

Törés és fragmentáció statisztikus fizikája

OTKA K84157

Záró beszámoló

A projekt keretében rendezetlen szerkezetű anyagok károsodásának, törésének és fragmentációjának mélyebb megértésére végeztünk kiterjedt elméleti vizsgálatokat. Kutatómunkánk több fő irányra összpontosult: vizsgáltuk heterogén anyagok konstans terhelés alatt lejátszódó fokozatos károsodását és szubkritikus törését, a lassan (kvázisztatikusan) növekvő terhelés hatására létrejött törési folyamatokat, valamint tanulmányoztuk az ütközéssel keltett dinamikus törés és a fragmentáció jelenségének számos aspektusát.

Az anyagok mikroszkopikus és mezoszkopikus skálán megjelenő rendezetlensége alapvető szerepet játszik a törési folyamataikban, ezért vizsgálataink elsősorban a statisztikus fizika módszereire, a fázisátalakulások és kritikus jelenségek elméletére épült. A törési jelenségeknek realiztikus szállköteg és diszkrét elem modelljeit dolgoztuk ki, amelyekkel nagyskálájú számítógépes szimulációkat végeztünk, valamint egyszerűsítő feltevések mellett sikerült a modelleknek analitikus megoldásait is megadnunk. Olyan problémákra koncentráltunk, amelyek a törés és fragmentáció statisztikus fizikájának frontvonalába tartoznak és a közelmúltban jelentős visszhangot váltottak ki a szakterületen. Kísérleti partnerekkel együttműködve lehetőségünk volt arra is, hogy elméleti eredményeinket laboratóriumi körülmények között teszteljük, illetve összevessük terepen végzett mérési eredményekkel is. Kutatómunkánk eredményeit 25 referált publikációban jelentettük meg a szakterület legrangosabb nemzetközi folyóirataiban (a cikkek közül kettő a Physical Review Letters-ben, kettő pedig a Scientific Reports-ban jelent meg). A publikációk felösszegzett impakt faktora közel 70.

Heterogén anyagok szubkritikus törése

Alkalmazások során az anyagok egyik leggyakoribb igénybevétele, hogy hosszú időn keresztül állandó nagyságú, a teherbíró képességük alá eső (szubkritikus) terhelésnek vannak kitéve. A viszonylag alacsony terhelés ellenére is, tapasztalat szerint az anyagok károsodnak és véges idő alatt eltörhetnek. Ez a kúszó, vagy fáradásos törés a felelős a mérnöki konstrukciók összeomlásáért, de több természeti katasztrófa, mint a hó- és kőlavínák, földcsuszamlások, és földrengések hátterében is a szubkritikus repedéskeltés áll.

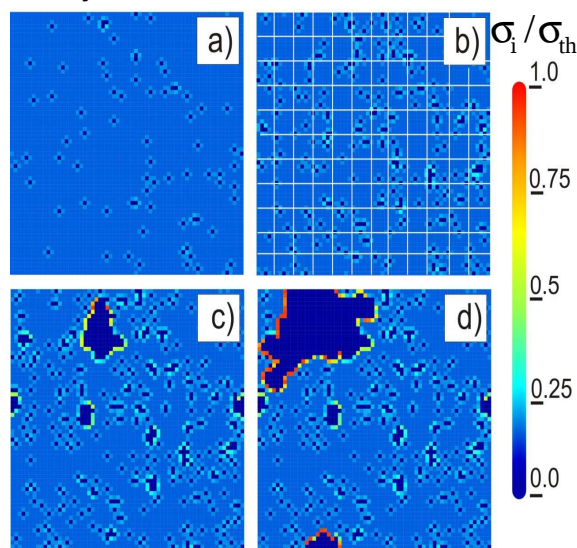
Termikusan aktivált törés

A szubkritikus repedés terjedés egyik legfontosabb mechanizmusa a termikusan aktivált károsodás. Kristályos szerkezetű szilárdtestek termikusan aktivált kúszó törését molekuláris dinamikai szimulációval vizsgáltuk. Azt találtuk, hogy konstans külső terhelés alatt a repedés hegyénél létrejön egy úgynevezett process zóna, ahol a kristályos szerkezet a termikus zaj hatására exponenciális profil szerint torzul. A process zóna kiterjedése befolyásolja a rendszer makroszkopikus teherbíró képességét, így a kontinuumok mechanikája alapján kapott méretskálázást, azaz a makroszkopikus teherbíró képességnek a repedés hosszától való függését, a process zóna kiterjedése miatt korrigálni kell [1].

