

Festékrétegek töredezésmintáinak kísérleti és elméleti tanulmányozása

Szerző:

Bakos Katinka

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Fizika Kar, fizika szak, alapképzés, III. év

Témavezetők:

dr. Néda Zoltán egyetemi tanár,

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Fizika Kar

Dr. Járai-Szabó Ferenc egyetemi adjunktus

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Fizika Kar

2012. június 30.

Tartalomjegyzék

Kivonat.....	3
I. Bevezető.....	4
II.1. Egy egyszerű fragmentációs modell	6
II.2. Egy komplexebb megközelítés: A rugó-tömb modell.....	8
II.3 A 3D rugó-tömb modell bemutatása.....	10
III.1. Kísérletek leírása.....	13
III.2. Kísérleti eredmények bemutatása.....	15
III.3. A modell parametrizálása.....	18
Következtetések. Kitekintő.....	26
Irodalomjegyzék.....	29

Kivonat

Kutatásaink során festékrétegek száradásakor létrejövő töredezésmintázatokat tanulmányoztunk kísérletileg és egy számítógépes modell alkalmazásával. Vizsgáltuk a törésmintázatoknak a réteg vastagságától való függését. Kísérleteinkhez egy különleges, könnyen töredező körömlakkot használtunk, melyet acetonnal hígítottunk és kontrollált módon párologtattunk üvegfelületeken. A párolgás során az üvegfelületen egy instabil festékréteget kaptunk, amely a száradás után összetöredezett. Változtatva az oldat mennyiségét különböző rétegvastagságokat sikerült előállítanunk. Ugyanakkor egy számítógépes rugó–tömb modell segítségével, amelyet a BBTE keretében fejlesztettek ki, szimuláltuk a jelenséget és a rétegvastagság függvényében tanulmányoztuk a töredezési mintázatokat.

A kísérleti és számítógépes szimuláció eredmények jó egyezést mutatnak. Mindkettő igazolja a már korábban megállapított skálatörvényeket az átlagos fragmensnagyság rétegvastagságtól való függésére.

I. Bevezető

Mindenki számára ismerős kép a száradó föld töredezésének mintázata vagy régi festmények repedezése. Ez a töredezési mechanizmus megtalálható mikroskálától makroskáláig, éppen ezért felmerült az igény, hogy többet tudjunk meg ennek működéséről.

Mi egy száradó rendszer dinamikája? Hogyan lehet ezt modellezni, szimulálni? Milyen törvényei vannak? Mindezekre a kérdésekre keresik a választ régi és új kutatások. A legújabb eredmények bebizonyították, hogy egy diszkrét rugó-tömb modellel elegánsan vissza lehet kapni a töredezési formákat és skálázási törvényeket száradó anyagok esetében [1]. Ugyanilyen modellből kiindulva sikeresen szimulálták az üveg töredezését [2], valamint előállítottak spirál alakú töredezéseket száradó anyagokban [3, 4].

A jelen dolgozat ezen kutatások hatására tűzte ki célul egy valós három dimenziós rugó-tömb modell felhasználását realisztikus töredezések előállítására különböző rétegvastagságokban, amit kísérleti eredményekkel hasonlít össze.



I.1. kép: Különböző anyagok töredezése (Forrás: [5]).

A felhasznált szimulációs programot, amit Néda Zoltán munkássága ihletett, Dombi András mesteris diák fejlesztette [6]. A program a jól bevált rugó-tömb modellcsalád egy sikeres alkalmazása, amely lehetőséget nyújt vékony rétegek töredezésének szimulálására - a valós, háromdimenziós esetben is. Ezt a fontos jellemvonását igyekeztünk kiaknázni, előállítva különböző realisztikus töredezéseket más-más rétegvastagságban. Ehhez szükséges volt megtalálni a modellben a kulcsfontosságú paramétereket,

és megérteni azok szerepét a töredezőminták kialakulásában.

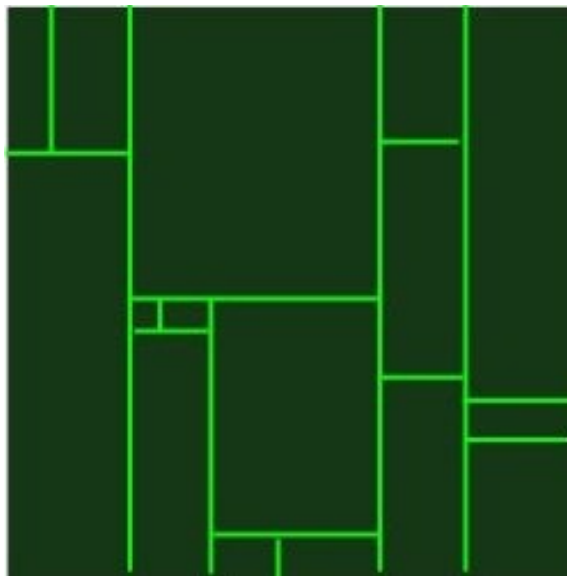
Továbbá munkák részét képezte egy töredező festékanyag különböző vastagságának előállítása, amely segítségével igazolni lehetett a már meglévő törvényeket az átlagos fragmensnagyság rétegvastagságtól való függésére.

A dolgozat II. fejezetében egy egyszerű fragmentációs modellen keresztül ismertetjük a rugó-tömb modell alapelvét, valamint a számítógépes megvalósítását. Továbbá a III. fejezet tartalmazza a kísérleti eljárásunk dokumentálását és az eredmények tárgyalását, valamint a szimulációs program eredményeit. A dolgozat végén a IV. fejezetben összefoglaljuk az elért eredményeket.

II.1. Egy egyszerű fragmentációs modell

A legegyszerűbb törésmintázat kialakítható, ha egységnyi felületet n darab töréssel feldarabolunk úgy, hogy a törésvonalak vonaltól vonalig terjednek.

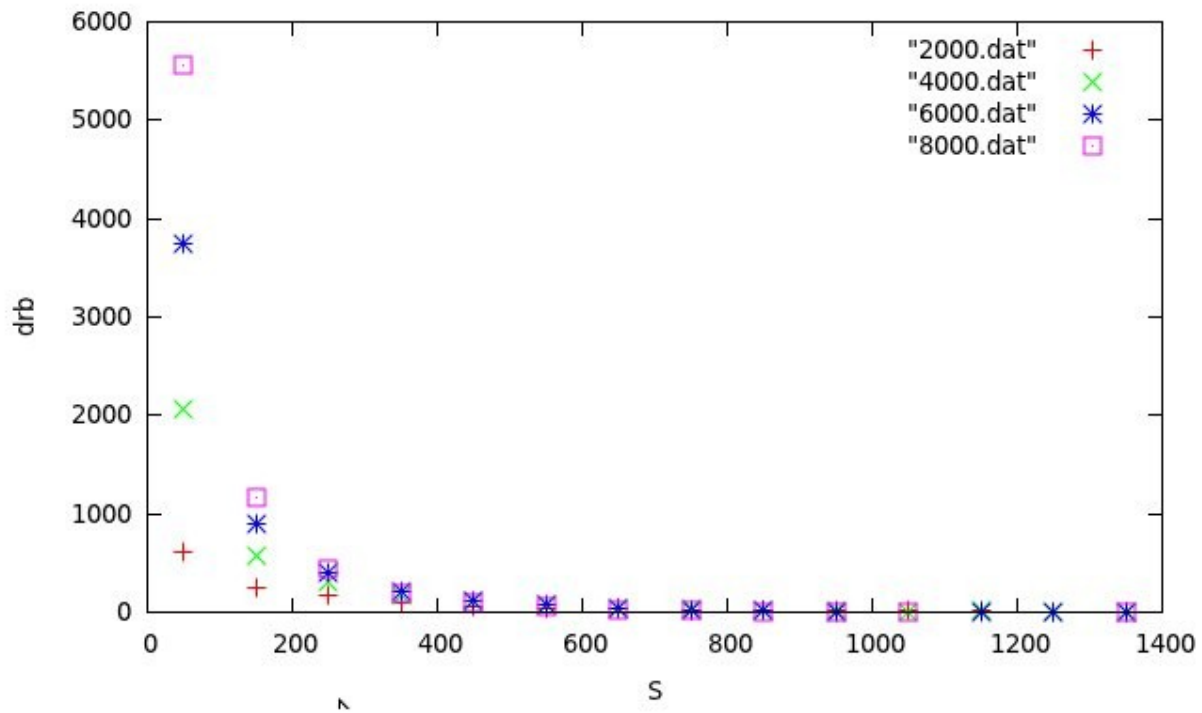
Programozás szempontjából ez megoldható, ha egy nullával feltöltött $N \times N$ -es tömbben egyeseket írunk be véletlenszerűen sorokba vagy oszlopokba, ezek jelképezvén az egyenes törésvonalakat. Ugyanakkor ezek a törések csak egy meglévő vonalból indulhatnak ki és egy másik vonalnál érhetnek véget. Az így kapott rendszer egyszerűsége ellenére is sok érdekes információt tud nyújtani, előrevetítvén bizonyos szintig a később kapott eredményeket.



