

BÍRÁLAT

Goda Tibor János

„Numerical modeling of dry and lubricated sliding contact of (visco) elastic bodies”

címmel az MTA doktora tudományos cím
megszerzéséért benyújtott disszertációjáról

Az értekezés bírálatára DT.58068/16/06 jelzéssel kaptam felkérést az MTA Doktori Tanácsától. Az értekezés angol nyelven íródott. Arra vonatkozó dokumentum nem érkezett, hogy az MTA engedélyezte az értekezés angol nyelven való beadását, azonban feltételezem, hogy az MTA Doktori Tanácsának adminisztrációja nem küldte volna ki az értekezést bírálatra, ha ez a feltétel nem teljesült volna.

Ezzel kapcsolatban azonban *a jelen bíráló nem leplezheti azon véleményét, miszerint* a magyar állampolgároknak a Magyar Tudományos Akadémiához benyújtott értekezéseinek alapesetben *magyar nyelven kellene íródniuk*, tekintettel arra, hogy az Akadémiánk küldetésének egyik fontos pontja a magyar nyelv ápolása, és ennek szellemében törekedni kell a magyar műszaki nyelv fejlesztésére és kiteljesítésére!

Az értekezés általános jellemzése

Az értekezés a címdalton túl 3 oldalas tartalomjegyzéket, 1 oldalas eredetiségi nyilatkozatot, 100 oldalon érdemi tárgyalást, 2 oldalon az értekezés téziseinek összefoglalását, 7 oldalas irodalomjegyzéket, 2 oldalas magyar nyelvű összefoglalót, 1 oldalas köszönetnyilvánítást és 20 oldalas függeléket (A, B és C jelű fejezetekkel) tartalmaz.

Az értekezés formai megjelenése megfelel a kívánalmaknak, a gépelés és az ábrák igen gondos kivitelűek. Az értekezés terjedelméről azonban azt meg kell jegyezni, hogy az egy oldalon átlagosan 50 soros és soronként 90 leütéses tükör alkalmazása (oldalanként 4500 leütés). A szokásos 1600 leütéses „nagy oldalt” figyelembe véve az értekezés valóságos terjedelme mintegy 280 oldal, ami az alkalmazott kicsi betűmérettel együtt a bírálat elkészítését *nem* segítette.

Az értekezés angol nyelvű fogalmazása csaknem hibátlan, csupán néhány helyen állapítható meg névelő hiány, esetenként személyrag hiány, vagy a többes szám jelének hiánya.

Az értekezés irodalomjegyzéke 143 tételt tartalmaz. Az értekezés szerzője 22 tételnél szerepel szerzőként az értekezés témájába vágó tudományos eredmények ismertetésével. Ezen belül 6 önálló (egyszerzős) cikkére, 14 kétszerzős és 2 többszerzős cikkére hivatkozik. Véleményem szerint a szerző eredményeit *megfelelően* publikálta a hazai és nemzetközi szakkiadványokban.

Az értekezés témaválasztása

Az értekezés választott témaköre tribológia szakterületéhez tartozik, és mint minden tribológiai probléma nagyon összetett jellegű. A száraz és kent felületek

csúszósúrlódásos kapcsolata viszko-elasztikus megközelítésű tárgyalásának mechanikai, hőtani és áramlástani alapokon kell felépülnie, és ehhez kapcsolódik a felületi érdességek alkalmas matematikai modellek keretében való kezelése. A tribológiai jelenségek fizikai hátterének megértése és modellezése, valamint a megfelelő rendszeregyenletek felállítása előfeltétel, és ennek teljesülése lehetővé teszi a fellépő parciális differenciálegyenlet rendszerek peremérték-feladatainak ill. kezdeti érték feladatainak numerikus közelítő megoldását a véges elemek módszerével. Lehetségessé válik a kereskedelmi forgalomban kapható programrendszerek kiterjedt felhasználói alkalmazása.

Ezen a ponton azt kell hangsúlyozni, hogy a véges elemek módszerével dolgozó szoftverek alkalmazásakor alapvetően fontos az alkalmazott paraméterek helyes beállítása. Itt egyrészt a mesh-érzékenység és a peremfeltételek kérdésének helyes kezelése, másrészt az anyagjellemző értékek helyes megválasztása emelendő ki. A súrlódásos felületi kölcsönhatások feltárásának és alkalmazásának másik alapvető tényezője a jól körülhatárolt feltételek mellett végzett kísérletek eredményeinek rendelkezésre állása.

