

Válasz

Prof. Dr. Kiss Rita

egyetemi tanár, az MTA levelező tagja

bírálatára

Először szeretném megköszönni Prof. Dr. Kiss Rita egyetemi tanár, az MTA levelező tagja alapos, részletes és konstruktív bírálatát. A bírálat nemcsak az értekezés eredményeinek értékelését tartalmazza, hanem számos olyan módszertani és értelmezési szempontot is felvet, amelyek hozzájárulnak a bemutatott kutatások pontosabb megvilágításához és tudományos kontextusba helyezéséhez. A megfogalmazott észrevételeket és kérdéseket köszönettel fogadom, és az alábbiakban ezekre tételesen válaszolok.

A dolgozat formájának, nyelvhasználatának értékelése

Köszönöm a dolgozat formai és nyelvhasználati szempontjaira vonatkozó részletes észrevételeket. A bírálatban megfogalmazott megállapításokkal egyetértek. A terjedelemmel, az irodalomjegyzék elhelyezésével, valamint a bekezdésszerkezet egyenetlenségeivel kapcsolatos észrevételek jogosak. Hasonlóképpen indokoltnak tartom a jelölések következetesebb alkalmazására, az ábrák és táblázatok áttekinthetőségének javítására, valamint a belső kereszthivatkozások egyértelműbbé tételére vonatkozó megjegyzéseket. Az angol nyelvű ábra- és diagramfeliratok alkalmazása valóban csökkenti a dolgozat nyelvi egységességét. Ezeket az észrevételeket hasznos tanulsgként kezelem, és a további munkáim során figyelembe fogom venni.

A dolgozat értékelése

Köszönöm a dolgozat tartalmi felépítésére, a szakirodalmi áttekintésre, valamint az egyes fejezetek funkcionális elkülönítésére vonatkozó részletes és alapos észrevételeket. A bírálatban megfogalmazott megállapításokkal alapvetően egyetértek. A szakirodalmi áttekintés célja elsősorban a vizsgált jelenségek és módszerek kontextusának megteremtése volt; ugyanakkor jogos az az észrevétel, hogy az eddigi kutatások korlátainak és a továbblépési irányoknak az összefoglaló, kritikai értékelése hangsúlyosabban is megjelenhetett volna.

Egyetértek továbbá azzal a megállapítással is, hogy egyes módszertani döntések – így a választott programrendszer, a modellezési megközelítés, illetve bizonyos kísérleti paraméterek – indoklása nem minden esetben jelenik meg kellő részletezettséggel.

A fejezetszerkezetre vonatkozó észrevételeket szintén jogosnak tartom. A módszertani fejezetben több helyen szerepelnek olyan ábrák és megállapítások, amelyek eredményjellegűek, míg az „Eredmények” fejezetben következtetések és tézisjellegű megállapítások is megjelennek. Ez a szerkesztési megoldás a vizsgálatok folyamatosságának bemutatását szolgálta, ugyanakkor elfogadom, hogy didaktikai szempontból az egyértelműbb elkülönítés javítaná az áttekinthetőséget.

A nyírókísérleten alapuló kalibráció érzékenységvizsgálatának jelentőségére tett megjegyzést köszönöm; e vizsgálat valóban a további kutatások szempontjából is meghatározó. A kezdő

paraméterek megválasztására, a sebességhányados és a vonóerőhányad fogalmi használatára, valamint a Galton-keverő esetében a sorok számának hatására vonatkozó észrevételekre a következő pontokban részletesen válaszolok.

A Galton-deszka vizsgálata során alkalmazott gömb alakú szemcsék választása tudatos egyszerűsítés eredménye volt. A vizsgálat célja nem a szemcsealak hatásának elemzése, hanem annak bemutatása volt, hogy a Galton-deszka elvén működő, mozgó alkatrész nélküli szerkezet önmagában alkalmas lehet szemcsekeverésre. Ennek megfelelően a lehető legegyszerűbb, jól definiált szemcsegeometriát alkalmaztam, amely mellett a keverési jelenségek egyértelműen értelmezhetők.

Az 1 mm-es átmérő megválasztását gyakorlati szempontok indokolták: a vizsgálatokhoz használt Galton-deszka 3D nyomtatással készült, és a szemcseméretet ehhez a geometriai kialakításhoz igazítottam annak érdekében, hogy az áramlási jelenségek stabilan, reprodukálható módon jelenjenek meg, és a szemcsék mérete ne legyen domináns korlátozó tényező a geometriai részletekhez képest.

A kísérleti feltételek még részletesebb dokumentálása valóban hozzájárulhatna a mérések reprodukálhatóságának további erősítéséhez. A disszertációban a kísérleti elrendezések és vizsgálati körülmények bemutatásánál arra törekedtem, hogy a lényeges, az eredmények értelmezését befolyásoló paraméterek kerüljenek ismertetésre, ugyanakkor a dolgozat terjedelmi és szerkezeti korlátai miatt nem minden technikai részlet szerepelt teljeskörűen.

A 4.1. táblázatban megadott kezdő paraméterek értékeit úgy határoztam meg, hogy a nyírókísérlet diszkrét elemes modellje a talajvályúban végzett kísérletek során meghatározott nyírási tönkremeneteli határgörbéhez közeli makroszkopikus viselkedést eredményezzen. A kezdő paraméterkészlet tehát egy előzetesen kalibrált referenciaállapotot reprezentál.

A dolgozatban használt „vonóerőhányad” kifejezés nem új, önállóan definiált mennyiséget jelöl, hanem a szövegben korábban bevezetett vonóerő arányra utal, amelyet a mereven rögzített szerszám vontatásához szükséges erő és a rezgő szerszám vontatásához szükséges erő hányadosaként definiáltam. A két megfogalmazás azonos fizikai tartalmat hordoz, a szóhasználat azonban nem teljesen következetes.

A Galton-keverő esetében a sorok számának növelésével a keverés hatékonysága egy adott pontig javul, majd telítődik. A maximálisan hatásos sorszám elsősorban azt határozza meg, hogy a szemcsék hány egymást követő balra–jobbra elpattanáson mennek keresztül a lefelé áramlás során. Egy bizonyos sorszám felett a szemcsék oldalirányú eloszlása már közel homogénné válik, így további sorok hozzáadása nem eredményez számottevő keveredésjavulást.

A vizsgálatok célja nem elsősorban az optimális sorszám univerzális meghatározása volt, hanem a Galton-elven működő statikus keverő használhatóságának bemutatása, valamint annak szemléltetése, hogy egy ipari statikus keverő tervezése során milyen jellegű keveredési mechanizmusokra és telítődési jelenségekre számíthatnak a gyakorló mérnökök. A levont következtetések ennek megfelelően a vizsgált geometriai és anyagi paraméterek mellett értelmezendők.

A „Következtetések és javaslatok”, illetve az „Összefoglaló” fejezetekkel kapcsolatos megállapításokat elfogadom; ezek valóban nagyrészt az új tudományos eredmények más megfogalmazásai, illetve értelmezései. A bíráló által jelzett strukturális és didaktikai szempontok a további munkáim során fontos iránymutatásként szolgálnak.

A bírálóban megfogalmazott észrevételek több, egymással összefüggő módszertani és értelmezési kérdést érintenek. Az alábbiakban ezekre a felvetésekre részletesen, a vizsgálatok céljának és kereteinek figyelembevételével, kérdésről kérdésre térek ki.

Az összes új tudományos eredményt akkor tudom elfogadni, ha a Jelölt tézisenként – nem összefoglaló jelleggel – egyértelműen megadja, hogy az adott tézist mely konkrét publikációi támasztják alá.

