

## LABORATÓRIUMI TALAJVÁLYÚS MÉRŐBERENDEZÉS FEJLESZTÉSE

### DEVELOPMENT OF A SOIL BIN TEST SYSTEM FOR LABORATORY EXPERIMENTS

*Pásthly László, BSc, tanszéki demonstrátor, pasthy.laszlo@edu.bme.hu*

*Dr. Farkas Zsolt, PhD, egyetemi adjunktus, farkas.zsolt@gt3.bme.hu*

*Dr. Tamás Kornél, PhD, egyetemi docens, tamas.kornel@gt3.bme.hu*

*(Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gép- és Terméktervezés Tanszék)*

#### ÖSSZEFOGLALÁS

Célunk egy laboratóriumi talajvályús mérőberendezés fejlesztése volt. A tervezés folyamán törekedtünk a hagyományos, valamint a modern mérnöki eszközök, mint például CAD, illetve diszkrét- és véges elemes szoftverek alkalmazására. Munkánk eredményeként sikeresen elkészítettük a laboratóriumi talajvályús mérőberendezés mechanikus rendszereinek működési tervét a gyárthatósági szempontok figyelembevételével.

#### ABSTRACT

Our aim was to develop a laboratory soil bin measuring system. During the design process, we used traditional and discursive methods as well as modern engineering tools, such as CAD discrete- and finite element method software. As a result of our work, we have successfully prepared the operational plan of the mechanical systems of the laboratory soil bin system, taking into account manufacturability aspects.

#### 1. BEVEZETÉS

A mezőgazdasági talajművelő szerszámokat vizsgáló laboratóriumi módszerek egy jellemző típusa a talajvályús kísérletek, melyek során egy bizonyos talajjal feltöltött, hosszirányban nagyobb kiterjedésű tárolóba behelyeznek egy próbatestet, amely lehet egy talajba süllyesztett szerszám, vagy annak egy kismintás modellje, vagy adott esetben egy traktor, illetve munkagép kerék, és elkezdik lineárisan mozgatni. Mindeközben általában mérik a próbatestre ható erőt, a szerszám mozgását, valamint egyéb, kísérlet specifikus

paramétereket. A talajvályús mérőberendezések méretük alapján csoportosíthatók. A nagyméretű (akár száz méter hosszú) talajvályúk 1:1-hez méretarányú szerszám modellek és tényleges talajművelő szerszámok tesztelésére alkalmasak, általában szabadterén, mezőgazdasági kutatóközpontok területén található [1]. A közepes méretű (20-30 m hosszú) talajvályúk alkalmazhatók valós méretű és csökkentett méretarányú szerszámok vizsgálatára. Rendszerint fedett csarnokokban található, így esetükben biztosíthatók az állandó környezeti körülmények [2]. A kisméretű (1-10 m hosszú) talajvályúk pedig csökkentett méretarányú kísérleteket tesznek lehetővé kontrollált laboratóriumi körülmények között [3]. Ezeket többnyire a konkrét eszköz fejlesztések helyett a talaj-szerszám kapcsolat megismerésére irányuló kutatásokhoz alkalmazzák, segítségükkel validálhatók az újonnan kifejlesztett numerikus eljárások és verifikálhatók a konkrét esetet modellező szimulációk.

Az elmúlt 60 évben számos talajvályús mérőberendezés épült mezőgazdasági kutatóintézetekben és egyetemeken [4]. Siemens és Weber 1964-es publikációjukban [5] egy elektrohidraulikus hajtásrendszerrel működtetett talajvályú tervezéséről és megépítéséről számoltak be.

Kepler és szerzőtársai 2015-ös kutatásukban [6] a NAIK - Mezőgazdasági Gépesítési Intézet - 45 m hosszú és 2 méter széles talajvályújában végeztek kísérleteket a passzív rezgésű szerszámokkal kapcsolatban.

Munkánk célja egy olyan mérőberendezés tervezése volt, amely képes egy 3000x500x500 mm-es befoglaló méretű,

talajjal feltöltött vályúban különböző talajművelő szerszámok és szerszám modellek lineáris mozgására miközben a szerszámra ható erők, valamint a szerszám elmozdulása folyamatosan mérve vannak.

A feladat megoldását négy fő lépésre osztottuk: (1) Konceptióváltozatok felállítása és értékelése. (2) Mértékadó terhelések számítása. (3) A kiválasztott konceptióváltozat részegységeinek részletes konstrukciós tervezése. És végezetül (4) a mértékadó terhelést felvevő elemek szilárdsági ellenőrzése.

