

MŰSZAKI SZEMLE

42. szám, 2008.

Szerkesztőbizottság elnöke / President of Editing Committee

Dr. Köllő Gábor

Szerkesztőbizottság tagjai / Editing Committee

Dr. Balázs L. György – HU,
Dr. Biró Károly Ágoston – RO,
Dr. Csibi Vencel-József – RO,
Dr. Fedák László – UA,
Dr. Kása Zoltán – RO,
Dr. Kászonyi Gábor – HU,
Dr. Majdik Kornélia – RO,
Dr. Maros Dezső – RO,
Dr. Nagy László – RO,
Dr. Pécs Hajnalka – YU,
Dr. Puskás Ferenc – RO,
Dr. Szalay György – SK,
Dr. Turchany Guy – CH

Kiadja / Editor

Erdélyi Magyar Műszaki
Tudományos Társaság – EMT
Societatea Maghiară Tehnico-Științifică
din Transilvania
Ungarische Technisch-Wissenschaftliche
Gesellschaft in Siebenbürgen
Hungarian Technical Scientific Society
of Transylvania

Felelős kiadó / Managing Editor

Dr. Köllő Gábor

A szerkesztőség címe / Address

Romania
400604 Cluj, Kolozsvár
B-dul 21. Decembrie 1989., nr. 116.
Tel/fax: 40-264-590825, 594042
Levélcím: RO – 400750 Cluj, C.P. 1-140.

Nyomda / Printing

Incitato Kft.

ISSN 1454-0746

CNCSIS által elismert folyóirat
Revistă acreditată de CNCSIS

www.emt.ro

emt@emt.ro

Tartalomjegyzék – Content– Cuprins

Klaszterezés és fázisátalakulás frusztrált hálózatokban Coalition Formation and Phase Transition in Frustrated Network Clusterizare și Tranziție de Fază în Rețele Frustrate	
NÉDA Zoltán, RAVASZ Mária, FLORIAN Răzvan, LIBÁL András, GYÖRGYI Géza	3
A természet és a társadalom komplex hálózataiban található átfedő csoportosulások feltárása Uncovering the Overlapping Community Structure of Complex Networks in Nature and Society Descoperirea grupărilor suprapuse în rețelele complexe din natură și societate	
PALLA Gergely, DERÉNYI Imre, FARKAS Illés, POLLNER Péter, VICSEK Tamás	9
Analogikai celluláris számítógépek egy új paradigma a számítástechnikában Analogic Cellular Computers – A New Computational Paradigm Calculatoare analogice celulare – O nouă paradigmă computațională	
ERCSEY-RAVASZ Mária, ROSKA Tamás, NÉDA Zoltán	19
Rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás egy rugó-fal típusú mágnesezési modellben Disorder-induced Phase Transition in a Spring-block Type Magnetization Model Tranziție de fază indusă de dezordine într-un model de magnetizare tip resort-bloc	
KOVÁCS Katalin, NÉDA Zoltán	26
A beltéri radon-koncentráció mérése A maratott nyomdetektoros módszer két változata Indoor Radon Measurements Using Two Variants of the Etched Track Detectors' Method Măsurarea concentrației de radon din locuințe. Două metode de măsurare cu detectori solizi de urme	
CSEGZI Sándor, Ana DANIȘ	31

A kiadvány megjelenését támogatta



COMMUNITAS
ALAPÍTVÁNY

Communitas Alapítvány – Kolozsvár



Eurotrans Alapítvány – Kolozsvár

Klaszterezés és fázisátalakulás frusztrált hálózatokban

Coalition formation and phase transition in frustrated network

NÉDA Zoltán¹, RAVASZ Mária¹, FLORIAN Răzvan¹, LIBÁL András²
és GYÖRGYI Géza³

¹Babes-Bolyai University, Dept. of Theoretical Physics, Cluj-Napoca, Romania

²Center for Nonlinear Studies, Los Alamos National Laboratory, U.S.A.

³Eötvös Loránd Tudományegyetem, Elméleti Fizika Tanszék, Budapest, Magyarország

ABSTRACT

The ground-state of an infinite-range Potts glass-type model with $\pm J$ bonds and unrestricted number of states is used to investigate coalition formation. As a function of the q probability of $+J$ bonds in the system it is found that the r relative size of the largest cluster (a cluster being the group of elements in the same state) shows a percolation like behavior. By simple analytical approaches and several numerical optimization methods we investigate the $r(q)$ curves for finite systems sizes. Non-trivial consequences for social percolation problems are discussed.

ÖSSZEFOGLALÓ

Egy végtelen hatótávolságú Potts-üvegszerű modell alapállapotát vizsgáljuk szociális klaszterezési és koalíció kialakulási folyamatok jellemzésére. A modellben a pozitív és negatív kötések együttes jelenléte az optimális klaszterezés szempontjából egy frusztrációt okoz, amelynek következtében a feladatot jellemző költségfüggvény optimalizációja egy komplex, NP nehéz feladat. Meglepő eredményként azt kapjuk, hogy a pozitív kötések valószínűségének a függvényében az optimális állapotban a legnagyobb klaszter relatív mérete egy perkoláció-szerű fázisátalakulást mutat. Ezen geometriai fázisátalakulás-szerű jelenséget véges rendszerekben analitikus és számítógép-szimulációs módszerekkel vizsgáljuk. A jelenségnek számos érdekes és nemtriviális szociológiai következményét tárgyaljuk.

Kulcsszavak: Potts-üveg, klasztereződés, frusztrált hálózatok, optimalizáció

1. BEVEZETŐ

Nap mint nap észlelhetjük a politikában, a gazdaságban, a társadalomban a különböző koalíciók, csoportok közti versengéseket. Természetesen ezen koalíciók kialakulása leginkább az országok vagy pártok közti politikai kapcsolatok, a cégek közti gazdasági viszonyok, és a kis társaságok, illetve egyének közti kapcsolatok jellegétől függ. Ezek a társadalmi kapcsolatok egy hierarchikus struktúrájú, nagyon bonyolult topológiával rendelkező frusztrált hálózatot alkotnak. Ezeknek a hálózatoknak a lényeges tulajdonságai aránylag egyszerű fizikai modellek segítségével tanulmányozhatók. Ha leegyszerűsítjük a kölcsönhatásokat pozitív (vagy vonzó) és negatív (vagy taszító) kapcsolatokra (pozitív kapcsolatról beszélünk barátok vagy partnerek esetén, negatív kapcsolatról ellenségek vagy vetélytársak esetében) belátható, hogy a rendszer koalíciókra szakad, hogy minél jobban megfeleljen az egyének – vagy gazdasági hálózatok esetében a cégek – közti kötéseknek [1]. Ideális csoport-szerveződés (klasztereződés) esetén az egy csoportban levő egyének közt csak vonzó, a különböző csoportokban levők között pedig csak taszító kölcsönhatás létezik. Természetesen ilyen ideális állapot nem mindig lehetséges, de statisztikus fizikai módszerekkel meghatározható az optimális konfiguráció a rendszerben [2-3].

Ez az optimális állapot nagyon különbözhet annak függvényében, hogy a rendszerben a pozitív vagy negatív kötések dominálnak. Ha a rendszerben a pozitív kapcsolatok vannak túlsúlyban, vagyis ha a társadalomban a kollaborációs hajlam nagy, akkor egy nagy klaszter (angolul cluster: fűrt) alakul ki. Ha viszont sok a negatív kötés a rendszerben, vagyis a konfliktusok nagyon gyakoriak, akkor minden egyén külön csoportot

alkot. Nagyon kis rendszerek esetén a két véglet közti átmenet fokozatos, de nagy rendszerekben ez az átmenet nagyon gyorsan történik, és amint majd tárgyalni fogjuk egy érdekes fázisátalakulás mutatható ki.

A probléma ami feltevődik, egy frusztrált rendszer optimalizálása. A feladat komplexitása hasonlít más érdekes és közismert NP nehéz problémához: fehérjeláncok egyensúlyi tekeredése, spinűvegek, az utazó-ügynök feladat vagy a gráf-színezési feladathoz. Ezek a feladatok azért bonyolultak, mert a megoldásukhoz szükséges idő nagyon gyorsan nő a rendszer méretével (bármilyen fokú polinomfüggvényénél gyorsabban). Ilyen feladatok tanulmányozására gyakran közelítő módszereket kell alkalmazni [4].

2. EGY EGYSZERŰ MODELL

Tekintsünk egy egyszerű modellt, amely segítségével szociális rendszerek klasztereződését, koalíciókra való szakadását vizsgáljuk [4]. A valóságban a társadalmi, politikai, gazdasági, stb. kapcsolatok folyton változnak, a modell viszont az egyszerűsítés kedvéért feltételezi, hogy a folyamat során (amíg a rendszer eljut az optimális állapotba) a kapcsolatok állandóak.

Legyen egy N egyedből álló globálisan csatolt rendszerünk. Két elem között a kötés lehet pozitív, ha az egyének szívesen kollaborálnak vagy lehet negatív ha konfliktusban vannak. A valóságban a kapcsolatok különböző erősségűek lehetnek és nem mindig szimmetrikusak: vagyis az egyének egymáshoz való viszonya nem mindig kölcsönös (pl. A nagyon kedveli B-t, de B szóba se áll vele). Itt azt az egyszerűbb esetet tekintjük, mikor szimmetrikus és egyforma erősségű kötéseink vannak. Az egyszerűség kedvéért ugyanakkor azt is feltételezzük, hogy az egyének egyforma súlyfaktoral rendelkeznek. A súlyfaktor a valóságban fontos lehet, mert sokszor figyelembe kell vennünk, hogy a különböző fontossággal rendelkező egyedek kötései különböző mértékű frusztrációt jelentenek a rendszerben. Elég a politikára gondolunk: ha az Egyesült Államok van konfliktusban egy másik országgal, sokkal nagyobb az általános frusztráció mintha esetleg Togo és Benin kerülne konfliktusba.

A fentebb értelmezett ideális rendszerben koalíciók fognak kialakulni, úgy, hogy minden egyén szeretne egy csoportba kerülni azokkal, akikkel pozitív kapcsolata van, és távol szeretne maradni azoktól, akikhez negatív kötés fűzi. Felmerül az a kérdés, hogyan fognak csoportokba rendeződni az egyének ahhoz, hogy legjobban kielégüljenek a kapcsolatok. Ideális klasztereződés esetén minden klaszteren belül csak pozitív, a csoportok között pedig csak negatív kötések kellene, hogy legyenek. Rögtön belátható azonban, hogy ez nem mindig (sőt nagyobb rendszerek esetén szinte soha nem) lehetséges. A feladat matematikai megfogalmazásához definiálható egy költségfüggvény (a rendszer energiája), amely annál nagyobb, minél erősebb a frusztráció a rendszerben. Ha a költségfüggvényt jól választjuk meg, feltételezhetjük, hogy ideális klasztereződés esetén ez minimális, így a rendszer „energiáját” minimalizálva találhatjuk meg az optimális állapotot. A rendszer energiájának felírása pár nagyon egyszerű megfontoláson alapszik. Mint már említettük az energia a rendszerben létező frusztráció mértéke. Sorra véve a kötéseket, mindig eldönthető, hogy a jelenlegi állapot eleget tesz-e a kötés jellegének vagy nem, és definiálható-e egy egyszerű költségfüggvény (energia) amely jellemzi a rendszer ellentmondás-mentességét. Így N globálisan kapcsolt egyed esetén a számunkra fontos K energiafüggvény alakja a következő lesz:

$$K = -\sum_{i < j} T_{ij} \delta_{\sigma(i)\sigma(j)} \quad (1)$$

ahol, $T_{ij} = \pm 1$ és $\sigma(i) \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$, vagyis azt az esetet vizsgáljuk, amikor $p=N$ állapot (klaszter) létezhet a rendszerben (a koalíciók számát nem korlátozzuk). A T_{ij} kötések eloszlásfüggvénye:

$$P(T_{ij}) = q\delta(T_{ij} - 1) + (1 - q)\delta(T_{ij} + 1), \quad (2)$$

ahol a q a pozitív kötések előfordulási valószínűsége, vagy ezek gyakorisága a rendszerben. Könnyen belátható, hogy a T_{ij} kötések kiosztása után az optimális állapotban a rendszer K energiája (költségfüggvénye) minimális lesz, így ennek az energiának a minimalizálásával keressük az optimális állapotot.

3. ÉRDEKES FÁZISÁTALAKULÁS

Az optimális állapotot különböző mennyiségekkel jellemezhetjük, mint pl. a kialakult koalíciók száma, a koalíciók átlagos mérete vagy a legnagyobb koalíció mérete. Természetesen ezen mennyiségek kiszámolásakor mindig a T_{ij} kötések nagyon sok realizációjára kell megkeresnünk az optimális állapotot, és az ezekben kapott értékek átlagát kell tekintenünk (egy statisztikai átlaggal kell dolgoznunk). A legérdekesebb viselkedést mutató paraméter, amely egyértelmű fázisátalakulásra utal a pozitív kötések valószínűségének a függvényében

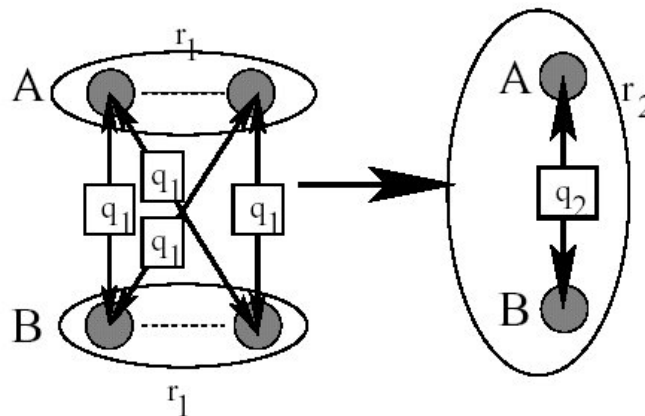
az a legnagyobb klaszternek a teljes rendszerhez viszonyított mérete, r , amit röviden a legnagyobb klaszter relatív méretének nevezünk. Ez a mennyiség 0 és 1 között van, és ez lesz a számunkra érdekes rendparaméter. Könnyen belátható, hogy ha csak pozitív kötések vannak ($q=1$), akkor egyetlen klaszter fog kialakulni ($r=1$), ha pedig csak negatív kötések ($q=0$) vannak, akkor egyáltalán nem alakulnak ki koalíciók ($r=1/N$), vagyis minden egyén egy külön csoportot képez az optimális (energiát minimalizáló) állapotban. Úgy gondolnánk, hogy ezen két szélső eset között lassú, fokozatos átmenet van. Meglepő módon azonban egy fázisátalakulás észlelhető a q paraméternek egy kritikus értéke körül. A feladat, amint már említettük egy komplex optimalizálási feladat, amit különböző analitikus vagy numerikus közelítő módszerekkel tanulmányozhatunk véges rendszerek esetén. Szigorú értelemben vett fázisátalakulás azonban csak végtelen nagy rendszer esetén létezik, és így a tanulmányaink során a véges rendszerekben kapott eredményekből kell következtetnünk arra, hogy mi történne végtelen nagy rendszer esetén. A következőkben röviden bemutatunk néhány analitikus és numerikus megközelítő módszert, amelyekkel a feladatot tanulmányoztuk [4].

3.1. A renormalizációs módszer

Első megközelítésként egy egészen egyszerű renormalizációs módszert mutatunk be. A módszer lényege, hogy mindig megduplázzuk a rendszer méretét és a rendparaméter előbbi értékéből megbecsüljük az új értékét. Eredetileg egy két elemből álló rendszerből indulunk ki. Ha a két elem között a kötés $q_1=q$ valószínűséggel pozitív, azt jelenti, hogy az optimális állapotban a legnagyobb klaszter relatív mérete q_1 valószínűséggel 1 illetve $1-q_1$ valószínűséggel $1/2$. Tehát:

$$r_1 = q_1 + (1 - q_1)/2 \quad (3)$$

Második lépésben veszünk két ilyen, két elemből álló rendszert (**A**,**B**), amelyekben a legnagyobb klaszter mérete r_1 , és összekötjük az elemeket egymással. (1. ábra)



1. ábra

A renormalizáció grafikus vázlatja

Most ki kell számítanunk annak a valószínűségét (q_2), hogy az új, **A** és **B** közti kötés pozitív legyen. Ahogy az ábrán is látható, az **A** és **B** elemei között összesen négy kötés létezik, ezért az új kötést pozitívnak vesszük a következő esetekben: (i) ha mind a négy kötés pozitív, ennek a valószínűsége q_1^4 , (ii) ha három pozitív és egy negatív, mivel négy ilyen eset van ennek a valószínűsége $4q_1^3(1 - q_1)$, (iii) amikor két pozitív és két negatív kötés van (összesen hat ilyen kombináció létezik) akkor az esetek felében vesszük pozitívnak az új kötést. A valószínűség így $3q_1^2(1 - q_1)^2$. Tehát

$$q_2 = q_1^4 + 4q_1^3(1 - q_1) + 3q_1^2(1 - q_1)^2, \quad (4)$$

a legnagyobb klaszter mérete pedig

$$r_2 = q_2 + (1 - q_2)r_1/2, \quad (5)$$

mivel q_2 valószínűséggel **A** és **B** egy klasztert alkot, vagyis a rendparaméter 1, $(1 - q_2)$ valószínűséggel pedig a legnagyobb klaszter az **A** vagy a **B** legnagyobb klasztere lesz, amelynek az eddigi relatív mérete r_1 volt, de mivel a rendszer méretét megdupláztuk, most ehelyett $r_1/2$ -t kell írunk a képletbe.

Ezután végtelen sokszor megismételhetjük ezt a lépést, megkétszerezve a rendszer méretét. k lépés után a rendszer mérete $N_k = 2^k$, és felírhatjuk a renormalizációs egyenletek általános formáját.

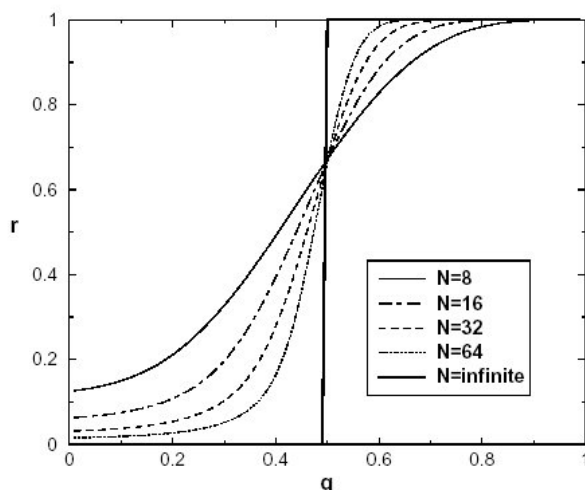
$$q_{k+1} = q_k^4 + 4q_k^3(1 - q_k) + 3q_k^2(1 - q_k)^2, \quad (6)$$

$$r_{k+1} = q_{k+1} + (1 - q_{k+1})^k / 2. \quad (7)$$

Érdekel minket, hogy milyen értékhez tart a rendparaméter végtelen lépés után, annak függvényében, hogy milyen kezdeti q valószínűségi értékből indultunk ki. A fenti egyenletnek két stabil iterációs fixpontja van 0 és 1 , illetve egy instabil fixpontja az $1/2$. Ha $q \in [0, 1/2)$ értékből indulunk ki, akkor $\lim_{k \rightarrow \infty} q_k = 0$ és

$\lim_{k \rightarrow \infty} r_k = 0$, ha pedig egy $q \in (1/2, 1]$ értéktől indulunk el, akkor $\lim_{k \rightarrow \infty} q_k = 1$ illetve $\lim_{k \rightarrow \infty} r_k = 1$. Az eredmények

alapján elmondhatjuk, hogy végtelen rendszer esetében két különböző fázis létezik, a fázisátalakulás pedig a $q_c = 1/2$ értéknél történik. Ha a rendszerben egy kötés $q < 1/2$ valószínűséggel pozitív, vagy másképpen megfogalmazva, a rendszerben a kötéseknek kevesebb mint fele pozitív, akkor végtelen nagy rendszer esetén a legnagyobb klaszter relatív mérete tart a nullához. Ha a rendszerben $q > 1/2$, tehát a kapcsolatok több mint fele pozitív, akkor a legnagyobb klaszter relatív mérete 1 -hez tart. A renormalizációs egyenletek alapján ábrázolhatjuk a rendparaméter változását a q valószínűség függvényében, a termodinamikai határesetben illetve különböző véges méretű rendszerek esetén. (2. ábra) Az ábrán látható, hogy valóban egy perkolációra emlékeztető fázisátalakulásról van szó.

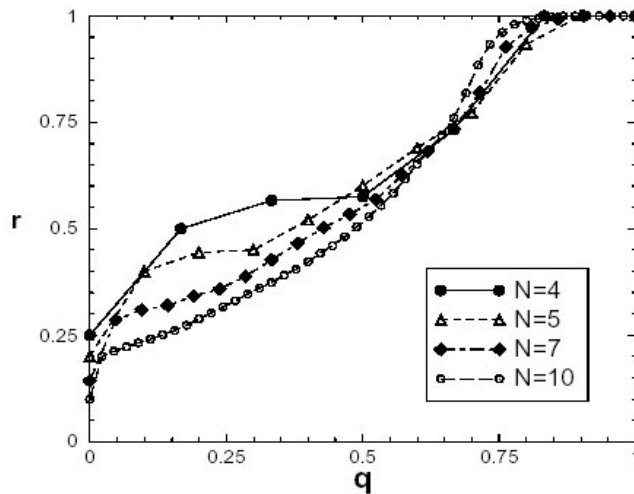


2. ábra

A renormalizációs módszerrel nyert eredmények

3.2. Egzakt eredmények kis rendszerek esetén

Kis rendszerekben a kötéseknek egy adott eloszlása esetén számítógép segítségével feltárható a $\sigma(i)$ koalíciók összes lehetséges konfigurációja. Mindegyik konfigurációnál kiszámítva a rendszer energiáját, egzakt módon megkaphatjuk a minimális energiát és a hozzátartozó optimális konfigurációt illetve a rendparamétert. A rendparaméter viszont változhat a kötések különböző eloszlása esetén, ezért átlagolnunk kell. $N \leq 7$ méretű rendszerekben a kötések eloszlásának összes konfigurációja is, tehát itt teljesen egzakt eredményeink vannak. $7 < N \leq 10$ méretű rendszereknél a számítógép által igényelt memória és futtatási idő nagyon megnő, ezért már nem számoljuk ki a rendparamétert a kötések összes lehetséges eloszlása esetén, de egy elég nagy számú (5000) konfigurációra átlagolunk. Az eredmények a 3. ábrán láthatók. Annak ellenére, hogy csak nagyon kis méretű rendszerekre tudunk egzakt eredményeket kapni, szükségesnek tartottuk, elvégezni ezeket a számolásokat, hogy ellenőrizhessük a többi módszer által nyújtott eredményeket. Az ábrán látható, hogy az $r(q)$ görbék meredeksége (a q_c körül) egyre nő a rendszer méretének növelésével. Ugyanezt mutatják az előbbi megközelítésekkel kapott ábrák is. Az eredmények alátámasztják elvárásainkat.