A bírálóban megfogalmazott igénnyel egyetértek, miszerint az új tudományos eredmények értékeléséhez szükséges, hogy az egyes tézisekhez egyértelműen hozzárendelhetők legyenek az azokat alátámasztó publikációk. Ennek megfelelően az alábbiakban a disszertációban eredetileg megfogalmazott téziseket változtatás nélkül, tézisenként ismertetem, és minden esetben külön megadom az adott tézist alátámasztó konkrét publikációkat. A tézisekhez kapcsolódó módszertani és értelmezési kiegészítésekre a későbbi pontokban térek ki.

1. új tudományos eredmény: Klasszikus nyírókísérlet, mint DEM kalibrálási eljárás. A klasszikus nyírókísérlet diszkrét elemes modelljét létrehozva matematikai összefüggések segítségével megadtam a szemcsehalmozok makromechanikai viselkedését meghatározó jellemzők (c látszólagos kohézió és a φ belső súrlódási szög) értékeinek mikromechanikai paraméterektől való függését. Kimutattam, hogy melyek azok a mikromechanikai paraméterek, amelyekre a nyírókísérlet leginkább érzékeny. Ezen új tudományos eredmények felhasználása rövidebb idő alatt vezethet sikeres kalibrációhoz, a kalibrálási folyamat idő- és erőforrás igénye így lecsökkenthető.

A tézist alátámasztó publikációim:

1. Keppler, I ☒; Safranyik, F; Oldal, I Shear test as calibration experiment for DEM simulations: a sensitivity study ENGINEERING COMPUTATIONS 33: 3 pp. 742-758., 17 p. (2016) Q2

A témához illeszkedő nem konkrétan a tézist tartalmazó (bár az annak megfogalmazásához vezető kutatás folyamatát bemutató) publikációk

1. Junhao, Huang; Safranyik, Ferenc; Tóth, János; Keppler, István ☒ Shear Test as Calibration Experiment for DEM Simulations: Sphero-polygonal Particle Model FME TRANSACTIONS 52 : 4 pp. 659-670. , 12 p. (2024) Q2
2. Junhao, HUANG; István, KEPLER; Adrienn, BABLENA Breakage and shear testing of corn and wheat particles MECHANICAL ENGINEERING LETTERS 25: 1 pp. 182-195. , 14 p. (2024)
3. Safranyik, Ferenc; Keppler, Istvan Automatic calibration of discrete element models In: Nolle, Lars; Burger, Alexandra; Tholen, Christoph; Werner, Jens; Wellhausen, Jens

- (szerk.) ECMS 2018 Proceedings: 32nd European Conference on Modelling and Simulation Wilhelmshaven, Németország: European Council for Modelling and Simulation (ECMS) (2018) 536 p. pp. 418-420. , 3 p.
4. Safranyik, Ferenc ☒; Keppler, Istvan; Bablena, Adrienn DEM Calibration: a Complex Optimization Problem In: Guerrero, Juan E (szerk.) 2017 International Conference on Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization, ICCAIRO 2017 Los Alamitos, Amerikai Egyesült Államok : IEEE Computer Society (2017) 344 p. pp. 198-201. , 4 p.
 5. Keppler, István; Oldal, István; Safranyik, Ferenc; Bablena, Adrienn Calibration of discrete element models MECHANICAL ENGINEERING LETTERS 14: 1 pp. 140-151. , 12 p. (2016)
 6. Oldal, István; Keppler, István ; Bablena, Adrienn; Safranyik, Ferenc; Varga, Attila On the Discrete Element Modeling of Agricultural Granular Materials MECHANICAL ENGINEERING LETTERS 11 pp. 8-17. , 10 p. (2014)
 7. Keppler, I ; Kocsis, L ; Oldal, I ; Csátár, A Determination of the discrete element model parameters of granular materials HUNGARIAN AGRICULTURAL ENGINEERING 2011: 23 pp. 30-32. , 3 p. (2011)
 8. Keppler, István; Csátár, Attila Determination of granular assemblies' discrete element material parameters by modelling the standard shear test. SUSTAINABLE CONSTRUCTION & DESIGN 2: 2 pp. 269-274. , 6 p. (2011)
 9. Keppler, István; Csátár, Attila Szemcsehalmozok diszkrét elemes modellparamétereinek meghatározása In: Baksa, A; Bertóti, E; Szirbik, S (szerk.) XI. Magyar Mechanikai Konferencia: Miskolc Egyetemváros, 2011. augusztus 29-31.: az előadások összefoglalói Miskolc, Magyarország : Miskolci Egyetem (2011) 134 p. pp. 143-143. , 1 p.
 10. Horváth, Roland; Keppler, István Szemcsehalmoz nyírókísérletének modellezése In: Bitay, Enikő (szerk.) XV. FMTÜ Nemzetközi Tudományos Konferencia [Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka XV.] Kolozsvár, Románia: Erdélyi Múzeum Egyesület (EME) (2010) 384 p. pp. 139-142. , 4 p.
 11. Keppler, I; Oldal, I; Csátár, A Determination of granular assemblies' discrete element material parameters by modelling the standard shear test MECHANICAL ENGINEERING LETTERS 4: 1 pp. 212-219. , 8 p. (2010)
 12. Keppler, István; Csátár, Attila Mezőgazdasági szemcsehalmozok diszkrét elemes modelljéhez szükséges paraméterek meghatározása. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA 51 : 10 pp. 2-4. , 3 p. (2010)

2. új tudományos eredmény: Torziós nyírókísérlet mint DEM kalibrálási eljárás. Kidolgoztam egy olyan kalibrációs eljárást, amely lehetővé teszi a szemcsehalmozok (főleg talaj) mechanikai tulajdonságának helyszíni meghatározását, majd ennek a vizsgálatnak az eredményei alapján a kalibrálás elvégzését. Meghatároztam a makroviselkedés mikromechanikai paramétereiktől való függésének matematikai alakját is, lehetővé téve a kalibrálási eljárás idő- és erőforrás igényének csökkentését.

A tézist alátámasztó publikáció:

1. Keppler, Istvan ✉; Bablena, Adrienn; Salman, Nihal D.; Kiss, Péter Discrete element model calibration based on in situ measurements ENGINEERING COMPUTATIONS 39: 5 pp. 1947-1961. , 15 p. (2022) Q2

3. új tudományos eredmény: Rezgő talajművelő szerszám és talaj kölcsönhatásának modellezése. Igazoltam, hogy a talajművelő szerszámok szabad rezgéseinek lehetővé tétele bizonyos esetekben csökkenti a talajművelési eljárás vonóerő igényét. Kimutattam, hogy a szerszámcsúcs sebesség és haladási sebesség hányadosának (sebességtényező) növelése vonóerőigény csökkenésre vezet, a vonóerőigény csökkenés pedig függetlennek mutatkozik a szerszám alakjától.

A tézist alátámasztó publikációim:

1. Keppler, Istvan ✉; Hudoba, Zoltan; Oldal, Istvan; Csatar, Attila; Fenyvesi, Laszlo Discrete element modeling of vibrating tillage tools ENGINEERING COMPUTATIONS 32 : 2 pp. 308-328. , 21 p. (2015) Q2
2. Keppler, István; Hudoba, Zoltán; Oldal, István; Fenyvesi, László Rezgő talajművelő szerszámok modellezése diszkrét elemek módszerével In: Baksa, Attila; Bertóti, Edgár; Szirbik, Sándor (szerk.) XII. Magyar Mechanikai Konferencia Miskolc, Magyarország: Miskolci Egyetem Műszaki Mechanikai Intézet (2015) pp. 140-140. , 1 p.