## 2. KONCEPCIÓVÁLTOZATOK

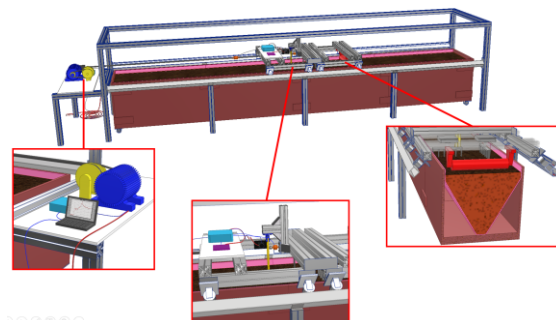
Az első konceptióváltozatban a fából készült vályú 1 m hosszú elemekből épül fel, amelyek átlapolt kötésekkkel vannak egymáshoz csatlakoztatva. Így szükség esetén a vályú tetszőleges hosszúságra kibővíthető, valamint a belülről rögzíthető betét elemek segítségével a téglalap keresztmetszettől eltérő vályú keresztmetszet is megvalósítható. A vályú egyik végére egy léptetőmotor van rögzítve, ami egy dobra csévélődő kötéll segítségével húzza a mérőkocsit. A mérőkocsi a vályú tetejére rögzített alumínium profilvezetékbe épített görgőkkel van megvezetve.

A második konceptióváltozatban a fémből készült vályú 1 m hosszú elemekből épül fel, amelyek átlapolt kötésekkkel vannak egymáshoz csatlakoztatva. Így szükség esetén a vályú tetszőleges hosszúságra kibővíthető, valamint a belülről rögzíthető betét elemek segítségével a téglalap keresztmetszettől eltérő vályú keresztmetszet is megvalósítható. A vályú és az összes többi részegységet tartó alumínium profilos vázszerkezet oldható kötésekkkel van egymáshoz rögzítve, valamint a vályú alján görgők vannak elhelyezve, így az például a talaj cseréjekor a többi részegységtől függetlenül, könnyen elmozdítható.

A harmadik konceptióváltozatban a vályú átlátszó oldalfalainak dőlésszöge egy csuklós szerkezet segítségével állítható, így a téglalap keresztmetszettől eltérő vályú kialakítás is megvalósítható, valamint az átlátszó oldalfalak segítségével a talaj alsóbb rétegeinek mérés közbeni mozgása is megfigyelhető. A vázszerkezet egyik végén egy asztal van kialakítva, amire rögzítve van a mérőkocsi mozgató hidraulikus munkahenger, a hidraulikus tápegység, az elektrohidraulikus szelepek és szenzorok, valamint a mérést vezérlő számítógép.

A negyedik konceptióváltozatban a fémből készült vályú 1 m hosszú elemekből épül fel, amelyek teleszkóposan egymásba tolhatók. Így a vályú tetszőleges hosszúságra beállítható, valamint a belülről rögzíthető betét elemek segítségével a téglalap keresztmetszettől eltérő vályú keresztmetszet is megvalósítható. A vályú és az összes többi részegységet tartó alumínium profilos vázszerkezet oldható kötésekkkel van egymáshoz rögzítve, valamint a vályú alján görgők vannak elhelyezve, így az például a talaj cseréjekor a többi részegységtől függetlenül, könnyen elmozdítható.

A négy konceptióváltozatot súlyozott pontozásos módszerrel értékeltük. A legmagasabb pontszámot a második megoldásváltozat (1. ábra) kapta, ezért a továbbiakban ennek részletes konstrukciós tervezésével foglalkoztunk.