A termikusan aktivált szub-kritikus törés időbeli lefolyását a szállköteg modell keretében vizsgáltuk. Analitikus és numerikus számolásokkal megmutattuk, hogy a hőmérséklet és a terhelés értékétől függően a törés alapvetően két különböző módon játszódhat le: magas terhelésen a rendszer folyamatosan gyorsulva közelíti meg a makroszkopikus törést. Kellően alacsony terhelés és hőmérséklet mellett viszont a gyorsulási fázist lassulás előzi meg. A terhelés-hőmérséklet síkon meghatároztuk a két fázis határát, amely egyben nagy hőterhelésnek kitett rendszerek (pl. sugárhajtómű alkatrészei) esetén a biztonságos működtetés határát jelöli ki. Számítógépes szimulációkkal igazoltuk, hogy a törési folyamat

gyorsulását a károsodás térbeli lokalizációja okozza (1. ábra), amit felhasználhatunk a gyorsulási fázis, és így a makroszkopikus törés biztonságos előrejelzésére is [2].

A termikusan aktivált törés szálköteg modelljének időfejlődését a szakirodalomban elterjedt módszer szerint úgy állítják elő, hogy a szálak mechanikai feszültségének Gauss eloszlású fluktuációit direkt módon mintavételezik. Ennek következtében a szimulációk futásideje arányos lesz a rendszer életidejével, ami lehetetlenné teszi a szimulációkat alacsony terhelés és alacsony hőmérséklet esetén. A



1. ábra: Termikusan aktivált repedés-keletkezés és terjedés a szálköteg modellben. A szinkód az ép szálak terhelését jelzi. (a) A kezdeti stádiumban véletlenszerűen kis repedések keletkeznek. (b) A repedések száma idővel nő és a repedések növekedhetnek is. (c) A kritikus ponthoz közeledve egyre inkább a repedések növekedése dominál. (d) A makroszkopikus törést egyetlen repedés instabilizálása okozza.

projekt során kidolgoztunk egy Kinetikus Monte Carlo szimulációs eljárást, amely ezeket a korábbi nehézségeket kiküszöböli, elérhetővé téve a szimulációk számára a teljes hőmérséklet-terhelés paraméter síkot [3].

Fokozatos károsodás által hajtott kúszó törés

A szubkritikus törésnek, a termikusan aktivált repedéskeltés mellett, számos további mikroszkopikus mechanizmusa lehetséges. Szálköteg modellt dolgoztunk ki a lassú károsodási folyamatok (például korróziós repedezés) által hajtott szubkritikus törés elméleti vizsgálatára. A modell keretében elemeztük a konstans terhelésnek kitett heterogén anyagok kúszó törése során az anyagban lévő fagyott strukturális rendezetlenség és a repedések körül létrejövő inhomogén feszültségtér versengésének hatását. Kimutattuk, hogy erős feszültségkoncentráció esetén egyetlen repedés jön létre, amelynek frontja intermittens módon, ugrásokkal, lavinákkal halad előre. A repedési lavinákat a lassan halmozódó károsodás miatti törések hajtják. Részletesen vizsgáltuk a front lokális

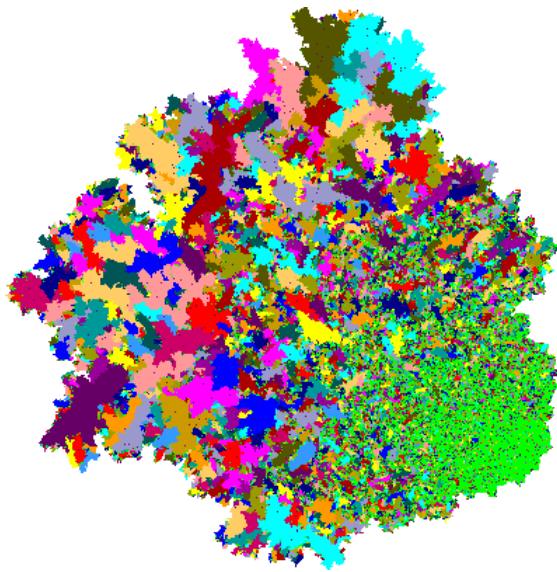
lavináinak statisztikus jellemzőit. Megmutattuk, hogy a lavinák méretét és a közöttük eltelt várakozási időt hatványfüggvény eloszlások jellemzik, amelyek exponense függ a rendezetlenség két forrásának erősségétől: ha a strukturális rendezetlenség dominál, akkor a lavinaméret exponense nagyobb, míg a várakozási idő kisebb, mint a lokalizált feszültségtér által dominált fázisban. Az eredmény azt mutatja, hogy erős feszültségkoncentráció esetén a lavinák nagyobbak és gyorsabban követik egymást a törés során [4]. Az eredményeket bemutató publikáció a Physical Review E folyóiratban jelent meg, ahol egy ábrája kiválasztásra került a hónap legérdekesebb ábráit bemutató Kaleidoscope-ba is [4].

