



Doktori Iskola vezetője: Prof. Dr. Mertinger Valéria

Miskolci Egyetem – Anyag- és Vegyészmérnöki Kar

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola

Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézet

Bimodális kompozit fémhab zömí- tés hatására kialakuló szerkezetének jellemezése gépi tanulás segítségével

Doktori értekezés

Készítette:

Bubonyi Tamás, okleveles kohómérnök

Tudományos témavezető:

Gácsi Zoltán

Barkóczy Péter

2024

Miskolc

Tartalomjegyzék

Témavezetői ajánlás	4
Jelölésjegyzék	5
Bevezetés	6
1 Irodalmi áttekintés.....	7
1.1 Fémhabok.....	7
1.2 Kompozit fémhabok jellemzése, a szerkezet viselkedése terhelés hatására	8
1.3 Gépi tanulás alkalmazhatóságának vizsgálata kompozit fémhabok esetén	19
1.4 Módszerek a szerkezet morfológiai leírására.....	23
2 Tudományos nyitott kérdések.....	29
3 Kísérleti tevékenység és alkalmazott módszerek	30
3.1 A próbatestek, és a zömítés bemutatása	30
3.2 Számítógépes tomográfia és metszetsorozatok előkészítésének bemutatása	33
3.3 Gépi tanulás	35
4 Eredmények és következtetések	42
4.1 A szerkezet leírása, osztályozás kidolgozása.....	42
4.1.1 Kvantitatív leírás	42
4.1.2 Osztályozás manuálisan	45
4.1.3 Osztályozás gépi tanulással.....	49
4.2 Osztályozás különböző keverékek esetén.....	55
4.3 Validálás generált szerkezetek segítségével	63
4.3.1 Valós és generált szerkezetek hasonlóságának vizsgálata radiális kovariancia segítségével	65
4.3.2 Deformációs mechanizmusok azonosítása a generált szerkezetek segítségével	70
5 Összefoglalás.....	73
6 Új tudományos eredmények	74
7 Tudományos eredmények hasznosulása	81
Summary.....	82
Köszönetnyilvánítás	83
A témához kapcsolódó publikációk.....	84

Irodalomjegyzék.....	85
Melléklet.....	93

Témavezetői ajánlás

Bubonyi Tamás doktori értekezéséhez

Bubonyi Tamás doktori kutató munkája során bimodális kompozit fémhabokkal foglalkozott. A zömítés hatására kialakuló szövetszerkezetet jellemezte, különös tekintettel a tönkremeneteli folyamatra, s a keletkező repedésekre. A téma jelentőségét egyrészt az adja, hogy kerámia gömböket és alapanyagként alumínium ötvözetet tartalmazó fémhabokat egyre szélesebb körben (járműiparban, építőiparban) alkalmazzák, másrészt a gyártás technológiájuk fejlesztésével, s az életartamuk növelésével kapcsolatban még számos nyitott kérdés vár megválaszolásra.

Bubonyi Tamás tudományos érdeklődését jól jelzi, hogy már hallgató korában foglalkozott összetett anyagok szövetszerkezetének kvantitatív jellemzésével, a képelemzés alkalmazási lehetőségeivel. Szakmai fejlődésének fontos állomása volt, hogy az Országos Tudományos Diákköri Konferencián első és második díjat, valamint ProScientia Aranyérmet nyert.

Bubonyi Tamás több mint nyolc éve végez kutatómunkát az Intézetünkben. Kezdetben hengerelt félkésztermékek felületének vizsgálatát végezte az „Új, piacképes hengerelt alumínium termékek technológiájának fejlesztése” projektben, majd „Kristályos és amorf nanoszerkezetű anyagok kutatásával és fejlesztésével” foglalkozó tudományos műhelyben komplex kiválás-újrakristályosodás sejtautomata szimulációját fejlesztette. Jelenleg a „Funkcionális kompozit fémhabok” OTKA pályázatban (BME) tevékenykedik.

