

TDK dolgozat

Mezőgazdasági gépek talajkapcsolatának szimulációja SPH módszerrel



Szerző:

Urbán Márton

Mechatronikai mérnök BSc
IV. évfolyam

Konzulensek:

Dr. Kerényi György

Dr. Molnár László

2011. november 9.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Tervezési és szimulációs módszerek.....	4
2.1. Analitikus módszerek.....	4
2.1.1. Mohr-Coulumb modell és a földmozgás általános differenciálegyenlete	4
2.1.2. Hettiaratchi és Reece 1965	6
2.1.3. McKeys és Ali 1977	7
2.2. Lagrange módszerek és a VCCT.....	8
2.3. Diszkrét elemes módszer - DEM	10
3. Smooth Particle Hydrodynamics.....	13
3.1. Az SPH alapjai	13
3.2. Az SPH mozgásegyenlete	14
3.3. ANSYS AUTODYN v.12.....	14
4. Mezőgazdasági talajra használt anyagmodellek	17
4.1. Drucker – Prager anyagmodell.....	17
4.2. Cap modell	18
4.3. Módosított Drucker-Prager modell	19
4.4. Felhasznált modellek bemeneti értékei	19
4.4.1. Lineáris D-P.....	19
4.4.2. Kohézió mentes talajok.....	20
4.4.3. Módosított D-P modellek	20
5. Eredmények.....	22
5.1. Síkbeli ék és a talaj kapcsolatának szimulációja	22
5.1.1. Alapbeállítások.....	22
5.1.2. Analitikus számítások	23
5.1.3. Szimulációs eredmények.....	24
5.2. Kultivátor húzóerejének analízise	29
5.2.1. Alapbeállítások.....	29
5.2.2. Analitikus számítás	30
5.2.3. Szimulációs eredmények.....	31
5.3. Erdészeti talajlazító és a föld kapcsolatának vizsgálata	34
5.3.1. Alapbeállítások.....	34
5.3.2. Analitikus számítások	34
5.3.3. Szimulációs eredmények.....	35
6. Összefoglaló	37
7. Felhasznált irodalom	39
8. Függelék.....	40
8.1. Hettiaratchi és Reece féle egyenlethez.....	40
8.2. McKyes és Ali féle egyenlethez.....	44

1. Bevezetés

Napjainkban a számítógépek számítási kapacitásának rohamos növekedésével egyre jelentősebb szerepet kap a mérnöki tevékenység során a különféle véges elemes szimulációkkal támogatott tervezés. Ezek a modellek az algoritmusok fejlődésének köszönhetően ma már bonyolultabb esetekben is egészen jól közelítik a valóságot, és így fontos eszközei a mérnöki munkának.

Dolgozatom célja ezeknek az új technológiáknak a kiaknázása a mezőgazdasági géptervezésben, vagyis egy olyan igényes módszer kidolgozása, amellyel elsősorban nagy pontossággal képesek vagyunk előre jelezni a szerszám, és a talaj kapcsolatát, együttes viselkedését. Másodsorban pedig megoldható különböző geometriájú szerszámok hatékonysági szempontból történő összehasonlítása, amely a valóságban is egy nehezen kivitelezhető feladat.

A probléma megoldása közben úgy találtam, hogy a föld szilárdságtani tulajdonságait legjobban a már ismert Drucker-Prager anyagmodell segítségével írhatom le. Ennek felépítéséhez a BME Geológiai Tanszékének mérési eredményeit használtam fel. Mivel a folyamat egy döntően tranziens jelenség, amely közben nagy erőhatások, illetve elmozdulások, nyúlások léphetnek fel, amely jelenségeket a hagyományos VEM módszerek nem tudnak kezelni, egy kevésbé elterjedt explicit dinamikai megoldót használtam a szimulációim során. Ez az SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) néven ismert háló nélküli módszer, amely az anyagokat különálló elemek sokaságaként modellezi, amelyek tömege az elem középpontjában van elhelyezve. Ezek a részecskék gyakorlatilag szabadon mozgó integrálási pontok, amelyeket egymással a távolság alapján interpolációs függvények kötnek össze. Az SPH szimulációk nagy előnye, hogy a testek jelentős deformációkon eshetnek át, széttöredezhetnek, egymással elkeveredhetnek, anélkül, hogy ez a futást érdemben veszélyeztetné.

Egy ilyen sikeres, a valóságot többé, kevésbé hűen tükröző vizsgálati módszer kidolgozása jelentős előrelépés lehet a mezőgazdasági szerszámtervezésben. A prototípusok előállítására, továbbá a kísérletekre (földtani vizsgálatok, erőmérések...stb.) szánt rengeteg idő, és anyagi forrás részben, egészében megspórolható. A végső fázisba érkező, a valóságban is kipróbált szerszámok száma nagymértékben csökkenthető ennek a segítségével.

Habár az SPH módszer egy egyre szélesebb körben használt eszköz, de eddig mezőgazdasági jellegű földtani szimulációk esetén történő felhasználása nem ismert. Céлом annak feltárása, hogy napjainkban milyen modellezési eszközök állnak rendelkezésre ebben a témakörben, és annak megvizsgálása, hogy az SPH jelenthet-e a jövőben egy új alternatívát ezeknek a kiváltására.

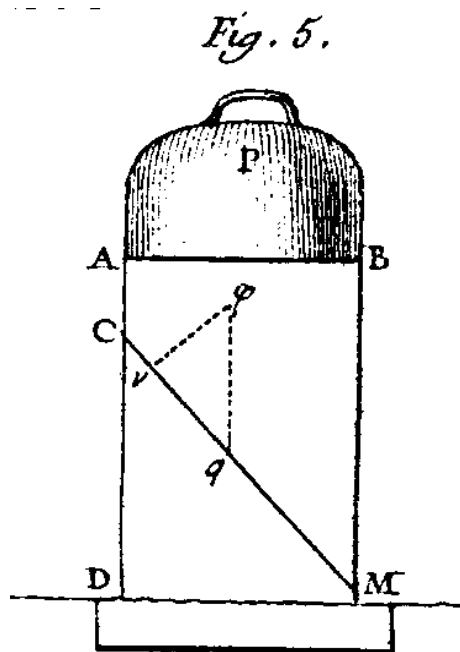
2. Tervezési és szimulációs módszerek

Ebben a fejezetben a talaj, és a talajművelő szerszám kapcsolatának elemzésére, a vonóerő meghatározására használt analitikus, és numerikus számítási módokat foglalom össze, valamint a jelenleg ismert szimulációs eljárásokat ismertetem a dolgozat terjedelmére való tekintettel a teljesség igénye nélkül.

2.1. Analitikus módszerek

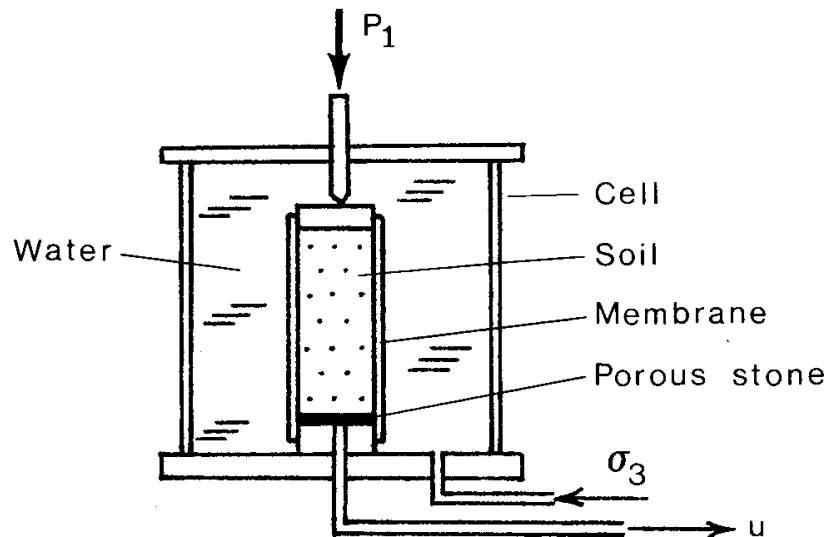
2.1.1. Mohr-Coulomb modell és a földmozgás általános differenciálegyenlete

A talaj anyagtulajdonságaival, és a talajmechanikával kapcsolatos ismereteink alapjait Coulomb (1776) munkássága alapozta meg. Különböző vizsgálatokat végzett, ahol a felhasznált talajmintákat nyírókísérleteknek vetette alá. Ennek lényege, hogy veszünk egy mintát, amelyet oldal irányból egy adott állandó nyomás terhel, majd elkezdjük ezt a mintát felülről préselni. Egy idő után azt tapasztaljuk, hogy a minta rézsútosan kettétörik, és a két fél a töret mentén elcsúszik egymáson. Coulomb saját rajza a folyamatról a 2.1-es ábrán látható, ahol a törés síkját a C és M pontok közötti vonal jelöli.



2.1. ábra – Mérési elrendezés (Coulomb 1776)

Manapság is végeznek ilyen méréseket, a talajok, kőzetek tulajdonságainak meghatározására. A korszerű elvi mérési összeállítást a 2.2-es ábrán láthatjuk.



2.2. ábra – Modern mérési elrendezés (McKyes 1985)

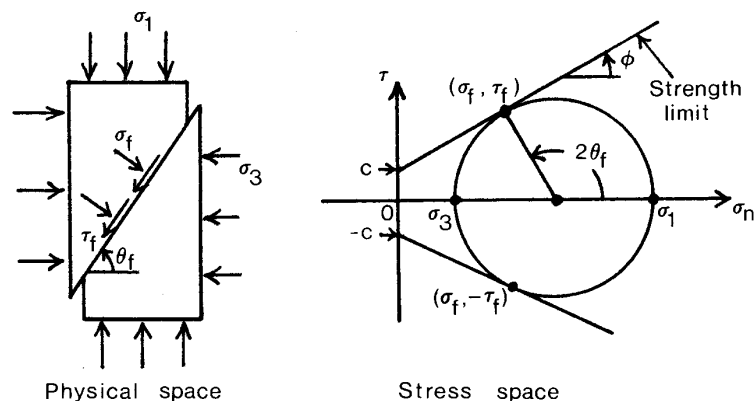
Itt a mintát egy vízzel teli tartályba helyezzük, hogy a víz nyomásával biztosíthassuk a talajban valóságos körülmények között jelenlévő állandó nyomást. Hogy a földet megvédjük a víztől, amely megváltoztatná annak kohézió tulajdonságait, egy vékony mechanikailag nem ellenálló, de vízzáró membránnal vesszük körbe. Így a minta a felülről érkező nyomás hatására szabadon elmozdulhat, miközben a palástján ébredő nyomás változatlan marad.

Vizsgálatainak eredményeként Coulomb úgy találta, hogy a nyíró feszültséget a következő képlet (egy.2.1.) határozza meg:

$$s = c + \sigma_n \cdot \tan \phi, \quad (\text{egy.2.1.})$$

ahol s a nyírófeszültség, c a kohézió, ϕ a belső súrlódási szög, és σ_n a belső nyírási felületre ható normális irányú feszültség.

Amennyiben Coulomb modelljét kombináljuk Mohr grafikus módszerével, a Mohr körökkel, akkor a 2.3-as ábrán látható képet kapjuk.

2.3. ábra – Mohr-Coulomb modell a σ - τ síkon (McKyes 1985)

Az egyenes vonal, amely a nyírófeszültségi tengelyt a c kohéziós erőnél metszi, az anyag tönkremeneteli határát jelöli. Az egyenes meredekségét a belső súrlódási szög tangense adja.

A fenti modellből kiindulva a talajban egy tetszőleges helyzetű földdarabra ható feszültségeket is fel lehet írni. A levezetés ismertetése nélkül, így a Sokolowski (1956) féle általános földmozgás differenciálegyenletét kapjuk (egy.2.2.), amelyben θ az elemi földhasáb iránya az abszolút (x - z) koordináta rendszerhez képest, σ a rá ható feszültség nagysága, γ a föld sűrűsége, μ a súrlódási félkúpszög, és g a nehézségi gyorsulás.

$$\left[\frac{d\sigma}{dx} \cdot \cos(\theta \pm \mu) + \frac{d\sigma}{dz} \cdot \sin(\theta \pm \mu) \right] \pm 2\sigma \cdot \tan\phi$$

$$\cdot \left[\frac{\partial\theta}{\partial x} \cos(\theta \pm \mu) + \frac{\partial\theta}{\partial z} \sin(\theta \pm \mu) \right] = \frac{\gamma \cdot g}{\cos\phi}$$

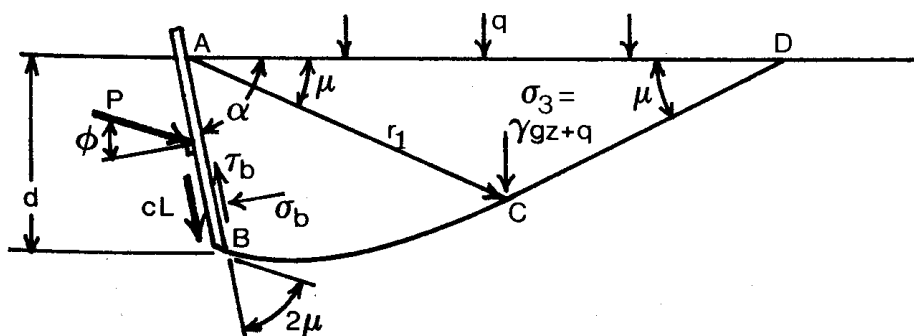
$$\cdot [\sin(\pm\theta) \cdot \cos(\theta \pm \mu) + \cos(\pm\theta) \cdot \sin(\theta \pm \mu)]$$

(egy.2.2.)

Az egyenlet zárt alakú megoldása mai napig ismeretlen, de az utóbbi időben már egyes numerikus módszerek képesek jó közelítő értékeket adni. Bizonyos peremfeltételek bevezetése mellett lehetséges zárt alakok levezetése. A ma ismert analitikus méretezési eljárások zöme ilyen egyszerűsített megoldása a fenti egyenletnek.

2.1.2. Hettiaratchi és Reece 1965

Hettiaratchi és Reece 1965-ben vezette le a (egy.2.2.) egyenlet egy speciális megoldását, amellyel egy könnyen használható, egyszerű képletet kaptak, amely megadja a talajban mozgatott szerszám vontatásához szükséges erőt. Ez a képlet a „földmozgás univerzális egyenlete”-ként vált ismertté. Felhasználása egy általános esetre értendő (2.4-es ábra), ahol egy ferde fémlap jellegű szerszámot használunk



2.4. ábra – Érdes felületű, ferde szerszámra ható erők a talajban (McKyes 1985)

kohézív, önsúllyal rendelkező, a szerszámmal súrlódásos kapcsolatban álló talajban. A kapott értékek 2D-ben, egységnyi szélességre vonatkoztatottak.

$$P = \gamma \cdot g \cdot \frac{d^2}{2} \cdot \left[\frac{\sin \mu \cdot \cos \phi \cdot e^{3(\alpha - \mu) \cdot \tan \phi}}{\sin^2 \alpha \cdot (1 - \sin \phi)} \right] + \frac{cd}{\sin \alpha \cdot \sin \phi} \cdot \left[\left(\frac{\cos^2 \phi \cdot e^{2(\alpha - \mu) \cdot \tan \phi}}{1 - \sin \phi} \right) - 1 \right] + q \cdot d \cdot \left[\frac{\cos \phi \cdot e^{2(\alpha - \mu) \cdot \tan \phi}}{\sin \alpha \cdot (1 - \sin \phi)} \right]$$

$$P = \gamma \cdot g \cdot d^2 \cdot N_{\gamma} + c \cdot d \cdot N_c + q \cdot d \cdot N_q, \quad (\text{egy.2.3.})$$

ahol P = a teljes szerszámra ható erő egységnyi szélességre vonatkoztatva, γ = a talaj sűrűsége, g = a gravitációs gyorsulás, d = a munkamélység, c = kohéziós erő, q = felső földréteg nyomása. , Az N konstansok a képletben, zárójelben szereplő kifejezésekkel határozhatóak meg, amelyek mint látszik, a szerszám és a talaj közötti súrlódási szögnek (δ), a szerszám szögének (α) és a talaj belső súrlódási szögének (ϕ) függvényei.

2.1.3. McKeys és Ali 1977

A Hettiaratchi és Reece (1965), illetve a Goodwin és Spoor (1977) módszerek továbbfejlesztéseként jött létre ez a számítási módszer, amely egy w szélességű egyenes szerszámra ható erő meghatározására alkalmas (3D-s modell).

$$P = \left(\gamma \cdot g \cdot d^2 \cdot N_{\gamma} + c \cdot d \cdot N_c + q \cdot d \cdot N_q + c_a \cdot d \cdot N_{ca} \right) \cdot w,$$

(egy.2.4.)

A 2.4-es egyenletben az N konstansok már nem csak a fentebb említett állandóktól, hanem d/w aránytól is függenek, ahol w = a szerszám szélessége. A vonóerő az (egy.2.5.) képlet alapján számítható.