A témához illeszkedő nem konkrétan a tézist tartalmazó (bár az annak megfogalmazásához vezető kutatás folyamatát bemutató) publikációk

3. Zachár, András; Keppler, István; Oldal, István ✉ Investigation of the applicability and efficiency of different mathematical modeling and numerical simulation methods for soil tool interaction JOURNAL OF COMPUTATIONAL AND APPLIED MECHANICS 11: 1 pp. 77-94. , 18 p. (2016)
4. Keppler, I Kavicságyas atomreaktor földrengésbiztonsági vizsgálata In: Baksa, Attila; Bertóti, Edgár; Szirbik, Sándor (szerk.) XII. Magyar Mechanikai Konferencia Miskolc, Magyarország : Miskolci Egyetem Műszaki Mechanikai Intézet (2015) pp. 147-147. , 1 p.
5. Keppler, István ✉ Failure analysis of pebble bed reactors during earthquake by discrete element method NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN 258 pp. 102-106. , 5 p. (2013) D1

4. új tudományos eredmény: Galton deszka, mint statikus keverő. Kimutattam, hogy a Galton deszkához hasonló felépítésű ütközéses alapon működő, mozgó alkatrészt nem tartalmazó készülékek alkalmasak nem kohézív szemcsehalmozok (például szemesterményhalmozok) keverésére. Matematikai összefüggések felírásával meghatároztam a keverés hatékonyságának függését a készülék geometriai felépítésétől, lehetőséget adva ezzel a működési hatékonyság növelésére, a keverési művelet energiaigényének csökkentésére.

A tézist alátámasztó publikációm:

1. Keppler, István ✉; Bércesi, Gábor ; Tóth, János Galton Board as Colliding Static Mixer JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS 152: 4 Paper: 04026003 , 10 p. (2026) Q1

A témához illeszkedő nem konkrétan a tézist tartalmazó (bár az annak megfogalmazásához vezető kutatás folyamatát bemutató) publikációk

1. Seifeddine, Garneoui; Péter, Korzenszky ✉; István, Keppler Enhancement of the mixture quality of corn grains in a single-shaft paddle mixer using DEM simulations JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY 37 : 3 pp. 1365-1373. , 9 p. (2023) Q2
2. Seifeddine, GARNEOUI; Péter, KORZENSZKY ✉; Keppler, ISTVÁN Mixing enhancement of mono-disperse and bi-disperse particles in a cylindrical drum mixer using discrete element simulations TEHNICKI VJESNIK-TECHNICAL GAZETTE 29 : 3 pp. 752-758. , 7 p. (2022)
3. Seifeddine, GARNEOUI; István, KEPPLER; Péter, KORZENSZKY Impact of screw pitch length on the mixture quality of grains in a small-scale silo apparatus MECHANICAL ENGINEERING LETTERS 23: 2 pp. 4-12. , 9 p. (2022)
4. Garneoui, Seifeddine ✉; Keppler, István; Korzenszky, Péter; Talafha, Muath Sultan Numerical study on the impact of particles tilling pattern and screw parameters on the mixing uniformity of wheat grains in a screw mixer APPLIED AND COMPUTATIONAL MECHANICS 15 : 2 pp. 123-132. , 10 p. (2021) Q2
5. Garneoui, Seifeddine ✉; Keppler, Istvan; Korzenszky, Peter Mixing Enhancement of Wheat Granules in a Hopper Bottom Lab-Scale Mixer Using Discrete Element Simulations FME TRANSACTIONS 48 : 4 pp. 868-873. , 6 p. (2020) Q2
6. Safranyik, Ferenc ✉ ; Varga, Attila ; Oldal, István ; Keppler, István Optimal and effective technique for particle packing ADVANCED POWDER TECHNOLOGY 31: 8 pp. 3222-3235. , 14 p. (2020) Q1
7. Seifeddine, Garneoui ✉; Keppler, István; Péter, Korzenszky Numerical Assessment of a Static Mixer Design for Mixing Free Flowing Granular Materials Using the Discrete Element Method JOURNAL OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY (JET) 11: 2 pp. 23-36. , 14 p. (2020)
8. Varga, Attila ✉; Keppler, Istvan; Fenyvesi, Laszlo Determination the efficiency of open mixing screws JOURNAL OF MECHANICAL SCIENCE AND TECHNOLOGY 34: 6 pp. 2327-2332. , 6 p. (2020)
9. Varga, Attila; Fenyvesi, László; Keppler, István Keverési hatékonyság vizsgálata diszkrét elemek módszerével. GÉP 68: 1 pp. 52-55. , 4 p. (2017)

5. új tudományos eredmény: Optimális lamella geometria. Megmutattam, hogy a szárítóberendezésekben az alul- vagy túlszáritás csökkentése érdekében elméletileg ciklois alakú lamellát célszerű alkalmazni. Gyártástechnológiai megfontolásokat is figyelembe véve kimutattam, hogy megfelelően kialakított Bézier görbe alakú lamella geometriák

felhasználásával is elérhető az egyenes lamelláénál sokkal jobb anyagáramlási egyenletesség. Az új típusú lamella geometria felhasználása csökkenti a szárítás egyenetlenségét, ezáltal javítja a végtermék minőségét, csökkenti a szárítás energiafelhasználását.

A tézist alátámasztó publikációim:

1. Keppler, István ✉; Bablena, Adrienn Optimal lamella geometry for mixed flow dryers ARCHIVE OF APPLIED MECHANICS 94 : 4 pp. 961-972. , 12 p. (2024) Q2
2. Bablena, Adrienn; Beke, János; Keppler, István ✉ Particle motion in mixed flow dryers: The effect of the wall inclination angle and friction RESEARCH IN AGRICULTURAL ENGINEERING 71 : 1 pp. 50-59. , 10 p. (2025)
3. I., Keppler bezier curve shaped lamellae in cross flow dryers HUNGARIAN AGRICULTURAL ENGINEERING 2024 : 43 pp. 65-73. , 9 p. (2024)
4. Keppler, István ✉; Bablena, Adrienn Optimal lamella geometry for mixed flow dryers ARCHIVE OF APPLIED MECHANICS 94 : 4 pp. 961-972. , 12 p. (2024) Q2
5. Keppler, István; Bablena, Adrienn Optimal material flow channels of cross flow dryers HUNGARIAN AGRICULTURAL ENGINEERING 2024 : 43 pp. 26-36. , 11 p. (2024)

A témához illeszkedő nem konkrétan a tézist tartalmazó (bár az annak megfogalmazásához vezető kutatás folyamatát bemutató) publikációk

6. Bablena, Adrienn; Keppler, István Szárítóberendezésben lezajló térbeli anyagáramlási folyamatok modellezése MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA 60: 5 pp. 2-5. , 4 p. (2019)
7. Keppler, István ✉; Kocsis, László; Oldal, István; Farkas, István; Csátár, Attila Grain velocity distribution in a mixed flow dryer ADVANCED POWDER TECHNOLOGY 23 : 6 pp. 824-832. , 9 p. (2012) Q2
8. Kocsis, L; Keppler, I; Herdovics, M; Farkas, I; Mellmann, J Investigation of the influences of the dryer walls, flow modifier and the discharge device on particle velocity distribution by discrete element method In: Proceedings of IDS 2012: 18th International Drying Symposium, Xiamen, China, November 11-15, 2012
9. Kocsis, László; Keppler, István; Herdovics, Mihály; Fenyvesi, László; Farkas, István Investigation of moisture content fluctuation in mixed flow dryer. AGRONOMY RESEARCH 9: SI 1 pp. 99-105. , 7 p. (2011)

Az 1. tézis esetében pontosan, felsorolásszerűen szükséges megadni, hogy mely mikromechanikai paraméterek hatása a legnagyobb, és ezek milyen módon befolyásolják a vizsgált jelenségeket.

