyomtattunk, hogy a mérőkúpok cserélhetők legyenek. (A mérőkúpok projektált keresztmetszete  $2, 3.33, 4 \text{ cm}^2$ .) A szár rész átmérőjét a legkisebb mérőkúp szárának átmérője szerint határoztuk meg. A vízszintesen húzott szerszámra ható talajellenállás méréséhez a moduláris robotcsatlakozáshoz egy erőmérőcella-tartó hüvelyt terveztünk az 2. a) ábra szerint, melybe függőleges helyzetben rögzítettük a cellát. A cella ellenkező oldalára pedig felcsavaroztuk az alkalmazott szerszámot.



2. ábra. Robotkarrá szerelhető talajvizsgáló szerszámok műszaki rajza. a) Talajban húzott egyszerű szerszám és b) penetrométer.

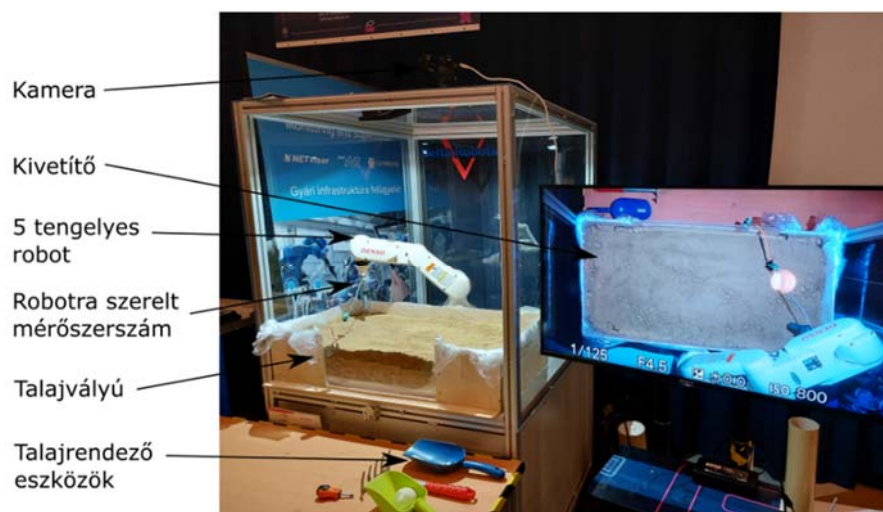
### 2.5. A talaj belső mozgásainak jellemzésére fejlesztett nyomkövető

A talaj mozgási tulajdonságainak vizsgálatához aktív nyomkövető rendszert készítettünk. Ennek központi eleme egy, a talajba helyezhető vezetékes kapcsolat nélkül is működőképes, saját tervezésű adatgyűjtő egység. Ezen adatgyűjtőnek a központi eleme egy úgynevezett IMU (Inertial Measurement Unit), mely egy olyan szenzort jelent, ami képes egyszerre gyorsulás-, giroszkóp- és – jelen esetben – magnetométer adatokat is gyűjteni mindhárom térbeli tengely mentén. Célunk az adatgyűjtő által a mérés során a fentebb említett típusú adatokból visszanyerni, hogy ez az egység a talaj-szerszám interakció során milyen trajektóriát járt be.

A nyomkövető elektronikai alkatrészeit egy saját tervezésű NYÁK fogja össze, illetve ehhez csatlakozik egy adott típusú MPU-9250-es szenzort kifejtő panel is szabványos 2,54mm-es rasztartávolságú tűkesorral olyan módon, hogy az IMU az eszköz geometriai középpontjába essen. A mérések során az elektronikát és az akkumulátort egy 3D nyomtatással készült, gömb alakú, egyik oldalt áttetsző házban helyeztük el. Ennek 4mm vastag fala ellenáll a mérés közben fellépő igénybevételnek, valamint a két részt összekötő menetes kapcsolat meggátolja a talaj bejutását az elektronikához. A már említett áttetsző házrésznek köszönhetően könnyen leolvasható az elektronika LED alapú színkódolt állapotvisszajelzése is.