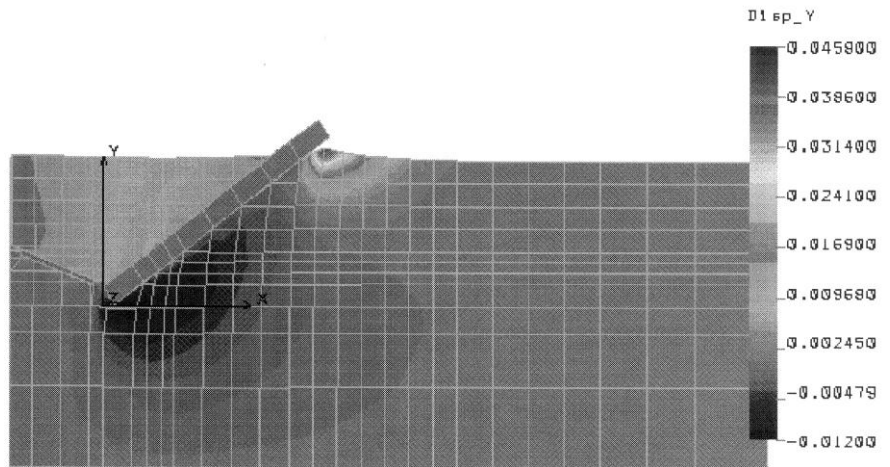
$$H = P \cdot \sin(\alpha + \delta) + c_a \cdot d \cdot w \cdot \operatorname{ctg} \alpha \quad (\text{egy.2.5.})$$

2.2. Lagrange módszerek és a VCCT

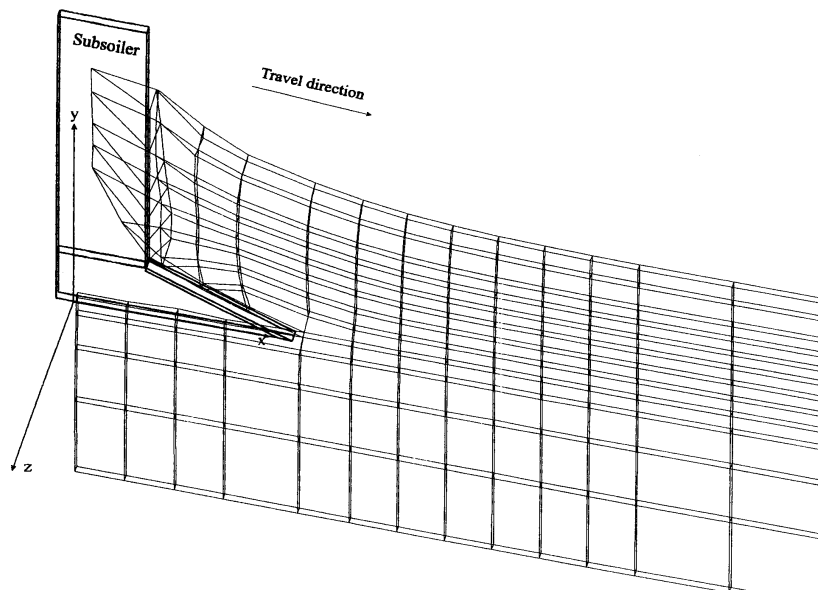
Napjainkban leggyakrabban a végeselemes módszert (Lagrange módszer) használják kontinuumok modellezésére. Ennek alapja, hogy a testet, amelyet vizsgálni szeretnénk, véges számú diszkrét elemből építjük föl, amelyek csomópontok, és elemi rudak bonyolult hálója. Egy-egy alapvető elem, amely több csomópontból, és rúdból is állhat, formázhat négyzetet, háromszöget, tetraédert, piramist, és még sok más geometriai alakot.

A bonyolult anyagtulajdonságoknak köszönhetően a talajszimulációs módszerek igen lassan kezdtek fejlődni. Elsőként kézenfekvő módon a legelterjedtebb,

legjobban megírt algoritmusokkal rendelkező Lagrange módszert részesítették előnyben különféle elemtípusok, és anyagmodellek felhasználása mellett. Ilyen kutatásokat folytatott például: Liu Yan, Zhi-Min, Xie Xiao-Mi, Kuswaha, Mouazen-Neményi, Kerényi... stb.

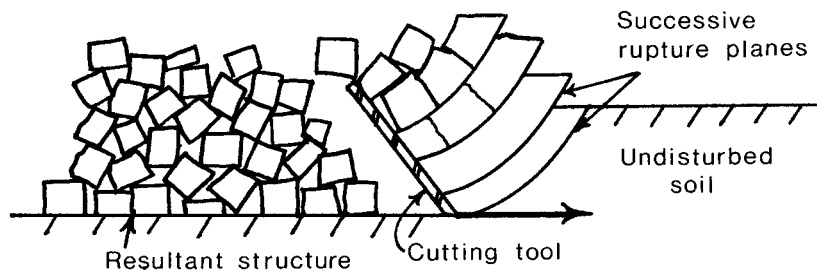


2.5. ábra – Talajlazító statikus vizsgálata (Soproni Egyetem 1997)



2.6. ábra – Kultivátor 3D szimulációja (Mouazen-Neményi 1996)

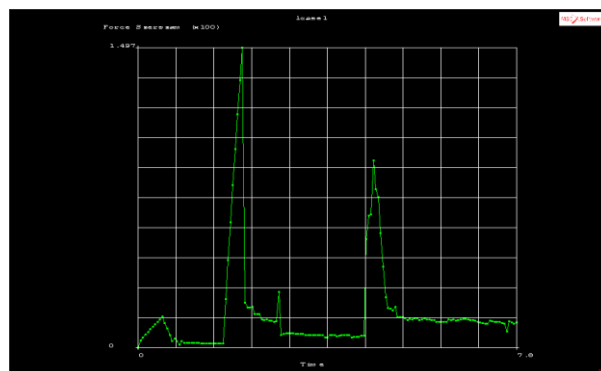
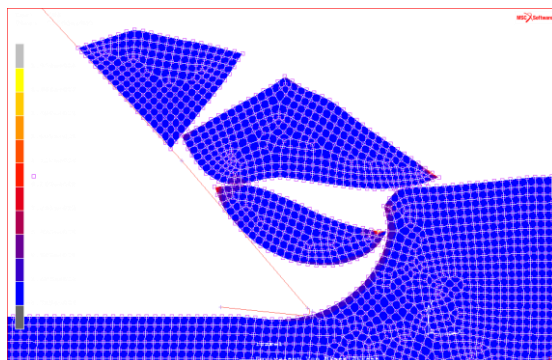
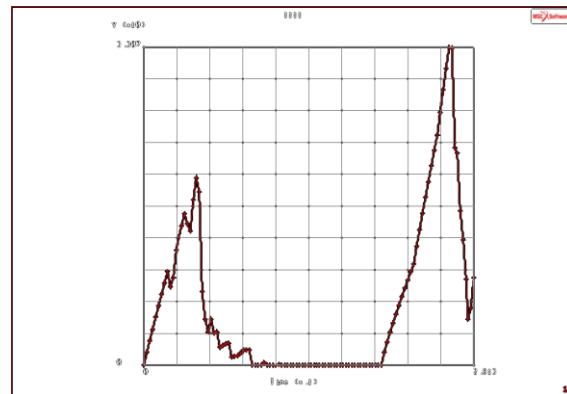
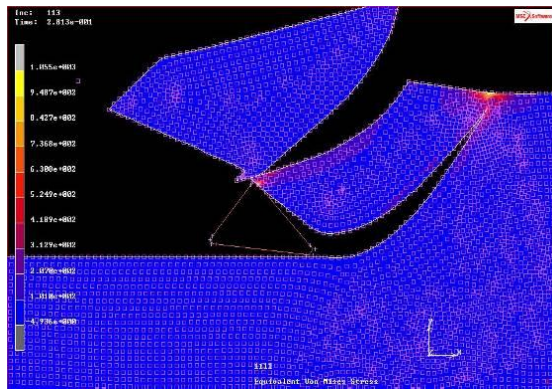
Ezek mind statikus vizsgálatok voltak, mivel az egyszerű VEM szimulációk alapvető problémája, hogy csak kis elmozdulások, és erőhatások esetén működik jól, a háló sajátosságainak köszönhetően. Ugyanis, ha egy testet a valóságban terhelésnek vetünk alá, legyen bármilyen az anyaga, akkor az deformálódik, majd bizonyos határokat elérve tönkremegy, de az anyag maga megmarad, és tovább változik. Ha ugyanezt egy Lagrange hálóval tesszük, akkor alacsony deformáció mellett kiválóan számíthatjuk a várható elmozdulásokat, erőértékeket. De mikor a deformáció már olyan nagy, hogy az elemek elmozdulása elér egy kritikus határt, szinte megszűnik közöttük a távolság, avagy olyan messzire kerülnek egymástól, amely szakadás nélkül már elképzelhetetlen, a háló folytonossága megszűnik, és a szimulációk megakadnak, vagy a valóságtól durván eltérő eredményre jutnak. Ezekre a nagy hálódeformációkra jó példa a 2.5-ös, és 2.6-os ábra. Könnyű belátni, hogy egy mezőgazdasági jellegű művelet során, ahol a szerszám célja a talaj fellazítása, átforgatása, óriási elmozdulások jöhetnek létre, amiket ezzel a hagyományos módszerrel lehetetlen kezelni.



2.7. ábra – Jellegzetes törési görbék a talajban (McKyes 1985)

Ennek a hibának a kiküszöbölésére született meg a „Virtual Crack Closure Technic”. A módszer alapja, hogy amikor a szerszám megindul a talajban, akkor egy bizonyos feszültségi érték fölött a szerszám előtti talajrész kitörik, és elmozdul, majd tovább töredezik, ahogyan az a 2.7-es ábrán is látható.

Törésvonalak egy hagyományos Lagrange hálóban sosem jöhetnének létre, mivel az a szimuláció megszakadásával járna. VCCT technikával viszont előre definiálhatunk a modellben lehetséges törési síkokat, amelyek, ha a feltételek adottak, akkor létre is jönnek. Az ehhez szükséges erőt a Griffith féle törési kritérium alapján számítja a rendszer, amely alaptétele, hogy a törés terjedéséhez a felszabaduló rugalmas energia mennyisége legalább akkora, vagy nagyobb kell legyen, mint amekkora energia egy új törési felület létrehozásához szükséges.



2.8-9. ábra – Transziens szimulációk Lagrange hálóval, VCCT technikával (Tamás-Jóri 2009)

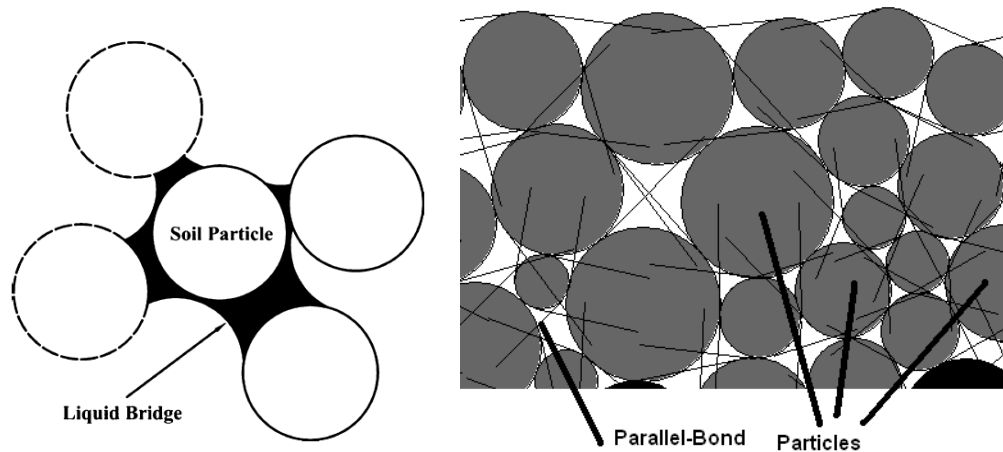
A 2.8-a, és 2.9-es ábrák Tamás és Jóri (2009) eredményeit mutatja. Jól látszanak a talajban kialakult, esetenként előre definiált törési görbék, de a rögök további töredezésének illetve a talajra jellemző porózusságnak nyoma sincs.

Tehát a VEM módszer megfelelő beállítások mellett jó becslést adhat a szerszámmra ható erők értékére, de ez a fajta analízis még mindig távol áll a valóságban lezajló folyamatoktól. A Lagrange hálós szimulációk terén további előre lépési lehetőség nem is igen látszik ezen a területen.

2.3. Diszkrét elemes módszer - DEM

A DEM módszert először Cundall (1977) használta kövek mechanikájának elemzésére. A későbbiekben elfogadott szimulációs eszköz lett különböző porózus anyagokra is, ahol nagy deformációkat kellett megvalósítani.

A DEM az atomok, és molekulák közötti kapcsolati rendszerhez nagyon hasonlóan működik. A DEM testek véletlenszerűen elrendezett, változó méretű, teljesen merev gömbökből állnak. Ezek között az elemek között a program egyfajta törékeny kötőanyagot definiál, ami egyszerre áll hagyományos, és úgy nevezett párhuzamos kötőelemekből.

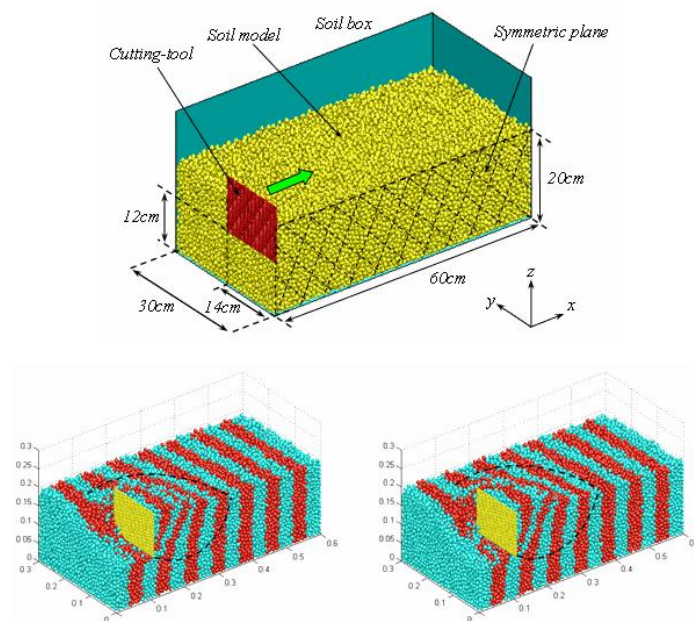


2.10. ábra – DEM „háló” felépítése (Tamás-Jóri 2009)

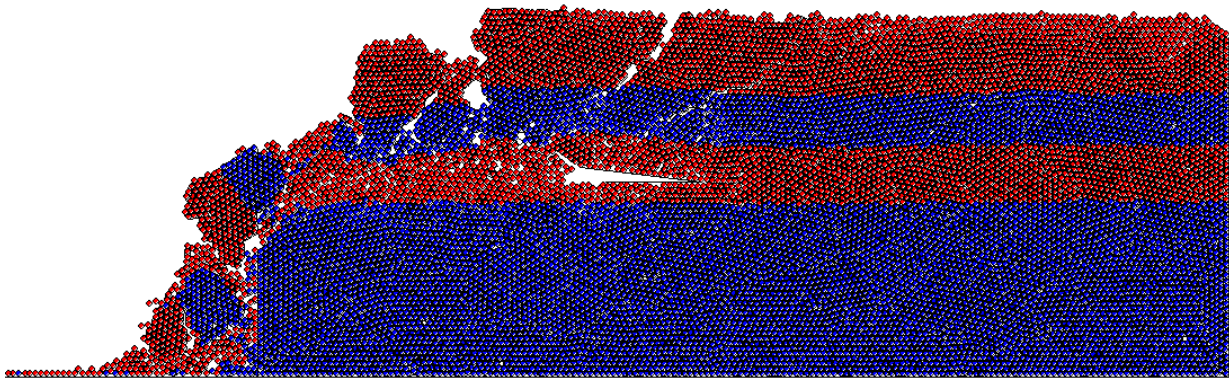
A hagyományos kötőelemek csak erőket tudnak közvetíteni az egyes elemek között, míg a párhuzamos kötések képesek a forgatónyomaték átadására is úgy, hogy közben nem gátolják az elcsúszást.

Ha két szomszédos elem között relatív mozgás lép fel, akkor a párhuzamos kötésekben erők ébrednek, ami, ha elérnek egy bizonyos nyíró, vagy húzó feszültségi határt, megsemmisülnek, és utána az elem szabaddá válik.

Ez a technika igen jól modellezi a földben ébredő kohéziós erőket, amelyek kis mértékben, de ellenállóvá teszik a talajt húzó irányú igénybevételnek is. Kiterjedtebben a DEM-et mezőgazdasági jellegű talajszimulációkra mostanáig Tamás-Jóri (2009), illetve Ha.H.Bui (2004) alkalmazta.

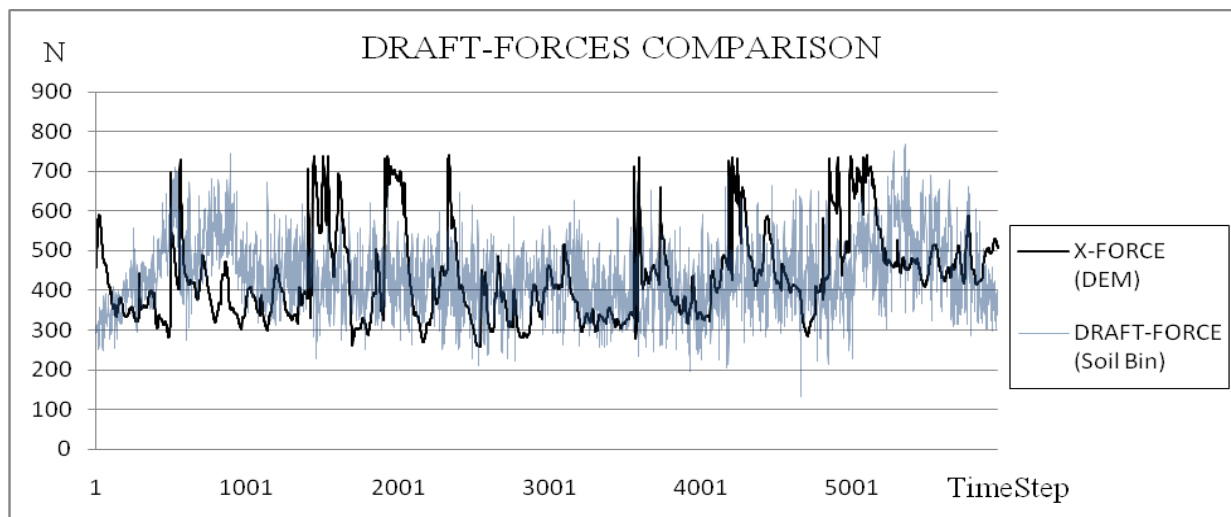


2.11. ábra – Függőleges vágólap hatása a talajra (Ha.H.Bui 2004)



2.12. ábra – Ék alakú szerszám mozgása a talajban (Tamás-Jóri 2010)

Tamás - Jóri (2010) szimulációja a 2.12-es képen látható. A talaj az ék hatására a törési síkok mentén eltöredezik, miközben megjelennek porózus szemcsék is a rögök között.