Az 1. tézisben vizsgált jelenségek esetében a mikromechanikai paraméterek hatása eltérő mértékben érvényesül. A disszertációban bemutatott DEM-alapú érzékenységvizsgálatok alapján az alábbi paraméterek hatása különíthető el.

1. A szemcsék közötti nyugvó súrlódási tényező változtatása eredményezte a legmarkánsabb változást a nyíróvizsgálatok során kapott erő-elmozdulás görbék lefutásában. A szemcsék közötti súrlódási tényező értékének megváltoztatása (a vizsgálati intervallumon belül) csak kismértékű hatással van a nyírási tönkremeneteli

határgörbe meredekségére, viszont jelentős mértékben hat a látszólagos kohézió értékére (4.3. ábra). A 4.3. ábrán megfigyelhető tendencia – miszerint a szemcsék közötti súrlódási tényező növelése a halmaz látszólagos kohéziójának csökkenésével jár – fizikailag értelmezhető. A bemutatott látszólagos kohézió nem mikroszkopikus anyagi tulajdonság, hanem a nyírási vizsgálatok eredményeire illesztett makroszkopikus modell paramétere. A szemcseközi súrlódás növelésével a nyírási ellenállás egyre nagyobb része súrlódási eredetűvé válik, ezért az illesztés során a kohéziós tag hozzájárulása csökken. Ez a jelenség nem a szemcsehalmaz tényleges összetartásának csökkenését jelzi, hanem a makroszkopikus ellenállás-összetevők arányának megváltozását.

2. Az alkalmazott anyagmodell kohézív kötéseinek normális irányú szilárdsága nincs jelentős hatással a makromechanikai jellemzőkre, viszont ugyanennek a kohézív kötésnek a nyírószilárdsága igen erős hatással van mindkét makromechanikai jellemző értékére. A 4.4. ábra a kohézív kötés nyírószilárdságának (s_{Coh}) hatását mutatja a Mohr–Coulomb illesztésből származtatott makroszkopikus paraméterekre. A vizsgált tartományban a s_{Coh} növelése mind a látszólagos kohézió, mind a belső súrlódási szög növekedését eredményezi, közel lineáris kapcsolat mellett. A hatás azonban eltérő mértékű: a látszólagos kohézió érzékenysége lényegesen nagyobb, míg a belső súrlódási szög változása mérsékeltebb. Ez fizikailag értelmezhető, mivel a kohézív kötés nyírószilárdságának növelése elsősorban olyan nyíróellenállás-komponenst erősít, amely kis vagy zérus normálfeszültség mellett is képes teherátadásra, ami a Mohr–Coulomb modellben közvetlenül a c paraméter növekedéseként jelenik meg. A belső súrlódási szög növekedése másodlagos hatásként értelmezhető, amely a kontakt-hálózat stabilitásának, a nyírás közbeni szemcse-átrendeződésnek és a dilatációs viselkedés módosulásának következménye. A bemutatott lineáris összefüggések a vizsgált, viszonylag szűk paramétertartományra és a választott kontaktmodellre érvényes empirikus közelítések, és nem általános anyagtörvényként értelmezendők.
3. A szemcsék gömb alaktól való eltérésének hatását bemutató ábra (4.5) egyértelműen jelzi, hogy a szemcsealak elsősorban a látszólagos kohézió értékét befolyásolja, míg a belső súrlódási szög változása a vizsgált tartományban gyakorlatilag elhanyagolható. Ez arra utal, hogy az alaktól eredő geometriai reteszelődések és a szemcsék közötti érintkezési topológia elsősorban a kis normálfeszültségek melletti nyíróellenállást módosítja, amely a Mohr–Coulomb modellben a c paraméterben jelenik meg. Ugyanakkor az is látható, hogy a belső súrlódási szög alakulása kevésbé érzékeny az alakparaméter változtatására. Ez a megfigyelés módszertani szempontból azt támasztja alá, hogy számos gyakorlati alkalmazásban – különösen akkor, ha a vizsgált jelenség elsősorban súrlódásvezérelt – az egyszerűsített, kétgömbös modellekkel végzett szimulációk is képesek a lényeges makroszkopikus viselkedés megragadására, miközben a számítási igény jelentősen csökkenthető. A szemcsealak részletesebb modellezése ilyen esetekben elsősorban a látszólagos kohéziós jellegű hatások pontosabb leírásához szükséges.
4. A 4.6. ábra az időlépték (Δt) változtatásának hatását mutatja a Mohr–Coulomb illesztésből származtatott makroszkopikus paraméterekre. Az ábra azt mutatja, hogy a belső súrlódási szög és a látszólagos kohézió erősen függ az alkalmazott időléptéktől,

főként akkor, ha az nem egyezik meg a kalibráció referenciaértékével. Ez azt jelzi, hogy az időlépték szerepe túlmutat a numerikus stabilitás biztosításán: befolyásolja a disszipáció mértékét, a kontaktreakciók időbeli lefolyását és a szemcsehalmoz dinamikus válaszát is. A tapasztalatok alapján ezért indokolt, hogy a kalibráció során beállított időléptéket a későbbi számításokban is megtartsuk, mert annak megváltoztatása a kalibrált paraméterekhez tartozó makroszkopikus viselkedést is módosíthatja. Ez az összefüggés a disszertációban szereplő eredményekből leolvasható, és fontos tanulságként szolgál a DEM-alapú kalibrációk alkalmazhatóságára vonatkozóan.

5. A 4.1. ábra a szemcsék rugalmas tulajdonságainak (Young-modulus, E) hatását mutatja a Mohr-Coulomb illesztésből származtatott makroszkopikus paraméterekre. Az ábrán látható, hogy mind a belső súrlódási szög, mind a látszólagos kohézió értéke érzékenyen függ a választott E értékétől, és a vizsgált tartományban nem monotonnak adódik. Ez arra utal, hogy a szemcsék rugalmas merevsége nem pusztán numerikus stabilitási vagy időlépték-korlátozó paraméter, hanem a kontakt-deformációk nagyságán, az erőláncok kialakulásán és a nyírás közbeni szemcse-átrendeződésen keresztül a makroszkopikus viselkedést is befolyásolja. Ennek megfelelően módszertanilag nem indokolt a rugalmassági modulus önkényes módosítása kizárólag a számítási idő csökkentése érdekében, mivel ez a kalibrált mikromechanikai paraméterekhez tartozó makroszkopikus válasz megváltozását eredményezheti. A bemutatott eredmények alapján a Young-modulus értékét a kalibráció és az azt követő szimulációk során konzisztensen szükséges kezelni.

A 2. tézis kiemelten fontos a különböző numerikus eljárásokhoz szükséges anyagjellemzők meghatározása szempontjából. A tézisben szükséges a kidolgozott kalibrálási eljárás lépéseinek részletes ismertetése, külön kiemelve azokat az új elemeket, amelyek a korábbi eljárásokban nem szerepeltek. A tézisben indoklással ki kell térni arra is, hogy az 1. és 2. tézisben említett mikromechanikai paraméterek azonosak-e, vagy eltérnek egymástól.

A 2. tézisben bemutatott kalibrálási eljárás alapját módosított torziós nyíróvizsgálat képezi. A vizsgálat attól tekinthető módosítottnak, hogy a szemcsehalmoz a nyírás megkezdése előtt függőleges irányból előterheljük, így a nyíró-tönkrementeli viselkedés különböző terhelési állapotok mellett vizsgálható. A módszer további lényeges sajátossága, hogy helyszíni vizsgálatként alkalmazható, így a szemcsehalmoz mechanikai jellemzői szállítás és mintavétel okozta bolygatás nélkül határozhatók meg.