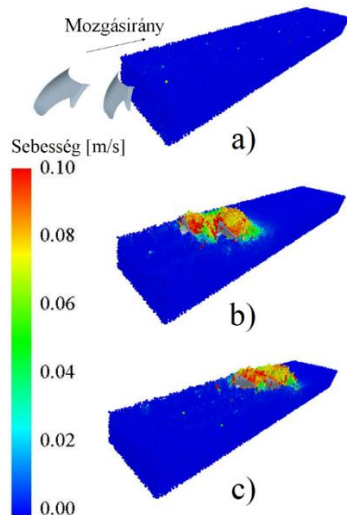
1. ábra. Kiválasztott konceptióváltozat

## 3. TERHELÉSEK SZÁMÍTÁSA

A terhelések meghatározása érdekében numerikus szimulációkat készítettünk az Altair EDEM 2021 diszkrétéleemes szoftver [7] segítségével. Az anyagmodell beállítási paramétereit Wang és szerzőtársainak 2022-es publikációjából [8] vettük át, akik a talaj tömörség mérésére használatos penetrométeres és a talajszemcsék sűrűdési tulajdonságainak meghatározására alkalmazott rézsűszög mérések segítségével, a talaj tömörödését is figyelembe vevő úgynevezett hiszterézises rugós és a sűrűdési erő talajszemcsék összetapadásának - azaz kohéziójának - következtében történő megnövekedését figyelembe vevő lineáris kohéziós modellek alkalmazásával bekalibráltak egy kohézív talaj modellezésére alkalmas anyagmodellt.

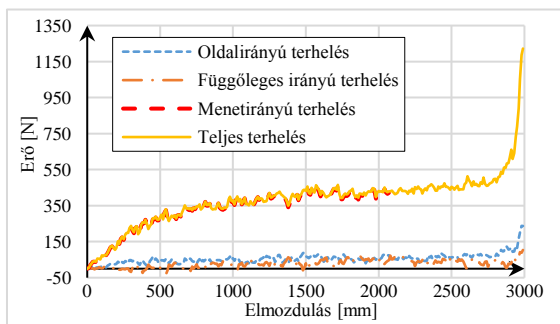
Az első szimuláció (2. ábra) alkalmával két darab 1/3 méretarányú eketestből álló szerelvényt húztunk a diszkrétéleemes halmazban Ucgul és szerzőtársainak méréséhez és szimulációjához [9] hasonlóan, 100 mm/s-os sebességgel. Az eketestek belső oldala előtt a

szimuláció elején (0-8 s) egyre több szemcse halmozódott fel, majd ez a felhalmozódott szemcsemennyiség a továbbiakban (8-25 s) közelítőleg állandó értéket vett fel. Ezzel beállt egy állandósult állapot. A szimuláció végén (25-30 s) pedig még több szemcse halmozódott fel az eketestek előtt, ami a vályú végén található fal hatásával magyarázható.



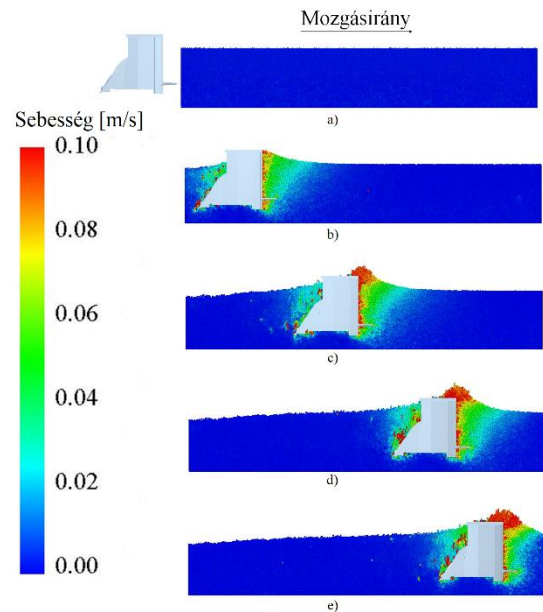
2. ábra. Eketestek szimulációja, a szemcsék sebességét színskála, az eketestek mozgásirányát pedig nyíl jelöli, a) 0 s, b) 8 s, c) 16 s

A szimuláció során az eketestekre ható erő különböző komponensit az 3. ábra mutatja. A menetirányú terhelés a legmagasabb, állandósult állapotban (8-25 s, 800-2500 mm) számított átlagos értéke 403 N, az oldalirányú terhelés állandósult állapotú átlaga 55 N, a függőleges irányú terhelés állandósult állapotú átlaga pedig 36 N. Így megállapítható, hogy az oldalirányú terhelés a menetirányú terhelés nagyjából 20 %-a. Az eredő erőként figyelembe vett teljes terhelés állandósult állapotban számított átlagos értéke 409 N-ra, maximális értéke pedig 1222 N-ra adódott a szimuláció végén fellépő falhatás miatt.