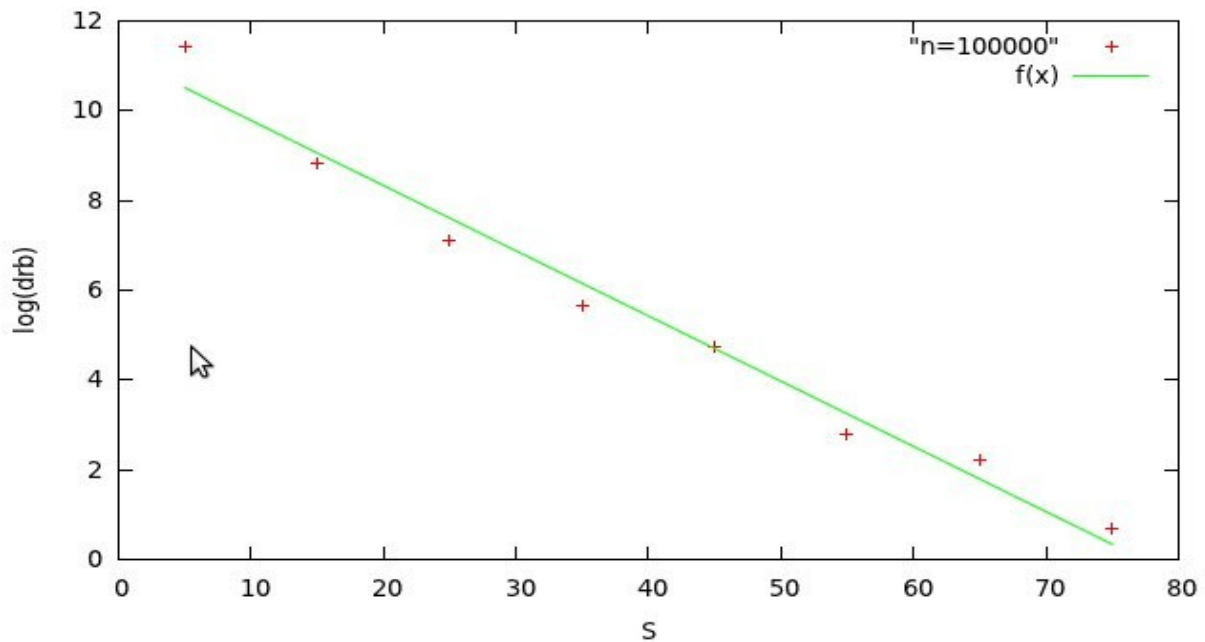
II.1.1. ábra: Egységnyi felület felosztása törésvonalakkal vonaltól vonalig .

A dolgozat további részében a releváns mennyiségünk a fragmensek nagysága (S) lesz. Ebben a kétdimenziós modellben megkapjuk az S értékeit, ha megszámloljuk hány nullás van körbehatárolva egyesekkel. Ezek ismeretében vizsgálhatjuk a fragmenseloszlást a törésvonalak függvényében.

A program megírása során paraméterként kezeltem a törésvonalak számát. Egy 1000×1000 -es tömb fragmentálása során vizsgáltam miként alakul a fragmenseloszlás a törésvonalak függvényében. A II.1.2. ábrán látható, hogy minél nagyobb a törésvonalak száma, annál inkább exponenciális a fragmenseloszlás.



II.1.2. ábra: A fragmenseloszlás változása különböző törésszámokra.



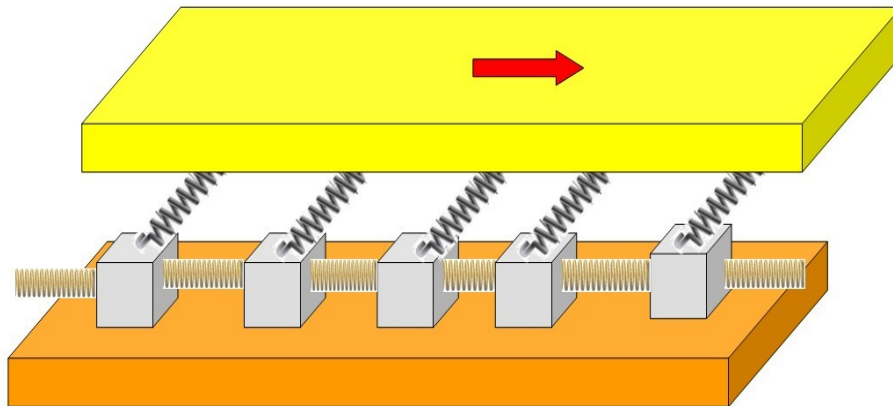
$$f(x) = -0.145 * x + 11.24$$

II.1.3. ábra: A fragmenseloszlás kellő nagy törésszámnál exponenciális eloszlást ad.

II.2. Egy komplexebb megközelítés: A rugó-tömb modell

A fizika területén belül nagy népszerűségnek örvend az az egyszerű modell, amit először Burridge és Knopoff 1967-ben alkalmazott a földrengések jobb megértése végett [7].

A rendszer maga, ahogyan a neve is jelzi, tömbökből és rugókból tevődik össze. Képzeljük el egy felületen egyeneletesen elhelyezett tömbök sokaságát, amelyek szomszédaikkal rugók segítségével hatnak kölcsön. Ugyanakkor minden tömböt rugó segítségével egy felső laphoz is kapcsolunk, ezt a lapot pedig egyenletes sebességgel húzni kezdjük. Ekkor a tömbökre kétféle erő hat: egy eredő rugalmas erő és a súrlódási erő a felülettel. A rugók egy darabig megnyúlnak, amíg egyik tömb esetében a súrlódási erőt legyőzi a húzó erő, és a tömb megcsúszik. Ez maga után vonja szomszédainak megcsúszását is, amely egy lavinaszerű elmozdulást eredményez.



II.2.1. ábra: Az egydimenziós rugó-tömb modell vázlata (A kép forrása: [8]).

Ez az ún. önszerveződő viselkedése a rugó-tömb típusú modelleknek utat nyit széles körű alkalmazási lehetőségeknek. A modellnek köszönhetően mára már közelebb kerültünk néhány fontos komplex rendszer viselkedésének megértéséhez. Ide tartozik a földrengések nagyság szerinti eloszlása amit az empirikus Gutenberg-Richter törvény fejez ki [9], forgalmi dugók kialakulási mechanizmusának a leírása [10], nanocsövek önszerveződése [11, 12], ablaküveg töredezése [2], a mágneses Barkhausen zaj modellezése [13].

Külön említendő (és a dolgozat témájához kapcsolódik) a modell alkalmazása száradás során kialakuló töredezésmintázatok leírására [1, 3, 4].

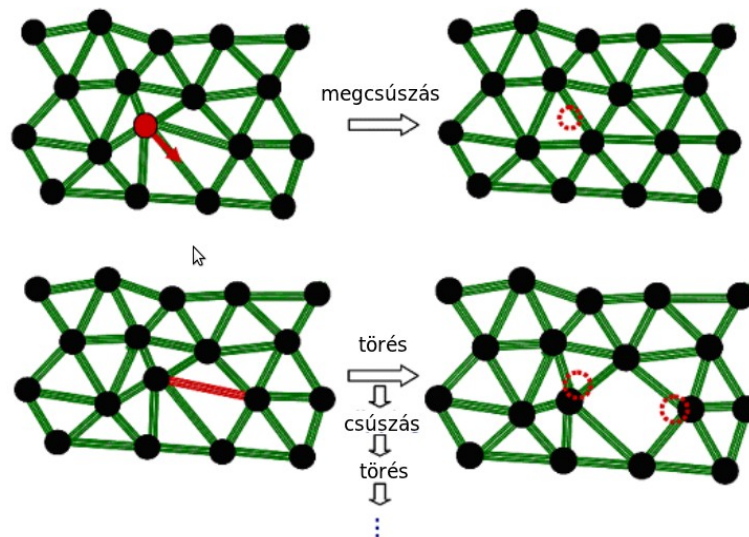
A nedves anyagban a tömbök az anyagszemcséknek felelnek meg, míg a rugók a köztük levő folyadékhidaknak. Száradás során a szemcsék közti feszültség megnő, amit a rugók rugóállandójának növelésével lehet jellemezni. Ennek a feszültségnek a hatására a tömbök elmozdulnak, új egyensúlyi állapotba kerülve. Ahogy tovább nő a rugóállandók értéke, azaz egyre jobban szárad a rendszer, új elmozdulások következnek be. Ez az egymást követő elmozdulás, majd relaxálódás vezet el a törésvonalak kialakulásához.

Ennek a modellnek a három dimenziós változata képezi az általunk használt szimulációs program alapját. A leírt kétdimenziós modellbe bele lehet építeni a harmadik dimenziót, ha több rugóval kapcsoljuk össze a szomszédos tömböket: minél több rugó valósítja meg a kapcsolatot, annál vastagabbnak tekinthető a szimulált réteg [1]. Számunkra azonban fontos volt, hogy minél realisztikusabb modellt használjunk a töredeзések kialakítására, ezért egy valós három dimenziós felépítéssel végeztük a szimulációkat.

II.3 A 3D rugó-tömb modell bemutatása

A számítógépes modell, amelynek segítségével szimuláltuk a festékréteg töredezését a fent bemutatott rugó-tömb modellre alapszik.

A háromdimenziós modell esetében a tömbök egy köbös rácsrendszer csúcspontjain helyezkednek el, amely valamilyen felületen fekszik. Kezdetben minden tömböt összekötünk rugók segítségével a legközelebbi szomszédaival. Ahhoz, hogy a töredezések kialakulásában legyen némi rendezetlenség, egy rendezetlenséget befolyásoló paraméter használatával néhány véletlenszerű rácspontot kimozdítunk eredeti helyzetéből. A rugóknak azonos a rugóállandójuk, aminek jól meghatározott kezdőértéke van, ez viszont a szimuláció során folyamatosan változik.

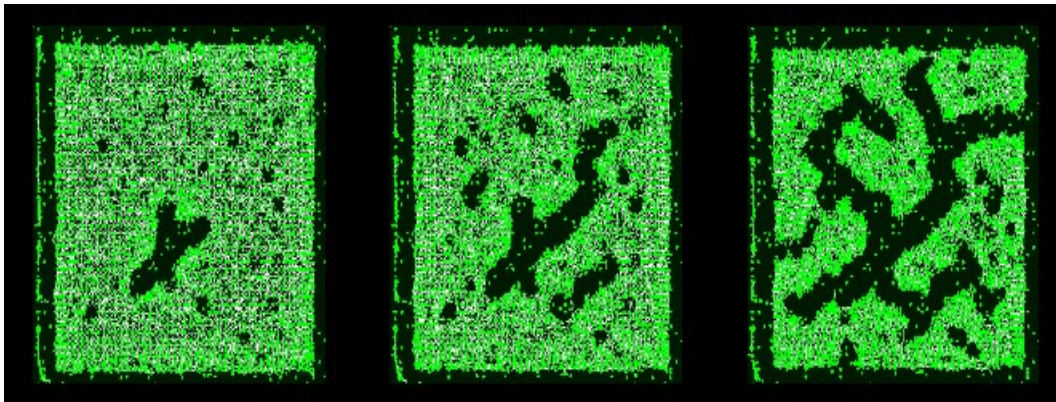


II.3.1. Ábra: Csomópontok elmozdulása és kötések elszakadása.

