

Egyedi, több vizsgálócellás triaxiális vizsgálóberendezés fejlesztése

A gyorsaság aranyat ér

Hazai talajmechanikai laborokban megfordulva a mai napig – bár a selejtezések és modernizálás folytán egyre kisebb számban – fellelhetők olyan egyedi, gépépítők által konstruált talajvizsgáló berendezések, mint a Poctor készülékek, közvetlen nyíróberendezések, CBR terhelőeszközök, vagy áteresztőképességet vizsgáló állványok, ödométerek. Nyilván ezek lassan kiszorulnak az említett laborok eszközparkjaiból, helyt adva – többnyire beszerzési pályázatok forrásainak köszönhetően – a neves, általános építőanyag-vizsgáló gép- vagy speciálisan talaj- és kőzetmechanikai eszközöket építő gyártók „polcos” termékeinek.

kai háttere és lehet, hogy a talajmechanikusok által nem minden szándékosságot nélkülöző módon fenntartott misztikum övezte és övezi napjainkig.

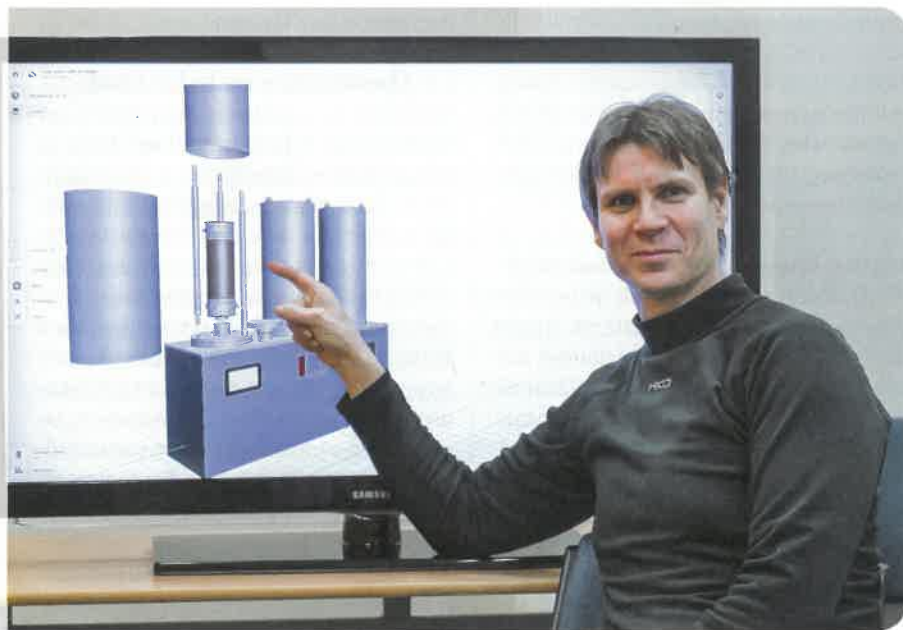
Az FTV Zrt. – pályázati támogatás és saját forrás bevonásával – saját mérnökállományával, külső szakemberek segítségével, illetve az Universitas-Győr Nonprofit Kft. a Széchenyi István Egyetem kutatóinak szakmai támogatásával 2022-ben az említett status quo megdöntésére vállalkozott azzal, hogy saját használatra egyedi, több vizsgálócellás berendezés megépítését tűzte ki célul. A fejlesztés alap gondolatát Hudacsek Péter, a Széchenyi István Egyetem oktatójának kettős felvetése adta. A különböző gyártók triaxiális berendezéseivel szerzett használati tapasztalatok, beszerzések, beszerzési kísérletek, geotechnikai laboratóriumi szereplőknek nyújtott támogatás, eszközfejlesztési tapasztalatok és a szabványi környezet ismerete alapján az a koncepció fogalmazódott meg, hogy a projekt eredményeképpen egyrészt olyan berendezést kell előállítani, amely a felhasználó számára kellő kapacitást biztosít több minta egyidejűleg történő vizsgálatára, másrészt képes kihasználni és csökkenti a hagyományos triaxiális berendezések vezérlésében egyöntetűen megjelenő kapacitásfelesleget.