Az általa művelt kutatási terület összetett ismeretet kíván: egyrészt a számítógépes tomográfia eszközeinek működtetésében való készséget, másrészt az eredmények feldolgozására alkalmas módszerek széleskörű ismeretét. Az elmúlt időszakban elvégzett szakmai munkája igazolta az informatikai módszerekben és eszközökben való nagyfokú jártasságát, valamint az új megoldások iránti nyitottságát és egyre nagyobb önállóságát.

Kutatómunkája eredményeiről szakmai konferenciákon tartott színvonalas előadásokat, széleskörű érdeklődését jelezi a sokféle téma: In situ tomográfia, alumínium-ötvények porozitása, sejtautomata szimuláció, kristálytani orientáció, újrakristályosodási textúra.

Összefoglalva: Bubonyi Tamás a bimodális kompozit fémhabok tönkremeneteli folyamatát tudományos alaposággal leírta, a gyártási folyamat jellemzésére is alkalmazható módszert fejlesztett ki és új tudományos eredményekre jutott.

Miskolc, 2024. június 6.

Dr. Gácsi Zoltán

Dr. Barkóczy Péter

Jelölésjegyzék

Rövidítések és jelölések

Rövidítés/jelölés	magyarázat (angol jelentés)	mértékegység
CMF	Kompozit fémhab (Composite Metal Foam)	
CT	Számítógépi Tomográfia (Computed tomography)	
SiC	Szilícium karbid	
G-MSF	Duzzasztott üvegyönggyel töltött szintaktikus fémhab	
P-MSF	Duzzasztott perlittel töltött szintaktikus fémhab	
Zn	Cink	
FEM	Végeselem Szimuláció (Finite element modeling)	
DEM	Diszkrét Elemes Szimuláció (Discrete element modeling)	
μ CT	Mikro Számítógépes Tomográfia (Micro Computed Tomography)	
ML	Gépi tanulás (Machine Learning)	
CNN	Konvolúciós Neurális háló (Convolutional neural network)	
SKIZ	Morfológiai Mozaik (Skeleton by Influence Zone)	
D_L	Nagy gömbhéjak átmérője	[mm]
d_s	Kis gömbhéjak átmérője	[mm]
R^2	Determinációs együttható	
NG	Nagy gömbhéj	
KG	Kis gömbhéj	
KH	Kis hiba	
KöH	Közepes hiba	
NH	Nagy hiba	
FTGH	Félig töltött gömbhéj	
AGH	Alakított gömbhéj	
p	Szignifikancia szint	[%]
ϵ	maradó alakváltozás	[%]
$B^{\bar{}}$	Bináris kép értelmezési tartománya	
$h^{\bar{}}$	Transzlációs vektor	[pixel]
φ	forgási szög	[°]
$H^{\bar{}}$	forgatási tenzor	

Bevezetés

A kompozit fémhabok (CMF-ek) vizsgálata számítógépes tomográfia (CT) segítségével új lehetőségeket nyit meg a kutatók előtt [1]. A röntgensugarak segítségével az anyag belső szerkezetéből kaphatunk információkat, anélkül, hogy bármiféle fizikai roncsolás torzítaná a kialakított habszerkezetet. A vizsgáló technika nagy előnye, hogy nagy felbontású vetületi képek sorozatát készíti el a mintáról, amelyből később számítógépi rekonstrukció segítségével lehet a teljes digitális háromdimenziós szerkezetet előállítani. Első körben a teljes belső szerkezet feltérképezhető a vizsgálat segítségével, így információnk lesz a habot alkotó belső szerkezetről, a pórusok méretéről, alakjáról, illetve a helyéről [2].

Modern képelemző eljárások segítségével további hasznos információkat lehet meghatározni a szerkezetről, amelyben már akár számszerű (kvantitatív) adatokat ismerhetünk meg az erősítő fázis térbeli eloszlásáról, miszerint található-e bármilyen szabályozott rendeződés vagy csoportosulás a szerkezetben. Az így kapott szerkezeti jellemzők kulcsfontosságú információkat hordoznak a további vizsgálati lehetőségek szempontjából, hiszen a csoportosult pórusok mechanikai viselkedése eltérő lehet a szerkezet többi részéhez képest. A CT vizsgálat eredményei gyakran „csak” bemenő paraméterként szolgálnak valamilyen mechanikai viselkedést szimuláló szoftver számára [3]. A kereskedelmi forgalomban elérhető képfeldolgozó, képelemző eljárások azonban sokszor limitált funkcionalitással rendelkeznek, így a minősítésekhez szükséges képi információk kinyerése és feldolgozása új kihívásokat állít fel [4].

