

Válasz
Prof. Dr. Keszthelyi-Szabó Gábor,
az MTA doktora
bírálatára

Ezúton köszönöm Prof. Dr. Keszthelyi-Szabó Gábor egyetemi tanárnak, az MTA doktorának az értekezés részletes és gondos áttanulmányozását, valamint a bírálat elkészítését. Külön megtisztelő számomra, hogy a tudományos munkásságom értékelése során kiemelte a publikációs teljesítményemet, az eredmények folyóirati megjelenésének színvonalát, valamint az együttműködési és utánpótlás-nevelési tevékenységemet. Ugyancsak nagy jelentőséget tulajdonítok annak, hogy az értekezés módszertani egységességét, a mikromechanikai szemlélet következetes alkalmazását, valamint az eredmények kísérleti és numerikus alátámasztottságát pozitívan értékelte. Köszönöm továbbá, hogy a megfogalmazott tudományos téziseket elfogadta. A bírálat átfogóan érinti az értekezés módszertani megközelítéseit, az alkalmazott modellezési eljárásokat és az eredmények értelmezését, továbbá több ponton pontosító kérdéseket és kiegészítést igénylő megjegyzéseket fogalmaz meg. A feltett kérdések és észrevételek lehetőséget adnak arra, hogy az értekezés egyes módszertani döntései és következtetései részletesebben kerüljenek kifejtésre. Az alábbiakban a bírálatban megfogalmazott kérdésekre a megadott sorrendet követve adok választ.

Nem gondolja, hogy a DEM-paraméterek „szabadságfoka” miatt gyakorlatilag bármilyen makroszkopikus viselkedés előállítható megfelelő paraméterválasztással?

A diszkrét elemes modellezés egyik ismert sajátossága valóban az, hogy a mikromechanikai paraméterek száma viszonylag nagy, és elvileg különböző paraméterkombinációkkal hasonló makroszkopikus viselkedés is előállítható. A dolgozat módszertani kiindulópontja éppen ennek a problémának a kezelése volt. A bemutatott vizsgálatokban a paraméterter nem szabadon, hanem fizikai és kísérleti megfontolások alapján erősen korlátozva szerepel: a paraméterek értéktartományait önálló mérések, irodalmi adatok, valamint egyszerű mechanikai becslések határozzák meg. Az elvégzett érzékenységvizsgálatok célja nem az volt, hogy tetszőleges makroszkopikus viselkedést „illeszthetővé” tegyenek, hanem annak feltárása, hogy a fizikailag értelmezhető paramétertartományon belül mely mikromechanikai jellemzők gyakorolnak domináns hatást a vizsgált makroszkopikus mennyiségekre, és melyek hatása másodlagos. Ennek eredményeként a kalibráció során a paraméterek szabadságfoka jelentősen csökken, és a modell viselkedése nem önkényes illesztés, hanem kísérletileg is ellenőrizhető mechanikai összefüggések következménye. A dolgozatban bemutatott kísérleti–numerikus összevetések azt

mutatják, hogy a választott megközelítés mellett a DEM-modell nemcsak reprodukálja a mért makroszkopikus viselkedést, hanem annak változásait is konzisztens módon írja le.

Miért tartja a torziós helyszíni mérést alkalmasabbnak DEM-kalibrációra, mint a klasszikus laboratóriumi nyíróvizsgálatot?

A módosított torziós helyszíni mérés alkalmazását nem a klasszikus laboratóriumi nyíróvizsgálatokkal szemben, hanem azok kiegészítéseként tartom indokoltnak a DEM-kalibráció során. A klasszikus nyíróvizsgálatok jól kontrollált laboratóriumi körülmények között, reprodukálható módon szolgáltatnak adatokat a szemcsehalmaz makroszkopikus nyírási jellemzőiről, ugyanakkor a mintavétel, az előkészítés és az előtömörítés szükségszerűen megváltoztatja a halmaz eredeti szerkezetét. A torziós helyszíni mérés előnye, hogy minimális bolygatással, a természetes szerkezethez közelebb álló állapotban teszi lehetővé a nyírási viselkedés vizsgálatát, ami különösen talajok esetében lehet lényeges. A dolgozatban bemutatott eredmények azt mutatják, hogy megfelelő műszerkalibráció mellett a torziós mérésből származtatott nyírófeszültségek és a klasszikus laboratóriumi vizsgálatokkal kapott eredmények konzisztens kapcsolatba hozhatók. Ennek alapján a torziós eljárás alkalmas arra, hogy gyors, helyszíni információt szolgáltatson a DEM-modell kalibrációjához, különösen olyan esetekben, amikor a mintavétel vagy a laboratóriumi vizsgálat nehezen kivitelezhető. A dolgozatban alkalmazott megközelítés célja nem a klasszikus módszerek kiváltása, hanem egy olyan kalibrációs lehetőség bemutatása, amely a kísérleti és numerikus vizsgálatok közötti kapcsolatot a gyakorlati alkalmazások felé is kiterjeszti.

