



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2
BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI
EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GÉP- ÉS TERMÉKTERVEZÉS TANSZÉK

PÁSTHY LÁSZLÓ

TDK DOLGOZAT

**Talaj és szerszám deformáció modellezése kétutas DEM-VEM
szimulációval**

Konzulensek:

Dr. Tamás Kornél
egyetemi adjunktus
Gép- és Terméktervezés Tanszék

Dr. Farkas Zsolt József
egyetemi adjunktus
Gép- és Terméktervezés Tanszék

Budapest, 2021.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretném köszönetemet kifejezni mindazoknak, akik hozzájárultak munkám elkészüléséhez: Köszönöm témavezetőimnek, Dr. Tamás Kornél Tanár Úrnak a szimulációk elvégzésében és Dr. Farkas Zsolt József Tanár Úrnak a mérések elvégzésében nyújtott támogatását. Köszönettel tartozok továbbá Kopasz István műhelyvezető Úrnak a forgácsolással készült alkatrészek legyártásáért, Széles Levente Tanár Úrnak a 3D nyomtatott alkatrészek legyártásáért, Vajda Márk Tanár Úrnak a kopásmérő berendezés kölcsönadásáért, Máté László Tanár Úrnak a mérési adatgyűjtő berendezés kölcsönadásáért, valamint a Polimertechnika Tanszék munkatársainak a polimer granulátum biztosításáért.

Tartalom

1. Jelölésjegyzék	3
2. Bevezetés	5
3. Feladat bemutatása	7
4. Irodalomkutatás	8
4.1. Holdra szállás DEM-MBD-VEM modellezése	8
4.2. DEM-VEM-CFD hatutas kapcsolt szimuláció fejlesztése	10
4.3. Talajban húzott síklap DEM szimulációja	11
4.4. Vertikális talaj penetrométeres mérés DEM szimulációja	12
4.5. Talajban rezgő szerszámok diszkrételes modellezése	13
4.6. Irodalomkutatás összefoglalása	14
5. Végeselemes módszer	15
5.1. VEM alkalmazása	15
5.2. Statikus szerkezeti számítás lépései	16
5.2.1. Mechanikai modell felállítása	16
5.2.2. Anyagmodell megválasztása	16
5.2.3. Hálózás	17
5.2.4. Peremfeltételek megadása	17
5.2.5. Számítás	18
5.2.6. Eredmények kiértékelése	20
6. Diszkrételes módszer	21
6.1. DEM alkalmazása	21
6.2. Számítás lépései	21
6.3. Néhány fontosabb anyagmodell	23
6.3.1. Hertz-Mindlin modell	23
6.3.2. Histerézises rugós (hysteretic spring) modell	25
6.3.3. Ragasztott modell	28
6.3.4. Lineáris kohézió modellje	29
6.4. Szemcsék mozgásállapotának meghatározása	30
7. Kétutas DEM-VEM szimulációs eljárás bemutatása	31
7.1. Kapcsolási ciklus	31
7.1.1. Diszkrételes folyamat	31
7.1.2. Végeselemes preprocesszálás	32
7.1.3. Csomóponti erő és megfogás peremfeltételek számítása	32
7.1.4. Végeselemes megoldás	33
7.1.5. Végeselemes posztprocesszálás	33
7.1.6. Deformált geometria egyszerűsítése	33
7.2. Számítási ciklus automatizálása	34
7.3. Konvergencia problémák kezelése	34
7.4. Szimulációk kiértékelése	38

8. Mérőberendezés bemutatása	39
9. Szimuláció és mérés kalibrálása	41
9.1. Homok talaj diszkrétélelemes paramétereinek kalibrálása.....	41
9.2. Erőmérő cella kalibrálása	44
10. Mérési és szimulációs paraméterek	45
11. Eredmények	46
11.1. Mérés homok talajjal	46
11.2. Mérés ABS polimer granulátummal.....	47
11.3. DEM szimuláció	48
11.4. DEM-VEM szimuláció.....	49
12. Szimulációk és mérések összehasonlítása	51
13. Összefoglalás	53
14. Tervek a jövőre	55
15. Hivatkozás.....	56

1. Jelölésjegyzék

Az 1.1. táblázat és 1.2. táblázat tartalmazza a dokumentációban használt jelöléseket.

1.1. táblázat: Jelölésjegyzék első fele

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A	Rácsos szerkezet terhelése	N
$\underline{a}$	Szemcse súlypontjának gyorsulásvektora	m/s ²
A_b	Ragasztott kapcsolat keresztmetszete	m ²
A_c	Érintkezési felület	m ²
A_g	Gerenda elem keresztmetszete	m ²
$\underline{\alpha}$	Szemcse szöggyorsulás vektora	rad/s ²
β	Kapcsolatban résztvevő szemcsepár csillapítási tényezője	-
b_n	Hiszterézises rugós (hysteretic spring) modell csillapítási tényezője	-
ΔM_t	Ragasztott kapcsolatban ébredő hajlító nyomaték különbség az előző időlépéshez képest	Nm
δ_n	Érintkező szemcsék közötti normálirányú átfedés	mm
δ_{n0}	Érintkező szemcsék közötti maradó normálirányú átfedés	mm
δ_t	Érintkező szemcsék tangenciális irányú relatív elmozdulása az érintkezés kezdete óta	mm
ΔF_n	Kapcsolatban ébredő normálerő különbség az előző időlépéshez képest	N
ΔF_t	Ragasztott kapcsolatban ébredő nyíróerő különbség az előző időlépéshez képest	N
ΔM_n	Ragasztott kapcsolatban ébredő csavaró nyomaték különbség az előző időlépéshez képest	Nm
Δt	Időlépés nagysága	s
E	Rugalmassági modulus	Pa, MPa
e	Kapcsolatban résztvevő szemcsepár ütközési tényezője	-
E^*	Kapcsolat egyenértékű nyomó rugalmassági modulusa	MPa
F	Terhelésvektor	N/A ¹
$f(x,y)$	Kétváltozós interpolációs függvény a végelemen belüli állapot leírására	N/A ²
φ	Gerenda elem vízszintestől mért szöge	°
F_i	Szemcsére ható erő az i-edik időlépésben	N
F_{lc}	Kohéziós erő, amely a kapcsolatban ható normálerőhöz adódik	N
F_n	Kapcsolatban ható normálerő	N
F_{nd}	Normálirányú csillapítási erő	N
F_{ni}	N-edik csomópontban ható i irányú reakcióerő	N
F_{nrug}	Kapcsolatban ható rugalmas normálerő	N
F_t	Kapcsolatban ható teljes nyíróerő	N
F_{td}	Nyíróirányú csillapítási erő	N
F_{trug}	Kapcsolatban ható rugalmas nyíróerő	N
F_{xi}	I-edik kapcsolási ciklusban figyelembe vett x irányú erők összege	N
F_{xjklf}	Lf-edik geometriára ható x irányú erő a j-edik kapcsolási ciklus k-adik mintavételezési pontjában	N
G	Csúsztató rugalmassági modulus	MPa
G^*	Kapcsolat egyenértékű csúsztató rugalmassági modulusa	MPa
γ_t	Hiszterézises rugós (hysteretic spring) modell merevségi tényezője	-
i_c	Kapcsolási ciklus sorszáma	-
J	Ragasztott kapcsolat másodrendű nyomatéka	m ⁴
j	I-edik kapcsolási ciklus, és az azt megelőző 9 kapcsolási ciklus sorszáma	-

¹ Különböző mértékegységű elemek

² Különböző mértékegységű lehet

1.2. táblázat: Jelölésjegyzék második fele

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
K	Merevségi mátrix	N/A ⁴
k	Mintavételezési pont sorszáma a j-edik kapcsolási cikluson belül	-
E_d	Kohéziós energia sűrűség	J/m ³
K_1	Felterhelési merevség	N/mm
K_2	Leterhelési és újraterhelési merevség	N/mm
k_{nj}	N-edik elem lokális merevségi mátrixának j-edik sorában, k-adik oszlopában található elem [SI].	N/A ³
L	Gerenda elem hossza	m
l	Távolság a geometriára ható erő és a vizsgált csomópont között	mm
l_f	Geometriára ható x irányú erő sorszáma a j-edik kapcsolási ciklus k-adik mintavételezési pontjában	-
m^*	Érintkező szemcsék egyenértékű tömege	kg
m_i	I-edik szemcse tömege	kg
M_i	Szemcsére ható nyomaték az i-edik időlépésben	Nm
μ	Kapcsolatban résztvevő szemcsepárra jellemző csúszási súrlódási tényező	-
μ_0	Kapcsolatban résztvevő szemcsepárra jellemző tapadási súrlódási tényező	-
n_{jk}	Geometriára ható x irányú erők száma a j-edik kapcsolási ciklus k-adik mintavételezési pontjában	-
ν	Poisson-tényező	-
ω_i	Szemcse szögsebesség vektora az i-edik időlépésben	rad/s
ω_{nrel}	Érintkező gömbök normálirányú relatív szögsebessége előjelhelyesen	rad/s
ω_{trel}	Érintkező gömbök nyíróirányú relatív szögsebessége előjelhelyesen	rad/s
R^*	Érintkező szemcsék egyenértékű sugara	mm
R_B	Ragasztott kapcsolat sugara	m
r_{cspi}	Vizsgált csomópont i irányú koordinátája	mm
r_{Fi}	Geometriára ható erő támadáspontjának i irányú koordinátája	mm
R_i	I-edik szemcse sugara	mm
$\underline{r}_i$	Szemcse súlypontjának helyvektora az i-edik időlépésben	m
S_n	Érintkező szemcsék egyenértékű normálmerevsége	N/mm
S_{nb}	Ragasztott kapcsolat normálirányú merevsége	N/m ³
S_t	Érintkező szemcsék egyenértékű nyírómerevsége	N/mm
S_{tb}	Ragasztott kapcsolat nyíróirányú merevsége	N/m ³
σ	Ragasztott kapcsolatban ébredő normál feszültség	Pa
σ_{max}	Ragasztott kapcsolat szakítószilárdsága	Pa
τ	Ragasztott kapcsolatban ébredő csúsztató feszültség	Pa
τ_{max}	Ragasztott kapcsolat nyírószilárdsága	Pa
Θ	Szemcse súlyponti tehetetlenségi nyomaték mátrixa	kgm ²
$\underline{U}$	Elmozdulás vektor	N/A ⁴
u_n	N-edik csomópont x irányú elmozdulása	m
$\underline{v}_i$	Szemcse súlypontjának sebességvektora az i-edik időlépésben	m/s
v_n	N-edik csomópont y irányú elmozdulása	m
v_{nrel}	Érintkező szemcsék normálirányú relatív sebessége az érintkezési pontban előjelhelyesen	m/s, mm/s
v_{trel}	Érintkező szemcsék nyíróirányú relatív sebessége az érintkezési pontban előjelhelyesen	m/s, mm/s
x_i, y_i	Gerenda elem i-edik csomópontjának koordinátái	m
Y	Érintkező szemcse folyáshatára	MPa
s	Síklap elmozdulása	mm

3 Különböző mértékegységű lehet

4 Különböző mértékegységű elemek

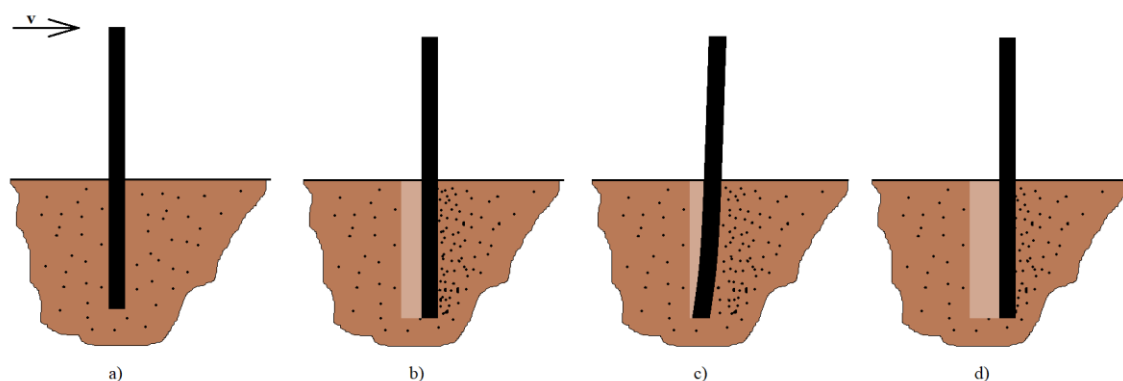
2. Bevezetés

A géptervezések során az alkatrészek szilárdságtani méretezésének jelentős része numerikus szimulációk segítségével zajlik. A mérnöki szakmában a végeselemes módszer az egyik legelterjedtebb numerikus eljárás, amely segítségével kiszámíthatók a szilárd testekben ébredő feszültségek és deformációk, modellezhető a hővezetés jelensége, valamint akár rezgéstani szimulációk készítésére is lehetőség van. Azonban az eljárás alkalmazhatósága korlátozott. Például szilárd szemcsés anyagok (pl. talaj, homok, granulátumok, mezőgazdasági termények) nehezen vagy egyáltalán nem modellezhetők vele. Ezen anyagok viselkedését hatékonyabban szimulálja egy másik számítási eljárás, a diszkrételemes módszer, amelyet az elmúlt évtizedben kezdtek el a kutatókon kívül az iparban tevékenykedő mérnökök is alkalmazni. Ennek lényege, hogy a szilárd szemcsék közötti érintkezésekben kiszámításra kerülnek a reakcióerők, majd ezek alapján a gyorsulás-, sebesség-, és mozgásállapotok. Így a szemcsék viselkedésén alapuló folyamatok (például talajművelés, granulátumok és porok keveredése) reprodukálható a számítógépes szimulációkban. Mivel azonban ezen számítások során a szemcsékkel érintkező szilárd testek merevnek tekintettek, így az eljárás alkalmazhatóságának gátat szab a szilárd testekre ható erő nagysága. Abban az esetben, ha ezek az érintkezési erők jelentős deformációt okoznak a szilárd testben, amely már a szemcsék mozgását is befolyásolja, önmagában a diszkrételemes szimuláció nem elegendő, a szilárd test deformációjának modellezésére végeselemes szimuláció alkalmazása szükséges. Az ilyen, több numerikus eljárást alkalmazó szimulációkat kapcsolt szimulációnak nevezik, amelyek fejlesztése jelenleg egy intenzíven kutatott terület [1]. Mérnöki alkalmazásuk az időigényesség miatt jelenleg kevésbé gyakori, azonban a géptervezés és a mérnöki szakma fejlődéséhez szükséges pontosabb számításokhoz a közeljövőben elengedhetetlenek lesznek.

A diszkrételemes és a kapcsolt végeselemes-diszkrételemes szimulációk egy lehetséges alkalmazási területe a talajművelés [2], ahol a művelőelemek deformációját alapvetően a vele kapcsolatban álló talajszemcsék okozzák. A művelőelemek egy speciális fajtája a passzív rezgésű szerszámok, amelyek a talajban haladva ciklikusan deformációt szenvednek, amit maga a talajban való haladás idéz elő. A deformációs ciklus kezdetén a talajban haladó szerszám összetömríti maga előtt a talajszemcséket (2.1. ábra/b), így megnő a szerszámra ható erő, ami miatt a szerszám a haladás irányával ellentétesen deformálódik (2.1. ábra/c). A deformált szerszám miatt megnő a talajszemcsék mozgástere, lecsökken a nyomásuk és a szerszámra ható erő, ami következtében a szerszám visszanyeri eredeti alakját (2.1. ábra/d). Ezt követően a folyamat kezdődik előlről, ezáltal a szerszám folyamatosan előre-hátra deformálódik. A

jelenség a művelés energiaigényének és minőségének javítására fordítható, ugyanis optimális szerszám geometria és művelési paraméterek alkalmazásával a passzív rezgésű szerszámok vonóerő igénye kevesebb, míg a talajlazítási képessége magasabb szintű, mint a mereven függesztett szerszámoké [3].

Az optimális geometria és művelési paraméterek meghatározásának egy lehetséges módja lehetne a kapcsolt szimuláció alkalmazása, amely segítségével nagyságrendekkel lehetne csökkenteni a valós kísérletek számát és költségét.



2.1. ábra: Passzívan rezgő talajművelő szerszám deformációs ciklusa, a) szerszám indulása, b) talajszemcsék feltorlódása, c) szerszám deformációja, d) szerszám visszarugózása, v jelöli a szerszám sebességét a talajhoz képest

3. Feladat bemutatása

Tudományos diákköri munkám céljából az alábbi feladatokat tűztem ki:

1. Tájékozódás a kapcsolt numerikus szimulációk témakörében különös tekintettel a végeselemes és a diszkrétélemes módszerre.
2. Tájékozódás a rezgő talajművelő szerszámok témakörében.
3. Kétutas kapcsolt végeselemes-diszkrétélemes eljárás fejlesztése, amely:
 - 3.1. Univerzálisan alkalmazható szemcsés anyagokat kezelő szerszámok, alkatrészek, berendezések és a szemcsés anyagok közötti kölcsönhatások modellezésére, ezáltal elősegítve mind a szemcsés anyagok, mind az őket kezelő berendezések tervezését.
 - 3.2. Alkalmazható a passzívan rezgetett talajművelő szerszámok és a talaj közötti kölcsönhatás modellezésére, beleértve a szerszámok rezgését, amely csökkenti a vonóerő igényt, és ez által energiamegtakarításhoz vezet.
 - 3.3. Kereskedelmi szoftverek alkalmazásával teszi lehetővé a numerikus módszerek összekapcsolását, így lehetőséget hagyva a későbbiekben a módszer ipari alkalmazására.
4. Mérőberendezés tervezése és megépítése, amely lehetővé teszi a talaj-szerszám kapcsolat vizsgálatát egy egyszerűsített kismintás modellen, és biztosítja a szerszám modelljére ható erők és a szerszámmodell deformációjának mérését.
5. Mérések végrehajtása a tervezett mérőberendezéssel.
6. Talajművelő szerszám talajban való haladását és rezgését modellező szimulációk készítése a mérési elrendezéssel azonos geometriával és kinematikával a fejlesztés alatt álló kapcsolt numerikus eljárás és tisztán diszkrétélemes szimuláció alkalmazásával.
7. Szimulációs és mérési eredmények összehasonlítása, és javaslattevés a fejlesztett eljárás javítására és optimalizálására.

4. Irodalomkutatás

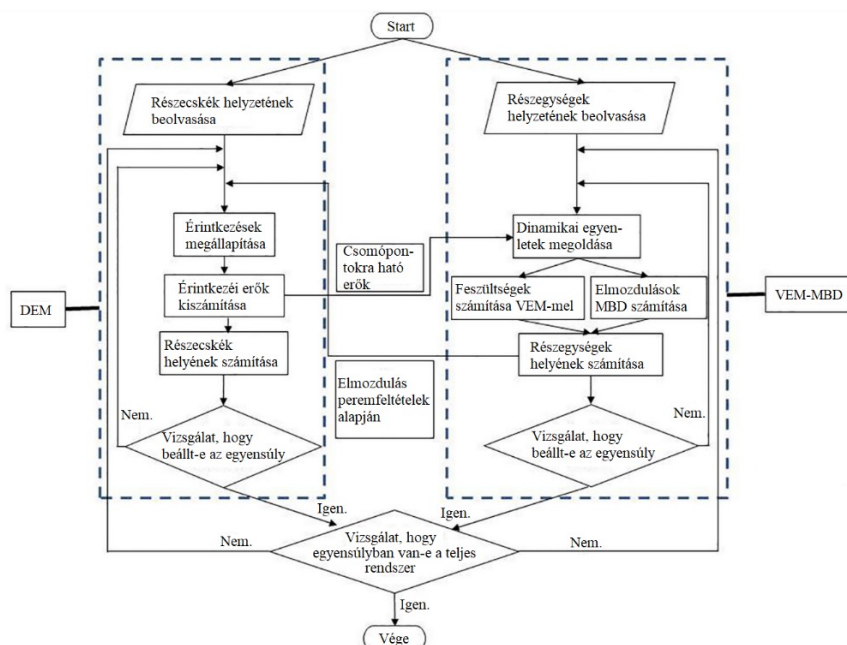
Az első feladatomban a kapcsolódó szakirodalom áttekintése volt. Utánanéztem, hogy milyen folyóiratcikkek születtek kapcsolt szimulációkról, valamint a talaj penetrációkkal kapcsolatban a közelmúltban. A leglényegesebbnek tartott cikkek tartalmát az alábbiakban röviden összefoglalom.

4.1. Holdra szállás DEM-MBD-VEM modellezése

A kapcsolt szimulációk egyik lehetséges alkalmazási területe az űrkutatás, ahol a folyamatok összetettsége miatt csak több numerikus eljárás egyszerre történő alkalmazásával kaphatók pontos eredmények, és ezáltal optimalizálhatók az űreszközök.

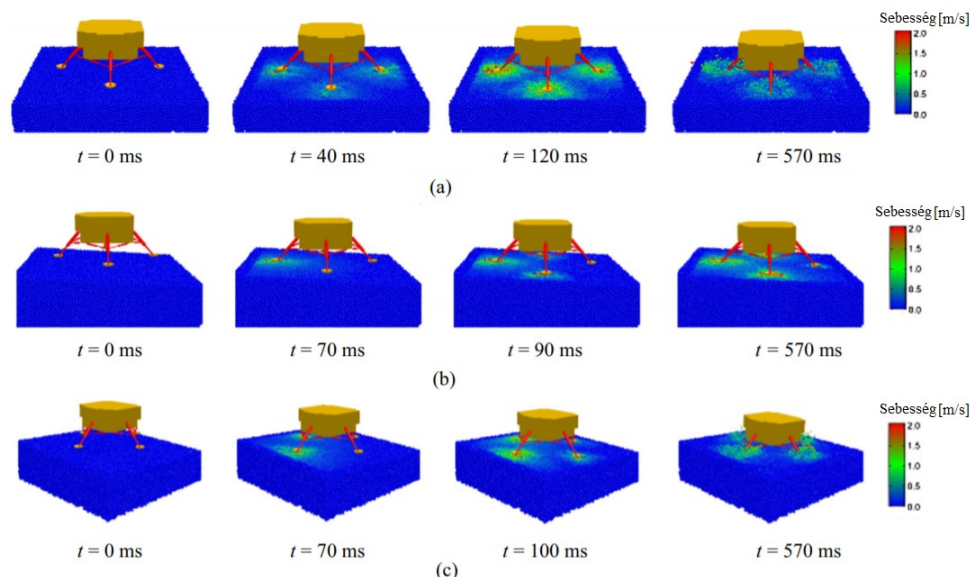
S. Ji és szerzőtársai 2021-es kutatásuk [4] során kifejlesztettek egy diszkrétéleemes-merev test dinamikai-végeselemes kapcsolt szimulációs eljárást, amellyel lemodellezték a 2019-ben landolt Csang-o-4, kínai holdszonda [5] holdra szállását. A holdközvetet diszkrét gömb elemekkel modellezték (DEM), a holdszondát több, külön elmozdulásra képes részegységből építették fel, amelynek mozgásállapotát merevtest dinamikai számítási eljárással (MBD) határozták meg, a részegységekben ébredő feszültségeket pedig végeselemes módszerrel (VEM) számították ki. A szimulációt egy földön történt, valós méretű landolási kísérletkor nyert adatok segítségével validálták.

