

VÉLEMÉNY

Goda Tibor János “(Viszko)elasztikus testek száraz és kent csúszó érintkezésének numerikus modellezése / Numerical modeling of dry and lubricated sliding contact of (visco)elastic bodies c. doktori művéről.

A Magyar Tudományos Akadémia (MTA) Doktori Tanácsának döntése alapján, hivatalos bírálói tisztség betöltésére szóló megbízásának eleget téve, a fenti című doktori művet - mely mellékletekkel együtt 137 angol nyelvű oldalt tartalmaz -, továbbá a doktori mű 12 oldalnyi magyar nyelvű összefoglalóját áttanulmányoztam, és a felkérésben megfogalmazott főbb szempontokra is figyelemmel az alábbi véleményt fogalmazom meg.

1. Témaválasztás

A dolgozat témája polimerek, azon belül a gumik és elasztomerek súrlódásának numerikus modellezése rendkívül aktuális és nagy nemzetközi érdeklődésre tart igényt.

A tribológia szakterületén belül a polimerek súrlódási, kopási és deformációs jelenségei még közel sem olyan ismertek, mint a fémek szerkezeti anyagok esetében. Nem véletlen, hogy világszerte komoly kapacitásokat fordítanak a polimer-tribológia jelenségeinek kutatására (jól lemérhető ez a nemzetközi szakfolyóiratok számának növekedésénél, új célszámok megjelentetésénél, nemzetközi konferenciák szervezésénél). Míg szilárdságra kiválóan-, élettartamra elfogadhatóan tudunk méretezni, addig súrlódás-kopás alapján az adott gépelem élettartama nagyobb bizonytalansággal jelezhető előre. Ennek oka a tribológiai rendszerek összetettségében rejlik. A szerteágazó szakirodalom régen letisztázta a tribológiai rendszerek elemeit, ható tényezőit, a meghatározó anyag/energia kapcsolatokat, de a súrlódó felületek közötti túl nagyszámú és dinamikusán változó tényező az analitikus matematikai modellek gyengeségét, illetve erősen korlátozott alkalmazhatóságát jelenti. Annak ellenére, hogy Archard, Kragelszkij és sokan mások jelentős eredményeket értek el egyes tribológiai rendszerek kísérleti alapokon nyugvó számítására, az analitikus módszerek jelenlegi megbízhatósága önmagában nem elég egy súrlódó kapcsolat kopásának előre jelzésére. Ennek tudható be, hogy a modellkísérletek felértékelődtek, sőt, szabványosításra is kerültek. A jól megtervezett és kivitelezett gyakorlati modellezéssel a súrlódási- kopási folyamatok

feltárhatók, de sok esetben idő- és pénzigényesek. Ezt a problémát a kísérleti modellrendszerek numerikus számítási modellezéssel történő kiegészítése oldhatja fel. Ez a numerikus tribológia területe, ez a fő célja: valós kísérleti rendszerek realisztikus hatástényezőinek eredményeit felhasználni olyan numerikus modellben, mely – adott feltételek és határok között – képes számítással jelezni a várható súrlódást, kopást, deformációt.

Ez a területe a tribológiának új, alig két évtizedes, hogy az egyszerű geometriákkal szimbolizált asperit kontaktusokat és azok elmozdulását számítással modellezték 2D-ben a legalapvetőbb mechanikai jellemzők ismeretében, rugalmas acél alapanyagok esetén. Goda Tibor János kutatómunkája a numerikus tribológia szakterületen kiemelkedőnek és úttörőnek nevezhető. Olyan részletekbe menő eredményeket ért el a rugalmas (viszkoelasztikus) érintkezések modellezésénél, melyet a nemzetközi kutatói társadalom is elismer. Ezt fémjelzi nagyszámú rangos publikációja. E dolgozatban foglalta össze közel két évtizedes kutatási és fejlesztési eredményeit.

2. A disszertáció felépítése, formai megjelenítése és stílusa

Az értekezés jól átgondolt, szép kivitelezésű, jó stílusú, olvasmányos munka. A nemzetközi szakfolyóiratokból ismert precíz angol szaknyelven íródott, hibát vagy elütést szinte alig találtam. Belső arányai, fejezet kiméretei elfogadhatóak, bár nem azonos súlyúak.

143 db hivatkozott szakirodalmi eredmény tükrében helyezi el saját munkásságát.