A kutatásom célja egy olyan eljárás kidolgozása, amely kihasználja a CT vizsgálatokban rejlő számtalan lehetőséget (térbeli elrendeződés, szerkezet kvantitatív jellemzése). A zömítés hatására bekövetkező tönkremenetel korai szakaszában keresem a kapcsolatot az alakváltozás és a töltőanyag (bimodális méreteloszlású kerámia gömbhéj) térbeli rendeződése között.

1 Irodalmi áttekintés

1.1 Fémhabok

A fémhabok olyan porózus anyagok, amelyek egyedülálló tulajdonságokkal rendelkeznek. Szerkezetüket tekintve az alap valamilyen szilárd fémmátrix, amelyben üregek/pórusok találhatóak. Így a tömbi anyagtól könnyebb, eltérő mechanikai, termikus és akusztikai tulajdonságokkal rendelkeznek. A fémhab gyártása két kihívást tartogat: habosítás és a szerkezet stabilizálása. Erre ma már különféle gyártási technológiákat alkalmaznak, beleértve a porkohászatot, az öntést vagy a gázbefecskendezést [5–7].

Korábbi kutatómunkából már bizonyított, hogy a fémhabok mechanikai tulajdonságai egyedi igényekhez igazíthatók [8]. A porozitás beállításával és a mátrix helyes megválasztásával a habok merevsége, szilárdsága optimalizálható. Meg kell említeni továbbá, hogy a fémhabok figyelemre méltó energiaelnyelő képességgel rendelkeznek. A pórusok jelenléte lehetővé teszi, hogy hatékonyabban nyeljék el és oszlassák el a kritikus energiát, mint a szilárd fémek. Ez a tulajdonság rendkívül kívánatosá teszi őket ütközésvédelmi alkalmazásokban, például az autóiparban.

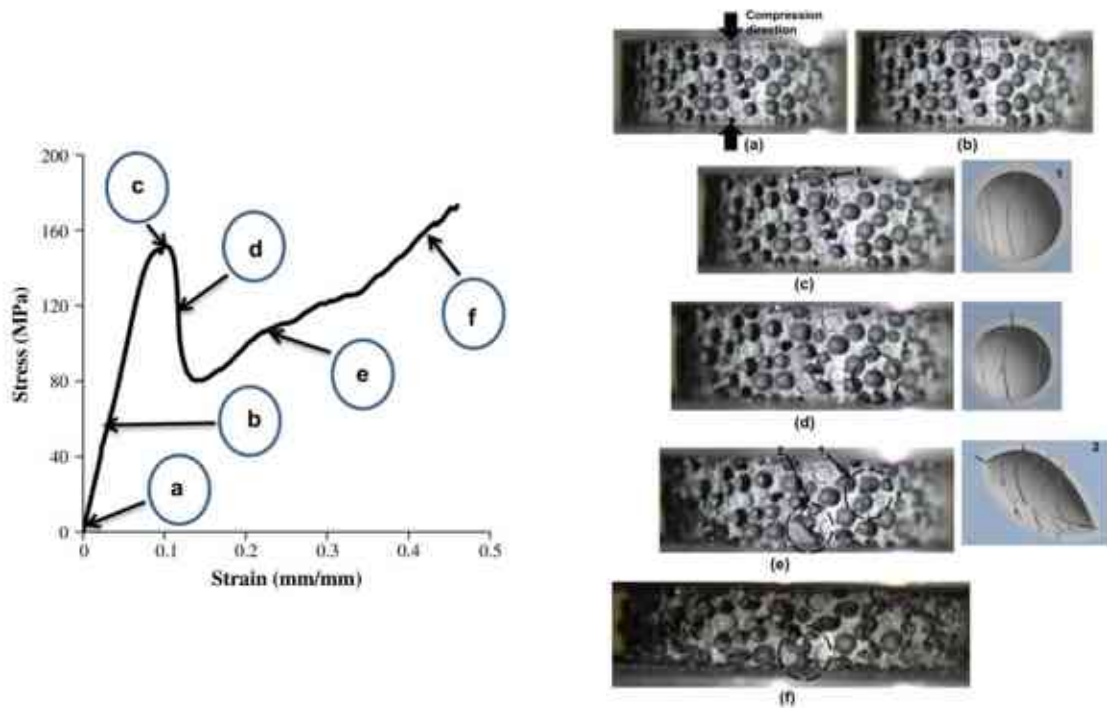
Az elmúlt években jelentős előrelépés történt a fémhabok fejlesztésében. A kutatók és mérnökök továbbra is új gyártási technikákat, például additív gyártást kutatnak [9,10], hogy javítsák termelékenységüket, valamint egyre bonyolultabb, összetett geometriákat hozzanak létre. Ezen túlmenően a folyamatban lévő kutatások a fémhabok szerkezet – tulajdonság kapcsolatának jobb megértésére összpontosítanak, így ma már komplex vevői igényeket is ki tudnak elégíteni. Folyamatos kutatási terület az egyenletes póruseloszlás elérése, a pórusok méretének és alakjának szabályozása, valamint a szerkezeti integritás biztosítása a gyártás során [2,11]. A megoldást egyre többen a kompozitok világában keresik, ezért a habszerkezetet szabályozott paraméterek között előre elkészített második fázis (duzzasztott részecskék [12–15], üreges gömbhéjak [1,16], esetleg különböző részecskék keveréke [11,17]) hozzáadásával próbálnak erősített szerkezeteket létrehozni. Az előnye a technológiának, hogy a második fázis alakja előre definiált (jellemzően gömbszerű), továbbá a morfológiát és a térbeli eloszlást is könnyebben lehet szabályozni.