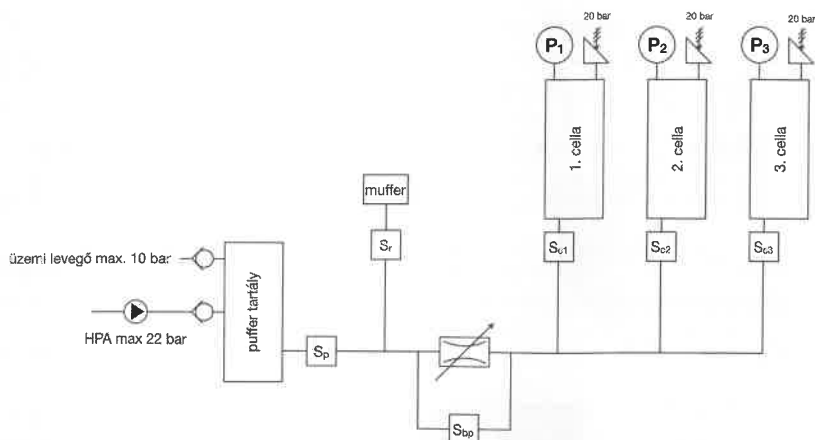
Az első felvetést talajmechanikai oldalról az alapozza meg, hogy a triaxiális berendezések használatát valóban indokló, ideális esetben a mintakészítés hibáinak hatását minimalizálандó, nagy próbatesztek felhasználásával, szabványosan elvégzett konszolidált drénezett vagy dré-

Hudacsek Péter, Bak Edina – FTV Zrt.

Tapasztalataink szerint a „háziilag” épített triaxiális berendezések előfordulása nem jellemző a hazai laborokban. Ezen gépcsalád esetén inkább a régi, Farnell, Wykeham Farrance és más tradicionális gyártók, sok esetben gyönyörű öntvény alkatrészei-

ket is tartalmazó vizsgálóberendezés maradványai lelhetők fel és vannak használatban laborjainkban. Annak oka, hogy az egyedi gépgyártóktól nem merészkedtek erre a területre, valószínűleg az lehetett, hogy az ezekkel a berendezésekkel elvégezhető vizsgálatokat, vélhetően a vizsgálatok hosszú átfutási ideje, a többi vizsgálathoz képest némiképp bonyolultabb mecha-





nezetlen vizsgálatai, melyek elsősorban a telített talajok a hatékony nyírószilárdsági paramétereinek, valamint esetleg merevségi jellemzőinek meghatározást célozzák, igen hosszas, már a berendezésen belül végzendő előkészítést (telítés, konszolidáció) és a szabványi előírások maradéktalan betartása esetén ennél jóval hosszabb nyírást, azaz összességében többnapos, -hetes, sőt szélsőséges esetben hónapos vizsgálatot jelentenek egy-egy próbatest vonatkozásában. E körülmény következménye, hogy valós piaci igényeket egy-egy igen drága berendezés beszerzésével valójában nem lehet kielégíteni.

A megfelelő átfutási idő biztosításának kényszere a legtöbb, vizsgálatra érdemes minta esetén a vizsgálatok szabványosságának kényszerű elvesztésével jár, aminek következtében megkérdőjeleződik a beruházás hasznossága. Nem véletlen, hogy a külföldi talajmechanikai laboratóriumok esetén a jellemző kép nem egyetlen triaxiális berendezést mutat, hanem egy-egy faszakasz mentén akár tízes nagyságrendben felsorakoztatott gépállományt szemléltet.