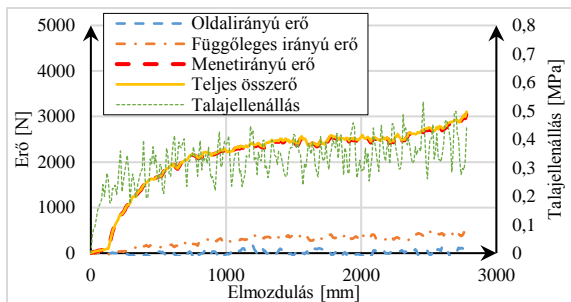
3. ábra. Eketestekre ható erők

A másik szimulációban (4. ábra) pedig egy horizontális penetrométert húztunk a diszkrét elemes halmazban 100 mm/s-os sebességgel. A penetrométer kúp projektált keresztmetszete 333 mm<sup>2</sup> volt, amivel a kúpra ható menetirányú erőt leosztva számítottuk a talajellenállást. A penetrométer előtt egyre több szemcse halmozódott fel. Ennek az lett a következménye, hogy a teljes szerkezetre ható erő nem állandósult, hanem a teljes szimuláció folyamán növekedett.



4. ábra. Horizontális penetrométer szimulációja, a szemcsék sebességét színskála, a penetrométer mozgásirányát pedig nyíl jelöli a) 0 s, b) 8 s, c) 16 s, d) 24 s, e) 28 s

A szimuláció során a penetrométer kúppal meghatározott talajellenállást és a penetrométert tartó testre ható erő különböző komponensit az 5. ábra mutatja. A penetrométerre ható menetirányú terheléshez képest a függőleges és oldalirányú terhelések viszonylag alacsonyak. Nagyjából 1500 mm út megtétele után a teljes terhelés átlagos értéke 2500 N, majd a szimuláció végén, ahogy a penetrométer megközelíti a talajvályú végét, és a szemcsék feltorlódnak előtte, a terhelés ismét nagyobb mértékben növekedni kezd. Maximumát a szimuláció végén éri el, értéke 3107 N. A talajellenállás nagyjából 600 mm elmozdulásnál felveszi állandósult állapotbeli értékét (0,35 MPa), és a szimuláció többi részében ezen érték körül ingadozik viszonylag nagy szórással (0,057 MPa). A talajellenállás maximuma 0,53 MPa.



5. ábra. Horizontális penetrométerre ható erők és talajellenállás

Mindezek alapján úgy döntöttünk, hogy 4000 N-os menetirányú terhelésre, valamint ennek a 70%-ára, azaz 2800 N-os oldalirányú terhelésre méretezzük a talajvályús mérőberendezést. Így a szerkezet nagy biztonsággal meg fog felelni a valós terheléseknek, amelyek várhatóan hasonlóak lesznek a szakirodalomban leírt, és a szimulációkkal meghatározott értékekhez.

#### 4. KONSTRUKCIÓS TERVEZÉS

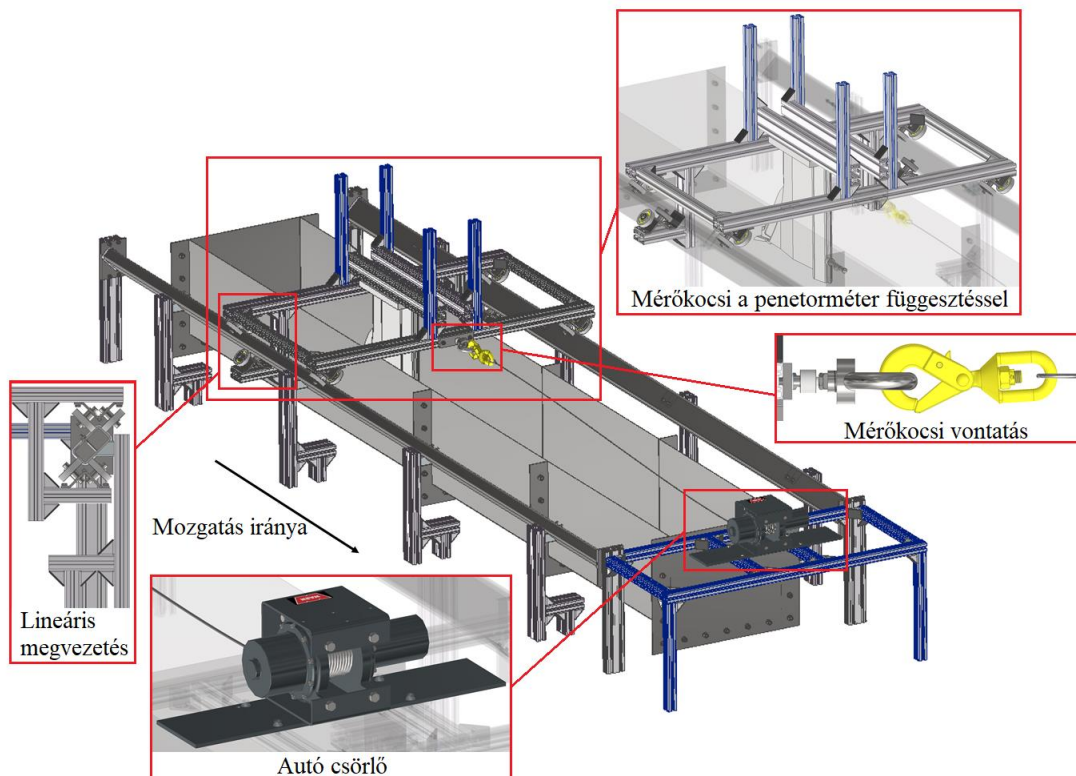
A teljes konstrukciót és az egyes részegységeket a 6. ábra mutatja. A talajvályú az előzetes tervek szerint a Gép- és Terméktervezés Tanszék MG épületi műhelyében található, téglalap keresztmetszetű szellőző csatornákból kerül kialakításra. A csatornák 2 mm vastagságú, acéllemezekből állnak, amelyek karimás kötésekkel kapcsolhatók egymáshoz. A három