A dolgozat elején, a bevezetés és témafelvetés előtt elhelyezi munkásságát a kapcsolódó támogató projektekben (KRISTAL EU-6, TÁMOP-4.2.1, DFG), valamint tisztázza a PhD hallgatóival kivitelezett munkákat.

A 3. fejezetben röviden összefoglalja, hogy az értekezés három fő tartalmi elemének (1. sima felületeken ébredő viszkoelasztikus súrlódás végelelemes becslése 2. EHD kenési állapotú gumitömítések numerikus modellezése alternáló mozgási rendszerben 3. falsúrlódás és nyomás becslése silókban, 3D diszkrétélelemes módszer fejlesztésével) mi a gyakorlati jelentősége.

A 4. fejezet adja a dolgozat gerincét, amin belül gumik és viszkoelasztikus anyagok száraz és kent súrlódásának numerikus modellezése terén elért eredményeit mutatja be a vonatkozó szakirodalom tükrében. Ez közel 64 oldalt tesz ki, és a megfogalmazott 5 tézisből négy ehhez a fejezethez tartozik.

Az 5. fejezetben foglalkozik a silók diszkrételes modelljeivel és a 3D-s modellekkel elért eredményeivel.

Logikusan ezt követi egy összefoglalás, az új tudományos eredmények 5 db tézispontban megfogalmazva, majd irodalomjegyzék, magyar nyelvű összefoglaló, köszönetnyilvánítás és mellékletek. Ez utóbbiak (A, B, C) szolgáltatják szépen összefoglalva azokat a szakirodalmi előzményeket, matematikai összefüggéseket, melyek a viszkoelasztikus és elasztikus anyagmodellek megalkotásának alapjai és a szoftverfejlesztéseknél felhasználhatók.

Hiányként kell megemlíteni, hogy a dolgozat elején nincs jelölés+dimenzió és rövidítés jegyzék.

Nem könnyíti meg az anyag megértését és a saját munka bemutatását az, hogy az érdemi fejezetekben a szakirodalmi eredményekkel együtt illetve annak a tükrében jelennek meg a saját eredmények, sőt, a szakirodalom kritikai összefoglalása külön egyes alfejezetek után (pl. 4.4.3) jelenik meg. Ennek a szerkesztésnek olvasmányosság szempontjából van jelentősége, de a bíráló munkáját nehezíti.

Összességében megállapítom, hogy a disszertáció formai szempontból megfelel az MTA doktori szabályzatában előírt feltételeknek és így alkalmas az abban kifejtett szakmai tartalom megjelenítésére.

3. Tartalmi észrevételek (4. fejezettől, azaz az érdemi résztől)

A 4. fejezet adja a dolgozat magvát, az itt bemutatott eredmények gumik, elasztomerek (pl. NBR, EPDM típusok) különböző érintkezési viszonyainak numerikus modellezéséről nemzetközileg publikáltak és elfogadottak. Sajnálatos, hogy a tanulmányozott EPDM és NBR összetétele, carbon-black tartalma (az anyagok meghatározó receptúrája) nem ismert, kénytelen a jelölt fizikai/mechanikai tulajdonságokkal azonosítani az egyes polimereket, mint pl. a 4.25 ábrán, ahol a „Shore A” keménység alapján azonosít. (...tudjuk, hogy ez így nem adhat általánosítható eredményt...)

E fejezet kapcsán apróbb észrevételek és hiányosságok fogalmazhatók meg elsősorban, a tartalmi elemek alapvetően megállják helyüket.

- a gumik és elasztomerek súrlódási sajátosságainak tisztázása (Grosch, Lorentz, Persson...stb megközelítései, majd vissza az Amonton's törvényhez) nehezen követhető. A súrlódási ellenállás hiszterézis komponensének bevezetése sem logikus. Célszerűbb és érthetőbb lett volna az általánosan elfogadott Archard-féle súrlódási elméletre alapozva ($F_s = F_A + F_d$ azaz a a súrlódási ellenállása a kontaktzóna adhéziójának és deformációjának az összege) kiindulni,

és ezt kiterjeszteni a kontaktzónától távolabbi anyagi részek deformációjából eredő energiavesztéssel. Egy gráf vagy halmaz-ábrázolással a súrlódási modellek közötti kapcsolatok és származtatások szépen bemutathatók lettek volna.