A tömbökre kétfajta erő hat: a rugók által ható rugalmas erő és a súrlódási erő, ami a tömbök és a felület között lép fel. Ha egy tömb esetében az eredő rugalmas erő legyőzi a súrlódási erőt, a tömb elmozdul, új egyensúlyi állapotba igyekezve. A következő időlépésben miután minden tömb megtalálta egyensúlyi állapotát, azaz a rendszer relaxálódott, a rugóállandók értékét megnöveljük – ebben rejlik a száradási folyamat szimulálása, ugyanis száradáskor a szemcsék közti feszültség megnő, ami jól jellemezhető a rugóállandók növelésével. Ennek hatására újabb elmozdulások következnek be, ami után a rendszer ismét relaxálódik. Ez a két folyamat váltja egymást a szimuláció során (II.3.1. Ábra).

A tömbök helyváltoztatásaik során nem kerülhetnek közelebb egymáshoz egy adott minimális távolságnál. Erre azért van szükség, hogy két szomszédos tömb ne csússzon egymásra. Míg a tömbök csak helyüket változtatják, addig a rugókkal más is történik: az elmozdulások során a rugók megnyúlást szenvednek, és ha a bennük fellépő rugalmas erő meghalad egy meghatározott küszöbértéket, a rugó elszakad. Ez megszünteti a két tömb közötti kölcsönhatást, amelyek az adott rugóval voltak összeköttetésben. A rugó elszakadásának következtében ezek a tömbök jobban elcsúszhatnak, maguk után rántva szomszédaikat, ami még több rugó elszakadását eredményezi. Ez a lavinaszerű folyamat vezet egy törésvonal kialakulásához és terjedéséhez.

A c++ programozási nyelvben megírt program futtatásakor a szükséges paraméterek a rendszer nagysága ($n_1 \times n_2 \times n_3$, ahol n_3 a rétegvastagság), a randomizáló paraméter, a súrlódási erő értéke (F_s), a rugalmas erő maximális értéke (F_t), a kezdeti rugalmassági állandó (k), az időlépés (dt), valamint a rugók egyensúlyi hossza (l_0). A program egy adat fájlba menti le minden dt időlépésben az összes tömb koordinátáit. Ezt használja fel egy Java-ban megírt vizualizációs program, amellyel ki lehet rajzolni minden időlépésben a rendszerben levő tömbök helyzetét és a köztük meglévő kapcsolatokat. Így nyomon követhető a tömbök elmozdulása és a kapcsolatok megszakadása, azaz maga a törésvonalak keletkezése és terjedése. Az ábrázolás három dimenziós esetben felülnézetből történik, így azok a törésvonalak láthatóak, amelyek teljesen átszelik függőleges irányban a réteget.



II.3.2. ábra: Törésvonal kialakulása és terjedése a szimulációs modell keretében (50x50-es rács esetében, 4-es rétegvastagsággal, $F_s = 5$, $F_t = 20$, $l_0 = 7$)

Ily módon a kísérleti törésmintákhoz hasonló jellegzetes képet kapunk, amit velük azonos módon lehet elemezni. A kapott töredeзések esetében kérdés számunkra hogy hogyan változik az átlagos fragmensnagyság a rétegvastagság függvényében. Az átlagos fragmensnagyság (S) mindegyik kép esetében meghatározható, ha megszámloljuk egy kijelölt egységnyi térfogatban a darabok számát (N_f):

$$S = \frac{V}{N_f} = \frac{1}{N_f}$$

Ábrázolva az S átlagos fragmensnagyságot a h rétegvastagság függvényében választ kapunk arra, hogy hogyan skálázódik az átlagos fragmensnagyság a vastagság függvényében.

III.1. Kísérletek leírása

Kutatásunk során kísérleti úton sikerült létrehozni a különböző vastagságú lakk-rétegek töredezéseit. Ehhez szükségünk volt egy olyan anyagra, amely könnyen töredezik. Kísérletünk anyagát a divat világából merítettük, ugyanis egy különleges körömlakk kezdett egyre elterjedtebbé válni, aminek a különlegessége éppen abban rejlik, hogy szemlátomást töredezik, karakterisztikus törés-mintázatokat alakítva ki száradása során.

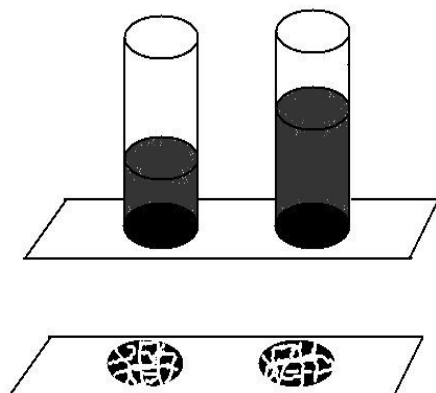
Miután meggyőződünk, hogy ez az anyag alkalmas lesz a mi célunkra, meg kellett találnunk annak a módját, hogy egyenletes festékrétegeket kapjunk, és a réteg vastagságát is kontrollálni tudjuk. Ennek legkézenfekvőbb megvalósítását a felhígított lakk párologtatásával tudtuk elérni.

Első lépésként aceton segítségével felhígítottuk a körömlakkot, majd a kapott oldatot kis tartályokba töltöttük és hagytuk elpárologni az acetont. A tartályokat saját magunk készítettük el: mikroszkóp tárgylemezekre kapcsokkal és ragasztóval rögzítettünk levágott végű fecskendőket (2. kép). Erre azért volt szükség, hogy az oldatot különböző magasságokban tudjuk beletölteni a tartályokba, ugyanakkor a száradás végén a fecskendőket el tudjuk távolítani, ahhoz hogy a hátramaradt festékrétegeket tovább lehessen elemezni. Így a rétegvastagságot a tartályban levő oldat mennyiségével tudtuk kontrollálni, minél több oldat került a tartályba, annál vastagabb lett a végső festékréteg.



III.1.1. kép: Az általunk készített tartályok.

Miután megtöltöttük különböző magasságokban tartályainkat, két-három napig hagytuk, hogy az acetone elpárologjon az oldatból. Ennyi időre volt ugyanis szükség, hogy minden minta megszáradjon. Végül eltávolítva a fecskendőket az üveglemezekre egyenletes, megtöredezett festékrétegeket kaptunk, különböző rétegvastagságban.

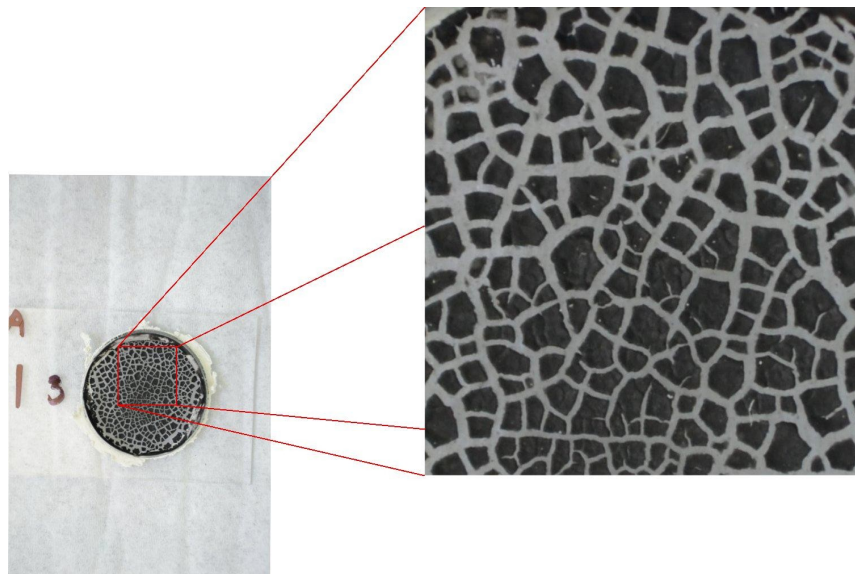


III.1.1. ábra: A kísérleti elrendezés vázlata.

Mikroszkóp segítségével csak a három legkisebb mintáról sikerült felvételt készíteni, a többi túl nagyra bizonyult ehhez.



*III.1.2. kép: A három legkisebb mintáról készített mikroszkópfelvételek 4x-es nagyítással
(1-3 ml oldatból készült minták).*

