

Térbeli heterogenitás vizsgálata mikro-CT technikával

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

STUMPFNÉ VÁSÁRHELYI LÍVIA

Témavezetők:

Prof. Dr. Kónya Zoltán

Prof. Dr. Kukovecz Ákos

Környezettudományi Doktori Iskola



Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi és Informatikai Kar

Alkalmazott és Környezeti Kémiai Tanszék

Szeged, 2024

1. Előzmények és célkitűzések

Az anyagtudomány napjainkban széles körben kutatott terület. Ahhoz, hogy az anyagok tulajdonságait és viselkedését megértsük és új, speciális anyagokat és rendszereket hozhassunk létre elengedhetetlen ezek belső mikrostruktúrájának beható ismerete. Az anyagok belsejében található hibák, pórusok, repedések, különböző anyagi minőségű komponensek térbeli helyzetének meghatározása kiemelt jelentőségű, hiszen ezek nagyban befolyásolhatják az anyagok fizikai tulajdonságait.

Az anyagok porozitása az egyik legfontosabb és legtöbbet vizsgált jellemző. Nem csak a pórusok száma, mérete és alakja fontos, hanem a térbeli elhelyezkedésük is. A nagyfelbontású számítógépes tomográfia (mikro-CT) egy 3D röntgen képalkotó eljárás, amely az anyagok különböző mértékű röntgenelnyelésén alapul. Különösen alkalmas pórusos anyagok vizsgálatára és a pórusszerkezet feltérképezésére, de a pórusok térbeli eloszlásának számszerű jellemzése már nem triviális feladat. A térbeli heterogenitás kvantitatív leírására használható jellemző a lakunaritás. A lakunaritás számos területen tölthetne be fontos szerepet az orvostudománytól a földtudományon át az anyagtudományig, a széles körű elterjedése azonban gátolt a klasszikus számítási mód (csúszódobozmódszer) óriási számolási igényéből kifolyólag. Ez különösen jelentős valós 3D mikro-CT adatsorok esetén, hiszen a számítási igény a vizsgált térfogat méretével köbösen skálázódik.

Ennek a problémának a megoldására kutatómunkám során két fő célt tűztem ki: létrehozni egy széles körben, könnyen alkalmazható számolási módot a lakunaritás meghatározására és a lakunaritás fontosságának bemutatását különböző anyagtudományi szempontból releváns rendszereken. Ehhez először bemutatunk egy lakunaritászámítási módszert, bizonyítjuk az alkalmazhatóságát és részletesen elemezzük a számolási módunk pontosságát és számítási idejét a csúszódobozmódszerhez viszonyítva. Bizonyítjuk, hogy az új számolási mód valós 3D mikro-CT adatsorok esetén is megbízhatóan alkalmazható. Ezt követően két anyagtudományi szempontból releváns rendszeren bemutatjuk a lakunaritászámítás jelentőségét.

Különböző porozitású rendszerek összehasonlításához modellrendszerként két, különböző módon előállított (hagyományos és szuperfolyósító adalékanyag hozzáadásával készült) betonmintát használunk és vizsgáljuk a pórusméret hatását a térbeli eloszlásra a minták különböző régióiban. Vizsgáljuk emellett a lakunaritás alkalmazhatóságát szemcsés anyagok keveredésének leírására.

2. Kísérleti rész

A nagyfelbontású számítógépes tomográfias méréseinket egy Bruker Skyscan 2211 típusú mikro-CT berendezéssel hajtottuk végre. A vizsgált minták 3D szerkezetének rekonstrukcióját az NRecon® szoftver (Skyscan, Bruker, Belgium) segítségével végeztük. A rekonstrukció során korrigáltuk a leggyakoribb képalkotási hibákat, leggyakrabban előforduló műtermékeket (gyűrűszerű műtermékek, sugárkeményedés, elmozdulás okozta műtermékek), referenciafelvételek alapján elvégeztük az X-Y irányú korrekciót és maszkoltuk a hibás pixeleket. A rekonstrukció után a térfogat-renderelt 3D mikro-CT felvételeket a CTVox® (Skyscan, Bruker, Belgium) szoftver segítségével állítottuk elő. 4D vagy *in situ* vizsgálatok esetén a különböző állapotokban készült felvételeket elforgattuk majd regisztráltuk (a különböző 3D felvételeket térben egymásra illesztettük) a DataViewer® (Skyscan, Bruker, Belgium) szoftverrel.