Alacsony terhelés határesetében, amikor a károsodás által hajtott lavinák nem játszhatnak döntő szerepet, a jelenségre kidolgozott szálköteg modellünknek megadtuk az analitikus megoldását. Megmutattuk, hogy pusztán a károsodás halmozódás miatt a repedési sebesség a makroszkopikus töréshez közeledve hatványfüggvény divergenciát mutat. Figyelembe véve a károsodás térbeli klaszterszerkezetét sikerült megmagyaráznunk a kísérletekben a kumulatív károsodás-idő görbéken megfigyelt hullámzást is [5,6].

A modell további vizsgálatával kimutattuk, hogy a makroszkopikus törés kritikus pontjához közeledve a rendszer időfejlődése gyorsul, amelyet a repedési lavinák gyakoriságának és átlagos méretének növekedése jelez. Számítógépes szimulációk és analitikus számolások is alátámasztották, hogy a lavinák rátájának növekedését az Omori törvény írja le, azaz a kritikus ponttól távolabb hatványfüggvény növekedést tapasztalunk, míg a katasztrófa közvetlen közelében a ráta telítődik. Az eredmény azért nagyon érdekes, mert földrengések esetén hasonló viselkedést a nagy rengéseket (főrengéseket) követő utórengés sorozatok lecsengésére mutattak ki [7]. Az eredmények azt is jelentik, hogy a Paris törvény

jól leírja ugyan egy kúszó repedés globális növekedési folyamatát, de a repedés-növekedés fluktuációinak, a repedési lavináknak a vizsgálatával a törési folyamat újszerű aspektusait tárhatjuk fel. Megmutattuk, hogy hosszú hatótávolságú feszültség-újraosztódás esetén, az anyag szerkezeti rendezetlensége miatt a repedési lavinák időszora jól leírható egy nem-homogén Poisson folyamatként, ahol mind az események mérete, mind a közöttük eltelt várakozási idő hatvány eloszlással rendelkezik. A nem-stacionárius jelleg miatt azonban, ha a lavinák méretére egy detektálási küszöböt vezetünk be, akkor a hatványfüggvények exponense megváltozik. Ez az eredményünk magyarázhatja azt a tényt, hogy a kísérletekben mért exponensek értéke miért mutat olyan nagy szórást. Az adatok feldolgozását a törés kritikus pontjának közelére korlátozva azt találtuk, hogy a hatványfüggvény eloszlások exponense csökken, amit kiaknázhathatunk a katasztrofális törés előrejelzésére is [7].

A kritikus pont felé haladva néha különösen nagyméretű lavinák jelennek meg, amelyek nagyobbak minden korábbinál. Az ilyen rekord események statisztikája értékes információval szolgálhat az idősor egészének fejlődéséről [8]. A szálköteg modellben megmutattuk, hogy a törési folyamat elején, amikor a rendezetlenség dominál, a rekordok darabszáma az eseményszám logaritmusaival nő, viszont a kritikus pont közelében, a feszültség-koncentráció gyorsabb, exponenciális növekedést eredményez. Mind a rekordok mérete, mind pedig a közöttük eltelt várakozási idő hatványfüggvény eloszlással rendelkezik. Az átlagos várakozási idő elemzésével kimutattuk, hogy van egy karakterisztikus rekord szám, amely alatt a rekordok lassabban dőlnek meg, fölötté viszont felgyorsul a rekord döntés. Az eredmény abban segíthet, hogy korán azonosítani tudjuk a törés kritikus pontját megelőző gyorsulási fázis kezdetét [8].