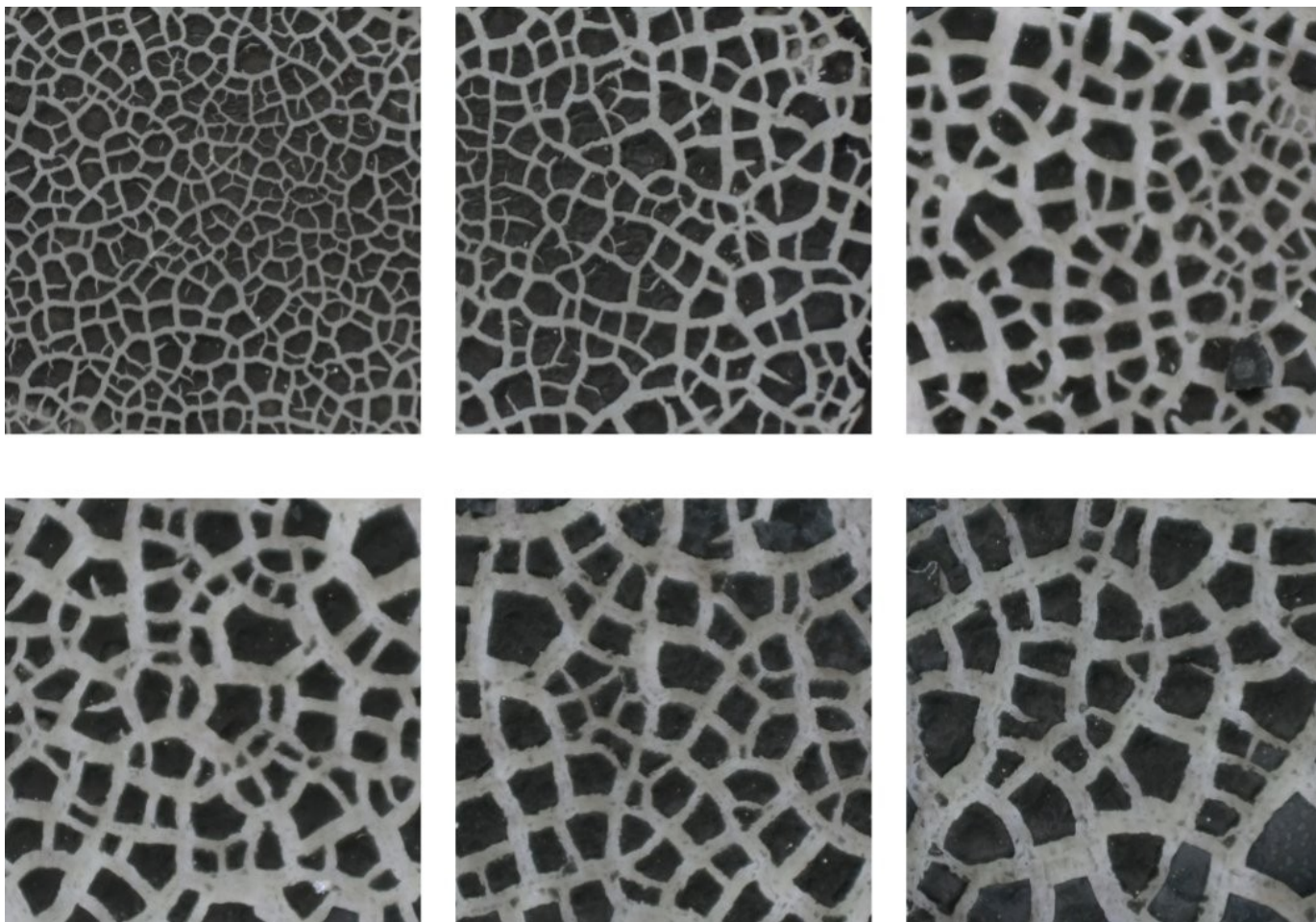


III.1.3. kép: A végső képminták elkészítése.

A töredezésekről jó felbontóképességű fényképezőgéppel sikerült képeket készíteni. Ahhoz, hogy a minták összehasonlítása lehetővé váljon, mindegyik képből ugyanakkora négyzetet vágtunk ki, ezeken végeztük a további méréseket.

III.2. Kísérleti eredmények bemutatása

Leung és NEDA vizsgálatai alapján [1] a száradó anyagban kialakuló mintázatokért két tényező a felelős: a felület minősége, amin a festékréteg szárad, valamint a festékanyag rétegvastagsága. A mi kísérleteink során mindenik festékréteg azonos üvegfelületen készült el és töredezett, így a mintázatok változatosságát csakis a rétegvastagság változása okozza. A III.2.1-es képsorozaton megfigyelhetjük, hogy a rétegvastagság növekedésével (balról jobbra) a festékben fellépő összehúzó erő is növekedik, egyre nagyobb fragmensek alakulnak ki. Ez belátható, ha megnézzük hogyan csökken az egységnyi felületen levő darabok száma a vastagság növekedésével: míg az első képpár esetében több száz fragmens is számlálható, addig az utolsó képpárnál ezek száma már alig haladja meg az ötvenet.

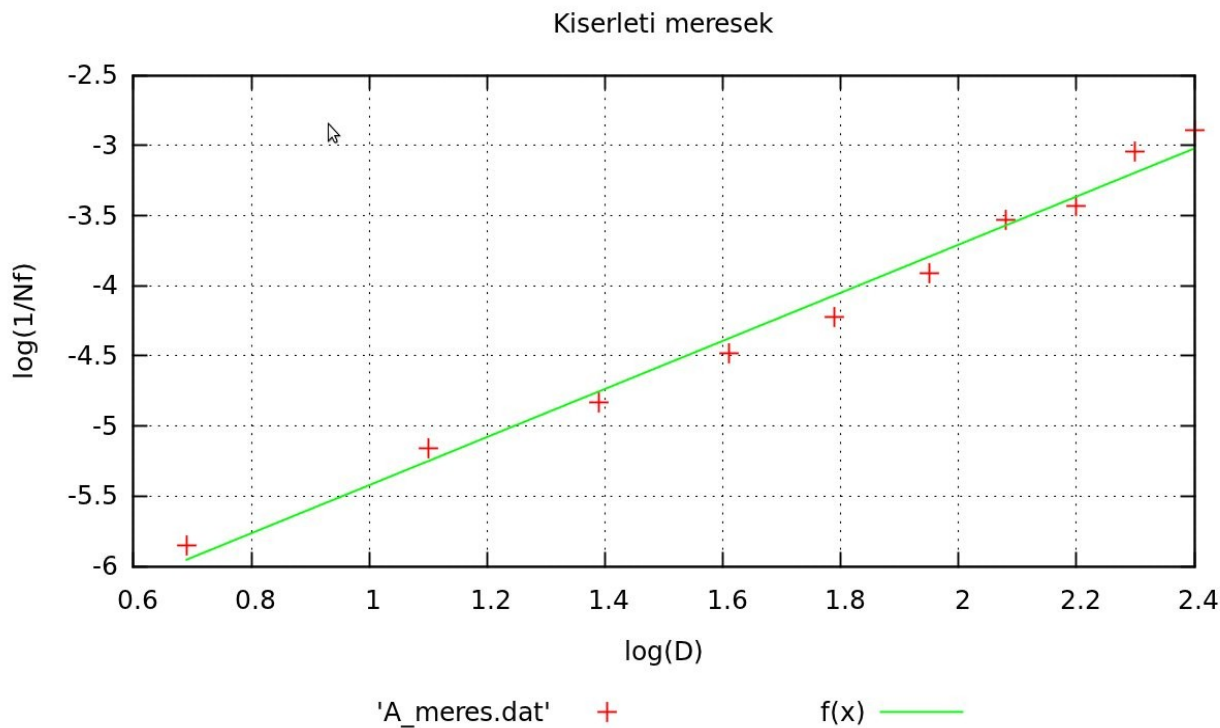


III.2.1. kép: A kísérletileg előállított töredezők. Balról jobbra haladva a használt oldat mennyiségével arányosan a rétegvastagság is növekedik. Megfigyelhető, hogy minél vastagabb a réteg, annál kevesebb a fragmensek száma.

Oldat térfogata [ml]	Darabszám
2	347
3	175
4	125
5	88
6	68

III.2.1. táblázat: A minták térfogata (rétegvastagság) és a fragmensek száma közti kapcsolat.

Ábrázolva a fragmensek számát a rétegvastagság függvényében megkaptuk, hogy a fragmensnagyság közelítőleg a rétegvastagság négyzetével skálázódik. Eredményünk tehát igazolja a már meglévő skálázási törvényt, amit Leung és Néda állapított meg [1].



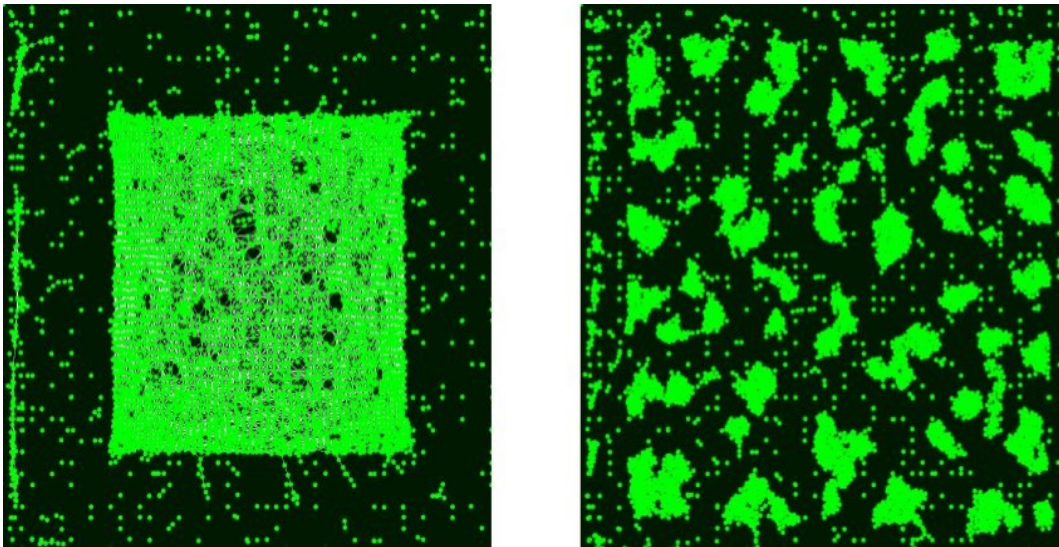
$$f(x) = 1.721 \cdot x - 7.146$$

III.2.1. ábra: Az átlagos fragmensnagyság hatványfüggvény-eloszlást mutat a rétegvastagság függvényében, 1.72-es exponenssel. Ez jól egyezik korábbi szimulációs és kísérleti eredményekkel [1], melyek szerint az átlagos fragmensnagyság a rétegvastagság négyzetével skálázódik.

III.3. A modell parametrizálása

A II.2 részben leírt háromdimenziós realisztikus modell segítségével több törésmintázat alakítható ki. Mindez a különböző paraméterek kombinálásával érhető el. Az alábbiakban ismertetem a fő paramétereket és azok szerepét a törésmintázat kialakulásában.