A kalibrálási eljárás célja olyan mikromechanikai paraméterkészlet meghatározása, amely különböző diszkrét elemes alkalmazásokban is konzisztensen használható, és kísérletileg igazolt makroszkopikus viselkedést eredményez. Az eljárás során több előterhelési szinten kerül meghatározásra a szemcsehalmoz elnyírásához szükséges nyomoték értéke. A kalibráció első lépése ezen értékek kísérleti meghatározása, majd ennek numerikus megfelelőjének felépítése diszkrét elemes modell segítségével.

A kalibrálás során a mikromechanikai paraméterek szisztematikus, egyenkénti módosítása történt, miközben a szimulált nyírási válasz összevetésre került a mért nyomoték értékekkel,

illetve makroszkopikus paraméterekkel. A paraméterek meghatározása nem egyetlen terhelési állapothoz vagy egyetlen mérési ponthoz igazodott, hanem a teljes tönkremeneteli viselkedés együttes figyelembevételével történt. Ez a megközelítés csökkenti annak lehetőségét, hogy különböző mikromechanikai paraméterkombinációk azonos makroszkopikus eredményt szolgáltatassanak.

A kidolgozott eljárás lényeges módszertani eleme, hogy a kalibráció nem zárult le a paraméterek illesztésével, hanem egy független validációs lépéssel egészül ki. A meghatározott mikromechanikai paraméterkészlet helyességét klasszikus nyírókísérlet numerikus reprodukciójával ellenőriztem. A szimulációk és a kísérleti úton meghatározott nyírási tönkremeneteli határgörbék közötti jó egyezés igazolta, hogy a kalibrált paraméterek nemcsak az alkalmazott kalibrációs elrendezésre, hanem más, azonos fizikai alapokon nyugvó nyíróvizsgálatokra is érvényesek.

Az 1. és 2. tézisben szereplő mikromechanikai paraméterek azonosak. A 2. tézis a mikromechanikai paraméterek meghatározására és validálására fókuszál, míg az 1. tézis ugyanezen paraméterkészlet érzékenységet és hatását vizsgálja különböző modellezési beállítások mellett. A két tézis tehát nem eltérő paraméterrendszerekre épül, hanem ugyanazon, kísérletileg ellenőrzött mikromechanikai paraméterkészlet eltérő módszertani aspektusait tárgyalja.

Kiegészítésként szeretném megjegyezni, hogy a disszertációban bemutatott kalibrációs és validációs vizsgálatok összességében három különböző diszkrét elemes szoftverkörnyezetben valósultak meg (EDEM, Rocky DEM és YADE). Bár nem minden lehetséges szoftver-modell-paraméter kombináció került szisztematikusan vizsgálatra, az egyes módszertani összevetések mindhárom környezetben konzisztens eredményeket szolgáltatottak. Ez arra utal, hogy a bemutatott kalibrációs eljárások és az abból levont következtetések nem egy adott szoftver specifikus megvalósításához kötődnek, hanem általánosabban érvényesek a diszkrét elemes modellezés keretein belül. Ennek részletesebb, rendszerszintű vizsgálata ugyanakkor már túlmutatott a jelen dolgozat célkitűzésein.

A 3. tézisben pontosítani kell, mit jelent az a megfogalmazás, hogy „bizonyos esetekben”, vagyis milyen konkrét feltételek, tartományok vagy körülmények között érvényes az állítás.

A 3. tézisben szereplő „bizonyos esetekben” megfogalmazás olyan feltételekre utal, amelyek mellett a vizsgált jelenség a bemutatott modellkeretek között egyértelműen kimutatható volt, ugyanakkor a teljes paramétertér szisztematikus feltérképezése nem történt meg (2015-ben nem állt rendelkezésemre az ehhez szükséges hardver környezet). A vizsgálatok a kutatási munka egy korábbi szakaszában, viszonylag egyszerű numerikus modellek alkalmazásával készültek, amelyek akkor még nem tették lehetővé a talajművelő szerszám szabad sajátregzéseinak teljes körű figyelembevételét. Ennek következtében a tézisben megfogalmazott állítások meghatározott modellezési feltételekhez, kinematikai kényszerekhez és vizsgált üzemállapotokhoz kötődnek, nem pedig általános, minden lehetséges szerszám-talaj-rezgési konfigurációra érvényes megállapításként értelmezendők.

Ugyanakkor fontos hangsúlyozni, hogy az egyszerűsített modellezési megközelítéssel kapott eredmények összevetése a szakirodalomban közölt kísérleti és numerikus adatokkal jó egyezést mutatott (4.16. ábra), ami arra utal, hogy a kimutatott tendenciák fizikai szempontból relevánsak. A bemutatott eredmények ebben az értelemben nem végpontjai, hanem kiindulópontjai egy olyan kutatási iránynak, amely a rezgő talajművelő szerszámok dinamikus viselkedésének mélyebb megértését célozza.

Megjegyzem, hogy a vizsgált problémakör azóta újra a kutatásaim fókuszába került: jelenleg a talajművelő szerszámok kopásának és sajátrezgéseinek kapcsolatát, valamint a szerszámrezgések spektrális tömegközéppont vándorlását elemzem numerikus szimulációk és kísérleti vizsgálatok segítségével. Az eddigi eredmények azt jelzik, hogy a 3. tézisben felvetett jelenségek pontosabb, kvantitatív feltételekhez kötött leírása a korszerűbb modellezési eszközök segítségével ma már reális célkitűzés. A disszertáció 3. tézise ennek megfelelően egy hosszabb távú kutatási folyamat akkor releváns eredményeit foglalja össze.

Az 5. tézisben számszerűen szükséges megadni, mit jelent az, hogy az eredmény „sokkal jobb”, vagyis milyen mértékű javulásról van szó, és mihez képest értelmezhető ez a különbség.

Az 5. tézisben szereplő „sokkal jobb” megfogalmazás valóban pontosításra szorul. A bemutatott ábrák alapján a különböző kifolyógeometriák hatása az egyenletlenségi tényező számszerű összehasonlításával értelmezhető. Az egyenes kialakítást referenciaértékként tekintve mind a ciklois, mind a Bézier-görbével leírt geometria alacsonyabb egyenletlenségi tényezőt eredményez. A leolvasható adatok alapján a Bézier-geometria az egyeneshez képest jellemzően 20–35%-os csökkenést eredményez az egyenletlenségi tényezőben, míg a ciklois esetében ez a javulás elérheti a 40–55%-ot, a vizsgált súrlódási tartománytól függően. A Bézier-görbével kapott eredmények ugyanakkor következetesen az elméletileg kedvezőbb ciklois és az egyszerű egyenes geometria között helyezkednek el.

Köszönöm a 3., 4. és 5. tézisek elfogadását. Remélem, hogy a fenti pontosításokkal az 1. és 2. tézis is elfogadható.

Kérdések a dolgozat tartalmához kapcsolódóan

1) A szakirodalmi áttekintésben, a dolgozat 13. oldalán a Jelölt leírja, hogy a Mercury DPM programrendszer működését mutatja be. Mi indokolta ennek a programrendszernek a kiválasztását?

A MercuryDPM programrendszer bemutatását elsősorban módszertani megfontolások indokolták. A disszertációban alkalmazott többi diszkrét elemes szoftverkörnyezet működési elvei alapvetően hasonlóak, a kontaktmodellek, az időintegrálás és a részecske–részecske kölcsönhatások kezelése tekintetében nincs lényegi különbség közöttük. Emiatt ezek részletes, párhuzamos ismertetése nem járult volna hozzá érdemben a dolgozat megértéséhez.

A MercuryDPM kiválasztásának egyik fontos szempontja az volt, hogy nyílt forráskódú programrendszer, így a numerikus megoldások, a kontaktmodellek és az alkalmazott algoritmusok teljes mértékben átláthatók és egyértelműen dokumentálhatók. Ez különösen

lényeges volt azokban az esetekben, ahol a program működésébe közvetlenül be kellett avatkozni. A Galton-deszkával kapcsolatos vizsgálatok során a modell módosítása és bővítése elsősorban ebben a környezetben történt meg, ami lehetővé tette az egyedi geometriai és kinematikai feltételek pontos megvalósítását.