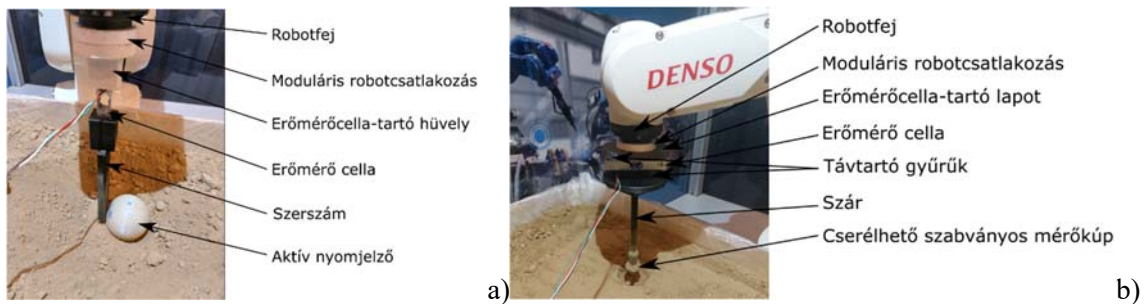
## 3. Eredmények

Az általunk kialakított laboratóriumi környezetet a talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatához a 3. ábra mutatja.



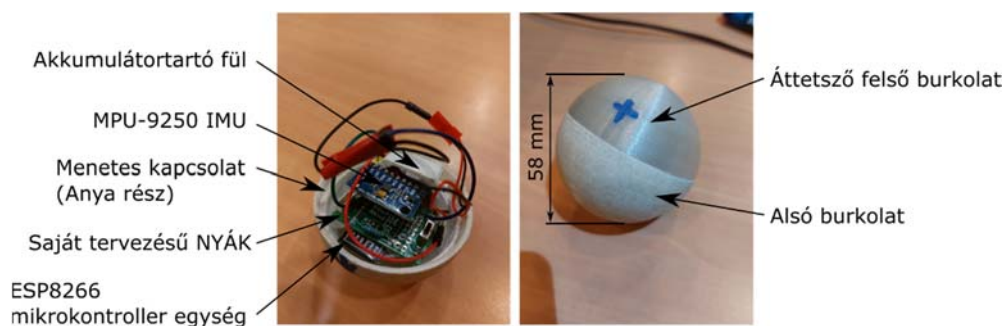
3. ábra. Kialakított laboratóriumi környezet talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatához.

A legyártott és robotkarral szerelt egyszerű szerszámot a 4. a) ábra, illetve a penetrométert a 4. b) ábra szemlélteti.



4. ábra. Legyártott, robotkarral szerelt talajvizsgáló szerszámok. a) Talajban húzott egyszerű szerszám mellett az aktív nyomjelző és b) penetrométer.

A legyártott nyomkövető a 5. ábrán látható.



5. ábra. Legyártott, talajba helyezhető IMU alapú nyomkövető eszköz.

A kialakított laboratóriumi környezetben az elkészített majd kalibrált mérőeszközök segítségével sikeres laboratóriumi talajvizsgálatokat végeztünk.

## 4. Konklúzió

A szakirodalomban található talaj-szerszám kölcsönhatás kutatásokban feltártuk a hiányosságokat. Ezek alapján saját laboratóriumi környezetet alakítottunk ki, saját fejlesztésű eszközökkel, hogy vizsgálni tudjuk a talaj-szerszám kölcsönhatás közben a talaj mozgási tulajdonságait az idő függvényében. A kutatásunk jelen szakaszában a következő következtetéseket vontuk le.