3. ábra
Egzakt eredmények

3.3. Monte Carlo féle optimalizációs módszerek

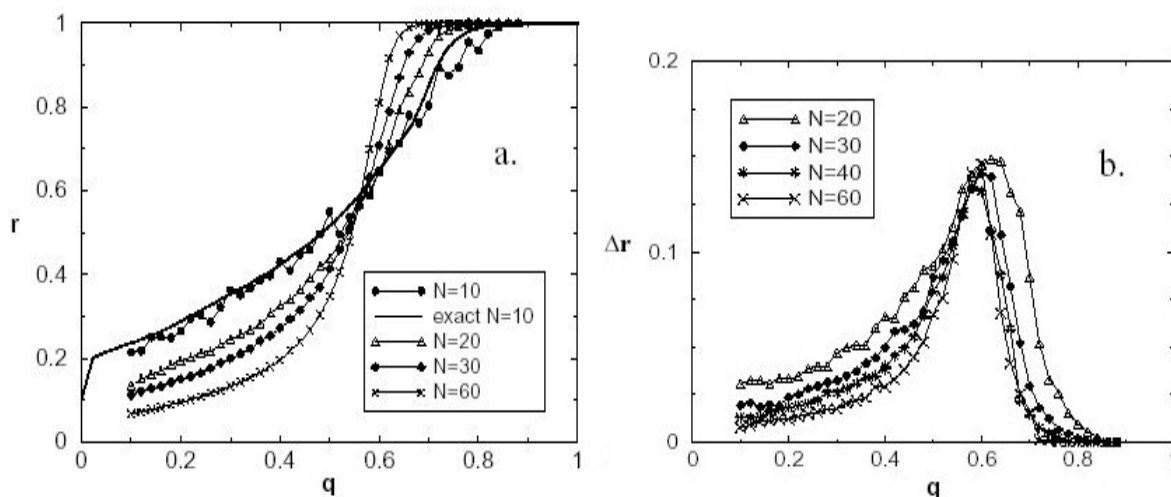
A statisztikus fizikában frusztrált rendszerek esetén leggyakrabban a Monte Carlo típusú optimalizációs módszereket használják. A mi feladatunk, hogy a rendszer energiáját minimalizálva keressük a rendszer optimális alapállapotát. Erre a klasszikus szimulációs hűtési módszert alkalmazzuk (*simulated annealing* [5]). Kezdetben az elemeket véletlenszerűen különböző állapotokba helyezzük, és a kötéseket q valószínűséggel vesszük pozitívnak. A rendszert egy T hőmérsékleti értékkel jellemezzük, amelynek értékét az időlépések során nagyon lassan csökkentjük. Egy időlépésben nagyon sokszor elvégezzük a következő lépéseket: (i) véletlenszerűen kiválasztunk egy elemet a rendszerből, (ii) áthelyezzük a legmegfelelőbb koalícióba, úgy, hogy a rendszer összenergiája a lehető legkisebb legyen, (iii) ha áthelyezéssel nem lehet csökkenteni a rendszer energiáját, megkeressük, hogy melyik koalícióba helyezve az elemet nőne a legkevesebbet a rendszer energiája és ezt a lépést $\exp(-\Delta K/T)$ valószínűséggel végrehajtjuk. Az időlépés végén csökkentjük a hőmérséklet értékét, majd a következő időlépésben ismét elvégezzük ezeket a lépéseket. Így megközelítjük a kötések egy adott eloszlása esetén a rendszer optimális állapotát. Látható, hogy bizonyos valószínűséggel a rendszer energiáját növelő lépéseket is megengedünk, és ez a valószínűség a hőmérséklettől függ. A hűtési módszert frusztrált rendszerek esetén alkalmazzák. A mi modellünk is frusztrált és az energiának nagyon sok lokális minimuma létezik. Ha csak az energiát csökkentő lépéseket engedélyezzük, a rendszer könnyen bekerül egy ilyen lokális minimumba és nem kerülhet ki onnan. A hűtési módszer lényege az, hogy a hűtés elején, amíg nagy a hőmérséklet, viszonylag nagy energiaváltozások megengedettek a rendszerben, majd nagyon lassan csökkentve a hőmérsékletet, egyre kisebb és kisebb fluktuációkat engedélyezünk, így ha jól kikísérletezzük a szimulációs paramétereket, akkor elérhető, hogy a rendszer a globális minimumba kerüljön. Sajnos soha nem lehetünk teljesen biztosak, hogy az energia elérte a minimumot, de jelenleg ez a módszer a legáltalánosabban használt a hasonló komplexitású feladatok megoldására.

A 4. ábrán a szimulációs hűtéssel nyert eredmények láthatók. Mivel a módszer csak közelítő módszer, és mint már említettük nagyon érzékeny a szimulációs paraméterek megválasztására, szükségünk volt az előbb alkalmazott egzakt numerikus módszerre, hogy eredményeinket megalapozhassuk. A 4a. ábrán látható, hogy $N=10$ esetén az egzakt eredmények tökéletesen találnak a Monte Carlo féle optimalizációs módszerekkel nyert eredményekkel. A 4b. ábrán láthatjuk, hogy a rendparaméter varianciája a fázisátalakulási pont körül a legnagyobb.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Módszereink egyértelműen bizonyítják, hogy a vizsgált rendszerben a $q_c=0.5$ körül egy perkolációra emlékeztető fázisátalakulás van. Ez a fázisátalakulás azonkívül, hogy a véletlenszerű frusztrált hálók fontos tulajdonsága, statisztikus fizikai vonatkozások mellett érdekes lehet bizonyos szociológiai jelenségek szempontjából is. Erre a legjobb példa talán egy osztályközösség. Az osztályokban is észlelhető a kis csapatok kialakulása, ugyanakkor vannak osztályok, ahol a gyerekek nagyon jól egyeznek, az egész osztály egyetlen társaságot alkot, és vannak esetek amikor szinte egyáltalán nem alakulnak ki csoportok, maximum két-három

főből álló kis baráti körök. Kis rendszerek esetén (amint a szimulációs eredmények is mutatják) az észlelt fázisátalakulás nem „éles”, és inkább egy folytonos átmenet tapasztalható, mint egy ugrás. A legkiszámíthatatlanabb szociológiai rendszerek azok, amelyekben a pozitív és negatív kötések megközelítőleg egyenlő számban vannak, vagyis a $q=0.5$ körül. Ilyenkor a pozitív kapcsolatok számának legkisebb változása is nagy ugrást okozhat a legnagyobb klaszter méretében.



4. ábra

*A szimulációs hűtési módszer eredményei
a) a rendparaméter (a legnagyobb klaszter) és b) a rendparaméter deviációja
a q pozitív kötések koncentrációjának függvényében*

Ez a modell természetesen egy első közelítés. A valós szociológiai rendszerek nagyon komplex rendszerek, a társadalmi kapcsolatok nagyon bonyolult topológiával rendelkező hálózatot alkotnak, és elsősorban nem globálisan csatolt rendszerek. Ezenkívül a modell a kötések és a társadalmi szerepeket időben állandónak tekinti és mindig egy adott konfiguráció esetén kell megkeressük az optimális állapotot. Tudjuk jól, hogy a valóságban viszont a kapcsolatok és a szerepek folyton változnak, az optimális állapot kialakulása közben is, bár ezek a változások valószínűleg nem olyan nagy mértékűek. A modell ugyanakkor elhanyagolja a rendszer dinamikáját, feltételezve, hogy mindig az optimális állapot felé tart. Valós rendszerek esetén nem lehetünk biztosak abban, hogy a rendszer eljut az optimális állapotba. Mivel ezek mind frusztrált rendszerek, az energiának sok lokális minimuma van, és könnyen megtörténhet, hogy a rendszer bekerül egy ilyen állapotba és nem éri el az optimális állapotot (nem a globális minimumba kerül). Ennek egyik oka az lehet, hogy általában az egyének a saját érdekeiket nézik, a saját energiájukat próbálják csökkenteni és nem a „globális” optimalizációra törekszenek. Vannak esetek, amikor az egész rendszer energiáját nem lehet csökkenteni egy-egy egyén egyeztetés nélküli koalíció váltásával, csak úgy, hogy egy lépésen belül több egyént helyezünk át más klikkbe.

Habár egy ilyen modell még nem alkalmas valós koalíciók kialakulásának magyarázatára, hasznos lehet majd hasonló, komplexebb, a valós rendszereket jobban megközelítő optimalizációs modellek tanulmányozásánál. Az észlelt fázisátalakulás meg elvi jelentőségű a frusztrált véletlenszerű rácsok szemszögéből. Még felderítésre vár, hogy nem globálisan csatolt rendszerekben hogyan történik a koalíciók kialakulása. Ez már egy jobb megközelítést jelentene a társadalomra vagy más nagyobb szociális rendszerekre vonatkozóan.

HIVATKOZÁSOK

- [1.] R. Axelrod, S. Bennet, *Br. J. Political Science*, **23** (1993) 211
- [2.] S. Galam, *Physica A*, **230** (1996) 174; *Physica A* **238** (1997) 66
- [3.] R. Florian, S. Galam, *Eur. Phys. J. B*, **16** (2000) 189
- [4.] Z. Neda et al., *Physica A*, **362** (2006) 357
- [5.] S. Kirckpatrick, C.D. Gelatt and M.P. Vecchi, *Science* **220** (1983) 671

A természet és a társadalom komplex hálózataiban található átfedő csoportosulások feltárása

Uncovering the Overlapping Community Structure of Complex Networks in Nature and Society

PALLA Gergely^{1,2}, DERÉNYI Imre², FARKAS Illés^{1,2},
POLLNER Péter¹ és VICSEK Tamás^{1,2}

¹ MTA-ELTE Statisztikus Fizika és Biológiai Fizika kutatócsoport,
H1117 Budapest, Pázmány Péter Sétány 1/A, Magyarország, (tel.: +36-1-3722795, fax: +36-1-3722757,
e-mail: bioadmin@angel.elte.hu, honlap: <http://angel.elte.hu/kutcsop>)

² ELTE Biológiai Fizika tanszék, H1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, Magyarország,
(tel.: +36-1-3722795, fax: +36-1-3722757, e-mail: bioadmin@angel.elte.hu, honlap: <http://angel.elte.hu>)

ABSTRACT

A fundamental question of great current interest is how to interpret the global organization of real-world networks as the coexistence of their structural sub-units (communities) associated with more highly interconnected parts. The existing methods used for large networks find disjunct communities, while most of the actual networks are made of highly overlapping and nested cohesive groups of nodes. Here we introduce the Clique Percolation Method enabling the extraction of overlapping communities on a large scale. We find that overlaps are indeed very significant, and the distributions we introduce to characterize the statistical features of community overlaps reveal novel universal features of networks. Finally, we find that the development of the modular structure of networks is driven by preferential attachment, in complete analogy with the growth of the underlying network of nodes.

ÖSSZEFOGLALÓ

A hálózatkutatás egyik alapvető fontosságú új területe a természetben található hálózatok csoportosulásainak feltárása. A hálózati csoportosulások általában olyan sűrűn kapcsolt szerkezeti alegységnek felelnek meg, melyben a csúcsok erősebben kötődnek egymáshoz, mint a hálózat többi részéhez. A nagyméretű hálózatokra jelenleg alkalmazott csoportosuláskereső módszerek diszjunkt csoportosulásokat találnak, ezzel szemben a valódi hálózatok többségében a csoportosulások egymást átfedik, és esetenként egymásba is ágyazódhatnak. Az általunk kifejlesztett Klikk Perkolációs Módszer egy hatékony megoldást nyújt nagyméretű hálózatok átfedő csoportosulásainak feltárására. Vizsgálataink szerint a természetben található hálózatok esetén a csoportosulások átfedése valóban szignifikáns, és az átfedések statisztikai tulajdonságainak jellemzésére bevezetett eloszlások a hálózatok új univerzális tulajdonságait tárják fel. A csoportosulások időfejlődésével kapcsolatos eredményeink szerint a hálózatok moduláris szerkezetének kialakulását preferenciális csatolódási mechanizmusok vezérlik, teljesen analóg módon az alapul szolgáló hálózatok növekedésével.

Kulcsszavak: Komplex hálózatok, átfedő hálózati modulok, csoportosulások, klikk perkoláció, preferenciális csatolódás

1. BEVEZETÉS

1.1. Hálózati csoportosulások

A hálózatok a természet és a társadalom leírásának igen általános és gyakran használt eszközei [1]. A rajtuk végbemenő folyamatok szempontjából meghatározó szerepe van a csoportosulásoknak (más néven moduloknak vagy klasztereknek). A csoportosulásoknak nincs egy általánosan elfogadott, egyértelmű definíciójuk, de általában olyan részgráfokat szokás csoportosulásnak elfogadni, amelyekben belül a csúcsok egymáshoz erősebben (sűrűbben) kapcsolódnak, mint a hálózat többi részéhez [5]. Egy egyszerű példa hálózati csoportosulásokra az emberi kapcsolatok hálózatában található családok, baráti körök, munkahelyi közösségek által

definiált csoportok. Ismert, hogy például a hírek egy-egy ilyen csoportosuláson belül (az egymással személyesen vagy akár telefonon gyakran beszélő emberek között) gyorsan terjednek, a csoportosulások között viszont jóval lassabban, ezért az emberi kapcsolatok hálózatán történő információáramlás szempontjából alapvető szerepük van a csoportosulásoknak. A csoportosulásoknak egy másik példája a világháló oldalainak hálózatában található olyan weboldalak, amelyek egymás közt sok mutatóval rendelkeznek. Ezek az oldalak gyakran földrajzilag egymáshoz közel találhatóak vagy hasonló témájúak, és a keresőprogramok számára hasznos lehet a feltérképezésük. A sejteink molekulái is sűrű csoportokba rendeződnek, ezek a csoportok számos érdekes felismerést és gyógyászati lehetőséget rejtenek. Ha a molekulák kölcsönhatási hálózatában (a csúcsok molekulák, az élek kölcsönhatások) találunk egy sűrű csoportot, akkor gyakran előfordul, hogy ennek a csoportnak egy korábban nem ismert, jól leírható önálló funkciója van az élő sejtben.

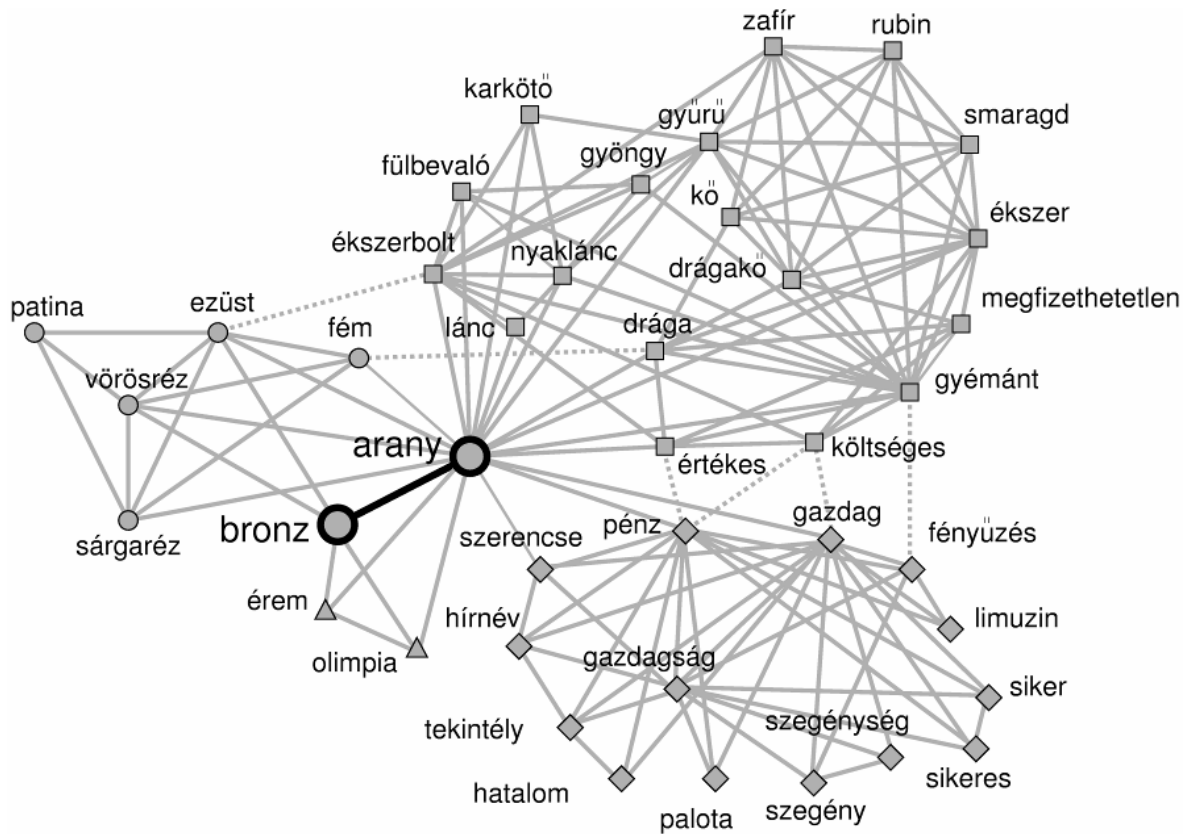
1.2. Csoportosuláskeresés élek eltávolításával

A csoportosulások (klaszterek) központi szerepe miatt a keresésükre kidolgozott módszerek számos tudományterületen és alkalmazásban használatosak. A jelenleg elterjedt klaszterezési eljárások döntő része egymástól elszigetelt, átfedéseket nem tartalmazó modulokat keres. Egyszerű (irányítatlan, súlyozatlan) gráfok esetén a klaszterezés leggyakoribb módja a gráf szétdarabolása izolált csoportosulásokra. Ilyenkor egy rögzített szabály szerint az éleket elkezdjük egyesével eltávolítani, majd egy ponton megállunk, és a megmaradt élek által összetartott gráf-komponenseket tekintjük az eredeti hálózat csoportosulásainak. Eltávolítandó élek érdemes mindig a leggyengébb láncszemet választani, vagyis azt a kapcsolatot, amely a legnagyobb terhelésnek van kitéve, ha például az éleket drótoknak képzeljük, és véletlenszerűen választott pont párok között elektromos áramot folytatunk át a rendszeren. A terhelés ugyanis várhatóan a sűrű tartományokat összekötő éleken lesz a legnagyobb, így ezek eltávolítása során a sűrű tartományok többnyire érintetlenül maradnak. Kérdés azonban, hogy az élek eltávolításával mikor érdemes megállni. Szeretnénk azt az állapotot megtalálni, amikor az eredeti gráfban meglévő „sűrűsödések” (csoportosulások) közé eső élek már eltűntek, de maguk a csoportosulások még épek. Ennek a problémának a megoldására vezette be Girvan és Newman a modularitás fogalmát [6]. Ez a mennyiség jellemzi, hogy a gráf pillanatnyi felosztása mellett hogyan viszonyul egymáshoz a csoportosulásokon belül ill. között futó élek száma az eredeti gráfban. A megállás pillanatát ezek után a modularitás maximumának elérésével határozhatjuk meg.

1.3. Csoportosuláskeresés átfedésekkel

Ha egy gráfot izolált csoportosulásokra bontottunk fel (például élek eltávolításával), akkor szükségszerűen kapott csoportosulások közül a hálózat minden csúcsa a legfeljebb egyhez tartozhat, tehát a csoportok között nincsen átfedés. Ezzel szemben a valódi hálózatokban gyakoriak a csoportosulások közötti átfedések: egy elem több csoportnak is tagja lehet [13]. Az egyik legismertebb példa erre az ismeretségi kapcsolatok hálózata. Ebben a hálózatban mindannyian több, egymástól eltérő szerepű csoportosulásnak is tagjai vagyunk. Példaként említhető családunk, iskolatársaink köre, baráti körünk, vagy munkatársaink. Két csoportnak természetesen több közös tagja is lehet, például a baráti körünk és az iskolatársaink csoportja számos közös taggal rendelkezhet. Szintén érdekes átfedő csoportosulásokat tartalmaz egy nyelv szóasszociációs hálózata (ld. 1. ábra). Ebben a hálózatban minden csúcs az adott nyelv egy-egy szavát jelöli, és két csúcs akkor van összekötve, ha az általuk jelölt két szót a vizsgálatokban megkérdezett személyek társították egymáshoz.

Érdekes megvizsgálni, hogy mi történik az ismeretségi hálózattal, ha felosztással próbálunk benne csoportosulásokat keresni, tehát átfedéseket nem engedünk meg. Tudjuk, hogy a legtöbb ember jó néhány csoportosuláshoz tartozik egyszerre, ezért akármilyen módon jelölünk ki a hálózatban számára egyetlen, a többivel nem átfedő klasztert, akkor abban az adott résztvevő több csoportosulásának töredékei együtt lesznek jelen. Például, ha az ismeretségi hálózatban a jelen cikk valamelyik szerzője számára egyetlen klasztert jelölnénk ki, akkor ebbe nagy valószínűséggel családtagok, iskola- és munkatársak egyaránt belekerülnének. Ez a megoldás két fontos hibalehetőséget rejt: a kijelölt egyetlen csoportosulásba belekerülnének olyanok is, akik nem ismerik egymást, például a vizsgált ember valamelyik családtagja és munkatársa (téves pozitív); számos családtag viszont ettől különböző klaszterbe kerülne (téves negatív).



1. ábra

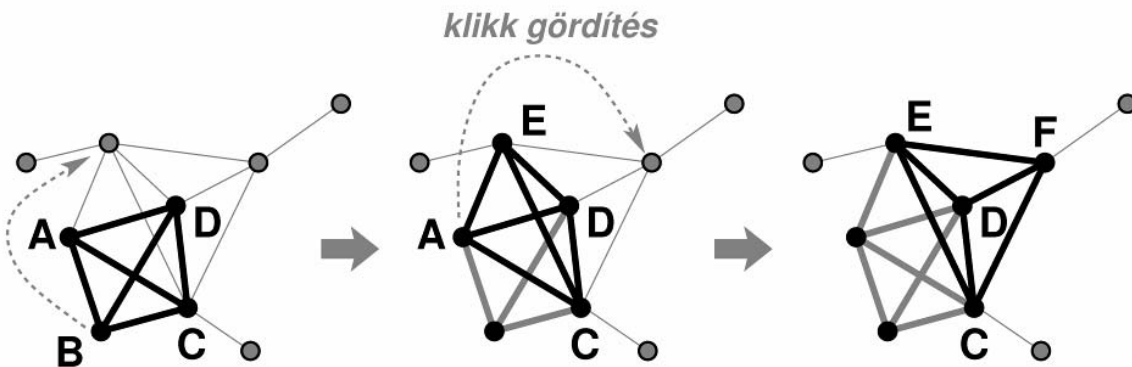
A University of South Florida Free Association Norms angol nyelvű szó asszociációs hálózatban a gold (arany) szóhoz talált négy csoportosulás magyar nyelvű megfelelői. A körökkel jelölt csoportosulás fémekkel kapcsolatos, a háromszögekkel jelölt csoportosulás olimpiai érmekkel, míg a másik két csoportosulás a jólét illetve az ékszerek köré rendeződik. A vastagított él és két csúcs több csoportosuláshoz tartozik, azaz csoportosulások átfedésében találhatóak. A pontozott vonalak csoportosulások közötti kapcsolatokat mutatnak.