A DEM-MBD-VEM eljárás folyamatdiagramját a 4.1. ábra mutatja.



4.1. ábra: DEM-MBD-VEM kapcsolt szimuláció folyamatdiagramja, forrás: Shunying Ji [4]

A kutatás során különböző landolási eseteket is megvizsgáltak. Szimulációt készítettek sík terepen való holdra érkezésről, ahol a szonda mind a négy talpa egyszerre érintkezik a talajjal, és lejtős terepen való landolásról, ahol a szonda vagy egyszerre két talppal, vagy csak egy talppal érintkezik először a talajjal. A vizsgált esetekben a talajszemcsék sebességeloszlását a 4.2. ábra mutatja.



4.2. ábra: Talajszemcsék sebessége a különböző landolási esetekben, a) landolás egyszerre 4 lábbal, b) landolás egyszerre 1 lábbal, c) landolás egyszerre 2 lábbal, forrás: Shunying Ji [4]

Megállapították továbbá, hogy a szonda tömegének és sebességének növelésével nő a talpakban ébredő maximális erő, valamint, hogy a holdközvet által elnyelt energia akkor volt a legkisebb, amikor mind a négy talp egyszerre érintkezett a talajjal, és akkor volt a legnagyobb, amikor a talpak párban érkeztek le.

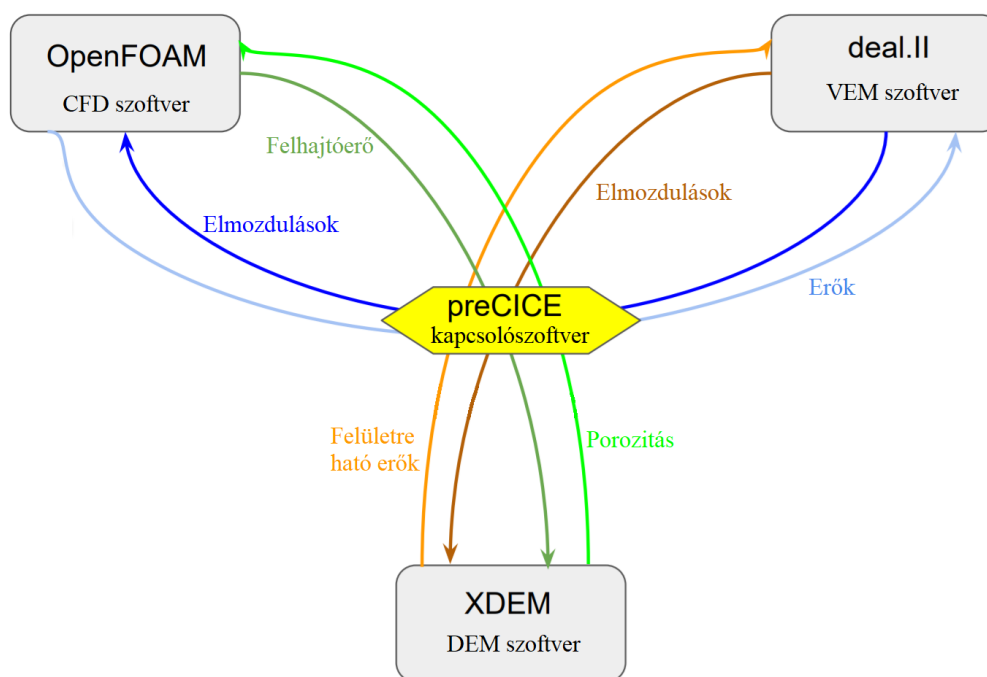
A talpat érő maximális erő, valamint a talpak besüllyedése a kísérlet során azonban elmaradt a diszkrétéleemes szoftver által számolt értékektől, ami annak köszönhető, hogy a szerkezet részegységei merev testként voltak modellezve. A későbbi szimulációkban tehát a pontosabb eredmények érdekében fontos lenne a végeleleemes szoftver által számolt elmozdulásokat is figyelembe venni a diszkrétéleemes számítás során. Valamint a gömb alakú diszkrétéleemes részecskék miatt is korlátozva volt a számítás pontossága. Ezeket a későbbiekben a számítási kapacitás növekedésével fel lehetne váltani szabálytalan alakú részecskékre.

Összességében a kutatás során kidolgozott eljárás és a kapott eredmények egy elméleti háttérrel biztosítanak a későbbi holdra szállások modellezésére, valamint elősegítik a későbbi holdra szálló üreszközök biztonságosabbá tételét.

4.2. DEM-VEM-CFD hatutas kapcsolt szimuláció fejlesztése

Xavier Besseron és munkatársai a 2020-as preCICE konferencián [6] beszámoltak kutatásukról [1], melynek során a preCICE kapcsolószoftver segítségével kifejlesztettek egy hatutas DEM-VEM-CFD kapcsolást. A diszkrétéleemes számítást egy saját fejlesztésű szoftverrel az XDEM-mel [7] oldották meg, végeleemes megoldónak egy nyílt forráskódú szoftvert, a deal.II-t [8] választották, míg az áramlástani számításokat szintén egy nyílt forráskódú szoftver, az OpenFOAM [9] végezte.

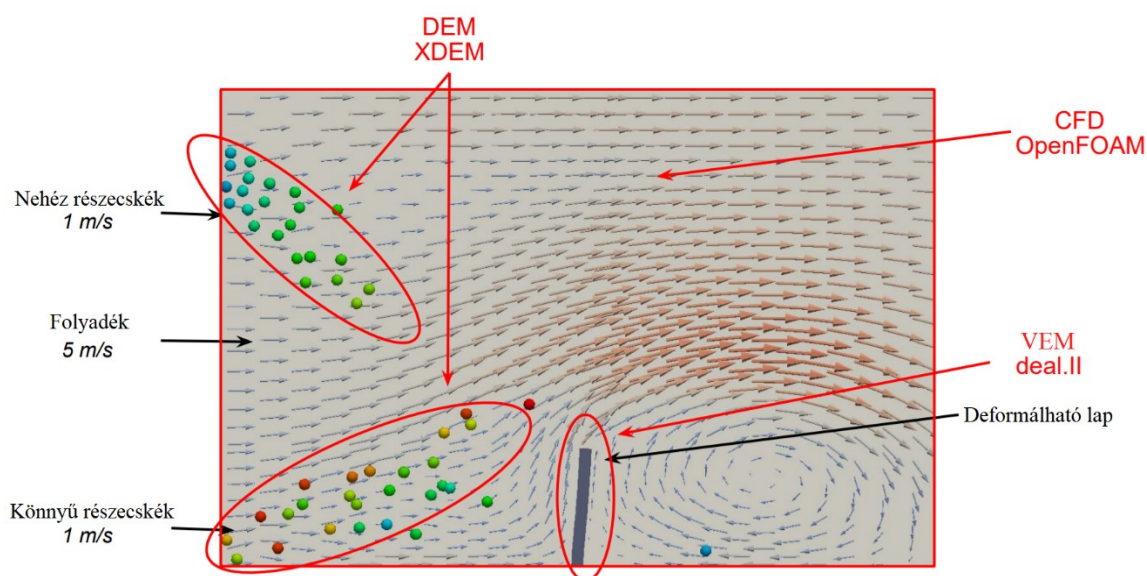
A szoftverek kapcsolatát az 4.3. ábra szemlélteti.



4.3. ábra: DEM-VEM-CFD kapcsolat egyszerűsített folyamatdiagramja, forrás: Xavier Besseron [1]

Látható, hogy a DEM szoftver az időlépések elején megkapja a részecskékre ható felhajtóerőt a CFD szoftvertől, valamint a szilárd geometria deformációját a VEM szoftvertől, a CFD szoftver megkapja a szilárd geometria deformációját a VEM szoftvertől és a részecskék helyzetétől függő porozitást a DEM szoftvertől, a VEM szoftver pedig megkapja a szilárd geometriára ható erőket a DEM és a CFD szoftvertől.

A szimulációt a 4.4. ábra mutatja.

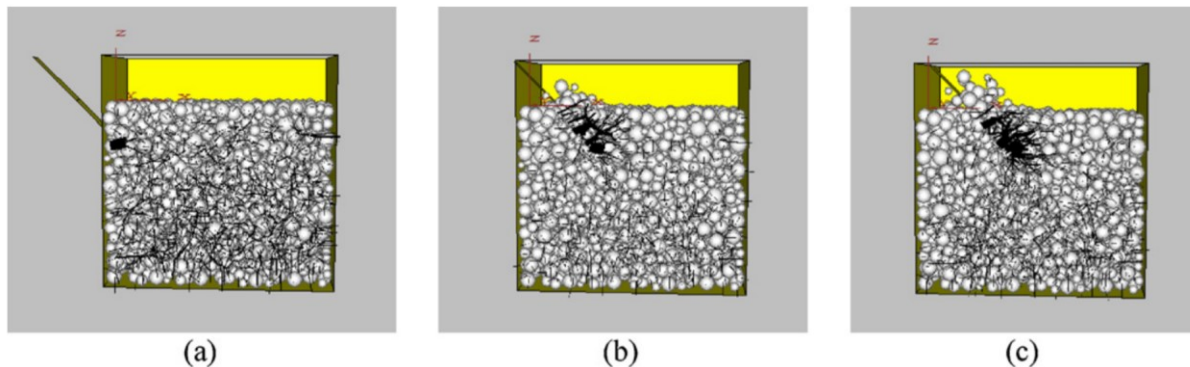


4.4. ábra: DEM-VEM-CFD kapcsolt szimuláció, forrás: Xavier Besseron [1]

A projekttel foglalkozó kutatók a jövőben tervezik az eljárás valós kísérlettel történő validálását, a CFD háló deformációjának pontosabb számítását, a hőátadás jelenségének figyelembevételét a DEM részecskék és a CFD-vel szimulált folyadék között, valamint a szoftverek párhuzamos futtatását a számítások időigényességének csökkentése érdekében. Továbbá a későbbiekben egy lehetséges alkalmazási területnek tekintik például gátszakadások szimulálását, ahol a víz áramlását CFD-vel, a hordalékot DEM részecskékkel, a gát szerkezetét pedig VEM-mel lehetne szimulálni.

4.3. Talajban húzott síklap DEM szimulációja

J. Mak és szerzőtársai 2010-es kutatásukban [10] elsőként határozták meg egy olyan talaj diszkrételemes paramétereit, ahol a szemcsék között kohézió figyelhető meg. A talajt diszkrételemes gömbökkel modellezték, a kohéziót pedig úgy szimulálták, hogy az egymással szomszédos szemcsék között ragasztott (bonded) kapcsolatokat működtettek, amelyek meghatározott terhelés nagyságára megszűntek. A szimulációk során egy ferde síklapot toltak a gömbhalmazba horizontális irányban (4.5. ábra). Az eredményeket összevetették a Reece-féle analitikus összefüggés [11] segítségével kapott eredményekkel, és addig változtatták a paramétereiket, amíg azok jó közelítéssel meg nem egyeztek. Ezáltal bekalibráltak egy diszkrételemes modellt, amely alkalmas lehet más talaj-eszköz kapcsolat modellezésére is.



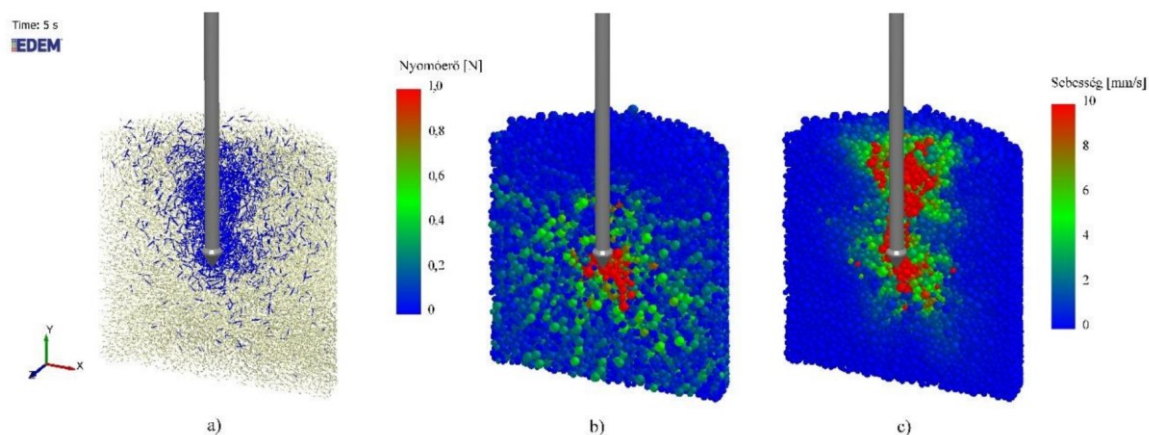
4.5. ábra: Talajban húzott síklap DEM modellje a) szimuláció kezdete, b) szimuláció korai szakasza, c) szimuláció stabil szakasza, forrás: J. Mak [10]

Munkájukkal bebizonyították tehát, hogy a talaj modellezhető diszkrételes gömbökkel és közöttük fennálló ragasztott kapcsolatokkal. A későbbiekben a paraméterek pontosítása érdekében szükségesnek tartották a lap különböző mértékű süllyesztése és sebessége mellett elvégezni a szimulációt, valamint méréssel kalibrálni az eredményeket. Az eszköz deformációjának modellezésére pedig felmerült egy DEM-VEM kapcsolt szimuláció lehetősége.

4.4. Vertikális talaj penetrométeres mérés DEM szimulációja

Dr. Kotroczi Krisztián Tanár Úr 2019-es doktori értekezésében [12] többek között egy kúpos penetrométeres vizsgálat diszkrételes szimulációjának paraméter érzékenységet vizsgálta két különböző diszkrételes szoftver alkalmazásával. A dolgozatban részletesen leírta a talajt modellező, gömbökből álló halmaz paramétereit és létrehozásának menetét, valamint a penetrométer geometriáját, így az eredmények könnyen reprodukálhatók, és a szimuláció továbbfejleszthető.

Az 4.6. ábra mutatja a szimuláció során a szemcsék között éppen felszakadó ragasztott kapcsolatokat, a szemcsék ható nyomóerőt, és a szemcsék sebességét.

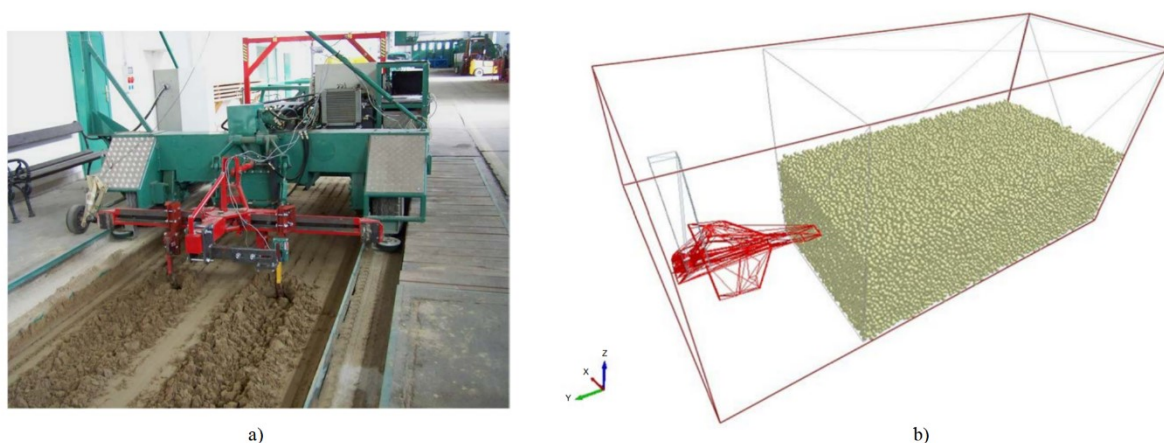


4.6. ábra: A penetrométeres szimuláció pillanatképe a) a felszakadt ragasztott kötésekkel, b) az elemekre ható nyomóerők, c) és a halmaz sebességmezője, forrás: Dr. Kotroczi Krisztián [12]

A paraméter érzékenységi vizsgálat alapján megállapította, hogy az elemek sűrűsége és Poisson tényezője nincs jelentős hatással a talajjellenállásra, hogy a ragasztott kapcsolat (parallel bond) sugár értékének növelése folyamatosan növeli a talajjellenállás értékét, valamint hogy a vetített penetrométer felületéhez képest 50..64-szer nagyobb halmaz átmérő esetén a talajjellenállás-mélység függvényt már nem befolyásolja jelentősen a halmaz mérete.

4.5. Talajban rezgő szerszámok diszkrételes modellezése

Keppler István és munkatársai 2013-mas kutatásukban [2], talajban rezgő szerszámok hatását vizsgálták különböző talajművelési paraméterek mellett. Méréseket végeztek passzívan (a talajszerszám kapcsolat miatt) rezgő, és nem rezgő szerszámokon. Ezeket diszkrételes szimulációkkal vetették össze, amelyekben a szerszám geometriákat egy gömbökből álló halmazon húzták végig, és közben a haladás irányában előre-hátra rezgették. A diszkrételes modell anyagparamétereit nyíródobozos vizsgálat segítségével kalibrálták be. A mérési és szimulációs elrendezést a 4.7. ábra mutatja.



4.7. ábra: Rezgő talajművelő szerszám vizsgálata, a) mérési elrendezés, b) szimuláció kezdeti állapota, forrás: Keppler István és munkatársai [2]

A kísérletek és a szimulációk egyaránt kimutatták, hogy a talajművelő szerszám rezgése jelentősen csökkenti a vonóerő igényt. Megállapították továbbá, hogy a nem rezgő és a rezgő szerszámok vonóerő igényének aránya, valamint a szerszám rezgés miatti csúcssebességének és a vontatási sebességnek az aránya (sebesség arány) nem függ a szerszám geometriától és a talajállapottól, amennyiben a sebesség arány nagyobb, mint 2.

Az eredmények alapján elmondható, hogy a diszkrételes talajművelési szimulációknál nem hanyagolható el a szerszám rezgésének hatása. Ennek figyelembe vétele megoldható úgy, hogy a szerszám geometriát állandó amplitúdóval és frekvenciával rezgetjük a diszkrételes halmazban előre haladva. Ennek hátránya, hogy a szimuláció elején tudnunk kell, hogy várhatóan a szerszám milyen átlagos amplitúdóval rezegne a valós talajban, valamint hogy

ekkor a halmaz viselkedése nem tudja befolyásolni a szerszám rezgését, tehát az állandó értéken marad a szimuláció során, ami a valósággal nem konzekvens eredményekhez vezethet, ugyanis a valóságban a rezgést maga a talaj-szerszám kapcsolat idézi elő. A szerszámrezgés figyelembe vételére egy másik megoldás lehet a kapcsolt szimuláció alkalmazása, ahol a valóságnak megfelelően a szerszám rezgését a talaj-szerszám kapcsolat határozza meg. Így a szimuláció kezdetén nem lenne szükség a szerszám rezgés paramétereinek megadására.

4.6. Irodalomkutatás összefoglalása

Az irodalmi áttekintés alapján összességében elmondható, jelenleg (2021.) a kapcsolt szimulációk jóval kevésbé elterjedtek, mint a csak egy numerikus módszert alkalmazó szimulációk. Általában a nagy precíziót és költségvetést igénylő projektek (pl. űrkutatás [4]) esetén jön szóba a különböző numerikus eljárások alkalmazása. A diszkrétételes módszer és a merevtest dinamikai szimulációk [4], valamint a diszkrétételes módszer és a folyadékáramlás szimulációk esetén már léteznek validált, kereskedelmi forgalomban is elérhető módszerek a kétutas kapcsolt szimuláció megvalósítására, azonban a diszkrétételes-végeselemes kétutas szimulációk működőképességét stabilitási problémák miatt még nem sikerült egyértelműen bizonyítani [1].

A diszkrétételes szimulációk egy lehetséges alkalmazási területe a talajművelés [2, 10, 12], ahol a talajszemcsék mozgását diszkrétételes szemcsék mozgásaként lehet modellezni. A diszkrétételes modell anyagparamétereit a szimulációhoz szükséges ismerni, melynek meghatározására alkalmazható például vertikális penterométeres mérés [12] vagy nyíródobozos vizsgálat [2]. A talajművelés során alkalmazhatóak mereven függesztett szerszámok és rugalmasan függesztett szerszámok, amelyek képesek valamekkora mértékű deformációra, és ezáltal a talajjal érintkezve ciklikus rezgést végeznek. A rezgésnek köszönhetően a rugalmasan függesztett szerszámok vonóerő igénye jelentősen kevesebb, mint a mereven függesztett szerszámoké [2]. Ez a hatás diszkrétételes szimulációk alkalmazásával is kimutatható. Az eddigi kutatások során ez úgy történt, hogy a szimulált szerszám geometriájának megadtak egy előre definiált rezgésállapotot, amely a szimuláció végéig állandó értéken maradt. Így azonban a rezgést előidéző talaj-szerszám kölcsönhatás nem került figyelembe vételre. Ennek egy megoldása lehetne a végeselemes-diszkrétételes kapcsolt szimulációk alkalmazása, amelyek során a szerszám deformációja és rezgésállapota a vele kapcsolatban álló diszkrétételes szemcsék hatására változna.