A tekintetbe vett viszko-elasztikus sajátosságot felmutató gumiszármazék próbatestek és a nagymerevségű támasztófelület kontaktmechanikai modellekre támaszkodó, száraz és kent felületi viszonyok melletti érintkezése esetén a különböző érdességi viszonyok jelenlétében kialakuló csúszósúrlódásának sajátosságainak numerikus modellezése az értekezés 100 oldalas érdemi részéből 74 oldalt tesz ki. Ez a témaválasztás egybehangzik az értekezés címével és **önmagában is elegendő lett volna** egy tartalmas akadémiai doktori értekezéshez.

A jelölt azonban értekezésében 26 oldal terjedelemben behatolt a siló tornyok és surrantók ömlesztett anyagáramlási folyamatának modellezési kérdésébe is. A töltet viselkedését kis gömbök egymással és a tartály falával kialakuló súrlódásos érintkezése során fellépő dinamikai kölcsönhatását a diszkrét dinamikai rendszerek vizsgálatában szokásos módon modellezte. Eredményként a siló valamint a surrantó falára ható, falra merőleges és a fal síkjában működő súrlódóerők alakulásával kapcsolatos kijelentést fogalmazott meg, alkalmazva a jelölt által kidolgozott összetett szimulációs algoritmust és programrendszert.

Ez a második - ugyancsak tribológiai alapokon nyugvó – nagyon érdekes tudományos téma kidolgozását a jelölt tulajdonképpen a *Lagrange* szemléletű folyadékáramlás leíráshoz hasonló elven építi fel az eljárását a szimulált szilárd tömegsokaság Newtoni mozgásegyenlet-rendszerének numerikus megoldásával. Valójában **ez a témakör önmagában is alkalmas lett volna az akadémiai doktori disszertációhoz.**

Az disszertáció felépítéséről, tartalmáról

A disszertációban bemutatott anyag öt fő részre osztható.

1. Viszko-elasztikus (gumiszerű) anyag nagykeménységű súrlódópartner érdes felületén kenőanyag mentes csúszó súrlódás közben kialakuló kontaktmechanikai folyamat numerikus leképezése a véges elemek módszerével. Célja a viszkozus disszipáció energiaigényének a súrlódásos kapcsolat mozgatásához szükséges energiaáram bevezetés megnövekedésével kapcsolatos mozgatóerő szükséglet növekedéssel összefüggő látszólagos súrlódási tényező alakulásában a „viszkózus súrlódási” frakció kimutatása.

2. Viszko-elasztikus kapcsolat előzőekben vizsgált erőátadási kérdéseit a kenőanyag (kenőolaj) jelenlétében kialakuló vegyes súrlódásos és tisztán folyadék-súrlódásos tangenciális erőátszármaztatás vizsgálata. Ennek előkészítése az elvégzett alapos kísérleti adatfeltárás a vonatkozó szakirodalom áttekintésével. Kritikai ismertetés és a jelölt numerikus modellel végzett saját szimulációinak tükrében kerül értékelésre a *Greenwood-Williamson* féle és a *Persson* féle modell. Merev síkfelület elasztomer partnerrel való érintkezésére vizsgálja és értékeli az érdes érintkezési felületek középtávolságaira kapott eredményeket.

3. A szabálytalan lefutású érdes profillal bíró kent felületekkel kapcsolatos súrlódási folyamatok vizsgálatának érdemi része a kenőanyag jelenlétében kialakuló kontaktmechanikai és hidraulikai folyamatok numerikus leképezése. A tényleges numerikus kivitelezés a *Patir* és *Cheng* által kifejlesztett sokaságátlagolt nyomásfüggő viszkozitás mellett érvényes Reynolds egyenlethez a *Salant* és társai által kifejlesztett befolyási koefficiensekkel dolgozó eljárással történik. A differenciálegyenletet iteratív eljárással megoldó programrendszer a numerikus integrálásához *Patankar* differencia sémáját alkalmazza.

4. A korábbi kutatási eredményekre támaszkodva olyan modell került kidolgozásra, amely a teljes elasztohidrodinamikus folyamatot leképezi, azaz nem csak a szabálytalan (konstans középértékű) érintkezési felületet, a kenőanyag áramlás nyomásfolyamataiból következő kavitációs jelenséget kezeli nyomásfüggő viszkozitás figyelembe vételével, hanem az érintkezésbe lépő kiszögellések rugalmas deformációit is beépíti a modellbe. Az itt kialakított modell és eljárás alkalmazását a gépkocsi ablaktörlő gumi és üveg, valamint a dugattyúrúd gumi ogyűrűs tömítésének vegyes-súrlódásos periodikus érintkezési folyamata esetére bemutatott esettanulmányok mutatják be.