Ennek megfelelően a MercuryDPM részletesebb bemutatása nem egy adott szoftver preferálását, hanem azt a célt szolgálta, hogy a dolgozatban szereplő numerikus eljárások működése, módosíthatósága és reprodukálhatósága világosan követhető legyen.

2) A szakirodalmi áttekintésben, a dolgozat 14. oldalán a Jelölt azt írja, hogy a Hertz–Mindlin kapcsolati modellt alkalmazza. Miért ezt a modellt választotta, és milyen szempontok alapján döntött mellette?

A Hertz–Mindlin kapcsolati modell alkalmazását elsősorban módszertani és gyakorlati megfontolások indokolták. Ez a modell a szemcsés anyagok normál- és érintőirányú kontaktviselkedésének egyik legszélesebb körben elfogadott és mechanikailag jól megalapozott leírása, amely rugalmas testek érintkezéséből vezethető le, és fizikai paraméterei egyértelműen értelmezhetők. Ennek köszönhetően a modell alkalmas arra, hogy a mikromechanikai paraméterek és a makroszkopikus viselkedés közötti kapcsolat értelmezhető módon vizsgálható legyen.

A modell választását emellett az is indokolta, hogy a Hertz–Mindlin megközelítés a diszkrét elemes alkalmazásokban gyakorlatilag szabványként terjedt el, és a legtöbb elterjedt DEM szoftverkörnyezet alapértelmezett vagy közvetlenül elérhető kapcsolati modellje. A dolgozat egyik célja az volt, hogy a bemutatott módszerek és eredmények közvetlenül alkalmazhatók legyenek gyakorlati DEM-szimulációkban, ezért célszerűnek tartottam olyan kontaktmodellt alkalmazni, amely a felhasználók széles köre számára ismert és hozzáférhető.

Alternatív, összetettebb kapcsolati modellek alkalmazása ugyanakkor nem állt összhangban a dolgozat célkitűzéseivel. A vizsgálatok fókuszában nem egy speciális kontaktmodell fejlesztése, hanem a mikromechanikai paraméterek hatásának, kalibrálhatóságának és alkalmazhatóságának bemutatása állt. Ebből a szempontból a Hertz–Mindlin modell megfelelő egyensúlyt biztosít a fizikai megalapozottság és a gyakorlati alkalmazhatóság között.

3.a) A 2.7. ábrán kérem megadni a tengelyek pontos feliratait.

A 2.7. ábrán az alkalmazott koordináta-rendszer Descartes-féle derékszögű koordináta-rendszer. Az x tengely a vízszintes irányú helykoordinátát jelöli (x [m]), míg az y tengely a függőleges irányú helykoordinátát (y [m]). Az A pont az origóban helyezkedik el ($A(0,0)$), a B pont koordinátái pedig $B(x_B, y_B)$. Az ábrán feltüntetett s az ívhossz menti helykoordinátát, Δs az ívhossz menti elmozdulást, míg Δx és Δy az ennek megfelelő vízszintes és függőleges irányú koordinátaváltozásokat jelölik.

3.b) A 2.8. ábra esetében kérem részletezni az a), b) és c) alábbiak jelentőségét, valamint azok kapcsolatát a szövegben tárgyalt jelenségekkel

A 2.8. ábra a terelőlemezek geometriájának szerepét szemlélteti a kifolyónyílás környezetében kialakuló áramlási viszonyok szempontjából. Az a) alábbi a referenciaeset mutatja, ahol a

szűkülő keresztmetszetben a szemcsehalmaz terelőelem nélkül áramlik, így a boltívek kialakulása és összeomlása kizárólag a geometria és a szemcseközi kölcsönhatások eredménye. Ez közvetlenül kapcsolódik a szövegben említett, öntartó boltívek kialakulására és az ebből adódó kiömlésgátlás lehetőségére.

A b) alábbi alkalmazott szimmetrikus terelőlemez célja a szemcseáramlás irányítása és a kifolyó feletti feszültségállapot módosítása. Ez a kialakítás hatással van a boltívek kialakulásának helyére és stabilitására, ezáltal a kifolyási sebesség alakulására is, összhangban az Oldal et al. (2012) által leírt, boltívképződéshez kapcsolódó sebesség-ingadozásokkal.

A c) alábbi tagolt terelőelemeket mutat, amelyekkel a szemcsehalmaz áramlása lokálisan befolyásolható. Az ilyen kialakítás lehetőséget ad a boltozatképződési folyamatok kontrollált módosítására, valamint annak vizsgálatára, hogy a geometriai kényszerek és a szemcse súrlódási tulajdonságai miként hatnak a kifolyási időre és a sebességviszonyokra, összhangban Kruggel-Emden et al. (2009) megállapításaival.

Az alábbiak így a szövegben tárgyalt boltozódási jelenségek, a kifolyási sebesség és a súrlódási tulajdonságok közötti összefüggések geometriai szemléltetését szolgálják.

Kérem, hogy a Jelölt pontosan és egyértelműen fogalmazza meg a dolgozatban összefoglalt kutatások kérdéseit, amelyekre az új tudományos eredmények választ adnak.

A dolgozatban összefoglalt kutatások kiindulópontját az a mezőgépezési alapvetés képezte, hogy a szemcsés anyagok és az azokkal érintkező, illetve azokban mozgó gépelemek kölcsönhatásának pontos leírása meghatározó jelentőségű a mezőgazdasági technológiai folyamatok energiaigénye, hatékonysága, a gépek kopása és a végtermék minősége szempontjából. E kölcsönhatások modellezése a szemcsehalmazok sajátos mechanikai viselkedése miatt különösen összetett feladat. A kutatások célja ezért az volt, hogy a diszkrét elemes módszer mezőgépezési alkalmazását megalapozó, gyakorlati szempontból is értelmezhető válaszokat adjon az alábbi kérdésekre.

Az első alapvető kutatási kérdés arra irányult, hogy a diszkrét elemes modellekben alkalmazott mikromechanikai paraméterek közül melyek határozzák meg döntő módon a szemcsehalmaz makroszkopikus mechanikai viselkedését, különösen a nyírási ellenállást és az erőhatásokat. Ehhez kapcsolódóan vizsgáltam, hogy ezeknek a paramétereknek a hatása elkülöníthető-e, illetve, hogy érzékenységvizsgálatok segítségével csökkenthető-e a kalibrálás idő- és számítási erőforrás-igénye.

A második kutatási kérdés arra vonatkozott, hogy kidolgozható-e olyan kalibrálási eljárás, amely a mikromechanikai paramétereket nem bolygatott, helyszínen mért mechanikai jellemzők alapján határozza meg. Ennek keretében azt vizsgáltam, hogy a helyszíni nyíróvizsgálatokon alapuló kalibráció képes-e megbízható, más vizsgálati elrendezésekben is alkalmazható paraméterkészletet szolgáltatni, és ezáltal kiküszöbölni a mintavétel és szállítás okozta bizonytalanságokat.

A harmadik kutatási kérdés a talajművelő szerszám és a talaj kölcsönhatására irányult, különös tekintettel a rezgő talajművelő szerszámok esetére. A vizsgálat célja az volt, hogy

meghatározható-e, milyen körülmények között képesek a szerszámról a talajba terjedő rezgések a talaj fellazítására, és ez miként befolyásolja a vonóerő- és energiaigényt. Ezzel összefüggésben azt is vizsgáltam, hogy létrehozható-e olyan diszkrét elemes modell, amely a vonóerőigényt a gyakorlat számára elfogadható pontossággal képes előre jelezni.