A másik felismerés az, hogy az említett hosszú, lassú vizsgálatok esetén az egyes vezérlési elemek (előtolás, cellanyomás-szabályzás, pórusvíznyomás-szabályzás) a teljes üzemidő elenyészően kis részében kell aktív beavatkozást végezzenek.

A két felismerés vegyítésével az körvonalazódott, hogy a projektnek egy olyan rendszer kifejlesztését kell megcéloznia, amely a vezérlési rendszert a lehető legnagyobb mértékben központosítja, egy-egy vezérlőelem minél több vizsgálócella különböző vezérlési igényét képes kiszolgálni, így gazdaságosabb lehet, mint a hagyományos, hatalmas redundáns vezérlési kapacitással bíró, önálló berendezésekből össze-

állított eszközpark. Így alakult ki a projekt munkacímét is adó több vizsgálócellás, központosított triaxiális talajvizsgáló berendezés megvalósításának alap gondolata.

A prototípus megvalósításakor egy háromcellás rendszer megalkotását tűztük célul. Egy háromcellás rendszert már elgondolnunk nagynak véltük ahhoz, hogy a vezérlések multiplexer rendszereinek hatékonyságát lássuk, az esetleges nehézségek, problémák kiütközzenek, de a prototípusfejlesztések esetén természetesen előkerülő hibák orvoslása még ne jelentsen túlzott pénzügyi, humán és szolgáltatói erőforrásigényt. A fejlesztésben három vezérlési alrendszer központosítását terveztük. Ezek a pórusvíznyomás/háttérnyomás szabályzó infrastruktúra, az előtolás-meghajtás és a cellanyomás-szabályzás voltak. A cellanyomás- és a pórusvíznyomás-szabályzás tekintetében az eredetileg elképzelt mértékű központosítást sikerült megvalósítani. A hidraulikus meghajtású axiális terhelést létrehozó alrendszer esetén ugyanakkor a teljes hidraulikai rendszer központosítása helyett végül csak az elektronikus vezérlés központosítására szorítkoztunk, mivel a nagy nyomások és a cellánként potenciálisan több nagyságrenddel eltérő előtolási sebesség, valamint az ehhez tartozó folyadékcsatlakoztatás, nyomás és a nagy felbontás igénye miatt – több lehetséges műszaki megoldást is megvizsgálva – az egyesített rendszer kiépítése gazdaságilag kedvezőtlenebbnek bizonyult, mint a végül implementált egyedi hidraulikus tápellátás megvalósítása.

Cellanyomás-szabályzás

A próbatest oldalmegettámasztást a hagyományos megközelítéssel ellentétben nem folyadékkal, hanem gázzal biztosítjuk.