- A kialakított laboratóriumi környezet alkalmas talaj-szerszám kölcsönhatás közben a talaj mozgásának vizsgálatára, és a robotkarral szerelt szerszámra ható talajellenállás mérésére.
- Öttengelyes robotkar alkalmas kis méretű talajvályúban történő talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatára.
- FDM technológiával nyomtatott szerkezeti elemekkel készült robotkarral szerelhető szerszámok alkalmasak a talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatára.
- Robotkar rendelkezésre állása esetén költséghatékonyan reprodukálhatók a robotkarral, illetve a talajba helyezhető mérőeszközök.
- A fejlesztett költséghatékonyan és egyszerűen gyártható mérőeszközök nemzetközi együttműködésre nyitnak lehetőséget talaj-szerszám kölcsönhatás vizsgálatokban.

## 8. Köszönetnyilvánítás

A kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-21-2-II-BME-240 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával, valamint a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

## Irodalmi hivatkozások

- [1] K. Tamás, „The role of bond and damping in the discrete element model of soil-sweep interaction”, *Biosyst. Eng.*, köt. 169, o. 57–70, máj. 2018, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.02.001.
- [2] K. Tamás és L. Bernon, „Role of particle shape and plant roots in the discrete element model of soil-sweep interaction”, *Biosyst. Eng.*, köt. 211, o. 77–96, nov. 2021, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2021.09.001.
- [3] A. Vanderkop, N. Kottege, T. Peynot, és P. Corke, „A Novel Model of Interaction Dynamics between Legged Robots and Deformable Terrain”, in *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, máj. 2022, o. 6635–6641. doi: 10.1109/ICRA46639.2022.9812351.
- [4] G. P. Scott és C. M. Saaj, „The development of a soil trafficability model for legged vehicles on granular soils”, *J. Terramechanics*, köt. 49, sz. 3, o. 133–146, jún. 2012, doi: 10.1016/j.jterra.2011.12.002.
- [5] B. Yeomans, C. M. Saaj, és M. van Winnendael, „MODELLING LEG / TERRAIN INTERACTION FOR A LEGGED PLANETARY MICRO-ROVER”.
- [6] B. Yeomans és C. M. Saaj, „Towards terrain interaction prediction for bioinspired planetary exploration rovers”, *Bioinspir. Biomim.*, köt. 9, sz. 1, o. 016009, jan. 2014, doi: 10.1088/1748-3182/9/1/016009.
- [7] S. Rahman, Y. Chen, és D. Lobb, „Soil Movement resulting from Sweep Type Liquid Manure Injection Tools”, *Biosyst. Eng.*, köt. 91, sz. 3, o. 379–392, júl. 2005, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2005.04.002.
- [8] F. F. Foldager, J. M. Pedersen, E. Haubro Skov, A. Evgrafova, és O. Green, „LiDAR-Based 3D Scans of Soil Surfaces and Furrows in Two Soil Types”, *Sensors*, köt. 19, sz. 3, Art. sz. 3, jan. 2019, doi: 10.3390/s19030661.
- [9] L. Znova és mtsai., „A new hoe share design for weed control: measurements of soil movement and draught forces during operation”, *Acta Agric. Scand. Sect. B — Soil Plant Sci.*, köt. 68, sz. 2, o. 139–148, febr. 2018, doi: 10.1080/09064710.2017.1367837.
- [10] J. Massah, H. Etezadi, B. Azadegan, és S. R. Hassan-Beygi, „Modelling of Soil Displacement Resulting from Sweep during Tillage Operation Using Image Processing”, *J. Agric. Sci. Technol.*, köt. 22, sz. 2, o. 415–424, márc. 2020.
- [11] M. Ucgul és C. Saunders, „Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling”, *Biosyst. Eng.*, köt. 190, o. 58–70, febr. 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.11.022.
- [12] S. Gürsoy, Y. Chen, és B. Li, „Measurement and modelling of soil displacement from sweeps with different cutting widths”, *Biosyst. Eng.*, köt. 161, o. 1–13, szept. 2017, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.005.