2. ábra: Egyetlen repedés növekedése a szálköteg modellben. A lassú károsodás halmozódás miatt eltört szálak (zöld) azonnali törések lavináit indítják be (zöldtől eltérő színű foltok). A lavinák mérete a makroszkopikus törés kritikus pontjához közeledve nő. Az ábrát a *Physical Review Letters* folyóirat a címlapjára tűzte.

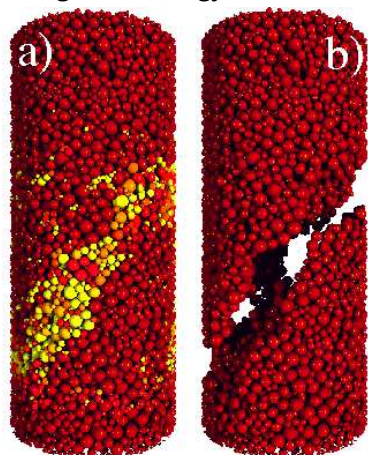
Nagyon érdekes eredményként azt találtuk, hogy a szubkritikus repedésnövekedést kísérő repedési lavinák időfejlődése nagyon érdekes és az alkalmazások szempontjából is értékes információt hordoz. Egyedi lavinák (a 2. ábra színes foltjai) átlagos időprofiljának vizsgálatával kimutattuk, hogy az időprofil szimmetria tulajdonságait a lokális

repedéseket követő feszültség újraosztódás hatótávolsága határozza meg: hosszú hatótávolság esetén szimmetrikus, míg lokális feszültség újraosztódáskor jobbra aszimmetrikus lavinaprofilok jönnek létre. Az eredmény felhasználható anyagvizsgálati módszerekben [9,10]. A lavinák időtartamának és méretének eloszlása a terhelés változtatásával egy átcsapási jelenséget mutat két eltérő exponensű hatványfüggvény tartomány között, ami azt jelzi, hogy alacsony terhelésen a rövid és kicsi, míg magas terhelésen a hosszú időtartamú és nagyméretű repedési lavinák dominálnak. Az eredményeket bemutató publikáció a *Physical Review Letters* folyóiratban jelent meg, amelynek a címlapjára került [9].

Egyedi lavinák térbeli alakjának elemzésével azt találtuk, hogy a lavinák kompakt, térkitöltő geometriai objektumok, viszont a területük, az anyag heterogenitása miatt, fraktál szerkezettel rendelkezik. Megmutattuk, hogy a repedési lavinák geometriai szempontból a huroktól mentesített véletlen bolyongás univerzalitási osztályába tartoznak, így területük fraktáldimenziója $5/4$. Numerikus eredményeink nagyon jól egyeznek az univerzalitási osztály exponensével [10].

Repedési zaj heterogén anyagok nyomás alatti törési folyamatában

Vizsgálataink nagyon fontos célja volt a repedési lavinák és földrengések közös dinamikájának mélyebb



megértése. Földcsuszamlások és földrengések keletkezésében elsősorban nyomás alatt létrejövő repedések játszanak domináns szerepet. Ezért egy realisztikus diszkrét elem modellt dolgoztunk ki, amely figyelembe veszi a természeti katasztrófák szempontjából legfontosabb anyagok szerkezeti és törési jellemzőit.

3. ábra: Szemcsés szerkezetű próbatest (üledékes kőzet) törési folyamatának végállapota. (a) A részecskéket az őket tartalmazó fragmens tömege alapján színeztük. Megfigyelhető, hogy a törések egy károsodási sávba koncentrálnak. (b) Ugyanaz a próbatest, de csak a két legnagyobb darabot tartottuk meg a végállapotban. Ebben a reprezentációban a károsodási sávot az üres rész jelzi.