A vázolt probléma kiküszöbölésére fejlesztettünk ki egy klikk perkoláción alapuló csoportosuláskereső módszert, mely természetes módon engedi meg a csoportosulások közti átfedéseket. Vizsgálataink szerint számos valódi hálózatban (például tudományos együttműködési, szó asszociációs ill. fehérje kölcsönhatási gráfokban) a csoportosulások között az átfedések valóban jelentősek és a bevezetett új statisztikus jellemzők segítségével nem triviális skálázási és korrelációs tulajdonságok találhatóak.

2. A KLIKK PERKOLÁCIÓS MÓDSZER

2.1. A módszer ismertetése

A hálózatokban található átfedő csoportosulások keresésére egy lehetséges eljárás a 2. ábrán illusztrált klikk perkolációs módszer (Clique Percolation Method, rövidítve CPM) [11]. Ez a módszer egyenként k darab csúcsból álló, teljesen összekötött részgráfokat (k -klikkeket) használ a csoportosulások feltérképezéséhez. Két k -klikket akkor mondunk szomszédosnak, ha csak egyetlen csúcsban különböznek egymástól, azaz $k-1$ csúcsuk közös. Egy, a CPM segítségével kapott csoportosulás azokból a k -klikkekből épül fel, melyek közül bármelyikből eljuthatunk bármely másikba szomszédos k -klikkeken keresztül.



2. ábra

A klikk-perkolációs módszer (CPM) [2] bemutatása egy kis hálózaton $k=4$ méretű klikk esetén. Az ábrán sötét színnel jelölt k -klikk sablon a gördülés során bejárja a hálózat A-B-C-D-E-F csoportosulását. Minden gördítési lépésben a sablon egyetlen csúcsa mozdul el és a többi $k-1=3$ csúcs helyben marad: ez a $k-1$ csúcs a gördítés előtti és utáni klikk közös része.

Ez a megközelítés nagyon közel áll a csoportosulások eredeti megfogalmazásához: a csoportosulásokon belül sok kapcsolatot szeretnénk, a csoportosulások között viszont keveset, hiszen k darab csúcs akkor van a lehető legsűrűbben összekötve, ha egy k -klikket alkotnak. A bevezetett k -klikk szomszédság segítségével definiálhatjuk a k -klikkek hálózatát is, ahol az egyes csúcsok az eredeti hálózat k -klikkjeinek felelnek meg, és két csúcs között akkor van él, ha a megfelelő k -klikkek szomszédosak. A csoportosulások ebben a képben a k -klikk hálózat összefüggő komponenseinek felelnek meg. Ezeket a statisztikus fizikában perkolációs klasztereknek szokás nevezni, innen származik a módszer elnevezése. Mivel az eredeti hálózatban egy csúcspont egyszerre több k -klikk perkolációs klaszternek (csoportosulásnak) is tagja lehet, ezért a CPM természetes módon engedi meg a csoportosulások közti átfedéseket.

A változt csoportosulás definíció jól szemléltethető k -klikk sablon gördítésén keresztül (2. ábra). A k -klikk sablon izomorf egy k -klikkkel, és ráilleszhető a gráf bármelyik k -klikkjére, majd onnan egy lépésben tovább gördíthető egy szomszédos k -klikkre. A csoportosulások így olyan részgráfoknak felelnek meg, melyek bejárhatók k -klikk sablon gördítéssel.

2.2. Optimális paraméter-beállítás

Módszerünk direktben súlyozatlan hálózatokra alkalmazható, hiszen a fent bemutatott csoportosulás-definíció sehol sem használta az élek súlyát. Amennyiben súlyozott hálózatot kívánunk a CPM segítségével analizálni, az él-súlyokat oly módon vehetjük figyelembe, hogy bevezetvén egy w^* súlyküszöböt a w^* -nál gyengébb éleket nem vesszük figyelembe. A súlyküszöb növelésével a csoportosulások mérete csökken és csak a legerősebben összekapcsolt részek maradnak meg. Hasonló effektust okoz k növelése is, a nagyobb k -hoz tartozó csoportosulások kisebbek, de ugyanakkor kohézívebbek is. A w^* és k paraméterek változtatása hasonlít egy mikroszkóp felbontásának beállításához.

Ha egy konkrét csúcsához tartozó csoportosulások érdekelnek minket, akkor azokat érdemes egy szélesebb w^* és k tartományban megvizsgálni. Ilyenkor csúcsról csúcsra más és más paraméter-értékeknél fogjuk a legérdekesebb képet látni. Ugyanakkor a globális csoportosulás-szerkezet vizsgálatához valamilyen kritérium szerint fixálni kell a súlyküszöböt és k -t. Az általunk használt kritériumot a perkoláció ihlette, és azon alapul, hogy lehetőleg a legtöbb információt hordozó csoportosulás-szerkezetet nyerjük ki. Amennyiben túl alacsony w^* és k paramétereket választunk, a rendszer „perkolál”, azaz megjelenik egy óriás-csoportosulás, mely magába foglalja a hálózat túlnyomó részét, elfedvén a csoportosulás-szerkezet lokális részleteit. Ezzel szemben túl magas paraméter-értékeknél csak elszórtan találunk néhány kisméretű csoportosulást, hiszen csak a legerősebben összekapcsolt, legkohézívebb részek maradnak meg. Az ideális paraméterválasztás valahol a két véglet között található: adott k értékhez w^* -t úgy kell beállítani, hogy még éppen ne jelenjen meg egy óriás-csoportosulás.

3. A CPM ALKALMAZÁSA NAGYMÉRETŰ HÁLÓZATOKON

3.1. A vizsgált rendszerek

A CPM segítségével megvizsgáltuk három nagyméretű, természetben illetve a társadalomban található hálózat átfedő csoportosulás szerkezetét. A tanulmányozott rendszerek a következők voltak:

- A Los Alamos Condensed Matter archívum preprint gyűjteményéből nyert társszerzőségi hálózat [15], melyben minden n szerzős cikk $1/(n-1)$ -el növeli a szerzők közti kapcsolatok erősségét. (Összesen 30739 csúcs, 136065 él).
- A South Florida Free Association norms list-ből kapott szóasszociációs hálózat [16], melyben két szó közt lévő kapcsolat súlya arányos azzal a gyakorisággal, mellyel a megkérdezettek az egyik szóról a másikra asszociáltak a tesztek során. (Összesen 10617 csúcs, 63788 él).
- A *Saccharomyces cerevisiae* (sarjadzó élesztő) egysejtű modellszervezet fehérje kölcsönhatási hálózata [17], melyben két fehérje között akkor van kapcsolat, ha a kísérletek során kölcsönhatottak egymással. (Összesen 2609 csúcs, 6355 él).

Mindhárom hálózat esetében a CPM segítségével kapott csoportosulásokhoz természetes módon lehetett jelentést, funkciót társítani. A társszerzőségi hálózat esetén egy szerző különböző csoportosulásai általában a különféle érdeklődési területeinek feleltek meg, hiszen gyakran előfordul, hogy más-más témában másokkal működünk együtt. A szóasszociációs hálózatban egy szó csoportosulásai a szó különféle jelentéséhez kötődtek, ezt illusztrálja az 1. ábra. Végül a fehérje kölcsönhatási hálózat esetén a csoportosulások a sejtműködés során ellátott különféle funkcióknak feleltek meg.

A csoportosulásszerkezet globális vizsgálatánál az optimális súlyküszöb- és k paramétereknek a következő értékek adódtak: a társszerzőségi hálózat esetén $w^*=0.1$, $k=6$, a szóasszociációs hálózat esetén $w^*=0.015$, $k=4$, végül a fehérje kölcsönhatási hálózat esetén $k=4$ (itt az élek súlyozatlanok voltak).

3.2. Csoportátfedési statisztikák

A csoportok közti átfedések jellemzéséhez három statisztikai eloszlást vezettünk be. Az első az s^{ov} átfedési méret eloszlása, ahol két csoport közti átfedés mérete a közös csúcsok számával egyenlő. Vizsgáltuk a csúcsok m tagsági index eloszlását is, ahol egy csúcs tagsági indexe alatt azon csoportosulások számát értjük, melyhez a csúcs hozzátartozik. Végül tanulmányoztuk a csoportosulások gráfjának d^{com} fokszámeloszlását is, ahol a csoportosulások gráfját az átfedések révén származtattuk. Ebben a gráfban egy-egy csúcs egy-egy csoportosulásnak felel meg, és két csúcs akkor van összekötve, ha a megfelelő csoportosulások átfedik egymással. Így egy csoportosulás fokszáma megegyezik azon egyéb csoportosulások számával, melyekkel átfed. E három, a csoportátfedéseken alapuló statisztika mellett vizsgáltuk a csoportosulások s^{com} méreteloszlását is.

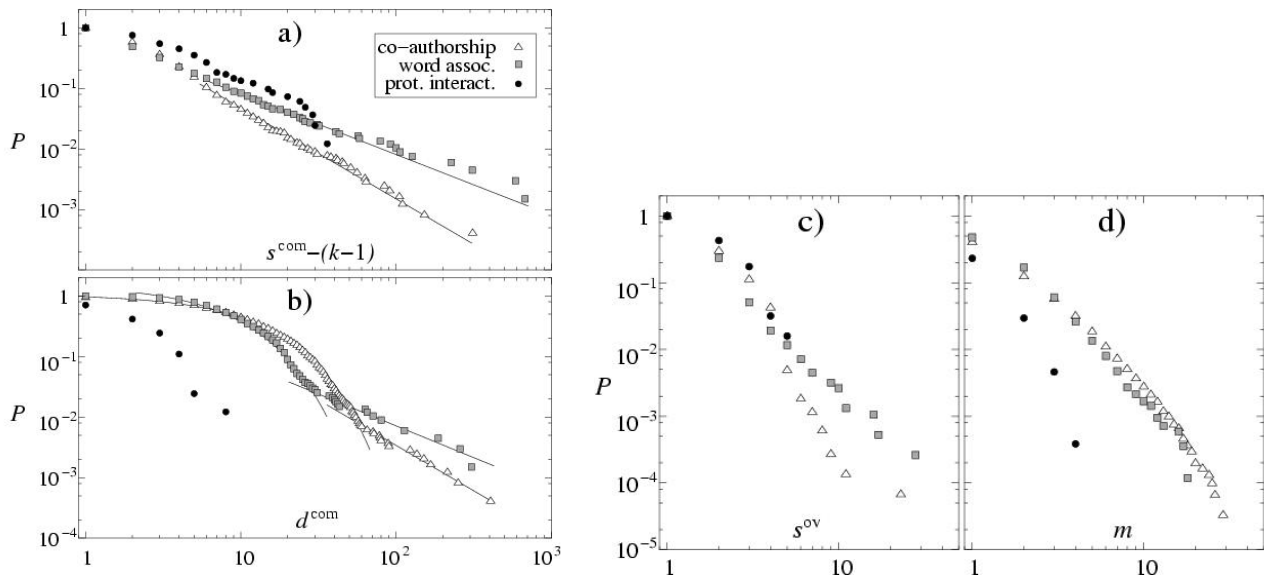
A kapott eredményeket a 3. ábra mutatja be. Ismert, hogy a korábbi, átfedéseket tiltó csoportosulás keresők segítségével kapott csoportosulások méreteloszlása hatványszerű. A 3a. ábrán látható, hogy a CPM által nyújtott teljesebb képből (ahol a csoportok közti átfedések is megengedettek) ez a tulajdonság megmarad, a csoportosulások méreteloszlása egy körülbelül 1.6-os hatványkitevővel csökken a nagy méretek felé.

Ennél összetettebb, nagyon érdekes viselkedést mutat a csoportosulások fokszámeloszlása (3b. ábra). Ezek az eloszlások két jól elkülöníthető részre tagolódnak: kis fokszámoknál exponenciálisan indulnak, majd egy ponton átváltanak hatványfüggvénybe, és a nagy fokszámok felé a csoportméret eloszlás hatványkitevőjével megegyező kitevővel csengenek le. Mindhárom hálózat esetén a csúcsok fokszámeloszlása hatványszerű; az imént ismertetett eredmény szerint egy magasabb szerveződési szinten, a csoportosulások szintjén, ehhez hasonló viselkedést tapasztalhatunk, (hiszen nagy fokszámok esetén a csoportosulások fokszáma is hatványfüggvény szerint cseng le). Emellett a csoportosulások szintjén eltérések is tapasztalhatók a csúcsok szintjéhez viszonyítva, ugyanis a kis fokszámoknál látott exponenciális rész nincs jelen a csúcsok esetén. Az, hogy a csoportosulás fokszámeloszlás farkának hatványkitevője megegyezik a csoportosulásméret eloszlás hatványkitevőjével, azzal magyarázható, hogy egy nagyméretű csoportosulás fokszáma jól becsülhető úgy, hogy felteszünk, hogy átlagosan minden csúcs egy δ járulékkal növeli a csoportosulás fokszámát, és így a csoportosulás fokszám egyszerűen a méret és δ szorzatával egyenlő.

A 3c. ábra szerint a csoportosulások átfedési méret eloszlása közel van egy nagy kitevőjű hatványfüggvényhez. Érdekes jelenség, hogy a $k-1$ méretet meghaladó átfedések is előfordulnak kis számban. Ez természetesen csak úgy lehetséges, hogy az átfedéseknek megfelelő részgráfok nem teljes részgráfok, (azaz bennük nincs mindenki mindenkiel összekötve). Végezetül a 3d. ábrán a csúcsok tagsági index eloszlását mutatjuk be, ezek az eloszlások szintén közel vannak egy gyorsan csökkenő hatványfüggvényhez.

Összehasonlításként megvizsgáltuk a csoportosulás-szerkezetet jellemző eloszlásokat a tanulmányozott hálózatoknak megfelelő véletlen hálózatokban is. Ezeket a véletlen hálózatokat az eredeti hálózatokból állítottuk elő az élek sorozatos véletlenszerű átkötésével, az egyes csúcsok fokszámának megtartása mellett. A kapott véletlen hálózatok rendkívül szegényes csoportosulás-szerkezetet mutattak, csak elvétve lehetett bennük

egy-két apró csoportosulást találni. Ez a jelenség alátámasztja azt, hogy az eredeti hálózatokban talált gazdag csoportosulás-szerkezet nem a módszerünk mesterséges melléktermékeként állt elő, hanem valóban a tanulmányozott hálózat belső korrelációit jeleníti meg egy igen szemléletes és áttekinthető módon.



3. ábra

A CPM segítségével a kapott csoportosulásokra jellemző kumulatív eloszlások a társszerzőségi hálózatban (háromszögek), a szóasszociációs hálózatban (négyzetek), valamint a fehérje kölcsönhatási hálózatban (körök). a) a csoportosulásméret-eloszlás, b) a csoportosulások fokszámeloszlása (a csoportosuláshálózat fokszámeloszlása), c) a csoportátfedések méret-eloszlása és d) a csúcsok tagsági indexének eloszlása. (Az ábra átvétel a [12] publikációból).

	N	$\langle d^{\text{com}} \rangle$	$\langle C \rangle$	$\langle r \rangle$
Társszerzőségi	2450	12.10	0.44	58%
Szóasszociációs	670	11.33	0.56	72%
Fehérje kölcsönhatási	82	1.54	0.17	26%

1. táblázat. A feltárt csoportosulások további jellemzői. N a csoportosulások számát jelöli, $\langle d^{\text{com}} \rangle$ a csoportosulások átlagos fokszámának felel meg, $\langle C \rangle$ a csoportosuláshálózat átlagos klaszterezettségi mutatója, míg $\langle r \rangle$ egy csoportosulás azon tagjainak átlagos hányada, melyek még legalább egy másik csoportosulásnak is tagjai.

Az 1. táblázatban a csoportosulások további statisztikai jellemzőit tüntettük fel. Az első oszlop a csoportosulások összesített N számát mutatja, míg a második oszlop a csoportosuláshálózat $\langle d^{\text{com}} \rangle$ átlagos fokszámának felel meg. A harmadik oszlop a csoportosuláshálózat $\langle C \rangle$ átlagos klaszterezettségi mutatóját tünteti fel. Általánosan, egy hálózat adott csúcsának C klaszterezettségi mutatója a csúcs szomszédjai közt található élek száma osztva a csúcs szomszédjai közt lehetséges élek számával, ezért C mindig nulla és egy közé esik. Ezt a mennyiséget a csúcsokra átlagolva kapjuk az átlagos klaszterezettségi mutatót, mely a táblázat tanúsága szerint meglehetősen magas értékeket vesz fel a csoportosuláshálózatok esetén. Ez azt mutatja, hogy ha két csoportosulás átfed egy közös harmadikkal, akkor nagy valószínűséggel egymással is átfednek. Ez leggyakrabban olyan konfigurációban fordul elő, mikor az érintett három csoportosulás közösen osztozik az átfedési tartományon.

3.3. A CPM legfontosabb tulajdonságainak összegzése

A fent ismertetett eredmények tükrében elmondhatjuk, hogy a CPM egyfelől egy flexibilis eszköz átfedő hálózati csoportosulások feltárására, hiszen lehetőségünk van ráfókuszálni egy adott csúcs környezetére, és megvizsgálni a kiválasztott csúcs csoportosulásait különféle paraméter-beállítások mellett. A lokális csoportosulás-analízissel párhuzamosan a teljes hálózat csoportosulás-szerkezetét is tanulmányozhatjuk, ezen a téren egy nagyon fontos új megközelítést kínál módszerünk a csoportosuláshálózat létrehozásán keresztül. Az álta-

lunk tapasztalt skálázás a csoportosulás fokszámoszlás esetén egy új megvilágításba helyezi a vizsgált rendszerek hierarchiájának kérdését. Eredményeink szerint a csúcsok szerveződési szintjéről a csoportok szerveződési szintjére történő váltáskor továbbra is hatványszerű marad a fokszámoszlás lecsengése, mindemellett megjelenik egy karakterisztikus foksám, ami alatt a fokszámoszlás exponenciális. A több szerveződési szinttel rendelkező komplex rendszerekről alkotott képünkben ez arra világít rá, hogy a különböző szerveződési szintek egyfelől hasonlítanak egymásra (a rendszer bizonyos mértékben önazonos) [18], másfelől minden szintnek van egy külön sajátossága, ami megkülönbözteti a többi szinttől.

4. PREFERENCIÁLIS CSATOLÓDÁS CSOPORTOSULÁS SZINTEN

A csoportosuláshálózat fokszámoszlásának hatványszerű lecsengése felvet egy érdekes kérdést. Ismert, hogy számos, a természetben és társadalomban található hálózat fokszámoszlásának hatványszerű lecsengése a preferenciális csatolódási szabállyal van szoros összefüggésben [2]. Egy preferenciális csatolódási szabály szerint növekvő hálózatban egy új csúcs becsatlakozásakor a már meglévő csúcsok a fokszámmal arányos valószínűséggel kapnak élt az új csúcsához. Így a nagy foksámú régi csúcsok nagyobb eséllyel tudják továbbnövelni kapcsolataik számát mint a kis foksámúak. Meg lehet mutatni analitikusan, hogy egy ilyen mechanizmus szerint fejlődő hálózat fokszámoszlása hatványszerű lesz, és történetek mérések is valós hálózatokon, melyek alátámasztották a preferenciális csatolódási szabály teljesülését a vizsgált hálózatok növekedése során [19]. Ezek alapján természetesen adódik az a kérdés, hogy vajon beszélhetünk-e preferenciális csatolódási szabályról a csoportosulások szintjén is, hiszen a csoportosulások fokszámoszlása is hatványfarkú.

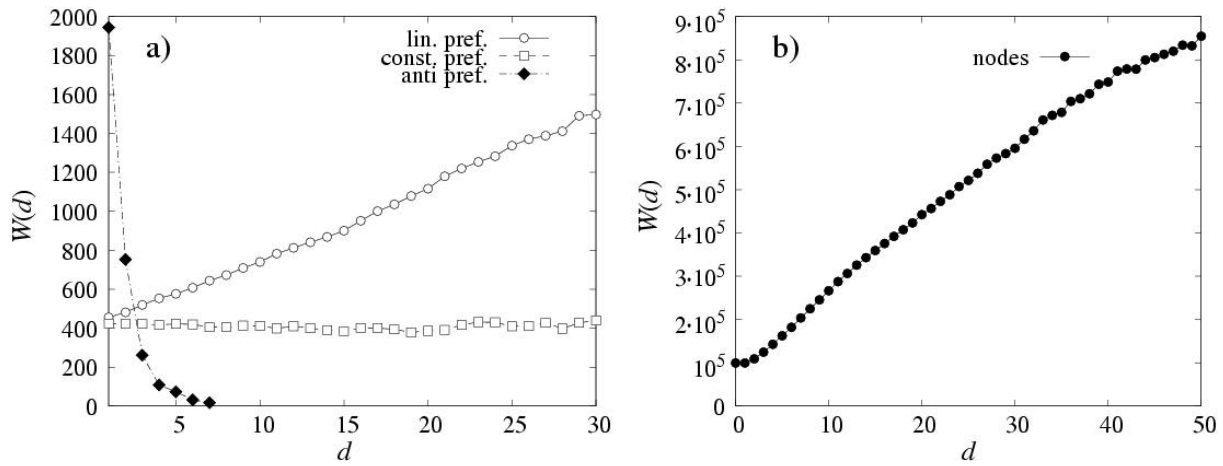
A társszerzőségi hálózat esetében a hálózat időfejlődése is nyomon követhető, ugyanis a megjelent cikkek havi bontásban tárolták (összesen 146 hónapon át). Ezen hálózat esetén a következő két kérdést vizsgáltuk empirikusan [22]: vajon tapasztalható-e preferenciális csatolódási mechanizmus az egyes csúcsok csoportosulásokhoz történő csatlakozása során, és tapasztalható-e preferenciális csatolódási mechanizmus a csoportosuláshálózat növekedése során?