legelérhetőbb helyen található csatorna elemből nagyjából 3500 mm hosszú, 500 mm széles, 400 mm mély vályút lehetne építeni.

A mérőkocsi ITEM elemekből alakítottuk ki, úgy hogy egyszerűen felszerelhetők és leszerelhetők legyenek róla a különböző vizsgált próbatestek, szerszám modellek és talajművelő szerszámok. Mivel a DEM szimulációk során a horizontális penetrométer esetén adódott a legnagyobb terhelés, ezért a továbbiakban ennek a felfüggesztését mutatjuk be részletesen.

A mérőkocsi lineáris megvezetése 2 db párhuzamos, téglalap keresztmetszetű zártszelvényvel van megoldva, amin elől csak a felső két oldalt, hátul pedig mind a négy oldalon egy-egy mélyhornyú golyóscsapágy gördül, így biztosított a mérőkocsi stabilitása, ami minden menetiránytól eltérő irányban képes felvenni a terhelést.

A zártszelvények a két végüknél 1-1 lemezre vannak felhegesztve, amik csavarkötéssel 80x40-es ITEM profilokra vannak rögzítve, a két végük között pedig méterenként egy-egy 45°-os ITEM könyökelemmel vannak csavarkötéssel rögzítve szintén 80x40-es ITEM profilokra, amelyeket tartóoszlopoknak neveztünk el. Ezek a tartóoszlopok alul meg vannak támasztva rövidebb ITEM profilok és 90°-os könyökelemek segítségével, így biztosan nem tudnak a terhelés irányában eldőlni.



6. ábra. Talajvályú konstrukció részegységekké, a mérőkocsi mozgásának irányát nyíl jelöli

A görgők két, egymásra merőlegesen elhelyezett mélyhornyú golyóscsapágyból állnak, melyek egy-egy tengelyre vannak rögzítve csavar alátétek és belső kulcsnyílású csavarok segítségével. A tengelyek másik oldala pedig egy hajlított lemez alkarészre van rögzítve szintén alátétek és belső kulcsnyílású csavarok alkalmazásával. A lemez hatlapfejú csavarokkal van négy helyen a mérőkocsi ITEM profilos vázszerkezetére rögzítve.

A mérőkocsi hajtását egy autó csörlővel oldottuk meg (6. ábra), melynek alsó lemeze csavarkötésekkel van rögzítve az ITEM profilos vázszerkezethez. A vontató kábel a csörlő dobjára van felcsévélve, a végére pedig egy vonóhorog van rögzítve. Ez egy vonószemhez van kapcsolva. A vonószem egy adapter alkatrész (mérőcella-vonószem adapter) orsómenetébe van becsavarva, amely másik végén egy anyamenettel csatlakozik egy erőmérő cellához. Az erőmérő cella pedig egy adapter lemezbe van becsavarva, ami a mérőkocsi ITEM profilos vázához van rögzítve csavarkötéssel.