A negyedik kutatási kérdés a szemcsehalmozok keveredésének modellezésére vonatkozott. A vizsgálatok célja annak feltárása volt, hogy milyen mértékben írhatók le a keverési folyamatok egyszerűsített, de fizikailag releváns modellekkel, és hogy a geometriai kialakítás, valamint a súrlódási jellemzők miként befolyásolják a keveredés hatékonyságát. Ennek keretében külön figyelmet fordítottam arra, hogy mozgó alkatrész nélküli, statikus keverőberendezések – különösen a Galton-deszka elvén működő kialakítások – esetében meghatározható-e a hatékony keveréshez szükséges konstrukciós és működési paraméterek.

Az ötödik kutatási kérdés a gravitációs rendszerű keresztáramú szárítóberendezésekben kialakuló anyagáramlási viszonyokra irányult. A cél annak feltárása volt, hogy milyen mechanikai jelenségek vezetnek az anyagmozgás egyenetlenségéhez, és ez miként járul hozzá az alul- vagy túlszáritásból eredő minőségromláshoz. Vizsgáltam továbbá, hogy a berendezés konstrukciójának módosításával – különösen a lamellageometria megválasztásával – csökkenthető-e az áramlás egyenetlensége, és ezáltal javítható-e a végtermék minősége és a szárítás hatékonysága.

A dolgozatban bemutatott új tudományos eredmények ezen kutatási kérdésekre válaszolnak, és együttesen azt a célt szolgálják, hogy a diszkrét elemes módszer a mezőgépeszeti tervezőmunka számára átláthatóbb, megbízhatóbb és gyakorlati szempontból is alkalmazható eszközzé váljon.

A nyírásvizsgálat diszkrét elemes modelljében a csillapodás időigénye 0,01 volt. Miért ezt az értéket választotta, illetve milyen eljárással határozta meg?

A bírálatban szereplő 0,01 érték nem időtartamot jelöl, hanem egy dimenziótlan konvergenciakritériumot. A nyíróvizsgálat diszkrét elemes modelljében a csillapodás mértékét az ún. *unbalanced force* segítségével jellemeztem, amely a szemcsére ható maximális érintkezési erő és a szemcsére ható maximális erő hányadosaként értelmezhető, amely a szemcsehalmoz mozgásának lecsillapodásával nullához tart.

A 0,01 érték a kvázisztatikus állapot elérésének kritériuma volt. A csillapodás „időigénye” ebben az értelemben nem egy előre megadott időtartamot jelentett, hanem azt az iterációszámot, amely alatt az unbalanced force elérte ezt a küszöbértéket.

A 0,01-es küszöbérték kiválasztása gyakorlati megfontolásokon alapult: ennél az értéknél a szemcsehalmoz globális mozgása már elhanyagolható, ugyanakkor a további csökkentés nem eredményezett számottevő változást a nyírási vizsgálatból származó makroszkopikus eredményekben, viszont a számítási idő jelentősen növekedett volna. Ennek megfelelően a választott érték megfelelő kompromisszumot jelentett a kvázisztatikus állapot biztosítása és a számítási hatékonyság között.

A dolgozat 42. oldalán a Jelölt a következőt írja: „Az itt elvégzett vizsgálatok segítségével bebizonyítottuk, hogy a módosított torziós nyírókísérlet alkalmas olyan helyszíni mérések

elvégzésére, amit felhasználva a diszkrét elemes modell kalibrálása elvégezhető, valamint azt, hogy a torziós mérés diszkrét elemes modellje jó közelítéssel képes visszaadni a méréssel meghatározott talajszilárdságot.” Mi indokolja, hogy ez a megállapítás a „Módszer” fejezetben szerepel? Mit jelent pontosan a „jó közelítéssel” kifejezés? Kérem számszerűsíteni az eltérést (hiba mértéke, relatív eltérés stb.).

A „jó közelítéssel” kifejezés számszerűen a mért és a diszkrét elemes modellből származtatott Mohr-Coulomb tönkremeneteli határgörbék összevetésére utal. A bemutatott eredmények alapján a belső súrlódási paraméter eltérése a mért értékhez képest mintegy 5%, míg a teljes vizsgált normálfeszültség-tartományban a nyírófeszültség eltérése jellemzően 1–6% közé esik. A kohézió értékében tapasztalható nagyobb relatív eltérés elsősorban annak kis abszolút értékéből adódik, miközben a nyírási viselkedés egészét leíró tönkremeneteli határgörbe jó egyezést mutat.

A fenti számszerű összevetés alapján a diszkrét elemes modell alkalmas a módosított torziós nyíróvizsgálattal mért talajszilárdsági paraméterek reprodukálására a mérnöki gyakorlat számára releváns pontossággal.

A bírálat észrevétele jogos abban a tekintetben, hogy ez a megállapítás eredményyszerű következtetésnek tekinthető, és szerkezetileg indokoltabb lett volna az „Eredmények” fejezetben szerepeltetni. A „Módszer” fejezetben való megjelenését az indokolta, hogy a torziós nyíróvizsgálat DEM-modelljének validálása közvetlenül a módszer alkalmazhatóságát volt hivatott igazolni, ugyanakkor tartalmilag valóban átvezet az eredmények értékelésébe.

A nyírókísérleten alapuló kalibrálási eljárás érzékenységvizsgálatánál a „kiinduló érték”, „kezdő paraméter”, „kezdeti érték”, „kiinduló adat” kifejezések szerepelnek. Ezek szinonimák, vagy eltérő jelentéssel bírnak? Amennyiben eltérőek, kérem a különbségek magyarázatát.

A bírálatban felsorolt kifejezések – „kiinduló érték”, „kezdő paraméter”, „kezdeti érték”, „kiinduló adat” – a dolgozatban nem eltérő fogalmakat jelölnek, hanem az érzékenységvizsgálat során alkalmazott ugyanazon referencia-paraméterkészletre utalnak. A szóhasználat nem minden esetben következetes, ami valóban félreértésre adhat okot.

A nyírókísérleten alapuló kalibrálási eljárás érzékenységvizsgálatában ezek a kifejezések azt a mikromechanikai paraméterkészletet jelölik, amelyet a kalibráció során először meghatároztam, és amelyhez képest az egyes paraméterek szisztematikus módosítása történt. Ez a paraméterkészlet nem önkényes választás eredménye, hanem a kísérleti nyíróvizsgálat numerikus reprodukciójával meghatározott, validált referenciaállapot.

A „kezdő paraméter” és „kezdeti érték” megfogalmazások elsősorban a numerikus eljárás szempontjából értelmezendők, és arra utalnak, hogy az érzékenységvizsgálat során a paraméterváltoztatás ebből az állapotból indult. A „kiinduló érték” és „kiinduló adat” kifejezések ugyanezt a szerepet hangsúlyozzák, inkább módszertani, semmint numerikus értelemben. A dolgozatban ezek között tartalmi különbségtétel nem történt, a fogalmak szinonimaként kerültek használatra.

Utólag visszatekintve célszerűbb lett volna egységesen egyetlen megnevezést alkalmazni, amely egyértelműen kifejezi, hogy az érzékenységvizsgálat minden esetben ehhez a kalibrált állapothoz viszonyítva történt.

A 64. oldalon a Jelölt ezt írja: „A szemcsék sűrűségének értéke hatással van a Rayleigh időléptékre és ezáltal a szimulációk futtatási időtartamára...”Ezt milyen eredmények alapján állapította meg, és mely ábrák, illetve adatok támasztják ezt alá?