2.13. ábra – Szimulált, és mért értékek összehasonlítása (Tamás-Jóri 2010)

A 2.13-as ábra mutatja kézzel a vonóerő mérési eredményeit, feketével a DEM szimulációval kapott eredményeket. A módszer meglepően pontos képet ad. Láthatóak a kiugrások egy-egy törésvonal létrejötte előtt, mint a VCCT metódusnál, de mégis folyamatosabb az erő.

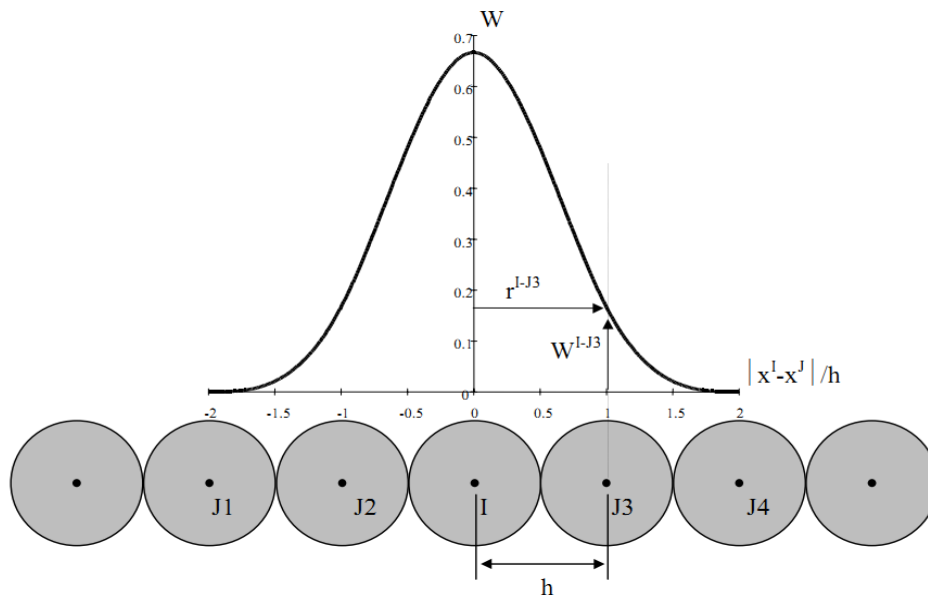
Tehát a DEM egy rendkívül hatékony módszer a mezőgazdasági jellegű talajszimulációk esetén, de ellene szól, hogy nehézkes az anyagtulajdonságok beállítása, mivel sok előzetes tesztet kell lefuttatni, hogy kalibráljuk a modellt, ugyanis a bemeneti értékek minden esetben a kötést létrehozó elemek csillapítási, rugalmassági, viszkozitási tényezői. Ma a piacon csak drágán hozzáférhető, kezdetleges, részben kísérleti stádiumban lévő, DEM-et megoldani képes programok kaphatóak. A szimulációk futtatásához igen hosszú idő szükséges, ami a kalibrálás jelentős idejével együtt, jelentősen csökkenti a felhasználás hatékonyságát.

3. Smooth Particle Hydrodynamics

3.1. Az SPH alapjai

Az SPH, háló nélküli szimulációs módszert eredetileg Lucy (1977), Monaghan és Gingold (1977) fejlesztették ki asztrofizikai kutatásokhoz. Eleinte bolygók, naprendszerek kialakulásának módját, szupernovák kialakulását tanulmányozták a segítségével. Később igen hatásosnak bizonyult különböző gázok, komplex folyadékok, illetve porózus anyagok, forgácsolási technikák vizsgálatánál is. Az utóbbi időben pedig földtani szimulációk terén is komoly eredményeket értek el a segítségével. A következőkben a teljesség igénye nélkül kívánom vázolni az SPH módszert.

A módszer alapja, hogy a testeket önálló, tömeggel rendelkező részecskékként képzeljük el. Minden részecskének megadunk egy sugarat (Ezt nevezzük „smoothing length”-nek), aminek kétszeresén belül lévő további részecskéket szomszédokként fogja érzékelni az algoritmus. Egy részecske fizikai tulajdonságai a szomszédok tulajdonságaiból kerülnek kiszámításra egy speciális, általunk választott súlyfüggvény alapján. Ez leggyakrabban Monaghan B-spline interpolációs görbéje.



3.1. ábra – Egyszerű példa egy rúd sűrűségének meghatározására (AUTODYN SPH User manual)

A 3.1-es ábrán egy 7 elemből álló rudat láthatunk. A középső, I elem sűrűségét a tőle $2h$ (h = smoothing length, részecskeméret) távolságon belüli J1-4 elemek határozzák meg a W súlyfüggvény alapján a következő képlet szerint:

$$\rho^I = \sum_{J=1}^N m^J W^{IJ}(\mathbf{x}^I - \mathbf{x}^J, h)$$

(egy.3.1.)

ahol J az aktuális részecske, m annak tömege, h a detektálási sugár, $\mathbf{x}$ pedig a részecske középpontjának pozíciója. Minden más tulajdonság is hasonlóképpen kerül kiszámításra a részecskék között. Az (egy3.1.)-es egyenlet általános alakja:

$$A(\mathbf{r}) = \sum_j m_j \frac{A_j}{\rho_j} W(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|, h),$$

(egy3.2.)

ahol A a tetszőleges mennyiség, és $\mathbf{r}$ a részecske helye.

Tehát az SPH elemek nem csak egyszerű koncentrált tömegpontok, amelyek egymással kapcsolatba lépnek, hanem igazi interpolációs pontok, amelyek a VEM módszerrel ellentétben nem csomópontokhoz, rudakhoz vannak kötve, hanem egymáshoz képest bármekkora mértékben elmozdulhatnak.

3.2. Az SPH mozgásegyenlete

Az adott részecskék sebessége is a 3.1.-es fejezetben foglaltakhoz hasonlóan, egy interpolációs függvény segítségével kerül kiszámításra. Ennek Monaghan által közölt eredeti alakja:

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^\beta} + f^\alpha$$

(egy3.3.)

ahol i a vizsgált részecske száma, N a szomszédok száma, m az adott részecske tömege, α és β a pozíciót jelölik, ρ a sűrűséget, $\mathbf{v}$ a sebességet mutatja meg, W az interpolációs függvény, a σ -k pedig feszültségtenzorok.

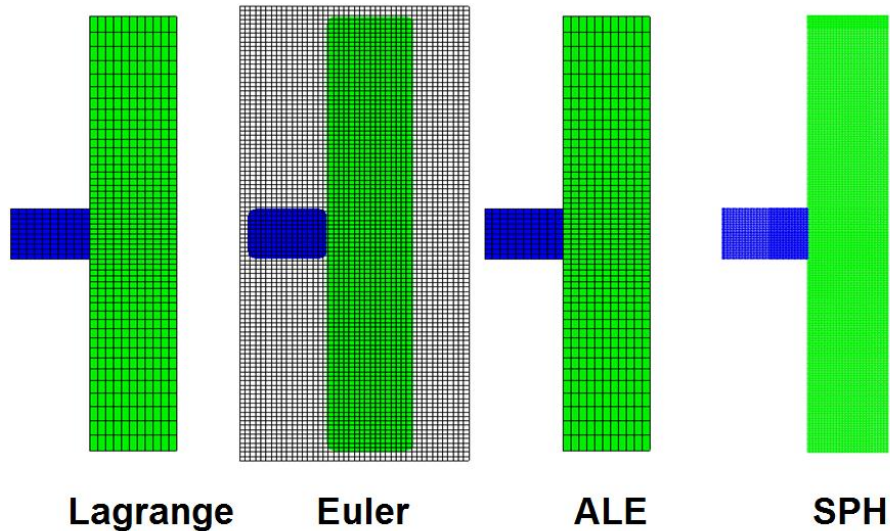
3.3. ANSYS AUTODYN v.12.

A vizsgálataimhoz egy bárki számára könnyen hozzáférhető, elterjedt, jól ismert programcsalád, az ANSYS, explicit dinamikai kiegészítőjét, az AUTODYN-t választottam. A program nagy előnye, hogy programkódja meglehetősen robosztus, így stabil, és megbízható futást kínál, viszonylag rövid idő alatt, illetve az ANSYS elterjedtségének köszönhetően más kifejezetten csak SPH megoldókhoz képest jóval kiforrottabb, és



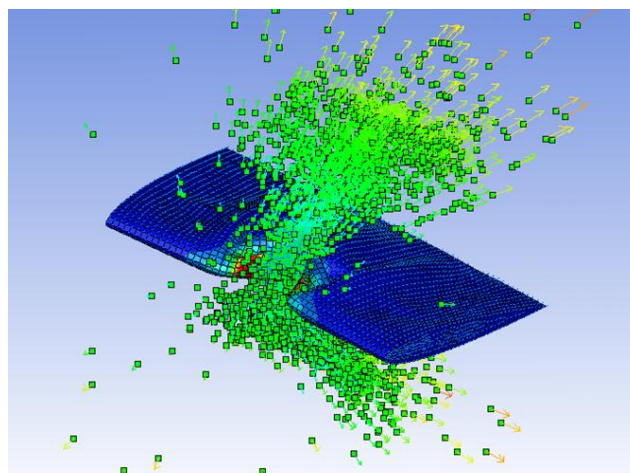
olcsóbban hozzáférhető.

Habár az ANSYS jóvoltából ez egy széles körben, sok problémára optimalizált szoftver, mivel az eredeti fejlesztő a Century Dynamics volt, a vezérlő felület még mindig független, a Workbench-hez képest kevésbé kifinomult megoldásokkal



3.2. ábra – AUTODYN szoftverben lévő megoldók típusai (ANSYS Exp. Dyn. tananyag)

A program négy fő beépített megoldóval rendelkezik. Ezek a Lagrange, Euler, ALE, illetve az SPH megoldók. Emellett képes a különböző megoldók korlátozott mértékű kombinálására is. Tehát példaképp létrehozhatunk olyan szimulációkat is, ahol egyszerre vannak jelen SPH és Lagrange elemek. (pl.:3.3.-as ábra) Ezek között a kapcsolat detektálása a VEM-ben megszokott külső hézag segítségével történik, de a kapcsolat keresésekor a program az eredeti részecskeméret duplája helyett, mindössze felével dolgozik, és ennél közelebb nem engedi egymáshoz a Lagrange csomópontokat, illetve az SPH elemeket.



3.3. ábra – Madár becsapódása repülőgépszárnyba SPH és Lagrange elemekkel (ANSYS Exp. Dyn. tananyag)

Jellemző hibája az SPH módszernek, hogy esetenként egy-egy részecskére irreálisan nagy sebességértéket kapunk. Ez jobb esetben a test belsejében történik, és a részecske néhány ciklus után beleütközvén a többi elembe lelassul, vagy rosszabb esetben elszáll a végtelenbe. Ekkor a kapcsolatdetektáló algoritmus jelentősen lelassíthatja a futást a lépésidő csökkentésével, illetve maga a ciklusidő is megnőhet. Ezt az AUTODYN szoftverben oly módon előzhetjük meg, hogy megadhatunk ún. limit értékeket például a sebességre. Én minden szimulációmban a kényszerként megadott sebesség kétszeresét használtam felső határként.

Előfordulhat még, hogy egy részecske magára marad a térben, ami szintén kárára lehet a teljesítménynek. Ezeket a sűrűségük alapján szelektálva likvidálhatjuk.

4. Mezőgazdasági talajra használt anyagmodellek

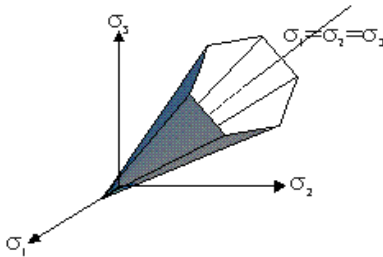
4.1. Drucker – Prager anyagmodell

A 2.1.1.-es fejezetben ismertetett Mohr–Coulomb anyagmodell napjaink egyik legelterjedtebb tökéletesen rugalmas, képlékeny anyagmodellje, amit előszeretettel használnak porózus anyagok, vagy beton leírására. Numerikus szempontból mégis komoly problémák merülnek fel vele kapcsolatban.

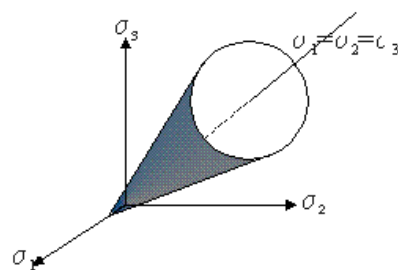
A 3D-s főfeszültségi térben a Mohr–Coulomb határfelülete egy hatszög alapú gúla. (4.1-es ábra) A modellt meghatározó egyenlet a következő:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \Phi$$

(egy.4.1.)



4.1. ábra – Moh-Coulomb modell



4.2. ábra – Drucker-Prager modell

ahol az τ a nyírófeszültség, c a kohézió, σ_n a nyomófeszültség, Φ pedig a belső súrlódási szög. Amikor egy anyagot terhelünk, és a feszültségi állapota eléri a határfelületet, akkor a további viselkedését az határozza meg, hogy pontosan milyen irányban hagyja el a megengedett zónát. Ez egy adott pontban általában a felületre merőlegesen, a normális irányban történik, amit a gúlát határoló síklapok köztes részein könnyen tudunk értelmezni. De amennyiben a kilépés valamely két síklap élének találkozásánál fordul elő, akkor bonyolultabb a megoldás. Ennek kezelése komplikáltabbá teszi az anyagmodellt megvalósító algoritmusokat, illetve növeli a számítási időt.

A Drucker-Prager anyagmodell (1952) a M-C modell egy módosítása. A D-P modell alakja a főfeszültségi térben egy kúp (4.2-es ábra). Ennél az alakzatnál numerikus számítási problémák nem lépnek fel a képlékenységi felületen.

A húzófeszültség kitérője a következő:

$$\sqrt{J_2} = A + B I_1$$

(egy.4.2.)

ahol az I_1 a feszültségtenzor első invariánsa, a J_2 a feszültségtenzor második invariánsa, A és B a Drucker-Prager modell konstansai.

A DP modell előnye még, hogy oda-vissza megfeleltethető a Mohr-Coulomb modellel. Tehát használhatjuk ugyanazokat a bemeneti anyagjellemzőket, mint eddig.

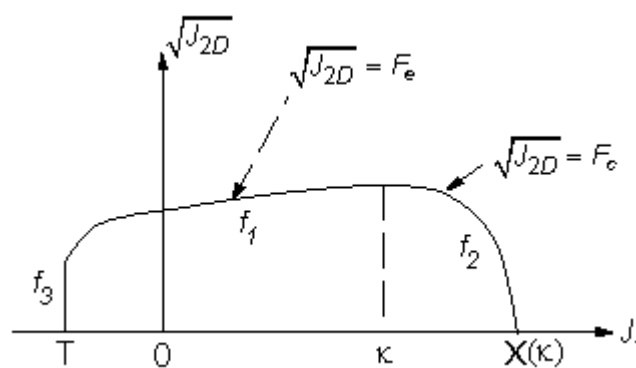
Az általam használt D-P modell esetén a M-C modell gúláját kívülről burkoló kúppal dolgozunk, amelyhez tartozó konstansokat a 4.3 egyenlet alapján lehet meghatározni.

$$A = \frac{6 c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}; \quad B = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)}$$

(egy.4.3.)

4.2. Cap modell

A D-P hátránya, hogy a húzófeszültségi tartományban túlzottan nagy erőhatásokat is megenged. Ennek kiküszöbölésére hozták létre a Cap modellt, ami mind a negatív feszültségtartományban, mind a nagy nyomófeszültségek pozitív tartományában is egy-egy ellipszissel került lezárásra. A köztes részeken az eddig megszokott egyenes határolja a felületet. (4.3-as ábra)



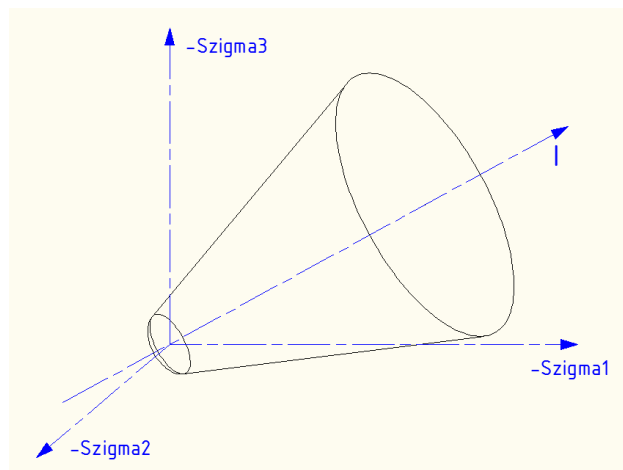
4.3. ábra – Cap modell (ANSYS Súgó)

Mivel ez a modell kevésbé elterjedt, és a Mohr-Coulomb-nak való megfeleltetése is nehezebb, így elvetettem a használatát.