## 5. TEHERBÍRÁS ELLENŐRZÉSE

A részegységek teherbírását végeeselemes módszerrel, az Autodesk Inventor 2021 szoftver segítségével ellenőriztük.

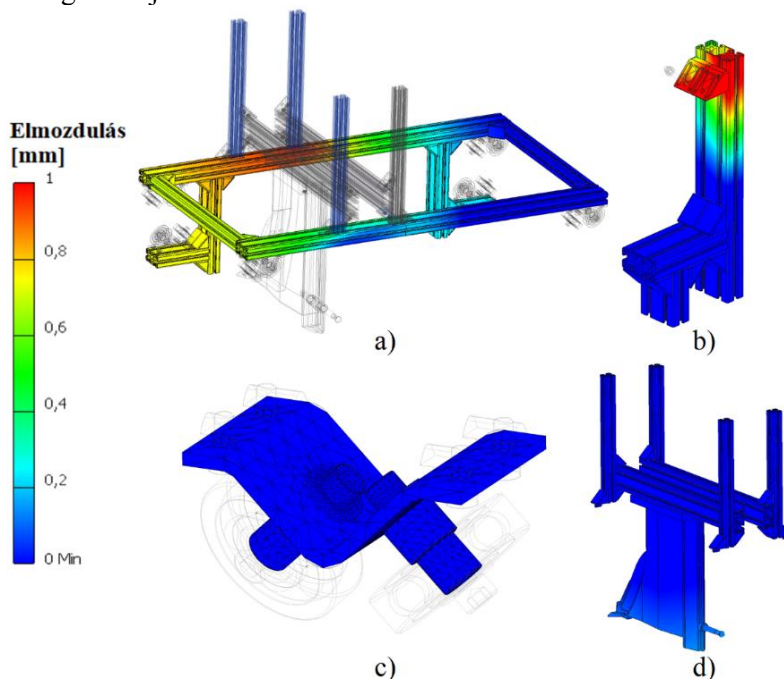
A horizontális penetrométer felfüggesztés ellenőrzése során a mérőkocsi vázszerkezetére rögzített ITEM elemeknek minden szabadságfokát megkötöttük az érintkezési felületen. A feszültség a teljes szerkezetben

jóval a megengedett alatt adódott, maximális értéke 59,4 MPa, a mérőkocsi vázszerkezetének egyik csatlakozási pontjánál ébredt. Az elmozdulás (7. ábra d) a szerkezet minden pontjában jóval 1 mm alatt adódott, maximális értéke 0,32 mm, a penetrométer tartó test alsó részén jelentkezett.

A mérőkocsi ellenőrzése során úgy tekintettük, mintha a kocsi vázszerkezetére a horizontális penetrométer felfüggesztése lenne felszerelve, ugyanis az előzetes DEM szimulációk során ennél a számnál ébredt a legnagyobb vonóerő. A biztonság érdekében az ellenőrzés során a penetrométer felfüggesztést nem teljesen a vázszerkezet közepére, hanem az egyik oldalához közelebb helyeztük el. A feszültség a teljes szerkezetben jóval a megengedett alatt adódott, maximális értéke 133,3 MPa, a jobb elülső görgő csatlakozási pontjánál ébredt. A maximális elmozdulás 1,0 mm, a hátsó ITEM profil penetrométer felfüggesztéshez csatlakozó részénél jelentkezett (7. ábra a).

A mérőkocsiról a zártszelvényre adódó erőket nyomatéki és erő egyensúlyi egyenletek alapján határoztuk meg. Az erők számításakor a penetrométer méreteit vettük figyelembe, valamint úgy tekintettük, mintha a penetrométer felfüggesztése nem teljesen középen, hanem a mérőkocsi egyik oldalához közelebb lenne elhelyezve.

A tartóoszlopokon a terhelés peremfeltételeket a 45°-os könyökelemek zártszelvényekkel csatlakozó oldalain működtettük.



7. ábra. Részegységek elmozdulása a) mérőkocsi, b) tartóoszlop, c) görgő, d) penetrométer

Elmozdulás peremfeltételként pedig megkötöttük a tartóoszlop talpának összes szabadságfokát. A feszültség a teljes szerkezetben a megengedett alatt adódott, maximális értéke 195,1 MPa, a főoszlopot támasztó segéd ITEM profilok bekötésénél ébredt. Az elmozdulás (7. ábra b) a leginkább terhelt könyökelem terhelést felvevő részénél lett maximális, értéke 1,4 mm. Ez még elfogadhatónak tekinthető, ugyanis a mérőkocsi deformációjával ellentétben nem befolyásolja a mérést.