Az egyik fontos paraméter a **súrlódási erő (F_s)**. Ez a tömbök és a tartófelület között lép fel. A III.3.1. ábrán jól kivehető, hogy ennek túl alacsony értéke nem vezet törésvonal megjelenéséhez, ugyanis a szemcséket nincs ami visszatartsa a teljes összehúzódástól. Ha viszont megnöveljük ennek értékét, a szemcséket inkább megakadnak a tartófelületen, a törésvonalak pedig igen nagy számban megjelennek.

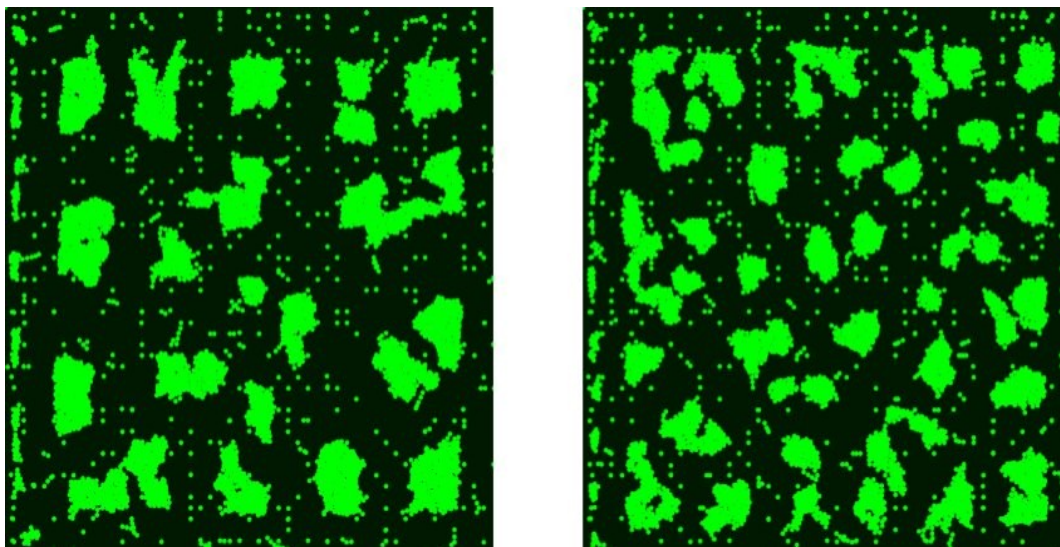


III.3.1. ábra: A súrlódási erő hatása 50x50-es rács esetében, 3-as rétegvastagsággal

első kép $F_s = 1.2$, $F_t = 20$, $l_0 = 5$

második kép $F_s = 7$, $F_t = 20$, $l_0 = 5$

Ha egy kisebb léptékű változást nézünk a súrlódási erő esetében (III.3.2. ábra), akkor megfigyelhetjük, hogy minél jobban növeljük a súrlódási erő értékét, annál több fragmens alakul ki, az átlagos fragmensnagyság ebben az esetben csökken.

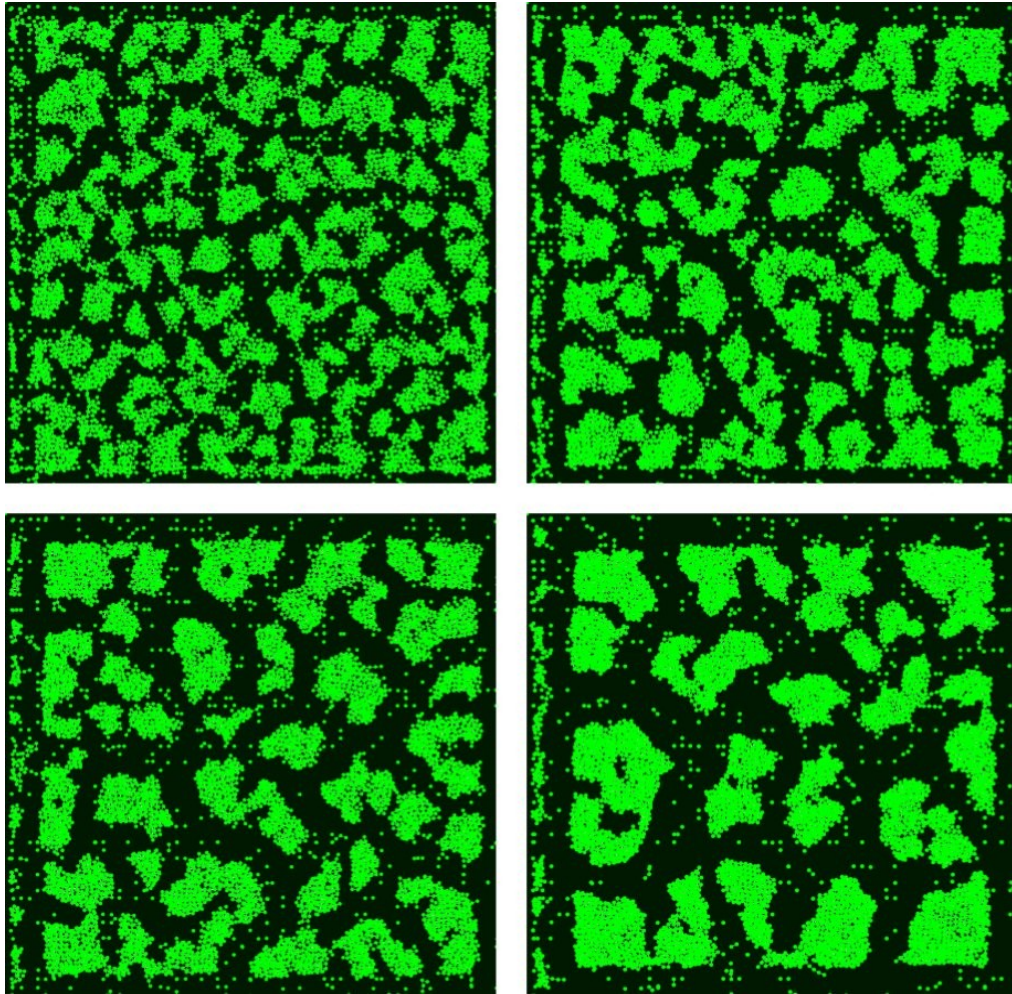


III.3.2. ábra: A súrlódási erő hatása 50x50-es rács esetében, 10-es rétegvastagsággal

első kép $F_s = 5$, $F_t = 20$, $l_0 = 5$

második kép $F_s = 7$, $F_t = 20$, $l_0 = 5$

A másik paraméter a rendszerben a **rugalmas erő maximális értéke (F_t)**. Ha egy rugó esetében a benne fellépő erő meghaladja ezt a felső küszöbértéket, a rugó elszakad. Az alábbi képsorozat alapján (III.3.3. ábra) észrevehető, hogy minél nagyobb ez a határértéke, annál nagyobb fragmensek alakulnak ki. Ez várható is, hiszen minél nagyobb erő hatására szakad el a rugó, annál erősebb a kapcsolat a két tömb között, így sokkal nehezebben alakulnak ki a kis fragmensek. Innen adódik az a meggondolás, hogy a harmadik dimenzió beépítése lehetséges több rugó használatával is (ahogy eddig is tették [1]), hiszen ebben az esetben nő a rugalmas erő, és az elért hatás minőségileg ugyanaz, mint amit a rétegvastagság növelésével érnénk el, ahogy azt nemsokára bebizonyítjuk.



III.3.3. ábra: A rugalmas erő hatása egy 60x60-as rács esetében, 3-as rétegvastagsággal

első kép $F_s = 5$, $F_t = 15$, $l_0 = 7$

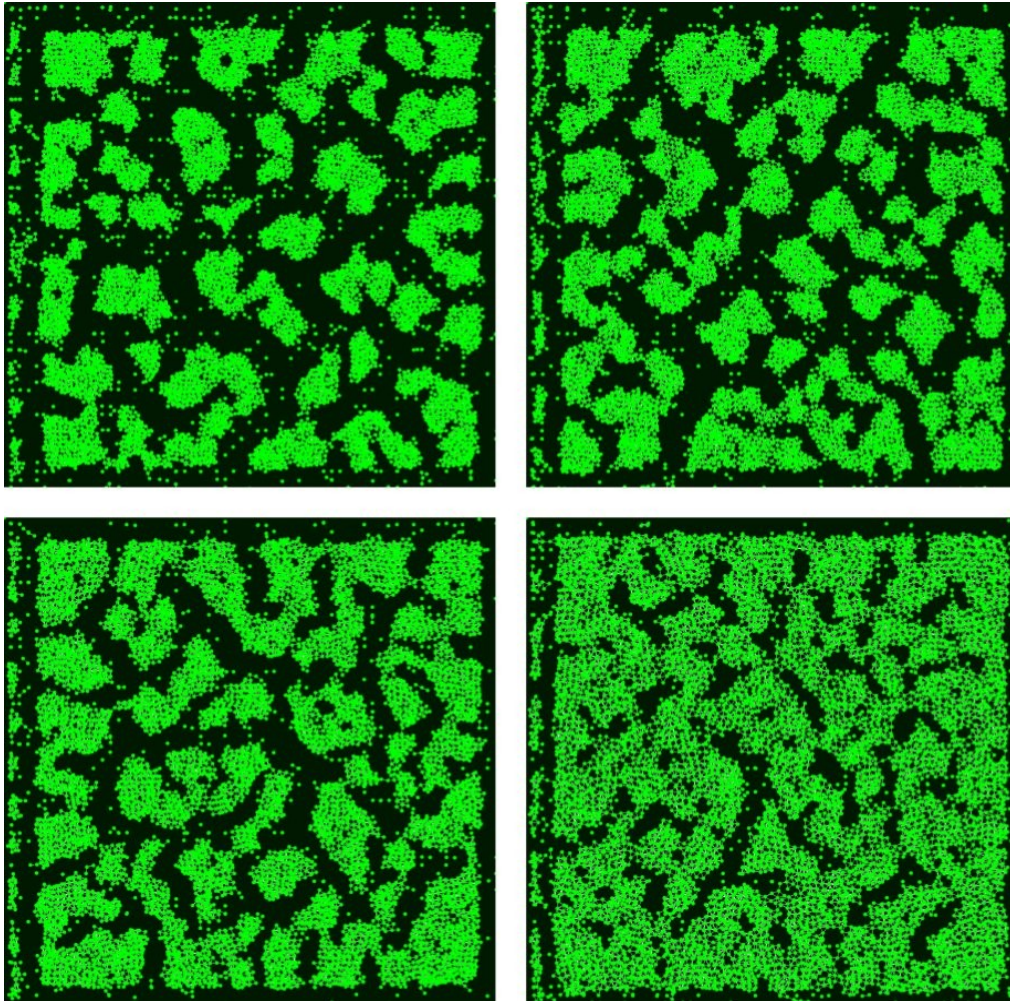
második kép $F_s = 5$, $F_t = 17$, $l_0 = 7$