A kísérletekben vizsgált, üledékes szerkezetű homokkő próbatest számítógépes rekonstrukciójához gömb alakú részecskék üledési folyamatát szimuláltuk, ahol a részecskék méreteloszlását szintén a mérések alapján határoztuk meg. A részecskék cementált kontaktusát rúd elemekkel reprezentáljuk a modellben, amelyek túl nagy terhelés alatt eltörnek. Molekuláris dinamikai szimulációval elemeztük az így előállított próbatest egytengelyű nyomás alatt lejátszódó törési folyamatát. A repedési lavinákat a homokkő szemcsék közötti kohézió kontaktusok feltörési eseményeinek korrelált sorozataiként azonosítottuk. Megmutattuk, hogy az így definiált törési lavinák statisztikus jellemzői kvantitatív módon reprodukálják a laboratóriumi mérések és terepen végzett megfigyelések eredményeit is. Korrelációt mutattunk ki a lavinák mérete és a lavinát követő várakozási idő között: a nagyobb lavinákat hosszabb várakozási idők kísérik, ami a lavina méret hatványfüggvényeként nő. A modell elsőként reprodukálta a földrengésekre megfigyelt úgynevezett b-érték anomáliát, azaz a lavinaméret exponensének csökkenését a kritikus pont közelében. A modell alapján megállapítottuk, hogy az anomáliát a lavinák térbeli lokalizációja okozza [12,13,14]. Az eredményeket a Physical Review Letters és Physical Review E folyóiratokban publikáltuk, amelyekről a Physics Focus szintén cikket jelentetett meg a szélesebb közönség számára az APS honlapján [13].

Heterogenitás erősségének szerepe a törésben

Heterogén anyagok törésének megértéséhez alapvető fontosságú annak tisztázása, hogy a rendezetlenség mértéke hogyan befolyásolja a törési folyamatot. A kérdés vizsgálatára a szálköteg modell jó lehetőséget kínál, mivel a modellben az anyagok rendezetlensége jól kontrollálható módon reprezentálható.

A szálköteg modell keretében megvizsgáltuk, hogy két erősen eltérő teherbíró képességű, de azonos Young modulusszal rendelkező anyag keverésével előállított kompozitok törési jellemzői hogyan függenek a kompozit összetételétől [15]. Egy törhető és egy nem törhető komponens keverési arányát változtatva azt találtuk, hogy a rendszer a nem törhető komponens alacsony részaránya esetén ridegen törik, míg egy kritikus arányt átlépve a rendszer makroszkopikus válasza szívóssá válik. Részletesen elemeztük a rideg-szívós átmenet következményeit a rendszer makroszkopikus és mikroszkopikus folyamataira lokális feszültség újraosztódást feltételezve. Legérdekesebb eredményként azt találtuk, hogy a szívós fázisban a repedési lavinák mérete hatványfüggvény eloszlást mutat, de annak exponense szignifikánsan kisebb a rideg törés jellemző exponenseinél. A lavinák statisztikájának és a keletkezett repedések térbeli szerzetének együttes vizsgálatával kritériumot adtunk annak eldöntésére, hogy a törési folyamatot a szilárdtest strukturális rendezetlensége, vagy a repedések körüli erős feszültség koncentráció dominálja [15].

A szálköteg modellben olyan kompozit anyagok kvázisztatikus törését is vizsgáltuk, amelyek komponensei eltérő keménységgel rendelkezhetnek [16]. Megmutattuk, hogy a keménység

rendezetlenségének mennyiségét változtatva a rendszerben egy folytonos fázisátalakulás jön létre: alacsony rendezetlenség esetén a makroszkopikus törés szakadásos jellegű, míg nagy rendezetlenségnél fokozatosan következik be. A katasztrofális törést a lassú fázisban repedési lavinákkal közelíti meg a rendszer, ami kihasználható előrejelzésre is. Analitikus és numerikus számolásokkal meghatároztuk a rendezetlenséggel kontrollált fázisátalakulás kritikus exponenseit is [16].

Egy hordozóra felvitt vékonyréteg száradáskor felrepedezik. Megmutattuk, hogy a felületi repedések szerkezete, a keletkező darabok méreteloszlása, valamint a mikro-törések idősorának fluktuációi erősen függenek a rendezetlenség mértékétől [17,18]. Meghatároztuk az egyes mennyiségek statisztikus jellemzőit és javaslatot tettünk olyan kísérletekre, amelyekkel elméleti jóslatainkat ellenőrizni lehet. Eredményeinket bambusz száradás okozta törésének vizsgálatára alkalmaztuk. Kifejlesztettünk egy olyan modellt, amely figyelembe veszi a bambusz hatszöges, cellás felépítését is. Megmutattuk, hogy a száradási folyamat lavinaszerű törési lépéseket okoz, ahol a lavinák között eltelt várakozási idő exponenciális eloszlású, míg a lavinák méreteloszlása hatványfüggvénnyel jellemezhető [17,18].