Miért a csíkozást választotta az áramlás jellemzésére, nem pedig sebességmezőket vagy sebesség gradienseket?

Az áramlás jellemzésére alkalmazott csíkozás megválasztását elsősorban az elemzés célja indokolta. A vizsgált rendszerekben – különösen a terményszárítók és statikus keverők esetében – nem a pillanatnyi lokális sebességmezők részletes feltárása volt a cél, hanem az anyagáramlás globális egyenletességének és időben integrált viselkedésének számszerű jellemzése. A csíkozás olyan Lagrange-jellegű megközelítést tesz lehetővé, amelyben az egyes szemcsék pályái és áthaladási ideje közvetlenül követhető, és ezek statisztikai tulajdonságai egyértelmű kapcsolatba hozhatók az áramlási egyenletlenségekkel. Ezzel szemben a sebességmezők vagy sebességgradiensek elsősorban Euler-jellegű, lokális információt szolgáltatnak, amelyek érzékenyek a mintavételezés időpontjára és a térbeli átlagolás módjára, és kevésbé alkalmasak a teljes berendezésre jellemző, időben felhalmozódó hatások közvetlen értelmezésére. A

csíkozás alkalmazása lehetővé tette az áramlási viselkedés egyszerű, robusztus és összehasonlítható jellemzését különböző geometriai kialakítások és üzemi paraméterek esetén. A választott módszer tehát nem alternatívája, hanem célzott kiegészítője a klasszikus sebességalapú leírásoknak, és kifejezetten a vizsgált mérnöki problémák szempontjait szolgálta.

Több helyen kvalitatív vagy trend-alapú következtetéseket von le. Nem hiányzik innen a formális statisztikai szignifikanciavizsgálat?

A dolgozatban szereplő vizsgálatok jelentős részében a cél nem hipotézisvizsgálat, hanem a mikromechanikai paraméterek és a makroszkopikus viselkedés közötti kapcsolatok feltárása, illetve ezek érzékenységeinek vizsgálata volt. A DEM-szimulációk determinisztikus jellegűek az adott paraméterkombináció mellett, a megfigyelt szórás elsősorban a kezdeti feltételek véletlenszerűségéből és a szemcsehalmoz statisztikus szerkezetéből adódik, nem pedig mintavételi bizonytalanságból. Ennek megfelelően a klasszikus statisztikai szignifikanciavizsgálatok – amelyek független minták közötti különbségek kimutatására szolgálnak – ebben az esetben korlátozott többletinformációt nyújtottak volna. A trend-alapú értékelés és az érzékenységvizsgálatok célzottan azt mutatják meg, hogy a vizsgált paraméterek változtatása milyen irányú és nagyságrendű hatást gyakorol a makroszkopikus jellemzőkre a fizikailag releváns paramétertartományon belül. Ahol kísérleti adatok álltak rendelkezésre, ott a numerikus eredmények összevetése kvalitatív és kvantitatív értelemben is megtörtént, és a megfigyelt tendenciák konzisztensnek bizonyultak. A dolgozat szemlélete ezért tudatosan a mechanikai értelmezhetőségre és a mérnöki alkalmazhatóságra helyezte a hangsúlyt, nem pedig a statisztikai hipotézisvizsgálatra, amely a vizsgált problémák jellegéből adódóan nem jelentett volna érdemi módszertani előrelépést.

A bírálóiban megfogalmazott kérdésekre és észrevételekre a fenti válaszokban, a dolgozatban alkalmazott módszertani kereteket és vizsgálati célokat szem előtt tartva adtam választ. Törekedtem arra, hogy a felvetett pontokat egyértelműen tisztázzam, és ahol szükséges volt, a választott megközelítések indoklását részletesebben kifejtsem. Bízom abban, hogy a megadott magyarázatok hozzájárulnak az értekezésben bemutatott eredmények és következtetések jobb érthetőségéhez, valamint a módszertani döntések hátterének világosabb bemutatásához. Ezúton is köszönöm az értekezés gondos áttanulmányozását és a bíráló elkészítésére fordított munkát.

Gödöllő, 2026. február 12.

Keppler István