harmadik kép $F_s = 5$, $F_t = 20$, $l_0 = 7$

negyedik kép $F_s = 5$, $F_t = 25$, $l_0 = 7$

Egy harmadik paraméter, ami szintén a rugókat jellemzi, az a rugók kezdeti megnyúlása, amit a program során a **rugók egyensúlyi hosszával (l_0)** határozható meg, amely a kezdeti tömbök közti távolsághoz van viszonyítva. Ez a paraméter azért szükséges, hogy a rugók megnyúlása során ki lehessen számítani a bennük fellépő rugalmas erőket. A III.3.4. ábrán látható, hogy minél nagyobb a kezdeti megnyúlás, azaz kisebb ennek az egyensúlyi hosszának az értéke, annál távolabb kerülnek

egymástól a fragmensek. Az l_0 értékének növekedésével mintha egy fordított töredezési folyamat menne végbe. Ez szorosan összefügg azzal, hogy a száradást a rugóállandók növelésével értük el.



III.3.4. ábra: A rugó egyensúlyi hosszának hatása egy 60x60-as rács esetében, 3-as rétegvastagsággal

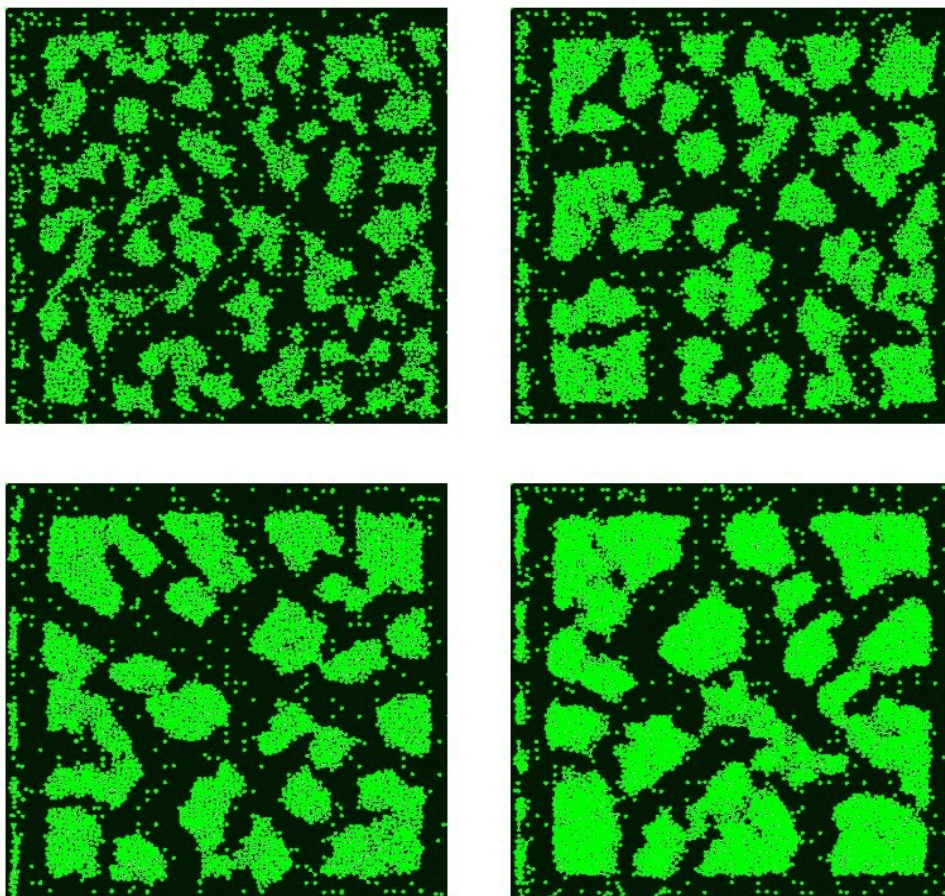
első kép $F_s = 5, F_t = 20, l_0 = 7$

második kép $F_s = 5, F_t = 20, l_0 = 7.5$

harmadik kép $F_s = 5, F_t = 20, l_0 = 8$

negyedik kép $F_s = 5, F_t = 20, l_0 = 9$

A leglényegesebb paraméter vizsgálataink során a **rétegvastagság** volt, mivel a kísérletek során is ennek a paraméternek a hatását tanulmányoztuk. A szimuláció során már aránylag kis rendszeren is jól látható, hogy a vastagság növekedésével nő az átlagos fragmensnagyság, az anyagi pontok egyre nagyobb csoportokba tömörülnek (III.3.5. ábra). Ez már egy fontos lépés a kísérleti eredmények visszaadásához, hiszen abban az esetben is ezt a hatást eredményezte a rétegvastagság növekedése.



III.3.5. ábra: 50x50-es rács, $F_s = 5$, $F_t = 20$, $l_0 = 7$

A rétegvastagság balról jobbra növekszik:

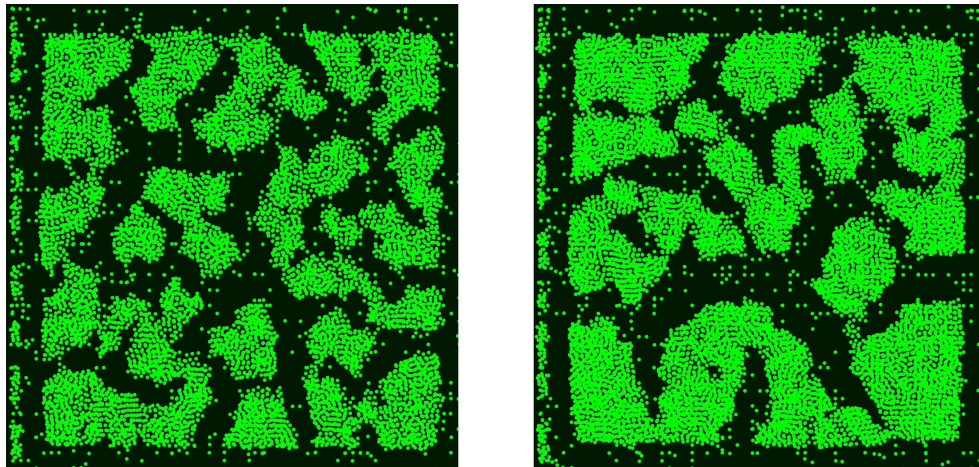
első kép 2, második kép 3, harmadik kép 6, negyedik kép 7

Miután sikerült megismerni a paraméterek hatását a rendszerre, igyekeztünk megkeresni azt a paramétersorozatot, amely a kísérleti eredményeket leginkább megközelítő törésmintázatot eredményezte. Bizonyítottan belátható, hogy a paraméterek legtöbb része hasonló hatással van a rendszerre. Éppen ezért elégséges volt egy vagy két paraméter változását vizsgálni a kísérletileg kapott törésmintázat visszaadására, ami a mi esetünkben főképpen a súrlódási erő és a rétegvastagság volt, a többi paramétert leginkább csak finom hangolásra használva.

A számítógépes programot az egyetemen kialakított klaszteren kellett többnyire futtatni, mivel a törésvonalak kialakulásához szükséges számolások nagy kapacitást igényeltek. Kisebb rendszerekre,

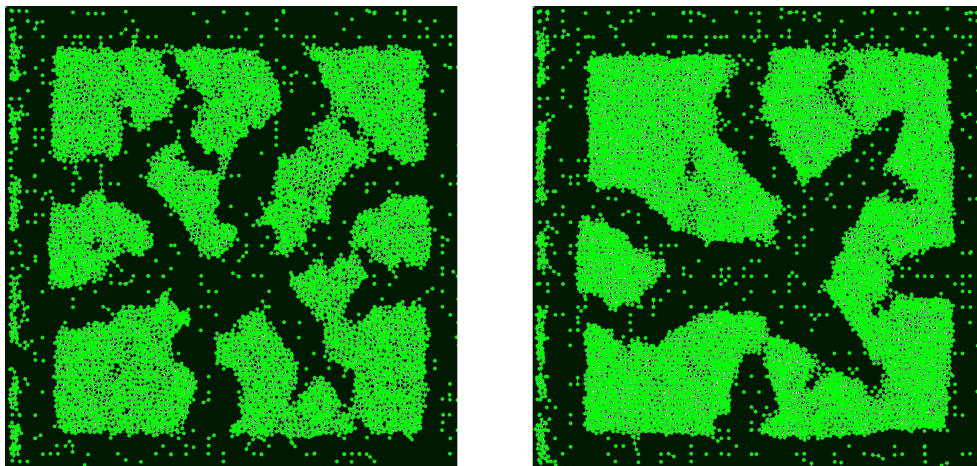
mint például egy 60x60-as tömbre a számolások nagyságrendileg több napba teltek, míg a 100x100-as rendszereknél ez már akár több hetet is felvett.

Annak ellenére, hogy a paraméterek hatását egyenként jól beláthattuk, legalább száz futtatás kellett különböző paramétersorozatokra annak érdekében hogy a kísérleti törésmintázatokat a szimuláció során is visszakapjuk. Az alábbiakban azok a paramétersorozatok láthatóak, amelyek a legjobban megközelítették a kísérletileg kapott töredezésmintázatokat. A képek alapján jól kivehető, hogy a jellegzetes sokszögű fragmensek, amiket a kísérletileg előállított töredezés is eredményezett, leginkább alacsony súrlódási erő értékekre alakulnak ki.