A gázmegtámasztás valójában a triaxiális cellák világán túl tekintve szokványos eljárásnak számít. Ilyet elsősorban olyan talajmechanikai vizsgálóberendezésekben alkalmaznak, melyek esetén a vizsgálótérben nem vízhatlan elektronikus érzékelőket kell elhelyezni. Tipikus példa erre a technológiára a resonant column vizsgálóberendezés. Az elektronikai eszközök szabadabb felhasználása jelentette nyilvánvaló előnyön túlmenően a cella vízzel történő feltöltésének elmaradása, a szétszerelés során a cella leürítése, a cella belső felületeinek szárazon maradása, kisebb korróziós kitéettsége – mind további kedvező hozadékként értelmezhető. A megoldás hátránya, hogy a nagyobb tárolt rugalmas energia nagyobb használati kockázatot jelent. Ennek kezelésére a rendszerbe épített több mechanikus biztonsági túlnyomásvédő szelepet és a kellő biztonsággal méretezett fém cellafalat terveztünk. A cella kialakítása ráadásul olyan, hogy a védelmi rendszer egyéb mechanikus és elektromechanikus elemeinek (rugós túlnyomásvédő szelep, reduktor, NC szolenoid stb.) meghibásodásakor olyan szakadás előtti alakváltozásokat szenved, amely hatására a nem tervezett túlnyomás leépül a cellában azáltal, hogy a gáz a cellahenger pereménél a cellavég lemezek peremtömítései mellett távozik. A cellanyomás biztosításához a forrás vagy nagy nyomású sűrített levegő hálózatról elérhető levegő vagy palackos inert gáz (nitrogén, esetleg sűrített levegő). A cellanyomás biztosítására vagy nagy nyomású sűrített levegő hálózatban elérhető levegő, palackos inert gáz (nitrogént vagy sűrített levegőt), egyedi nagy nyomású légkompresszor, illetve ezek észszerű és a lehetőségeket figyelembe vevő kombinált használata kézenfekvő. A prototípus esetén egy kombinált hálózati levegő és HPA kompresszor rendszerű megoldást alkalmaztunk. A HPA szivattyú és a hálózati levegő egy közös puffertartályt tölt, melynek nyomása 1–22 bar között lehet, a legfeljebb három párhuzamosan futó kísérletben megjelenő legnagyobb nyomáshoz alkalmazkodva. A cellák egy közös töltő-ürítő légvezetékhez csatlakoztak 2/2 NC szolenoid szelepeken keresztül. Az aktuális cellanyomást minden cella esetén egy ezekhez kapcsolódó nyomásmérő érzékelő méri. A mért nyomásértékeket a mérésvezérlő elektronika összeveti minden cella esetén az adott időpontra előírt nyomásértékkel, és amennyiben va-



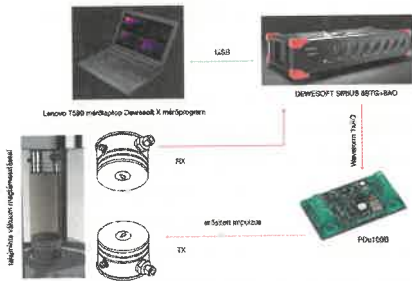
lamegyik cella esetén az eltérés meghaladja az 1 kPa értéket, a töltővezérlés a cella szelepet kinyitva a cellát a töltő-ürítő vezetékre csatlakoztatja.

A töltő-ürítő vezetékek egy bypass szeleppel megkerülhető fojtószelepen keresztül a egy olyan ághoz kapcsolódik, mely szintén NC mágnesszelepekkel egyrészt a légköri nyomás fele nyit hangtompítón keresztül vagy egy másik szelepen át a kuffertartályhoz kapcsolható. A fojtószelep jelenleg fix Cv-értékre van beállítva. A puffertartály és a cellanyomás közötti különbség alapján a rendszer megbecsüli a szükséges nyomáskorrekció eléréséhez szükséges várható nyitvatartási időt. Ezt a számított teljes időtartamot öt részre osztva, rövid időszakokra nyitja a szelepet a szükséges cellanyomás beállítására. A rendszer minden nyitás után ellenőrzi a nyomásváltozást és a nyitási időket, illetve a még szükséges további nyitás számot a mért nyomásváltozás értékek függvényében korrigálja.

Nagyon rövid számított nyitásiidők (pl. nagy abszolút cellanyomás mellett kis nyomáscsökkentési igény) esetén a puffertartály nyomása is megváltoztatható és a leeresztés a légkör helyett a tartály módosított nyomásához képest kisebb nyomáskülönbséget mutató cella felől kellő finomsággal megvalósítható. A cellanyomás gyors leeresztésére a kísérlet végzetével vagy a cella kezdeti gyors feltöltésre a fojtószelepet megkerülő bypass szelep megnyitásával van lehetőség. A leírt vezérlési rendszer elemeit az 1. ábra szemlélteti.