- a 4.2.-es ábra minősége nem elfogadható, még ha irodalmi is, a dolgozatban fel kellett volna javítani az olvashatóság miatt. A 4.1. és 4.2. ábrákhoz a kritika hozzá tartozott volna, hogy a kontaktzónától távolodva nem két elkülöníthető anyagi tartomány van anyagmodell szempontjából, hanem valójában az érintkezési zónától egyre távolabb haladva fokozatosan hal el a deformáció mértéke, az anyag alapvetően gradiens viselkedést mutat.

- a 4.3.1.-ben, az egyszerű 2D gumi modell tartalmaz konkrét igénybevételi és anyag jellemzőket. Lehet itt érvényességi hőmérséklet tartományt definiálni?

- 4.3.2.-ben volt e valami gyakorlati indíttatása, hogy a modellben az EPDM lap vastagsága 2 mm és az idealizált asperit sugara 0,25 mm? Szintén nincs indoklása a 15 tagú Maxwell-modellnek a kapcsolt nemlineáris rúgóval.

- 4.3.3. részben a viszkoelasztikus súrlódó rendszerek hőmérséklet függését is kiemeli és részletesen bemutatja 2D modellen.

- 4.12. /b ábra olvashatatlanul kicsi, van-e értelme a viszkoelasztikus súrlódási tényezőt 5 tizedesjegyre megadni?

- 4.3.6 és a 4.3.7 alfejezet foglalkozik a korábbi ismeretek kiterjesztéseként 3D-s végeelem modellekkel, hangsúlyozva a fékhenger és EPDM tömítés érintkezési viszonyainak és súrlódásuknak számítását (4.17-4-19. ábrák), valamint macro-scale geometriai elrendezésben (acél gömb csúszása gumi felületen) a modellszámítások jóságát, mérési eredményekkel összevetve (4.22. ábra). Sajnos a vizsgálati rendszer és határai nincsenek kellően definiálva. A

- 4.22 ábra aláírása a modell identifikációját tartalmazza, de hogy történt-e validálás pl. adott hőmérséklet tartományra, az nem derül ki.

- A 4.27 ábrán a névleges normál terhelés függvényében mutatja az NBR 90 jelű gumi csúszását igen kis sebességgel (0,1 mm/s) PMMA és acél felületen. Denny hipotézise mellett van-e saját magyarázata a tapasztalt jelenségről illetve a görbék közti különbségről? Hogy kell értelmezni a kenési állapotot és azt, hogy „light mineral oil”?

- a 4.5 alfejezettől kezdve foglalkozik gumi elemek (hidraulikus dugattyúrúd tömítés, ablaktörlő lapát) vegyes súrlódási állapotával stochasztikus modellalkotással. Saját munkáját első lépésben a Greenwood-Williamson és a Persson-féle érintkezési elmélet alapos összehasonlítása adja, ahol számszerűsíti az egyes modellek által szolgáltatott eredményeket a névleges érintkezési nyomás függvényében, 0,1 és 1 MPa között. Ehhez kapcsolódik a dolgozat 2. tézise. Úttörőnek tekinthető, hogy a korábban dugattyúrúd tömítésekre

kidolgozott, de korlátozott feltételekre érvényesíthető Salant modellt továbbfejlesztve, olyan numerikus modellt alkotott PhD hallgatóival, mely a felületi érdesség, a kavitáció, a nyomásfüggő viszkozitás és a rugalmas deformáció hatását is figyelembe veszi. A modellt adaptálták ablaktörlő gumilapát érintkezési viszonyainak meghatározására, mint ahogy azt a 4.56. ábra is szemlélteti. Eredményeiket széleskörűen publikálták.

Az. 5. fejezet foglalkozik silók kifolyásának modellezésével, diszkrét elemes analízissel.

Ez a része a dolgozatnak tematikailag nehezen kapcsolható össze az előbbiekkal, csak a feladat megoldás módszertana tekinthető közösnek. Az egész dolgozat legproblémásabb fejezete, amit talán el is lehetett volna hagyni.

- A munka érdemi része 2005-re datálódik gömbmodellekre építve, amikor a módszer és eredmények újszerűsége fennállt, de a jelen dolgozatban megfogalmazott tézis már egyrészt elavultnak tekinthető, másrészt pontatlan és bizonytalan megfogalmazású.

- E rész irodalmának áttekintése is hiányos. Sajnálatos, hogy a BME-n korábban elért, már a 90-es években publikált eredmények (pl. Bagi Katalin, diszkrét elemes halmazok modellezése, az MTMT-ben 91-től végignézhető) nem jelennek meg. Nem kevés munka történt Magyarországon a mezőgépészet területén is, ennek is érdemes lett volna utána nézni.