A mintákhoz tartozó lakunaritásgörbéket a CTAn® (Skyscan, Bruker, Belgium) szoftver segítségével előállított, szegmentált (bináris) képek alapján számítottuk az általunk fejlesztett szoftver (Lac3D) segítségével. A vizsgálni kívánt érdekes térfogat (VOI) méretének és a számoláshoz használt dobozméret kiválasztása után történt meg a 3D lakunaritásértékek kiszámítása a kiválasztott dobozméret esetén a csúszódoboz- és/vagy a rögzítetrács-módszer alapján. A számításokhoz egy normál teljesítményű (Intel® Core™ i3-2348 M @ 2,3 GHz processzor) és egy nagyteljesítményű számítógépet (Intel® Xeon® E5-2640 v4 @ 2,4 GHz processzor) használtunk.

A különböző porozitású minták összehasonlításához tíz darab, egyenként $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ térfogatú betonkockát állítottunk elő. A hagyományos betonmintákhoz (TC) kompozit-portlandcementet (EN 197-1 CEM II/B-M (V-LL) 32,5 N, DDC Beremend) és $d < 1 \text{ mm}$ szemcseméretű homokot használtunk. A szuperfolyósító adalékanyag hozzáadásával készült minták (SPC) esetén VIP-Rex SF adalékszert (Vip-Rex Kft., Kisújszállás, viprex.hu) alkalmaztunk. Mindkét mintatípusból öt-öt darabot készítettünk, két napig hagytuk őket szilárdulni az öntőformában, majd a kötési idő további 26 napján az egyenletes nedvességtartalom biztosítása érdekében víz alatt tároltuk őket. A mikro-CT vizsgálatokat megelőzően a mintákat szobahőmérsékleten szárítottuk a tömegállandóság eléréséig. A betonkockák törésvizsgálatát Zwick Roell Zmart Pro szakítógép segítségével végeztük 50 N előterhelés, 100 mm/min előterhelési sebesség és 0,5 MPa/s mérési sebesség alkalmazásával. A mintákat Parafilm® M univerzális lezáró fóliába csomagoltuk, ezzel megakadályozva a törés során a minta széthullását és lehetővé téve a mikro-CT vizsgálatokat a széttört mintákon. A

különböző fázisokban (törésteszt előtt és után) készített felvételek elforgatását és a regisztrációját a DataViewer® szoftver segítségével végeztük. A betonminták esetén részletes 3D porozitásanalízist is végeztünk a CTAn® szoftver segítségével. A lakunaritás számításoknál a legnagyobb vizsgált térfogat (VOI) oldalhosszúsága (M) 800 voxel volt, míg a kisebb térfogat esetén $M = 400$ voxel.

A keverési kísérletekhez 3D nyomtatott, politejsavból készült keverőedényeket használtunk. Kb. 500 db kalcium-alginát gyöngyöt ($1,2 \text{ g/cm}^3$ átlagsűrűség és $1,75 \text{ mm}$ átlagos átmérő) kevertünk össze kb. 5000 db polisztirol gömbbel ($1,05 \text{ g/cm}^3$ átlagsűrűség és $1,1 \text{ mm}$ átlagos átmérő). Három különböző méretű keverőedényt használtunk a kísérletek során: egy $20 \times 20 \times 25 \text{ mm}^3$, egy $20 \times 20 \times 35 \text{ mm}^3$ és egy $20 \times 20 \times 40 \text{ mm}^3$ térfogatút. A keverőedény alakja az általunk használt lakunaritás számítási módhoz legmegfelelőbb, négyzet alapú hasáb. A pontos ismétélhetőség érdekében léptetőmotor segítségével forgattuk a keverőedényt a kísérletek során. Egy keverési ciklus az edény egy, adott tengely menti 360° -os körbefordításának felel meg. Tíz keverési ciklust végeztünk el és a kiindulási állapotban, illetve 1, 2, 3, 5, 7 és 10 ciklus után készítettünk mikro-CT felvételeket a rendszerekről. A keverési kísérletek esetén a lakunaritás számításokat a kalcium-alginát gyöngyök pozícióját tartalmazó bináris képek alapján végeztük.