5. A súrlódásos érintkezési feladatok másik, az első négy kérdéskörtől eltérő jellegű feladat megoldását adja a silóban vagy surrantóban tárolt, majd a gravitációs erőter hatására az alsó nyíláson kiürítésre kerülő gömb alakú részecskék egymással és a falakkal fennálló súrlódásos érintkezés mellett kialakuló dinamikai folyamat modellezésével. A tömeg részek mindegyikére érvényesített newtoni mozgásegyenlet egy szimultán mozgásegyenlet sokasághoz vezet, melynek numerikus integrálásával a kiürülési folyamatjellemzői már meghatározhatók. A gyakorlati alkalmazásokhoz (tervezés, üzemeltetés) hasznos eredményeket szol-

gáltató választ szolgáltat a numerikus elemzés, a siló/surrantó falak különböző alakú változatainak terhelési viszonyaira nézve.

Általános megállapítások a disszertációba foglalt anyagról.

A disszertáció áttanulmányozása után megállapítható, hogy a disszertáció téma-választása a tribológia tudományosan nagyrészt feltáratlan szakterületi kérdéseinek megválaszolására irányul, és magában hordja a közvetlen ipari alkalmazások részéről jelentkező konstrukciós és üzemeltetési mérnöki feladatok egzakt alapokon nyugvó megoldásának lehetővé tételét.

A Jelölt széles szakirodalmi áttekintést szerezve látott hozzá feladatának megoldásához. Munkájában kiváló műszaki alaptudományos felkészültsége segítette, hozzátevé, hogy igen nagy járatossággal alkalmazta a numerikus szimulációs technikákat, beleértve a véges elemek módszerét a rendelkezésre álló szoftver-rendszerek felhasználását különösen az érintkezésmechanikai problémák kezelésében. Saját fejlesztésű számítási algoritmusai és programrendszerei lehetővé tették számára, hogy a szakirodalomban dokumentált kísérleti vizsgálatok eredményeivel validálja az általa kifejlesztett számítási eljárásokat. Azt különösen pozitív hangszílyal kell kiemelni a munka értékelésekor, hogy a számítási eljárásokkal párhuzamosan saját kísérleti vizsgálatainak eredményei is beépültek az értekezésbe.

Bíráló észrevételek

Az értekezés bírálatának megkezdésekor azonnal kibukott *a jelölések jegyzékének sajnálatos hiánya*, pedig annak tartalma sokban segítette volna a bírálati munkát

Nem segítette a bírálati munkát a nagyszámú „*kívülre hivatkozás*” megtapasztalása sem, miszerint számos helyen a szakirodalmi források egzakt megadását nem kíséri olyan mértékű tartalmi magyarázat, hogy a hivatkozott állítás, összefüggés helyessége kétség nélkül (könyvtárba vonulás nélkül) elfogadhatónak ítéltető. Sokszor segített a bírálónak az elmaradt információ után az interneten történő tájékozódás.

Kiváltképp az értekezés későbbi tanulmányozóira gondolva lett volna helyes a kontaktmechanikai feladat *olyan fogalmazása*, amelyben a tényleges érdekesség kiszögelléssel vagy domborulattal érintkezéssel kapcsolatos felületi trakcióként értelmezett súrlódóerő eloszlással képzett súrlódási részenergiaáramok és a súrlódókapcsolatban lévő testekben alapvetően a kontaktfelületi érdekességek környezetében kialakuló deformációkkal kapcsolatos (viszko-elasztikus, esetenként viszko-plasztikus) disszipációs energiaáramok eloszlásának *alapvetően megkülönböztetésre kerülnek*. Ezen eredendő megkülönböztetés hiányában nehezen lehet értelmezni a „viszko-elasztikus súrlódás” mértékét, és végül csupán azt lehet megállapítani, hogy a kontaktfelületi trakciókkal kapcsolatos súrlódási munka leküzdésén túl további, belső (és nem *közvetlenül* a felületi kölcsönhatásokból

eredő) további energiaszükséglet merül fel az anyag belső súrlódásával kapcsolatos disszipatív energiaáramok energiaigénye miatt, mely többlet energiaigényt is az egyébként a kapcsolat mozgásának fenntartásához aktivizált külső energiaforrásból kell biztosítani.