5. Végeselemes módszer

Az irodalomkutatás mellett fontosnak tartottam továbbá a két alkalmazott numerikus módszer bemutatását, és az alkalmazott modellek részletezését. Az alábbiakban röviden bemutatom tehát a végeselemes módszert, majd a következő fejezetben a diszkrét elemes módszerrel foglalkozom.

A végeselemes módszerről részletesebb áttekintés olvasható Dr. Tamás Péter és szerzőtársainak „Végeselemes módszerek” című könyvében [13].

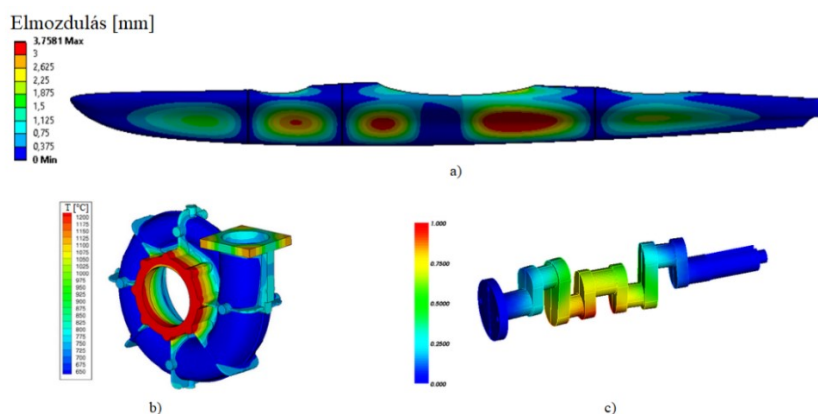
5.1. VEM alkalmazása

A végeselemes módszert (VEM) legelőször a szilárd testekben statikus terhelés hatására ébredő deformáció és feszültségállapot meghatározására fejlesztették ki (A. Hrennikoff, 1941. [14], R. Courant, 1943. [15]). A későbbiekben elterjedt továbbá a hőtani [16], rezgéstani, stabilitásvesztési és kifaradási jelenségek modellezésére [17] is az alkalmazása. Az eljárás segítségével számítható a modellezett szerkezet deformációja, sajátfrekvenciája, gerjesztésre adott állandósult és tranziens állapotbeli válasza, a szerkezetben ébredő hőmérséklet mező és a hőterjedés, a szerkezet kihajlása, kifaradása, továbbá akár a repedések terjedése.

A módszer lényege, hogy a vizsgált geometriát véges számú elemre bontjuk (behálózunk), amelyek meghatározott pontjaiban (a csomópontokban) definiáljuk a terhelés, elmozdulás és érintkezés peremfeltételeket, majd meghatározzuk az ismeretlen változókat (pl. elmozdulás, feszültség, alakváltozás, hőmérséklet). Ezt követően pedig a csomópontokban számolt eredmények alapján az elemek belsejében közelítő interpolációval számolhatjuk a vizsgált mennyiségeket.

Mivel tudományos diákköri dolgozatomban csak statikus számításokat végeztem, ezért a következőkben ennek a számításnak a módját részletezem bővebben.

Az 5.1. ábra mutatja a végeselemes módszer alkalmazási lehetőségeit.



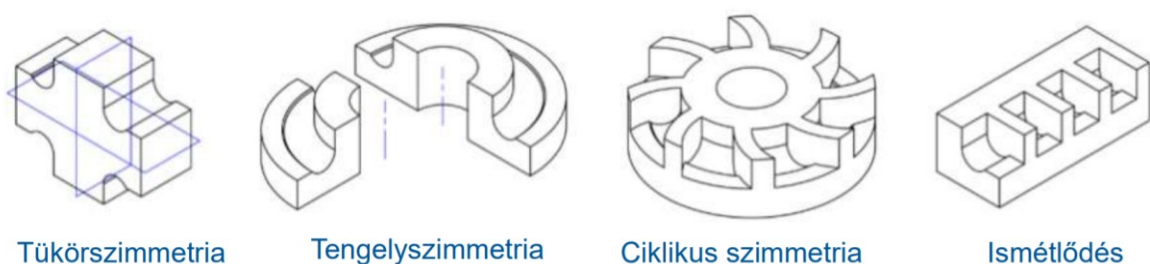
5.1. ábra: VEM alkalmazásai, a) kajak statikus szerkezeti analízise, b) turbokompresszor hőtani vizsgálata, c) vezérműtengely modális analízise, források: www.lke-eng.com [16], IndiaMART.com [17]

5.2. Statikus szerkezeti számítás lépései

Alapvetően a végeleemes számítás három fő részre bontható: a preprocessálásra, a processzáásra és a postprocesszáásra. Az első és utolsó lépést általában manuálisan szükséges végrehajtani, mert a különböző megoldandó feladatok esetén eltérések tapasztalhatók, a második lépést azonban a végeleemes megoldó szoftver feladata.

5.2.1. Mechanikai modell felállítása

A preprocessálás első feladata, hogy felállítsuk a vizsgált probléma egyszerűsített mechanikai modelljét. Ennek során meghatározzuk a figyelembe veendő terheléseket, megfogásokat és a geometriát, amelynek általában egy egyszerűsített változatát használjuk fel a számításához. Modellezhetünk egy dimenzióban pl. tartók, rácsos vagy csuklós szerkezetek esetén, két dimenzióban pl. lemezek, héjszerkezetek, forgásszimmetrikus testek, tartó keresztmetszetek esetén vagy három dimenzióban összetettebb geometriák esetén. Lehetőség van továbbá szimmetria miatti egyszerűsítésekre, amennyiben a geometria, a terhelések és a megfogások is szimmetrikusak (megkülönböztetünk tükörszimmetriát, forgásszimmetriát, tengelyes szimmetriát, és ciklikus szimmetriát (5.2. ábra)). Mivel ebben az esetben az eredmények is szimmetrikusak lennének, elegendő a szerkezet csak egy kisebb részét figyelembe venni a számítások során.



5.2. ábra: Lehetséges szimmetriatípusok, forrás: Tamás P. és szerzőtársai [13]

5.2.2. Anyagmodell megválasztása

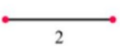
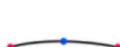
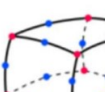
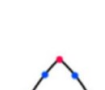
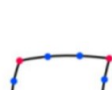
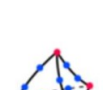
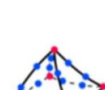
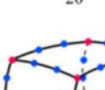
A következő feladat a részegységek anyagainak megválasztása, amely meghatározza, hogy adott terhelésállapotban adott terhelésnövekmény hatására mekkora lesz a szerkezet deformációja. Számos anyagmodellt alkalmazhatunk kezdve a leggyakrabban használt izotróp, lineárisan rugalmastól az anizotróp nemlineárisan képlékenyig. A választott anyagmodelltől függ, hogy milyen paramétereket szükséges megadnunk. Például a lineárisan rugalmas modell esetén elegendő a rugalmassági modulus és a Poisson-tényező megadása, multilineáris izotróp modellnél pedig a teljes egytengelyű húzásra vonatkozó alakváltozás-feszültség görbe megadása szükséges.

5.2.3. Hálózás

A geometria diszkretizálását, azaz hálózását számos elemtípussal megtehetjük (5.3. ábra). Egy dimenziós számításokra alkalmasak a rúd (csak normál irányú terhelést vesznek fel) és a gerenda elemek (minden irányú terhelést felvesznek), kétdimenziós számításokra a leggyakrabban forgásszimmetrikus elemeket, lemez elemeket és héj elemeket alkalmaznak, három dimenziós számítások esetén a tetraéder, hexaéder, a prizma és a gúla alakú elemek közül választhatunk.

A tetraéder elemekkel viszonylag könnyű behálózni a geometriát, ezért az automatikus hálózók általában ezt az elemtípust preferálják, azonban alkalmazásuk kevésbé pontos eredményhez vezet, mintha hexaéder elemeket alkalmaznánk, amelyekkel a hálózás viszont bonyolultabb. A prizma és gúla elemeket pedig csak ritkábban, általában a tetraéder és hexaéder háló közötti átmenetnél alkalmazzák.

Az elemtípuson kívül szükséges továbbá az elemek rendjének megválasztása. Elsőrendű elemek esetén az elemek belsejében a vizsgált paramétereket lineáris interpolációval lehet meghatározni, amely nem mindig vezet elegendően pontos eredményekhez. Ezért gyakori a magasabb rendű elemek alkalmazása, amelyeknek nemcsak a csúcaiban, hanem az éleiken, lapjaikon és/vagy a belsejükben is vannak csomópontok, így a vizsgált paraméterek az elemek belsejében is pontosabban közelíthetők a magasabb interpoláció alkalmazásával.

	1D (vonat)	2D (Felület) (2 DoF/Node)		3D (Térfogat) (3 DoF/Node)			
	Vonal (Line)	Háromszög (Triangle)	Négyszög (Quadrilateral)	Tetraéder (Tetrahedron)	Gúla (Piramid)	Prizma (Pentahedral Prism, Wedge)	Tégla (Hexahedron)
Lineáris (Linear)	 2	 3	 4	 4	 5	 6	 8
Másodfokú (Quadratic)	 3	 6	 8	 10	 13	 15	 20
Harmadfokú (Cubic)	 4	 9	 12	 16	 21	 24	 32

5.3. ábra: Leggyakoribb elemtípusok, forrás: Tamás P. és szerzőtársai [13]

5.2.4. Peremfeltételek megadása

A hálózást követően a felvett mechanikai modell alapján szükséges a peremfeltételek definiálása a megfelelő csomópontokra. Ezek a statikus szerkezeti VEM számítások esetén

lehetnek elmozdulás peremfeltételek, amelyek esetén meghatározzuk adott csomópont elmozdulását, terhelés peremfeltételek, amelyek esetén meghatározzuk az adott csomópontra adódó erővektort, valamint érintkezés peremfeltételek, amelyek esetén meghatározzuk a külön hálózott testprimitívek csomópontjai közötti érintkezéseket.

5.2.5. Számítás

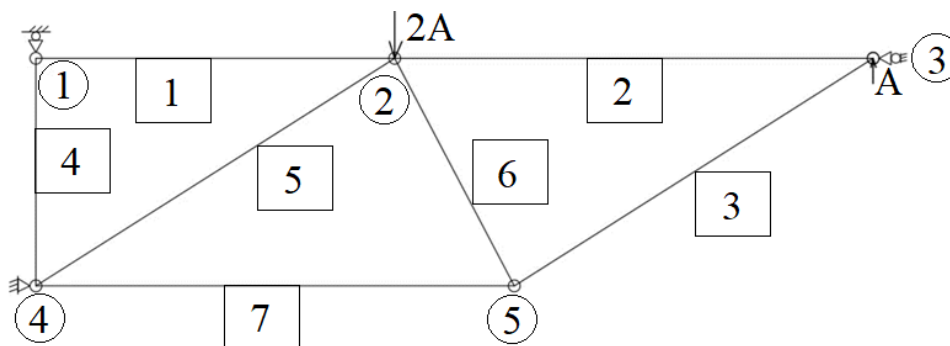
Statikus szerkezeti VEM és lineáris anyagmodell esetén az alábbi egyenletrendszer megoldása szükséges (A. Hrennikoff, 1941 [14]):

$$\underline{\underline{K}} \cdot \underline{U} = \underline{F} \quad (5.1)$$

A globális merevségi mátrix, valamint az elmozdulás és terhelés vektor az egyes elemekre jellemző lokális mátrixokból és vektorokból tevődik össze. A globális mátrixok és vektorok a háló összes csomópontjának összes szabadságfokára jellemző értéket tartalmazzák, míg a lokális mennyiségek csak egy elem csomópontjaira jellemző értékeket foglalnak magukban.

A globális merevségi mátrixot úgy kapjuk, hogy behelyezzük az elemek lokális merevségi mátrixait a globális mátrixban az adott elemeket jellemző csomópontok soraiba és oszlopaiba, majd azon csomópontok esetén, amelyek több elemhez tartoznak, összeadjuk a lokális merevségi mátrixok megfelelő elemeit. A globális terhelés és elmozdulás vektorokban pedig egyszerűen fel vannak sorolva a háló összes csomópontjára vonatkozó terhelés és elmozdulás értékek.

Vegyük például az alábbi rácsos szerkezetet, amely elemei húzott-nyomott rúdként modellezhetőek (5.4. ábra):



5.4. ábra: Rácsos szerkezet, az elemeket sorszáma keretezett, a csomópontoké pedig karikázott

Az egyes elemek merevségi mátrixai az alábbi módon számolhatók:

$$\underline{\underline{K}}_{nlok} = \frac{A_g \cdot E}{L} \cdot \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \cos \varphi \cdot \sin \varphi & -\cos^2 \varphi & -\cos \varphi \cdot \sin \varphi \\ \cos \varphi \cdot \sin \varphi & \sin^2 \varphi & -\cos \varphi \cdot \sin \varphi & -\sin^2 \varphi \\ -\cos^2 \varphi & \cos \varphi \cdot \sin \varphi & \cos^2 \varphi & \cos \varphi \cdot \sin \varphi \\ -\cos \varphi \cdot \sin \varphi & -\sin^2 \varphi & \cos \varphi \cdot \sin \varphi & \sin^2 \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{n11} & k_{n12} & k_{n13} & k_{n14} \\ k_{n21} & k_{n22} & k_{n23} & k_{n24} \\ k_{n31} & k_{n32} & k_{n33} & k_{n34} \\ k_{n41} & k_{n42} & k_{n43} & k_{n44} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Látható, hogy a lokális merevségi mátrixok 4x4-esek, mivel az elemek két csomópontot tartalmaznak, amelyek mindegyike x és y, azaz két irányban képes elmozdulni.

Az 5.4. ábra és az 5.2 képlet alapján számolható a szerkezet globális merevségi mátrixa, amely az alábbi alakot veszi fel:

$$\underline{\underline{K}}_{glob} = \begin{pmatrix} k_{111} + k_{411} & k_{112} + k_{412} & k_{113} & k_{114} & 0.0 & 0.0 & k_{423} & k_{414} & 0.0 & 0.0 \\ k_{121} + k_{421} & k_{122} + k_{422} & k_{123} & k_{124} & 0.0 & 0.0 & k_{423} & k_{424} & 0.0 & 0.0 \\ k_{131} & k_{132} & k_{133} + k_{211} + k_{511} + k_{611} & k_{134} + k_{212} + k_{512} + k_{612} & k_{213} & k_{214} & k_{513} & k_{514} & k_{613} & k_{614} \\ k_{141} & k_{142} & k_{143} + k_{221} + k_{521} + k_{621} & k_{144} + k_{222} + k_{522} + k_{622} & k_{223} & k_{224} & k_{523} & k_{524} & k_{623} & k_{624} \\ 0.0 & 0.0 & k_{231} & k_{232} & k_{233} + k_{311} & k_{234} + k_{312} & 0.0 & 0.0 & k_{313} & k_{314} \\ 0.0 & 0.0 & k_{241} & k_{242} & k_{243} + k_{321} & k_{244} + k_{322} & 0.0 & 0.0 & k_{323} & k_{324} \\ k_{431} & k_{432} & k_{531} & k_{532} & 0.0 & 0.0 & k_{433} + k_{533} + k_{711} & k_{434} + k_{534} + k_{712} & k_{713} & k_{714} \\ k_{441} & k_{442} & k_{541} & k_{542} & 0.0 & 0.0 & k_{443} + k_{543} + k_{721} & k_{444} + k_{544} + k_{722} & k_{723} & k_{724} \\ 0.0 & 0.0 & k_{631} & k_{632} & k_{331} & k_{332} & k_{731} & k_{732} & k_{333} + k_{633} + k_{733} & k_{334} + k_{634} + k_{734} \\ 0.0 & 0.0 & k_{641} & k_{642} & k_{341} & k_{342} & k_{741} & k_{742} & k_{343} + k_{643} + k_{743} & k_{344} + k_{644} + k_{744} \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Látható például, hogy a hatodik elem a második és ötödik csomópontok között helyezkedik el. Mivel minden csomópontnak két szabadságfoka van, ezért két sor és oszlop tartozik hozzá, így a második csomópont a globális mátrix harmadik és negyedik, az ötödik csomópont pedig a kilencedik és tizedik sorokat, illetve oszlopokat határozza meg. Ezért a hatodik elem lokális merevségi mátrixának elemei a harmadik, negyedik, valamint a kilencedik és tizedik sorokban és oszlopokban találhatóak.

A globális terhelés vektor az alábbi alakot veszi fel:

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_{1y} \\ 0 \\ -2A \\ F_{3x} \\ A \\ F_{4x} \\ F_{4y} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

A globális elmozdulás vektor pedig:

$$\underline{U} = \begin{bmatrix} u_1 \\ 0 \\ u_2 \\ v_2 \\ 0 \\ v_3 \\ 0 \\ 0 \\ u_5 \\ v_5 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Az (5.1) egyenletrendszer megoldásának egy lehetséges módja, ha két részre osztjuk a folyamatot: Először kivesszük az egyenletrendszerből azokat a sorokat és oszlopokat, amelyhez tartozó csomópont adott irányú elmozdulása ismert (kondenzáljuk a rendszert), invertáljuk a merevségi mátrixot, és a terhelés vektorral összeszorozva meghatározzuk az ismeretlen elmozdulásokat. Végül az elmozdulás vektor ismeretében számíthatóvá válnak a terhelésvektor ismeretlen elemei is.

Az egyenletrendszer megoldható ezen kívül többek között Gauss-eliminációval, amely nagyméretű hálók esetén időigényesnek mondható, Gauss-Seidel iterációval, alsó-felső háromszög mátrix felbontással és Cholesky-iterációval is.

Mivel nemlineáris anyagtörvények esetén a merevség pontról pontra változik, ezért ebben az esetben nem elegendő az egyenletrendszer egyszeri megoldása, hanem több lépéses iterációs eljárásokkal (pl. Newton-Raphson iteráció, Módosított Newton-Raphson iteráció, Line Search iteráció) lehet a szükséges mennyiséget meghatározni.

Az alapmennyiségek (szerkezeti VEM esetén elmozdulás és terhelésvektor) meghatározását követően lehetőség van másodlagos mennyiségek meghatározására is (pl. feszültségmező, alakváltozás mező), amelyek már számolhatók az alapmennyiségekből.

Ezt követően pedig interpolációs függvények alkalmazásával számíthatók az elemek belsejében is a vizsgált mennyiségek. Például elsőrendű, síkbeli rúd elemek esetében a vizsgált mennyiségek az alábbi függvény szerint közelíthetők az elem belsejében:

$$f(x, y) = f(x_i, y_i) \cdot \left(\frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}}{L} \right) + f(x_j, y_j) \cdot \left(\frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{L} \right) \quad (5.6)$$

5.2.6. Eredmények kiértékelése

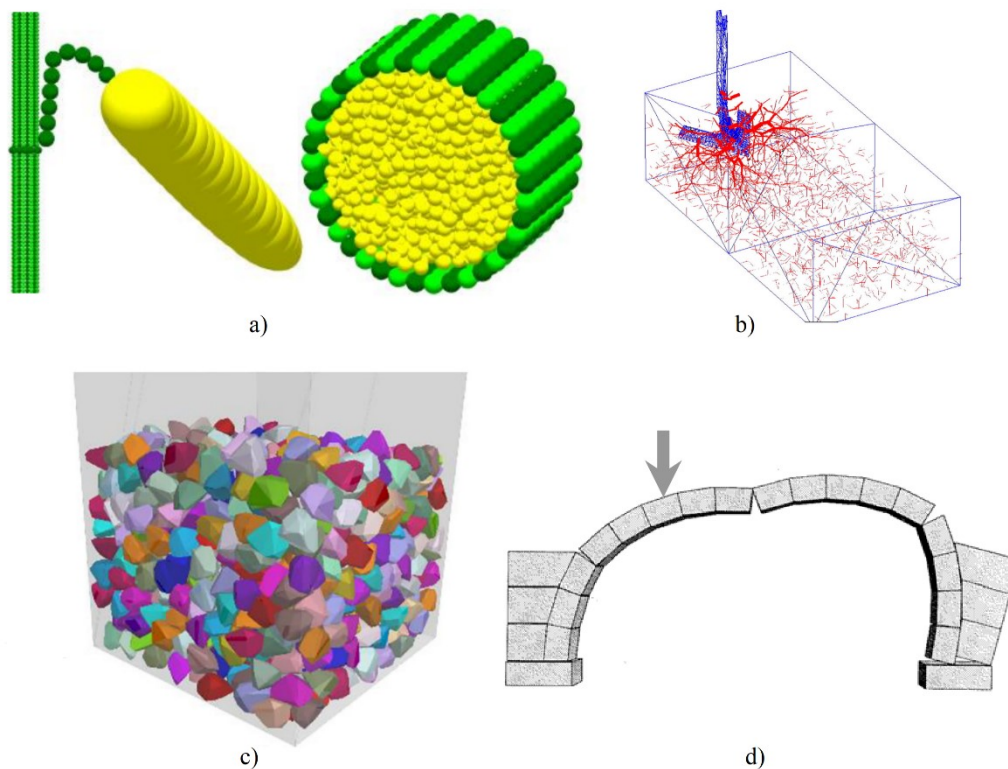
A végeselemes eljárás utolsó lépése a posztprocesszálas, melynek során kielemezésre kerülnek a vizsgált mennyiségek, továbbá szükség esetén megtörténik a szimuláció validálása vagy verifikálása. Végül megtehetők a szükséges következtetések, és javaslatok.

6. Diszkrét elemes módszer

Diszkrét elemes módszerről részletesebb áttekintés olvasható Dr. Bagi Katalin Professzorasszony „A diszkrét elemek módszere” című könyvében [18].

6.1. DEM alkalmazása

A diszkrét elemes módszert (DEM) szemcsés anyagok modellezésére fejlesztették ki (P. A. Cundall és szerzőtársai, 1979 [19]). Számos alkalmazási területei között szerepel a talaj, kőzetminták, mezőgazdasági szemes termények, vegyipari, élelmiszeripari és gyógyszeripari anyagok, vasúti zúzottkövek, kőépítmények modellezése (6.1. ábra). A korszerűbb modellek képesek továbbá a szemcsék közötti hővezetést, elektrosztatikus töltésállapotokat és a szemcsékkel érintkező geometriák kopását is kiszámítani.