A diszkrét elemes módszerrel (DEM) végzett szimulációkat a LIGGGHT általános szemcsés szimulációs szoftverrel hajtottuk végre. A két érintkező részecske közötti kölcsönhatási erőt a Hertz-modell segítségével számoltuk ki. Ez a séma lehetővé teszi a következő rugalmas és csillapító kölcsönhatási paraméterek becslését: Young modulus (Y_m), az anyag Poisson-tényezője (ν), a restitúciós együttható (e) és a részecskék súrlódási együtthatója (μ). Szimulációinkban a következő értékeket használtuk: $Y_m = 5 \times 10^6 \text{ Pa}$, $\nu = 0,45$, $e = 0,2$, $\mu = 0,5$. $20 \times 20 \times 35 \text{ mm}^3$ és $20 \times 20 \times 40 \text{ mm}^3$ térfogatú, zárt határokkal rendelkező cellákat használtunk, amelyeket gömb alakú részecskékből álló kétkomponensű keverékkel töltöttünk meg. A keverék 5000 darab $1,1 \text{ mm}$ átmérőjű és $1,05 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű és 500 darab $1,75 \text{ mm}$ átmérőjű és $1,2 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű részecskéből állt. A keverési folyamat utánzásához a tartályt forgattuk adott forgástengely és a forgási periódus alkalmazásával.

3. Új tudományos eredmények

T1 Kifejlesztettünk egy, a rögzítetrács-módszerén alapuló algoritmust 3D lakunaritásszámításra és bizonyítottuk, hogy nagyságrendekkel gyorsabban (a számítási idő hetek helyett másodpercekben mérhető) szolgáltat a jelenleg elterjedten használt csúszódobozmódszerrel gyakorlatilag megegyező eredményeket. A csúszódobozmódszer egymással átfedő dobozokat használ a lakunaritásszámítás során, ebből kifolyólag nagy méretű 3D adatsorok esetén óriási a számítási igénye, hiszen a számítási ideje a vizsgált térfogat élhosszúságának hatodik hatványa szerint skálázódik. Ezzel szemben az általunk létrehozott algoritmus egymással át nem fedő dobozokkal dolgozik, töredékére csökkentve ezzel a számoláshoz szükséges erőforrásokat. A két módszerrel számolt lakunaritásértékek egészen kis adathalmazok esetén a lakunaritás statisztikus jellege miatt jelentősen eltérhetnek, nagy méretű adatsorok esetén ($M = 200$ voxel oldalhosszúság felett, ami 8 millió adatpontnak felel meg) azonban gyakorlatilag megegyeznek ($R^2 = 0,999$), így az általunk bemutatott algoritmus nagy biztonsággal használható valós mikro-CT felvételek esetén.

T2 Elsőként követtük nyomon egy kétkomponensű szemcsés zárt rendszer keveredését számítógépes tomográfiával, és alkalmaztuk a lakunaritást az időbeli változás leírására. Vizsgáltuk a tengely menti forgatás hatására bekövetkező keveredést hasonló méretű és alakú, de nagymértékben eltérő röntgenelnyelésű szemcsés anyagok esetén, és az időbeli változást a lakunaritásgörbékkel írtuk le. Meghatároztuk, hogy az adott rendszerben hét forgatási ciklus szükséges a leghomogénebb állapot eléréséhez. Vizsgáltuk a keverődény méretének hatását a keveredésre és azt találtuk, hogy a növekvő edénymérettel gyorsult a homogenizálódás.