4.3. Módosított Drucker-Prager modell

A fenti modelleket eredetileg földtani vizsgálatokra szánták, ahol olyan kérdések merülnek föl elsősorban, hogy mikor fordulnak elő földcsuszamlások, mekkora nyomása lesz a gátnak a támfalakra stb. Ezekben az esetekben a negatív feszültségi tartomány csak másodlagosan jelenik meg, így ennek a tartománynak a kialakítására kevesebb figyelmet fordítottak.

Miközben a szoftvert igyekeztem oly módon kalibrálni, hogy az a valósághoz minél jobban közelítő eredményt adjon, azt tapasztaltam, hogy esetenként túlságosan kohézióvan viselkedik a talaj, ha a hagyományos D-P modellt használom. Így mivel az AUTODYN lehetőséget adott egy törött vonalként definiált D-P modell bevitelére, a CAP modellhez hasonlóan a képlékenységi feltétel negatív végét levágtam.



4.4. ábra – Módosított Drucker-Prager modell

4.4. Felhasznált modellek bemeneti értékei

4.4.1. Lineáris D-P

Ehhez a bemeneti értékeket Mouazen–Neményi munkájából vettem, akik egy szántóföldi talajmintán végrehajtott valós mérésorozatot alapján számították őket. Továbbiakban *c20DP*.

$$c = 20,4 \text{ kPa}$$

$$\phi = 34^\circ$$

$$\delta = 34^\circ * {}^{2/3} \rightarrow \text{McKyes ajánlása, hogy } {}^{1/2} \phi \leq \delta \leq {}^{7/8} \phi \text{ legyen, ha a szerszám anyaga acél.}$$

$$\rho = 1840 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 20 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.385$$

4.4.2. Kohézió mentes talajok

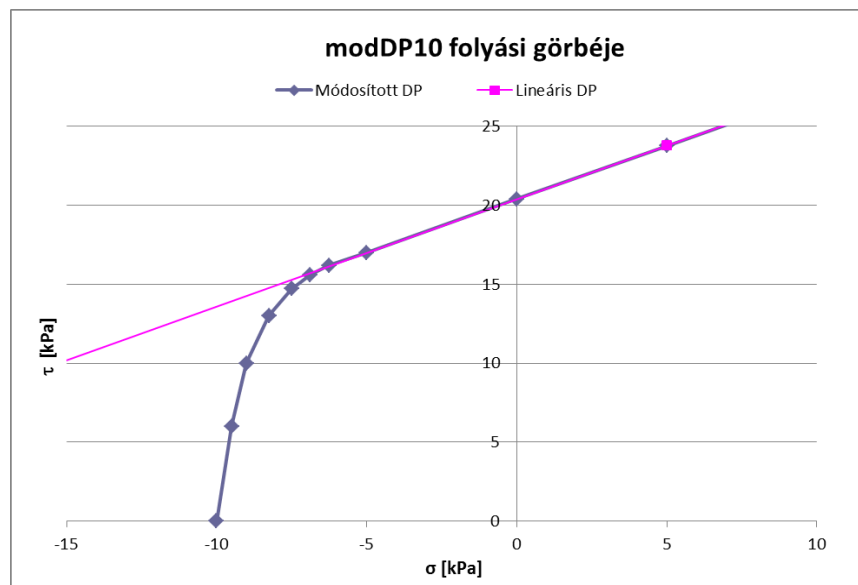
Egy ilyen anyagot használtam (ezentúl *c0DP*), amit az eredeti D-P módszerrel definiáltam a *c20DP* értékei alapján. Egyetlen különbség, hogy *c* értékekül 0,01 kPa-t adtam meg. Azért nem közvetlenül 0-t, mert azt nem tudná kezelni a program.

4.4.3. Módosított D-P modellek

Az első két esetben a *c20DP* talaj két negatív tartományban megcsonkított változatát mutatom be, ahol a negatív tartományban a 0 húzófeszültségű pontot egyszer a *c* felének, egyszer pedig negyedének választottam.

modDP10_c20

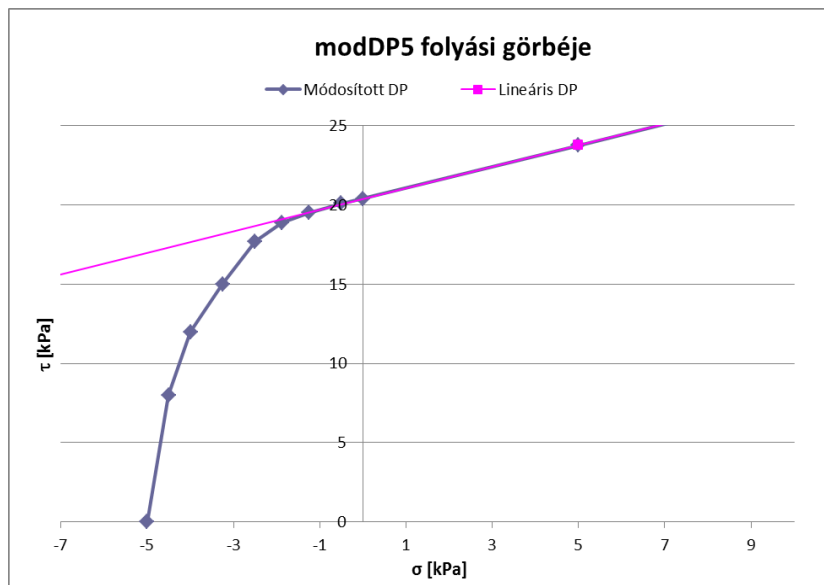
Koordináták	
σ [kPa]	τ [kPa]
-10	0
-9,5	6
-9	10
-8,25	13
-7,5	14,7
-6,875	15,6
-6,25	16,2
-5	17
0	20,4
50000	33745,4



4.5. ábra – modDP10 folyási görbéje

modDP5_c20

Koordináták	
σ [kPa]	τ [kPa]
-5	0
-4,5	8
-4	12
-3,25	15
-2,5	17,7
-1,875	18,9
-1,25	19,5
-0,5	20,1
0	20,4
50000	33745,4



4.6. ábra – modDP5 folyási görbéje

A harmadik a Tamás–Jóri (2009) által talajvályúban végzett kísérletnél fölhasznált kísérleti, tömörített, nedves homokból kialakított talaj alapján felvett D-P modell átalakított változata. Ez utóbbinál erősen kopott szerszámot feltételezve a δ/ϕ arányt $1/2$ -nek választottam. Az új nullpont értékét itt is a c felének választottam.

$$c = 12 \text{ kPa}$$

$$\phi = 27^\circ$$

$$\delta = 13.5^\circ$$

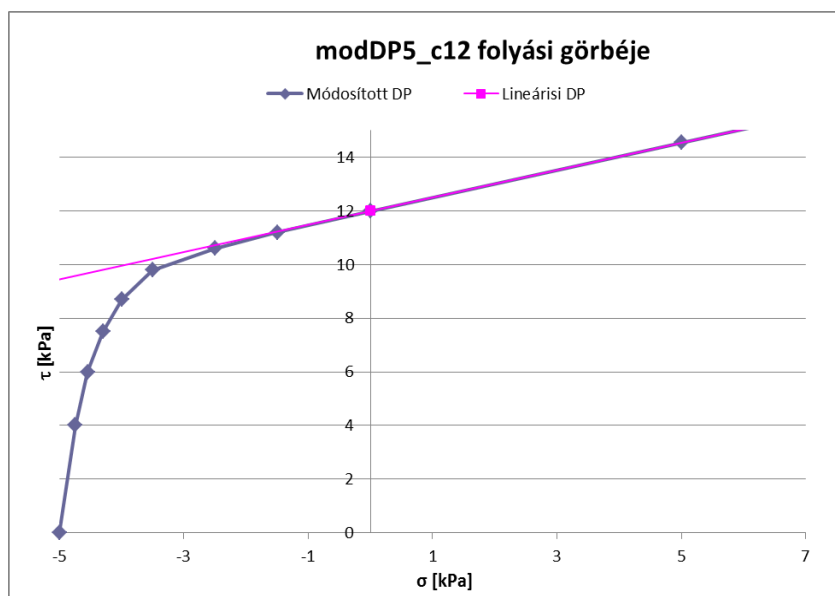
$$\rho = 1840 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 20 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.385$$

modDP5_c12

Koordináták	
σ [kPa]	τ [kPa]
-5	0
-4,75	4
-4,55	6
-4,3	7,5
-4	8,7
-3,5	9,8
-2,5	10,6
-1,5	11,2
0	12
50000	25462



4.7. ábra – modDP_c12 folyási görbéje

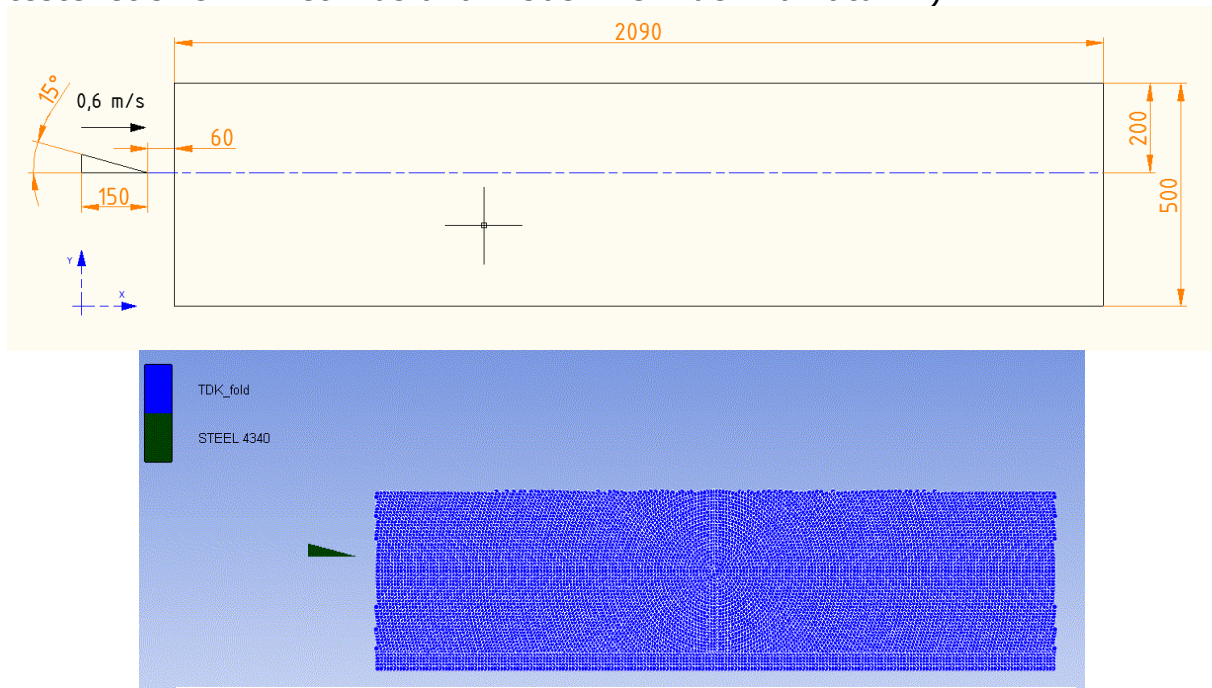
5. Eredmények

5.1. Síkbeli ék és a talaj kapcsolatának szimulációja

5.1.1. Alapbeállítások

Mivel az ANSYS programcsaládba anyagmodell úgy nem kerülhet be, hogy azt előzőleg ne hitelesítették volna valóságos kísérletekkel, feltételeztem, hogy a Drucker-Prager anyagmodell, és az SPH elemek kombinációjának működése is megfelel a modellről közölt egyenleteknek. Ezért nem láttam szükségét ezzel kapcsolatban további vizsgálatokat folytatni, és egyből egy egyszerűsített, síkbeli szimulációval kezdtem a vizsgálódást.

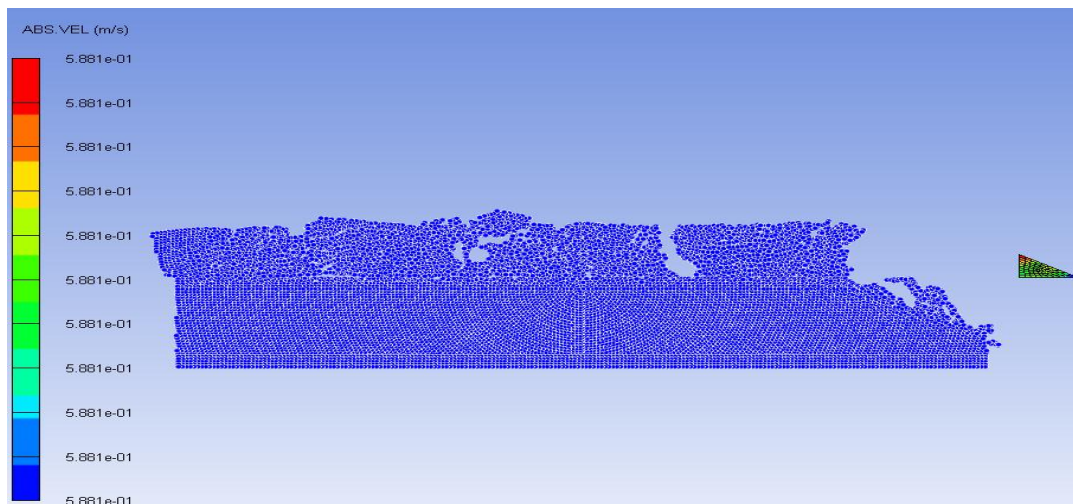
A modell létrehozásánál az analitikus módszereknél is felhasznált, részben idealizált esetet vettem alapul, ahol egyetlen merev lappal szimbolizálják a szerszámot, amelyet a talaj felületével párhuzamosan mozgatnak. (2.6-os ábra) A lapot egy ékkel helyettesítettem, és anyagául egy beépített acél anyagtípust választottam, hogy a szerszámot a talajhoz képest ideálisan merevnek tekinthessem. (Anyagtulajdonságában merev testeket síkszimmetrikus analízisben nem definiálhatunk.)



5.1. ábra – Szimulációs geometria

A szimulációs geometria elrendezését az 5.1-es ábrán láthatjuk. Az ék munkamélysége 200 mm. Az előtte elterülő téglalap 20ezer részecskéje a talajt szimbolizálja, melynek alsó rétegét teljesen megfogtam, hogy ellenálljon a gravitációnak.

Az ék kizárólag X irányban mozdulhat el, és a sebességét kezdeti feltételként adtam meg. Ebből következik, hogy idővel képes veszíteni ugyan mozgási energiájából, de maga a számítás lényegesen gyorsabb



5.2. ábra – Sebességeloszlás diagram

(negyed annyi idő.) ahhoz képest, ha a sebességet kényszerként definiálom. A lassulást a kinetikus energia drasztikus növelésével kompenzálom úgy, hogy megemelem az acél sűrűségét az eredeti 10^4 szorosára. Az 5.2-es ábrán az egyik szimuláció végső pillanatában láthatjuk a sebességeloszlást, amin jól látszik, hogy a csökkenés az eredeti 0,6 m/s-hoz képest kevesebb, mint 2%. Tehát a szerszámot továbbra is egyenletes mozgásúnak tekinthetjük, miközben jelentősen csökkentettük a tényleges futási időt.

Több futtatás után úgy találtam, hogy a legtisztább, legjobb eredményt, akkor kapom, ha a talajt SPH elemekből, míg az éket Lagrange elemekből építem fel. Ekkor lehetőségem nyílik a két test között súrlódás bevezetésére, továbbá az eredmények testek szerinti csoportosítására is.

5.1.2. Analitikus számítások

A síkbeli szimulációk ellenőrzésére egy szintén síkbeli módszert, a Hettiaratchi és Reece féle számítási módot alkalmaztam, amelyet a 2.1.2-es fejezetben ismertettem. Az egyenlet konstansainak meghatározásához szükséges táblázatokat az első függelékben közlöm.

Az elmélet minden esetben a hagyományos D-P modellt veszi alapul, vagyis az általam létrehozott módosított változatokat nem tudom figyelembe venni a számított értékekben. Két féle ék geometriával (egy 15° , és egy 30° -os), és két féle alap földmodellel ($c=20.4\text{kPa}$ Mouazen-Neményi(1996), illetve $c=12\text{kPa}$ Tamás-Jóri (2009) féle) dolgoztam. Ebből összesen két esetben végeztem el a számításokat.

A számított értékek egységnyi szélességre értendők, vagyis a végeredmények mértékegysége N/m.