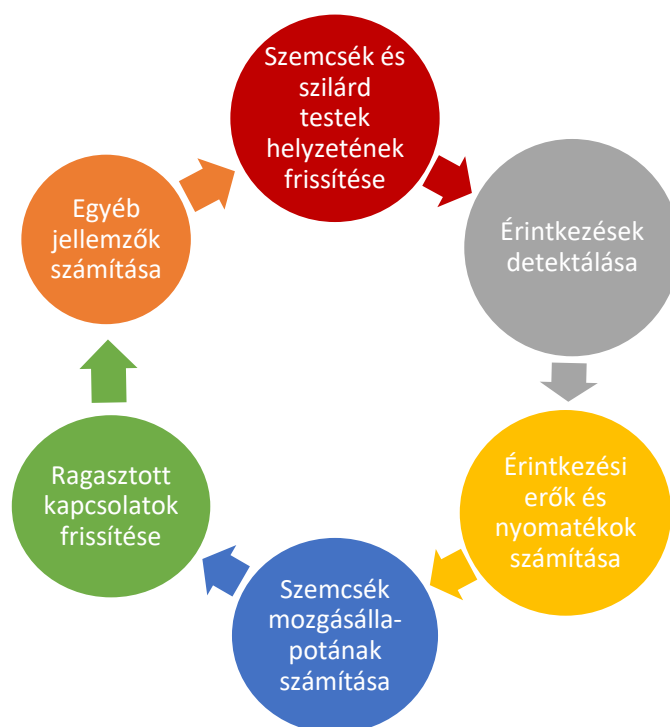
6.1. ábra: Néhány példa a DEM alkalmazására, a) kukoricacső modellezése, b) talajkultivátor modellezése, c) vasúti zúzottkövek modellezése, d) falazott ív DEM modellje, források: Kovács Á. [20], Tamás K. [21], Orosz Á. [22], Bicanic N. [23]

6.2. Számítás lépései

A számítás főbb lépései a vizsgált probléma dimenziójának megválasztása (két vagy háromdimenziós) szemcségeometria definiálása (kör/gömb, gömbökből/körökből felépített szemcsék vagy poliéder szemcsék), az érintkező szilárd testek geometriájának definiálása, a szemcsehalmaz tulajdonságainak definiálása a választott anyagmodellnek megfelelő

mikromechanikai jellemzőkkel (sűrűség, normál és nyíró merevség, csúszási és gördülési súrlódási tényező, csillapítási tényező, normál és nyíróirányú szilárdság, hővezetési tényező, stb.), az időlépés meghatározása, a szemcsehalmoz létrehozása (gravitációs üleptetés, izotróp tömörítés, tartományba növesztés, stb.), és/vagy a szimuláció futtatása, és végül az eredmények kiértékelése (sebesség, térfogatáram, erő, feszültség, hőmérséklet, kohézió, porozitás, stb. adatok lekérése, ábrák tanulmányozása) [18].

A szimuláció lényege alapvetően a halmazban található szemcsék mozgásának modellezése. Ez úgy kivitelezhető, hogy bizonyos időlépésenként meg kell ismételni a számítási lépéseket, azaz ciklikusan kell végrehajtani a számítást. Egy számítási ciklus legfontosabb lépései a szemcsék és szilárd testek helyzetének frissítése az előző lépésben nyert adatok alapján, a szemcsék egymással és a szilárd geometriával való érintkezésének detektálása, az érintkezési erők és nyomatékok számítása, a szemcsék mozgásállapotának (elmozdulás, sebesség, gyorsulás) számítása a Newton-törvények alapján és egyéb jellemzők (pl. feszültség, hőmérséklet) számításából áll (6.2. ábra). Ezen lépések végrehajtására számos módszert dolgoztak ki, amelyek közül azonban csak azokat részletezem, amelyeket dolgozatomban a szimulációkban felhasználtam.



6.2. ábra: DEM számítási ciklus

Az érintkezések felismerése kör és gömb alakú szemcséknél viszonylag egyszerű számítást igényel: A szimulációs teret kisebb tartományokra osztják a szoftverek, majd a szomszédos tartományban lévő szemcsék középpontjainak kiszámolják a távolságát, és összehasonlítják a szemcsék sugarának összegével. Ha az utóbbi a nagyobb, a szemcsék átfedésben vannak, azaz

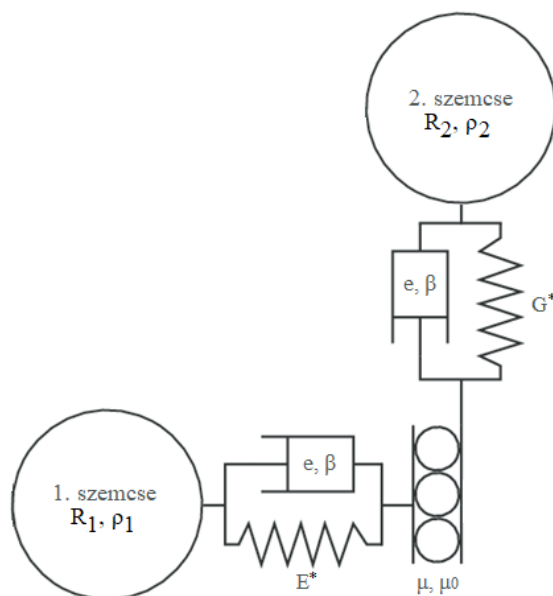
fennáll az érintkezés. Poliéder alakú szemcséknél is megoldható az érintkezések számítása (Orosz Á. 2021. [22]), az átfedés nagyságának megállapítása azonban nem minden esetben egyértelmű, így erre különféle módszereket is kidolgoztak. Alapvetően elmondható, hogy a poliéder elemek érintkezésének detektálása jóval nagyobb számítási igényű, mint a gömb vagy kör elemeké, hiszen geometriájuk is jóval összetettebb, ezért a valós ipari felhasználások során egyelőre még csak a gömb és kör alakú elemek alkalmazása terjedt el.

Az érintkezési erőket minden anyagmodell esetében az átfedés mértékével arányosítják. Egyes modellek ezen kívül figyelembe veszik a szemcsék előző időlépésbeli mozgásállapotát is: a szemcsék relatív sebességével arányos csillapítási erők és elmozdulásával ellentétes súrlódási erők számíthatók.

6.3. Néhány fontosabb anyagmodell

6.3.1. Hertz-Mindlin modell

Az egyik leginkább elterjedt anyagmodell például a Hertz-Mindlin, amely önmagában kohéziómentes, rugalmas anyagok (pl. száraz polimer granulátumok) modellezésére alkalmazható. Két érintkező szemcse kapcsolatát a 6.3. ábra által jelzett módon tudjuk elképzelni:



6.3. ábra: Hertz-Mindlin kapcsolati modell szemléltető ábrája, forrás: M. Rackl [24]

Mint látható, a kapcsolat leírásához 9 paraméterre van szükség: a szemcsék sűrűségére (ρ_1, ρ_2) és geometriájára (gömb és kör elemek esetén elegendőek a sugarak, azaz R_1, R_2), a kapcsolat egyenértékű húzó rugalmassági modulusára (E^*), egyenértékű csúsztató rugalmassági

modulusára (G^*), statikus és csúszó súrlódási tényezőjére (μ, μ_0), valamint az ütközési tényezőre (e), melyből számolható a csillapítási tényező (β).

A következőkben bemutatom, hogy gömb alakú szemcsék esetén hogyan számolhatók a kapcsolati erők.

A kapcsolatban ható rugalmas normál erő (Hertz H. [25]):

$$F_{nru} = \frac{4}{3} \cdot E^* \cdot \sqrt{R^*} \cdot \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (6.1)$$

A kapcsolat egyenértékű húzó rugalmassági modulusa:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (6.2)$$

A szemcsék csúsztató rugalmassági modulusa számítható a húzó rugalmassági modulusból és a Poisson-tényezőből:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (6.3)$$

Az érintkező gömbök egyenértékű sugara:

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (6.4)$$

A normálirányú csillapítási erő:

$$F_{nd} = -2 \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \beta \cdot \sqrt{S_n \cdot m^*} \cdot v_{nrel} \quad (6.5)$$

Az érintkező gömbök egyenértékű tömege:

$$m^* = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)^{-1} \quad (6.6)$$

A gömbök tömege egyszerűen számolható a sugár és sűrűség ismeretében:

$$m_i = \rho_i \cdot \frac{4 \cdot R_i^3 \cdot \pi}{3} \quad (6.7)$$

A csillapítási tényező az ütközési tényezőből számítható

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (6.8)$$

Az érintkező gömbök egyenértékű normálmerevsége:

$$S_n = 2 \cdot E^* \cdot \sqrt{R^* \cdot \delta_n} \quad (6.9)$$

Így egy kapcsolatban ható normálerő:

$$F_n = F_{nrug} + F_{nd} \quad (6.10)$$

Egy kapcsolatban ható rugalmas nyíróerő:

$$F_{trug} = -S_t \cdot \delta_t \quad (6.11)$$

Az egyenértékű nyírómerevség az egyenértékű normálmerevséghez hasonlóan számítható:

$$S_t = 8 \cdot G^* \cdot \sqrt{R^* \cdot \delta_t} \quad (6.12)$$

A nyíróirányú csillapítási erő:

$$F_{td} = -2 \cdot \sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \beta \cdot \sqrt{S_t \cdot m^*} \cdot v_{trel} \quad (6.13)$$

Végül egy kapcsolatban ható nyíróerő, amely a súrlódás által korlátozva van (R. D. Mindlin [26]):

$$F_t = \begin{cases} F_{trug} + F_{td}, & \text{ha } F_{trug} + F_{td} < \mu_0 \\ F_n \cdot \mu, & \text{ha } F_{trug} + F_{td} \geq \mu_0 \end{cases} \quad (6.14)$$

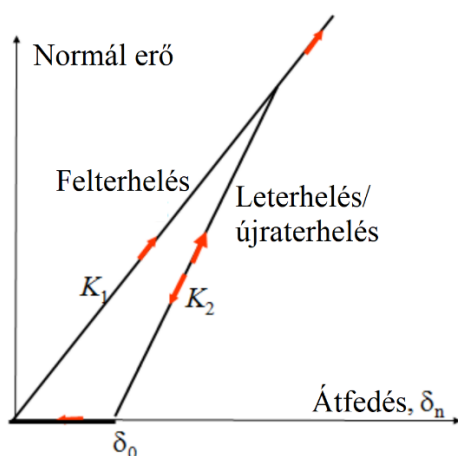
6.3.2. Hiszterézises rugós (hysteretic spring) modell

Egy másik kapcsolati modell a hiszterézises rugós (hysteretic spring) modell nevet viseli, amely kohéziómentes, képlékeny anyagok modellezésére alkalmas. Lényege, hogy két szemcse

érintkezése és összenyomódása után megváltozik a kapcsolat merevsége, így leterheléskor még az átfedés megszűnése előtt, a maradó átfedés elérésekor nulla lesz a normálerő a két szemcse között, és az érintkezés megszűnéséig érvényes marad, hogy csak akkor ébred normálerő, ha az átfedés meghaladja a maradó átfedés értékét.

A megadandó mikromechanikai paraméterek között a Hertz-Mindlin-féle modellhez hasonlóan szerepel a szemcsék és a szilárd geometriák húzó rugalmassági modulusa (E), tapadási súrlódási tényezője (μ_0), csúszási súrlódási tényezője (μ), ütközési tényezője (e), a szemcsék sugara (R) és sűrűsége (ρ). Ezekon kívül szükség van továbbá a hiszterézises rugós modell csillapítási tényezőjének (b_n), valamint a hiszterézises rugós modell merevségi tényezőjének (γ_t) megadására.

A 6.4. ábra mutatja az ébredő normálerő jellegét az átfedés függvényében:



6.4. ábra: Hiszterézises rugós (hysteretic spring) modell normálerő-átfedés diagramja, forrás: learn.altair.com, [27]

Mint látható, a rugalmas normálerő a következőképpen számítható (O. R. Walton és szerzőtársai [28]):

$$F_{n\text{rug}} = - \begin{cases} K_1 \cdot \delta_n, & \text{első felterhelés esetén} \\ K_2 \cdot (\delta_n - \delta_{n0}), & \text{leterhelés és újraterhelés esetén,} \\ 0, & \text{leterhelés és újraterhelés esetén,} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{ha } \delta_n > \delta_{n0} \\ \text{ha } \delta_n \leq \delta_{n0} \end{matrix} \quad (6.15)$$

A felterhelési merevség:

$$K_1 = 5 \cdot R^* \cdot \min\{Y_1, Y_2\} \quad (6.16)$$

A gömb alakú szemcsék folyáshatára:

$$Y = \begin{cases} \frac{4}{15} \cdot \frac{E}{\sqrt{R}} \cdot \frac{1}{70}, & \text{ha } \frac{4}{15} \cdot \frac{E}{\sqrt{R}} \cdot \frac{1}{70} \geq 10^{-4} \\ 0,003 \cdot E, & \text{ha } \frac{4}{15} \cdot \frac{E}{\sqrt{R}} \cdot \frac{1}{70} < 10^{-4} \end{cases} \quad (6.17)$$

A leterhelési és újraterhelési merevség:

$$K_2 = \frac{K_1}{e^2} \quad (6.18)$$

A maradó átfedés mindig az érintkezés kezdetén határozódik meg, és amíg el nem válik a két szemcse egymástól, állandó értékű:

$$\delta_{n0} = \delta_n \cdot \left(1 - \frac{K_1}{K_2}\right) \quad (6.19)$$

A modell továbbfejlesztéseként bevezethetők a normál és nyíróirányú csillapítások, és a nyíróerő (O. R. Walton [29]).

A normálirányú csillapítóerő:

$$F_{nd} = -b_n \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot m^* \cdot K}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \cdot v_{nrel} \quad (6.20)$$

A teljes normálerő pedig a Hertz-Mindlin kapcsolatnál leírtakhoz hasonlóan:

$$F_n = F_{nrug} + F_{nd} \quad (6.21)$$

Egy kapcsolatban ható rugalmas nyíróerő:

$$F_{tru} = \gamma_t \cdot K_1 \cdot \delta_n \quad (6.22)$$

A nyíróirányú csillapítási erő:

$$F_{td} = - \sqrt{\frac{4 \cdot m^* \cdot \gamma_t \cdot K}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}} \cdot v_{trel} \quad (6.23)$$

A kapcsolatban ható teljes nyíróerő hasonlóan számolható, mint a Hertz-Mindlin modellben:

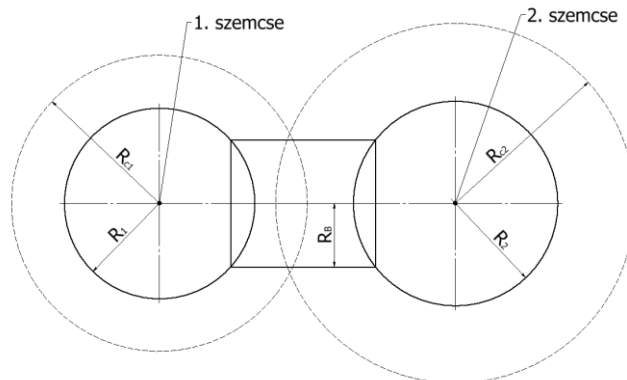
$$F_t = \begin{cases} F_{trug} + F_{td}, & \text{ha } F_{trug} + F_{td} < \mu_0 \\ F_n \cdot \mu, & \text{ha } F_{trug} + F_{td} \geq \mu_0 \end{cases} \quad (6.24)$$

6.3.3. Ragasztott modell

Az alap modelleket ki lehet egészíteni másodlagos modellekkel. Ilyen például a hővezetési modell, amivel meghatározható a szemcsék között a hő terjedése (ezt most külön nem részletezem, mivel tudományos diákköri dolgozatomban nem volt célom hőtani szimulációt készíteni), vagy a szomszédos szemcsék között akár ragasztott kapcsolatok is definiálhatóak (D. O. Potyondy és szerzőtársai [30]), melyek segítségével modellezhető a kohézió.

A ragasztott kapcsolatok definiálásához szükséges megadni az érintkezési sugarat (R_c), a ragasztott kapcsolat sugarát (R_B), a ragasztott kapcsolat normálirányú merevségét (S_{nb}), a ragasztott kapcsolat nyíróirányú merevségét (S_{tb}), a ragasztott kapcsolat szakítószilárdságát (σ_{max}), valamint a ragasztott kapcsolat nyírósilárdságát (τ_{max}).

Azon szemcsék között jön létre a kapcsolat, amelyek R_c érintkezési sugarai által kijelölt gömbök a létrehozás pillanatában átfedésben vannak. Ekkor a szemcsepár között a ragasztott kapcsolatra jellemző, R_B sugarú rúd jön létre, amely összetartja a két szemcsét (6.5. ábra), így a közöttük ható erőket nem az alapmodell, hanem a másodlagos modell határozza meg mindaddig, amíg rúdban a normál vagy nyírófeszültség meg nem haladja a kapcsolat szakító, illetve nyírósilárdságát. Ekkor a két szemcse elválik egymástól, és a későbbi érintkezésük során az alapmodellnek megfelelően viselkednek.



6.5. ábra: Ragasztott kapcsolat geometriai paraméterei

A ragasztott kapcsolatban ébredő normálerő különbség az előző időlépéshez képest:

$$\Delta F_n = -v_{nrel} \cdot S_{nb} \cdot A_b \cdot \Delta t \quad (6.25)$$

A ragasztott kapcsolatban ébredő nyíróerő különbség az előző időlépéshez képest:

$$\Delta F_t = -v_{trel} \cdot S_{tb} \cdot A_b \cdot \Delta t \quad (6.26)$$

A ragasztott kapcsolatban ébredő csavaró nyomaték különbség az előző időlépéshez képest:

$$\Delta M_n = -\omega_{nrel} \cdot S_{tb} \cdot J \cdot \Delta t \quad (6.27)$$

A ragasztott kapcsolatban ébredő hajlító nyomaték különbség az előző időlépéshez képest:

$$\Delta M_t = -\omega_{trel} \cdot S_{nb} \cdot \frac{J}{2} \cdot \Delta t \quad (6.28)$$

A ragasztott kapcsolat keresztmetszete:

$$A_b = R_B^2 \cdot \pi \quad (6.29)$$

A ragasztott kapcsolat másodendű nyomatéka:

$$J = \frac{1}{2} \cdot R_B^4 \cdot \pi \quad (6.30)$$

A ragasztott kapcsolatban ébredő normál feszültség:

$$\sigma = \frac{-F_n}{A_b} + \frac{2 \cdot M_t}{J} \cdot R_B < \sigma_{max} \quad (6.31)$$

A ragasztott kapcsolatban ébredő csúsztató feszültség:

$$\tau = \frac{-F_t}{A_b} + \frac{M_n}{J} \cdot R_B < \tau_{max} \quad (6.32)$$

6.3.4. Lineáris kohézió modellje

A ragasztott modell mellett egy másik másodlagos modell a lineáris kohézió modellje, amely megnöveli a kapcsolatban a szemcsék közötti normálerőt egy kohéziós erővel, melynek a szimulációt megelőzően szükséges megadni E_d energiasűrűség paraméterét:

$$F_{lc} = E_d \cdot A_c \quad (6.33)$$

A modell alkalmazásával hatékonyabban modellezhetők kohézív, ragadós anyagok, például a nedves talaj, ugyanis a nagyobb normálerő miatt megnő a súrlódási erő maximuma, ami azt eredményezi, hogy az egymással kapcsolatban lévő szemcsék csak nagyobb nyíróerők esetén csúsznak meg egymáson, ezzel modellezve az egymáshoz ragadás állapotát.

6.4. Szemcsék mozgásállapotának meghatározása

A szemcsék mozgásállapotának meghatározása a Newton-törvények segítségével (S. I. Newton, 1687. [31]) történik, azaz a szemcse gyorsulása és szöggyorsulása arányos a rá ható erővel, illetve nyomatékkal:

$$\underline{a}_i = \frac{\sum \underline{F}_i}{m}$$

$$\underline{\alpha}_i = \left(\sum (\underline{M}_i) - \underline{\omega}_{i-1} \times (\underline{\Theta} \cdot \underline{\omega}_{i-1}) \right) \cdot \underline{\Theta}^{-1}$$
(6.34)

A gyorsulásból számítható a szemcsék következő időlépésbeli sebessége és helyzete:

$$\underline{v}_i = \underline{v}_{i-1} + \underline{a}_i \cdot \Delta t$$

$$\underline{r}_i = \underline{r}_{i-1} + \underline{v}_i \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \underline{a}_i \cdot \Delta t^2$$
(6.35)

És végül a szöggyorsulásból számítható a szemcsék következő időlépésbeli szögsebessége:

$$\underline{\omega}_i = \underline{\omega}_{i-1} + \underline{\alpha} \cdot \Delta t$$
(6.36)

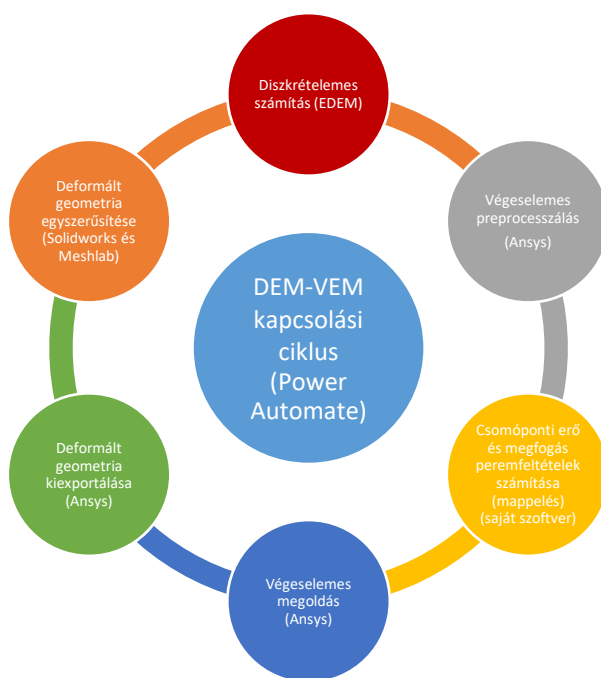
7. Kétutas DEM-VEM szimulációs eljárás bemutatása

Tudományos diákköri munkám során kidolgoztam egy DEM-VEM szimulációs eljárást, amely segítségével számítható és figyelembe vehető a diszkrételes számítás során a szilárd geometriák deformációja. Az eljárás lényege, hogy a diszkrételes szimulációt bizonyos időközönként megszakítva végeselemes módszerrel kiszámításra kerül az érintkezési erők alapján a szilárd geometria vagy geometriák deformációja, ami a folytatódó DEM számítás során figyelembe vételre kerül.