T3 Igazoltuk, hogy a lakunaritás a keverés hatékonyságának mérőszámaként használható. A lakunaritásgörbék időbeli változása a keverés során jól jellemzi a keverés hatékonyságát. A keverés ciklusszámának növekedésével a keverék egyre homogénebb állapotba került, és ezt a változást a lakunaritásgörbe meredekségének növekedése és az egyes dobozméreteknél vett lakunaritásértékek számszerű csökkenése folyamatosan követte. A normált lakunaritásgörbék esetén a leghomogénebb állapothoz a 0, a legheterogénebb állapothoz pedig az 1 érték tartozik.

T4 Elsőként alkalmaztuk a lakunaritást kísérleti és diszkrét elemes módszerrel (DEM) modellezett/szimulált eredmények összevetésére. Tekintettel arra, hogy a DEM-módszer minden egyes részecske pályáját megadja, a lakunaritásszámítások a rendszer bármely kívánt

állapotában elvégezhető. Bizonyítottuk, hogy a kísérletes és szimulált adatokhoz tartozó lakunaritásgörbék alakja és lefutása hasonló, azonos trendet követnek, és hogy az eredmények közötti különbségek a valós rendszer tökéletlenségeiből erednek.

T5 Elsőként alkalmaztuk a lakunaritást betonok pórusszerkezetének térbeli eloszlásának kvantitatív jellemzésére. Módszert fejlesztettünk törési kísérletek során szétvált fragmentumok porozitásának egyedi jellemzésére. A póruseloszlás homogenitásának 3D kvantitatív vizsgálatára alkalmaztuk a számítógépes tomográfiát és a lakunaritászámítást. Két különböző porozitású betontípus esetén összehasonlítottuk a pórusok térbeli- és méreteleoszlását. Meghatároztuk, hogy a szuperfolyósító adalékanyag hatására csökkent a porozitás, az átlagos pórusméret és a pórusok térbeli heterogenitása, a pórusok száma viszont nőtt. A nagy méretű ($d > 1$ mm) pórusok mindkét mintatípus esetén heterogénebb eloszlást mutatnak, mint a kis pórusok ($d < 1$ mm). A törésvizsgálatok során a szuperfolyósító adalékanyaggal készült minták szabályosabb törési mintázatot mutattak. Ahhoz, hogy vizsgálni tudjuk a letört és a megmaradó homokóra-alakú részek porozitását a mintákat parafilmmel vontuk be a töréskereszteket megelőzően. A letört részek porozitása mindkét esetben hozzávetőleg 20%-kal nagyobb a megmaradó részhez képest, és a nagy méretű pórusok jellemzően a letört részekben találhatóak vagy a törési felületre esnek.

4. Summary

The main goals of my doctoral research were to develop a method for the fast and accurate calculation of lacunarity as a measure of spatial heterogeneity and to investigate the applicability and usefulness of lacunarity in materials science systems using micro-CT images.

First, I presented the basics of our fixed-grid method and tested it on real 3D micro-CT datasets in terms of accuracy and computational time, compared to the best-known gliding box method. The gliding box method uses overlapping boxes for the lacunarity calculation, hence for large 3D datasets, it is very computationally demanding, as the computational time scales with the sixth power of the side length of the volume of interest. In contrast, our algorithm works with non-overlapping boxes, reducing the required computational resources to a fraction (the computational time decreases from weeks to seconds). The lacunarity values computed by the two methods may differ significantly for very small datasets, due to the statistical nature of lacunarity, but they are practically the same for large datasets, thus the algorithm we present can be used with high confidence for real micro-CT images.