4.1. A preferenciális csatolódás kimutatásának módszere

A preferenciális csatolódási szabály kimutatására a következő általános módszert dolgoztuk ki [22], mely alkalmas az eloszlási trend megállapítására olyan, kis esetszámmal rendelkezésre álló adatok esetén is, ahol a hagyományos statisztikai eljárások [19] nem alkalmazhatók. Legyen ρ egy tulajdonság (pl. méret, vagy foksám), és tegyük fel, hogy a vizsgált csatolódási mechanizmus szempontjából ρ értéke irreleváns. Ilyenkor a csatolódások során nagy átlagban a pontosan ρ tulajdonság eloszlásával fognak a csoportosulások kiválasztódni. Ellenben ha a csatolódás a nagy (vagy kis) ρ értékeket preferálja, akkor a nagy (vagy kis) ρ -val rendelkező csoportosulások nagyobb valószínűséggel fognak szerepelni, mint amit a ρ eloszlása alapján kapnánk. Egy ilyen eltérést úgy lehet kimutatni, hogy minden t időpontban meghatározzuk a ρ kumulatív eloszlását, $P_t(\rho)$ -t, valamint a t és $t+1$ időpontok közt a csatolódások során kiválasztott csoportosulások normálatlan, kumulatív ρ eloszlását, $w_{t \rightarrow t+1}(\rho)$ -t. Egy konkrét ρ^* esetén a $w_{t \rightarrow t+1}(\rho^*)$ értéke azon csoportosulások számával egyenlő, melyek kiválasztódtak a t és $t+1$ között a csatolódások során és ρ értékük t -ben nagyobb volt, mint ρ^* . A ρ szerint egyenletes csatolási preferenciától való eltérés kimutatásához egyszerűen fel kell összegezni az időlépések során $w_{t \rightarrow t+1}(\rho)$ és $P_t(\rho)$ hányadosát:

$$W(\rho) = \sum_{t=0}^{t_{\max}-1} \frac{w_{t \rightarrow t+1}(\rho)}{P_t(\rho)} \quad (1)$$

Ha a csatolódás szempontjából ρ értéke irreleváns (ρ szerint egyenletes csatolási preferencia), akkor a $W(\rho)$ egy konstans függvény lesz. Ellenben ha a nagy (vagy kis) ρ értékek preferáltak, akkor $W(\rho)$ növekvő (vagy csökkenő) válik. A vázolt módszert növekvő modell-hálózatokon teszteltük, melyeket a foksámmal lineáris preferenciális csatolódással, foksámtól független csatolódással, valamint foksám szerint anti-preferált csatolódással növesztettünk. Amint azt a 4a. ábra mutatja, a tesztek során rendre visszakaptuk, hogy a csúcsok foksámának függvényében $W(d)$ növekvő, konstans, illetve csökkenő tendenciát mutat az alkalmazott preferenciától függően. Emellett megvizsgáltuk magának a társszerzőségi hálózatnak a fejlődését is, és a 4b. ábra tanúsága szerint a csúcsok preferenciálisan csatlakoznak be a hálózatba a foksám szerint.



4. ábra

A preferenciális csatolást kimutató empirikus módszer tesztelése. a) Eredmények fokszám szerinti lineáris preferenciával növesztett hálózat esetén (körök), fokszámtól független preferenciával növesztett hálózat esetén (négyzetek) és fokszám szerint anti-preferenciával növesztett hálózat esetén (rombuszok). b) A társszerzőségi hálózat növekedésére kapott eredmény szerint a csúcsok a fokszámmal preferenciálisan kapcsolódnak be a hálózatba. (Az ábra átvétel a [22] publikációból).

4.2. A csoportosulások időfejlődésére kapott eredmények

A csoportosulások időfejlődése során a ρ helyébe az s^{com} csoportméretet, illetve a d^{com} csoportosulás fokszámot helyettesíthetjük aszerint, hogy a csoportméret, vagy a csoport fokszám szerinti preferenciális csatolás létre vagyunk kíváncsiak. A csoportosuláshálózatba bekapcsolódó új csoportosulások csatolási mechanizmusának vizsgálata során így időlépésenként a kiválasztott régi csoportosulások $w_{t \rightarrow t+1}(s^{\text{com}})$ és $w_{t \rightarrow t+1}(d^{\text{com}})$ normálatlan kumulatív méret- illetve fokszámeloszlását kellett a $P_t(s^{\text{com}})$ és $P_t(d^{\text{com}})$ kumulatív méret- és fokszámeloszlással elosztani és a kapott hányadosokat az időlépések során felösszegezni:

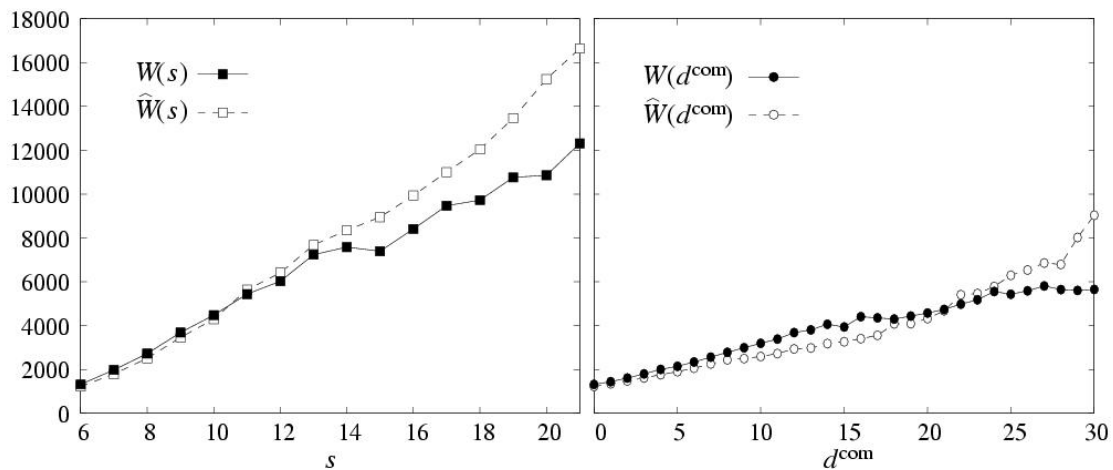
$$W(s^{\text{com}}) = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}-1} \frac{w_{t \rightarrow t+1}(s^{\text{com}})}{P_t(s^{\text{com}})} \quad (2)$$

$$W(d^{\text{com}}) = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}-1} \frac{w_{t \rightarrow t+1}(d^{\text{com}})}{P_t(d^{\text{com}})} \quad (3)$$

Hasonlóan, az új tagok megjelenésének vizsgálatokor időlépésenként azon csoportosulások $w_{t \rightarrow t+1}^*(s^{\text{com}})$ és $w_{t \rightarrow t+1}^*(d^{\text{com}})$ normálatlan kumulatív méret- illetve fokszámeloszlását határoztuk meg, melyek új tagokra tettek szert t és $t+1$ között. Ezt a két eloszlást a $P_t(s^{\text{com}})$ és $P_t(d^{\text{com}})$ kumulatív méret- és fokszámeloszlással osztottuk el és a kapott hányadosokat az időlépések során felösszegeztük:

$$\hat{W}(s^{\text{com}}) = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}-1} \frac{w_{t \rightarrow t+1}^*(s^{\text{com}})}{P_t(s^{\text{com}})} \quad (4)$$

$$\hat{W}(d^{\text{com}}) = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}-1} \frac{w_{t \rightarrow t+1}^*(d^{\text{com}})}{P_t(d^{\text{com}})} \quad (5)$$



5. ábra

A csoportosulások időfejlődésére kapott eredmények. Jól láthatóan mind a csoportosulásméret, mind a csoportosulás fokszaám szerint preferenciálisan csatlakoznak az egyes csúcsok a csoportokhoz (fehér szimbólumok), valamint preferenciális csatolódási szabály szerint növekszik a csoportosulások hálózata is (fekete szimbólumok). (Az ábra átvétel a [22] publikációból).

A társszerzőségi hálózatra kapott eredmények az 5. ábrán láthatók. Mind a négy $W(p)$ típusú görbe határozottan emelkedik, ami alapján az alábbi két következtetést vonhatjuk le:

- A csoportosuláshálózat növekedése során egy, még kapcsolatok nélküli csúcs (csoportosulás) a csoportosulásmérettel és csoportosulás fokszaámmal preferenciálisan fog a csoportosuláshálózatba bekapcsolódni.
- A hálózatban egy csúcs, mely még egyetlen egy csoportosulásnak sem tagja, a csoportosulásmérettel és csoportosulás fokszaámmal preferenciálisan fog egy csoportosuláshoz csatlakozni.

Ezen a ponton megjegyezzük, hogy amint azt már az előző fejezetben is említettük, ebben a hálózatban a csoportosulások mérete és a csoportosulások fokszaama a nagy méretek és fokszaamok felé erősen korrelált egymással. Ezért ha egy csatolódási mechanizmus preferenciális akár a csoportméret, akár a csoport-fokszaam szerint, akkor preferenciálisnak kell lennie mindkettő szerint.

Eredményeink szerint a társszerzőségi hálózat időfejlődését hasonló mechanizmusok vezérik mind a csúcsok, mind a csoportosulások szintjén. A csoportosulások hálózatának növekedése a preferenciális csatolódási szabály szerint történik, teljesen analóg módon az alapul szolgáló hálózat növekedésével. Ez a jelenség egy további megerősítése a rendszer különböző szerveződési szintjei közt tapasztalható hasonlóságnak.

5. A CPM EGYÉB ALKALMAZÁSAI

A <http://www.cfinder.org> címről ingyenesen letölthető a szerzők által kifejlesztett CFinder (Clique and Community Finder) program [23], amely a Klikk Perkolációs Módszer használatával csoportosulásokat keres és – több más elemzéssel együtt – a talált csoportosulások hálózatát bemutatja. A program tudományterülettől függetlenül alkalmazható minden olyan adatrendszer elemzésére, amely hálózatként ábrázolható. A felhasznált bemenő adatfájl a hálózat éleit sorolja fel, minden sorban a hálózat két, egymással összekötött csúcsának a nevét kell megadni. A program Windows, Linux és Macintosh számítógépeken egyaránt használható.

Néhány érdekes alkalmazás, amely a [12] publikáció megjelenése óta eltelt másfél év alatt a CFinder felhasználásával született: a sarjadzó élesztő (egysejtű modellszervezet) fehérje-fehérje kölcsönhatási hálózatában korábban nem ismert csoportok és új fehérje funkciók azonosítása [23], majmok agyának látókérgében az ott található idegsejt kapcsolatok hálózata alapján az egyes területek szerepének elemzése [24], könnyűzenei előadók csoportosulásainak vizsgálata és szociológiai értelmezése [25], valamint daganatos elváltozásokban a sejt megváltozott működéséért felelős fehérjék keresése [26].

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki Barabási Albert-Lászlónak a hasznos beszélgetések, valamint Adamcsek Balázsnak a CFinder program grafikai felületének kidolgozásában való közreműködéséért. A szerzők kutatásait az OTKA D048422, F047203, T049674 és K60456 jelű pályázatai támogatják.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Watts, D. J. & Strogatz, S. H.: Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature* **393** (1998) 440--442 .
- [2] Barabási, A.-L. & Albert, R.: Emergence of scaling in random networks. *Science* **286** (1999) 509--512.
- [3] Albert, R. & Barabási, A.-L.: Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.* **74** (2002) 47—97.
- [4] Mendes, J. F. F. & Dorogovtsev, S. N.: *Evolution of Networks: From Biological Nets to the Internet and WWW* (Oxford University Press, Oxford, 2003).
- [5] Blatt, M., Wiseman, S., & Domany, E.: Super-paramagnetic clustering of data. *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 3251--3254.
- [6] Girvan, M. & Newman, M. E. J.: Community structure in social and biological networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **99** (2002) 7821-7826.
- [7] Radicchi, F., Castellano, C., Cecconi, F., Loreto, V., & Parisi, D.: Defining and identifying communities in networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **101** (2004) 2658--2663.
- [8] Spirin, V. & Mirny, L. A.: Protein complexes and functional modules in molecular networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **100** (2003) 12123--12128.
- [9] Scott, J.: *Social Network Analysis: A Handbook, 2nd ed.* (Sage Publications, London, 2000).
- [10] Watts, D. J., Dodds, P. S., & Newman, M. E. J.: *Identity and search in social networks.* *Science* **296** (2002) 1302--1305.
- [11] Derényi I., Palla G., Vicsek T. Clique percolation in random networks. *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 160202:1-4.
- [12] Palla G., Derényi I., Farkas I., Vicsek T. Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society. *Nature* **435** (2005) 814-818.
- [13] Faust, K.: Using Correspondence Analysis for Joint Displays of Affiliation Networks. *Models and Methods in Social Network Analysis* (Eds Carrington, P., Scott, J., & Wasserman, S.) Ch. 7 (Cambridge University Press, New York, 2005).
- [14] Gavin, A. C. *et al.*: Functional organization of the yeast proteome by systematic analysis of protein complexes. *Nature* **415** (2002) 141--147.
- [15] Warner, S.: E-prints and the Open Archives Initiative. *Library Hi Tech* **21** (2003) 151--158.
- [16] Nelson, D. L., McEvoy, C. L., & Schreiber, T. A.: *The University of South Florida word association, rhyme, and word fragment norms.* <http://www.usf.edu/FreeAssociation/>
- [17] Xenarios, I. *et al.*, Rice, D. W., Salwinski, L., Baron, M. K., Marcotte, E. M., & Eisenberg, D.: DIP: the Database of Interacting Proteins. *Nucl. Ac. Res.* **28** (2000) 289--291.
- [18] Song, C., Havlin, S., & Makse, H. A.: Self-similarity of complex networks. *Nature* **433** (2005) 392--395.
- [19] A. L. Barabási, H. Jeong, Z. Néda, E. Ravasz, A. Schubert & T. Vicsek: *Physica A* **311** (2002) 590--614.
- [20] H. Jeong, Z. Néda & A.-L. Barabási: Measuring preferential attachment for evolving networks. *Europhysics Letters* **61** (2003) 567--572.
- [21] M. E. J. Newman: Clustering and preferential attachment in growing networks. *Phys. Rev. E* **64** (2001) 025102.
- [22] Pollner, P., Palla, G., & Vicsek, T.: Preferential attachment of communities: The same principle, but a higher level. *Europhys. Lett.* **73** (2006) 478--484.
- [23] Adamcsek B., Palla G., Farkas I. J., Derényi I., Vicsek T. CFinder: locating cliques and overlapping modules in biological networks. *Bioinformatics* **22** (2006) 1021-1023.
- [24] Négyessy L., Nepusz T., Kocsis L., Bazsó F. Prediction of the main cortical areas and connections involved in the tactile function of the visual cortex by network analysis. *Eur. J. Neurosci.* **23** (2006) 1919-1930.
- [25] R. D. Smith. The network of collaboration among rappers and its community structure. *Journal of Statistical Mechanics – Theory and experiment* (2006) Art. No. P02006.
- [26] P. F. Jonsson, T. Cavanna, D. Zicha, P. A. Bates. Cluster analysis of networks generated through homology: automatic identification of important protein communities involved in cancer metastasis. *BMC Bioinformatics* **7** (2006) Art. No. 2.

Analogikai celluláris számítógépek – egy új paradigma a számítástechnikában

Analogic Cellular Computers – A New Computational Paradigm

ERCSEY-RAVASZ Mária^{1,2}, ROSKA Tamás², NÉDA Zoltán¹

1. Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Elméleti- és számítógépes Fizika Tanszék
str. Kogalniceanu 1, RO-400084 Cluj-Napoca,

2. Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Információs Technológia Kar,
Práter u. 53., Budapest, HU-1053
ravasz@digitus.itk.ppke.hu

ABSTRACT

The computational paradigm represented by Cellular Neural/nonlinear Networks (CNN) and the CNN Universal Machine (CNN-UM) as an Analogic Cellular Computer, gives new perspectives for computational sciences. Beside the applications developed in image processing, robotics, we will present how this computer can be used in physics for solving special, complex problems.

ÖSSZEFOGLALÓ

A celluláris neurális hálózatok (CNN) elmélete alapján megtervezett analogikai celluláris számítógépek új perspektívát nyújtanak bizonyos komplex és sok számítógépes időt igénylő feladatok megoldásában. Ezeket a chipeket eddig főképp a robotikában és képfeldolgozásban alkalmazták, de sok, fizikában fontos probléma megoldásánál is hasznosak lehetnek. A CNN alapvető elmélete és a CNN számítógép rövid bemutatása után különböző hasznos alkalmazásokról adunk áttekintést.

Kulcsszavak: analogikai számítógépek, celluláris neurális hálózatok, CNN univerzális gép, Monte Carlo szimulációk, sztochasztikus folyamatok

1. BEVEZETÉS

A számítógépek gyors fejlődése ellenére azt tapasztaljuk, hogy sok tudományágban továbbra is komoly gondot okoz bizonyos komplex problémák megoldása vagy nagyon nagy adathalmazok kezelése. Az elmúlt évszázad során a különböző technikákkal megvalósított számítógépek teljesítménye exponenciálisan nőtt [1]. 1960 és 2000 között az egy mikroprocesszorban lévő tranzisztorok száma 1-ről közel 1 milliárdra változott. Ez alatt a négy évtized alatt egyre komplexebb processzorok jelentek meg közel azonos áron. A chipek szerveződései és működési elve azonban nem változott, máig is a Neumann János alkotta tárolt programú, digitális szerkezeti modellt követik. A mai technológia azonban lassan eléri működési korlátait, ezért ma már újfajta számítógépek konstrukciójával foglalkoznak a kutatók és mérnökök. Egy ilyen újfajta eszköz az Analogikai Celluláris Számítógép, mely a celluláris neurális hálózatok elméletére épül (rövidítve CNN-UM: Celluláris Neurális/Nemlineáris Hálózat – Univerzális Gép). A processzor működtetése a hagyományos, rugalmasan tárolt-program vezérléssel történik, azonban a műveletek jó része a folytonos analóg jelek térképszerű képein folyik.

A celluláris neurális hálózatok (CNN) elméletének [2] és a CNN univerzális gép [3] szerkezetének rövid bemutatása után áttekintést adunk a különböző alkalmazási lehetőségekről.

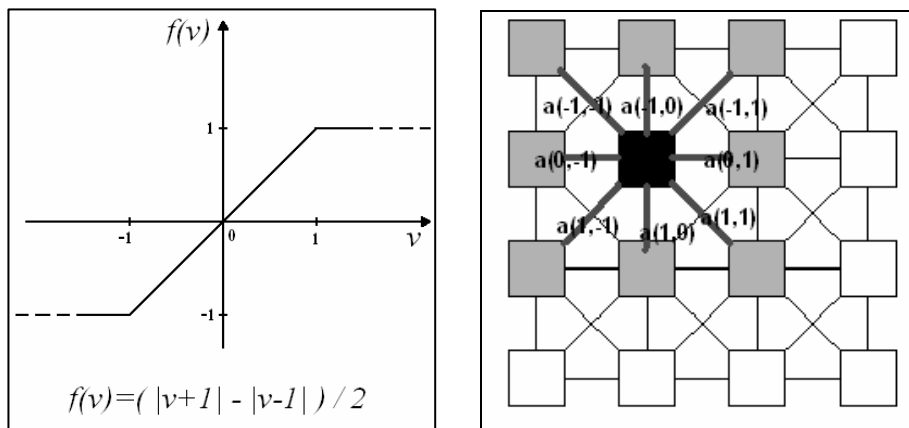
2. CELLULÁRIS NEURÁLIS HÁLÓZATOK

Az analogikai celluláris számítógép alapja a **celluláris neurális hálózat** vagy röviden CNN (Cellular Neural/nonlinear Network). A celluláris neurális hálózatok elméletét 1988-ban publikálták [2]. Ez egy csatolt, analóg, nem lineáris processzor-tömb, amely alapértelmezésben egy négyzetrácson elhelyezkedő, lokálisan

összekötött cella-rendszert alkot. A négyzetrács minden csúspontjában egy cella (áramkör) van. Minden cellát három érték jellemez: az u bemeneti feszültség, mely időben állandó, az $x(t)$ állapot érték, és az $y(t)$ kimeneti feszültség. A kimeneti feszültség egy bizonyos tartományban (-1 és 1 között) megegyezik az állapotértékekkel, azon kívül pedig állandó értéke van, egész pontosan a következő függvénnyel írható le (1. ábra):

$$y = f(x) = \frac{1}{2}(|x+1| - |x-1|) \quad (1)$$

A továbbiakban gyakran fogjuk a celluláris hálózat állapotát képként ábrázolni, ilyenkor a fehér szín a -1 kimeneti értéket, a fekete a $+1$ kimeneti feszültséget jelöli, a köztes értékek pedig a szürke skála színei.



1. ábra

a) A kimeneti érték és állapotérték közötti összefüggést leíró függvény. b) A CNN hálózat struktúrája.

A cellák csak a szomszédokkal vannak kapcsolatban. Minden cella állapotát befolyásolhatják a szomszédok kimeneti és bemeneti értékei. A kölcsönhatások erősségét az A illetve B mátrixok határozzák meg. A cellák állapotegyenlete a következő:

$$\frac{dx_{ij}(t)}{dt} = -x_{ij}(t) + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 A_{kl} y_{i+k, j+l}(t) + \sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 B_{kl} u_{i+k, j+l} + z_{ij} \quad (2)$$

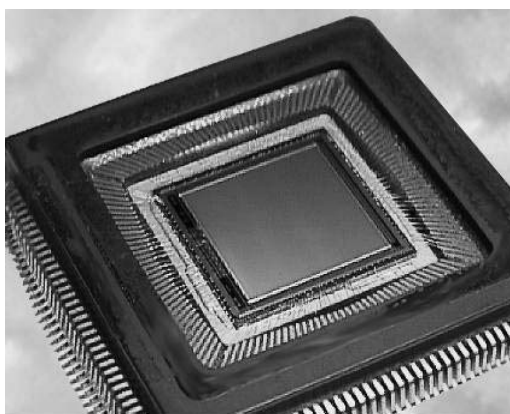
Az A és B mátrixok értékei változtathatók, de egy művelet során minden cella esetében azonosak. A z paraméter egy időben állandó érték, mely celláról cellára változhat. Az A, B, z paraméterek összességét template-nek nevezzük. Egy művelet elvégzésekor megadjuk a cellák bemeneti értékeit, definiálunk egy kezdeti állapotot, és megadjuk a template értékeit. A művelet során a cellák párhuzamosan működve és kölcsönhatva eljutnak egy stabil állapotba, amely valójában az állapotegyenletek megoldása. Ha a template-t úgy definiáltuk, hogy a kimeneti értékek végig a $(-1, 1)$ tartományban maradnak, akkor egyetlen művelet megold egy lineáris differenciál egyenletrendszer. A kimeneti érték levágása miatt olyan template-k is definiálhatók, amelyek logikai vagy más aritmetikai műveleteknek felelnek meg.