Repedésterjedés dinamikus törésben

Dinamikus törés akkor jön létre, ha egy szilárdtestet nagysebességű mechanikai terhelésnek teszünk ki, és a határfeltételek biztosítják, hogy egyetlen repedés jön létre. Műszaki létesítmények közül a vasúti sínek, szerelvények kerekei, hídszerkezetek egyes komponensei magas dinamikus teherbíró képességgel kell rendelkezzenek a zavartalan működéshez. A dinamikus törésvizsgálatok legelterjedtebb módszere a Charpy-ütőműves vizsgálat, amelyben egy kilendített inga a lengési ív alján megüt egy befogott próbatestet. A befogás segítségével a dinamikus terhelés hárompontos hajlítást hoz létre a próbatesten.

A projekt keretében számítógépes szimulációval vizsgáltuk heterogén szilárdtestben terjedő repedés dinamikáját hárompontos dinamikus hajlítás folyamata során. Kétdimenziós diszkrét elem szimulációkkal megmutattuk, hogy a repedés növekedése nem sima, hanem egy zajos folyamat, amelyben a repedés hegye korrelált ugrásokkal halad előre. Az ugrások kiterjedése és a közöttük eltelt várakozási idő hatványfüggvény eloszlással jellemezhető, ahol az exponensek értéke rideg törés esetén nem függ a rendezetlenség mértékétől. Az eredmények kiaknázzhatók anyagvizsgálati módszerekben [19,20].

A repedés hegyének, illetve három dimenzióban frontjának, ugrásai laboratóriumi mérésekkel jól követhetők, ugyanis az ugrások rugalmas hullámokat keltenek, amelyeket akusztikus érzékelőkkel regisztrálni lehet. Ferromágneses anyagok, mint az acél, dinamikus törésekor a repedés ugrásait a mágneses tér gyors változásai kísérik, így azok megfelelő érzékelőkkel feszültség jellé alakíthatók. Együttműködő partnerünk a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft. miskolci Logisztikai és Gyártástechnikai Intézetében ilyen mágneses emissziós méréseket végzett szerkezeti acélokon, amelynek eredményeit kutatócsoportunk értékelte ki [21]. A mérési adatok feldolgozásával kiváló egyezést kaptunk a szimulációs eredményeikkel [19,20,21]. A mérésekben sikerült meghatároznunk a különböző időtartamú repedési események (mágneses zaj feszültség csúcsai) átlagos időprofilját is. A korábbi szálköteg modellben végzett számításainkkal összhangban parabola profilt kaptunk, amely enyhén jobbra döntött [9, 21]. Az eredmény felhasználható anyagvizsgálati technikák fejlesztésére, mert lehetővé teszi a feszültségkoncentráció mértékének meghatározását a repedés frontján.

Fragmentációs jelenségek

Ha egy szilárdtesttel rövid idő alatt nagymennyiségű energiát közlünk, például robbantással, vagy lövedék belövésével, akkor a testben egy lökéshullám jön létre, ami hatalmas számú repedést kelt és a szilárdtest sok apró darabra esik szét. Heterogén anyagok fragmentációs jelenségeinek egyik legfontosabb jellemzője, hogy a keletkezett darabok tömege hatványfüggvény eloszlással rendelkezik, ahol az exponens értéke nem függ az energia betáplálás módjától és az anyagi jellemzőktől. A

közelmúltban néhány kísérletben azonban azt találták, hogy bizonyos körülmények között az univerzalitás sérül, a tömegeloszlás exponense nő a betáplált energiával. Az univerzalitás sérülésének megértésére diszkrét elem szimulációkkal vizsgáltuk lapszerű testek lövedék belövés által kiváltott széttörését úgy, hogy széles tartományon változtattuk a test vastagságát a vékony laptól egészen a tömörszerű háromdimenziós testig. Vizsgálataink feltárták, hogy a tömegeloszlás exponense akkor függ a betáplált energiától, ha egy alacsony dimenziós fragmentálódó objektum magasabb dimenziós térbe van ágyazva. Ezt a repedési mintázatban megfigyelhető strukturális átmenet okozza: kis lapvastagságok esetén, alacsony energián a rugalmas hullámok interferenciája miatt kétdimenziós repedési mintázat jön létre. Növelve a betáplált energiát a repedési kép háromdimenzióssá válik, ami a tömegeloszlás exponensének növekedését eredményezi. Az effektus háromdimenziós tömbi anyagok esetén teljesen hiányzik, egyetlen univerzális exponens jellemzi a rendszert, mert nem tud létrejönni strukturális átmenet a repedési mintázatban [22].