30°-ra modDP esetén:*

$$N\rho o := 1.2 :$$

$$N\rho\phi := 2 :$$

$$Nco := 0.6 :$$

$$Nc\phi := 2.3 :$$

$$N\rho := N\rho o + (N\rho\phi - N\rho o) \cdot \frac{\delta}{\phi} = 1.741176470$$

$$Nc := Nco + (Nc\phi - Nco) \cdot \frac{\delta}{\phi} = 1.750000000$$

$$P := \rho \cdot g \cdot d^2 \cdot N\rho + c \cdot d \cdot Nc + o = 8397.157270$$

$$H := P \cdot \sin(\alpha + \phi) + c \cdot d \cdot \cot(\alpha) = \\ 8397.157270 \sin\left(\frac{16}{45} \pi\right) + 4080.0 \sqrt{3} \xrightarrow{\text{at 10 digits}} 14614.08226$$

*15°-ra modDP*_c12 esetén:*

$$\phi := 27 \cdot \text{radconv} :$$

$$\delta := 13.5 \cdot \text{radconv} :$$

$$\alpha := 15 \cdot \text{radconv} :$$

$$N\rho o := 2 :$$

$$N\rho\phi := 2.4 :$$

$$Nco := 0.5 :$$

$$Nc\phi := 0.9 :$$

$$N\rho := N\rho o + (N\rho\phi - N\rho o) \cdot \frac{\delta}{\phi} = 2.200000000$$

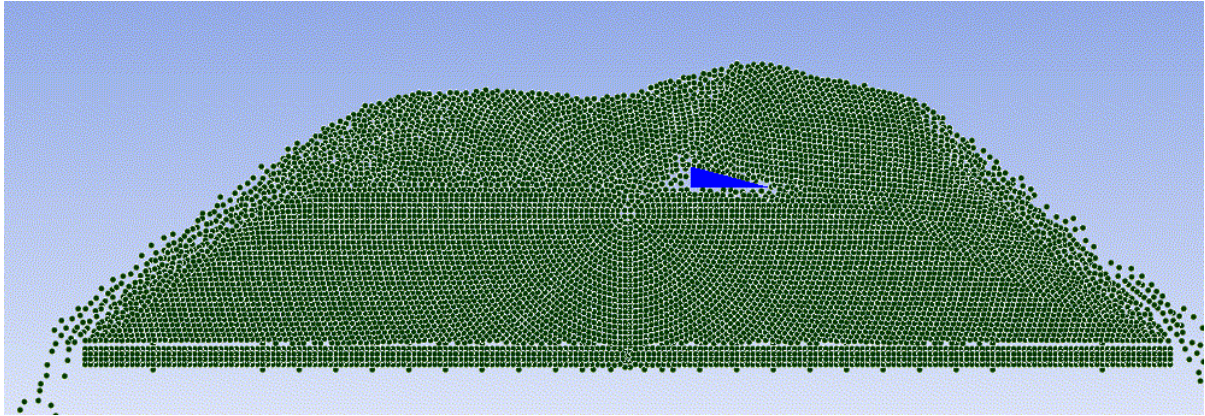
$$Nc := Nco + (Nc\phi - Nco) \cdot \frac{\delta}{\phi} = 0.700000000$$

$$P := \rho \cdot g \cdot d^2 \cdot N\rho + c \cdot d \cdot Nc + o = 3268.435200$$

$$H := P \cdot \sin(\alpha + \phi) + c \cdot d \cdot \cot(\alpha) = \\ 3268.435200 \sin\left(\frac{7}{30} \pi\right) + 2400.0 \cot\left(\frac{1}{12} \pi\right) \xrightarrow{\text{at 10 digits}} 11143.93197$$

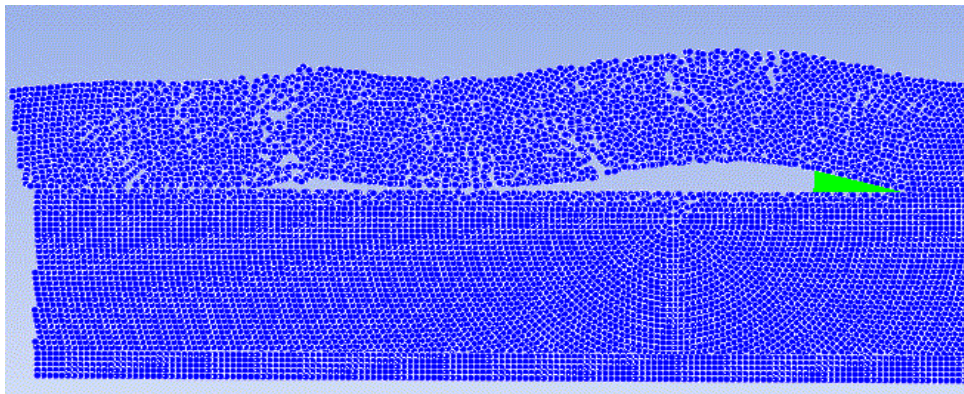
5.1.3. Szimulációs eredmények

A különböző talajmodellek, illetve beállítások létrehozásakor az elsődleges vizsgálati szempont a talaj viselkedése volt. A célom az volt, hogy a valóságra minél inkább hasonlító törési felületeket, és erőértékeket egyszerre tudjak produkálni. Elsőként egy teljesen kohéziómentes talajt (*cODP*) használtam.



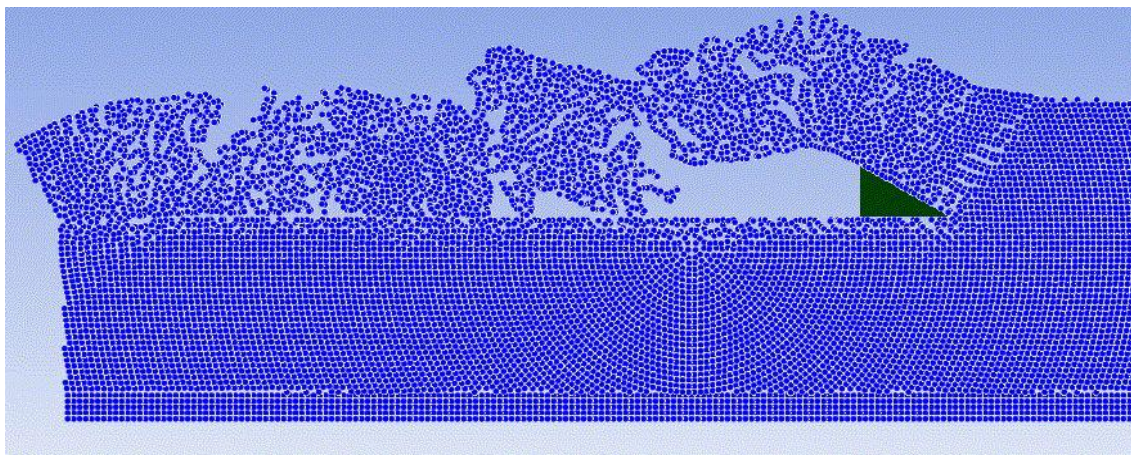
5.3. ábra – c0DP; 0,6 m/s

A modell viselkedése az elvárásoknak megfelelően alakult. Semmilyen húzóirányú ellenállást nem mutatott, önnön súlya alatt szétporladt, akár a homok. Ez jól bizonyítja, hogy az SPH módszer alacsony kohézióval valóban nem számottevő.

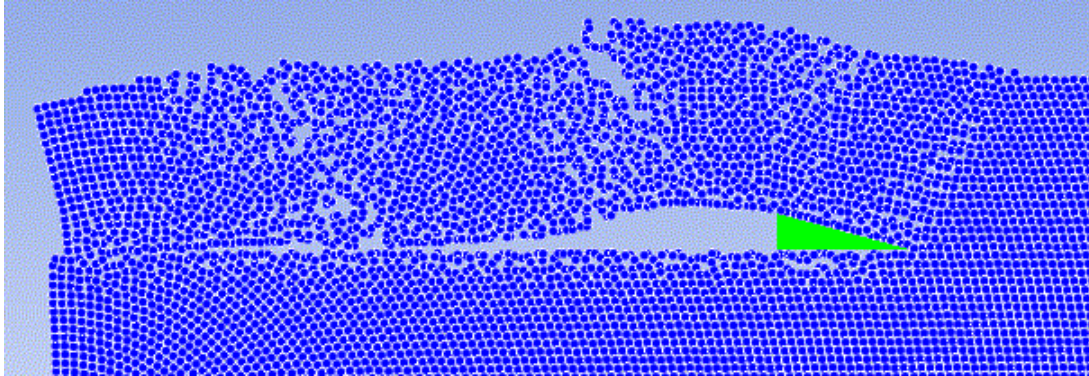


5.4. ábra – c20DP; 0,6 m/s

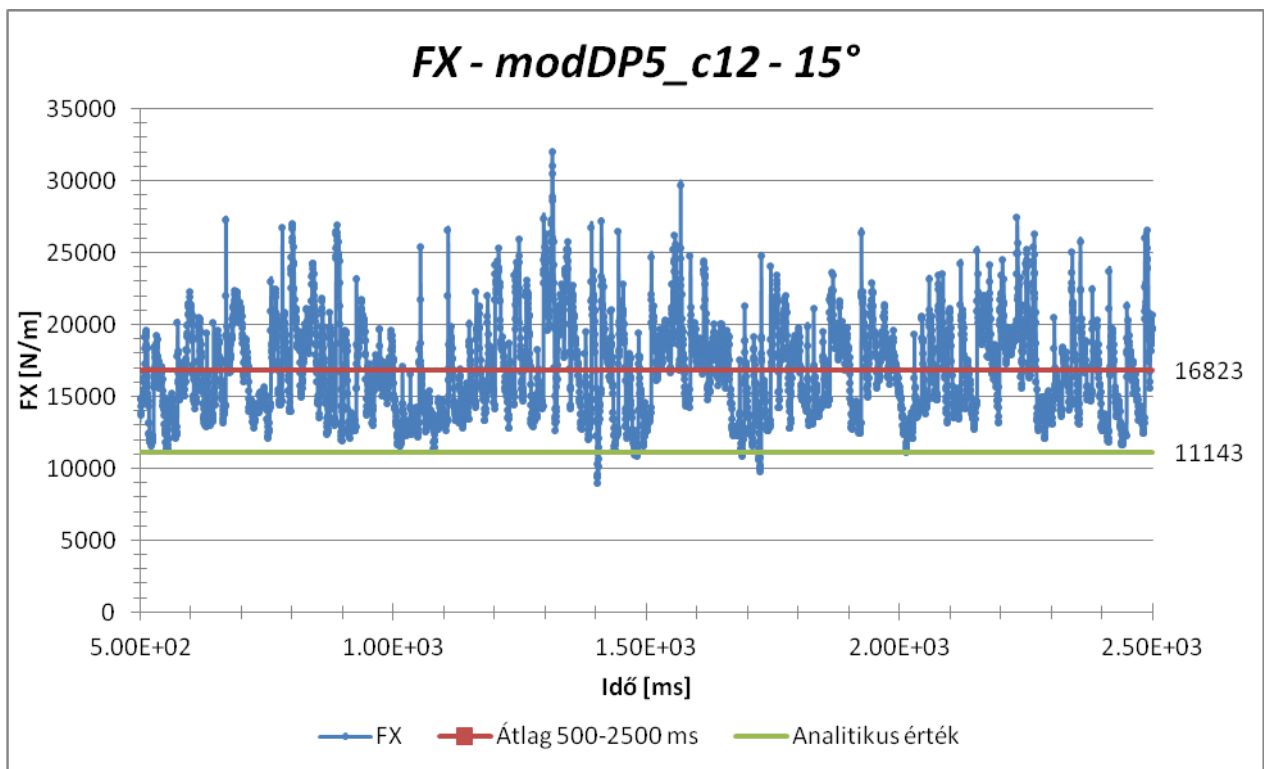
Ezután a beépített lineáris D-P modellhez tartozó *c20DP*-vel kezdtem el dolgozni, amely az 5.3-as ábrán láthatóakkal ellentétben kifejezetten agyagos, erősen összetapadó képet mutatott. Ez a viselkedés közel másfélszer, kétszer nagyobb kohéziót feltételezett volna, mint a beállított érték.

5.5. ábra – modDP5; $\alpha=30^\circ$

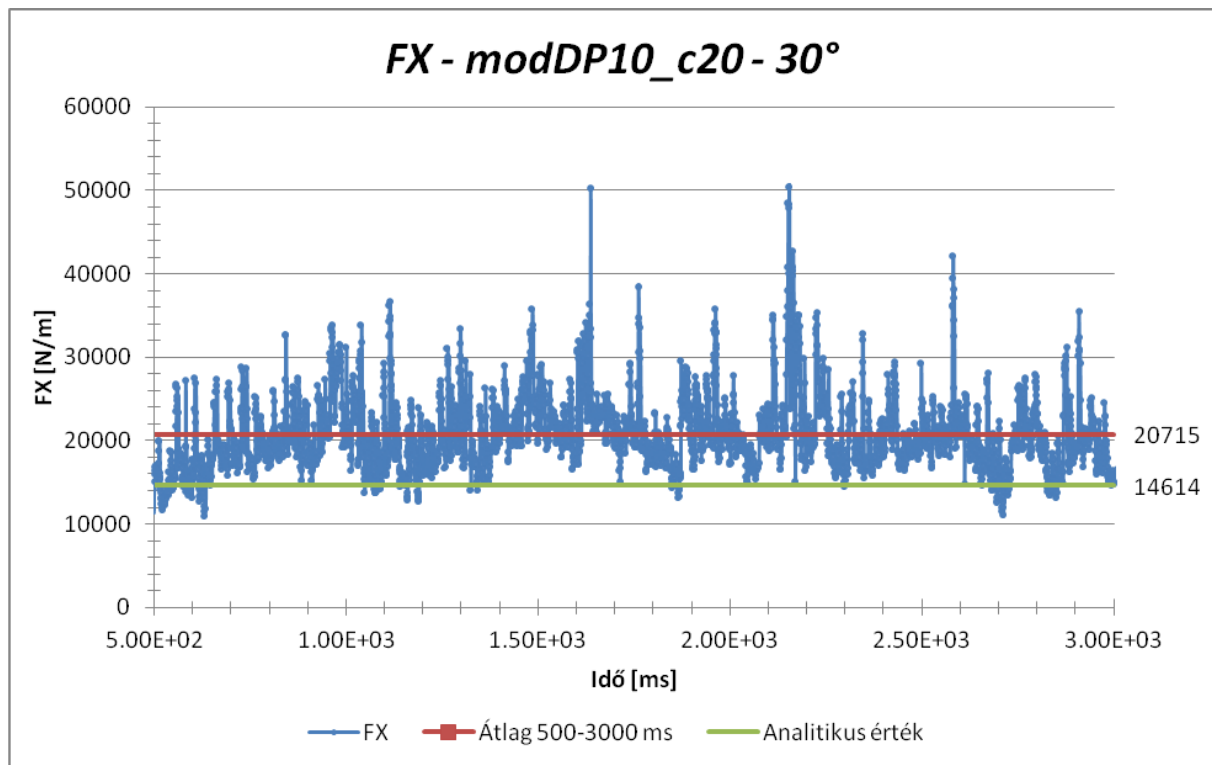
Emiatt döntöttem a módosított DP anyagmodellek létrehozásánál. Ezeket a 4.3.3.-as fejezetben közölt talajbeállításokkal, illetve az 5.2.2.-es fejezetben számított kombinációkban futattam. Az ezekben a szimulációkban kialakult töretnyomokra példát az 5.5.-ös, és 5.6.-os ábrákon láthatunk.



5.6. ábra – modDP5_c12; $\alpha=15^\circ$



5.7. ábra – FX – modDP5_c12 – 15°

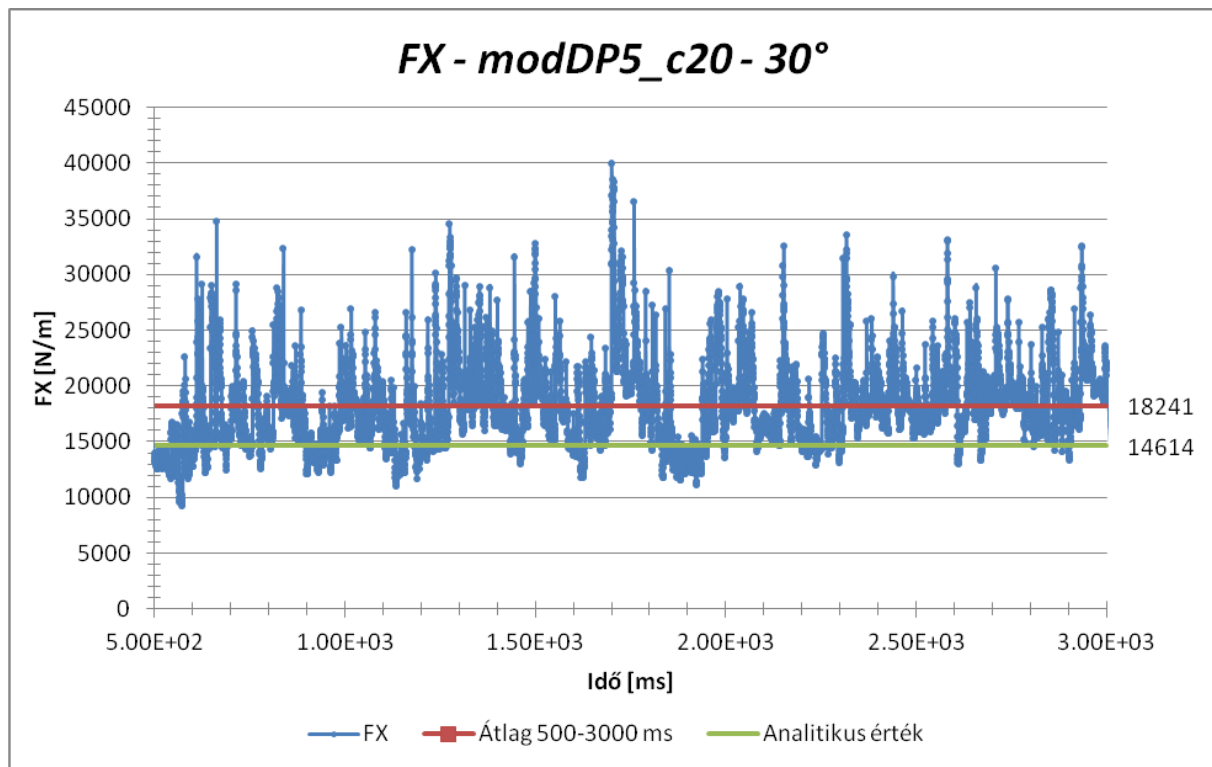


5.8. ábra – FX – modDP10_c20 – 30°

Az 5.7.-es, illetve az 5.8.-as ábrákon két szimuláció eredményeit láthatjuk. Az egyiknél 30°-os éket $c=20\text{kPa}$ kohézió mellett, a másiknál 15°-os éket $c=12\text{kPa}$ kohézió mellett használtam. A letörés nagysága mindkét esetben a c értékének fele. Jól megfigyelhető a vonóerő értékének hullámozása, ami a folyamatosan létrejövő újabb és újabb törési síkok következménye, a 2.13-as ábrán is megjelenő valóságos jelenség.