A diszkrételes számításokhoz az Altair EDEM szoftver 2021-es verzióját [32], a végeselemes számításokhoz pedig az Ansys Mechanical APDL 2020 R2-es verzióját [33] alkalmaztam. A deformált geometriát tartalmazó fájl méretének szabályozására a Dassault Systemes Solidworks 2018 SP4 verzióját [34] és a Meshlab 2021.05 verzióját [35] használtam. A számítást végző szoftverek automatizált működését pedig a Microsoft Power Automate szoftver [36] segítségével oldottam meg.

7.1. Kapcsolási ciklus

A kapcsolási ciklus (7.1. ábra) alapvetően 6 lépésből áll, melyeket a következőkben részletezek.



7.1. ábra: DEM-VEM kapcsolási ciklus lépési és az alkalmazott szoftverek

7.1.1. Diszkrételes folyamat

A számítási ciklus a diszkrételes szoftverben kezdődik. A posztprocesszálás során először kitörlésre kerül az előző ciklus során alkalmazott szilárd deformálható geometria, majd

beimportálódik az előző ciklusokban adódott terheléseknek megfelelően deformálódott geometria iges fájlformátumban. Ezután szükséges a geometriát a megfelelő pozícióba transzformálni, ami mozgó geometria esetén ciklusonként eltér. Amennyiben a szimuláció során mozog a geometria, szükséges a sebességének, és mozgási irányának megadása is.

A processzálas során meg kell adni, hogy a diszkrételéses számítás meddig fusson (a számítás akkori időpontja és a számítási ciklus szimulációs idejének összege), majd elkezdődik a szimuláció. A diszkrételéses szoftver ekkor meghatározott időközönként elmenti a szimuláció helyzetét, beleértve a szilárd geometriákra ható terheléseket.

Amikor véget ér a diszkrételéses számítás, megkezdődik a poszt processzálas: kiexportálódik egy csv formátumú fájl, ami tartalmazza a vizsgált geometriára a mentési időpontokban ható érintkezési erők támadáspontját és vektorát. Végül pedig az automata program visszalépteti a diszkrételéses szoftvert a preprocessáló modulba, hogy a következő számítási ciklus során is megfelelően el tudjon kezdődni a diszkrételéses folyamat.

7.1.2. Végeselemes preprocessálás

A DEM számítást követi a végeselemes számítás. Ennek első lépése a preprocessálás, amely egy APDL kódnak köszönhetően automatikusan történik. Először beimportálásra kerül az előző ciklus során meghatározott geometria, majd a kód definiálja az anyagtulajdonságokat (például lineárisan rugalmas, izotróp anyag esetén a rugalmassági modulust és a Poisson tényezőt), és behálózza a geometriát (például 20 csomópontos tetraéder elemekkel). Ezt követően pedig egy txt fájlba kiexportálja a háló csomópontjainak koordinátáit.

7.1.3. Csomóponti erő és megfogás peremfeltételek számítása

A végeselemes preprocessálás a peremfeltételek definiálásával zárul, amelyet megelőz egy úgynevezett mappelési eljárás [37]. Erre egy saját szoftvert készítettem c# nyelven, amely beolvassa a diszkrételéses szoftverből kinyert erő adatokat, és a végeselemes szoftverből érkező csomópont koordinátákat, és a támadáspontokhoz legközelebb eső csomópontokra helyezi rá az erőket a Pitagorasz-tétel alkalmazásával:

$$l^2 = \min \left((r_{Fx} - r_{cspx})^2 + (r_{Fy} - r_{cspy})^2 + (r_{Fz} - r_{cspz})^2 \right) \quad (7.1)$$

Az (6.1) képletet tehát a mappelést végző szoftver kiszámítja minden egyes erő és csomópont esetén, és minden erő esetén azt a csomópontot választja ki, ahol az adott erő támadáspontja és a vizsgált csomópont közötti táv minimális.

Az aktuális ciklus erői pozitív előjellel lesznek figyelembe véve, ezen kívül pedig egy korábbi ciklus során ható erők is ráadódnak a végeselemes modellre, azonban ezek negatív előjellel.

Erre azért van szükség, mert a geometriára már nem ható erők által okozott deformációt a rugalmas viselkedés miatt meg kell szüntetni. Így ha például a geometriára nem hat erő, az bizonyos számú ciklus alatt fokozatosan visszanyeri eredeti alakját a ráadott negatív erőknek köszönhetően.

Az erők mappelését követően a csomópontokra jutó megfogásokat is kiszámolja a szoftver. Ezek lehetnek például a geometria egyik szélső felületén vagy sarkában. Ekkor tehát kiválasztásra kerülnek azok a csomópontok, melyek koordinátái nagyobbak vagy kisebbek egy adott értéknél.

Végül a mappelést végző szoftver automatikusan elkészít egy APDL kódot, amely tartalmazza a terhelés és megfogás peremfeltételeket, és amelyet beolvas a végelelemes szoftver.

7.1.4. Végelelemes megoldás

A végelelemes processzálsra a VEM szoftver egy következő, előre definiált APDL kódban kap parancsot.

7.1.5. Végelelemes posztprocesszáls

A processzálsához beolvasott APDL kód egyben tartalmazza a geometria kiexportálásához is a parancsokat. Ennek során keletkezik egy iges formátumú fájl, ami tartalmazza a deformált geometriát.

A posztprocesszáls során lehetőség van továbbá az aktuális ciklus végelelemes számításának elmentésére, valamint a csomópontok elmozdulásának külön elmentésére, hogy a szimulációt követően kiértékelhetők legyenek az egyes paraméterek (például elmozdulás és feszültségmező).

7.1.6. Deformált geometria egyszerűsítése

A szimulációs ciklus végén szükséges a végelelemes szoftverből kinyert deformált geometria egyszerűsítése, ugyanis ez túlságosan sok geometriai elemből áll ahhoz, hogy a következő számítási ciklus során belátható időn belül be lehessen hálózni. Az egyszerűsítéshez először a térfogati (solid), iges formátumú geometriát egy felületi, stl formátumú geometriává konvertálja az alkalmazott CAD szoftver, majd a felületi geometriát egy poligon csökkentő eljárással leegyszerűsíti a hálókezelő szoftver. Továbbá ekkor lehetséges a geometria megfelelő mértékegységre skálázása is (például ha a szimuláció során a geometria milliméter mértékegységben van alkalmazva, a végelelemes szoftverből pedig méter mértékegységben kerül kiexportálásra). Ezt követően a hálókezelő szoftver elmenti stl formátumban a módosított

geometriát, és végül a CAD szoftver visszaalakítja a felületi modellt térfogati modellé, majd elmenti iges formátumban.

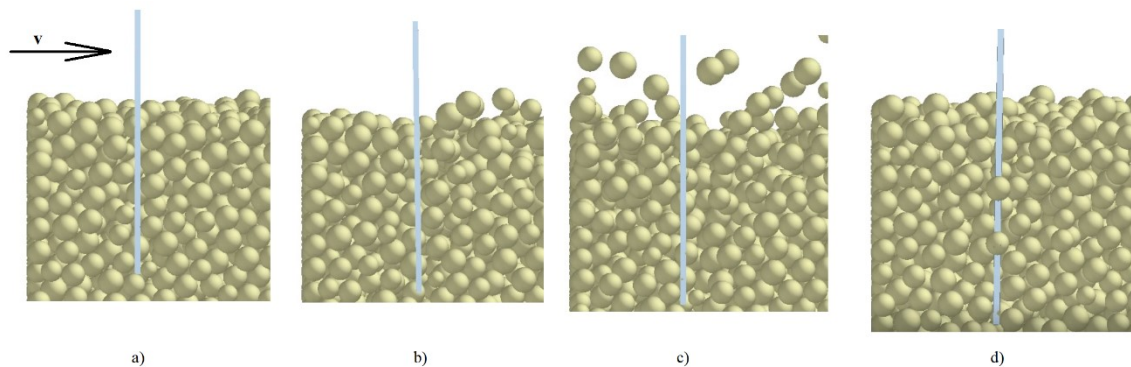
7.2. Számítási ciklus automatizálása

A számítási ciklust egy RPA (robotic process automation) szoftver, a Microsoft Power Automate [36] segítségével lehet automatizálni. Ez a szoftver alkalmas rá, hogy előre beprogramozva végrehajtsa a felhasználói felületeken a szükséges lépéseket a kapcsolt szimulációhoz. Például lehetőség van annak megadására, hogy a felhasználói felületen adott gombra vagy képre kattintson, begépeljen adott szöveget, vagy éppen várakozzon, amíg egy ablak meg nem nyílik. Ezek mellett képes számon tartani a megadott változók értékét, műveleteket végezni a változókkal, szövegfájlból változókat beolvasni és szövegfájlba változókat kiírni, valamint képes feltételes és ciklikus utasítások végrehajtására. Az előre definiált utasításblokkokat beparaméterezve és egymás alá rendezve automatizálható szinte bármilyen ismétlődő jellegű folyamat a személyi számítógépeken.

7.3. Konvergencia problémák kezelése

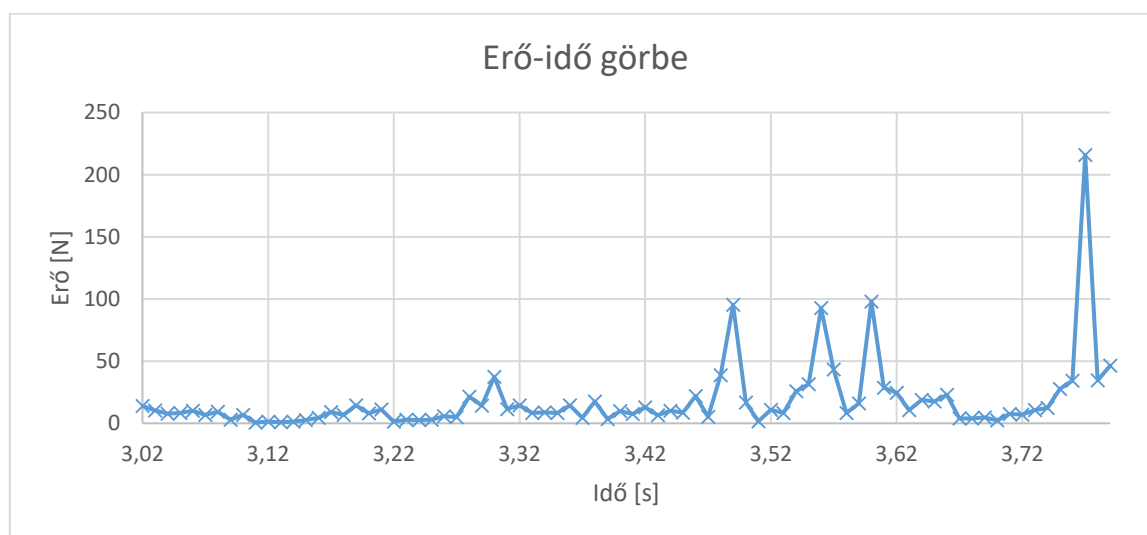
A kezdeti szimulációknál gondot jelentett, hogy egy időlépés során az érintkezési erőkből számolt deformáció túlságosan nagy volt, így a deformált geometriát a szemcsehalmazba visszahelyezve irreálisan nagy átfedésbe került a szemcsékkel. Emiatt a következő időlépés során irreálisan nagy érintkezési erők adódtak, amik még inkább megnövelték a geometria deformációját. Ezért a geometria deformációja tetszőlegesen sok időlépés esetén sem állt be egy adott értékre, hanem időlépésről-időlépésre ingadozott, és a valóságosnál sokkal jelentősebben ellökte magától a szomszédos szemcséket, így mondhatni felrobbantotta maga körül a halmazt. Ezek mellett a nagymértékű deformációk miatt a geometria folyamatosan torzult a végeselemes szoftverben ami a lap hosszának növekedéséhez vezetett.

Ezt a problémát mutatja a 7.2. ábra. 3,14 s-nál látható a halmaz szétrobbanása. 3,79 s-nál már a robbanást követően leülepedtek a szemcsék, viszont a világoskék színű geometria (lap) irreálisan nagy átfedésbe került néhány szemcsével. Megfigyelhető továbbá a geometria hossznövekedése az idő előrehaladtával.



7.2. ábra: Konvergencia probléma a szimulációban, időpontok: a) 3,01 s, b) 3,08 s, c) 3,14 s, d) 3,79 s, v jelöli a lap sebességének irányát

Továbbá az 7.3. ábra mutatja a fentiekben tárgyalt szimulációnál a geometriára ható erőt az egyes időlépésekben. Látható, hogy egy bizonyos idő elteltével ugrásszerűen egyre jelentősebb erők ébrednek. Ezek akkora deformációkat okoznak, amik egy időlépésben már nem kezelhetők irreálisan nagy szemcse-geometria átfedések nélkül.



7.3. ábra: Erő-idő görbe nem konvergens deformációk esetén

A konvergencia problémák megoldására az alábbi intézkedéseket vezettem be:

- Lecsökkentettem az érintkezési erők mentésének időközét 0,01 s-ról 0,001 s-ra, így mivel egy kapcsolási ciklus időközét 0,01 s-nak választottam, az érintkezési erőket ezután nem egy időpontból vettem figyelembe, hanem 10 időpont átlagaként.
- Azoknál a szimulációknál, ahol a geometria mozgott a halmazban, megállítottam a geometriát, amíg az időlépések között a deformációja egy bizonyos érték (pl. 5 mm) felett volt, és csak akkor indítottam el újra, ha a geometria már kvázi statikus helyzetbe került, azaz az időlépések között jelentősen lecsökkent a deformációja.

Az intézkedések bevezetésével kevésbé jelentősen ugyan, de még mindig fent álltak a túlságosan nagy deformáció növekedés miatti konvergencia problémák, ezért szükség volt egy új erő modell bevezetésére, amivel az volt a célom, hogy az ugrásszerű erő növekmények ne egy időlépésben legyenek figyelembe véve, hanem fokozatosan, több lépésen keresztül okozzák a geometria deformációját.

A továbbiakban a végeselemes szimulációk során nem az előző tíz, hanem az előző száz mérési/adatmentési pontban ható erő átlagát vettem figyelembe, azaz mindig az előző 10 kapcsolási ciklus során ható erők átlagát működtettem a geometrián.

Például a geometriára egy kapcsolási ciklusban figyelembe vett x irányú erők összege az alábbi képlet szerint számolható:

$$F_{xi} = \sum_{j=i-9}^{i_c} \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{jk}} \frac{F_{xjklf}}{100} \quad (7.2)$$

A 7.1.3 pontban ismertetetteknek megfelelően a végeselemes szimuláció során mindig pozitív előjellel vettem figyelembe az adott kapcsolási ciklushoz számolt erőket (F_i), és negatív előjellel vettem figyelembe az előző kapcsolási ciklushoz számolt erőket (F_{i-1}). Így például egy kapcsolási ciklus során a következő x irányú erőket működtettem a geometrián:

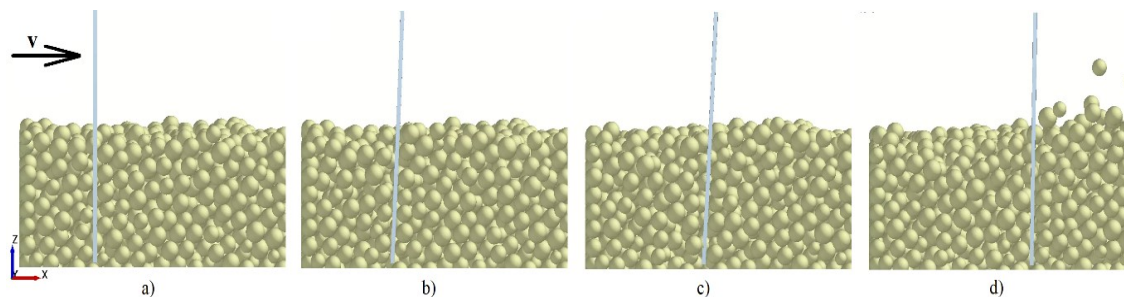
$$F_{xi} - F_{xi-1} = \sum_{j=i-9}^{i_c} \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{jk}} \frac{F_{xjkl}}{100} - \sum_{j=i-10}^{i_c-1} \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{jk}} \frac{F_{xjkl}}{100} \quad (7.3)$$

A (6.3) egyenletben szereplő külső szummát kifejtve látható, hogy két tag kivételével minden kiesik:

$$\begin{aligned} F_{xi} - F_{xi-1} &= \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{(i_c-9)k}} \frac{F_{x(i_c-9)kl}}{100} + \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{(i_c-8)k}} \frac{F_{x(i_c-8)kl}}{100} + \dots + \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{i_c k}} \frac{F_{xi_c kl}}{100} \\ &\quad - \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{(i_c-10)k}} \frac{F_{x(i_c-10)kl}}{100} - \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{(i_c-9)k}} \frac{F_{x(i_c-9)kl}}{100} - \dots - \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{(i_c-1)k}} \frac{F_{x(i_c-1)kl}}{100} \\ &= \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{i_c k}} \frac{F_{xi_c kl}}{100} - \sum_{k=1}^{10} \sum_{l_f=1}^{n_{(i_c-10)k}} \frac{F_{x(i_c-10)kl}}{100} \end{aligned} \quad (7.4)$$

Így a végeselemes szimuláció során elegendő volt figyelembe venni az adott kapcsolási ciklus során ható erők tizedének és a 10 ciklussal előtti erők tizedének különbségét.

Az új erő modell alkalmazásával már sikerült megoldani a konvergencia problémákat. Ezt mutatja a 7.4. ábra.

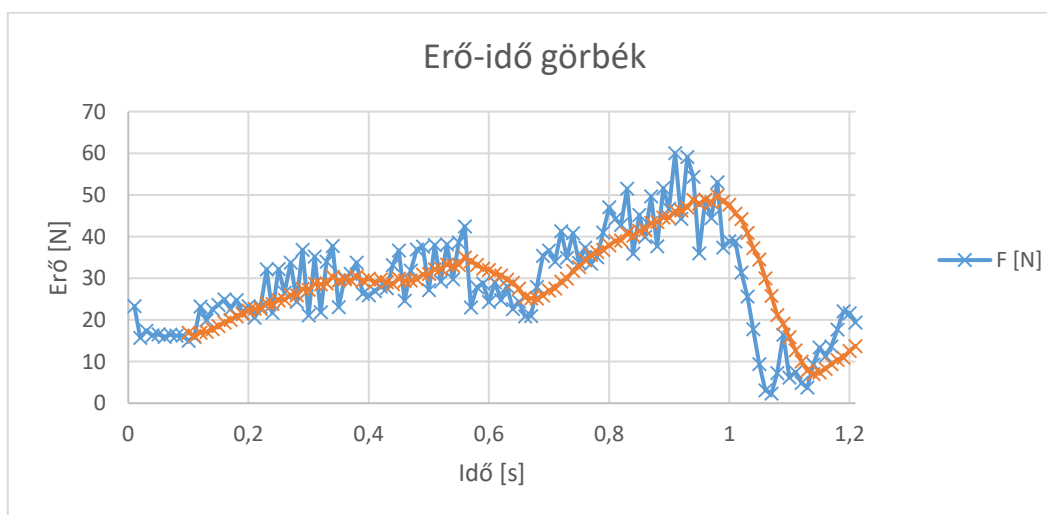


7.4. ábra: Konvergencia problémáktól mentes szimuláció, időpontok: a) 0 s, b) 0,4 s, c) 0,8 s, d) 1,2 s, v jelöli a lap mozgásának irányát

A szimuláció során a deformálható lapnak (geometria) egyenletes, x irányú sebesség lett megadva. Megfigyelhető, hogy egyik időpontban sincsenek irreálisan nagy átfedések a lap és a gömbök között, valamint hogy a lap a halmaz által kifejtett ellenállás miatt $-x$ irányba deformálódik (0-0,4 s), majd kvázi statikusan megmarad a deformációja (0,4-0,8 s). Végül a növekvő nyomás miatt elcsúsznak egymáson a feltorlódott gömbök, és a lap előre löki őket, aminek következtében csökken a lapra ható nyomás, és ezért csökken a deformációja is (1,2 s).

Továbbá látható az is, hogy sikerült kiküszöbölni a lap hossznövekedését a szimulációban, ugyanis a lapot nem érte egy lépésben akkora terhelés, amit a végeleemes szoftver képtelen lett volna pontosan kezelni.

A 7.5. ábra mutatja a lapra ható erő változását. A kék görbe jelzi az előző század másodpercben a lapra ható erők átlagát (tényleges terhelés), a narancssárga görbe pedig az előző tized másodpercben ható erők átlagát (végeleemes számítás során figyelembe vett terhelés).



7.5. ábra: Lapra ható erő

Látható, hogy az új erő modell lecsökkenti az erő lokális oszcillációját, ami konvergencia problémákhoz vezetne, és fokozatosabbá teszi az erő változását, ugyanakkor globálisan azonos trendet követ, mint a ténylegesen ható erő.

7.4. Szimulációk kiértékelése

A szimulációk kiértékelése céljából a geometriára ható erők, és a végeleemes háló csomópontjainak deformációi minden ciklus során el lettek mentve egy-egy csv fájlba. Ezek összegzésére szintén készítettem két szoftvert.

Az erők kiértékeléséhez a szoftver irányonként összegzi az egyes ciklusok során a geometriára ható erőket, és táblázatosan összegyűjti csv fájlba mentve.