A kent súrlódókapcsolatok esetében, ahol a kenőanyag áramlás az érdesség-profilok alkotta szabálytalan falgeometriájú áramlási térben megy végbe, esetenként lokálisan többfázisú rendszer alakulhat ki és a változó nyomásmező miatt kavitációs jelenség is felléphet. Ilyen rendszerek esetén is problematikus a súrlódási tényező értelmezése, hiszen lokális szigetekben szilárd érdesség csúcsok érintkezése párhuzamosan valósul meg, lokálisan tiszta folyadéksúrlódásban tapasztalható nyírófeszültség frakció jelenlétével kell számolni.

Egyrészt vannak tehát a súrlódópár relatív mozgását közvetlenül – valamilyen felületi kölcsönhatás folyományaként - gátolni kívánó erők és az ezek által felemésztett munkát kívülről fedezni kell. Van azonban azon *addicionális energiaszükséglet*, amelyet kontaktfelületi érdességek tövében kialakuló – de esetleg az anyag zöméig hatolóan is kiterjedő – *disszipatív energiaáramok* fedezésére be kell vezetni a csúszó-súrlódó kapcsolat mozgása során, és ez is a súrlódó kapcsolat mozgását biztosító, kívülről alkalmazandó csúszásirányú erő munkájával van fedezve.

Helyes lett volna tehát az értekezés elején *részletes*, értelmező *ábrával segítve* bemutatni az összetett érintkezési problémát és kontaktfelületről kiinduló és a súrlódó testek belsejében is folytatódó a dinamikai és energetikai folyamatok, értelmezését és a kontaktfelület közeli viszko-elasztikus, vagy viszko-plasztikus disszipatív folyamatoknak a látszólagos súrlódóerőre vagy súrlódási tényezőre kifejtett befolyását.

Tételes bírálói megjegyzések és kérdések

1. A 14. oldalon f. a.18. sorban a *Campbell* hivatkozással kapcsolatos részhez kívánatos lett volna ábrával illusztrálni a behozott fogalmakat.
2. A 15. oldalon. a.15. sorban a *frictional shear stress* értelmezése ábra nélkül aggályos.
3. A 15. oldalon a. 3. sorban a *critical sliding velocity* létezéséről és kimutatási módjáról nem szerepel magyarázat.
4. A 16. oldalon f. 3...8 sorokban az *adhesion component of friction* fogalmának egyértelmű fizikai tartalmáról nem kapunk komprehenzív tájékoztatást.
5. A 16. oldalon a 4.3 ábrával bemutatott *standard solid model* esetén kérdéses a sorbakapcsolt lineáris rugó és lineáris csillapító rendszer *eredő dinamikájának* a kezelése. Milyen módszert használt a Jelölt?
6. A 17. oldalon f. 9 sorban belép a különböző hossz-skálához tartozó súrlódási tényezők *additivitása*. Az egyes skálákhoz tartozó profilok Fourier sorokkal

léphetnek be. Ezzel szemben *Nettingsmeier* és *Wriggers* csupán egyetlen szinusz hullámmal kezeli a profilt. Elégséges lehet az ilyen leegyszerűsített kezelés?

7. Végül is mi a mérlege *Nguyen* vizsgálatainak összevetve a gömbszerű és a szabálytalan (éles csúcsos) érdesség alakok esetét? Milyen modellt ajánl a jelölt az egyenetlenség (érdesség) profilok egzakt kezelésére? (18. old. első bekezd)
8. A viszko-elasztikus energiaveszteség meghatározására alkalmazott végeselemes eljárás során a felületek érintkezésével kapcsolatos *súrlódási trakciókat* figyelmen kívül hagyja a jelölt (2. old. a. 20.sor). Eljárása helyes, azonban készült-e szimuláció az elhagyott szokásos súrlódási trakciók hatásának figyelembe vételével?
9. Hogyan érti a jelölt azt, hogy a gumi merevebb lesz nagyobb csúszási sebesség estén? (21. old. a. 1.sor)
10. A *Maxwell*-féle anyagmodell többször belép a képbe. Felmerül a kérdés, hogy milyen módon kezeli a jelölt a modellben a *sorbakapcsolt* rugó és csillapító elem együttes dinamikai viselkedését. A kérdés sokszorosan merül fel a különböző, 15...40 párhuzamos ággal általánosított *Maxwell* modell kezelését illetően. (22. old. a. 5. sor) Mi itt a *ViscoData* szerepe? (23. old. a. 5. sor)
11. A rejtélyes „*measured master curve*” pontos értelmezése szükséges. Mi a független változó, mi a függő változó, mik a konstans paraméterek, ki és hol végezte a méréseket? Mekkora volt a mérés hibája? (22. old. a. 2. sor).
12. A 24. old. a. 5. sorban említett „*counter surface*” anyagi minősége nem került megadásra. Miképpen (milyen eljárással) készült a szinuszos érintkezési profil?
13. Mi volt a *Maxwell*-modellbeli paramétereknek (véltetően merevségi, csillapítási tényező/relaxációs idő paraméterek) kézzel való beállításának (*manually adjusted*) konkrét módszere, és hogyan (milyen fizikai elv érvényesülése mellett) függnek össze a paraméter értékek? Csupán pl. egy legkisebb négyzetes közelítés alapján? Mekkora lehet a közelítés hibája? (26. old. a. 6. sor)
14. Kérném pontosan megadni, mit ért *Denny* az angol szöveg szerinti „*adhesion component of rubber friction*” kifejezéssel megjelölt jelenségen. Magyarul itt az anyagpár között csúszásmentes érintkezési felületén kialakuló, felületre merőleges *intermolekuláris* vonzerőre lehet gondolni, vagy a felületi normális trakció mellett kialakuló csúszó-súrlódási trakcióra? (39. old. a. 6. sor)
15. A 40. old. f. 7. sorban a „*frictional shear stress*” milyen pont környezetében kialakuló nyírófeszültséget jelent? A szilárd test súrlódó partner csúszófelületéhez közeli, de már a szilárd testben lévő pontbeli mechanikai feszültségről van szó, vagy pedig a kenőanyag rétegek egymáson történő (remény szerint