Then we proved the usefulness of lacunarity calculated by the fixed-grid method in systems significant in materials science. We were the first to apply lacunarity to quantitatively characterize the spatial distribution of the pore structure of concrete. We also developed a method to characterize the porosity of fragments separated during fracture experiments.

Additionally, we were the first to monitor the mixing of a closed, two-component granular system using computed tomography and to apply lacunarity to describe the change over time. We have demonstrated that lacunarity can be used as a measure of mixing efficiency. We were the first to use lacunarity to compare experimental and discrete element method (DEM) modeled/simulated results.

5. A doktori értekezés alapját képező közlemények

1. Fast and accurate lacunarity calculation for large 3D micro-CT datasets

D. Sebők, L. Vásárhelyi, I. SzentI, R. Vajtai, Z. Kónya, Á. Kukovecz

Acta Materialia, 2021, (214) 116970

IF: 8,203

2. Lacunarity as a quantitative measure of mixing – a micro-CT analysis-based case study on granular materials

L. Vásárhelyi, D. Sebők, I. SzentI, Á. Tóth, S. Lévy, R. Vajtai, Z. Kónya, Á.

Kukovecz

Oxford Open Materials Science, 2023, 3 (1), itad014

IF: -

3. Quantitative insight into the fracture behavior of concrete based on micro-CT derived three-dimensional pore heterogeneity data

L. Vásárhelyi, D. Sebők, I. SzentI, O. Szép, Z. Kónya, Á. Kukovecz

Composite Structures, 2024, közlésre benyújtva

6. A doktori értekezéshez kapcsolódó konferencia-részvételek

1. Pórusos és többkomponensű anyagok vizsgálata mikro-CT technikával

Vásárhelyi L., Sebők D., SzentI I., Kukovecz Á., Kónya Z.

Magyar Mikroszkópos Társaság (MMT) éves konferenciája, Siófok, 2019. (előadás)

2. Pórusos rendszerek vizsgálata mikro-CT technikával

Sebők D., Vásárhelyi L., SzentI I., Kukovecz Á., Kónya Z.

XII. Országos Anyagtudományi Konferencia (OATK), Balatonkenese, 2019. (előadás)

3. Térbeli heterogenitás jellemzése mikro-CT technikával

Vásárhelyi L., Sebők D., SzentI I., Kukovecz Á., Kónya Z.

Magyar Mikroszkópos Társaság (MMT) éves konferenciája, online, 2021. (előadás)

4. Szemcsés anyagok keveredésének jellemzése mikro-CT technikával és DEM szimulációkkal

Vásárhelyi L., Sebők D., SzentI I., Kukovecz Á., Kónya Z.

Magyar Mikroszkópos Társaság (MMT) éves konferenciája, Siófok, 2022. (előadás)

5. Térbeli heterogenitás vizsgálata mikro-CT technikával

Kukovecz Á., Kónya Z., Sebők D., SzentI I., Vásárhelyi L.