A görgők felfogatásának terhelés peremfeltételeit a tengelyek csapágyakkal érintkező felületein működtettük. Mivel a jobb elülső görgőpárt éri a legnagyobb terhelés, ezért az erre ható terheléseket vettük figyelembe. Elmozdulás peremfeltételként pedig megkötöttük a lemez alkatrész mérőkocsi ITEM profiljával érintkező felületének összes szabadságfokát. A feszültség a teljes szerkezetben jóval a megengedett alatt adódott, maximális értéke 61,3 MPa, a baloldali görgő tengelyének a lemez alkatrészsel való csatlakozásánál ébredt. A maximális elmozdulás bőven egy milliméter alatt adódott, értéke 0,03 mm, a baloldali görgő tengelyének csapágyal érintkező végénél jelentkezett (7. ábra c).

A görgő csapágait az SKF katalógusból választottuk, és az ISO 281 szabvány alapján ellenőriztük dinamikus alapterherbírásra. A számított élettartam (7,7 millió óra) bőven meghaladta az elvártat (18 ezer óra), tehát a csapágy dinamikus teherbírása megfelelt.

## 6. EREDMÉNYEK, TOVÁBBFEJLESZTÉS

Összességében tehát (1) megalkottuk a koncepciókat és megtervezésre került egy laboratóriumi talajvályús mérőberendezés mechanikus működése. (2) A mértékadó terhelések a diszkrét elemes szimulációkból lettek meghatározva. (3) Ezt követően kialakításra került a vályú, a mérőkocsi és lineáris megvezetése, valamint a hajtásrendszer, és (4) végelemes módszerrel valamint analitikus képletekkel ellenőrizve lettek a mértékadó terhelést felvevő részegységek. A fejlesztés következő lépései egy talajállapot rendező kocsi tervezése, valamint az energialáncok és a mérés technika kialakítása

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tervezési projekt a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

## 8. IRODALOM

[1] W. R. Gill, „A history of the USDA National Tillage Machinery Laboratory: Agricultural Research Service, US Dept. of Agriculture Auburn, Alabama”, 1990.

[2] A. Mardani, K. Shahidi, A. Rahmani, B. Mashoofi, és H. Karimmaslak, „Studies on a long soil bin for soil-tool interaction”, *Cercetări Agronomice în Moldova*, köt. 142, sz. 2, o. 5–10, 2010.

[3] A. Yahya, M. Zohadie, D. Ahmad, A. K. Elwaleed, és A. F. Kheiralla, „UPM indoor tyre traction testing facility”, *Journal of Terramechanics*, köt. 44, sz. 4, o. 293–301, 2007.

[4] O. A. Ani, B. B. Uzoejinwa, A. O. Ezeama, A. P. Onwualu, S. N. Ugwu, és C. J. Ohagwu, „Overview of soil-machine interaction studies in soil bins”, *Soil and Tillage Research*, köt. 175, o. 13–27, 2018.

[5] J. C. Siemens és J. A. Weber, „Soil bin for model studies on tillage tools & traction devices”, *Journal of Terramechanics*, köt. 1, sz. 2, o. 56–67, 1964.

[6] I. Keppler, Z. Hudoba, I. Oldal, A. Csatar, és L. Fenyvesi, „Discrete element modeling of vibrating tillage tools”, *Engineering Computations*, köt. 32, sz. 2, o. 308–328, 0 2015, doi: 10.1108/EC-10-2013-0257.

[7] „Discrete Element Modeling - DEM Software | Altair EDEM”. <https://www.altair.com/edem/> (elérés 2021. szeptember 11.).

[8] X. Wang, Q. Zhang, Y. Huang, és J. Ji, „An efficient method for determining DEM parameters of a loose cohesive soil modelled using hysteretic spring and linear cohesion contact models”, *Biosystems Engineering*, köt. 215, o. 283–294, 2022.

[9] M. Ucgul, C. Saunders, és J. M. Fielke, „Discrete element modelling of tillage forces and soil movement of a one-third scale mouldboard plough”, *Biosystems Engineering*, köt. 155, o. 44–54, 2017.