A piros vonal minden esetben a diagramon látható értékek átlagát, a zöld pedig az 5.1.2.-es fejezetben számított idevágó analitikus értéket mutatja. Jól látszik, hogy a szimuláció azonos mértékben, de mindig felülbecsülte az analitikusan meghatározott értéket. Ha figyelembe vesszük, hogy a 2.1.-es fejezetben bemutatott módszerek statikus állapotra vonatkoznak, vagyis azt az erőt adják meg, ami a földbe beásott szerszám megmozdításához, kiszabadításához szükséges, akkor máris elfogadható a hiba, amelyet kaptunk. Ugyanis könnyű belátni, hogy a mozgó szerszám minél nagyobb sebességgel halad, annál nagyobb ellenállásba ütközik. Az ellenállás természetesen csak egy véges ideig növekszik, utána újra csökken (ezt nevezik nagysebességű földművelésnek), de a mi esetünkben használt 0,6 mm ezt meg sem közelíti.

Annak vizsgálatára, hogy a letörés mértéke mennyiben befolyásolja az eredményeket, érdemes megtekinteni a 30°-os éknél, $c=20\text{kPa}$ mellett, de a c negyedére visszavett földmodell (modDP5_c20) esetén kapott értékeket is. (5.9.-es ábra)



5.9. ábra – FX – modDP5_c20 – 30°

Az modDP10_c20-hoz képest érezhetően csökkent az átlag, és a számított érték eltérése. Amennyiben később bebizonyosodik, hogy az eltérés nem csak a szimuláció dinamikus voltából fakad, a letörés mértékének felülvizsgálása egy életképes lehetőség a kezünkben az eredmények javítására.

5.2. Kultivátor húzóerejének analízise

5.2.1. Alapbeállítások

Következő lépésként egy 3D-ös vizsgálat elvégzését tűztem ki. Ehhez a legcélravezetőbb elsőként egy olyan szerszám használata, amely viszonylag egyszerű geometriával rendelkezik, és a mozgás síkjára nézve szimmetrikus. Az előbbi feltételeket kiválóan teljesíti a mezőgazdaságban egyik legelterjedtebb kultivátorfej típus, az úgy nevezett „lúdtalp”. (5.10-es ábra)

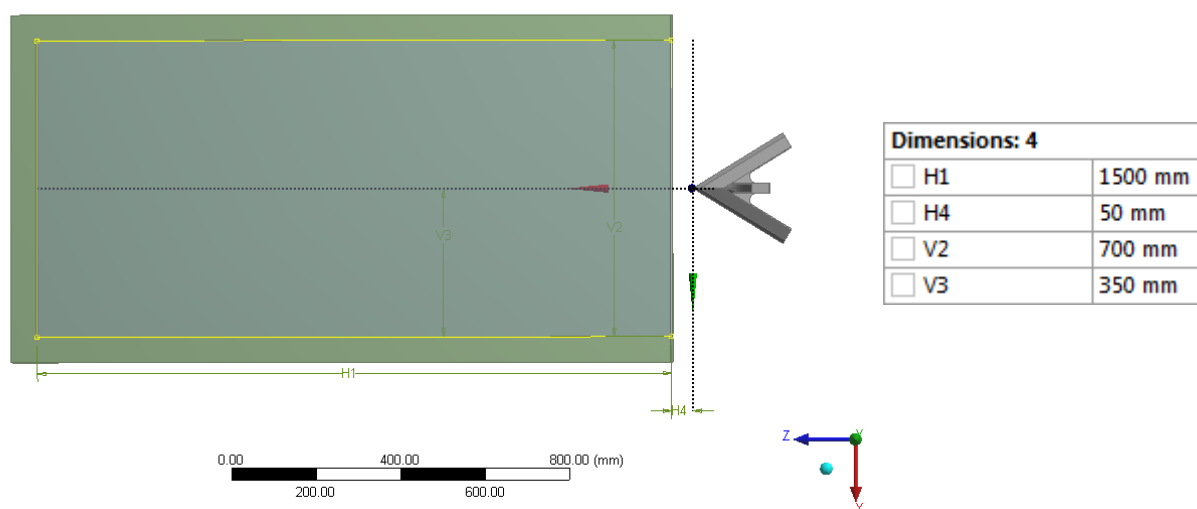
A saját geometriámat (5.11-es ábra) is egy valós kultivátortag után készítettem. A szimulációs elrendezés megalkotásakor az előző fejezetben látható elrendezést vettem alapul. Munkamélységnek itt is 200 mm-t választottam, míg a belső talaj többi mérete az 5.12-es ábráról olvasható le.



5.10. ábra – Egy valós kultivátor

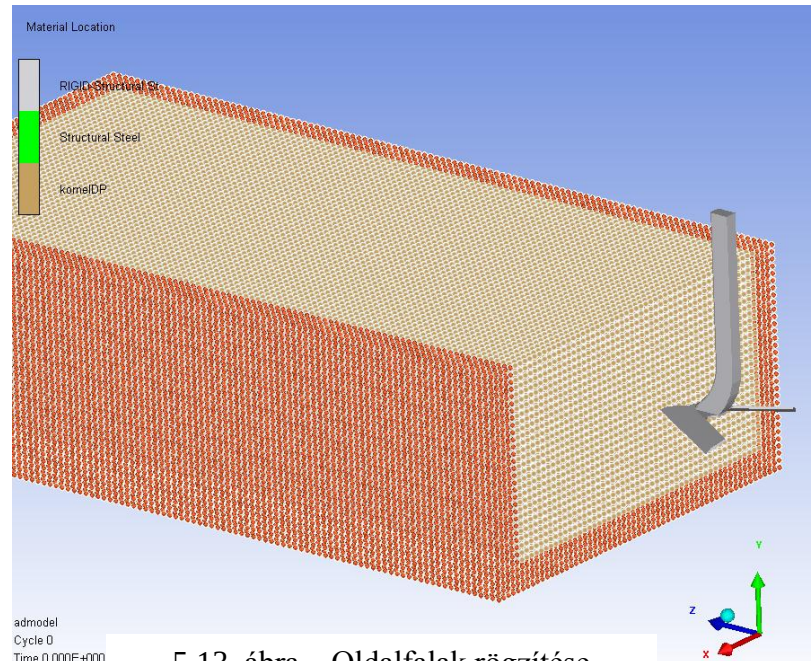


5.11. ábra – A szerszám számítógépes modellje



5.12. ábra – Szimulációs geometria

A belső, laza talajt egy ugyanolyan tulajdonságokkal rendelkező, szintén SPH elemekből álló fallal vettem körül szemből alulról, és oldalról. Ennek vastagsága minden irányban 60 mm. Erre azért volt szükség, hogy biztosítani tudjam a laza talajrészek megfogását a szélső fal rögzítésén keresztül. Mivel a kultivátortag talajra gyakorolt hatása csak egy véges nagyságú területen jelentkezik,



5.13. ábra – Oldalfalak rögzítése

feltételezhetjük, hogy a tőle x távolságban lévő elemek semmilyen alakváltozást nem szenvednek, tehát nem hamisítja meg a szimulációt, ha ezeket az elemeket, vagyis esetemben a külső falat, kényszerrel látom el. Az 5.13-as ábrán a teljes elrendezést láthatjuk, ahol sötétbarna pontokkal lettek kiemelve az elmozdulni nem képes elemek. A belső területet 150ezer részecske alkotja.

A kultivátortag sebességét az előzőekben ismertetett okokból, ugyancsak kezdeti feltétellel 0,6 m/s-nak adtam meg. Továbbá kényszerrel gondoskodtam arról, hogy a szerszám kizárólag Z irányú mozgást végezhesen.

Mivel a kultivátor feladata alapvetően az, hogy elvágja a földben maradt növények gyökereit, a talajlazítás funkciója csak másodlagosan jelentkezik, tehát nem számíthatunk a szemcsék nagymértékű átrendeződésére.

Az anyagtulajdonság definiálásakor az analitikus számításokkal összehasonlítva legjobban teljesítő modDP5_c12 földmodellt alkalmaztam a talajra. Azonban, mert 3D-ben már lehetőségünk nyílik merev testek alkalmazására, a szerszámot már egy merev acél anyaggal töltöttem fel.

5.2.2. Analitikus számítás

Ebben az esetben a 2.1.3.-as fejezetben ismertetett McKyes és Ali féle egyenletet alkalmaztam. Az N konstansok meghatározásához szükséges táblázatok a függelék második részében közlöm. α a szerszám művelő síkjának emelkedési szöge a haladás síkjában nézve, w pedig ugyanerre a síkra merőleges legnagyobb szélessége. A számított érték kN-ban értendő.

$$\rho := 1.840 :$$

$d := 0.2 :$

$w := 0.26125 :$

$g := 9.81 :$

$c := 12 :$

$radconv := \frac{\pi}{180} :$

$\phi := 27 \cdot radconv :$

$\delta := 13.5 \cdot radconv :$

$\alpha := 29.6 \cdot radconv :$

$N\rho := 1.7 :$

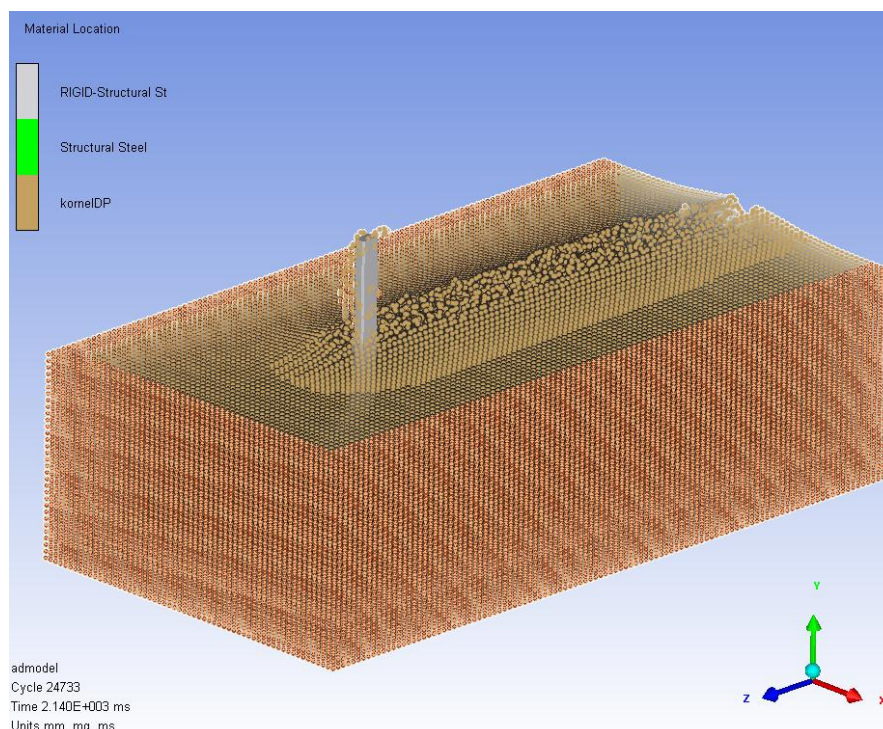
$Nc := 1.7 :$

$H_1 := (\rho \cdot g \cdot d^2 \cdot N\rho + c \cdot d \cdot Nc + o) \cdot w \cdot \sin(\alpha + \delta) =$

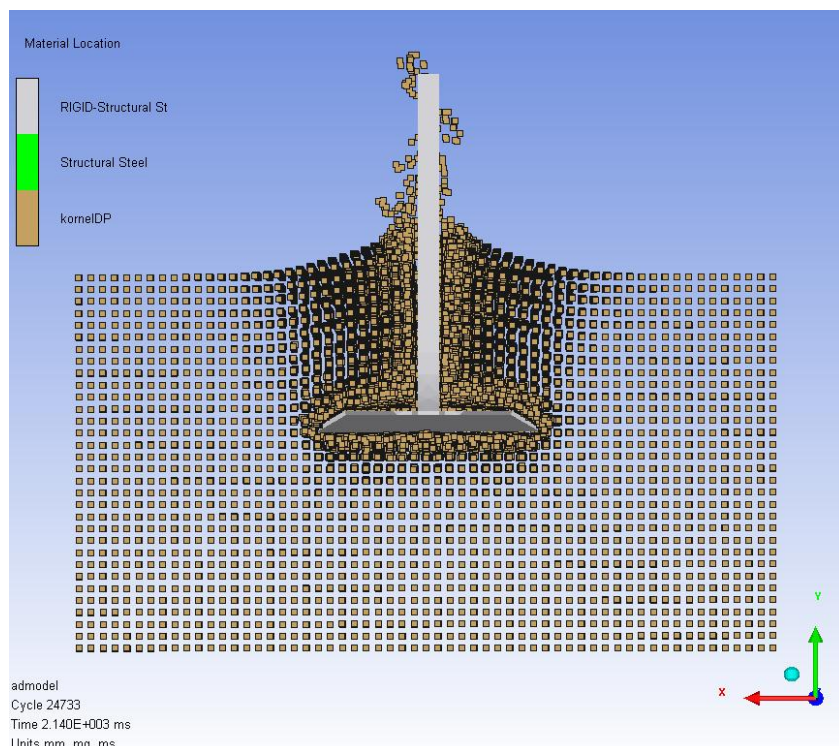
$1.386565356 \sin(0.2394444444 \pi) \xrightarrow{\text{at 10 digits}} 0.9474037433$

5.2.3. Szimulációs eredmények

A kultivátor, ahogy azt vártuk is, csak kis mértékben mozgatta meg a talajt, és nem is alakultak ki látványos törési felületek, ami következtében lényegesen simább erőértéket kapunk. A hatást az 5.14-es és 5.15-ös ábrákon láthatjuk.



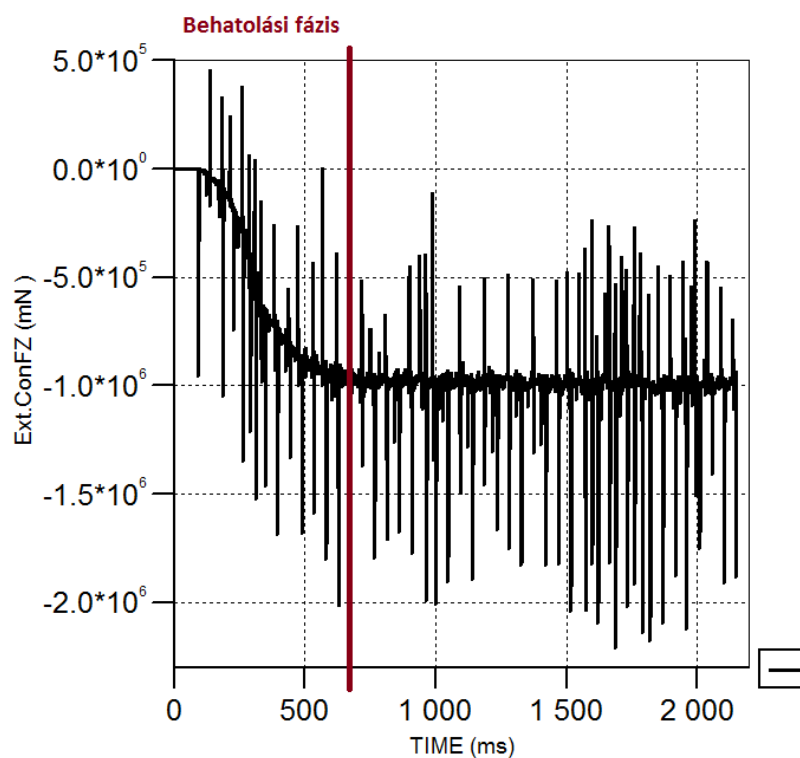
5.14. ábra – A kultivátor hatása a felszínen



5.15. ábra – A talaj keresztmetszete a szerszám után

A szerszám vontatásához szükséges numerikusan számított erő az idő függvényében:

Part Summary (Ident 0 - admodel)



5.16. ábra – FZ–t diagram

Ha a kiugró értékektől eltekintünk, akkor jól látszik, hogy az erő miután elhagytuk a belépési fázist, 1 kN-hoz tart, amely majdnem pontosan megegyezik az 5.2.2.-es fejezetben számított elméleti vonóerővel. A szimuláció az analitikus módszerek alapján sikeresnek mondható.

5.3. Erdészeti talajlazító és a föld kapcsolatának vizsgálata

5.3.1. Alapbeállítások

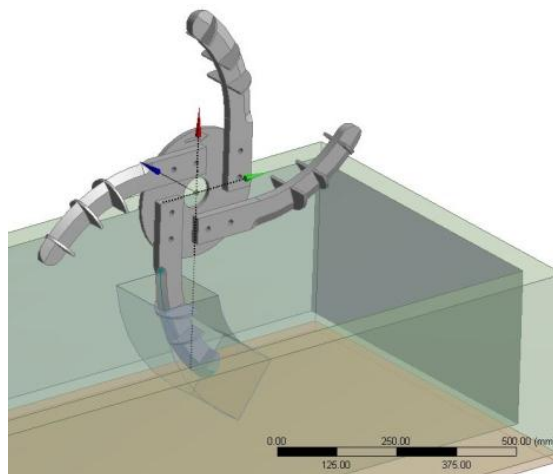
Ebben a fejezetben egy erdészeti talajlazító berendezés forgó részének vizsgálatát végzem el. A geometria megalkotásához a Bagodi Mezőgépgyártó Kft. BPG-600-as típusú berendezését vettem alapul.

A kényszerek továbbra is maradtak az 5.2-es fejezetben leírtak, de a sebesség itt már több komponensből tevődik össze, lévén a szerszám folyamatos forgó mozgást végez 58 1/p fordulatszámmal. Mivel az AUTODYN-ban forgó mozgást kizárólag kezdeti feltételként adhatunk meg, nem maradt választási lehetőségünk a sebesség kényszerezését illetően. Természetesen ez a sűrűség mesterséges megnövelése mellett nem okoz különösebb gondot. A transzverzális sebesség 1,5 km/h.