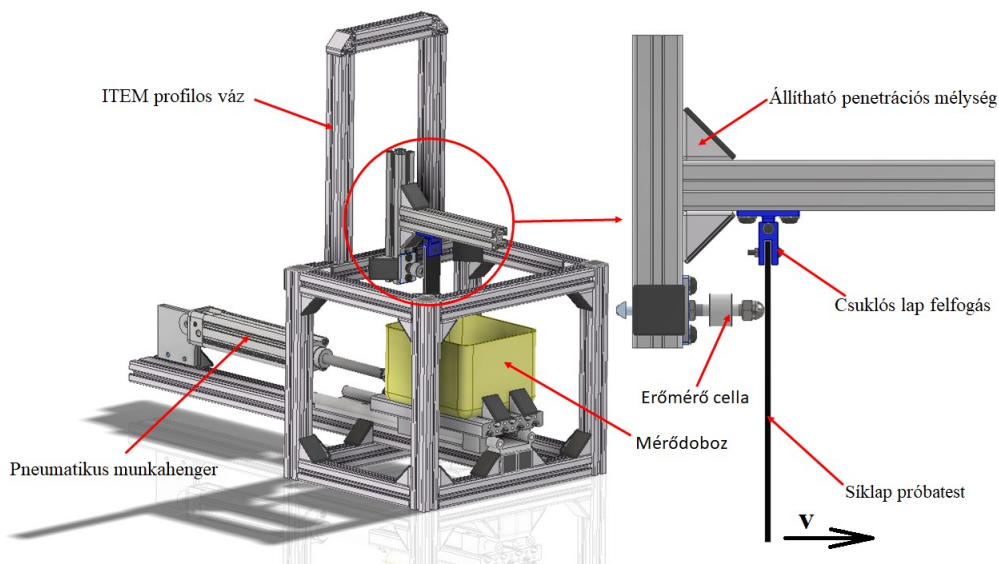
A deformációk esetén a kiértékelés már a szimuláció folyamán megtörténik, ugyanis a geometria maximális deformációja befolyásolja a diszkrét elemes szimulációt (ha meghalad egy értéket, a geometria mozgása megáll). A végeleemes háló csomópontjainak elmozdulásai kimentésre kerülnek a végeleemes szoftverből, amiket a kiértékelő szoftver beolvas, és kiválasztja a maximális elmozdulást. Ezen kívül vizsgálja még egy meghatározott helyen a geometria abszolút (kezdeti állapothoz képesti) deformációját is: Megkeresi, hogy az adott helyhez melyik csomópont van a legközelebb, és kiszámolja ennek távolságát a vizsgált helytől. Végül a háló maximális elmozdulását és a vizsgált hely abszolút elmozdulását egy csv fájlba menti. A szimulációt követően az egyes ciklusok során létrehozott csv fájlokat beolvassa a másik kiértékelő szoftver, és táblázatos formában összegyűjti szintén egy csv fájlba.

Így a szimulációt követően lehetőség van a geometriára ható erőket, és a geometria elmozdulásait elemezni, valamint diagramokat készíteni.

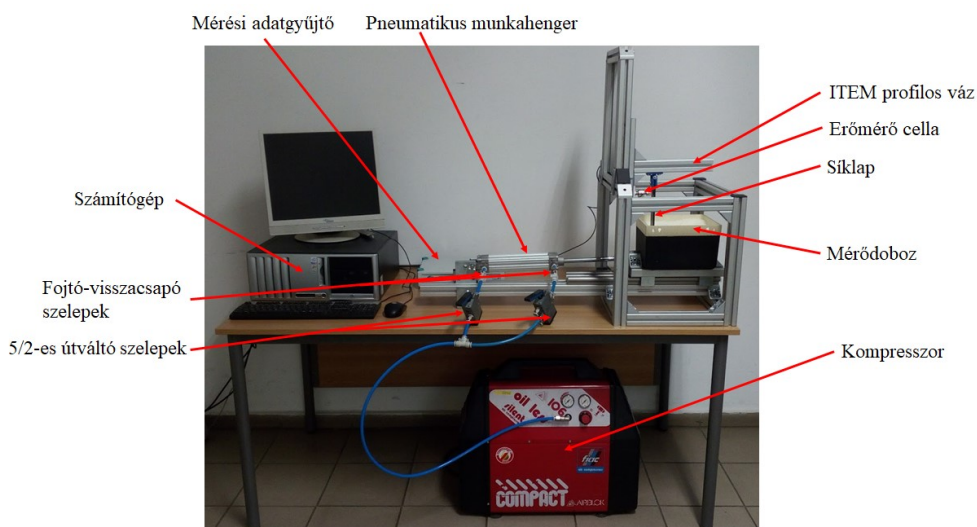
8. Mérőberendezés bemutatása

A kidolgozott kapcsolt szimulációs eljárás alkalmazhatóságának vizsgálatára készítettem egy speciális mérőberendezést, amellyel vizsgálható egy szemcsés halmazban húzott síklap deformációja és rezgése. A berendezéssel méréseket végeztem, majd összehasonlítottam az eredményeket a mérési folyamat szimulációja során adódott eredményekkel.

A mérőberendezés tervezése nem kizárólag az én érdemem, ugyanis a síklap-szemcsehalmoz kölcsönhatás vizsgálatokhoz Vajda Márk Tanár Úr kopásvizsgáló mérőberendezését alakítottam át. A meglévő ITEM profilos [38] vázszerkezetre és pneumatikus hajtásra rögzítettem a szemcsés halmazt tartalmazó dobozt, a síklap próbatestet, valamint az erőmérő cellát. A mérőberendezés CAD modelljét mutatja a 8.1. ábra, a megépült mérőberendezést pedig a 8.2. ábra mutatja.

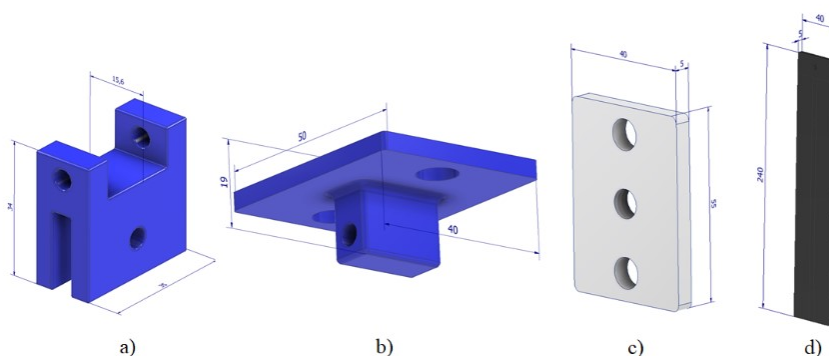


8.1. ábra: Mérőberendezés CAD modellje, v jelöli a lap mozgásának relatív sebességét a mérődobozhoz képest



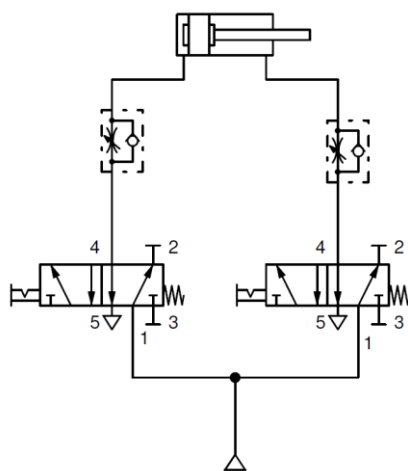
8.2. ábra: Megépült mérőberendezés

Látható, hogy a szemesés halmazt tartalmazó mérődoboz elmozdulását egy pneumatikus munkahenger vezérli, miközben a síklap próbatest csuklósan van a vázszerkezethez rögzítve. Ezt FDM technológiával nyomtatott adapter alkatrészek biztosítják. Az erőmérő cella a laptól függetlenül, egy másik adapter alkatrésszel van rögzítve a vázhoz, és egy gömbfejű anyával van a lapnak támasztva, így biztosított, hogy hajlítás és nyírás nem terheli, azaz kizárólag nyomóerőt vesz fel. Az erőmérő cella és a lap felfogását biztosító tartók függőleges helyzete egyszerűen állítható a fővázhoz képest, így tetszőlegesen változtatható a síklap mélysége a halmazban. Továbbá a két tartót a főváztól eltávolítva lehetőség van a síklap próbatest vízszintes helyzetbe állítására, így az erőmérés kalibrálható. A síklap anyaga akrilnitril-butadién-sztirol (ABS), a csuklós felfogást biztosító adapterek anyaga politejsav (PLA), az erőmérő cellát rögzítő adapter pedig alumíniumból készült. Ezeket az egyedileg tervezett és gyártott alkatrészeket mutatja a 8.3. ábra.



8.3. ábra: Egyedi tervezésű alkatrészek, a) lapot fogó alsó adapter, b) lapot fogó felső adapter, c) erőmérő cellát fogó adapter, d) síklap próbatest

A pneumatikus rendszer kapcsolási rajzát a 8.4. ábra mutatja.



8.4. ábra: Pneumatikus kapcsolás

Látható, hogy a tápot követően a levegő két 5/2-es útszelepen és két fojtó-visszacsapó szelepen halad keresztül, amíg eljut a munkahengerbe. A fojtó-visszacsapó szelepekkel szabályozható a munkahenger sebessége, az útszelepekkel pedig elindítható és megállítható a munkahenger mozgása.

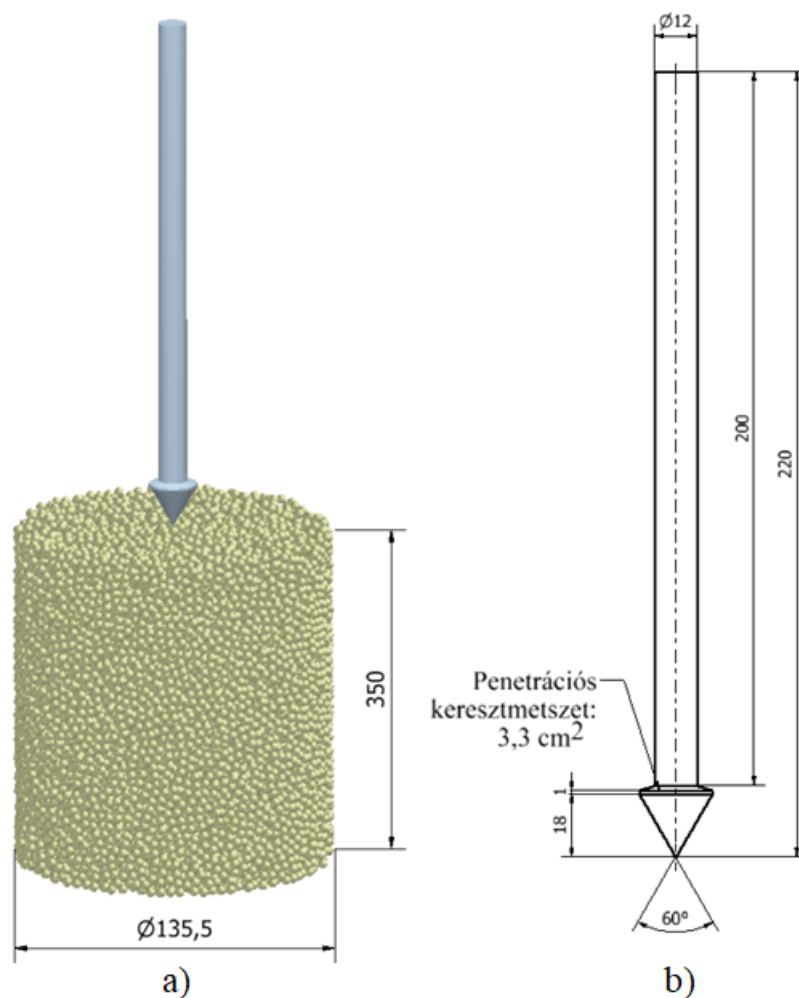
9. Szimuláció és mérés kalibrálása

9.1. Homok talaj diszkrételemes paramétereinek kalibrálása

A Kapcsolt VEM-DEM szimulációk futtatása előtt szükséges volt a vizsgált homok diszkrételemes paramétereinek meghatározása, hogy lehetőség legyen a szimuláció eredményeit a valós méréssel összehasonlítani. Ezt a homokon egy előzetesen elvégzett penetrométeres vizsgálat adatai segítségével tettem meg, amelyet az alábbiakban bemutatok.

A valós mérés és a kalibrációs szimuláció során megegyezett a penetrométer geometriája.

A kalibrációs szimulációk elrendezését, és a penetrométer geometriáját a 9.1. ábra mutatja:



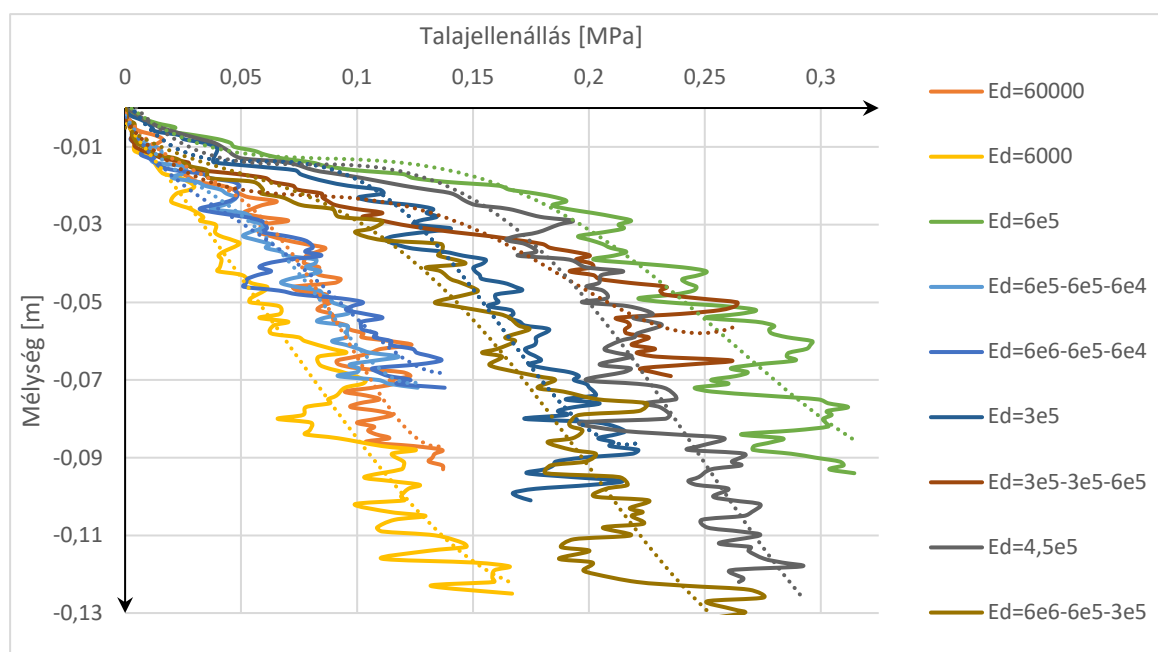
9.1. ábra: Kalibrációs szimuláció a) elrendezése, b) penetrométerének geometriája

Látható, hogy a vizsgált halmazt egy 135,5 mm átmérőjű, 350 mm magasságú hengerben elhelyezkedő, gravitációsan ülepített szemcsékkel modelleztem. A penetrométert a halmazba a szimuláció során 100 mm/s-os sebességgel süllyesztettem.

A halmaz viselkedésének modellezésére a hiszterézises rugós (hyserteic spring) alapmodellt alkalmaztam, lineáris kohéziós másodlagos modellel kiegészítve. A paramétereket változtatva

azt vizsgáltam, hogy a penetrométerre ható vertikális irányú erő hogyan változik a penetrométer halmazhoz viszonyított mélységének függvényében. A szimulációs mintavételi pontokra negyedfokú polinomot illesztettem a legkisebb négyzetek módszere segítségével, majd a polinomot kiértékeltem a valós penetrométeres mérés rögzített pontjaiban, és megvizsgáltam az átlagos és maximális eltérést a valós mérési pontok és az illesztett görbe között.

A kalibráció során megvizsgáltam a rugalmassági modulus, a folyáshatár, a merevségi tényező és az energiasűrűség hatását talajellenállás függvényre. A paraméterek közül leginkább az energiasűrűség befolyásolta a talajellenállás változását a mélységgel, ezért ennek a paraméternek a vizsgálatával hangsúlyosabban foglalkoztam. Az energiasűrűség (E_d) hatását a talajellenállás-mélység függvényre a 9.2. ábra mutatja. Láthatók a kalibrációs görbék, valamint a rájuk illesztett görbék, amelyek összehasonlításra kerültek a valós mérési görbével.



9.2. ábra: Energiasűrűség hatása a talajellenállásra

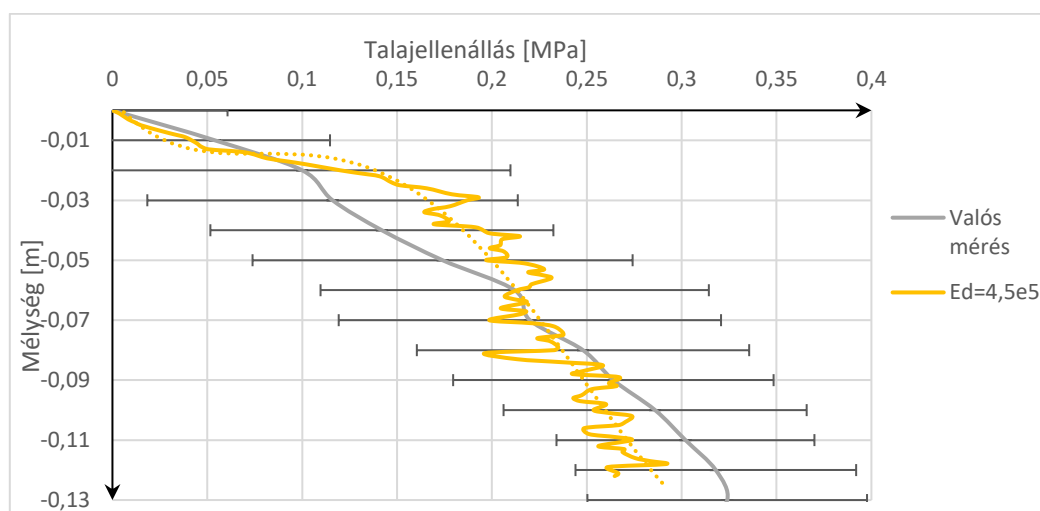
Megfigyelhető, hogy az energiasűrűség növelésével a talajellenállás intenzívebben változik a mélységgel.

A későbbi végesselemes-diszkrétselemes kapcsolt szimulációkat azokkal a paraméterekkel futtattam, amelyek mellett a szimuláció a legkisebb százalékos átlagos eltérést mutatta a valós mérési adatsorhoz képest. Ezeket a paramétereket a 9.1. táblázatban foglaltam össze:

9.1. táblázat: Homok talaj kalibrált DEM paraméterei

Anyag/anyagpár	Paraméter	Jelölés	Mennyiség	Mértékegység
Szemcse	Átlagos átmérő	d	2	mm
	Szemcseméret eloszlás	-	normál	-
	Szemcseméret szórás	σ	0,02	-
	Minimum átmérő az átlaghoz képest	d_{min}/d	0,95	-
	Maximum átmérő az átlaghoz képest	d_{max}/d	1,05	-
	Sűrűség	ρ_s	2600	kg/m ³
	Normál rugalmassági modulus	E_s	$1,11 \cdot 10^{10}$	Pa
	Nyíró rugalmassági modulus	G_s	$4,3 \cdot 10^9$	Pa
	Poisson-tényező	ν_s	0,3	-
Fal és penetrométer	Sűrűség	ρ_p	7865	kg/m ³
	Normál rugalmassági modulus	E_p	$2,05 \cdot 10^{14}$	Pa
	Nyíró rugalmassági modulus	G_p	$7,9 \cdot 10^{10}$	Pa
	Poisson-tényező	ν_p	0,3	-
Szemcse - szemcse	Ütközési tényező	e_{ss}	0,6	-
	Csúszási súrlódási tényező	μ_{ss}	0,407	-
	Tapadási súrlódási tényező	μ_{0ss}	0,57	-
	Merevségi tényező	sf	0,95	-
	Csillapítási tényező	df	0,05	-
	Folyáshatár	R_{eh}	$5,88 \cdot 10^6$	Pa
	Energia sűrűség	E_d	450000	J/m ³
Szemcse - fal és penetrométer	Ütközési tényező	e_{sp}	0,6	-
	Csúszási súrlódási tényező	μ_{sp}	0,5	-
	Tapadási súrlódási tényező	μ_{0sp}	0,05	-
Általános	Időlépés	Δt	$8 \cdot 10^{-5}$	s

A valós mérésel meghatározott görbéhez képest legkisebb eltérést mutató szimulációs görbe és a rá illesztett egyenes diagramját a 9.3. ábra mutatja:

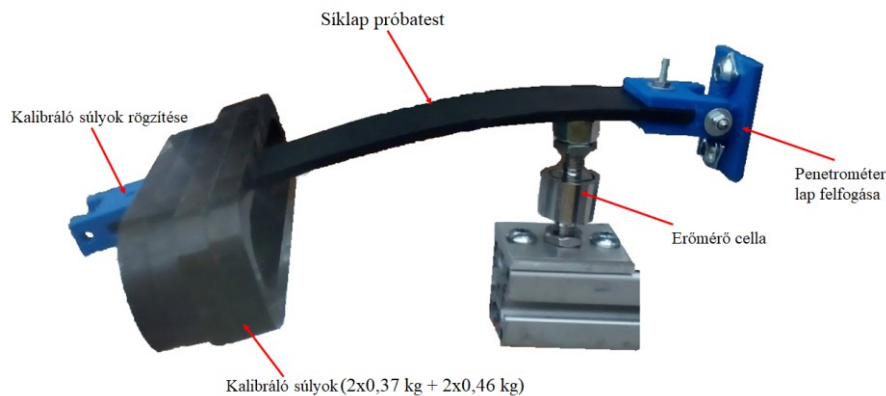


9.3. ábra: A valós mérést leginkább követő szimuláció diagramja

Látható, hogy a szimulációs görbe az összes mérési pontban a mérés szórásán belül található, tehát a kalibrált mikromechanikai paraméterek jól közelítik a valósakat. A szimulációs görbe átlagos eltérése a mért görbétől 21,53%, a maximális eltérése pedig 49,17%.