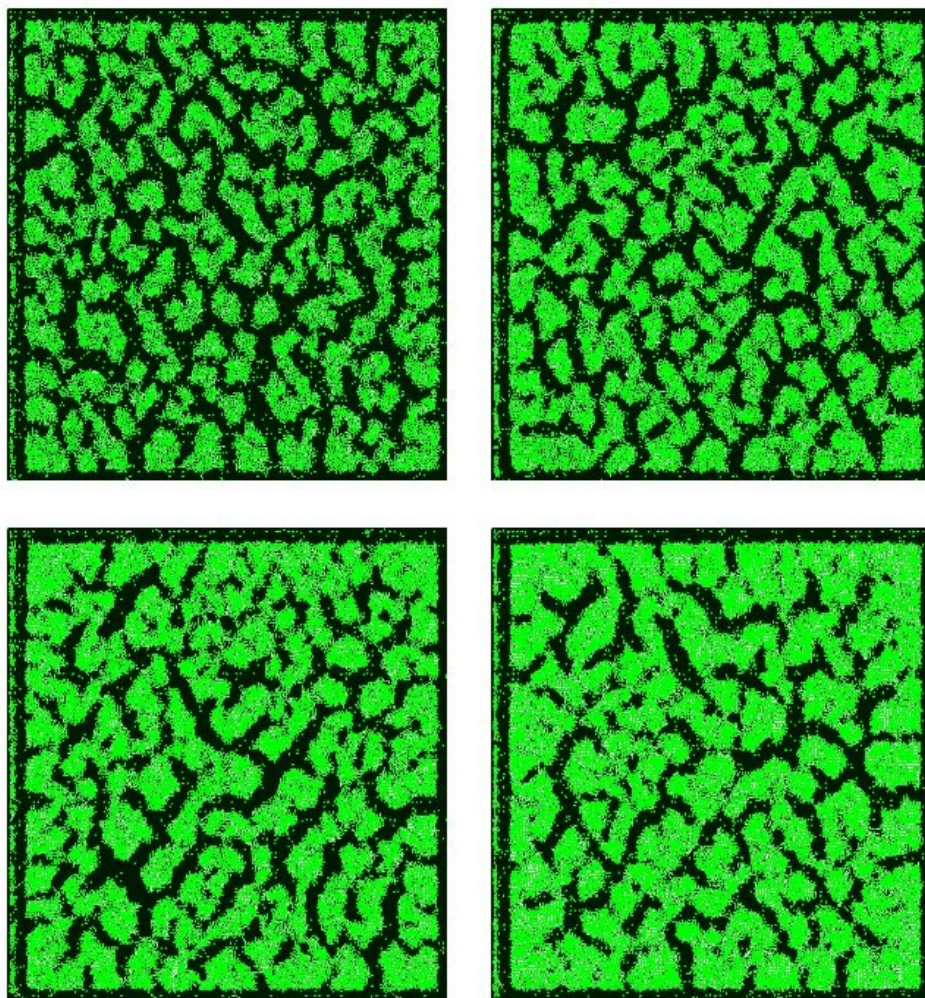
III.3.6. ábra: 60x60-as rács, $F_s = 3$, $F_t = 17$, $l_0 = 8$

A rétegvastagság: első kép 3, második kép 4



III.3.7. ábra: 60x60-as rács, $F_s = 2$, $F_t = 17$, $l_0 = 8$

A rétegvastagság: első kép 3, második kép 4

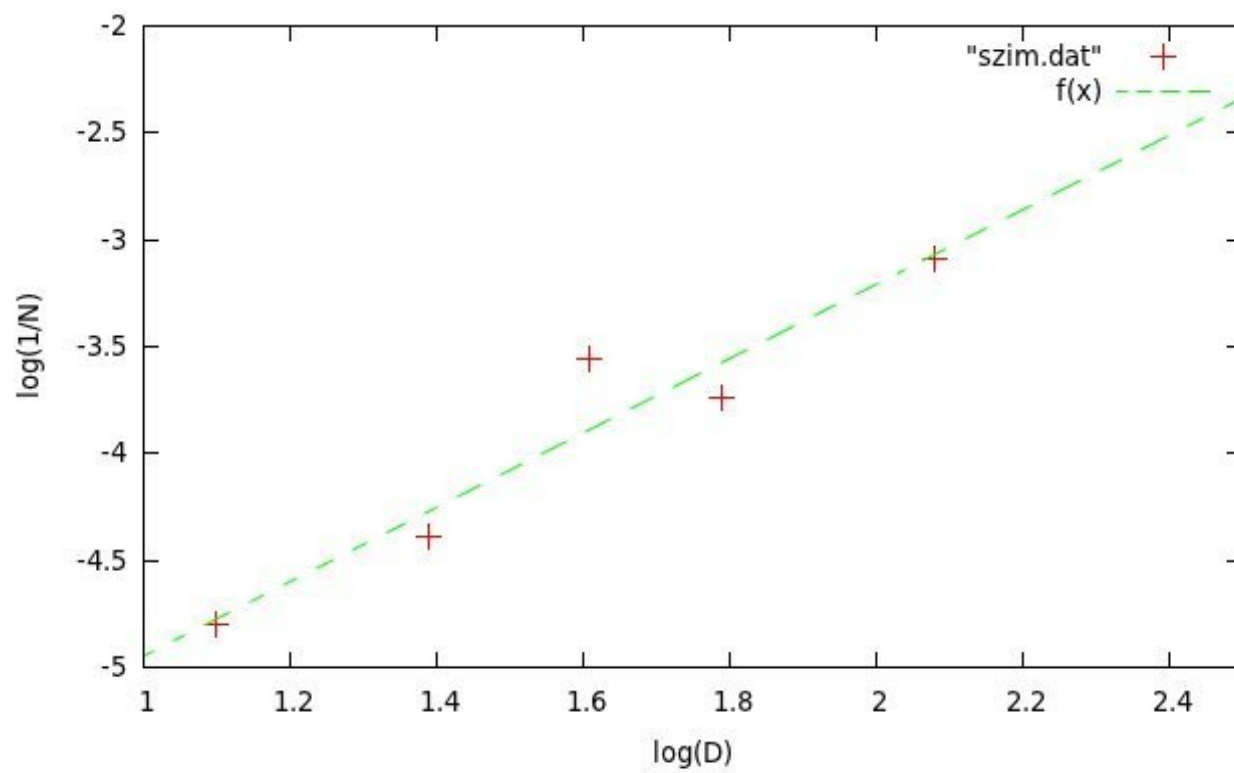


III.3.8. ábra: 100x100-as rács, $F_s = 5$, $F_t = 20$, $l_0 = 8$

A rétegvastagság:

első kép 4, második kép 5, harmadik kép 6, negyedik kép 7

Továbbá a fenti 100x100-as rendszeren megvizsgáltuk hogyan skálázódik az átlagos fragmensnagyság a rétegvastagság függvényében. Annak ellenére, hogy csak kis számú mérést sikerült elvégezni, biztató az így kapott eredmény, amely szintén az átlagos framensnagyság hatvány-függvény szerinti eloszlását adja a rétegvastagság függvényében.



$$f(x) = 1.73 * x - 6.68$$

III.3.9. ábra: 100x100 – as rács esetén a szimulációs eredmények is hatványfüggvény-eloszlásra engednek következtetni.

Következtetések. Kitekintő

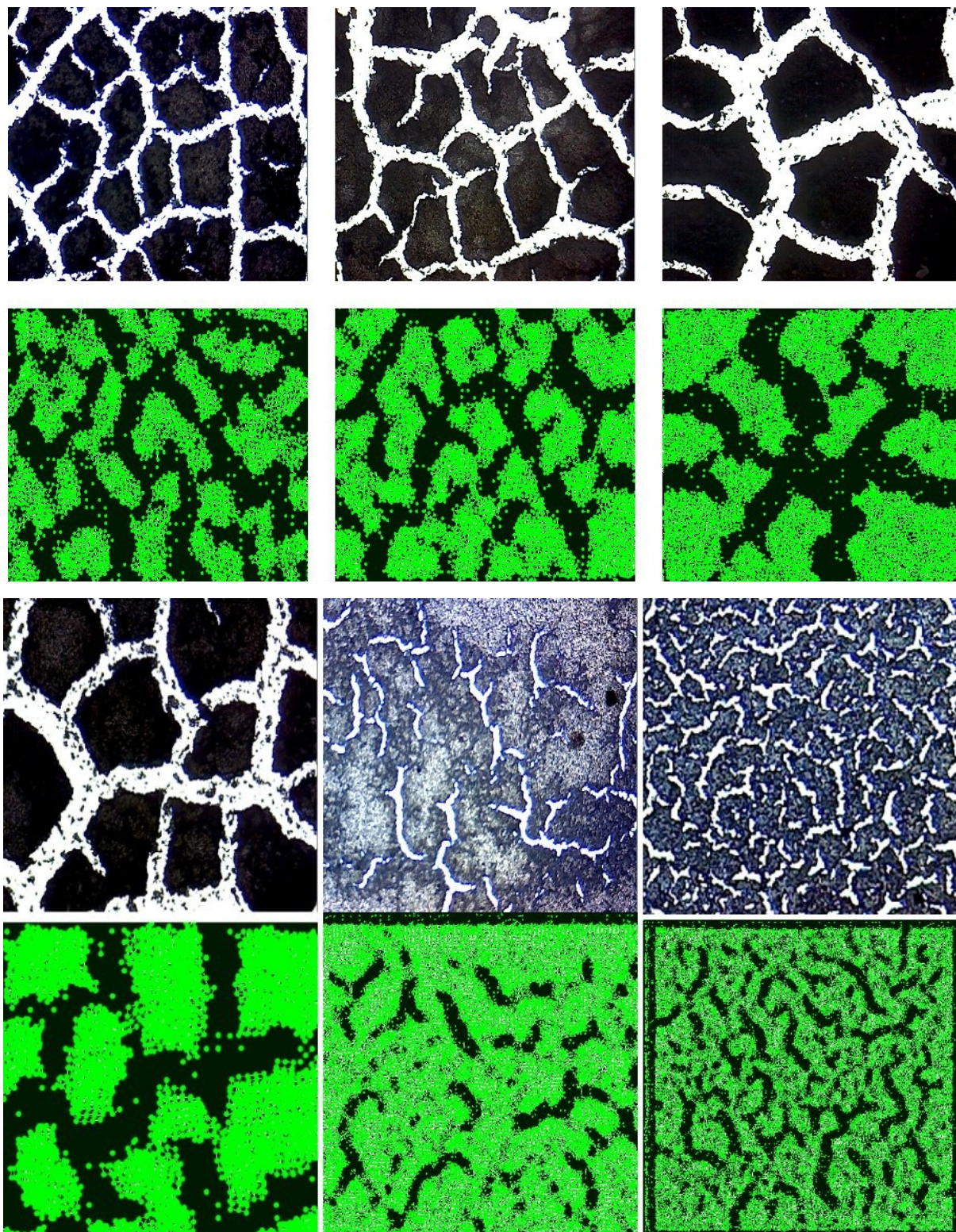
Kutatásunk során kísérleti úton előállítottuk az általunk használt lakk-réteg különböző rétegvastagságainak töredezését. Ezzel igazolni tudtuk a korábban megállapított skálatörvényt, mely szerint az átlagos fragmensnagyság közelítőleg a rétegvastagság négyzetével skálázódik.