Összefoglalva, a fémhabok egy olyan új meghatározó anyagcsoport, amelynek porózus szerkezetükből adódó egyedi tulajdonságai vannak. Kis sűrűségük, kivételes energiaelnyelésük, hővezető képességük, hangszigetelésük és hangolható mechanikai tulajdonságaik rendkívül sokoldalúvá teszik számos alkalmazáshoz. A kompozit fémhabok megjelenése új kihívásokkal állítja szembe nemcsak a gyártókat, hanem a felhasználókat is, amelyre a tudomány fejlődése igyekszik válaszolni.

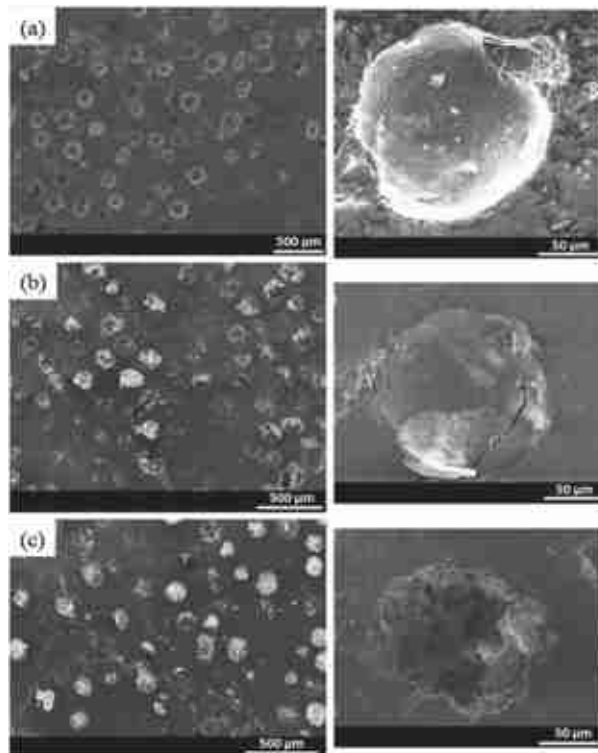
1.2 Kompozit fémhabok jellemzése, a szerkezet viselkedése terhelés hatására