IV. Országos Röntgentomográfias Fórum, Veszprém, 2023. (előadás)

7. Egyéb közlemények

1. Co₄N/nitrogen-doped graphene: a non-noble metal oxygen reduction electrocatalyst for alkaline fuel cells

T. Varga, G. Ballai, L. Vásárhelyi, H. Haspel, Á. Kukovecz, Z. Kónya

Applied Catalysis B: Environmental, 2018, (237) 826-834

IF: 14,229

2. Noble-metal-free iron nitride/nitrogen-doped graphene composite for the oxygen reduction reaction

T. Varga, L. Vásárhelyi, G. Ballai, H. Haspel, A. Oszkó, Á. Kukovecz, Z. Kónya

ACS omega, 2019, 4 (1) 130-139

IF: 2,584

3. Fast optical method for characterizing plasmonic nanoparticle adhesion on functionalized surfaces

L. Mérai, L. Janovák, D.S. Kovács, I. Szent, L. Vásárhelyi, Á. Kukovecz, I. Dékány, Z. Kónya, D. Sebők

Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2020, (412) 3395-3404

IF: 3,286

4. Microcomputed tomography–based characterization of advanced materials: a review

L. Vásárhelyi, Z. Kónya, Á. Kukovecz, R. Vajtai

Materials Today Advances, 2020 (8) 100084

IF: -

5. Binder-Free Construction of a Methanol Tolerant Pt/TiO₂/Carbon Paper Anode by Atomic Layer Deposition

G. Ballai, T. Gyenes, H. Haspel, L. Vásárhelyi, I. Szent, D. Sebők, Z. Kónya, Á. Kukovecz

Catalysts, 2021, 11 (2) 154

IF: 3,45

6. Specific ion effects on aggregation and charging properties of boron nitride nanospheres

T. Hegedűs, D. Takács, L. Vásárhelyi, I. Szilágyi, Z. Kónya

Langmuir, 2021, 37 (7) 2466-2475

IF: 3,557

7. Stability of Boron Nitride Nanosphere Dispersions in the Presence of Polyelectrolytes

L. Vásárhelyi, T. Hegedűs, S. Sáringer, G. Ballai, I. Szilágyi, Z. Kónya

Langmuir, 2021, 37 (17) 5399-5407

IF: 3,557

8. Metastable wetting model of electrospun mats with wrinkled fibers

A. Rawal, S. Shukla, S. Sharma, D. Singh, Y.M. Lin, J. Hao, G.C. Rutledge, **L. Vásárhelyi**, G. Kozma, Á. Kukovecz, L. Janovák

Applied Surface Science, 2021, (551) 149147

IF: 6,182

9. Damage-tolerant 3D-printed ceramics via conformal coating

S.M. Sajadi, **L. Vásárhelyi**, R. Mousavi, A.H. Rahmati, Z. Kónya, Á. Kukovecz, T. Arif, T. Filleter, R. Vajtai, P. Boul, Z. Pang, T. Li, C.S. Tiwary, M.M. Rahman, P.M. Ajayan

Science Advances, 2021, 7 (28) eabc5028

IF: 13,98

10. Three-dimensional printing of complex graphite structures

S.M. Sajadi, S. Enayat, **L. Vásárhelyi**, A. Alabastri, M. Lou, L.M. Sassi, A. Kutana, S. Bhowmick, C. Durante, Á. Kukovecz, A.B. Puthirath, Z. Kónya, R. Vajtai, P. Boul, C.S. Tiwary, M.M. Rahman, P.M. Ajayan

Carbon, 2021, (181) 260-269

IF: 11,307

11. Superhydrophobic self-similar nonwoven-titanate nanostructured materials

S. Sharma, A. Rawal, I.Y. Tóth, **L. Vásárhelyi**, G. Kozma, Á. Kukovecz, S. Jee, F. Ayaydin

Journal of Colloid and Interface Science, 2021, (598) 93-103

IF: 7,489

12. Structural health monitoring of nonwoven materials via self-similar arrays of carbon nanotubes

B. Singh, A. Gupta, D. Singh, S. Shukla, **L. Vásárhelyi**, I. Szenti, Á. Kukovecz, A. Rawal

Composites Communications, 2022, (32) 101155

IF: 7,568

13. Exploration of Li-Ion Batteries during a Long-Term Heat Endurance Test Using 3D Temporal Microcomputed Tomography Investigation

G. Ballai, M.A. Sörös, **L. Vásárhelyi**, I. Szenti, R. Kun, B. Hartmann, D. Sebők, F. Farkas, A. Zahoor, G. Mao, A. Sápi, Á. Kukovecz, Z. Kónya

Energy Technology, 2023, 11 (8) 2300207

IF: 4,149

14. An Exploratory In Vitro Microcomputed Tomographic Investigation of the Efficacy of Semicircular Apicoectomy Performed with Trepine Bur