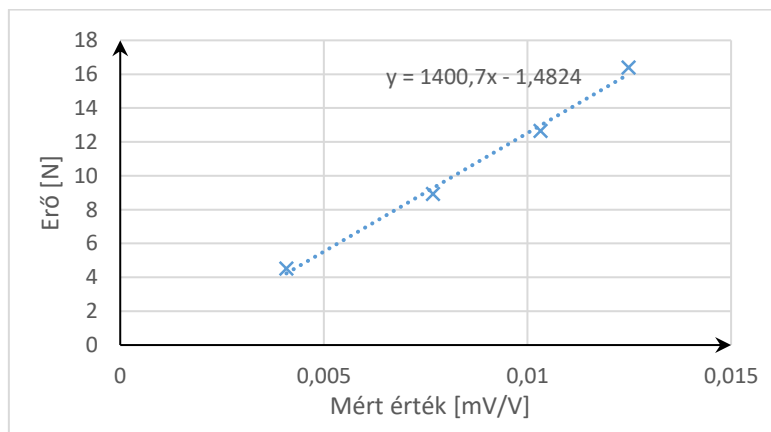
9.2. Erőmérő cella kalibrálása

Ahhoz hogy a mérések kiértékelésekor meghatározzam a síklap próbatestre ható erőt, szükség volt az erőmérő cella kalibrációjára. Ennek során az erőmérő cellát és a síklapot tartó ITEM elemek együtt leszerelésre kerültek a mérőberendezés fővázáról, és úgy lettek elhelyezve, hogy a síklap vízszintes állapotban legyen. Így lehetőség adódott különböző, ismert súlyú tömegeket elhelyezni a lap végén, ahol a mérések során a szemcsés halmazsal érintkezett, és rögzíteni az erőmérő cella által mutatott értékeket. A kalibrációs mérési elrendezést a 9.4. ábra mutatja.



9.4. ábra: Erőmérés kalibráció elrendezése

Az erőmérő cella által mutatott értékeket és a kalibrációs súlyokat diagramon ábrázoltam, és a pontpárookra egyenest illesztettem a legkisebb négyzetek módszere segítségével. Ezt mutatja a 9.5. ábra.



9.5. ábra: Erőmérés kalibrációja

Látható, hogy a mért pontok jó közelítéssel egy egyenesre esnek, azaz lineáris kapcsolat van a lapra ható erő, és az erőmérő cella által mért értékek között. Így az illesztett egyenes segítségével a későbbi mérések során átszámolhatóvá vált az erőmérő cella által mért érték a lapra ható tényleges erőre.

10. Mérési és szimulációs paraméterek

A mérőberendezéssel homok talajon és az Albis cég által gyártott akrilnitril-butadién-sztirol (ABS) polimer fröccsöntő granulátumban [39] végeztem 5-5 mérést.

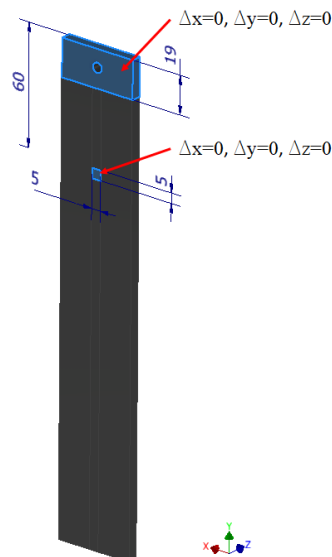
A mérés paraméterei mindkét esetben megegyeztek, ezeket az 10.1. táblázatban foglaltam össze:

10.1. táblázat: Mérések paraméterei

Megnevezés	Mennyiség	Mértékegység
Síklap és doboz relatív sebessége	16	mm/s
Síklap mélysége a halmazban	51	mm
Síklap próbatest szélessége	40	mm
Síklap próbatest vastagsága	5	mm
Síklap maximális elmozdulása	160	mm
Mérések száma	5	db

A homok talajon végzett mérést tisztán DEM és DEM-VEM kapcsolt szimulációkkal reprodukáltam azonos geometriai paraméterek alkalmazásával. A diszkrétéleemes szimulációkat során a 9.1 fejezet 9.1. táblázatában bemutatott anyagparamétereket alkalmaztam, a végeselemes szimulációkban pedig 3 GPa-ra állítottam be a síklap rugalmassági modulusát, és 0,3-ra állítottam be a Poisson-tényezőjét.

A végeselemes szimulációk során alkalmazott elmozdulás peremfeltételeket a 10.1. ábra mutatja:



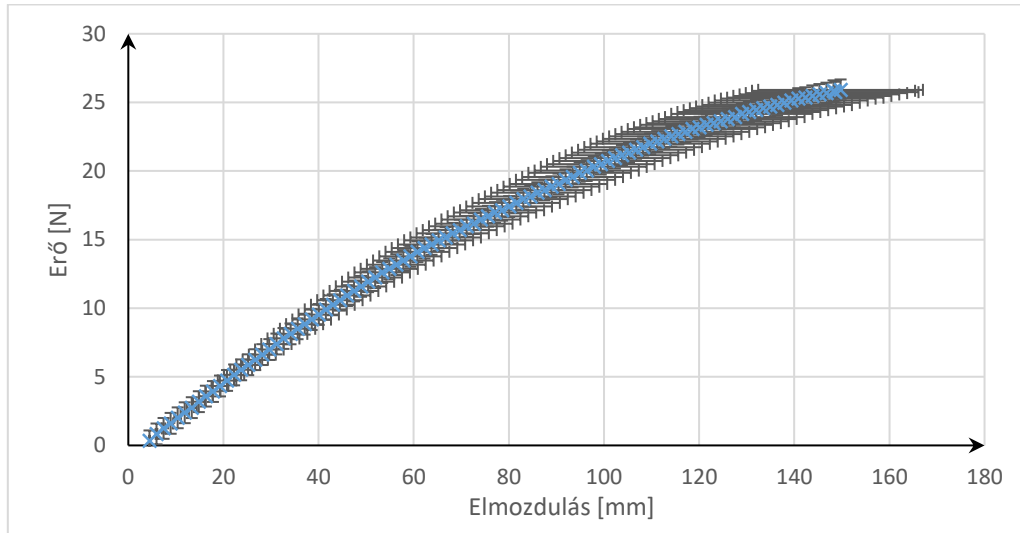
10.1. ábra: Síklap elmozdulás peremfeltételei

Látható, hogy mindhárom irányú elmozdulást meggátoltam a kékkel jelölt térfogatrészekben, azaz a lap felső felfogásánál és az erőmérő cella érintkezésének 5 mm-es környezetében.

11. Eredmények

11.1. Mérés homok talajjal

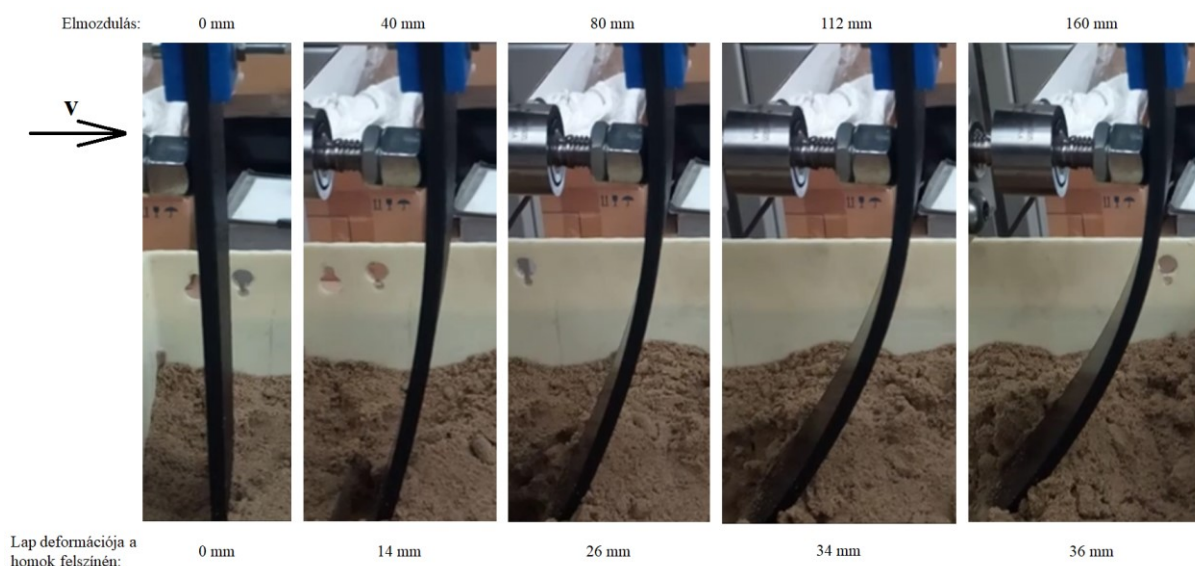
A 11.1. ábra mutatja a homok talajon végzett síklapos mérések átlagolt erő-elmozdulás görbéjét.



11.1. ábra: Homok talajon végzett síklapos mérés erő-elmozdulás diagramja

Látható, hogy a síklapra ható erő a mérés során folyamatosan nőtt, maximuma átlagosan 26 N volt. A mérések kezdetben csak kismértékben tértek el egymástól, azonban a mérés végén nagyobb volt az eredmények szórása.

A 11.2. ábra mutatja a síklap deformációját a negyedik mérés esetén különböző elmozdulások mellett.

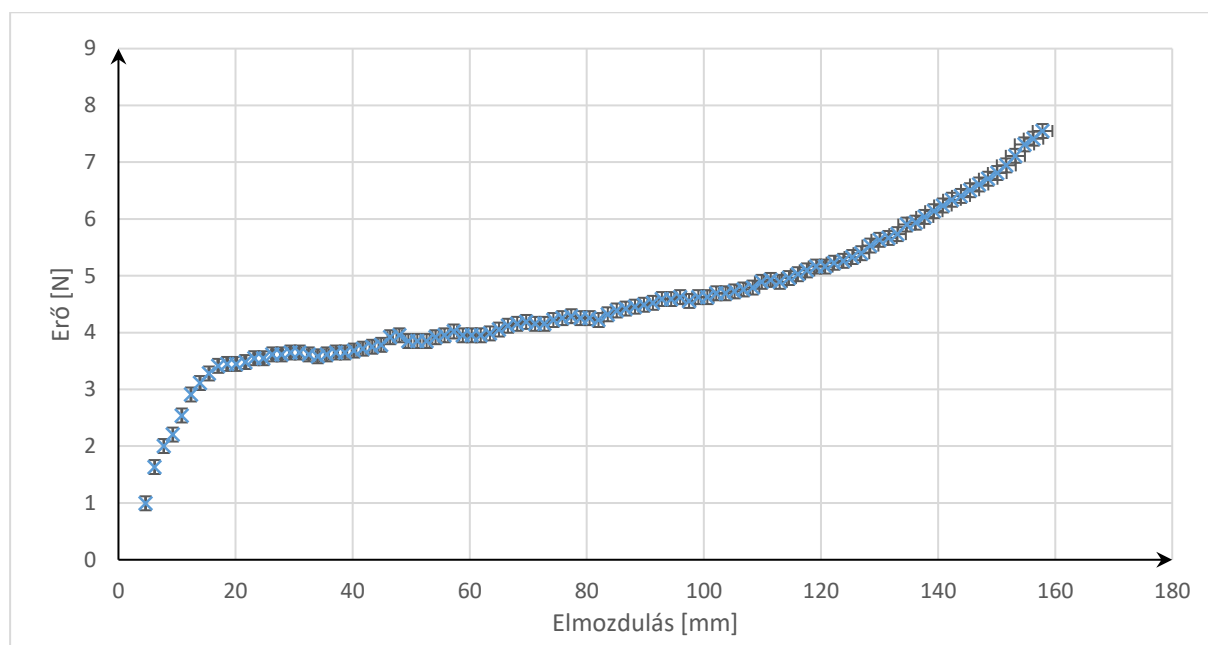


11.2. ábra: Lap deformációja a homok talajon végzett síklapos mérés során, v jelöli a síklap relatív sebességét a mérődobozhoz képest

Látható, hogy a mérés kezdetén a lap deformációja rohamosan nőtt, majd később csökkent a növekedés mértéke. A mérés végén a homok felszínén mért deformáció 36 mm volt.

11.2. Mérés ABS polimer granulátummal

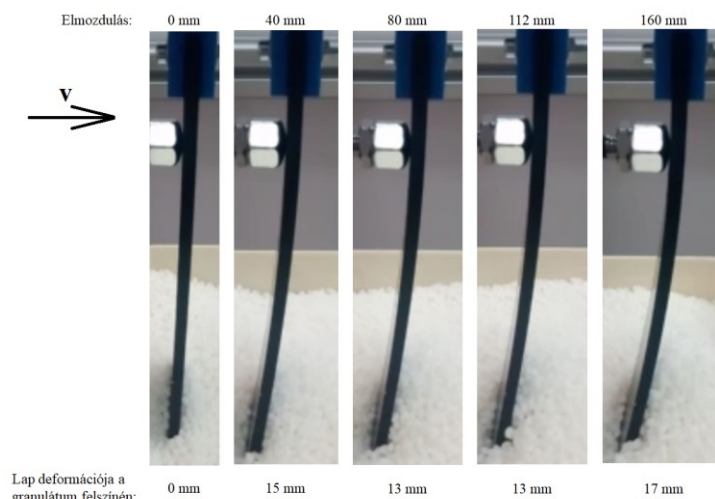
A 11.3. ábra mutatja az ABS polimer granulátumban végzett síklapos mérések átlagolt erő-elmozdulás görbáját.



11.3. ábra: ABS granulátumban végzett síklapos mérés erő-elmozdulás diagramja

Látható, hogy a síklapra ható erő a mérés során eltérő mértékben nőtt: A mérés kezdetén nagy volt a növekedés mértéke, majd az erő közel azonos értéken maradt, végül pedig újra nőni kezdett. Ez utóbbi jelenség a mérődoboz falának köszönhető, ugyanis a mérés végén egyre közelebb került a lap a doboz falához, így a szemcsék feltorlódtak előtte, ami miatt megnőtt a rá ható erő. Az erő maximuma átlagosan 7,5 N volt.

A 11.4. ábra mutatja a síklap deformációját az ötödik mérés esetén különböző elmozdulások mellett. Látható, hogy a lap deformációja a rá ható erővel arányos.

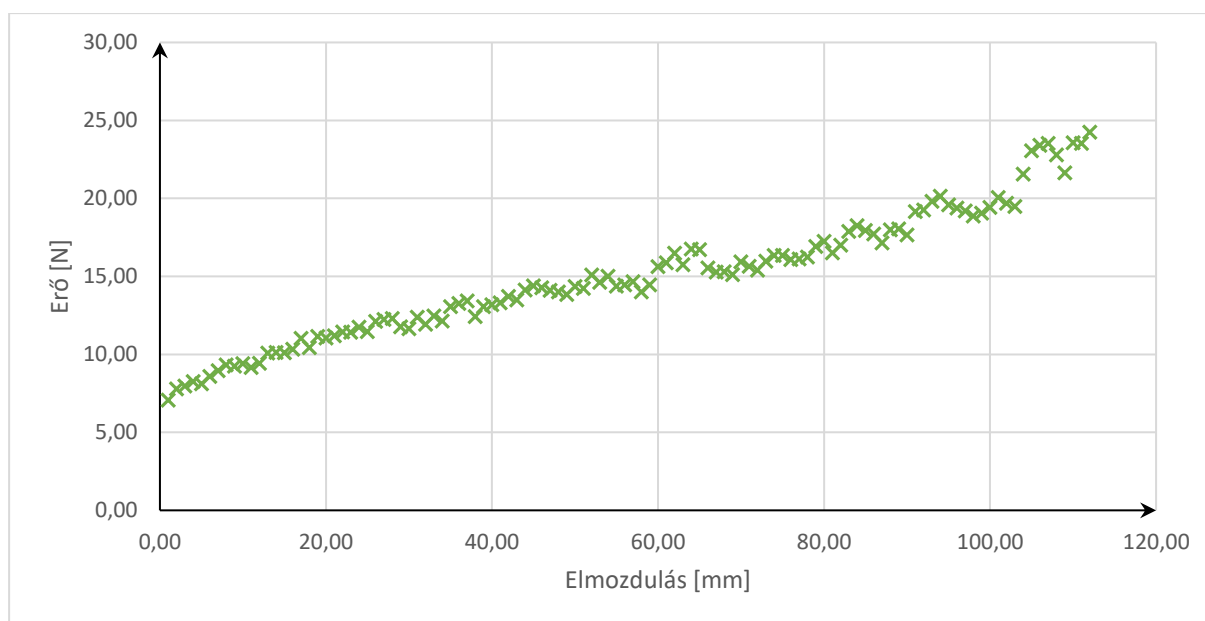


11.4. ábra: Lap deformációja ABS granulátumban végzett síklapos mérés során, v jelöli a síklap relatív sebességét a mérődobozhoz képest

11.3. DEM szimuláció

A diszkrétéleemes szimulációt a 10. fejezetben ismertetett paraméterekkel futtattam.

A tisztán diszkrétéleemes szimuláció erő-elmozdulás diagramját a 11.5. ábra mutatja:



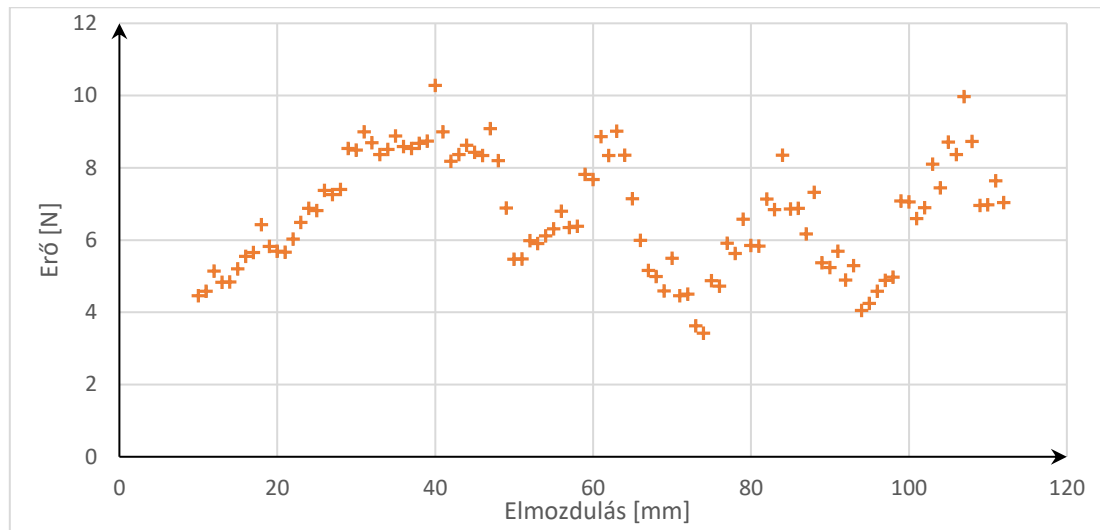
11.5. ábra: DEM szimuláció erő-elmozdulás diagramja

Látható, hogy az erő nem a nulla értékről indul, hiszen a síklapot már kezdetben is terhelik az azt körülvevő szemcsék. A kezdeti terheléshez képest az erő közel a 3,5-szeresére, 24,25 N-ra nő a szimuláció végére, amikor a síklap elmozdulása 112 mm. Továbbá némi ingadozás megfigyelhető a terhelésben, ami a szimuláció diszkrét voltával magyarázható, ugyanis a síklapot jóval kevesebb szemcse terheli a szimulációban, mint a valós mérés során, ami miatt a szimulációban egy-egy szemcse érintkezésbe lépése vagy érintkezésének megszűnése nagyobb terhelésváltozást okoz, mint a valós mérés esetén.

11.4. DEM-VEM szimuláció

A diszkrétéleemes-végeleemes szimulációt a 10. fejezetben ismertetett paraméterekkel futtattam.

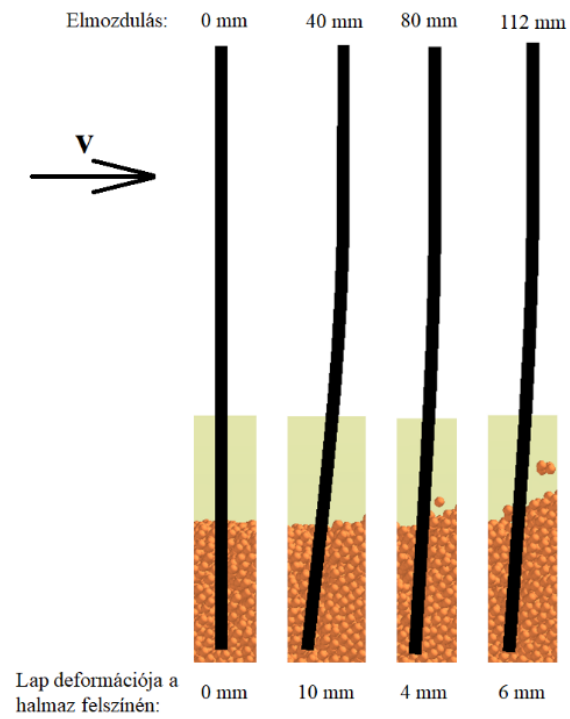
A diszkrétéleemes-végeleemes kapcsolt szimuláció erő-elmozdulás diagramját a 11.6. ábra mutatja:



11.6. ábra: DEM-VEM szimuláció erő-elmozdulás diagramja

Látható, hogy kezdetben (körülbelül 40 mm elmozdulásig) az erő a mérésekhez és a tisztán diszkrétéleemes szimulációhoz hasonlóan nőtt, viszont ezt követően ciklikusan ingadozni kezdett. Ez avval magyarázható, hogy amikor egy időlépésben nagy erő többlet adódott a lapra, az akkora deformációt szenvedett hátrafelé, hogy megszakadt a kapcsolata az előtte lévő szemcsék és közöttte, így az erő csökkenni kezdett. Majd amikor a lap újra érintkezésbe lépett a szemcsehalommal, a folyamat kezdődött előlről.