A kompozit fémhabok gyártása mellett egyre nagyobb figyelem fordul azok mechanikai vizsgálatára is, mivel a felhasználás szempontjából kritikus a szerkezet viselkedését ismerni. A tönkremenetel során a terhelés hatására a szívós alumínium mátrix könnyedén képes az alakváltozásra, azonban a rideg töltőanyag már nem. Ezeket a megállapításokat D. D. Luong és munkatársai publikálták 2013-ban [18]. Munkájuk során szilícium-karbid gömbhéjakat használtak töltőanyagként szintaktikus kompozit fémhab létrehozására, majd a tönkremenetel mechanikáját vizsgálták kvázi-statikusan és dinamikus igénybevétel hatására. A kvázi-statikusan terhelés során hat különböző pontot vizsgáltak a szilárdság – alakváltozás diagramon. A felállított modelleket a 1. ábra mutatja be. A tönkremenetel során azok a gömbhéjak, amelyek a gyártás során, vagy korábban megsérültek, már az „a” pontban instabilan viselkednek. A vékonyabb falú gömbhéjak a „b” pontnál törtek el, míg a gömbhéjak lokális csoportosulása a „c” pontnál okozott törést. A gömbhéj falában keletkezett repedés átterjedhet a mátrixba is, ha a töltőanyag és a mátrix között megfelelő a kapcsolat (d). A plató effektus során a kezdeti gömbszerű alak eltorzul (e), majd végül teljesen magába roskad (f).

Sahu és társai [19] cenoszférával (szilícium-oxidból és alumínium-oxidból készített üreges gömbhéj) töltött szintaktikus fémhabot készítettek, melyen kvázi-statikusan zömítéseket végeztek el (2. ábra).



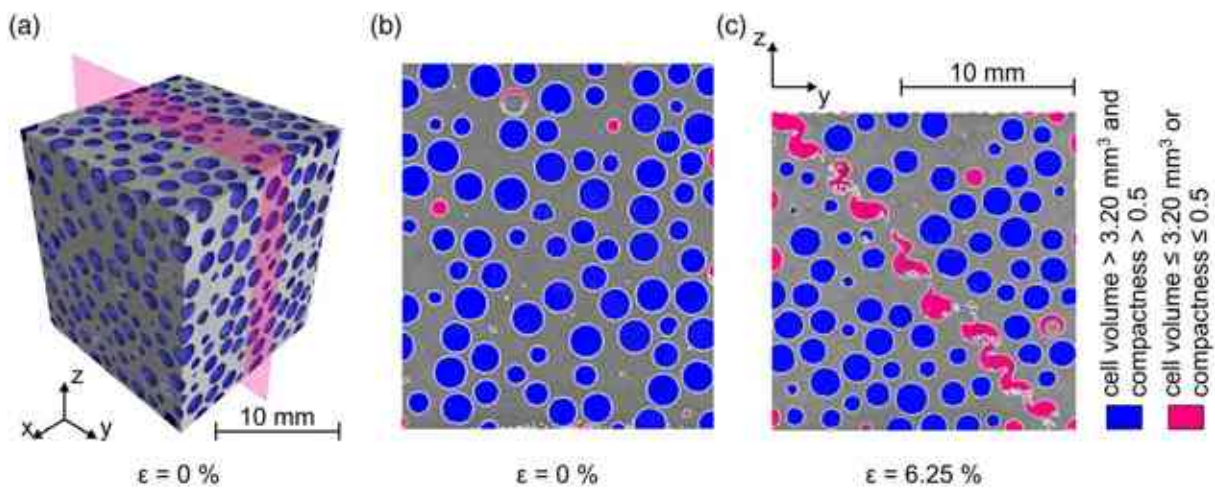
1. ábra. Kvázi-statisz zömítés során vizsgált hat különböző pont vizsgálata A356 mátrixú, SiC gömbhéjakkal erősített szintaktikus fémhabon. Balra: Szilárdság – alakváltozás diagram a jelölt vizsgálati pontokkal. Jobbra: nagy felbontású digitális kamera segítségével készített felvételek (a-f), valamint tönkremenetel alapján felállított modellek (1-2) [18].