Pórusvíznyomás-szabályzás

A pórusvíznyomás-szabályzó rendszer központi eleme egy vagy két precíziós adagolószivattyú, melyek 5 utas golyós szelepeken keresztül kapcsolódnak a próbatetek



alsó és felső véglapjaihoz. A rendszer a hagyományos elrendezésekhez hasonlóan üzemeltethető egyetlen szivattyúval is, de a dupla szivattyús összeállítás bizonyos esetekben megkönnyítheti a feltöltést. A szivattyúk belső elrendezése speciális, bizonyos szempontból szakít a legtöbb gyártó által alkalmazott hagyományos léptetőmotoros megoldással. A megoldás kapcsán a fejlesztők megindították annak szabaldalmaztatási eljárását.

A vezérlésmegosztás logikája ez esetben is hasonló, mint a cellanyomás szabályozás esetén. A rendszer ez esetben is összeveti a pillanatnyilag szükséges nyomásértékeket az egyes próbatetek véglapjain aktuálisan mért pórusvíznyomásokkal, s bármely 2 kPa-t meghaladó eltérés esetén a golyósszelep megfelelő pozícióba állítását követően pórusvíz mintába sajtolásával vagy abból való kieresztésével elvégzi szükséges szabályzási feladatot.

Az említett beavatkozás során a vezérlés nyilvántartja az adott porton a szabályozási feladat ellátásához szükséges lépésszámot, melynek cellánkénti összegzésével ismertté válik a mintában lévő pórusvíz mennyiségének változása a vizsgálat alatt. A hagyományos rendszer esetén minden egyes cellához külön precíziós szivattyú vagy más elosztott pórusvíznyomás-szabályzó és térfogatváltozás-mérő rendszer csatlakozik, s mivel ezek költséges precíziós egységek, melyek megfelelő

MŰSZAKI PARAMÉTEREK

A megvalósult berendezés (működő prototípus) legfontosabb műszaki paramétereit:

- Cellanyomás: 0-20 bar
- Terhelő erő: 0-100 kN szerkezeti teherbírás, jelenleg 10 kN erőmérési kapacitás, de az erőmérő igény esetén cserélhető
- Pórusvíznyomás-szabályozás: 0-20 bar, mérés
- Erőmérés felbontása: 2N
- Elmozdulásmérés felbontása: optikai mérőlemez alkalmazása esetén 1 µm
- Pórusvíznyomás és cellanyomás-mérés felbontása: 1 kPa
- Előtolás sebessége/felbontása 0-11 mm/perc; 0,5 µm

egyedi kalibrációjuk révén mm³ felbontást és 0,01 cm³-nél nagyobb pontosságot képesek biztosítani, ezek számának csökkentése jelentős költségmegtakarítást eredményez.

A pórusvíznyomás-mérő rendszer része még a gépalapba épített útváltó szivattyú, mely a külső vízforrásból való feltöltés és a normál szabályzás üzemmódok közötti váltást teszi lehetővé. Jelenleg a funkciót egyetlen léptetőmotorral forgatott háromjártú golyósszeleppel oldjuk meg, de a későbbiekben megfontolandó ennek a megoldásnak két rozsdamentes acél anyagú, nagy nyomású használatra tervezett mágnesszeleppel történő kiváltása.

Hidraulikus meghajtású előtolás

A berendezés tervezésekor az egyik legfontosabb előkép a Bishop-Wesley-rendszerű cella volt. Ezek a külső, keret nélküli berendezések hidraulikus axiális terhelőrendszert alkalmaznak, melynek nyomásforrása általában a pórusvíznyomás előállítására használatos léptetőmotoros szivattyú (csakúgy, mint a cellanyomás szabályzáshoz használt egység). Általában ezek a cellák kisebb minták feszültségpálya-vizsgálatára alkalmasak, a viszonylag kis munkahengerméret és a szivattyúk jellemzően maximális 20 bar üzemi nyomása nem teszi lehetővé olyan nagy erők kifejtését, mint amit megcélzottunk a projektben, hogy a nagy minták vizsgálata is megoldható legyen. Számos tervezési iterációt követően az axiális terhelőrendszer tekintetében végül nem ragaszkodtunk a precíziós adagolás mindenáron való központosításához, mivel a bevezetőben leírt nehézségek miatt ez a feladat csak olyan összetett gépészeti megoldásokkal lett volna megbízhatóan megoldható, amelynek

összköltsége felülmúlta volna az egyedi meghajtások költségét.