- lamináris) elcsúszásával kapcsolatos sebességi gradiens függő csúsztatófe-szültség szerepel?
16. Kérem ábra segítségével értelmezni a Denny-től hivatkozott „*average excess coefficient*” fogalmat.(41. old. a. 14. sor)
 17. A deformábilis test érdes felület merev síkkal vizsgált érintkezési feladatát a 4.35 ábra kívánja megjeleníteni. Nem került képletszerű megadással (pl. integrál-átlag) értelmezésre a „*mean surface hight*” azaz a közepes felület (profil) magasság. Milyen középérték képzés szerepel? Ugyancsak nincs szigorúan definiálva a „*mean summit hight*” azaz a közepes csúcs magasság. Ezek hiányában a d „*separation*” egzakt értelmezése nem valósul meg.
 18. Az, hogy az 53. old. f. 18. sorban a Jelölt *valószínűségi sűrűségfüggvényt* említ arra enged következtetni, hogy a háttérben értelmezve van egy *valószínűségi mező* és azon egy *sztochasztikus folyamat*, amely utóbbi leírja az érdeességnek a hosszkoordináta menti alakulását. A kérdés valószínűség-számítási bevezetése azonban nem tűnik elő, és nem tudunk meg semmit az érdeesség-függvény statisztikailag bizonyított vagy feltételezett valószínűségi szerkezetéről (pl. *gyenge stacionaritás?*). Ilyen helyzetben a szerepeltetett $\Phi(z)$ függvény csupán a szabálytalan alakú profilgörbe maximumpontjainak vízszintes irányú bevetítésével kapott (nem független elemű) statisztikai mintára támaszkodó *relatív gyakoriság sűrűséghisztogram* folytonossá tett változataként azonosítható.
 19. A 4.4 képlettel meghatározott *zéró és egy közé eső „szintmeghaladási arányszámot”* csak *szimbolikusan* lehet valószínűségnek nevezni. Helyes marad azonban a 4.5 képlet, amennyiben azt a d távolodást meghaladó csúcsok közepes számaként értékeljük. Szigorúbb valószínűségi modellben mind n mind N valószínűségi változó lenne.
 20. Jelölt a gömbfelületű érdeesség és a sík érintkezésekor értelmezett δ gömb-süveg magasságot a $\delta \approx a^2/R$ közelítő formulával számolja. Mint azt *Sitkei György* akadémikus nemrég (2017) kimutatta, valójában ez jelentős hibát hoz be a pontos $\delta = R(1 - \sqrt{1 - (a/R)^2})$ értékhez képest. Ebből következően az összes olyan formula, amely a $\delta = a^2/R$ közelítéssel számol, elvileg pontatlan. Nem rovom fel a jelöltnek ezt, mert a szakirodalomban szinte mindenütt ezt a közelítést használják. Érdekes lenne a későbbiekben a különböző származtatott mennyiségekben keletkezett hiba feltárása.
 21. Az 59. old. f. 19. sorban tett *felismerés* arra nézve, hogy jellegükben (alakjukat tekintve) eltérő sajátosságú véletlen függvény realizációk spektrális sűrűségfüggvénye megegyező is lehet, *közismert* a gyengén stacionárius sztochasztikus folyamatok elméletében.