- A fejezet fő problémája, hogy szemcsetulajdonságokra alapozva állítja fel a kapcsolati modellt és próbálja makro-rendszerre átültetni. Ez rendkívül bizonytalan dolog. A diszkrét modellezés a gyakorlatban nem működik a „valós” szemcsetulajdonságok alkalmazásával, a halmazt és annak viselkedését kell modellezni. Még akkor sem, ha a modellben és a valóságban ugyanakkorák a szemcsék. A DEM-ben az egyik legnagyobb probléma a megfelelő paraméterek megkeresése, ebben a témában a mai napig jelennek meg új módszerek, nem véletlenül. A módszer gyakorlati alkalmazásának alapvető feltétele, hogy a halmaz viselkedését írja le, ami a paraméterek identifikációjával lehetséges.

- A 5.1. táblázatban foglalja össze a vinil-acetát gömbök tulajdonságait, amit a modellszámításoknál használ. A gömbök mérete nincs feltüntetve ($\varnothing 6\text{mm}$), habár a halmaz viselkedése szempontjából az egyik legfontosabb tényező, mely minden további viselkedést (szemcse deformáció, kontakt feszültségek, súrlódási viszonyok és végül kifolyási sebesség és falnyomás) befolyásol. A számítási modell validálását lehetővé tevő paraméter változtatás, mint ami az 5.1. táblázatban van, az pl. napainkban már számítható hatások alapján történik.

- Az 5.1. táblázat adatait nem mérte, nem kalibrált a modell, csak átvette a Schafer cikk [87] alapján, ami szintén átvett egy korábbi cikkből [91], mely 2D gömbmodelleken alapszik.

Azaz cellulóz-acetát gömböket modellez, nem azok halmazát, ami teljesen másképp viselkedik eltérő szemcseméreteknél és silógeometriáknál.

- *Miért számolt szemcseátmérő nyolcszorosával a kifolyási átmérőnél?* Ez nagyon alacsony érték, nem biztos, hogy klasszikus halmazként viselkedik a kifolyásnál, boltozódás veszélye is fenn áll.

- Egy valós kifolyási modell kifolyási sebességének mérésével a halmaz- és a modell validálása is megtörténhetett volna, e nélkül a munka eredményét vagy elhiszi az olvasó, vagy sem.

- A munkából megfogalmazott tézist (5. tézis) nem tudom elfogadni - mindamellett, hogy működik egy nagy munkával megírt számítási modell – mert a megfogalmazása bizonytalan. Kalibrált modellt definiál, habár a leírtak szerint nem az, végképp nem a halmazra vonatkozóan. A falnyomás értékét számolva kijelenti, hogy az a töltet súlyának 12....16%-a. Ez nem igaz így, ehhez siló geometriai arányok tartoznak, melyek egyébként szabvány szerinti kategóriákban definiáltak (pl. EUROCODE1, tervezés alapjai, tartószerkezeteket érő hatások: „karcsú” és „zömök” silók. Az EUROCODE1 tartalmazza azt a Janssen-féle falnyomásra vonatkozó, „e”-ados telítési görbe szerinti eloszlás függvényt, amit a dolgozat a 4.5.6-ban a 103.oldalon említ, de sehol nem mutatja be és nem hivatkozza.

E fejezetről összességében megállapítható, hogy a maga idejében jelentős munkát tartalmazva újszerű volt, a kidolgozott módszer mindenképp egy előrelépésnek tekinthető, de a belőle fogalmazott tézis pontatlan, bizonytalan és nem kellően definiált, ezért azt nem tudom elfogadni.

Tézisek.

A fent leírt részletes bírálat értelmében:

1. tézis: elfogadom
2. tézis: elfogadom
3. tézis: elfogadom
4. tézis: elfogadom
5. tézis: nem fogadom el

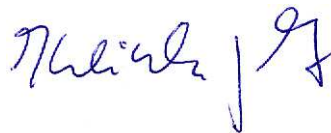
5. Kérdések

A véleményben dőlt betűkkel tördeltem azokat a részeket, amire további magyarázatot és választ várok a jelölttől.

6. Összegzés

Az értekezés önálló, értékes és új tudományos megállapításokat is tartalmazó igényes munka. Mindezek alapján a disszertáció nyilvános vitára tűzését, és eredményes védelem esetén az MTA doktora cím odaítélését javaslom.

Gödöllő, 2017 február 15.



Prof. Dr. Kalácska Gábor
MTA doktor