- [13] V. Milkevych, L. J. Munkholm, Y. Chen, és T. Nyord, „Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method”, *Soil Tillage Res.*, köt. 183, o. 60–71, nov. 2018, doi: 10.1016/j.still.2018.05.017.
- [14] A. Solhjoui, J. M. Fielke, és J. M. A. Desbiolles, „Soil translocation by narrow openers with various rake angles”, *Biosyst. Eng.*, köt. 112, sz. 1, o. 65–73, máj. 2012, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2012.02.006.
- [15] J. Liu, Y. Chen, D. Lobb, és R. Kushwaha, „Soil-straw-tillage tool interaction: Field and soil bin study”, *Can. Biosyst. Eng. Genie Biosyst. Au Can.*, köt. 49, o. 2.1-2.6, jan. 2007.
- [16] Z. Zeng, X. Ma, Y. Chen, és L. Qi, „Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM)”, *Soil Tillage Res.*, köt. 197, o. 104505, márc. 2020, doi: 10.1016/j.still.2019.104505.
- [17] J. A. Montgomery, D. K. McCool, A. J. Busacca, és B. E. Frazier, „Quantifying tillage translocation and deposition rates due to moldboard plowing in the Palouse region of the Pacific Northwest, USA1Paper presented at International Symposium on Tillage Translocation and Tillage Erosion held in conjunction with the 52nd Annual Conference of the Soil and Water Conservation Society, Toronto, Canada, 24–25 July 1997”, *Soil Tillage Res.*, köt. 51, sz. 3, o. 175–187, aug. 1999, doi: 10.1016/S0167-1987(99)00036-7.
- [18] K. Spokas, F. Forcella, D. Archer, és D. Reicosky, „SeedChaser: Vertical soil tillage distribution model”, *Comput. Electron. Agric.*, köt. 57, sz. 1, o. 62–73, máj. 2007, doi: 10.1016/j.compag.2007.01.014.
- [19] A. Caviezel és mtsai., „Reconstruction of four-dimensional rockfall trajectories using remote sensing and rock-based accelerometers and gyroscopes”, *Earth Surf. Dyn.*, köt. 7, o. 199–210, febr. 2019, doi: 10.5194/esurf-7-199-2019.
- [20] G. Spreitzer, J. Gibson, M. Tang, J. Tunnicliffe, és H. Friedrich, „SmartWood: Laboratory experiments for assessing the effectiveness of smart sensors for monitoring large wood movement behaviour”, *CATENA*, köt. 182, o. 104145, nov. 2019, doi: 10.1016/j.catena.2019.104145.
- [21] E. Akeila, Z. Salcic, és A. Swain, „Smart Pebble for Monitoring Riverbed Sediment Transport”, *IEEE Sens. J.*, köt. 10, sz. 11, o. 1705–1717, nov. 2010, doi: 10.1109/JSEN.2010.2046726.
- [22] O. Gronz és mtsai., „Smartstones: A small 9-axis sensor implanted in stones to track their movements”, *CATENA*, köt. 142, o. 245–251, júl. 2016, doi: 10.1016/j.catena.2016.03.030.
- [23] G. Maniatis, T. Hoey, R. Hodge, D. Rickenmann, és A. Badoux, „Inertial drag and lift forces for coarse grains on rough alluvial beds measured using in-grain accelerometers”, *Earth Surf. Dyn.*, köt. 8, sz. 4, o. 1067–1099, dec. 2020, doi: 10.5194/esurf-8-1067-2020.
- [24] K. L. G. Pretzlav, J. P. L. Johnson, és D. N. Bradley, „Smartrock Transport in a Mountain Stream: Bedload Hysteresis and Changing Thresholds of Motion”, *Water Resour. Res.*, köt. 56, sz. 11, o. e2020WR028150, 2020, doi: 10.1029/2020WR028150.
- [25] J. B. Dost, O. Gronz, M. C. Casper, és A. Krein, „The potential of Smartstone probes in landslide experiments: how to read motion data”, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, köt. 20, sz. 12, o. 3501–3519, dec. 2020, doi: 10.5194/nhess-20-3501-2020.
- [26] A. Lavrinec és mtsai., „Observations of dense phase pneumatic conveying using an inertial measurement unit”, *Powder Technol.*, köt. 343, o. 436–444, febr. 2019, doi: 10.1016/j.powtec.2018.11.039.