A berendezés terhelő gépelemének tekintetében is egy piaci termék betervezése mellett döntöttünk, mivel az egyedi tervezésű munkahenger biztosította előnyök csak marginálisak lettek volna nagyjából azonos költségszint, de nagyobb műszaki kockázat mellett. A betervezett terhelőelem a Hi-Force gyártmányú HHR306 típusú kettős működésű üreges munkahenger lett. Jelen fejlesztési fázisban a munkahenger húzókapacitását pusztán a visszatérítés megkönnyítésére használjuk, melyhez 10 bar előtöltésű levegős hidroakkumulátorok kerültek beépítésre a húzóoldali portokra. Az előtölés növelésekor ezekben az akkumulátorokban a nyomás ugyan növekszik, amit nagyobb előtölő erővel kell kompenzálni, ennek a vezérlésre nincsen hatása, mivel a terhelő erő számítása nem elsősorban a munkahenger nyomások alapján számítás, hanem a cella felső teherelosztó lemezébe épített triaxiális vizsgálóberendezésekben való használatra kifejlesztett Applied Measurements gyártmányú STALC3 termékcsaládba tartozó 10 kN kapacitású erőmérő cellával. (A rendszer tervezett teherbírása 100 kN, a sorozatban elérhető azonos geometriai méretekkel 100 kN kapacitású cella is, de a tesztelés időszakára – és az általános használat esetén – is hasznosabbnak gondoltuk a 10 kN teherbírású egység beépítését.) A munkahengerek hidraulikus tápellátását egy-egy 500 lépés/fordulat felbontású, PKP569FN24B2 típusú motorral meghajtott, BIERI gyártmányú, AKP103 típusú, 0,1 cm³/fordulat szállítású dugattyús szivattyú biztosítja, mely elrendezés 0,04 μm/lépés elméleti felbontást jelent, azaz kb. 16°-os (23 lépés) motorfordulathoz tartozik 1 μm előtölés. Ezt praktikusán felezni, negyedelni lehet érdemes.

A hagyományos elmozdulásmérésre négy különböző rendszerelem került beépítése. Az egyik a munkahenger abszolút pozícióját kb. 0,1 mm pontossággal, 0,01 mm felbontással mutató vonóköteles elmozdulásmérő, mely a munkahenger alatt helyezkedik el és a talplemezhez alulról csatlakozik. A másik a szivattyúfordulatokból számított relatív elmozdulás meghatározása. A harmadik rendszer a választhatóan egy vagy három db 1 μm felbontású Aikron AKP1-150 típusú, az alsó és a felső erőbevezető lemezhez csatlakozó üvegléces inkrementális digitális kimene-

tű mérőelem. A negyedik pedig a multiDIC nyílt forráskódú többkamerás 3D képalapú mérőrendszeren alapuló megoldás, melyhez az elemzéshez bemenő képi információként szükséges felvételeket a cellán belül elhelyezett Raspberry mikroszámítógépekkel vezérelt, összesen 12, 3 db 4-es csoportban elhelyezett kamera szolgáltatja, a próbatestek felszíni három sávjának monitorozásával. A kamerákat is mutató összeállításról a 3. ábra ad renderképet.