22. Az 59. oldalon Jelölt a *Salant*-féle „sztochasztikusnak mondott” áramlási és súrlódási modelljét (*mixed friction model*) veszi tekintetbe a kenőanyag és a szabálytalan felületprofilok közötti részben kialakuló folyadékáramlás dinamikai vizsgálatára. A dinamikai elemzés a siklócsapágyak elméletében is használt Reynolds-féle differenciálegyenletre támaszkodik. Az általános egyenletből kiindulva Jelölt által tekintetbe vett egyenlet a *Müller*-féle egyszerűsítésekkel dolgozik, előnyére írandó azonban, hogy az áramló (vonszolt) folyadékot exponenciálisan nyomásfüggő viszkozitásúként veszi figyelembe.
23. A *Reynolds* egyenlet alkalmazását a 60. old. második bekezdésében tett a és b , továbbá a $d, \dots, k$ közelítő feltételezések nem kifogásolhatók, azonban kérdéses pontként merül fel, hogy a „ c ” feltételezés szerint a kiinduló egyenlet merev falak esetén érvényes. Ehhez képest a későbbi numerikus vizsgálat deformálódó határoló alakzatot is kezel.
24. Ha a későbbiekben vizsgált dugattyúrúd mozog a tömítéssel fennálló súrlódó kapcsolatban, akkor ezen a folyamat során kialakuló részáramlás *stacionaritása aggályos*, kérdésessé válik a (4.18) egyenletből a (4.19) egyenletre való áttérés lépésének jogossága.
25. A *Reynolds* egyenlet kezelésénél közepes (átlagos) mennyiségek bevezetésével a Jelölt eljut a (4.22) differenciálegyenlethez, amit „ f ” általános koordinátára és az „ F ” kavitációs indexre iterációval old meg. Az így kialakított iterációval kezelni tudja a kialakuló rugalmas (elasztikus) deformáció folyamatát. A rugalmas deformáció számítására a *behatási együttható mátrix* (*influence coefficient matrix*) módszerét alkalmazza. Az elméleti végeredmény a szivárgási mennyiség [(4.25) egyenlet] számítására szolgáló képlet a tömítések tervezésében felhasználható.
26. A kavitáció folyamatának követésében a jelölt meglehetősen visszafogottan jár el, mert be kellett volna mutatnia a folyadéktérbeli nyomás változását az x koordinátatengely mentén. Így vélhetően jobban kidomborodott volna, hogy ha a folyamatban valahol a kenőanyag (vagy más folyadék) telítési gőznyomása alatti nyomású szakasz után pl. az áramlási keresztmetszet lokális megnövekedése miatt elég hamar, elég nagynyomású zóna következik, akkor jön a kavitáció (a nagysebességű és kisnyomású térrészben létrejött gőzbuborékok összeomlása).
27. A kavitációból kiinduló további hatások (pl. nyomáshullámok) vizsgálatára a jelölt nem tér ki. Igazából az olvasó nem kap információt arra nézve, hogy a vizsgált tribológiai rendszerben a következményei miatt fontos kérdés-e a kavitáció, vagy csak érdekes jelenség?
28. A 4.41 ábrán közölt blokkvázlat *nem ad könnyű áttekintést* a Jelölt által kidolgozott algoritmus és a program tényleges működéséről.