A szerszám anyaga továbbra is merev acél, míg földként, tekintve a felhasználási környezetet, egy sokkal tömörebb modellt, a c20DP-t választottam. Habár ez még így is inkább egy szántóföldi, rendszeresen művelt lazább talajnak minősül, aminek kohéziója alatta marad az erdők műveletlen, erősen összetömörödött földjeinek kohéziójához képest.

További újítás, hogy ezúttal a szerszámot nem a talajon kívülről, hanem magából a talajból indítom útjára. Hogy ezt megtehessem úgy, hogy a kapcsolatokat detektáló algoritmus számára is maradjon mozgástér, a szerszám körül egy kisebb üreget hoztam létre.

A laza talajrészt 200ezer SPH részecske alkotja.



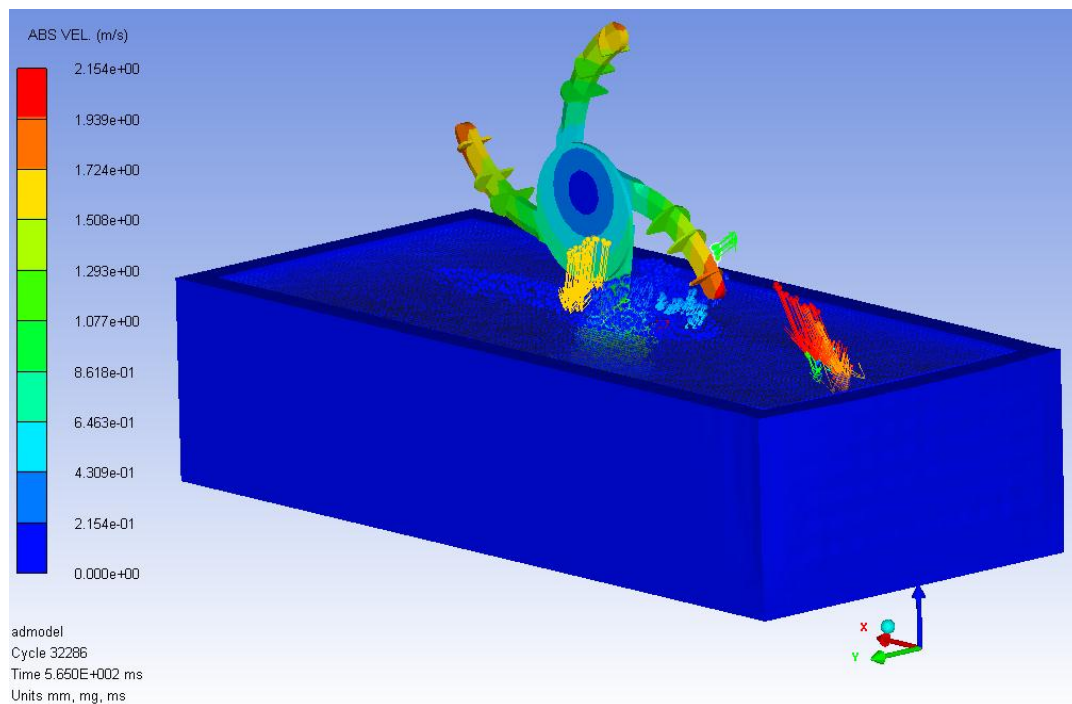
5.17. ábra – A szerszámot körülölelő hézag

5.3.2. Analitikus számítások

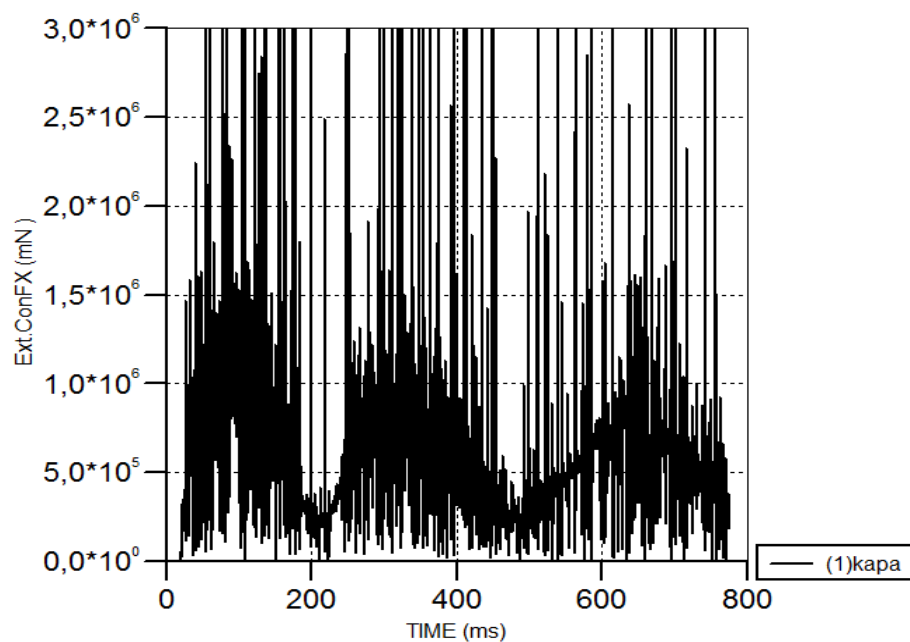
Sajnos ez a probléma már annyira bonyolult, hogy nem állnak rendelkezésre kellő pontosságú analitikusan levezetett módszerek a méretezésre. Mindössze tapasztalati értékekre hagyatkozhatunk, egy ilyen eszköz tervezésénél.

Tekintve a gép maximális teljesítményigényét, és ismerve forgási sebességét, befoglaló méreteit, az $F_{max} = P/(2\pi \cdot n \cdot d/2)$ képletből számítható, hogy a rendszer vonóigénye legfeljebb 14 kN lehet. Figyelembe véve az erőtalaj tömörségét, az esetlegesen előforduló sziklákat, farönköket ez az érték meglehetősen szélsőségesnek kell számítsion, és mindössze tájékoztató jelleggel használható.

5.3.3. Szimulációs eredmények



5.18. ábra – Sebességeloszlás diagram vektorokkal



5.19. ábra – Vonóerő az idő függvényében

Habár a vonóerő diagramján sokkal több a kiugró, valószínűleg hibás értéket kaptunk, mint a kultivátor elemzésénél, azért megjelenik egyfajta sinusos jelleg, amit a forgómozgás alapján elvárunk. Az erő értéke is reálisnak mondható, bár sajnos ezt nincsen lehetőségünk ellenőrizni. (Ne feledjük, hogy az előzőekben számított érték egyfajta abszolút maximum terhelés mellett érvényes!)

A szimuláció legnagyobb érdeme tehát az, hogy megbizonyosodhattunk afelől, hogy a módszer valóban képes megbirkózni 3D-ben is komoly elmozdulásokkal, deformációkkal járó esetek szimulálásával is.

6. Összefoglaló

A szimulációk eredményeit tekintve megállapíthatjuk, hogy az SPH módszer kétségkívül nagy lehetőségekkel rendelkezik a szemcsés anyagok, így a mezőgazdasági talajok analízise területén. A síkbeli futtatásoknál megjelentek a jellegzetes törésvonalak, amelyek a talajműveléskor kialakulnak a földben. A vonóerő értékét is képes voltam jól közelíteni, habár minden futtatásnál határozottan felülbecsülte a program az analitikus módszerek eredményeit. Ez az eltérés részben annak köszönhető, hogy az ismert méretezési eljárások kivétel nélkül statikus állapotot feltételeznek, míg én dinamikus folyamatot modelleztem, de figyelembe kell vennünk a Drucker-Prager modell, illetve az SPH (Smooth Particle Hydrodynamics) megoldó időközben felmerült esetleges hibáit is. A pontosság növelésére létrehozott módosított Drucker-Prager anyagmodellek hatékonysága is kimutatásra került, miközben sikerrel alkalmaztam őket.

A térbeli szimulációk eredményei szintén ígéretes értékeket szolgáltatottak. Egyrészt a síkban jól teljesítő anyagmodellek felhasználásával igen jól közelítettem az analitikus módszer szolgáltatotta értéket a kultivátor esetében, másrészt bizonyítottam, hogy még egy olyan bonyolult probléma esetén is, mint az erdészeti talajlazító, ahol igen összetett a geometria, és nagy deformációk is előfordulhatnak, az SPH valóban képes stabil futást, megbízható számítást biztosítani.

Mindezen eredményeket rövidnek mondható időn belül (síkbeli ~ 12 h; térbeli ~ 72 h), vagyis hatékony módon állítottam elő az ANSYS AUTODYN használatával, amely egy széles körben hozzáférhető, kiforrott, sokrétűen használható, illetve relatíve alacsony áron beszerezhető CAE szoftver. Még az esetenként több százezer elemből álló futtatások hardverigénye sem haladta meg egy hétköznapi háztartási számítógép kapacitását. (Felhasznált hardver: Intel Core Duo 2,4 GHz egyetlen magja; 4 Gb DDR2 RAM)

A dolgozat készítése során természetesen felmerültek problémák, amelyek további fejlesztési lehetőségeket hordoznak magukban. Mindenekelőtt érdemes lenne hitelesíteni az eredményeket valóságos mérések végrehajtásával. Hasznos lenne komolyabban megvizsgálni a módosított anyagmodellek letörési értékeinek befolyását is a számított értékekre, mivel, mint láthattuk, ebben még jelentős tartalékok rejlenek a vonóerő pontosságának szempontjából. A letörés mértékére pedig mérésekkel alátámasztott ajánlás kidolgozása lenne a kívánatos megoldás.

Az SPH elméletének tanulmányozásakor felmerült egy esetben relevánsnak tűnő hibajelenség is, amely „tensile instability” néven vált ismertté. Lényege, hogy húzófeszültség esetén túlzott kohéziót mutathatnak a részecskék, ezzel hamis töretnyomokat létrehozva. A probléma kiküszöbölése Monaghan (1999) elméletével lehetséges, amely optimális bemeneti értékei viszont minden felhasználási területen más és

más nagyságúnak adódnak. H. H. Bui (2007) geológiai talajszimulációkra kikísérletezett értékei jó kiindulási alapul szolgálhatnak mezőgazdasági problémáknál. Ezeknek a módosított egyenleteknek AUTODYN-ben történő implementálása, mezőgazdasági felhasználásra való kalibrálása, hatásuk feltárása további komoly feladat, potenciális fejlesztési lehetőség.

Tehát mindent egybevéve az SPH egy igen ígéretes módszer, amely bár jelenleg még pontatlanabbnak tűnik valamivel, mint a Tamás-Jóri (2010) által használt DEM (Discrete Element Method), rendelkezik még finomítási tartalékokkal, és már most egyértelműen könnyebben kezelhető, kisebb hardverigényű, és rövidebb időigényű módszer.

7. Felhasznált irodalom

J.J. Monaghan, 1988 "An introduction to SPH," Computer Physics Communications, vol. 48, pp. 88–96,.

Ha H. Bui: 2007 Lagrangian mesh-free particles method (SPH) for large deformation and failure flows of geomaterials using elasto-plastic soil constitutive models, Ph.D. Thesis, Ritsumeikan University, Japan, March.

Ha H. Bui, K. Sako, R. Fukagawa, J.C. Wells 2008: SPH-Based Numerical Simulations for Large Deformation of Geomaterial Considering Soil-Structure Interaction , Ritsumeikan University, Japan

McKyes 1985, Soil Cutting and Tillage (Developments in Agricultural Engineering)

ANSYS hivatalos tananyagok: Mechanical Structural Nonlinearities, Introduction to ANSYS Explicit Dynamics, Introduction to ANSYS AUTODYN

ANSYS 2005 AUTODYN SPH User Manual

ANSYS AUTODYN v12 User Manual

Kerényi György 1996: A talaj vágásának modellezése végelemek módszerrel. Doktori értekezés, Budapest, , (Hungarian)

Mouazen, A.M., Neményi, M.: 1996.Tillage Tool Design by the Finite Element Method, Pannon Agricultural University, Hungary

Hettiaratchi, D.R.P.: 1993. The development of a powered low draught tine cultivator. Soil Tillage Res. 28, 159-177

McKyes, E., Ali, O.S., 1977. The cutting of soil by narrow blades. J. Terramechanics 14(2), 43-58.

Terzaghi, K., 1943. Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.

J.J.Monaghan 1999, SPH without a tensile instability, Monash University, Clayton, Australia

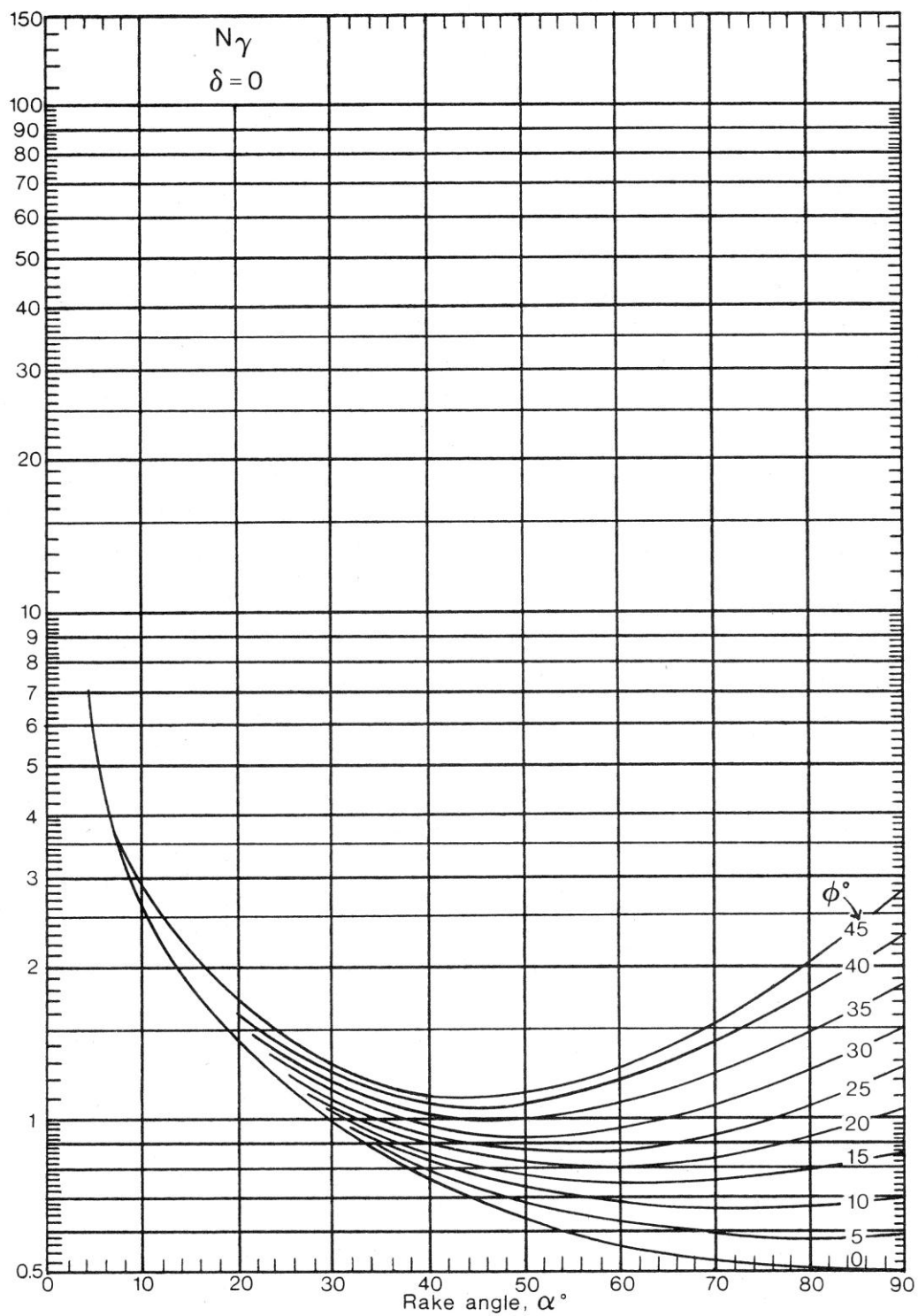
Ha H. Bui 2004: Development of the discrete element computer code (DEM) to simulate soil excavations, Master thesis, Ritsumeikan University, Japan