3. A CNN UNIVERZÁLIS SZÁMÍTÓGÉP

Az analogikai celluláris számítógépek fizikai megvalósítása jóval később kezdődött [3,4] és még mindig fejlesztés alatt áll. Ezeket a számítógépeket CNN univerzális számítógépnek is nevezik, mert a számítógép alapját egy CNN hálózat képezi. A CNN hálózat elméletében leírt cellák lokális memóriákkal, lokális logikai és analóg egységekkel vannak ellátva, és egy globális programozó egység biztosítja, hogy a számítógép tárolt-program vezérléssel működhessen. Ezek a chipek könnyen kapcsolhatók a hagyományos számítógépekhez, melyekről különböző programozó felületek (pl. az Analogic Macro Code [5]) segítségével vezérelhető a CNN számítógép. A 2. ábrán a 128×128 cellából álló ACE16K chip látható. A táblázatban feltüntettük az eddig gyártott chipeket. Látható, hogy a méretük egyre nő, és fontos kiemelni, hogy több rétegű chipeket is gyártanak már. Ezekben több réteg cella helyezkedik el, és a függőleges szomszédok között is állítható a kölcsönhatás erőssége. A CNN univerzális számítógépet több fontos tulajdonság teszi különlegessé [3,4]. Ezek közül a legfontosabbak: a) analóg, folytonos jelekkel dolgozik, ugyanakkor logikai műveleteket is végez (ezért nevezük analogikai számítógépnek), b) a cellák állapotértékei időben folytonosan változnak, c) térben diszkrét, d)

a cellák párhuzamosan működnek, e) univerzális Turing gép. A CNN számítógép másik fontos előnye, hogy a cellákhoz különböző (pl. fény-) érzékelők csatlakoztathatók, ez nagyon hasznossá teszi a robotika, bionika területén is. Ezekről az alkalmazásokról röviden a 4.2. fejezetben lesz szó.

<i>Név</i>	<i>Év</i>	<i>Méret</i>
--	1993	12*12
ACE440	1995	20*22
POS48	1997	48*48
ACE4k	1998	64*64
CACE1k	2001	32*32*2
ACE16k	2002	128*128
XENON	2004	128*96*2
EYE-RIS	2005	176*144
CACE2k	Gyártás alatt	32*32*3



2. ábra

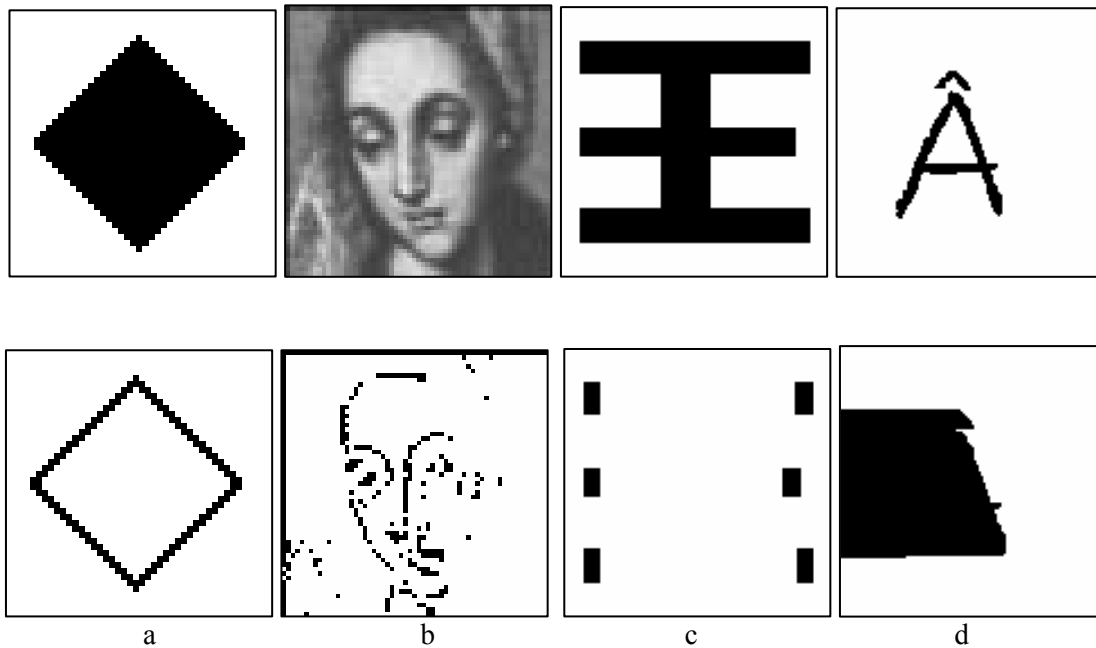
A táblázat a CNN chippek fejlődését követi végig. A képen az ACE16K chip látható.

4. A CNN SZÁMÍTÓGÉP ALKALMAZÁSAI

A CNN számítógép struktúrája és működési elve rengeteg területen ad alkalmazási lehetőséget. Ezek közül a legfontosabbak: a) a képfeldolgozásban, b) a robotikában és bionikában; a matematika és fizika területén c) sejtautomata modellek szimulálására, d) parciális differenciál egyenletek megoldására, e) sztochasztikus szimulációk elvégzésére alkalmas.

4.1. Alkalmazások a képfeldolgozásban

A celluláris neurális hálózat celláinak kimeneti értékei könnyen felfoghatók mint egy szürke skálájú kép, ezért teljesen természetes, hogy ez a CNN hálózaton dolgozó gép a képfeldolgozásban nagy szerepet játszik. Egyetlen beprogramozott művelettel az egész képen elvégezhető a transzformáció, hiszen a cellák párhuzamosan működnek. Ez a számítógép nem valós számokon, hanem képeken (2 dimenziós számtömbökön) végzi a műveleteket.



3. ábra
Képfeldolgozási műveletek

A 3. ábrán pár egyszerű műveletet mutatunk be. A felső sorban a bemeneti képek, az alsó sorban a művelet eredménye látható. Az első template megtalálja egy fehér-fekete ábrán a széleket. A template értékei: $A=\{0,0,0,0,1,0,0,0,0\}$, $B=\{-1,-1,-1,-1,8,-1,-1,-1,-1\}$, $z=-1$. A második művelet egy szürke képen detektálja a kontúrokat: $A=\{0,0,0,0,2,0,0,0,0\}$, $B=\{-1,-1,-1,-1,8,-1,-1,-1,-1\}$, $z=-0.5$. A harmadik példában a sarkokat lehet egyetlen művelettel kijelölni: $A=\{0,0,0,0,1,0,0,0,0\}$, $B=\{-1,-1,-1,-1,4,-1,-1,-1,-1\}$, $z=-5$, a negyedik template pedig árnyékot vetít: $A=\{0,0,0,0,2,2,0,0,0\}$, $B=\{0,0,0,0,2,0,0,0,0\}$, $z=0$. Ezek nagyon egyszerű példák, de természetesen több template segítségével sokkal komplexebb képfeldolgozási algoritmusok készíthetők [6,7].

4.2. Alkalmazások a robotikában és bionikában

A CNN chipek fontos előnye, hogy a cellákra érzékelők is szerelhetők [8]. Pl. a Bi-i nevű gépben olyan CNN chip van, amelynek cellái fotoszenzorokat tartalmaznak, így nagyon gyors kameraként tud működni [9]. Egy másodperc alatt több ezer képet képes felvenni. Ez a szám akkor válik igazán megdöbbentővé, ha belegondolunk, hogy a mi szemünk már 50 kép/s vetítési sebességnél is folytonos képet lát. Normális videokamerák 100-nál kevesebb képet vesznek fel egy másodperc alatt. A gyorsasága mellett fontos, hogy a felvett képeken azonnal műveleteket tudunk végezni, esetleg eldönthető, hogy az adott képet érdemes-e elmenteni vagy nem (pl. ha azt akarjuk, hogy csak akkor mentjük el a képet, ha mozdult valami). Hasonlóan tapintó- és hangérezékelők tervezésén is dolgoznak a kutatók. Ezek a mesterséges érzékelők nemcsak a robotikában hasznosak, de az orvostudományban is, különböző implantátumok tervezésénél.

4.3. Sejtautomata modellek

A párhuzamosan működő cellák nagyon könnyűvé teszik sejtautomata modellek programozását is. A sejtautomata modellek lényege, hogy minden cella új állapotát a lokális környezet előző (vagy még régebbi) állapota határozza meg. A sejtautomata modell szabályai általában könnyen megfogalmazhatók template-k formájában. Ezeket a műveleteket pedig egymás után ismételtethetjük, mindig az előző művelet kimeneti állapotát használva a következő bemeneti állapotaként. A párhuzamosan működő cellák nagyon gyorsá teszik ilyen modellek szimulálását.

Két alapvető példa a dilatáció és az erózió, amelyek egyetlen template-tel megoldhatók. A dilatáció esetében meghatározhatjuk, hogy minden olyan cella új állapota legyen fekete, amelynek a bizonyos szomszédai feketék voltak: $A=\{0,0,0,0,0,-1,0,0,0,0,0\}$, $B=\{0,1,0,1,1,1,0,1,0\}$, $z=2$, az erózió esetében pedig minden olyan cella legyen fehér, amelynek bizonyos szomszédai fehérek voltak: $A=\{0\}$, $B=\{0,1,0,1,1,1,0,1,0\}$, $z=-2$. Több template felírásával sokkal komplexebb, akár különböző logikai műveleteket is tartalmazó sejtautomata modellek is tanulmányozhatók [10].

4.4. Parciális differenciál egyenletek megoldása

Egy template paramétereinek definiálása után, ha a celluláris neurális hálózatot elindítjuk egy kezdeti állapotból, a végső stabil állapot a rendszer állapotegyenleteinek megoldását adja. Ha a CNN számítógéppel egy konkrét differenciál egyenletet szeretnénk megoldani, térben diszkretizálva az egyenletet megtalálható a megfelelő template. Pl. ha a diffúziós egyenletet szeretnénk megoldani [11], térben diszkretizálva egy olyan lineáris differenciál egyenletet kapunk (3. egyenlet), amelynek az alakja megegyezik a cellák állapotegyenleteinek az alakjával, és ezáltal azonosíthatók a diffúziót elvégző template paramétereik.

$$\frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = c \nabla^2 u(x, y, t) \Rightarrow \frac{\partial u_{i,j}}{\partial t} = \frac{c}{h^2} (u_{i,j+1} + u_{j,i+1} + u_{i,j-1} + u_{j,i-1} - 4u_{i,j}), h = \Delta x = \Delta y \Rightarrow \quad (3)$$
$$A = \{0, c/h^2, 0, c/h^2, 1 - 4c/h^2, c/h^2, 0, c/h^2, 0\}, B = \{0\}, z = 0.$$

Ezt a komplex műveletet a CNN chip kb. 20 ns alatt képes elvégezni.

Több réteg cellát tartalmazó CNN számítógépekkel sokkal bonyolultabb parciális differenciál egyenletek (PDE) oldhatók meg. Két réteg esetében pl. reakció-diffúzió típusú PDE-k [11], vagy 3 rétegű chipen már megoldható a két dimenziós Navier-Stokes egyenlet is [12].

4.5. Sztochasztikus szimulációk a CNN számítógépen

A sztochasztikus szimulációk a fizikának egy másik nagyon tág témaköre, melyben fontos lenne a szimulációk gyorsítása. Itt a legnagyobb előnyt a CNN chip valós zajja jelenti, amelyet fel lehet használni valószínű véletlen-számok előállítására. A sztochasztikus vagy Monte Carlo típusú szimulációk egyik legfontosabb lépése a random számok generálása. A mai digitális számítógépeken viszont csak pszeudo-random számok generálhatók, hiszen minden algoritmus teljesen determinisztikus. A CNN számítógép analóg jelei viszont valódi – az áramkörökben lejátszódó különböző fizikai jelenségekből származó – zajt hordoznak. Ez a valós zaj azonban térben erősen korrelált, nem lehet direkt módon felhasználni véletlenszámok generálására.

Ennek a valószínű véletlenszám generátornak a működését a [13] cikkben mutattuk be, itt röviden vázoljuk. A CNN számítógépen már kidolgoztak különböző pszeudo-random generátorokat, amelyek valójában olyan kaotikus sejtautomata modellek, amelyek statisztikája jól megközelíti a véletlenszámok statisztikáját [10]. Ezek mind 1/2 valószínűséggel generálnak 0 (fehér) vagy 1 (fekete) értékeket, főleg a kriptográfiában használták őket. Mi egy ilyen kaotikus sejtautomatát használunk, csak minden lépésben megzavarjuk egy zajos képpel. A sejtautomata modell szabálya:

$$x_{t+1}(i, j) = (x_t(i+1, j) \vee x_t(i, j+1)) \oplus x_t(i-1, j) \oplus x_t(i, j-1) \oplus x_t(i, j), \quad (4)$$

ahol a \vee a vagy, a \oplus a kizáró-vagy műveletet jelenti.

A zajos képet úgy kapjuk, hogy egy a értékű szürke képen egy $a+z$ küszöbű vágást végzünk (azok a cellák amelyeknek az értéke nagyobb mint $a+z$ feketék lesznek, a többi fehér lesz). Ha a z egy kicsi pozitív szám, a zaj miatt mindig lesz pár fekete pixel a kimeneti képen. Nagyon korrelált zajt kapunk, de az időbeli fluktuációk valós zajból származnak. Most a zajos kép és a sejtautomata modell kimeneti képe között egy kizáró-vagy műveletet végzünk, ezzel végül is néhány véletlenszerűen választott pixel értékét megváltoztatjuk (a kizáró vagy művelet biztosítja, hogy a fehér-fekete pixelek sűrűsége nem változik meg). Ez a kis perturbáció a sejtautomata modell következő lépéseiben aztán „továbbhalad”, hiszen a szomszédok következő értékeit majd befolyásolják a megváltoztatott pixelek. Így elérhető, hogy ugyanabból a kezdeti állapotból kiindulva a random-generátor soha nem ugyanazokat az értékeket generálja, mert az eredmény mindig a zajos képtől is fog függeni, de a sejtautomata modell jó statisztikai tulajdonságai is megmaradnak (nem lesznek korrelációk). Több független 0.5 sűrűségű képből könnyen nyerhetünk más p sűrűségű képeket is (lásd [13]).

Ezt a véletlen-szám generátort az ACE16K nevű, 128*128 cellából álló chipen teszteltük. Egy kép generálásához szükséges idő kb. 116 μ s, vagyis egyetlen véletlen-számra jutó idő 7 ns. Ezzel szemben egy 2.8 GHz-es Pentium 4 számítógép 33 ns alatt generál egy véletlen-számot. Tehát nem csak a valószínű zaj jelent előnyt, hanem az algoritmus gyorsasága is jelentősen nőtt. Ez az előny a chipek fejlődése során a cellák számának növelésével várhatóan tovább fog nőni.

Miután rendelkezésünkre áll a CNN számítógépen egy jó véletlen-szám generátor, nagyon sok különböző fizikában alkalmazott sztochasztikus (vagy Monte Carlo típusú) szimulációs módszert lehet implementálni. Itt két feladat megoldásának az alapötletét mutatjuk (be a részletek megtalálhatók a [13,14] publikációkban). Ez a két feladat a perkolációs feladat és az Ising modell.

A perkolációs feladat („site-percolation problem”) lényege a következő: adott egy fekete-fehér pontokból álló négyzetrács. Minden lépésben egy fekete pontról csak annak egy fekete szomszédjára léphetünk; kér-

dés, hogy létezik-e út a négyzetrács egyik szélétől a másikig. Ha létezik út, akkor van perkoláció. Ez egy nagyon absztrakt matematikai feladat, de nagyon sok jelenség modelljében alkalmazták már: erdőtüzek, betegségek terjedésére, folyadék terjedésére porózus anyagokban, bizonyos anyagok vezetőképességének kiszámolásához. A feladat statisztikus fizika szempontjából is érdekes, a fekete pontok sűrűségét változtatva egy másodfajú geometriai fázisátalakulás észlelhető. Megkeresni a CNN számítógéppel, hogy egy képen van-e perkoláció, nagyon izgalmas feladat, mert kiderül, hogy az a viszonylag bonyolult rekurzív algoritmus amellyel az utat keressük a digitális számítógépeken, az itt egyetlen template-tel helyettesíthető. A template értékei: $A=\{0.5,0.5,0.5, 0.5,4,0.5,0.5,0.5,0.5\}, B=\{0,0,0,0,4,0,0,0\}$, $z=3$. A bemenet maga a kép, amelyen a perkolációt keressük, a kezdeti állapot a bemenetnek csak az első sorát tartalmazza. A művelet során egy folyam indul el, a template az első sortól kiindulva kezdi rekonstruálni a bemeneti képet, így a kimenet tartalmazni fogja az összes olyan fekete pontot, amely kötődik az első sorhoz. A művelet elvégzése után csak azt kell ellenőrizni, hogy az utolsó sorban van-e fekete pont (ez egyetlen ÉS művelettel megkapható). Természetesen a feladatot statisztikailag is ellenőriztük, az eredmények jó egyezést mutatnak a digitális gépeken nyert eredményekkel [13]. Az algoritmus gyorsasága ennél a rácsméretnél (128) még nem éri utol a digitális számítógépeket, de mivel a szükséges idő lineárisan nő a rácsmérettel, és nem a rácsméret négyzetével, mint a digitális számítógépeken, a jövőben előnyt jelenthet a CNN számítógép.

Az Ising modellen egy másodfajú fázisátalakulást mutató spinrendszert tanulmányozunk. A spinek egy négyzetrácsra helyezkednek el, mindegyik spinnek (s) két állapota lehet -1 (fehér) és +1 (fekete), és az első szomszédok között egy ferromágneses kölcsönhatás van. A rendszer energiája: $H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} s_i s_j$. Ez a köl-

cönhatás rendezné a rendszert, a spinek azonos állapotba akarnak kerülni ha $J>0$, de ugyanakkor a hőmérséklet zajt (rendezetlenséget) visz be a rendszerbe. Létezik egy kritikus hőmérséklet, amely alatt a rendszer szinte teljesen rendezett (egyetlen nagy azonos spinekből álló klaszter dominál a rendszerben), fölötté pedig teljesen rendezetlen, nem alakulnak ki nagy klaszterek. Sok algoritmus létezik a rendszer tanulmányozására és a számunkra fontos átlagoknak a kiszámítására, a legtöbb viszont soros természetű. Pl. a Metropolis algoritmusban minden lépésben véletlenszerűen megváltoztatjuk egy spin állapotát. Ha az energiaváltozás (ΔE) negatív, akkor $p=1$, ha pozitív, akkor $p=\exp(-\Delta E/kT)$ valószínűséggel fogadjuk el az új állapotot. Ha a CNN számítógépen akarjuk ezt az algoritmust implementálni, a cellák párhuzamos működése miatt kerülnünk kell, hogy közvetlen szomszédok állapotát ugyanabban a lépésben változtassuk meg. Ahhoz, hogy mégis kihasználhassuk a párhuzamoság előnyeit, egy sakktábla maszkot alkalmazunk, minden páros (páratlan) lépésben a maszk fehér (fekete) pontjainak megfelelő spinekre alkalmazzuk a Metropolis algoritmust. Ez a párhuzamosított algoritmus megegyezik azzal az esettel, mintha a Metropolis algoritmusban nem véletlenszerű hanem rendezett sorrendben választanánk a spineket. Ez az algoritmus így már könnyen implementálható a CNN számítógépen a véletlen-szám generátor és egyszerű logikai műveletek segítségével. A párhuzamosított algoritmust teszteltük digitális számítógépeken és az ACE16K CNN chipen. A kapott eredmények nagyon jól egyeznek a klasszikus Metropolis algoritmus eredményeivel. Ugyanakkor az algoritmus gyorsasága sok előnyt ígér a cellák számának a jövőbeli növelésével.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Amint a sok és különböző alkalmazási lehetőség is mutatja, az analogikai celluláris számítógépek egy teljesen új számítástechnikai paradigmát képviselnek. Speciális komplex műveleteket tudnak nagyon könnyen és gyorsan elvégezni, ezért egy jó kiegészítést adnak a manapság használt digitális számítógépeink mellé. Ezen számítógépek egy első lépést képviselnek a biológiai rendszerekből inspirált számítógép megalkotása felé.

HIVATKOZÁSOK

- [1] G. Moore, Electronics, Vol. **38**, 114 (1965)
- [2] L. O. Chua, Lin Yang, *Cellular Neural Networks: Theory*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. **35**, No. 10 (1988)
- [3] T. Roska, L. O.Chua, *The CNN Universal Machine: an analogic array computer*, IEEE Trans. CAS-II, vol. **40**, pp. 163-173, March (1993)
- [4] T. Roska, *Computational and computer complexity of analogic cellular wave computers*, Journal of Circuits, Systems and Computers, Vol. **12**, No.4. (2003)
- [5] T. Roska, L.O.Chua, Á.Zarándy, *Language, compiler, operating system for the CNN super-computer* Berkeley, Technical report UCB/ERL M93/34, (1993)

- [6] L. O. Chua and Tamas Roska, *Cellular neural networks and visual computing*, Cambridge University Press, (2002)
- [7] L. O. Chua, Lin Yang, *Cellular Neural Networks: Applications*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. **35**, No. 10 (1988)
- [8] P. Kinget and M. Steyaert, *An analog parallel array processor for real-time sensor signal processing*, in Proc. of IEEE Int. Solid-state Circuits Conference, vol. **39**, pp. 92-93, (1996)
- [9] A. Zarandy, C. Rekeczky, *Bi-i: a standalone ultra high speed cellular vision system*, IEEE Circuits and Systems Magazine, Vol. **5**, p. 36-45, (2005)
- [10] K. R. Crouse, T. Yang, L. O. Chua, *Pseudo-random sequence generation using the CNN Universal Machine*, Fourth IEEE Int. Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, Seville, Spain, (1996)
- [11] T. Roska, L. O. Chua, D. Wolf, T. Kozek, R. Tetzlaff, F. Puffer, K. Lotz, *Simulating Nonlinear Waves and Partial Differential Equations via CNN – Part I: Basic Techniques, - Part II: Typical Examples*, IEEE Transactions on Circuits and Systems –I: Fundamental Theory and Applications, Vol. **42**, No. 10 (1995)
- [12] T. Kozek and T. Roska, *A double time-scale CNN for solving two-dimensional Navier-Stokes Equations*, International Journal of Circuit theory and Applications, Vol. **24**, 49-55 (1996)
- [13] M. Ercsey-Ravasz, T. Roska, Z. Neda, *Perspectives for Monte Carlo simulations on the CNN-UM*, Int. J. of Modern Physics C, Vol. **17**, No. 6, p. 909 (2006)
- [14] M. Ercsey-Ravasz, T. Roska, Z. Neda, *Stochastic Simulations on the Cellular Wave Computers*, Eur. Phys. J. B, Vol. **51**, No. 3, p. 407, (2006)

Rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás egy rugó-fal típusú mágnesezési modellben

Disorder-induced Phase Transition in a Spring-block Type Magnetization Model

KOVÁCS Katalin, NÉDA Zoltán

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Elméleti- és Számítógépes Fizika Tanszék
str. Kogălniceanu 1, RO-400084 Cluj-Napoca, Romania
kkovacs@phys.ubbcluj.ro

ABSTRACT

An one-dimensional Burridge-Knopoff type magnetization model is studied with Monte-Carlo computer simulation. Disorder is introduced through randomly distributed pinning centers, the magnetization process is modeled with relaxation dynamics. The avalanche size distribution is studied for different values of the disorder. The results indicate that the model exhibits disorder-driven phase transition.