Ha egy fragmentációs folyamat a világűrben játszódik le, például egy földkörüli pályán történt robbanás, vagy aszteroidák ütközése esetén, a fragmens felhő további időfejlődése jelentősen függ a darabok sebességének eloszlásától és a tömeg-sebesség korrelációtól. Vizsgálataink arra az eredményre vezettek, hogy vékony lapok esetén a fragmensok tömege és sebessége korrelált, azaz a nagyobb tömegű darabok kisebb sebességre tesznek szert. A tömeg-sebesség kapcsolatát hatványfüggvény írja le. A korreláció tömbi anyagok esetén eltűnik, ami az eltérő repedésszerkezetnek köszönhető. Az eredmények segíthetik az űrszemét kezelésére szolgáló módszerek fejlesztését a jövőben [23].

Háromdimenziós diszkrét elem modellünkkel szimulációkat végeztünk gömb alakú testek kemény fallal történő ütközés okozta széttörési folyamatainak megértésére. Megmutattuk, hogy az ütközési sebesség növelésével a rendszer fázisátalakulást mutat a károsodott és fragmentált állapotok között. Szuperszámítógépet használva szimulációkat végeztünk különböző rendszerméreteknél, majd végesméret skálázás segítségével, nagy pontossággal meghatároztuk a fázisátalakulás kritikus exponenseit. Kimutattuk, hogy az irodalomban megjósoltakkal ellentétben a hatványfüggvény tömegeloszlás exponense háromdimenziós tömbi testek esetén nem függ a betáplált energiától, összhangban a lapszerű geometriában kapott eredményeikkel is. Felhívtuk a figyelmet arra, hogy az irodalomban ismert energiafüggő exponensek oka a hibás adatfeldolgozási eljárásban keresendő [24].

A fragmensok tömegeloszlása mellett, részletesen elemeztük a keletkezett darabok alakját is mind az ismételten alkalmazott, úgynevezett szub-kritikus, mind pedig a gyors, nagy energiájú terhelés hatására lejátszódó széttörési folyamatokban. Együttműködő partnereinkkel terepi méréseket és laboratóriumi kísérleteket végeztünk változtatva az energia betáplálás módját és a fragmentált anyag típusát. Az alak-méret viszonyának elemzésével kimutattuk, hogy a fragmensok alakja meglepő univerzalitást mutat, azaz a méret változtatásával az alak ugyanolyan módon fejlődik függetlenül a fragmentáció módjától és az anyagi minőségtől: bizonyos méret alatt a darabok izotróp alakúak, viszont a méret növekedésével egy jól definiált, elnyúlt alakhoz konvergálnak. A konvergenciát egy exponenciális függvény írja le. Az eredmények értelmezésére bevezettünk egy diszkrét, sztochasztikus modellt, amely a fragmentációs jelenségeknek két aspektusát ragadja meg: (i) a darabolódás önhasonló módon történik, (ii) a repedések legnagyobb valószínűséggel a fragmentumok leghosszabb kiterjedésére merőleges irányban keletkeznek. A modellel végzett számítógépes szimulációk nagyon jó egyezést adnak a mérési eredményekkel. Mindössze egyetlen szabad paraméter változtatásával sikerült a fragmentálódó rendszer minden mért mennyiségét nagy pontossággal reprodukálni, ami tovább erősíti az univerzalitást [25].