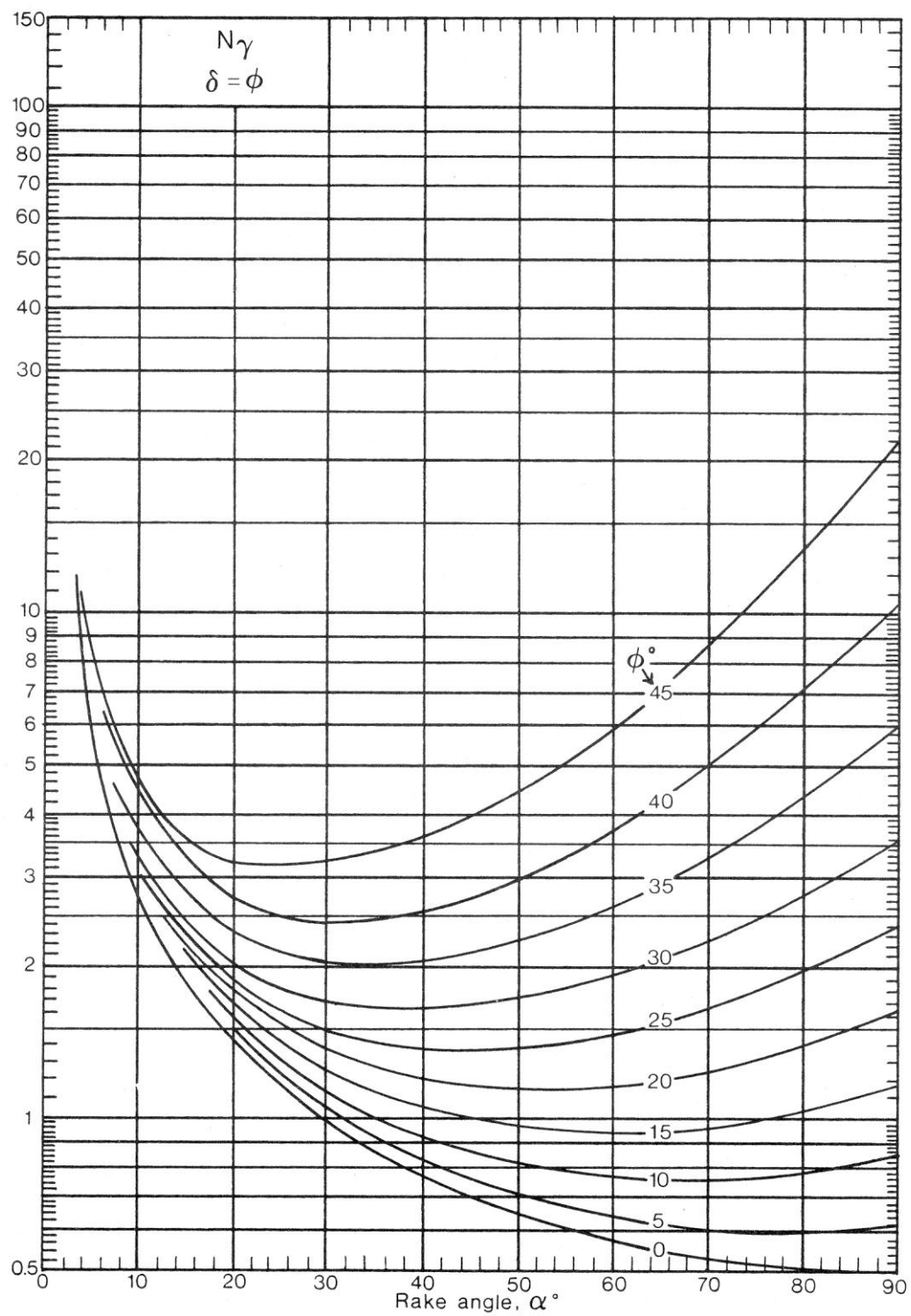
Kornél Tamás, István J. JÓRI 2010: Numerical Approaches in Tillage and Soil Modelling, Budapest University of Technology and Economics

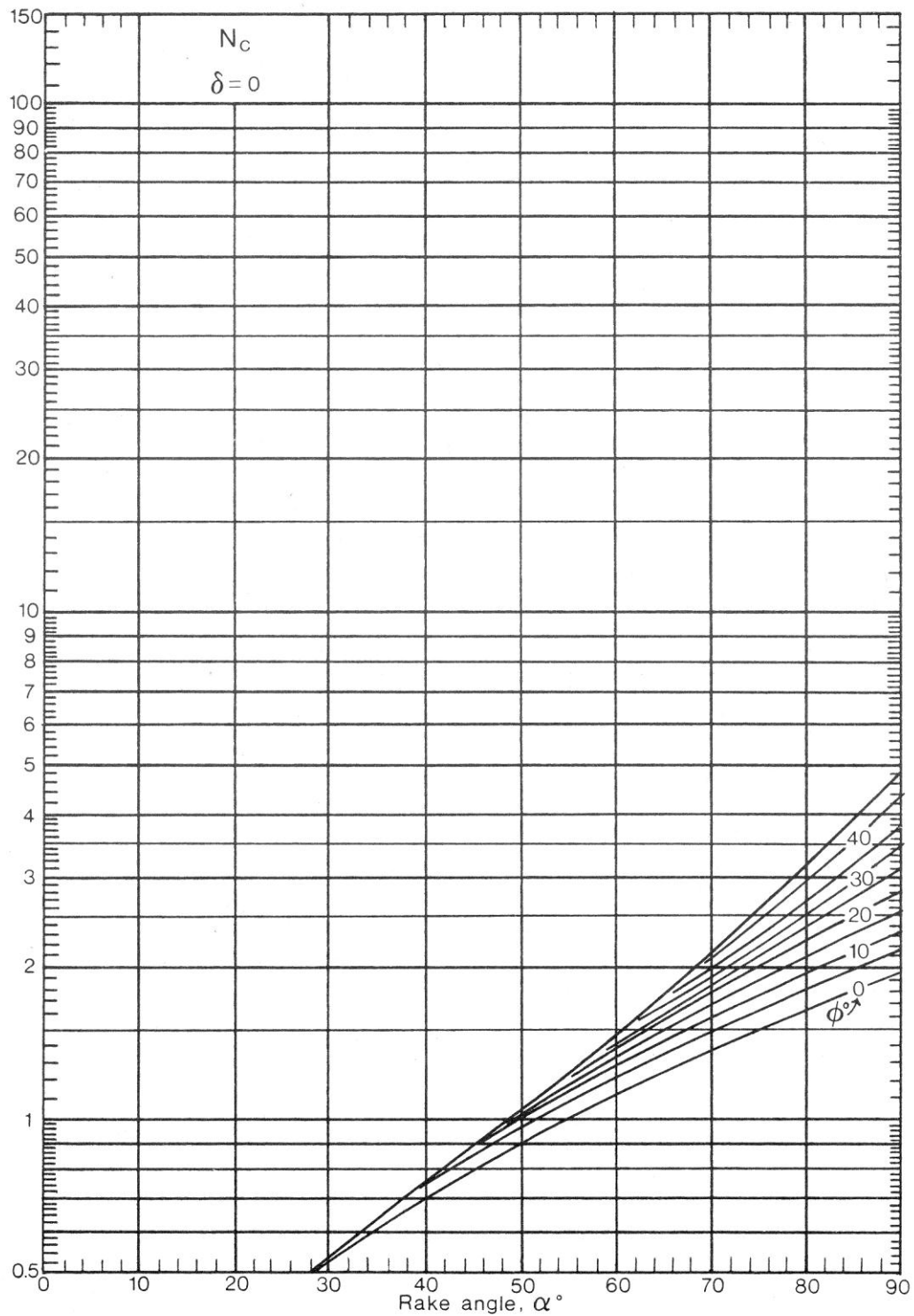
Kornél Tamás, István J. JÓRI 2009: FEM Analysis Of The Soil-Tool (Sweep) Interaction, Budapest University of Technology and Economics

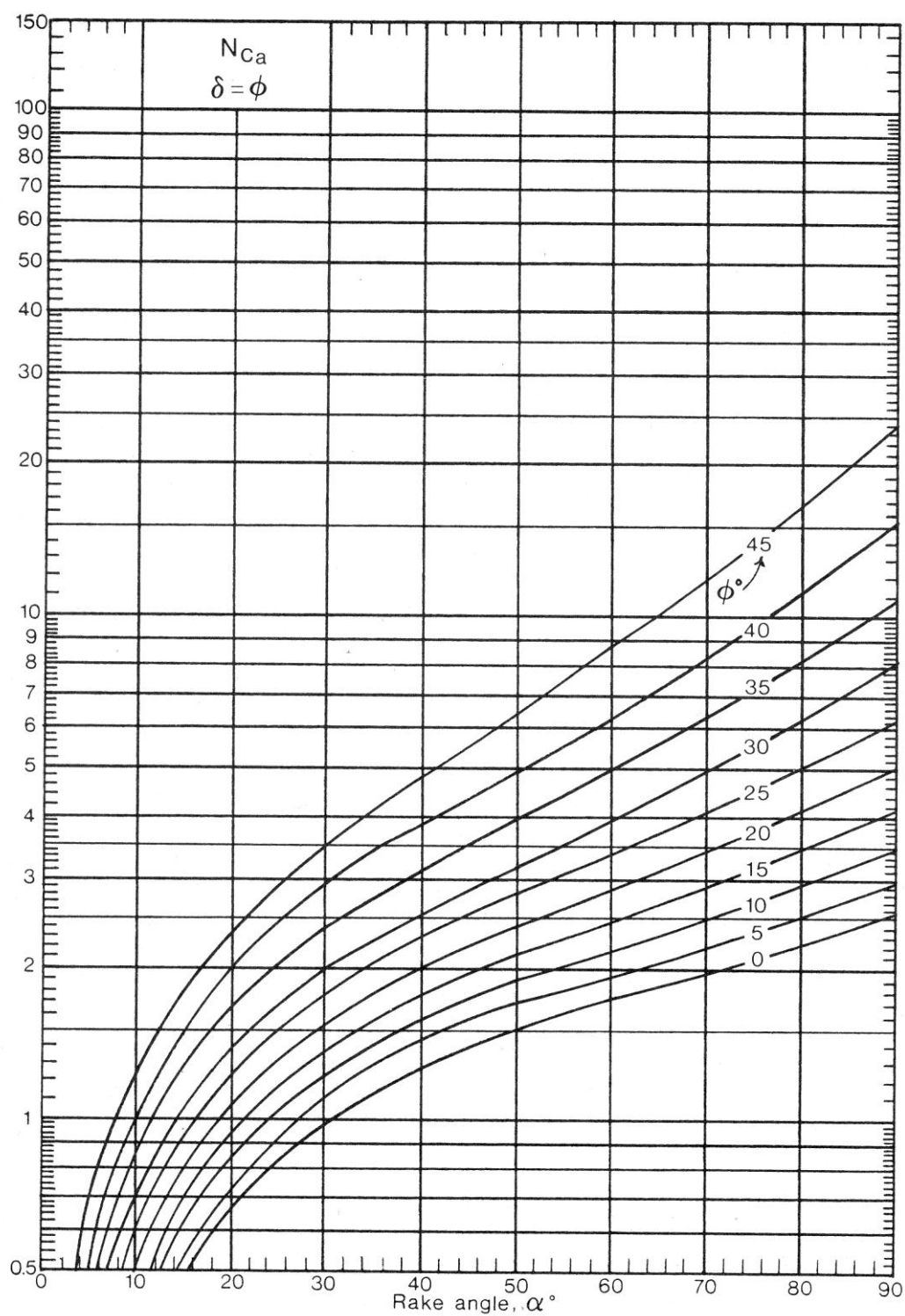
8. Függelék

8.1. Hettiaratchi és Reece féle egyenlethez

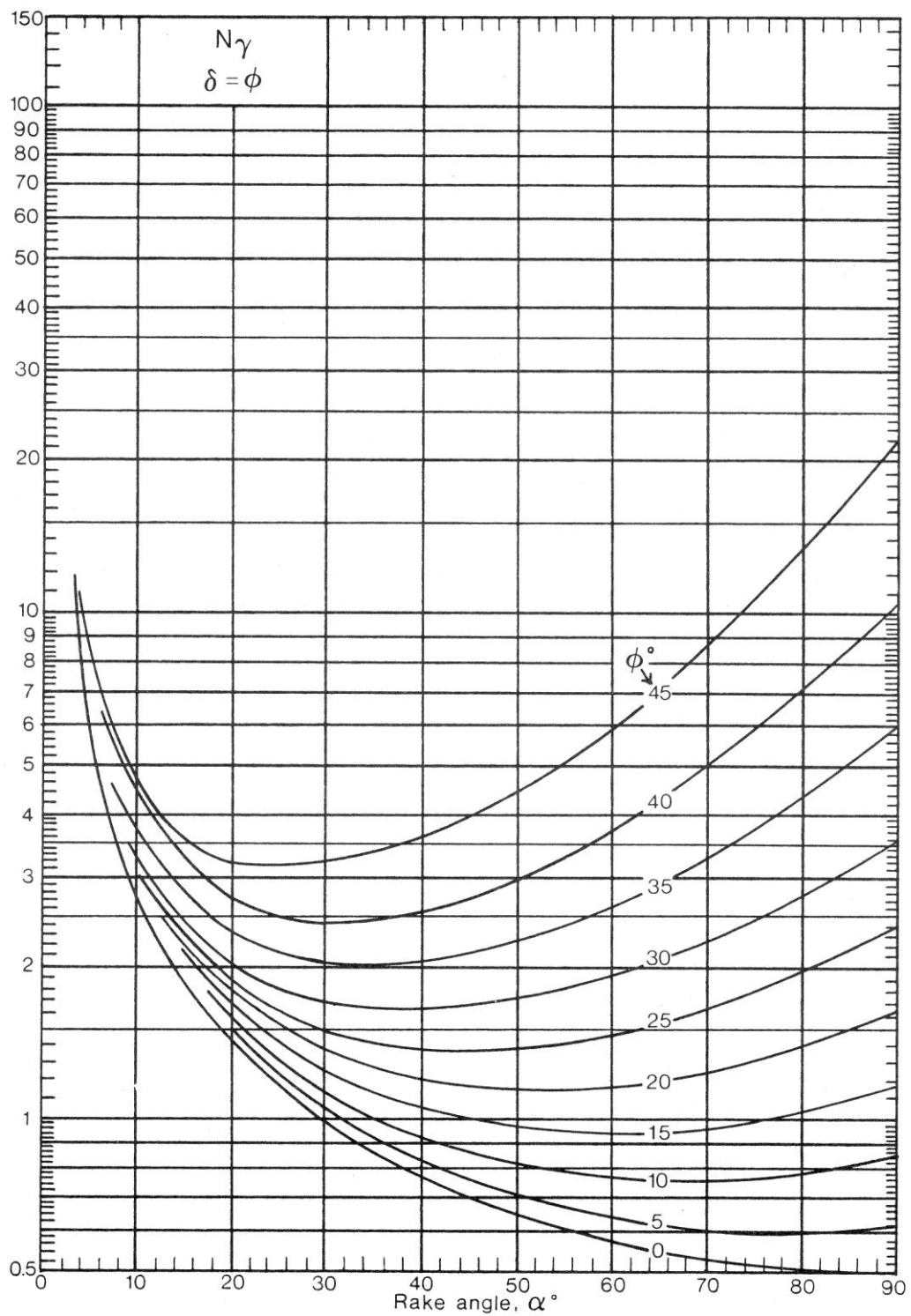


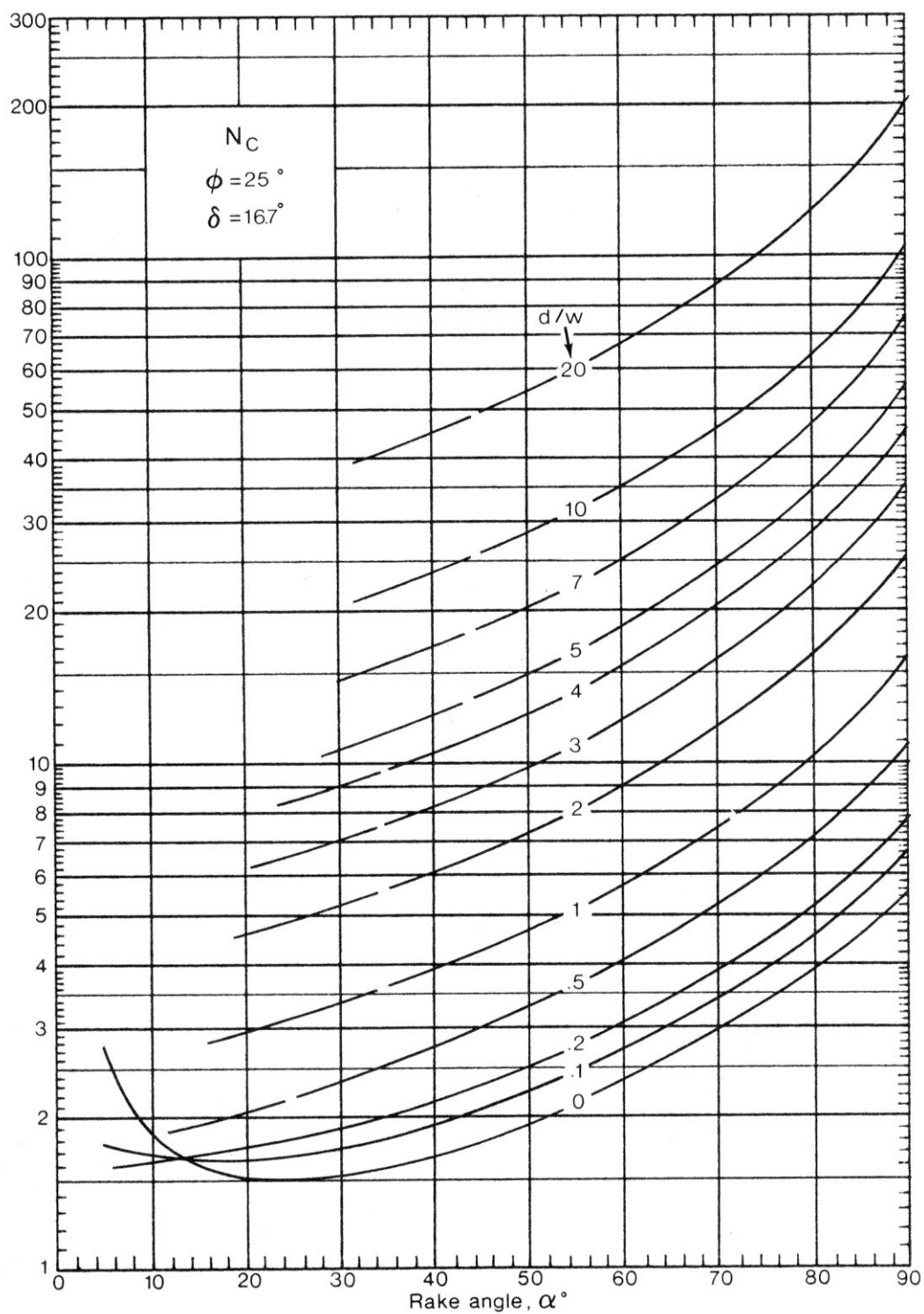






8.2. McKyes és Ali féle egyenlethez





Budapest, 2011. november 9.

Aláírás