ÖSSZEFOGLALÓ

Egydimenziós Burridge-Knopoff típusú mágnesezési modell mutatunk be, amelyet Monte Carlo szimulációs módszerrel tanulmányoztunk. A rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás kialakulásának lehetőségét vizsgáltuk, ahol a rendezetlenséget véletlenszerűen szétszórt pinning centerek által vezetjük be a rendszerbe. A modell relaxációs dinamikát követ. Tanulmányozzuk a lavinák nagyság szerinti eloszlását a rendezetlenség függvényében. Az eredmények alapján a modell mutatja a várt rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulást.

Kulcsszavak: rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás, Burridge-Knopoff típusú rugó-fal mágnesezési modell, számítógépes szimuláció, Barkhausen-zaj.

1. BEVEZETÉS

A modern statisztikus fizikának egyik sokat tanulmányozott területe a rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulások [1-5].

Elsőfajú fázisátalakulás közelében egy rendszerben három jellegzetes időskála van: τ_a mikroszkopikus (atomi) válaszügy, τ_{th} a termális fluktuációk ideje és τ_{dr} a külső vezérlés időskálája. Abban az esetben, amikor ezek között $\tau_a < \tau_{dr} < \tau_{th}$ összefüggés áll fenn, fluktuációmentes vagy atermális fázisátalakulásról beszélünk. Ilyen például a mágnesezési tér által vezérelt elsőfajú fázisátalakulás ferromágneses anyagokban. Atermális fázisátalakulást mutató rendszereknek jellegzetes tulajdonsága a hiszterézis, amely a rendszerben (térben és időben) „befagyott” rendezetlenségnek a következménye. A fluktuációmentes fázisátalakulások érdekes típusa az, amelyet a rendezetlenség vezérel. Változtatva a rendezetlenség mértékét, a hiszterézis alakja a kritikus rendezetlenségnél hirtelen megváltozik. Berger és társai [5] kísérletileg is kimutatták a rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulást egy Co/CoO ferromágneses/antiferromágneses kettősrétegen.

Számos modell, amely a mágnesezési jelenségek magyarázatára szolgál, szintén alkalmas a rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás modellezésére is. Ilyen, pl. a „random field” (RFIM) [1], „random bond” (RBIM) [3] és „random anisotropy” (RAIM) [4] Ising modellek. Ezeknek a modelleknek a lényege, hogy különböző módon véletlenszerű zajt (rendezetlenséget) vezetnek be egyszerű Ising-típusú modellbe, ezáltal tudják kezelni a mágnesezési jelenségekért felelős mikroszkopikus kölcsönhatásokat a mágnesezési rendszerekben.

Ferromágneses anyagokat külső mágnesezési térbe helyezve a külső vezérlő tér irányításának megfelelő mágnesezettségű tartományok növekednek a doménfalak elmozdulása által. A kristályhibák és szennyeződések azonban potenciálgátként akadályozzák a falak szabad elmozdulását. Adott doménfal mindaddig mozdu-

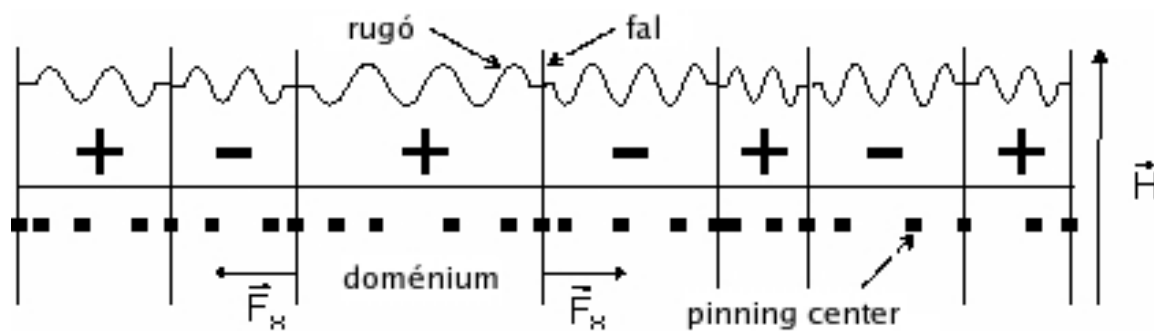
latlan marad, amíg a rá ható erők eredője meg nem haladja a hibák tűző „pinning” erejét. A doménfalak két pinning center között meg nagyon gyorsan elmozdulnak. Ennek következménye a mágnesezettség diszkrét ugrásokban történő változása, amit Barkhausen-zajnak nevezünk.

Jelen dolgozatban egy újabb, általunk nemrég bevezetett [6] mágnesezési modellt mutatunk be, és a modell keretein belül tanulmányozzuk a rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás létrejöttének feltételeit.

2. A RUGÓ-FAL MÁGNESEZÉSI MODELL

Az itt bemutatott modell a Burrige-Knopoff modellek [7] családjához tartozik, és egy egyszerű mechanikai analógián alapul. Burrige és Knopoff a rugó-tömb típusú modellt földrendések magyarázatára alkalmazta, azóta azonban a fizika legkülönbözőbb területein használják, mint pl. repedezések [8], önszerveződő nanostruktúrák [9], vagy akár a ragasztószalag feltépésekor tapasztalt jelenségek [10] tanulmányozására.

Az általunk bevezetett modell alapja egy egydimenziós rugó-fal rendszer, amelynek célja, hogy a mágnesezési jelenségekben fontos doménfal-mozgás dinamikáját mezoszkopikus skálán magyarázza. A modell vázlatos bemutatása az 1. ábrán látható.



1. ábra
A rugó-fal modell vázlat

2.1 Felépítés

A modell alkotóelemei a következők: (i) 1D spinlánc mentén egyenletes eloszlással véletlenszerűen szétszórta pinning centerek; (ii) néhány pinning centeren található merev fal, amelyek ellentétes mágnesezettségű (+/-) szomszédos tartományokat határolnak (ezeket 180°-os falaknak nevezzük); (iii) azonos rugó-állandóval és nulla egyensúlyi hosszal rendelkező rugók, amelyek szomszédos falakat kapcsolnak össze. Az így felépített mintát külső mágneses tér hatásának vetjük alá. Ezekkel az elemekkel létrehozott modell a valós, kristályhibákat és szennyeződések tartalmazó, ferromágneses anyagok doménszerkezetét modelleztük. A modell és a ferromágneses anyagok alapvető szerkezeti elemei között egyértelmű megfeleltetés van: (i) a modellbeli pinning centerek a kristályhibákat és szennyeződések modellezik; (ii) a merev falak a Bloch- vagy Néel-falaknak felelnek meg; (iii) a falakat összekapcsoló rugók pedig a mágneses doméniumok demágnezesési hatását modellezik.

A modellben három típusú kölcsönhatást veszünk figyelembe. Adott falra (pl. az i -dikre) három erő hat, amelyeknek a viszonya vezérli a doménfal-mozgást:

(1) Pinning (megtűző) erő, ami a falak mozgását akadályozza. A mechanikai analógiában ez a pinning centerek részéről ható Gauss-eloszlást követő tapadási súrlódási erő F_p .

(2) A mágneses doméniumok kölcsönhatása a külső mágneses térrel. Ezt a modellbe egy olyan erőként építettük be, amely minden falra egyenlő nagyságú, de szomszédos falakra ellentétes irányítású:

$$F_H = (-1)^i \beta \cdot H, \quad (1)$$

β dimenzióállandó. Az egyszerűség kedvéért a modellben úgy választjuk az egységeket, hogy $\beta = 1$. Ez az erő biztosítja azt, hogy a külső térrel megegyező irányítású doméniumok növekedni fognak.

(3) A doméniumok saját mágneses energiájából származó erő. A modellben ez a rugókban fellépő rugalmas erő:

$$F_m = -f_m \cdot x_i \quad (2)$$

Mágneses rendszerekben a doménium saját mágneses energiája a mágnesezettség négyzetével arányos ($E_m \sim M^2$), az ebből származó erő pedig $F_m \sim M$. A rugó-fal modellben egy tartomány mágnesezettsége a doménium hosszával egyenesen arányos. A teljes minta mágnesezettsége pedig a doméniumok hosszának megfelelő előjellel vett összegével arányos. A megfeleltetés tehát egyértelmű a modellbeli és valós demágnezesési erő között. A (2) képletben szereplő f_m a rugók rugóállandója, fontos csatolási állandó, a demágnezesési energia erősségét jellemzi.

A modellbe a rendezetlenséget a tűző erőkön keresztül vezetjük be. A rendezetlenség mértékét egyrészt a pinning pontok tűző ereje (F_p), másrészt a pinning pontok sűrűsége (N_p/L) határozza meg.

A modell paraméterei: N_p/N_w - pinning centerek és falak számának aránya, f_m - csatolási állandó, dH - lépés a külső tér változtatására, L - a minta hossza, σ - rendezetlenség mértéke (F_p szórása).

2.2. Dinamika

A bemutatott elemekkel és erőkkel jellemzett modell a ferromágneses anyagok doménszerkezetét és a mágnesezés során jelentkező doménfal-mozgás dinamikáját adja vissza. A modellt Monte-Carlo típusú számítógépes szimulációs módszerrel tanulmányozzuk.

Kezdetben N_p pinning pontot szórunk szét véletlenszerűen egy adott L hosszúságú mintában egyenletes eloszlással. Minden pinning pontot jellemez egy pinning erő F_p , ezek Gauss-eloszlást követnek. Ezek után N_w ($N_p/N_w \approx 100$) darab falat helyezünk el véletlenszerűen a pinning pontokon. A falak csak ezeken a tűző pontokon állhatnak. A szimuláció a $H = 0$ külső mágneses térerősségről indul. A modellbeli rendszer relaxációs dinamikát követ. Amikor egy falra ható erők között $|F_H + F_m| > F_p$ összefüggés áll fenn, a pinning erő hatása megszűnik, és a fal átugrik az eredő erő irányában levő szomszédos pinning pontra, amennyiben ezen nem található más fal. Ha azonban a megcélzott pinning pont már foglalt, a fal nem mozdul.

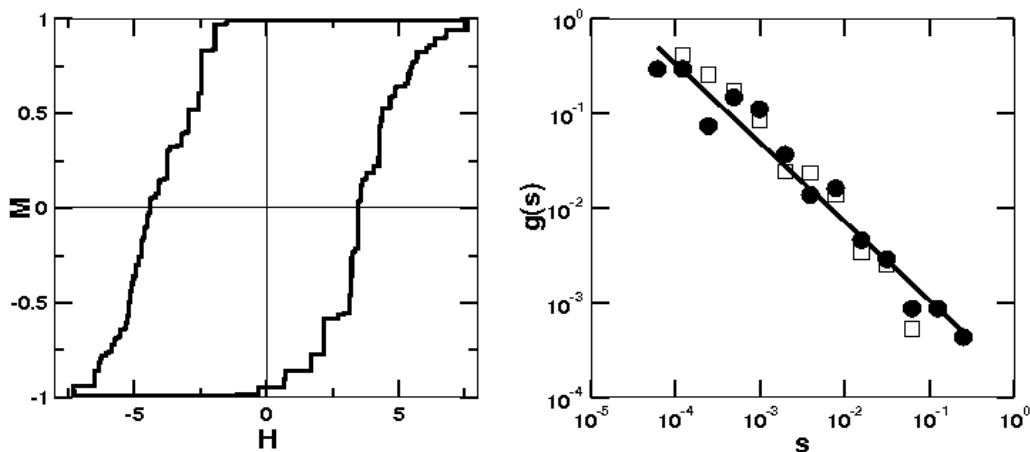
Doménfal átugrása szomszédos pinning pontra pillanatszerűen következik be. Itt azzal a közelítéssel élünk, hogy egy falnak a pinning ponton töltött idejéhez képest a mozgásideje elhanyagolhatóan rövid. Egy fal elmozdulása megváltoztatja a szomszédos falakra ható erők viszonyát is. Ennek következményeként egy falmozgás maga után vonhatja további falak elmozdulását, lavinaszerű jelenséghez vezetve.

A rendszer akkor van relaxált állapotban, amikor a falak már nem mozdulhatnak. Ekkor változtatjuk kis dH lépéssel a külső vezérlő térerősséget, és ismét relaxáljuk a rendszert. Egy lavina nagysága az általa okozott mágnesezettségbeli változással jellemzett. A mintát sok hiszterézis cikluson vezetjük keresztül és a rendszer statisztikus viselkedését vizsgáljuk.

3. EREDMÉNYEK

A szimulációk során vizsgáltuk a hiszterézis görbék alakját, valamint a lavinák nagyság szerinti eloszlását a rendszerben levő rendezetlenség mértékének függvényében. A lavinák nagyság szerinti eloszlása a legrelevánsabb jellemzője a mágnesezési jelenségeknek.

A 2. ábrán látható egy jellegzetes hiszterézis görbe és a hozzá tartozó ugrások (lavinák) nagyság szerinti eloszlása.



2. ábra

Hiszterézis görbe (balra) és a hozzátartozó lavinák nagyság szerinti eloszlása (jobbra) a kritikus rendezetlenség közelében. Paraméterek: $N_p/N_w=100$, $N_p=7000$, $L=7$, $\sigma=0.4$, $f_m=10$, $dH=0.001$.

Az ábrán látható hiszterézis jól reprodukálja a valós ferromágneses anyagokra mért kísérleti görbéket. Észrevehető, hogy a mágnesezési görbe nem folytonos, hanem nagyszámú és különböző méretű diszkrét ugrásokból épül fel. A modell tehát képes a Barkhausen-zaj létrehozására, a hiszterézis görbék alakja pedig stabil marad tág paraméter-tartományban.

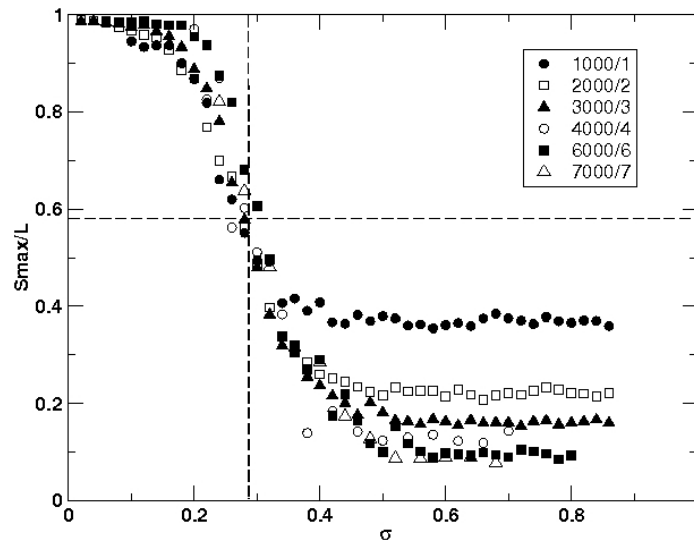
Az ábráról az is leolvasható, hogy ha a rendszerbe beépített rendezetlenség mértéke jól meghatározott érték körül van, akkor a lavinák nagyság szerinti eloszlása hatványfüggvény-szerű viselkedést mutat. Ennél a rendezetlenség értéknél a mágnesezési görbe nagyszámú és három nagyságrendet felölélő nagyságú ugrásokból áll. A hatványfüggvény-eloszlás utalhat fázisátalakulás környékén jelentkező kritikus állapot jelenlétére a vizsgált rendszerben, ezért tanulmányoztuk a rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás kialakulásának feltételeit a rugó-fal modellben.

3.1. Rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás

Jól ismert korábbi tanulmányok (RFIM, RBIM, RAIM [1-4]) igazolták, hogy a rendszerbe beépített rendezetlenség mennyisége erősen befolyásolja a Barkhausen-ugrások statisztikus tulajdonságait. Nagyon alacsony és nagyon magas rendezetlenség szintnél az ugrások nagyság szerinti eloszlása nem hatványfüggvény. Jól meghatározott, kritikus rendezetlenség értéknél azonban hirtelen jelentkezik a skálázás.

A rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás tanulmányozására definiáljuk a rendparamétert és a vezérlő paramétert. A rendparaméter a legnagyobb lavina relatív mérete S_{max}/L [3], a vezérlő paraméter pedig a rendezetlenség σ . Különböző rendszerméretekre ábrázolva a rendparamétert a rendezetlenség függvényében, a 3. ábrán látható görbéket kapjuk.

A görbék alakja a rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás jelenlétére utal. Kis $\sigma < \sigma_{crit}$ értéknél a hatalmas, teljes rendszeren végigsöprő lavinák dominálnak ($S_{max}/L \approx 1$), a mágnesezettség hirtelen fordul át negatív telítettségéből pozitívba adott külső térerősségnél. Ezt tekintjük a rendszer egyik fázisának. Nagy rendezetlenség értékeknél $\sigma > \sigma_{crit}$ a kis lavinák a jellemzők a rendszerben, az egyes falak elmozdulása nem képes nagy lavinák létrehozására az erős pinning pontok miatt. A mágnesezettség átfordulása apró ugrásokban, majdnem folytonosan történik, ez a második fázis. Jól meghatározott σ_{crit} rendezetlenségnél a görbéknek inflexiós pontja van, közelében a lavinanagyság rohamosan csökken. Annak érdekében, hogy a végesméret hatást ellenőrizzük, tanulmányoztuk az S_{max}/L alakját növekvő rendszerméretekre. Az eredmények azt igazolják, hogy a fázisátalakulás valódi, nem csupán végesméret effektus: növekvő rendszerméretek esetén sem mozdul el az inflexiós pont helye, $\sigma_{crit} = 0.28 \pm 0.02$ és a neki megfelelő relatív lavinaméret $S_{max}/L = 0.59 \pm 0.03$ minden esetben, a két fázis pedig nagyobb rendszerek esetén hangsúlyozottabban elkülönül, mint kis rendszerekben. Az eredmények jó egyezést mutatnak korábbi, más modellek által szolgáltatott eredményekkel [3].



3. ábra

A rendparaméter a rendezetlenség függvényében növekvő rendszerméretekre:
 $L=1-7$; paraméterek: $N_p/L=1000$, $N_p/N_w=100$, $f_m=10$, $dH=0.001$.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Jelen dolgozatban egydimenziós Burrige-Knopoff típusú rugó-fal mágnesezési modellt mutattunk be, különös tekintettel a rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulás kialakulására. A rendezetlenséget időben és térben befagyasztott pinning pontok által vezettük be a modellbe, erősségük változtatásával szabályozható a rendszerbe beépített rendezetlenség mértéke.

A modell minőségileg helyesen reprodukálja a valós ferromágneses anyagokban létrejövő doménfalmozgást és a Barkhausen-zajt. Ez az egyszerű egydimenziós modell képes a rendezetlenség által vezérelt fázisátalakulást kimutatni és a kapott eredmények jó minőségi egyezést mutatnak korábbi, magasabb dimenziós modellek eredményeivel [1-4].

Az itt bemutatott modell egyszerű mechanikai analógiára épül, ezért könnyen érthető, jól kezelhető, számítógéppel egyszerűen tanulmányozható, pedagógiai felhasználásra meg kitűnően alkalmas.

HIVATKOZÁSOK

- [1] J. P. Sethna, K. Dahmen, S. Kartha, J. A. Krumhansl, B. W. Roberts and J. D. Shore, Phys. Rev. Lett. **70**, 3347 (1993); O. Perkovic, K. Dahmen, J. P. Sethna, Phys. Rev. Lett. **75**, 4528 (1995)
- [2] O. Perkovic, K. Dahmen, J. P. Sethna, Phys. Rev. B **59**, 6106 (1999); A. Travesset, R. A. White and K. A. Dahmen, Phys. Rev. B **66**, 024430 (2002)
- [3] E. Vives and A. Planes, Phys. Rev B **50**, 3839 (1994)
- [4] E. Vives and A. Planes, Phys. Rev B **63** 134431 (2001)
- [5] A. Berger, A. Inomata, J. S. Jiang, J. E. Pearson and S. D. Bader, Phys. Rev. Lett. **85**, 4176 (2000)
- [6] K. Kovács, Y. Brechet and Z. Nédá, Model. Sim. Mat. Sci. **13** 1-12 (2005)
- [7] R. Burrige and L. Knopoff, Bull. Seis. Soc. Amer. **57**, 341 (1967); J. H. E. Cartwright, E. Hernandez-Garcia and O. Piro, Phys. Rev. Lett. **79**, 527 (1997)
- [8] K.-t. Leung and Z. Nédá, Phys. Rev. Lett. **85**, 662 (2000)
- [9] F. Járai-Szabó, S. Aştilean and Z. Nédá, Chem. Phys. Lett. **408**, 241 (2005)
- [10] Rumi De, Anil Maybhatte and G. Ananthkrishna, Phys. Rev. E **70**, 046223 (2004)
- [11] K. Kovács and Z. Nédá, Phys. Lett. A, In press.

A beltéri radon-koncentráció mérése – A maratott nyomdetektoros módszer két változata

Indoor Radon Measurements – Using Two Variants of the Etched Track Detectors' Method

Drd. CSEGZI Sándor¹, Dr. Ana DANIȘ²

¹Str. Cornești 68/a, Târgu Mureș, România

²Str. Matei Voievod 11, Sector 2, București, România

ABSTRACT

Using two experimental variants of etched track detectors' method for indoor radon measurement, one elaborated by the SSNTDs Laboratory, ATOMKI, Debrecen, and SSNTDs Laboratory, IFIN-HH, Bukarest; there have been performed 38 determinations simultaneously, from different apartments within the locality of Covasna, County Covasna, Romania.

Keywords: Radon indoor measurement; air radon monitoring device; track detector CR-39; calibrated etched track detectors for radon indoor measurements.