A projekt eredményeként született legfontosabb publikációk

1. A.Yamamoto, F. Kun, and S. Yukawa, *Micro-structure of damage in thermally activated fracture of Lennard-Jones systems*, Physical Review E **83**, 066108 (2011).
2. N. Yoshioka, F. Kun, and N. Ito, *Time evolution of damage in thermally induced creep rupture*, Europhysics Letters **97**, 26006 (2012).
3. N. Yoshioka, F. Kun, and N. Ito, *Kinetic Monte Carlo Algorithm for thermally induced breakdown of fiber bundles*, Physical Review E **91**, 033305 (2015).
4. Z. Halász, Zs. Danku, and F. Kun, *Competition of strength and stress disorder in creep rupture*, Physical Review E **85**, 016116 (2012).
5. S. Lennartz-Sassinek, Z. Danku, F. Kun, I. G. Main, and M. Zaiser, *Damage growth in fibre bundle models with localized load sharing and environmentally-assisted ageing*, Journal of Physics: Conference Series **410**, 012064 (2013).
6. S. Lennartz-Sassinek, I. G. Main, Zs. Danku, and F. Kun, *Time evolution of damage due to environmentally assisted aging in a fiber bundle model*, Physical Review E **88**, 032802 (2013).
7. Zs. Danku and F. Kun, *Creep rupture as a non-homogeneous Poissonian process*, Scientific Reports **3**, 2688 (2013).
8. Zs. Danku and F. Kun, *Record breaking bursts in a fiber bundle model of creep rupture*, Frontiers in Physics **2**, 8 (2014).
9. Zs. Danku and F. Kun, *Temporal and Spacial Evolution of Bursts in Creep Rupture*, Physical Review Letters **111**, 084302 (2013).
10. Zs. Danku and F. Kun, *Temporal and Spatial Evolution of Bursts in a Fiber Bundle Model of Creep Rupture*, Key Engineering Materials **592**, 773 (2014).
11. Zs. Danku, F. Kun, and H. J. Herrmann, *Fractal frontiers of bursts and cracks in a fiber bundle model of creep rupture*, Physical Review E **92**, 062402 (2015).
12. H.A. Carmona, F.K. Wittel, and F. Kun, *From fracture to fragmentation with discrete element modeling*, European Physical Journal Special Topics **223**, 2369 (2014).
13. F. Kun, I. Varga, S. Lennartz-Sassinek, and I. G. Main, *Rupture Cascades in a Discrete Element Model of a Porous Sedimentary Rock*, Physical Review Letters **112**, 065501 (2014).
14. F. Kun, I. Varga, S. Lennartz-Sassinek, and I. G. Main, *Approach to failure in porous granular materials under compression*, Physical Review E **88**, 062207 (2013).
15. K. Kovács, R. C. Hidalgo, I. Pagonabarraga, and F. Kun, *Brittle-to-ductile transition in a fiber bundle with strong heterogeneity*, Physical Review E **87**, 042816 (2013).
16. E. Karpas and F. Kun, *Disorder induced brittle to quasi-brittle transition in fiber bundles*, Europhysics Letters **95**, 16004 (2011).
17. G. Villalobos-Camargo, F. Kun, and J. D. Munoz, *Effect of disorder on temporal fluctuations in drying induced cracking*, Physical Review E **84**, 041114 (2011).
18. G. Villalobos-Camargo, F. Kun, D. L. Linero, and J. D. Munoz, *Size distribution and waiting times for the avalanches of the Cell Network Model of Fracture*, Computer Physics Communications **182**, 1824 (2011).
19. G. Timar and F. Kun, *Crackling noise in three-point bending of heterogeneous materials*, Physical Review E **83**, 046115 (2011).
20. Z. Halász, F. van Steeden, and F. Kun, *Transition from Straight to Fractal Cracks due to Projectile Penetration*, Key Engineering Materials **592**, 765 (2014).
21. Zs. Danku, Gy. B. Lenkey, and F. Kun, *Statistical features of magnetic noise in mixed-type impact fracture*, Applied Physics Letters **106**, 064102 (2015).
22. G. Pál, I. Varga, and F. Kun, *Emergence of energy dependence in the fragmentation of heterogeneous materials*, Physical Review E **90**, 062811 (2014).
23. G. Pál, I. Varga, and F. Kun, *Mass-Velocity Correlation in Impact Fragmentation*, Key Engineering Materials **592**, 141 (2014).
24. G. Timár, F. Kun, H. A. Carmona, and H. J. Herrmann, *Scaling laws for impact fragmentation of spherical solids*, Physical Review E **86**, 016113 (2012).
25. G. Domokos, F. Kun, A. A. Sipos, and T. Szabo, *Universality of fragment shapes*, Scientific Reports **5**, 9147 (2015).