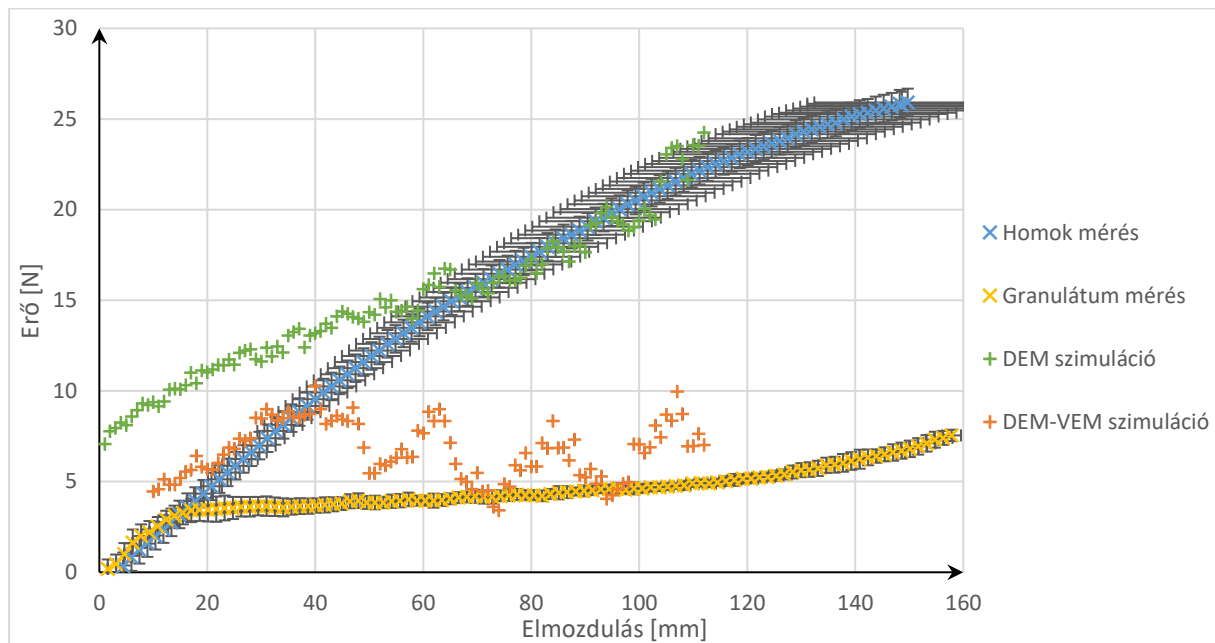
A 11.7. ábra mutatja a síklap deformációját a kapcsolt DEM-VEM szimuláció esetén különböző elmozdulások mellett. Látható, hogy a lap deformációja 40 mm-es elmozdulás esetén volt maximális, ezt követően nagyjából 5 mm körül ingadozott.



11.7. ábra: Lap deformációja a DEM-VEM szimuláció során, v jelöli a síklap relatív sebességét a mérődobozhoz képest

12. Szimulációk és mérések összehasonlítása

A mérési és szimulációs erő-elmozdulás diagramokat a 12.1. ábra foglalja össze:

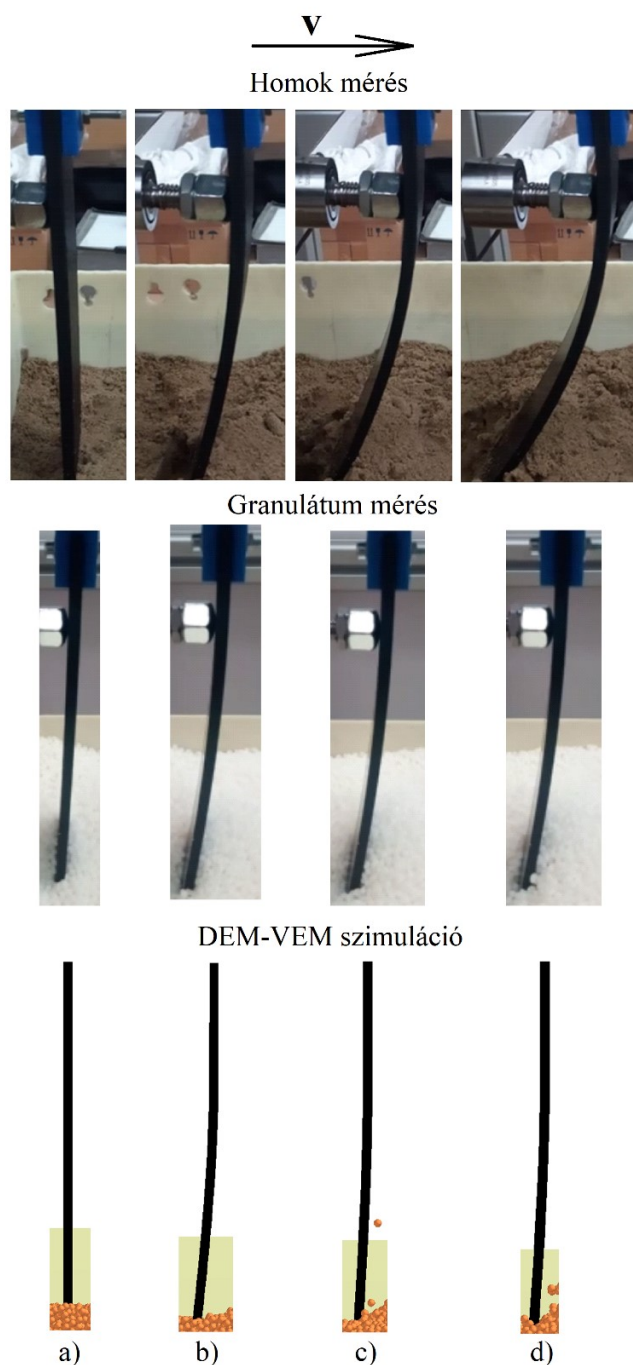


12.1. ábra: Mérési és szimulációs diagramok

Látható, hogy az összes adatsor esetén azonos nagyságrendbe estek az erők, valamint, hogy az ABS granulátum esetén adódtak a legkisebb erők. Mivel a diszkrét elemes szimulációk során az anyagparaméterek a homok mikromechanikai paramétereire alapozva lettek beállítva, így a szimulációs erők a homok talajon végzett mérés során adódó erőkhöz estek közelebb. Azonban a DEM-VEM kapcsolt szimulációt jellegre jobban közelítette a granulátumon végzett mérés, ahol az erő a kezdeti növekedés után nagyjából állandó értéken maradt, és csak a mérés végén kezdett újra nőni, amikor a mérődoboz falának közelébe ért. Továbbá kisebb mértékben ugyan, de a DEM-VEM kapcsolt szimulációhoz hasonlóan a granulátumon végzett mérések esetén is megfigyelhető volt az erő ingadozása.

A homok talajon végzett mérést kezdetben, az első 40 mm-en jobban közelítette a DEM-VEM szimuláció, 60 és 112 mm elmozdulás között pedig a tisztán DEM szimuláció esett közelebb a mérési pontokhoz. Ez avval magyarázható, hogy a síklap kezdeti deformációja nagy hatással volt az erőkre. A hátrahajló lap esetén a szemcséknek több helyük volt, mint a merev lap esetén, így kisebb nyomást fejtettek ki a lapra, mintha az merev lenne. Ez a hatás jól modellezhető volt a kapcsolt szimuláció segítségével. A mérés kezdeti részét követően a lap deformációja nem nőtt jelentősen, így kisebb hatással volt az ébredő erőkre. Ezért ekkor a tisztán DEM szimuláció, amely a lapot merev testként kezelte, jobban közelítette az erőket.

A 12.2. ábra mutatja a síklap deformációját különböző elmozdulások mellett a mérések és szimulációk esetén.



12.2. ábra: Lap deformációja a mérések és a DEM-VEM szimuláció során, Lap elmozdulása: a) 0 mm, b) 40 mm, c) 80 mm, d) 112 mm, v jelöli a síklap relatív sebességét a mérődobozhoz képest

Látható, hogy a lap deformációja a homok talajon végzett mérés esetén volt a legnagyobb. Az ABS granulátumon végzett mérés esetén is nagyobb volt (nagyjából kétszer akkora) a deformáció, mint a DEM-VEM szimuláció során. A két esetben tehát nagyságra nem, viszont jellegre megegyezett a deformáció alakulása: Mind a DEM-VEM szimuláció, mind a granulátumon végzett mérés esetén 40 mm-es elmozduláskor volt a lap deformációja maximális, melyet követően a deformáció beállt egy kisebb, állandó értéktartományba.

13. Összefoglalás

Tudományos diákköri dolgozatomban során a diszkrételes-végeselemes két utas kapcsolt szimulációk témakörével foglalkoztam.

Munkámat egy áttekintő irodalomkutatással kezdtem, melynek során utánanéztem a közelmúltban született kapcsolt numerikus szimulációs folyóiratcikkeknek, valamint a talajművelés diszkrételes szimulációval történő modellezésének. Ezután ismertettem a végeselemes módszer és diszkrételes módszer elméletét, melynek során kitértem az általánosan alkalmazott anyagmodellekre.

Ezt követően egy kétutas diszkrételes-végeselemes kapcsolt szimulációs eljárás fejlesztésébe kezdtem, melynek alkalmazásával egyszerre modellezhető szemcsés halmazok viselkedése, és a velük kapcsolatban lévő szilárd testek deformációja. Ezáltal vizsgálhatóak például passzív rezgésű talajművelő szerszámok a talaj-szerszám kölcsönhatás figyelembevételével. A szimulációs ciklust a diszkrételes számításból, a végeselemes preprocessálásból, a csomóponti erő és megfogás peremfeltételek számításából, a végeselemes megoldásból, valamint a deformált geometria konvertálásából és kezeléséből építettem fel. A folyamatot RPA szoftver segítségével automatizáltam.

A kifejlesztett eljárás teszteléséhez terveztem, és részben átalakítottam, részben megépítettem egy mérőberendezést, amellyel vizsgálhatóvá vált egy talajban horizontálisan húzott síklap próbatest deformációja és rezgése, valamint a rá ható terhelés.

A mérőberendezés erő mérését ismert tömegű súlyokkal, vízszintes helyzetben kalibráltam, majd méréseket végeztem homok talajon, és ABS polimer granulátumon, melyek során rögzítettem a síklapra ható erők értékét, és a lap deformációját.

Egy korábbi vertikális penetrométeres mérés segítségével kalibráltam a diszkrételes modell anyag paramétereit, és azonos geometriai paraméterek mellett tisztán DEM és DEM-VEM szimuláció alkalmazásával reprodukáltam a mérőberendezéssel végzett méréseket.

Végül összehasonlítottam a mérési és szimulációs eredményeket. Megállapítottam, hogy a síklapra ható erők a mérések és szimulációk esetén azonos nagyságrendbe estek, valamint hogy kis elmozdulások esetén a kapcsolt DEM-VEM szimuláció, nagyobb elmozdulások esetén pedig a tisztán DEM szimuláció adott pontosabb eredményeket a homok talajon végzett mérésekre. A síklap deformációja a homokon végzett mérés esetén volt a legnagyobb, melyet az ABS granulátumos mérés esetén kapott deformáció követett. A DEM-VEM szimuláció esetén ugyan kisebb volt a lap deformációja, azonban hasonló jelleget mutatott, mint az ABS

granulátumos mérés esetén: A kezdeti nagyobb deformációt követően beállt egy kisebb értéktartományba.

Összefoglalva tehát munkám során:

1. Áttekintettem a közelmúltban született szakirodalmat a kapcsolt numerikus szimulációk témakörében.
2. Áttekintettem a szakirodalmat a rezgő talajművelő szerszámok témakörében.
3. Egy kétutas kapcsolt végeselemes-diszkrételemes eljárás fejlesztésével foglalkoztam, amely:
 - 3.1. Univerzálisan alkalmazható szemcsés anyagokat kezelő szerszámok, alkatrészek, berendezések és a szemcsés anyagok közötti kölcsönhatások modellezésére, ezáltal elősegítve mind a szemcsés anyagok, mind az őket kezelő berendezések tervezését.
 - 3.2. Alkalmazható a passzívan rezgetett talajművelő szerszámok és a talaj közötti kölcsönhatás modellezésére, beleértve a szerszámok rezgését, amely csökkenti a vonóerő igényt, és ez által energiamegtakarításhoz vezet.
 - 3.3. Kereskedelmi szoftverek alkalmazásával teszi lehetővé a numerikus módszerek összekapcsolását, így lehetőséget hagyva a későbbiekben a módszer ipari alkalmazására.
4. Terveztem és részben átalakítottam, részben megépítettem egy mérőberendezést, amely lehetővé teszi a talaj-szerszám kapcsolat vizsgálatát egy egyszerűsített kismintás modellen, és biztosítja a szerszám modelljére ható erők és a szerszámmodell deformációjának és rezgésének mérését.
5. Méréseket végeztem a tervezett mérőberendezéssel.
6. Talajművelő szerszám talajban való haladását és rezgését modellező szimulációkat készítettem a mérési elrendezéssel azonos geometriával és kinematikával a fejlesztés alatt álló kapcsolt numerikus eljárás és tisztán diszkrételemes szimuláció alkalmazásával.
7. Összehasonlítottam a szimulációs és mérési eredményeket, és javaslatot tettem a fejlesztett eljárás javítására és optimalizálására.

14. Tervek a jövőre

A kapcsolt szimulációk témakörében végzett kutatásomat a Tudományos Diákköri Konferenciát követően is folytatni szeretném.

Egyrészt a megépített mérőberendezés segítségével további, különböző geometriai és anyag paraméterek melletti mérések végzésére lenne lehetőség, amelyek összevethetők lennének az azonos paraméterekkel készített két utas kapcsolt szimulációkkal. A szimulációs paraméterek optimális beállításával nagyobb egyezéseket lehetne elérni, így akár lehetőség adódna a kifejlesztett eljárás validására is.

Másrészt a kifejlesztett eljárás időigényét is csökkenteni lehetne a szimulációs ciklus automatizálásának továbbfejlesztésével.

Harmadrészt pedig a jövőben akár saját fejlesztésű szoftver is készülhetne, amely képes lenne elvégezni mind a diszkrétéleemes, mind a végeleemes szimulációt, aminek köszönhetően jelentősen lerövidülne az eljárás időigénye, ugyanis nem lenne szükség különböző szoftverek közötti kapcsolattartásra, és az adatok szoftverek közötti konvertálására.

Negyedrész pedig a végeleemes és diszkrétéleemes eljárások mellett bevonhatóak lennének egyéb numerikus eljárások is a kapcsolt szimulációba. Például áramlástani (CFD) szimulációval lehetőség adódna szilárd szemcsék áramlásának vizsgálatára folyadékokban és gázokban, merev test dinamikai szimulációk (MBD) segítségével pedig modellezhetők lennének a szemcsés anyagok mellett a szilárd testekre ható erők következtében a szilárd testek mozgásállapot változásai is.

15. Hivatkozás

- [1] X. Besseron, A. Rousset, A. Peyraut, és B. Peters, „6-way coupling of DEM+CFD+FEM with preCICE”, febr. 2020, Elérés: máj. 16, 2021. [Online]. Elérhető: <https://orbilu.uni.lu/handle/10993/41617>
- [2] I. Keppler, Z. Hudoba, I. Oldal, A. Csatar, és L. Fenyvesi, „Discrete element modeling of vibrating tillage tools”, *Engineering Computations*, köt. 32, sz. 2, o. 308–328, 0 2015, doi: 10.1108/EC-10-2013-0257.
- [3] G. Rao és H. Chaudhary, „A review on effect of vibration in tillage application”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, köt. 377, o. 012030, jún. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/377/1/012030.
- [4] S. Ji és S. Liang, „DEM-FEM-MBD coupling analysis of landing process of lunar lander considering landing mode and buffering mechanism”, *Advances in Space Research*, köt. 68, sz. 3, o. 1627–1643, 0 2021, doi: 10.1016/j.asr.2021.03.034.
- [5] „Csang-o-4”, *Wikipédia*. aug. 03, 2021. Elérés: aug. 24, 2021. [Online]. Elérhető: <https://hu.wikipedia.org/w/index.php?title=Csang-o%E2%80%934&oldid=24090532>
- [6] „preCICE workshop 2020 | preCICE - The Coupling Library”. <https://precice.org/precice-workshop-2020.html#undefined> (elérés aug. 24, 2021).
- [7] „LuXDEM - Luxembourg XDEM Research Centre”. <https://luxdem.uni.lu/> (elérés máj. 16, 2021).
- [8] „The deal.II Finite Element Library”. <https://www.dealii.org/> (elérés aug. 24, 2021).
- [9] „OpenFOAM”. <https://www.openfoam.com/> (elérés aug. 24, 2021).
- [10] J. Mak, Y. Chen, és M. A. Sadek, „Determining parameters of a discrete element model for soil–tool interaction”, *Soil and Tillage Research*, köt. 118, o. 117–122, 0 2012, doi: 10.1016/j.still.2011.10.019.
- [11] A. R. Reece, „Paper 2: The Fundamental Equation of Earth-Moving Mechanics”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, köt. 179, sz. 6, o. 16–22, jún. 1964, doi: 10.1243/PIME_CONF_1964_179_134_02.
- [12] Kotroc K., „Talaj diszkrét elemes modellezése talaj-kerék kölcsönhatásának elemzéséhez”, *Discrete element modelling of soil to analyse the soil-wheel interaction*, 2019, Elérés: aug. 25, 2021. [Online]. Elérhető: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/13131>
- [13] P. Tamás, A. Bojtos, A. Décsei-Paróczy, és R. T. Fekete, „Végeselem módszerek”, *Budapest, BME MOGI* http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/vegeselem_modszerek/book.html, 2014.
- [14] A. Hrennikoff, „Solution of Problems of Elasticity by the Framework Method”, *Journal of Applied Mechanics*, köt. 8, sz. 4, o. A169–A175, 0 1941, doi: 10.1115/1.4009129.
- [15] R. Courant, „Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations”, *Lecture notes in pure and applied mathematics*, o. 1–1, 1943.
- [16] „Thermal analyses | FEM, FEA | LKE”. <https://www.lke-eng.com/lke-fea-engineering/thermal-analyses/> (elérés szept. 06, 2021).
- [17] „Finite Element Analysis - Structural Analysis (Finite Element Analysis / FEA) Service Provider from Chennai”, *IndiaMART.com*. <https://www.indiamart.com/udvavisk-technologies/> (elérés szept. 06, 2021).

- [18] B. Katalin, „A diszkrét elemek módszere”, *BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék*, 2007.
- [19] P. A. Cundall és O. D. L. Strack, „A discrete numerical model for granular assemblies”, *Géotechnique*, 1979, doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47.
- [20] Á. Kovács, „Modelling of maize plant by the discrete element method”, *Kukorica növény feldolgozásának modellezése diszkrét elem módszerrel*, 2019, Elérés: szept. 01, 2021. [Online]. Elérhető: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/13329>
- [21] K. Tamás, I. J. Jóri, és A. M. Mouazen, „Modelling soil–sweep interaction with discrete element method”, *Soil and Tillage Research*, köt. 134, o. 223–231, 0 2013, doi: 10.1016/j.still.2013.09.001.
- [22] Á. Orosz, V. Angelidakis, és K. Bagi, „Surface orientation tensor to predict preferred contact orientation and characterise the form of individual particles”, *Powder Technology*, köt. 394, o. 312–325, 0 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.08.054.
- [23] N. Bićanić, C. Stirling, és C. J. Pearce, „Discontinuous modelling of masonry bridges”, *Computational Mechanics*, köt. 31, sz. 1, o. 60–68, máj. 2003, doi: 10.1007/s00466-002-0393-0.
- [24] M. Rackl, F. Top, C. Molhoek, és D. Schott, „Feeding system for wood chips: A DEM study to improve equipment performance”, *Biomass and Bioenergy*, köt. 98, o. 43–52, márc. 2017, doi: 10.1016/j.biombioe.2017.01.003.
- [25] H. HERTZ, „On the contact of elastic solids”, *Z. Reine Angew. Mathematik*, köt. 92, o. 156–171, 1881.
- [26] R. D. Mindlin, „Compliance of Elastic Bodies in Contact”, *Journal of Applied Mechanics*, köt. 16, sz. 3, o. 259–268, 1949, doi: 10.1115/1.4009973.
- [27] „Course: EDEM Contact Models eLearning, Section: Base Models”. <https://learn.altair.com/course/view.php?id=148§ion=2> (elérés szept. 03, 2021).
- [28] O. R. Walton és R. L. Braun, „Stress calculations for assemblies of inelastic speres in uniform shear | SpringerLink”, 1986. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01182541> (elérés szept. 03, 2021).
- [29] O. Walton, „Elastic-plastic contact model. Company Report”, *DEM Solutions*, 2006.
- [30] D. O. Potyondy és P. A. Cundall, „A bonded-particle model for rock”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, köt. 41, sz. 8, o. 1329–1364, 0 2004, doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.011.
- [31] S. I. Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Jussu Societatis Regiae ac typis Josephi Streater, prostant venales apud Sam. Smith, 1687.
- [32] „Discrete Element Modeling - DEM Software | Altair EDEM”. <https://www.altair.com/edem/> (elérés szept. 11, 2021).
- [33] „Ansys | Engineering Simulation Software”. <https://www.ansys.com/> (elérés máj. 11, 2021).
- [34] „3D CAD Design Software | SOLIDWORKS”. <https://www.solidworks.com/home-page-2021> (elérés szept. 11, 2021).
- [35] P. Cignoni, M. Callieri, M. Corsini, M. Dellepiane, F. Ganovelli, és G. Ranzuglia, „MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool”, *Eurographics Italian Chapter Conference*, o. 8 pages, 2008, doi: 10.2312/LOCALCHAPTEREVENTS/ITALCHAP/ITALIANCHAPCONF2008/129-136.

- [36] „Power Automate | Microsoft Power Platform”. <https://powerautomate.microsoft.com/hu-hu/> (elérés szept. 11, 2021).
- [37] Á. Orosz, K. Tamás, J. Radics, és P. T. Zwierczyk, „Coupling Finite And Discrete Element Methods Using An Open Source And A Commercial Software”, máj. 2018, o. 399–404. doi: 10.7148/2018-0399.
- [38] „item International”. <https://www.item24.com/> (elérés okt. 23, 2021).
- [39] „Material Data Center | Datasheet Terluran® GP-35”. <https://www.materialdatacenter.com/ms/en/Terluran/BASF+SE/Terluran%C2%AE+GP-35/d4a7a7cd/367> (elérés nov. 02, 2021).
- [40] „Export The Deformed Geometry Shape from an Ansys Model”, *SimuTech Group*, dec. 11, 2020. <https://simutechgroup.com/export-the-deformed-geometry-shape-from-an-ansys-model/> (elérés nov. 02, 2021).
- [41] „Bosch Rexroth. WE MOVE. YOU WIN.”, *Bosch Rexroth Magyarország*. <https://www.boschrexroth.com/hu/hu/> (elérés okt. 25, 2020).
- [42] Brand, „Fiac Fiac”. <https://web.fiac.it/en> (elérés nov. 02, 2021).
- [43] „Test & Measurement | Load Cell | Transducer | Strain Gage”, *HBM*, okt. 19, 2021. <https://www.hbm.com/en/> (elérés nov. 02, 2021).