Ugyanakkor a felhasznált szimulációs program segítségével különböző valós töredezéseket kaptunk a paraméterek függvényében. A kapott eredmények szépen visszaadták a kísérletileg végzett töredezés végső mintáit, ugyanakkor a törési mintázat kialakulásának folyamatában is fellelhető volt a hasonlóság (1. ábra). Nagyobb rendszer esetében szimulációink azt mutatják, hogy az átlagos fragmensnagyság is közelítőleg a rétegvastagság négyzetével skálázódik. Kísérleti és szimulációs eredményeink tehát jó összhangban vannak.

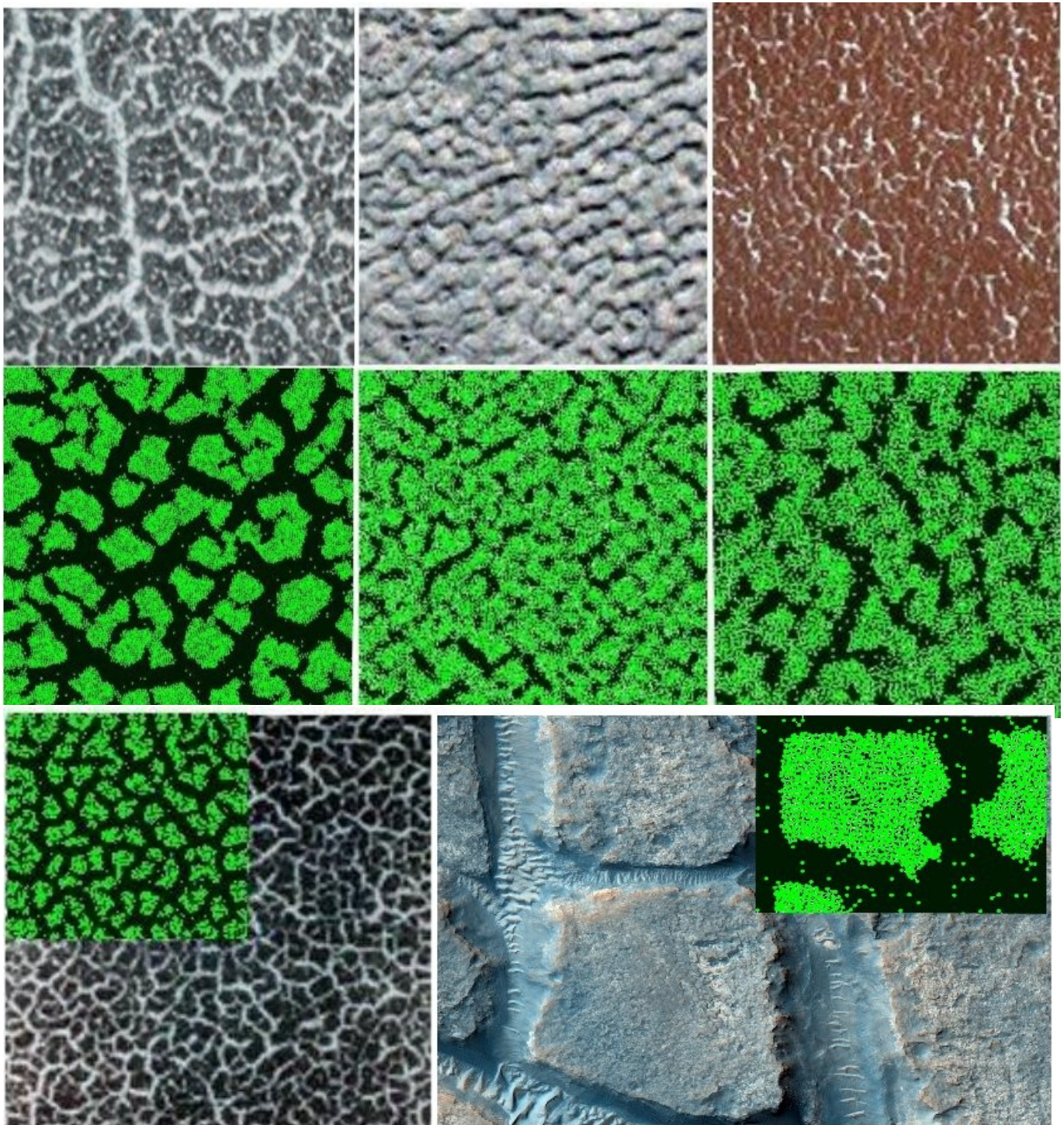
Viszont a kapott törésmintázatok nem kizárólagosan csak a festékrétegek töredezését adják vissza, annál sokkal tágabb területet fednek le. A tudomány vívmányainak köszönhetően sikerült a Mars felszínéről nagy felbontású képeket készíteni, amelyek a www.uahirise.org weboldalon érhetők el. Ezek a képek sokféle felszíni alakzatot és formát tartalmaznak, köztük található sok érdekes törésmintázathoz hasonló alakzat is. Mivel a szimuláció paramétereinek vizsgálása során többféle törésmintázat állítható elő, kihívásképpen megpróbáltuk reprodukálni a Mars egyes felszíni formáit is.

A kapott képpárok (2. ábra) szépen igazolják, hogy a számítógépes rugó-tömb modell ezeket a felszíni formákat is képes visszaadni, annak ellenére, hogy ezek kialakulási folyamatai viszonylag bonyolultak, lévén itt többféle anyagról szó, mint például száraz jég, homok, láva töredezése. Ezzel igazolni tudtuk azt is, hogy a töredezési mechanizmus igazából skálafüggetlen, hiszen megtalálható mikroskálától makroskáláig, a mikrométer vastagságú festékrétegtől egészen a Mars felszínén is észlelhető alakzatokig.

Végezetül elmondhatjuk, hogy ez a kutatási téma még sok továbblépési lehetőséget kínál. Tanulságos lenne megvizsgálni olyan anyagok esetében is a töredezést, amelyekben száradás során az összehúzó erő kisebb mértékű. Ilyen például az appetit vagy a tojásfehérje. Továbbá a szimulációs program alkalmazása is még feltárásokra vár. Meg lehetne vizsgálni, hogy milyen törésminták lehetségesek még a különböző paraméterek változtatásával, illetve ezekre valamilyen osztályozási lehetőségét felfedni.



1.ábra: A kísérleti és szimulációs eredmények hasonlósága. A szimuláció során kapott töredezesek leginkább a mikroszkópfelvételekkel mutatnak kitűnő egyezést.



2.ábra: A Mars felszínéről készített fényképek és szimulációs mintázatok hasonlósága. A Mars felszínén észlelt alakzatok visszaadására is képes a számítógépes rugó-tömb modell.

Irodalomjegyzék

- [1] K.-t. Leung, Z. Nédá, Phys. Rev. E 82, 046118 (2010)
- [2] E-A Horvat, F. Jarai-Szabo, Y. Brechet, Z. Neda, Centr. Eur. J. Phys. (2012)
- [3] K. T. Leung, L. Jozsa, M. Ravasz, Z. Neda, Nature 410, 166 (2001)
- [4] Z. Neda, K. T. Leung, J. Jozsa, M. Ravasz, Phys. Rev. Lett. 88, 095592 (2002)
- [5] http://www.123rf.com/photo_11068722_cracked-painting-background.html;
http://photos.doniv.org/main.php?g2_itemId=590&g2_enterAlbum=0; <http://imgusr.tradekey.com/p-5341639-20110715080507/crack-nail-polish-cracked-nail-lacquer-shatter-nail-polish.jpg>
- [6] Dombi András, Crack formation and propagation in drying granular materials in a three-dimensional spring-block model, Mesteri Szakdolgozat, 2010, BBTE
- [7] R. Burridge, L. Knopoff, Bull. Seism. Soc. Am 57, 341 (1961)
- [8] G. Máté, Z. Nédá, J. Benedek, Spring-Block Model Reveals Region-Like Structures, PLoS One, 6(2):e16518 (2011).
- [9] B. Gutenberg, C.F. Richter, Ann. Geofis. 9, 1 (1956)
- [10] F. Jarai-Szabo, B. Sandor, Z. Neda, Centr. Eur. J. Phys. 9, 1002 (2011)
- [11] F. Jarai-Szabo, S. Astilean, Z. Neda, Chem. Phys. Lett. 408, 241 (2005)
- [12] F. Jarai-Szabo, E-A Horvat, R. Vajtai, Z. Neda, Chem. Phys. Lett. 511, 378 (2011)
- [13] K. Kovacs, Y. Brechet, Z. Neda, Mod. Sim. Mat. Sci. Eng. 13, 1341 (2005)