E. Nagy, B. Vőneki, L. Vásárhelyi, I. Szent, M. Fráter, Á. Kukovecz, M.Á. Antal
Applied Sciences, 2023, 13 (16) 9431
IF: 2,838

15. Nature-inspired self-similar carbon nanotubes-nonwoven nanostructured materials for fog harvesting applications

S. Shukla, S. Sharma, K. Koul, H. Saraswat, L. Vásárhelyi, A. Rawal, Á. Kukovecz
Composites Communications, 2023, (43) 101694
IF: 8

16. Droplet navigation on metastable hydrophobic and superhydrophobic nonwoven materials

S. Sharma, S. Shukla, A. Rawal, S. Jee, F. Ayaydin, L. Vásárhelyi, Á. Kukovecz, V. Kumar, N. Kadi
Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2024, (683) 132993
IF: 5,518

8. Egyéb konferencia-részvételek

1. Vas-nitrid/nitrogénnel adalékolt grafén kompozitok oxigén redukciós aktivitása
Vásárhelyi L., Varga T., Kónya Z.

Országos Felsőoktatási Környezettudományi Diákkonferencia (OFKD), Budapest, 2018. (előadás)

2. Iron-nitride/nitrogen-doped graphene composite: a non-noble metal catalyst for the oxygen reduction reaction

L. Vásárhelyi, T. Varga, G. Ballai, H. Haspel, A. Oszkó, Á. Kukovecz, Z. Kónya
Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience (SIWAN8), Szeged, 2018. (poszter)

3. Electrocatalytic activity of Co₄N/nitrogen-doped graphene composites in the oxygen reduction reaction

G. Ballai, T. Varga, L. Vásárhelyi, H. Haspel, Á. Kukovecz, Z. Kónya
Szeged International Workshop on Advances in Nanoscience (SIWAN8), Szeged, 2018. (poszter)

4. In situ investigation of crack propagation in ceramics by micro-CT technique

L. Vásárhelyi, I. Szent, D. Sebők, Á. Kukovecz, Z. Kónya

Conference for Young Scientists in Ceramics (CYSC-2019), Szerbia/Újvidék 2019.
(előadás)

5. Belső szerkezeti változások in situ vizsgálata mikro-CT technikával

Vásárhelyi L., Sebők D., SzentI. I., Kukovecz Á., Kónya Z.

PhD Hallgatók Anyagtudományi Napja, Veszprém, 2019. (előadás)

6. Bór-nitrid nanorészecskék kolloid stabilizálása polielektrolitokkal

Vásárhelyi L., Hegedűs T., Sáringer Sz., Szilágyi I., Kónya Z.

XLIII. Kémiai Előadói Napok (KEN), online, 2020. (előadás)

7. Mikro-CT technika orvosi, biológiai és anyagtudományi alkalmazásai a Szegedi Tudományegyetemen

Kukovecz Á., Kónya Z., Sebők D., Vásárhelyi L., SzentI. I.

II. Országos Röntgentomográfias Fórum, online, 2021. (előadás)

8. CT és mikro-CT infrastruktúra a Szegedi Tudományegyetemen

Kukovecz Á., Sebők D., SzentI. I., Vásárhelyi L.

III. Országos Röntgentomográfias Fórum, Veszprém, 2022. (előadás)

9. Tudománymetrikai adatok

Összes referált közlemény: 18 ebből az értekezéshez kapcsolódik: 2

Összesített impakt faktor: 105,6 ebből az értekezéshez kapcsolódik: 8,2

Összes független hivatkozás: 249 ebből az értekezéshez kapcsolódik: 9

MTMT azonosító: 10066776

10. Nyilatkozat a jelölt eredményekhez való hozzájárulásáról

Kijelentem, hogy Stumpfne Vásárhelyi Livia doktorjelölt értekezésében felhasznált eredmények teljes mértékben tükrözik a jelölt hozzájárulását a disszertáció alapjául szolgáló publikációkban.

Szeged, 2024. május 16.

.....

Prof. Dr. Kukovecz Ákos