29. Kérdés merül fel, hogy a 64. old. a. 4. sorában a „*shear stress due to contacting particles*” kifejezés valójában az érdességek érintkezésekor kialakuló szokásos csúszósúrlódásos érintkezésbeli felületi trakciót jelenti-e?
30. Elírásként azonosítható a 4.44. ábrán a függőleges tengelyre a térfogatáram-ra felírt mm^2/s mértékegység. Ez a probléma ismét felmerül a 79. old. f. 14 sorában.
31. A 82. oldalon az 5. Fejezet első bekezdésének negyedik sorában a *compliant* szó aggályos a jelenség magyarázatához. Valóban a golyók merev testek, de az érintkezési tartományban *rugalmas és disszipatív* (nemlineáris) visszatérítő erőt képesek kifejteni. A *compliance* szó „frekvenciafüggő rugóállandó” jelentéssel szokott feltűnni az angol nyelvű szakirodalomban.
32. A 82. old. a. 9. sorbeli *collision* szóval kapcsolatba kérdés, hogy az eljárásban valóban (megfelelő ütközési tényezővel számított) ütközési (*collision*) impulzuscsere valósul-e meg a kölcsönható falak és részecskék között a geometriai érintkezés létrejötté indikálásának pillanatában, és innen új kezdeti feltételek mellett folytatódik a tömegek mozgásegyenleteinek az integrálása? Vagy inkább az érintkezésbe lépő gömbfelületek *átmetsződési mélységének mértékével függvénykapcsolatban álló mértékű* normális irányú, a mozgásállapottól nemlineárisan függő rugalmas és disszipatív visszatérítő erő, valamint a csúszási viszonyoknak megfelelő tangenciális súrlódóerő kerül bevezetésre a gömbök kerületén?
33. A gömböcskék mozgása milyen koordinátarendszerben került leírásra? Hol van az $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$ alap bázisa a 3 dimenziós euklidészi térnek, amelynek térgörbéi mentén a gömböcskék középpontjai mozognak? Feltehetően minden gömb középponthez helyvektor mutat. Minden helyvektorhoz, mint *tárgyvektorhoz képvaktorként* hozzá kell rendelődnie a gömböcske (haladási és forgási) sebességállapot vektorainak, valamint a rá ható eredő erő és eredő nyomaték vektorának, valamely $\mathbf{f} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^{12}$ vektor-vektor függvénykapcsolat szerint. Van-e formalizálható felírása a fenti $\mathbf{f}$ vektorfüggvénynek?
34. A 83. oldalon az (5.2) vektoregyenlettel kapcsolatban elegendő lehet a $\underline{\underline{\theta}}$ tehetlenségi nyomaték mátrixról beszélni, hiszen a bázis rögzített.
35. A 83. old. f. 18. sorában említett *emlékezettél bíró tulajdonság* (*history dependency*) nem lehet hosszú távú, talán csak éppen az előző szimulációs lépésbeli mozgásállapottól és súrlódási állapotától való függés lép be?
36. Lehet-e valamilyen egyszerű fizikai/fenomenológiai megokolást adni a 88. oldal (5.6) kifejezésében a jobb oldal második tagjában fellépő négyzetgyökös ξ_n -függésre nézve?
37. A 89. oldalon szereplő (5.9) képletbeli kifejezés nem jellemzi helyesen a tangenciális kapcsolatban átviendő súrlódóerőt. Az alábbi képlet a helyes:

$$F_i = \max \{0, \min(F_i^*, -\text{sign}(v_i) \mu |F_n|)\} + \min \{0, \max(F_i^*, -\text{sign}(v_i) \mu |F_n|)\}$$

38. Lehet-e valamilyen egyszerű fizikai/fenomenológiai megokolást adni a 88. oldal (5.10) kifejezés szerkezetére és konstans együtthatójára nézve?
39. Az 5.18 és az 5.24 ábra aláírásban fontos korrigálni, mert a szögsebesség SI mértékegység: **rad/s**.
40. Lehet-e valamilyen kijelentést tenni a surrantó kiömlési keresztmetszetének környezetében megvalósuló részecskeáramlás sebességterének *forgásosságáról*?

A tudományos eredmények értékelése.

Jelölt a disszertációjában bemutatott vizsgálatainak eredményeit öt tézisben foglalta össze.

A tézisek közül az első négy a csúszó-érintkezéssel kapcsolatos dinamikai és energetikai kérdések megoldásához a feltárt összefüggésekben jelentkező parciális differenciálegyenlet-rendszereket (peremérték feladatokat) numerikus módszerrel, alapvetően a kereskedelembe kapható, a *véges elemek módszerével* (VEM) működő programrendszerrel oldja meg. Viszont saját kidolgozású programrendszerrel kezelte a Jelölt az érdes felületek kenőanyag jelenlétében kialakuló kontaktmechanikai feladatát a *Reynolds* egyenlet numerikus megoldását adva.

Az ötödik tézisben alapvetően rendszerdinamikai feladat numerikus megoldására dolgozott ki a jelölt saját algoritmust és programrendszert és vezette a vizsgálatokat a silóban/surrantóban tárolt gömbszerű anyagok egymással és a falakkal való súrlódásos érintkezésének kezelésére, a falra ható erők meghatározására.

1. Az első tézisben a kidolgozott VEM módszerekkel és kísérleti vizsgálatokkal kimutatta, hogy a vizsgált gumiszerű anyag érdesfelületű súrlódópárral kialakuló csúszósúrlódásos kapcsolatában az érdeesség következtében fellépő lokális disszpációból visszaszámítható mozgatóerő szükséglet nem érheti el a *Modifi* által publikált értéket.