A szemcsék sűrűségének Rayleigh-időléptékre gyakorolt hatását nem közvetlen mérési vagy numerikus összehasonlító eredmények alapján állapítottam meg, hanem a Rayleigh-időlépték elméleti összefüggéséből következően (2.25 összefüggés). A diszkrét elemes modellezésben alkalmazott kritikus időlépték a szemcsében terjedő rugalmas hullámok terjedési sebességéhez kapcsolódik, amely a szemcse anyagi tulajdonságaitól függ.

A Rayleigh-időlépték általános alakjában tartalmazza a szemcse sűrűségét, jellemző méretét és rugalmas tulajdonságait (különösen a Young-modulust és a Poisson-tényezőt). Ennek megfelelően a sűrűség növelése a rugalmas hullámterjedési sebesség csökkenését eredményezi, ami a kritikus időlépték növekedéséhez vezet. Mivel a numerikus stabilitás érdekében a szimuláció időlépése a Rayleigh-időlépték egy adott hányadánál kisebb kell legyen, a szemcsesűrűség közvetlen hatással van a megengedhető időlépés nagyságára, és ezen keresztül a szimulációk futtatási idejére.

Fizikai értelemben ez az összefüggés úgy értelmezhető, hogy a szemcsék ütközése során kialakuló lökéshullámok terjedési sebessége a szemcse anyagi jellemzőitől függ. Nagyobb sűrűségű szemcsék esetén az ütközések során fellépő dinamikus hatások lassabban terjednek át a szemcsén, ami szigorúbb numerikus időlépték-korlátot eredményez.

A dolgozatban ez az összefüggés elsősorban módszertani megfontolásként jelenik meg, és nem önálló eredményként került bemutatásra.

A 4.1–4.6. ábrák esetében a bemutatott kapcsolatok egyes esetekben exponenciális, más esetekben lineáris jellegűek. Milyen módszerrel határozta meg a kapcsolat jellegét, és milyen tényezők befolyásolják, hogy melyik modell írja le megfelelően az összefüggést?

A 4.1–4.6. ábrákon bemutatott összefüggések esetében a kapcsolat jellegének meghatározása empirikus módon történt. A mikromechanikai paraméterek szisztematikus változtatása során kapott numerikus eredményeket grafikus formában elemeztem, és a vizsgált paramétertartományban egyszerű illesztőfüggvényekkel írtam le. Azokban az esetekben, ahol az adatok közel lineáris lefutást mutattak, lineáris kapcsolatot alkalmaztam, míg görbült lefutás esetén alacsony fokszámú hatványfüggvénnyel, jellemzően másodfokú polinomiális közelítéssel írtam le az összefüggést.

Az alkalmazott kapcsolatok nem általános érvényű törvényszerűségek, hanem a vizsgált paramétertartományon belül érvényes empirikus közelítések, amelyek elsődleges célja az egyes mikromechanikai paraméterek relatív hatásának összehasonlítható bemutatása volt.

Utólagos megfontolásként megjegyezhető, hogy a lineáris vagy nemlineáris kapcsolat megjelenése összefügghet azzal, hogy az adott mikromechanikai paraméter közvetlenül a

kontakt-erők nagyságát befolyásolja-e, vagy közvetetten, a kontaktidőn, a disszipáción és a szemcsehalmoz dinamikus válaszában keresztül fejt ki hatását. Ez utóbbi esetben természetes módon jelenhet meg nemlineáris, hatványfüggvénnyel jól közelíthető viselkedés.

A 76. oldalon a Jelölt megállapítja: „Arra a következtetésre jutottam, hogy a vonóerő arány (mereven rögzített szerszám vontatásához szükséges erő / rezgő szerszám vontatásához szükséges erő) a szerszám geometriától függetlenül csökken.” Kérem részletezni, hogy ezt pontosan mely eredmények alapján állapította meg, valamint felsorolni, hogy milyen szerszámgeometriákat elemzett e következtetés levonásához.

A vonóerő-arány sebességhányadostól való függésére, valamint annak szerszámgeometriától való robusztusságára vonatkozó megállapításomat a 75. oldalon bemutatott, több forrásból származó eredmények együttes értelmezése alapján tettem.

A csatolt ábrán a rezgő szerszám vontatásához szükséges vonóerők arányát (vonóerőhányad = rezgő talajművelő szerszám vonóerőigénye / mereven rögzített talajművelő szerszám vonóerőigénye) ábrázoltam a sebességhányados (szerszámcsúcs sebesség / haladási sebesség) függvényében. Az ábrán egymás mellett szerepelnek saját diszkrét elemes szimulációs eredményeim, saját mérések, valamint több, a szakirodalomban publikált kísérleti adat (Shahgoli et al., Bandalana et al., Niyamapa et al.). Az adatok közös jellemzője, hogy a sebességhányados növelésével a vonóerő-arány minden esetben csökkenő tendenciát mutat, függetlenül attól, hogy az adott vizsgálat milyen konkrét szerszámgeometriával történt.

A következtetés levonásához figyelembe vett szerszámgeometriák a szakirodalmi források alapján jelentős eltéréseket mutatnak. Shahgoli és munkatársai két, mélyművelésre alkalmas, oszcilláló késes altalajlazítót alkalmaztak. Bandalana és munkatársai egy 400 mm hosszú, 70 mm vágóél-szélességű, 30° emelési szögű altalajlazító kést vizsgáltak, míg Niyamapa és munkatársai 100 mm szélességű, 13° emelési szögű pengével végeztek kísérleteket. Az általunk végzett kísérleti vizsgálatokhoz szárnyas kultivátor kapát használtunk, ugyanennek a geometriai modelljét használtuk a diszkrét elemes modellünkben. Ezek a geometriák eltérnek egymástól hosszban, vágóél-szélességben és emelési szögben is, ami a talaj-szerszám kölcsönhatás szempontjából lényeges különbségeket jelent.

Ennek ellenére az ábrán bemutatott eredmények azt mutatják, hogy a sebességhányados növelésével fellépő vonóerő-arány csökkenés tendenciája minden esetben megmarad. A „szerszámgeometriától független” megfogalmazás ebben az értelemben nem azt jelenti, hogy a vonóerő abszolút értéke független lenne a geometriától, hanem azt, hogy a rezgő és a merev szerszám vonóerő-arányának csökkenő jellege a vizsgált, jelentősen eltérő geometriák esetében is konzisztensen megjelenik.

Ez alapján a megállapítás egy robusztus, több forrásból megerősített tendenciára vonatkozik, nem pedig egyetlen konkrét szerszámgeometriára érvényes következtetés.

A téziszűzet jelen formájában inkább a dolgozat kivonataként, semmint a tudományos eredmények és azok alátámasztásának tömör összefoglalásaként értelmezhető.

A téziszfüzet összeállításakor az volt a célom, hogy az új tudományos eredményeket azok módszertani és értelmezési összefüggéseivel együtt mutassam be, ami a terjedelem növekedéséhez és a disszertáció fejezeteihez való erősebb tartalmi kötődéshez vezetett. Ennek következtében a téziszfüzet a jelenlegi formájában valóban inkább a dolgozat tömör kivonataként értelmezhető, mintsem a tézisszerű összefoglalás klasszikus műfajának megfelelő dokumentumként.

Köszönöm a bírálónak az alapos és körültekintő értékelést, valamint azokat a pontos, lényegre törő észrevételeket, amelyek a dolgozat kevésbé kidolgozott vagy pontosításra szoruló részeire is rávilágítottak. A bírálat több esetben olyan szempontokra hívta fel a figyelmet, amelyek a munka mélyebb átgondolását tették szükségessé, és ezáltal érdemben hozzájárultak az eredmények és a módszertani megfontolások tisztázásához és amely szempontok figyelembevételének a későbbi kutatómunkám során nagy hasznát fogom venni.

Gödöllő, 2026. február 12.

Keppler István