ÖSSZEFOGLALÓ

A maratott nyomdetektoros módszer két kísérleti módszerét alkalmazva a beltéri radon-koncentráció mérésére (egyiket az SSNTDs Laboratory, ATOMKI, Debrecen, a másikat az SSNTDs Laboratory, IFIN-HH, Bukarest kivitelezte), 38 vizsgálatot végeztünk különböző lakásokban és egy mofettában Kovászna városban (Kovászna megye, Románia).

1. BEVEZETŐ

Romániának az Európai Unióba való belépése után hozzá kell igazítania tudományos gyakorlatát az IRMM (Institute of Reference Materials and Measurements – Európai Unió) által támasztott követelményeknek, ami *i) az alkalmazott módszerek, ii) a hivatkozási anyag, és iii) a kísérleti adatok feldolgozásának egységesítését* illeti, azzal a céllal, hogy az adatok minőségileg megfeleljenek és bekerüljenek a kontinentális és globális adatbázisba.

E dolgozatot úgy tekintjük, mint a *beltéri radon-koncentráció maratott nyomdetektorokkal való meghatározásának tesztjét*, arra a módszerre vonatkozóan, amelyet az IFIN-HH bukaresti laboratóriumának egy kutatócsoportja dolgozott ki. Drd. Csegzi Sándor doktori dolgozatának kapcsán 38 mérési pontban végzett beltéri összehasonlító radon-koncentráció mérést, ténylegesen alkalmazva az SSNTDs Laboratory (Atomki, Debrecen) módszerét (amely módszer nemzetközileg már jóváhagyott) és a bukaresti IFIN-HH hasonló laboratóriumának módszerét. Az eredmények összehasonlításával a kísérlet jelentős mértékben hozzájárult néhány olyan tényező felderítéséhez, amely befolyásolni tudja a nyomdetektoros beltéri radon-koncentráció mérés eredményét.

Az elvégzett munkának a következő eredményei születtek :

1. Elkészült, Romániában először, két helység radon-térképe (Gyergyóremete és Kovászna)
2. Sikerült kidolgozni egy olyan munkamódszert, mely lehetővé teszi iskolai körülmények között, a tudományosság feltételeivel a kiterjesztést egy országos reprezentatív mérési hálózat szintjére. Ezt egy munkafüzet is segíti.
3. Van Romániának egy olyan mérési módszere, mely a debreceni együttműködés alapján, az összehasonlító mérésekre alapozva elfogadható mérési eredményekhez vezet

Megjegyezendő, hogy a romániai anyagi viszonyokra alapozva, a mikroszkópos feldolgozás látszik kiterjeszhetőnek, így nagyobb hangsúlyt fektettünk a nyomok észlelésének, felismerésének problémáira.

A munkafüzet könyv formájában létezik. Kiadását a bukaresti Didaktikai és Pedagógiai Kiadó támogatja. Ebben elméleti alapozás található a radioaktivitásról általában, a radonról kiemelten. Mérési módszerek bemutatása és ajánlott laborgyakorlatok is vannak. Az elméleti alapozás statisztikai és hibaszámítási kérdéseket is taglal, melyek nélkül az adatfeldolgozás nem elégítené ki a tudományos elvárásokat.

A beltéri radon-mérést Romániában, Kovászna városban 38 lakásban egyidejűleg végeztük a két fent említett maratott nyomdetektoros módszerrel. Minden mérési pontba két monitorizáló berendezést helyeztek el (1-es és 2-es ábra), amelyekbe szilárd nyomdetektorokat szereltünk. Az expozíciós időt minden detektor esetében az 1-es táblázat mutatja.

Elméletileg a nyomdetektorban (amelyet a beltéri radon-mérő készülékbe szereltünk) az alfa sugárzás nyomsűrűsége ρ [nyom/cm²] arányos

i) a radon-koncentrációval, A_v [Bq/m³], a radon-mérő berendezés aktív térfogatával, v , melynek koncentrációja arányos a helyiség levegőjének radon-koncentrációjával. E berendezés szűrője csak a radon számára áttetsző és visszatartja a radon származékait, amelyek az aeroszol részecskékhez kapcsolódnak.

ii) a beltéri radon-mérő berendezés aktív térfogata v

iii) t a detektor expozíciós ideje és

iv) az alfa-részecskék regisztrálásának hatékonysága ε az alkalmazott nyomdetektorban.

Tehát:

$$\rho = K A_v v t \varepsilon \quad (1)$$

ahol K , azon kívül, hogy figyelembe veszi a beltéri radonnak a berendezés szűrőjén való áthatolását, figyelembe veszi a megfigyelő szubjektivitását is, amely az alfa részecskék azonosítását befolyásolja.

Ha x -szel jelöljük az 1-es összefüggés mennyiségi mutatóját a beltéri radon-mérő berendezés belsejében elhelyezett detektor esetén, és s -szel a kalibrált detektor (amely a radon-mérő berendezéshez hasonló berendezésbe van szerelve) mutatóit (amely viszonyításnak számít), ha a nyomdetektorok hasonló típusúak és azonos szériából vannak, a két összefüggés aránya alapján a v és ε értékek egyszerűsítése nyomán az A_x beltéri radon-koncentráció:

$$A_x = A_s \cdot (\rho_x / \rho_s) \cdot (t_s / t_x) \quad (2)$$

A ρ_x és ρ_s mérhető mennyiségek, amelyeket a szilárd nyomdetektorok alfa-nyomainak száma alapján állapítanak meg optikai mikroszkópia vagy automata számláló segítségével, t_x és t_s pedig könnyen meghatározható mennyiségek, az esetek többségében, előre meghatározottak.

1. táblázat

Kovászna város lakóházaiban – az IFIN-HH nyomdetektoros módszerével mért radon aktivitások

Sor-szám	Cím	IFIN-HH detektor száma/ Mikroszkóp lemez száma	Expozíciós idő [nap]	Észlelt alfa nyomok száma/tanulmányozott felület [nyom/mm ²]	Alfa nyom-sűrűség [nyom/cm ²]	Háttér nélküli alfa nyom-sűrűség [nyom/cm ²]	Alfa nyomsűrűség /nap [nyom/cm ² nap]	Radon aktivitás koncentráció [Bq/m ³]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Cuza Voda 90	1/653	368	<u>5121 ± 281</u> 120, 1	4264 ± 234	3939 ± 394	10, 70	197 ± 23
2.	Baia de Piatra 41	2/653	368	<u>1672 ± 63</u> 37, 7	4437 ± 155	4112 ± 411	11, 17	205 ± 27
3.	Toamnei 20	3/654	369	<u>1183 ± 47</u> 35, 6	3323 ± 133	2998 ± 320	8, 12	149 ± 18
4.	Morilor 14	5/654	360	<u>1053 ± 46</u> 36, 8	2864 ± 126	2539 ± 279	7, 05	129 ± 15
5.	Baia de Piatra 4 A	6/655	368	<u>2325 ± 48</u> 78, 4	2978 ± 60	2653 ± 292	7, 21	133 ± 16
6.	Digului 10	7/655 *	368	<u>6289 ± 79</u> 63, 7	9875 ± 128	9550 ± 955	26, 12	495 ± 54
7.	József Attila 4	8/656 *	369	<u>645 ± 51</u> 75, 5	3505 ± 70	3180 ± 345	8, 62	159 ± 19
8.	Tiglariei 18	9/656 *	369	<u>4111 ± 64</u> 107, 8	3814 ± 61	3489 ± 356	9, 45	171 ± 21
9.	Plevnei 6	10/657 *	369	<u>3528 ± 59</u> 92, 1	3830 ± 65	3505 ± 385	9, 50	175 ± 19

Sor- szám	Cím	IFIN-HH detektor száma/ Mikroszkóp lemez száma	Expozíciós idő [nap]	Észlelt alfa nyomok száma/tanul- mányozott felület [nyom/mm ²]	Alfa nyom- sűrűség [nyom/cm ²]	Háttér nélküli alfa nyom- sűrűség [nyom/cm ²]	Alfa nyomsű- rűség /nap [nyom/ cm ² nap]	Radon aktivitás koncentráció [Bq/m ³]
10.	M. Eminescu 5	11/657 *	369	<u>2352 ± 48</u> 117, 6	2000 ± 40	1675 ± 184	4, 45	83 ± 10
11.	Butyakak 6	12/658 *	369	<u>3591 ± 60</u> 108, 8	3301 ± 56	2976 ± 327	8, 06	148 ± 19
12.	Kalvin 5	13/658 *	369	<u>6562 ± 81</u> 110, 7	5878 ± 81	5513 ± 606	15, 00	276 ± 34
13.	Luceafarului 9	14/659 *	370	<u>1203 ± 35</u> 34, 5	3492 ± 101	3167 ± 317	8, 50	156 ± 17
14.	M.Eminescu 19	15/659 *	370	<u>2913 ± 54</u> 25, 4	11454 ± 218	11129 ± 988	30, 15	555 ± 67
15.	M.Eminescu 78	16/660	369	<u>929 ± 43</u> 33, 5	2771 ± 127	2446 ± 204	6, 61	122 ± 13
16.	M.Eminescu 81	17/660	368	<u>1560 ± 68</u> 57, 8	2699 ± 119	2374 ± 261	6, 43	118 ± 13
17.	Parului 2	18/661	369	<u>1034 ± 45</u> 27, 7	3727 ± 164	3402 ± 340	9, 24	170 ± 19
18.	Brazilor 36	19/661	368	<u>1307 ± 51</u> 30, 1	4349 ± 170	4024 ± 402	10, 90	201 ± 22
19.	Brazilor 53	20/662	369	<u>1006 ± 44</u> 29, 4	3426 ± 137	3101 ± 310	8, 40	155 ± 17
20.	Brazilor 18	21/662	369	<u>756 ± 39</u> 31, 9	2369 ± 118	2044 ± 225	5, 53	102 ± 12
21.	Tóth 21B	22/663	369	<u>1394 ± 53</u> 30, 1	4638 ± 176	4313 ± 431	11, 72	216 ± 24
22.	Piata eroilor 3	23/663	368	<u>1020 ± 45</u> 31, 4	3244 ± 143	2919 ± 318	7, 91	146 ± 16
23.	Teculescu 14	24/664	369	<u>650 ± 36</u> 36, 8	1768 ± 97	1443 ± 159	3, 91	72 ± 9
24.	Horia-Closca- Crisan 16	25/664	368	<u>2526 ± 71</u> 27, 7	9105 ± 255	8780 ± 965	23, 79	438 ± 43
25.	Timar 4 B	26/665	369	<u>1430 ± 54</u> 31, 2	4582 ± 174	4257 ± 426	11, 54	212 ± 23
26.	Timar 14	27/665	369	<u>1065 ± 46</u> 31, 8	3350 ± 144	3025 ± 306	8, 19	151 ± 17
27.	St. Mare 122	28/666	369	<u>977 ± 45</u> 32, 4	3018 ± 139	2693 ± 270	7, 29	134 ± 15
28.	Petőfi 3	30/666 **	367	<u>14033 ± 239</u> 0, 013	456458 ± 456	456133 ± 54736	1242, 87	22877 ± 2745
29.	Petőfi 102	31/667	368	<u>1265 ± 51</u> 34, 7	3648 ± 146	3323 ± 365	9, 03	166 ± 18
30.	Petőfi 13	32/6687	368	<u>1767 ± 59</u> 34, 7	5095 ± 168	4770 ± 477	12, 96	238 ± 26
31.	Arany János 23	33/668	369	<u>1295 ± 51</u> 34, 7	3734 ± 145	3409 ± 341	9, 23	170 ± 19
32.	Arany János 15	34/668	370	<u>2861 ± 76</u> 25, 4	11250 ± 304	10925 ± 1093	29, 70	543 ± 60
33.	Stefan cel Mare 63	35/669	369	<u>904 ± 43</u> 30, 1	3008 ± 144	2683 ± 295	7, 27	134 ± 15
34.	Kalvin 4	36/669	369	<u>2079 ± 64</u> 32, 4	6423 ± 199	6098 ± 610	16, 53	304 ± 33
35.	Stefan cel Mare 58	37/670	370	<u>1477 ± 55</u> 31, 2	4732 ± 175	4407 ± 441	11, 91	219 ± 24
36.	Stefan cel Mare 97	38/670	369	<u>1004 ± 45</u> 32, 4	3102 ± 140	2777 ± 305	7, 52	138 ± 17
37.	Toth 10	39/671	366	<u>800 ± 40</u> 32, 4	2472 ± 124	2147 ± 215	5, 86	108 ± 12
38.	Petőfi 40	40/671	362	<u>1192 ± 49</u> 34, 7	3437 ± 141	3112 ± 342	8, 60	158 ± 17

A próbák többségénél az objektív X 20 és az okulár X 10 nagyítást használtunk (teljes nagyítás X 300),
* Objektív X 10, ** Objektív X 40

2. táblázat

Összehasonlító táblázat Kovászna városban az ATOMKI, Debrecen és az IFIN-HH, Bukarest, maratott nyomdetektoros módszerekkel, azonos időpontban végzett lakásradon koncentrációkkal

Sorszám	ATOMKI, Debrecen mód- szerrel kapott értékek	IFIN-HH, Bukarest módszerrel kapott értékek	A két módszer közötti szám- szerű külön- ség	A különbség standard hibája		Megjegyzések az eredményeket illetően a jelentős eltérés elvét alkal- mazva (a különbség nagyobb vagy nem a standard eltérés háromszoro- sánál).*
	[Bq/m ³]	[Bq/m ³]		σ	3σ	
1.	131 ± 6	197 ± 23	66	24	72	NEM, az eltérés nem jelentős.
2.	128 ± 6	205 ± 26	77	28	84	NEM, az eltérés nem jelentős
3.	96 ± 5	149 ± 18	53	19	57	NEM, az eltérés nem jelentős
4.	58 ± 3	129 ± 16	71	16	48	IGEN, az eltérés jelentős.
5.	43 ± 3	133 ± 16	90	16	48	IGEN, az eltérés jelentős.
6.	600 ± 28	495 ± 54	125	61	183	NEM, az eltérés nem jelentős
7.	50 ± 3	159 ± 19	109	19	57	IGEN, az eltérés jelentős.
8.	88 ± 4	171 ± 21	83	21	63	IGEN, az eltérés jelentős.
9.	78 ± 4	175 ± 19	97	19	57	IGEN, az eltérés jelentős.
10.	41 ± 2	83 ± 10	42	10	30	IGEN, az eltérés jelentős.
11.	78 ± 4	148 ± 19	70	19	57	IGEN, az eltérés jelentős.
12.	202 ± 11	276 ± 34	74	36	108	NEM, az eltérés nem jelentős
13.	133 ± 6	156 ± 17	23	18	54	NEM, az eltérés nem jelentős
14.	236 ± 13	555 ± 67	319	68	204	IGEN, az eltérés jelentős.
15.	91 ± 5	122 ± 13	31	14	42	NEM, az eltérés nem jelentős
16.	92 ± 5	118 ± 13	26	14	42	NEM, az eltérés nem jelentős
17.	119 ± 6	170 ± 19	51	20	60	NEM, az eltérés nem jelentős
18.	296 ± 15	201 ± 22	95	27	81	IGEN, az eltérés jelentős.
19.	164 ± 8	155 ± 17	9	19	57	NEM, az eltérés nem jelentős
20.	60 ± 3	102 ± 15	42	15	45	NEM, az eltérés nem jelentős
21.	230 ± 13	216 ± 24	14	27	81	NEM, az eltérés nem jelentős
22.	121 ± 6	146 ± 16	25	17	51	NEM, az eltérés nem jelentős
23.	31 ± 2	72 ± 9	41	9	27	IGEN, az eltérés jelentős.
24.	561 ± 26	438 ± 43	123	50	150	NEM, az eltérés nem jelentős
25.	208 ± 9	212 ± 23	4	25	75	NEM, az eltérés nem jelentős
26.	109 ± 5	151 ± 17	42	18	54	NEM, az eltérés nem jelentős
27.	118 ± 6	134 ± 15	16	16	48	NEM, az eltérés nem jelentős
28.	16012 ± 865	22877 ± 2745	6865	2878	8634	NEM, az eltérés nem jelentős

Sorszám	ATOMKI, Debrecen mód- szerrel kapott értékek	IFIN-HH, Bukarest módszerrel kapott értékek	A két módszer közötti szám- szerű külön- ség	A különbség standard hibája		Megjegyzések az eredményeket illetően a jelentős eltérés elvét alkal- mazva (a különbség nagyobb vagy nem a standard eltérés háromszoro- sánál).*
	[Bq/m ³]	[Bq/m ³]		σ	3σ	
29.	172 ± 8	166 ± 18	6	20	60	NEM, az eltérés nem jelentős
30.	205 ± 9	238 ± 26	33	28	84	NEM, az eltérés nem jelentős
31.	168 ± 8	170 ± 19	2	21	63	NEM, az eltérés nem jelentős
32.	179 ± 8	543 ± 60	364	60	180	IGEN, az eltérés jelentős.
33.	106 ± 5	134 ± 15	28	28	84	NEM, az eltérés nem jelentős
34.	399 ± 20	304 ± 33	95	39	117	NEM, az eltérés nem jelentős
35.	122 ± 6	219 ± 24	97	25	75	IGEN, az eltérés jelentős.
36.	106 ± 5	138 ± 18	32	18	54	NEM, az eltérés nem jelentős
37.	115 ± 6	158 ± 17	43	18	54	NEM, az eltérés nem jelentős
38.	94 ± 5	108 ± 12	14	13	39	NEM, az eltérés nem jelentős

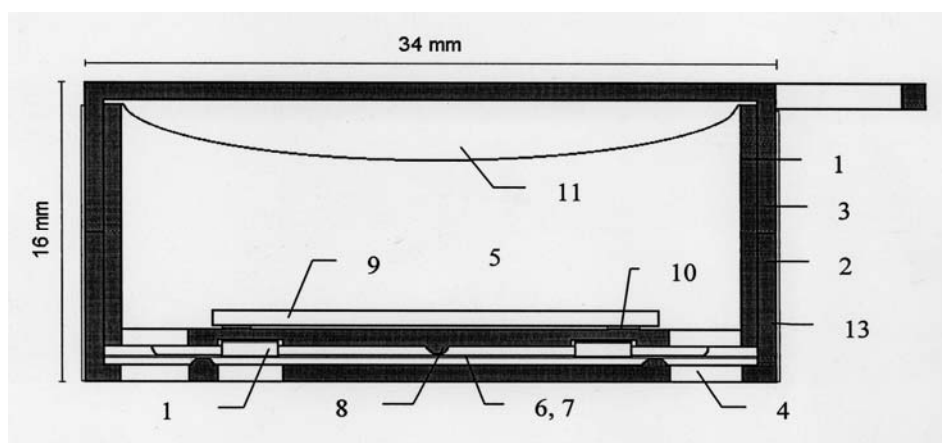
* Két egymástól független mérésor k_1 és k_2 középértékeinek $k_1 - k_2$ különbsége, normál eloszlás esetén, normál eloszlású standard eltérése:

$$\sigma_{(k_1 - k_2)} = \sqrt{\sigma_{k_1}^2 + \sigma_{k_2}^2}$$

Az eltérés jelentős ha: $k_1 - k_2 > 3 \sigma_{(k_1 - k_2)}$

A beltéri radon-koncentráció 1-es mérési módszerét (maratott nyomdetektorok alkalmazásával – ATOMKI, debreceni változat) a következő feltételekkel alkalmaztuk:

- beltéri radon-monitorizáló készülék (RADAMON):

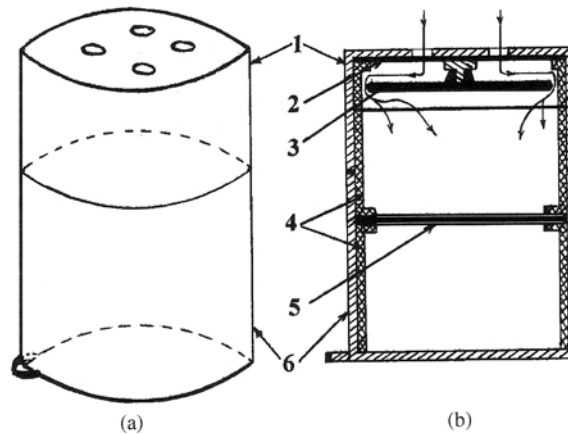


1. ábra

- a használt szilárd nyomdetektor: TASTRAK- CR-39, Bristol, Anglia

A beltéri radon-koncentráció 2-es mérési módszerét maratott nyomdetektorokkal (IFIN-HH változat, Bukarest – a következő feltételek mellett alkalmaztuk:

- Radon-mérő készülék



2. ábra

Az IFIN-HH módszer nyomdetektoros mérőeszköze:

a) külső doboz és

b) hosszmetset. 1. felső, lyukas, fedő; 2. a szűrő rögzítő gyűrűje; 3.korong;

4. a nyomdetektort rögzítő felület; 5. a CR-39 típusú nyomdetektor; 6. a berendezés alsó fedője

- Alkalmazott szilárd nyomdetektor, CR-39 típus, Page Ltd, Anglia
- a detektorok kalibrálása egy laboratóriumi kalibráló berendezéssel történt, egy friss ^{226}Ra – forrást alkalmazva, amely radioaktív egyensúlyban van a ^{222}Rn -nal és amelynek aktivitása a hitelesítés pillanatában (2004. július 8-án) 2082 ± 150 Bq volt (11001-es számú hitelesítési bizonyítvány, 2004. július 29., kiadta az IFIN-HH Radionuklidek Metrológiai Laboratórium)
- a kalibráláshoz egy olyan hitelesítő berendezést használtunk (CE 10976 egybeesési módszer), melyben a kalibrálási detektorok expozíciós ideje alatt a ^{226}Ra forrás aktivitása nem volt jelentős mértékű ($T_{1/2} = (1600 \pm 7)$ Bq)
- a ^{222}Rn expanziós térfogata az alkalmazott kalibráló berendezésben (7653 ± 6) cm^3 volt
- a kalibrálandó detektorok teljes expozíciós ideje alatt a radon-koncentráció állandó volt ($272,05 \pm 19,59$ Bq/ dm^3 értékű)
- a detektorok teljes expozíciós ideje a kalibráló berendezésben 45 nap volt

- **a detektorok maratási feltételei:** maratási szer 30%-os NaOH oldat, 70°C -os hőmérséklet, időtartam 7 óra.
- **Az összes nyomdetektor** éspedig **i)** a háttér-detektorok **ii)** a kalibrált detektorok és **iii)** a mérési detektorok **egyidőben és ugyanabban a marató kádban marattattak** egy U 15 típusú termosztatált fürdőben (MLW, Németország). A maratás után az összes detektort alaposan megmostuk ötször vízben és 18-20 órát desztillált vízben tartottuk, oly módon, hogy a detektorok mindkét felülete közvetlenül érintkezzen a vízzel;
- **A maratott nyomdetektorokban található alfa-nyomok tanulmányozása** hagyományos optikai mikroszkópiával történt, egy két látcsöves, kalibrált Carl Zeiss Jena mikroszkópot alkalmazva. A mikroszkóp kalibrálására egy mm^2 -re felosztott 1 cm^2 -es optikai hálót használtunk, ezt egy okulárlencsébe helyeztük (1, 5 cm-es eredeti Carl Zeiss hajszálkereszttel, amely mm-re és tízedmiliméterekre van felosztva, próbaként.
- A maratott nyomdetektorokban található nyomok vizsgálata **X150**-es nagyítással történt (objektív X10, okulár X10 és a mikroszkóp optikája X1, 5), amely esetén egy négyzetes látómező felülete $0,49\text{ mm}^2$ volt, tehát a detektor 1 cm^2 -nyi felületének vizsgálata céljából 204,08 egymás utáni négyzetes látómezőt kellett elemezni és **X300**-as nagyításnál (objektív X20, okulár X10 a mikroszkóp optikája X1, 5), amely esetében egy négyzetes mikroszkopikus látómező felülete $0,1156\text{ mm}^2$ volt. Tehát a detektor 1 cm^2 -nyi felülete esetén 865,05 négyzetes mikroszkopikus látómezőt kellett elemezni. Egyetlen alkalommal, a mofetta vizsgálatánál használtak **X600**-os nagyítást (objektív

X40, okulár X10 és a mikroszkóp optikája X1, 5), amely esetben a négyzetes mikroszkopikus látómező felülete $0,030765 \text{ mm}^2$.