Mechanikai kialakítás, anyagok, ergonómia, további fejlesztések

A prototípus fejlesztése során jelentős figyelmet fordítottunk a használati és a gyártási ergonómia. Az anyagfelhasználás tekintetében a kezdetektől eltökéltek voltunk, hogy dominánsan rozsdamentes anyagból építjük meg a szerkezetet. Ehhez a koncepcióhoz – az alsó és felső lemezeket összekötő teherviselő rudak anyagától eltekintve – tartottuk magunkat. A rudak anyagválasztása kompromisszumos megoldás volt, mivel a gyártás idején rövid határidővel nem állt rendelkezésre megfelelő mechanikai tulajdonságokkal rendelkező rozsdamentes anyag. A szerelvények tekintetében az amerikai Swagelok elemait tervezzük be. Költséghatékonysági szempontból felmerült ugyan, hogy hasonló műszaki paraméterekkel bíró, de kedvezőbb árfekvésű alternatívákat használjuk, de amíg a továbbfejlesztések nem zárulnak le, ezt nem kívánjuk megtenni. Hasonló jellegű gépészeti fejlesztésekkel foglalkozó ismerős cégek képviselői hasonló motivációjú váltást követően inkább kedvezőtlen tapasztalatokról számoltak be, ami szintén az eredeti döntés fenntartást indokolja.

A használati ergonómia kapcsán azt tapasztaltuk, hogy az előre összeszerelt keretbe való mintabeépítés kellően kényelmes, még az oszlopok között is. Ez azért szerencsés, mert ugyanez a nagy súlyú felsőlemez mozgatásáról nem mondható el, ami különösen akkor nehézkes, ha a szerelést magasan vagy előre kinyúlva kell elvégezni. Éppen ezért a további fejlesztések során egy mobil gépvázat tervezünk összeállítani, melynek része lesz a fejeket lebegtető ballancer, ami az említett alkatrészt felfüggesztve megkönnyíti az összeállítást. Ezen kívül a cellaburkolat megfogásához vákuumos tapadókorongot specifikálunk.

Vezérlélelektronika

Az egységek mérési vezérlési feladatainak ellátását jelenleg a 4D Systems gyártó ESP32 chipje köré épített kapacitív érintőképernyős wifiképes mikrokontrollereivel oldottuk meg. Az egyes modulok a saját egységeik közvetlen vezérlési feladatait látják el, mint pl. a léptetőmotorok meghajtóinak vezérlése, az egyes műszerek analóg/digitális jeleinek fogadása feldolgozása és wifihálózaton keresztül továbbítása a központi PC-n futó mérő/vezérlő szoftverbe. A decentralizált mérőrendszernek kétségkívül vannak előnyei, s az ESP32 rendszer elterjedtsége, valamint a helyi kijelzés könnyű integrálhatósága igen vonzó jellemzők. Ugyanakkor a fejlesztés során azt tapasztaltuk, hogy egy központi mérésadatgyűjtő rendszer – különösen, ha ahhoz egy könnyen kezelhető felületet biztosító szoftveres keretrendszer tartozik – hatékonyabb lehet az elosztott rendszernél jelen feladat esetében. Mindezen tapasztalatok alapján a projekt lezárását követően, a termék fejlesztés fázisában nagy valószínűséggel áttérünk a szlovén Dewesoft mérésadatgyűjtő-gyártó egységeire.

Összefoglalás

A pályázat keretében megvalósult fejlesztések eredményeképpen az FTV Zrt. a végső tesztek lezárultát követően, 2025 őszétől három nagy teljesítőképességű triaxiális cellával képes lesz fejlett talajmechanikai vizsgálatok elvégzésére. Az elkészült prototípust a projekt zárórendezvényén mutattuk be. A 4. ábrán az ott készült felvétel látható a berendezésről. A projekt a Széchenyi Terv Plusz program, ezen belül a Gazdaságfejlesztési és Innovációs Operatív Program Plusz keretében valósult meg. Az FTV Zrt. által elnyert, vissza nem térítendő európai uniós támogatási összeg 161,28 millió forint, amelyből 19,35 millió forint hazai társfinanszírozás. A támogatás mértéke a projekt elszámolható összköltségének 68,57%-a. A projekt három év alatt, a vállalat két paksi telephelyén valósult meg, és 2025. június 20-án zárult.