A jelölt ezen eredménye *fontos szakirodalmi korrekciót* alapoz meg, amelyre alapozva a méretezés biztonsága növelhető..

2. A második tézisben a *Greewood-Williamson*-féle és a *Persson* féle érintkezési elméleteket merev sík és érdes felületű elasztomer esetére alkalmazva kimutatta az érdeesség középsíkja és a merev sík közötti távolság a két elmélet szerint *lényegesen másképpen reagál* a kontaktusban működő névleges érintkezési nyomás változására. Meglepő eredmény, a nyomás egy nagyságrendnyi változása során a nagy nyomásoknál négy nagyságrendnyi eltérés jelentkezik a két elmélettel kapott eredmény között.

Vizsgálataival *kimutatta a Persson-elmélet jobb közelítését*.

3. A harmadik tézisben *Salant et al.* által állandósult csúszási állapotra, de felületi érdesség, nyomásfüggő viszkozitású kenőanyag, kavitáció, és felületi deformáció figyelembevételével vegyes-súrlódásra kialakított egydimenziós számítási módszerét alkalmazza az O gyűrűs tömítés és az alatta mozgó dugattyúrúd (nagylöketű hidraulikus henger) kenési folyamatának elemzésére. Kimutatja, hogy eltérés van a kenőfilm vastagságában a be és kitolás esetében, továbbá kitolás során fellép a kavitáció, míg befelé mozgáskor nem jelentkezik kavitáció a tekintett (szokásos paraméterekkel bíró) tribológiai rendszerben.

A nyert eredménye hasznos, mert a kavitáció ténye egyenesen mutat a várható felületi károsodás megjelenésére és a szerkezeti megbízhatóság és élettartam csökkenésére. A módszere tehát *elősegíti a kavitációmentes tervezést.*

4. A negyedik tézisben *Salant et al.* által vegyes-súrlódásra kialakított modelljének tekintetbe vételével a jármű ablaktörlő gumi és az üveg vízzel kent súrlódókapcsolatának folyamatait elemzi, konkrét adatokkal bíró gumilapát esetére alkalmazza kialakított numerikus módszerét. Kimutatja az áramlási rés alakulását és a kavitáció bekövetkezését a rés táguló szakszán, megadja az érdességcsúcsi nyomásmaximumot, és ehhez viszonyítva a vízben, mint kenőfilmben kialakuló legnagyobb nyomást, mely 3 nagyságrenddel kisebb, mint az érdességcsúcsnál jelentkező legnagyobb nyomás.

A tézis szerinti eredmények *igazolják a kialakított numerikus módszerének alkalmasságát az ablaktörlő lapátok szerkezeti kialakításának és anyagválasztásának továbbfejlesztéséhez.*

5. Az ötödik tézisben a háromdimenziós diszkrét elem-módszerre támaszkodva kialakított a *Cundall* és *Strack* módszere szerinti algoritmussal és saját fejlesztésű numerikus programrendszerrel vizsgálja a négyzet keresztmetszetű tölcser, illetve alul ilyen tölcseres surrantóval ellátott siló esetére a gömb alakú töltet elemekről függőleges és ferde falaira ható súrlódóerő alakulását a feltöltési folyamat végén (már összerázódott töltet) és megállapítja súrlódó erők a töltet össz súlyához való arányát a rezonábilis $\mu=0,3$ csúszósúrlódási tényező feltételezésével. A deklarált arány: 0,12...0,16.

A tézis szerinti eredmény *hozzájárul a szemcsés anyagok tárolását és ürítését biztosító silótartály és surrantó szerkezetek tervezésének biztonságosabbá tételéhez, a működő súrlódóerők helyes tekintetbevételéhez.*

A doktori munka adatainak hitelességéről

A doktori munka mind a részletesen feldolgozott szakirodalom tekintetében, mind a Jelölt a saját kutatási eredményeihez vezető elméleti, numerikus és mérési módszerek tekintetében, mind pedig a szerepeltetett új tudományos eredmények tekintetében hiteles adatokat tartalmaz.

Összegző értékelés

Mint hivatalos bíráló nyilatkozom, hogy ***a doktori munka mind az öt tézisét elfogadom a jelölt új tudományos eredményének.*** A doktori munkát a nyilvános vitára ***alkalmasnak tartom***, és a vita kitűzését ***javasolom***.

Budapest, 2017. április 1.

Prof.Dr. Zobory István
a műszaki tudomány doktora
BME professzor emeritusz