- **A mérendő mennyiség** a CR-39 típusú detektorokban található **alfa nyomsűrűség [nyom/cm²]** volt. A számításokban a **napi alfa nyomsűrűséget [nyom/cm².nap]** használták, amelyet összehasonlítotunk a kalibrált detektorok **napi alfa nyomsűrűségével**, ami után mindkét mennyiségből kivontuk a háttérsugár-sugárzás-nyomokat.
- **A meghatározott mennyiség bizonytalansági foka, a beltéri radon-koncentráció esetében** a #) mérhető mennyiségek bizonytalansága (**A típusú bizonytalanság**) és a #) **B típusú bizonytalanság** (a használt mennyiségek bizonytalansága a mennyiségek meghatározása esetén) összege. Mind-egyiknek egy $k = 1,96 \approx 2$ kiterjesztési faktor felel meg (egy 95%-os bizalmi szint esetén).
- Tehát, beltéri radon-koncentráció mennyiségi meghatározása esetén a bizonytalansági összefüggés:

$$U_{\text{total}}^2 = U_A^2 + U_B^2$$

2. AZ EREDMÉNYEK TÁRGYALÁSA

A beltéri radon-koncentráció maratott nyomdetektorokkal való mérése nyomán elért eredményeket (a két módszer alkalmazása során) az 1-es, ill. a 2-es táblázat mutatja be.

Ahogy az 1-es és a 2-es táblázatból kitűnik, a két laboratórium által kapott beltéri radon-koncentráció értékek 74%-os pontossággal megegyeznek, az eltérések nem jelentősek, 26%-ban pedig jelentős eltérések mutatkoznak. Hogy ezt a megállapítást indokolni tudjuk, nevezetesen, hogy megállapítsuk a jelentős eltérések okát, fontosnak tartottuk egy-egy részlet pontosítását a munkafolyamat során.

Abból kiindulva, hogy a beltéri radon-koncentráció maratott nyomdetektorokkal való mérésének debreceni változata **nemzetközileg jóváhagyott**, megpróbáltuk megmagyarázni az eredmények során kapott különbségeket ugyanazon mérési pontokban, megfigyelve azokat a lehetséges hibaforrásokat, amelyek közbelephetnek az IFIN-HH változat esetében, mely módszer nemzetközileg még nem hitelesített.

Mielőtt az eredményeket elemeznénk, meg kell említenünk hogy a **maratott nyomdetektoros módszer** jelenleg a leginkább ajánlott a hosszú távú beltéri radon-mérésre, ugyanakkor az egyetlen, amely megengedi a detektorok expozícióját akár 1 évig is anélkül, hogy ezek jelentősen megváltoztatnák fizikai állapotukat és ama képességüket, hogy alfa-részecskéket regisztráljanak. Ráadásul egyszerű, gazdaságos, robusztus és nem szükséges üzemanyag a működéséhez és az információ regisztrálásához.

Összes hasznos tulajdonságával együtt, e módszer alaposítást és sok türelmet, lelkiismeretes munkát igényel, ellenkező esetben ugyanis bármelyik kísérleti szakasz negatív hatással lehet a kapott eredményekre.

Elsősorban, **kizárjuk a nyomdetektorok felcserélésének lehetőségét**, ugyanis minden detektort megjelöltünk egy számmal (karcolással az egyik sarkában).

Másodsorban, ellenőriztük, hogy a beltéri radon-koncentráció mérési eredményei a módszer két változata során jelentősen különböznek vagy sem.

Ezt a tényt határoztuk meg ama bizonyított kritérium alapján, hogy két eredmény jelentősen különbözik, ha különbségük nagyobb mint 3 szokványos eltérés (egymás közötti különbség). Nevezetesen, ha a két érték, k_1 és k_2 egymástól független és véletlenszerű, normál disztribúció esetén különbségük, $k_1 - k_2$ normál disztribúciót jelent a szokásos eltéréssel:

$$\sigma_{(k_1 - k_2)}^2 = \sigma_{k_1}^2 + \sigma_{k_2}^2 \quad (3)$$

A két érték lényegesen különbözik, ha:

$$k_1 - k_2 > 3 \sigma_{(k_1 - k_2)} \quad (4)$$

A beltéri radon-koncentráció mérés 38 pontja esetén, **az eredmények mintegy 74 %-a nem mutat jelentős különbségeket**, tehát ezeket elfogadjuk, az eredmények mintegy **26 %-a jelentős különbségeket mutat**, ahogy azt a 2-es táblázat is mutatja.

Ahogy fentebb említettük, megpróbáljuk megvizsgálni a maratott nyomdetektoros munkamódszer minden szakaszát (IFIN-HH változat), hogy megállapíthassuk azokat az okokat, amelyek jelentős különbségekhez vezettek a mérésben, figyelembe véve, hogy a debreceni változat (ATOMKI) nemzetközileg hitelesített, így tehát alkalmazása helyes.

a) Minden olyan műveletnél, amely a nyomdetektorok és a monitorizáló berendezések előkészítését célozza, a használatuk érdekében kötelező:

- i) **ezek mosása**, gyorsan és hatékonyan

ii) a fertőzés elkerülése végett a csipesz és a kesztyű használata révén, ezek mosása és gyors szárítása valamint gyors becsomagolása (a csomagolás megőrzése addig, amíg a detektorokat a radon-monitorizáló készülékekbe szerelik) a levegőben levő alfa-részecskék és más laboratóriumi radioaktív forrásból származó anyagok regisztrációjának elkerülése érdekében.

Úgy tekintjük, hogy ez a szakasz nem tudta befolyásolni az IFIN-HH által mért eredményeket. E szabályok be nem tartása esetleg 0,5%-nál kisebb bizonytalansági szintet eredményezhet akár egy éves időtartam alatt, 600 Bq/m³-nál nagyobb radon-koncentráció értékek esetén.

b) Figyelembe véve, hogy a kísérletben alkalmazott összes CR-39 típusú nyomdetektor,

i) a háttér-detektorok, ii) a kalibrált detektorok és iii) a mérési detektorok ugyanahhoz a gyártási szériához tartoztak (Page Ltd, Anglia), tehát mind egyformán régiiek voltak (kb. 10 évesek), és azonos körülmények között őriztük őket használatukig, **ezeket a detektorokat – a rendeltetésüknek megfelelő információ-regisztráció után egy időben és ugyanabban a kádban marattuk, majd hasonló feltételek között mostuk meg**, mind a mosások számát tekintve, mind a desztillált vízben való megőrzésüket > 18 órán át.

Úgy véljük, ez a fajta mosási módszer megkönnyíti a nyomok követését, és ezzel együtt az alfa-nyomok tanulmányozását a szokványos optikai mikroszkópiával. Bár a maratott nyomdetektorok felületesebb mosása egy bizonytalansági tényező lehet amiatt, hogy nem választja ki azokat az alfa nyomokat, amelyek nagyon hasonlóak a detektor belsejében található nyomokhoz, (nem az alfa nyomoknak köszönhetően), a nyomdetekciós technika alkalmazásának gyakorlata hosszú távon bebizonyította, hogy az IFIN-HH által használt mosás – kezelés hozzásegít a nyomok helyes kiválasztásához, az említett mosási módszert alkalmazva, ha a nyomok vizsgálatánál más feltételek is teljesülnek.

Úgy véljük, ez a szakasz sem tudta befolyásolni az IFIN-HH által kapott eredményeket. A maratás után a nyomdetektorok néhány felületesebb mosása nyomán az alfa nyomok azonosításánál különbségeket észleltek, ugyanannak a megfigyelőnek az esetében, akár 5%-nál nagyobbakat is.

c) A kísérleti szakaszok ellenőrzése alkalmával (a CR-39 típusú nyomdetektorok expozíciója a radon-monitorizáló készülékben) megállapítottuk, hogy **nem minden készüléket használtak azonos helyzetben az expozíció időtartama alatt**. Helyesen, az IFIN-HH módszere szerint a radon-monitorizáló készülékeket a helyiség egyik falára kell felfüggeszteni (ahol a radon-mérést végzik), azon az övpánton keresztül, amelyet előírnak a szűrő nélküli kupak esetében (2-es ábra). Ily módon elkerüljük a szűrőnek a lerakódott por általi részleges eltömítődését. E hatás hangsúlyt kaphat, mivel az expozíció ez esetben 1 év volt.

Mivel mind az ATOMKI, mind pedig az IFIN-HH készülékeit azonos feltételek között szereltük fel, ugyanannak a hatásnak tettük ki, talán kissé különböztek a készülékbe felszerelt szűrő okán de lényegesen a különbséget nem befolyásolta.

d) **A CR-39 típusú detektorok kalibrálása** a fent említett, jól meghatározott feltételek között történt. A tény alapján, hogy az eredmények kb. 74%-a nem mutat jelentős eltérést, úgy ítéljük, hogy ez a szakasz (a maratott nyomdetektorok kalibrálása) optimális feltételek között történt (a célnak megfelelően) és olyan problémák nélkül, amelyek indokolnák az eredmények közötti jelentős különbséget.

e) **a CR-39 típusú nyomdetektorokban regisztrált alfa-nyomok tanulmányozása** (Page, Anglia) **hagyományos optikai mikroszkóppal**, az említett feltételek mellett. Természetes, és jól ismert tény, hogy létezik egyfajta szubjektív tényező a megfigyelő részéről, ami a nyomok „csúcsait” illeti, mint alfa-nyomokat. E szubjektív tényezőt úgy is tekinthetjük, hogy része (benne foglaltatik) egy arányossági állandónak a nyomsűrűség és az (1) összefüggés többi mennyiségei között.

Tehát, ugyanannak a megfigyelőnek ez a tényező leegyszerűsödik, ha ugyanaz a megfigyelő mind a kalibrált detektor, mind a mérési detektor esetében.

Sajnos elmondhatjuk, hogy a **munka e szakasza** (amely talán a legfontosabb e módszer esetén, hiszen ebben a szakaszban határozzák meg a mérendő értékeket, **az alfa nyomsűrűséget [nyom/cm²]** a kalibrált nyomdetektorokban, illetve a beltéri radon-mérő detektorokban) **hozhatja magával a legnagyobb bizonytalanságot az alfa-nyomok helytelen azonosításával**.

Itt két olyan szempontot veszünk figyelembe, amely a nehéz részecskék (műanyag nyomdetektorok esetén) nyomdetekciója során kapott jelentőséget. Ezek a szempontok:

- az alfa nyomok helyes azonosítása
- a megfigyelő szemének optikai tulajdonságai, amely jellemzi a nyom vizsgálatának minőségét

Mindkét szempont azonos fontossággal bírhat az alfa-nyomok tanulmányozásában, és ezeket összevetve, jelentős eredménybeli eltéréseket mutathat.

Ezek a szempontok nagy hangsúlyt kaptak az alfa sugarak azonosításában a nyom hosszában keletkezett folt átmérőjének kritériumát vévén alapul, amelyet az SSNTDs Laboratóriumban fogalmaztak meg (IFIN-HH), mintegy szükségként (a régi és nagyon régi, CR-39 típusú nyomdetektorokban megnövekedő „paraziták” miatt).

Ez a világító folt nem függ *méretében* egy alfa-nyom átmérőjétől, amely korong formájú és nem jelenik meg a lemezek elöregedése okozta rács-hibák miatt kialakult nyomoknál.

Ezen alfa korong-nyomok megkülönböztetésekor (azoktól a nyomoktól, amelyek korong formája jellemzi az elöregedett/hibás detektorokat) legtöbbször segít a színkülönbség is. A nem alfa jellegűek világosabb színűek, mint az alfa nyomok fekete színe, a fekete sötétbarnává változik.

Egyik nyom sem számít alfa nyomnak, ha átmérője nagyobb mint „a folt átmérője”. A parazita nyomok száma – a detektorok elöregedése és meghibásodása miatt időben nő, még akkor is, ha a detektorok jól be vannak csomagolva és megfelelően őrzik őket. Hasonló a helyzet abban az esetben is, ha a detektorok nagyon hosszú ideig ki vannak téve a beltéri radon-sugárzásnak.

Kijelenthetjük, hogy az általunk tökéletesített kísérleti módszerrel (IFIN-HH változat) ezt a dolgot nagyon jól kihangsúlyozták és be is bizonyították az eredmények összehasonlításával.

A detektorokban fellelhető alfa-nyomok helyes azonosítása a világító folt átmérőjének kritériuma alapján, nagymértékben függ a következő tényezőktől:

- i) *a mikroszkóp optikájának minősége;*
- ii) *a detektorok maratása és mosása;*
- iii) *a tanulmányt végző megfigyelőtől,* amennyiben az illető személynek jó a látása

3.ÖSSZEFOGLALÁS

Ahogy fentebb említettük, *a beltéri radon-koncentráció maratott nyomdetektorokkal való mérése* jelenleg a legjelentősebb és a leginkább alkalmazott módszer a beltéri radon-koncentráció mérésére, ugyanis a szilárd nyomdetektorok tulajdonságaiknak köszönhetően előnyben vannak a más típusú detektorokkal szemben.

Bár e módszer nagyon előnyös, óvatosságot követel a nyomdetektorok kezelése, megőrzése és különösen ezek vizsgálata során a mérendő értékek („*az alfa nyomsűrűség*”) meghatározása céljából, amely arányos a meghatározott értékkel, „*a beltéri radon-koncentrációval*”.

A beltéri radon-koncentráció maratott nyomdetektorokkal való mérésének két változata segített előtérbe helyezni néhány olyan tényezőt, amely befolyásolhatja a beltérradon-koncentráció valós értékeit.

Ez egy integrátor módszer, amely (annak köszönhetően, hogy nagy időtartamokra – akár egy évre is – megengedi a mérést) a beltéri radon-koncentráció mérés esetén egy olyan középértékhez vezetnek, amely (legalább elméletileg) a legközelebb áll az évi átlagos radon-koncentráció értékeihez. Ez az érték segít nekünk abban, hogy *reál értékben* felbecsüljük *milyen mértékben van kitéve a lakosság* a beltéri radon-sugárzásnak, ugyanakkor a *tényleges dózis* felbecsülését segíti, amely egy valódi epidemiológiai vizsgálat tárgya lehet.

Tehát, a beltéri radon-koncentráció meghatározásának módszere így alapvető módszerré válik, viszont e módszert országos méretű alkalmazása előtt még ellenőrizni kell, ugyanakkor hozzá kell igazítani a kontinentális és globális követelményekhez. A kapott eredmények reálisnak bizonyulnak.

Az általunk elvégzett összehasonlítás célja az volt, hogy ellenőrizze az IFIN-HH által kidolgozott beltéri radon-koncentráció mérési módszerét, mielőtt hitelesítenék egy nemzetközi összehasonlítás során.

Az a tény, hogy néhány eredmény nem felel meg a reális értékeknek, csak segít néhány negatív tényező kihangsúlyozásában, amely nagy fontosságú a sugárvédelem terén, ha a kísérlet során kapott eredményeket összevetik az illető területen ajánlott értékekkel ($200 \text{ Bq/m}^3 - 600 \text{ Bq/m}^3$), hogy meghatározzák a tevékenységi szintet.

1. ha az eredmények kisebbek, mint a valós értékek, *akkor a lakosság* (amely beltéri koncentráció-mérés területén lakik, dolgozik és idejének 80%-át eltölti) *expozíciója, alulbecsült, a jelen valószínűségben nagyobb dózisoknak van kitéve, mint a beltérben mért radon-értékek.* Ilymódom alulbecsült expozícióval van dolgunk, ami néha előre nem látható következménnyel járhat, különösen ott, ahol a radon-koncentráció meghaladja a 600 Bq/m^3 értéket.
2. ha az eredmények nagyobbak, mint a valós értékek, *akkor a lakosság expozícióját túlbecsülték.* Abban az esetben, ha az ország törvényhozásában megszabják a *beltéri radon estén a tevékenységi szintet,* ezek a *túlbecslések gazdaságilag megterhelik az országot, az illetékes hatóságok kötelessége lévén, hogy cselekedjenek e koncentrációk csökkentése érdekében, és javításokkal érjék el, hogy ezek az értékek a megszabott intervallumban maradjanak.* Ugyanez ajánlott a 600 Bq/m^3 fölötti koncentráció-értékek esetében is, ebben az esetben azonban főleg költségek is felmerülhetnek, ha a radon-koncentráció szintje a valószínűségben kisebb.

Ez az összehasonlítás (a maratott nyomdetektorokkal végzett beltéri radon-koncentráció mérés kapcsán) felhívta a kísérletet végző figyelmét olyan tényezőkre, amelyek ronthatnak az eredmények hitelességén.

Ahogy a 2-es táblázatban is láthatjuk, a nem megegyező értékek többsége nagyobb, mint a valós érték. A 2-es táblázat 5-ös és 13-as sorszáma esetén, az IFIN-HH értékei 309%-kal illetve 17%-kal különböznek a debreceni ATOMKI Laboratóriumétól. Igaz viszont, hogy ha ezeket a méréseket megismételjük, a levont következtetések közelebb vinnének a valósághoz. Ezek az adatok abba a 26%-ba tartoznak, ahol jelentős különbségeket észleltünk.

Bár ez a megállapítás főleg az alacsony, a 100 Bq/m^3 alatti radon-koncentrációkra vonatkozik, az eredmények közti nagy különbségek nem engedik meg, hogy ne tisztázzuk e szempontot is, amely a régi (több, mint 10 éves) detektorokban levő alfa-részecskék helytelen azonosításából ered. Sokak (akik ezt a kísérleti módszert használták) véleménye szerint az alfa nyomok vizsgálata szilárd nyomdetektorokban optikai mikroszkóp segítségével pontosabb, mint az automata számláló berendezés esetén.

Az említett egyenlőtlenségek okán olyan feltételeket is azonosítottak, amelyek segítségével ezek kiküszöbölhetők.

- egy olyan mikroszkópos nagyítással, amely esetén könnyen azonosítható a kialakult nyom, még akkor is, ha csak egy kisebb felületet vizsgálunk, amely minden esetben reprezentatív a nyomdetektorok expozíciója esetében;
- ugyanaz a megfigyelő egyszerre vizsgálja a *kalibrált detektorokat*, a *mérési detektorokat* és a természetes *háttér-sugárzás detektorokat*. Az alfa nyomok hagyományos optikai mikroszkóppal történő vizsgálata feltételezi, hogy ugyanazt a mikroszkópot használják ugyanazon feltételek között az alfa-nyomok vizsgálatánál
- a megfigyelőnek ne legyenek látási problémái (ne legyen fáradt) és legyen türelme a nyomok azonosításában
- a módszer minden szakaszát helyesen kell elvégezni, a módszer előre meghatározott feltételei szerint;
- a beltéri radon-mérő készülékeket úgy kell elhelyezni, hogy a szűrőre ne rakódjék rá a por, különösen a nagyon hosszú időtartamú expozíciók alatt ≥ 3 hónap. Minden esetben „felakasztva”, rögzített helyzetben kell tartani
- bár a beltéri radon-koncentráció magas értékei esetén az értékek összehasonlítása esetén nincs lényeges különbség (mint amilyen a mofetta), úgy véljük, hogy a kapott eredmények eltérhetnek a valóságostól mindkét esetben, ugyanis a nyomsűrűség nagyon magas, két nagyságrenddel nagyobb, mint a *számlálандó megengedett maximális értéke*, a nyomok egymásra tevődése folytán. Ez komoly gondot jelenthet a nyomok azonosításában és számlálásában, világosan látható következményekkel a nyomsűrűség meghatározásában. Ez esetben ajánlott a radon-koncentráció mérés megismétlése az illető helyen és a detektor expozíciós idejének megváltoztatása egy olyan faktorral, amely esetében a nyomsűrűség ne lépje át a $5 \cdot 10^4$ nyom/cm²-es határt a detektorban

Annak ellenére, hogy a maratott nyomdetektorokkal való beltéri radon-koncentráció mérés nagy óvatosságot, megszorításokat, korrektséget, céltudatosságot igényel, a szerzők úgy vélik, hogy e módszernek biztosítani kell az őt megillető helyet a beltéri radon-mérésben, ezt indokolja a pontossága, az egyszerűsége és a gazdaságossága.

IRODALOM

- [1.] Csige I., Csegzi S., The Radamon radon detector and an example of application, *Radiation Measurements* 34 (2001) 437-440
- [2.] Daniş A., M. Ciubotariu. Metodă de determinare a concentraţiei de activitate a radonului indoor folosind detectori solizi de urme. Raport PN 03-20 05 01, Contract nr.10/2003, IFIN-HH, Bucureşti, 2003.
- [3.] Daniş A., M.Oncescu, M. Ciubotariu. System for calibration of track detectors used in gaseous and solid alfa radionuclides monitoring. *Radiation Measurements* 34, 155- 159, 2001.
- [4.] Daniş A. Omologare sursă ²²⁶Ra - ²²²Rn. Caiet de Sarcini nr.1118/2002 IFIN-HH, Bucureşti, B.I. Nr.1727 din 05.12.2002. .
- [5.] Ciorăscu F., M.Oncescu. *Detectarea și Măsurarea Radiațiilor Nucleare*. Capitolul 10, Fluctuații Statistice, Ed. Academiei Romane, 1964.
- [6.] Ispășoiu Gh. P. *Evaluarea incertitudinii de măsurare și raportarea rezultatului măsurării mărimilor fizice*. Ed. Asociația de Standardizare din Romania (ASRO), 2002.