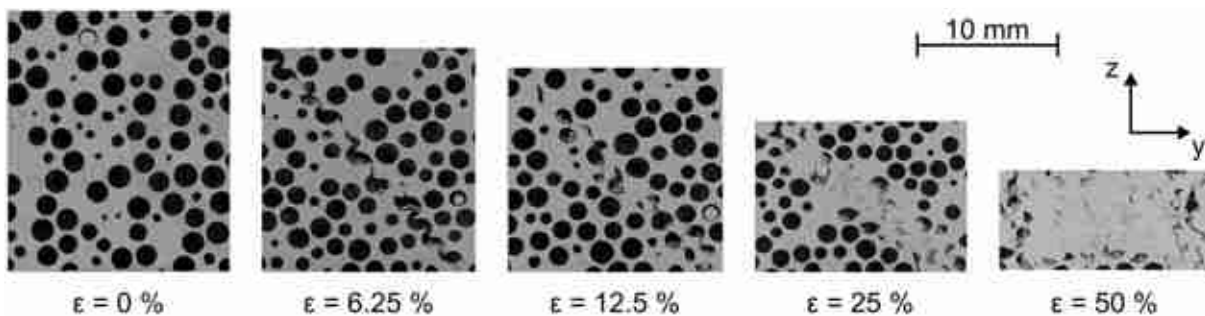
2. ábra Pásztázó elektronmikroszkópos felvételek AA2014 alumínium mátrixszal készült habon a) 2,5%, b) 10%, és c) 15% alakváltozásnál [19].

A zömítés során azt tapasztalták, hogy kisebb alakváltozás során egy $\sim 45^\circ$ -os repedésvonal jelenik meg a mintadarabban. A tönkremenetel során a minta közepében található nagyobb gömbhéjak törnek először a deformáció hatására. Amint ezek a gömbhéjak összeroppannak, a terhelés a közelben található gömbhéjakra helyeződik át. Ez a folyamat addig tart, amíg a minta közepén található gömbhéjak többsége össze nem töredezik. Nagy alakváltozás esetén ez a zóna tovább terjed, a környező érintetlen részecskékre. A gömbhéjak a minta testátlói mentén tördelődnek, továbbá a hátrahagyott üregek új repedésképző helyként szolgálnak a mátrixban. Ezek a repedések a későbbiekben kiterjedt törésvonalakká állnak össze. A vizsgálat azonban nem teljes, nem terjed ki a részecskék morfológiájára, továbbá, bár több különböző átmérőjű frakció van jelen a töltőanyagban, azok közül a legnagyobb is csupán $\sim 300 \mu\text{m}$ átmérővel rendelkezik.

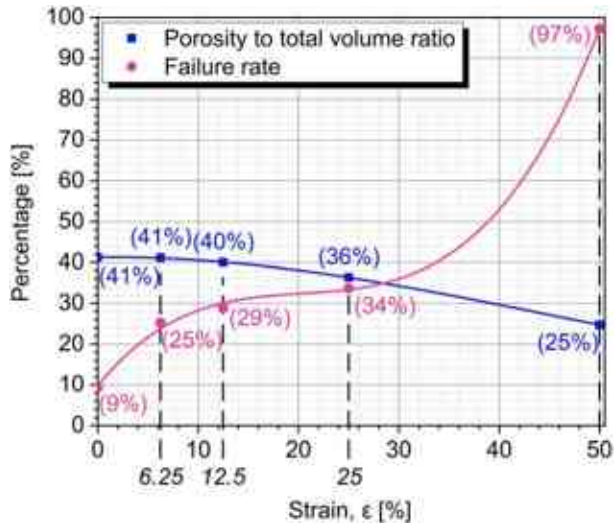
Hasonló tönkremeneteli mechanizmust írt le Leveles a társaival [20], amikor kerámia gömbhéjakkal erősített fémhabokat vizsgáltak ex-situ zömítés során (3 és 4. ábra).



3. ábra a) Rekonstruált CT felvétel a kiinduló szerkezetről, b) metszeti kép a kiinduló szerkezetről, c) metszeti kép 6,25% alakváltozás után [20].



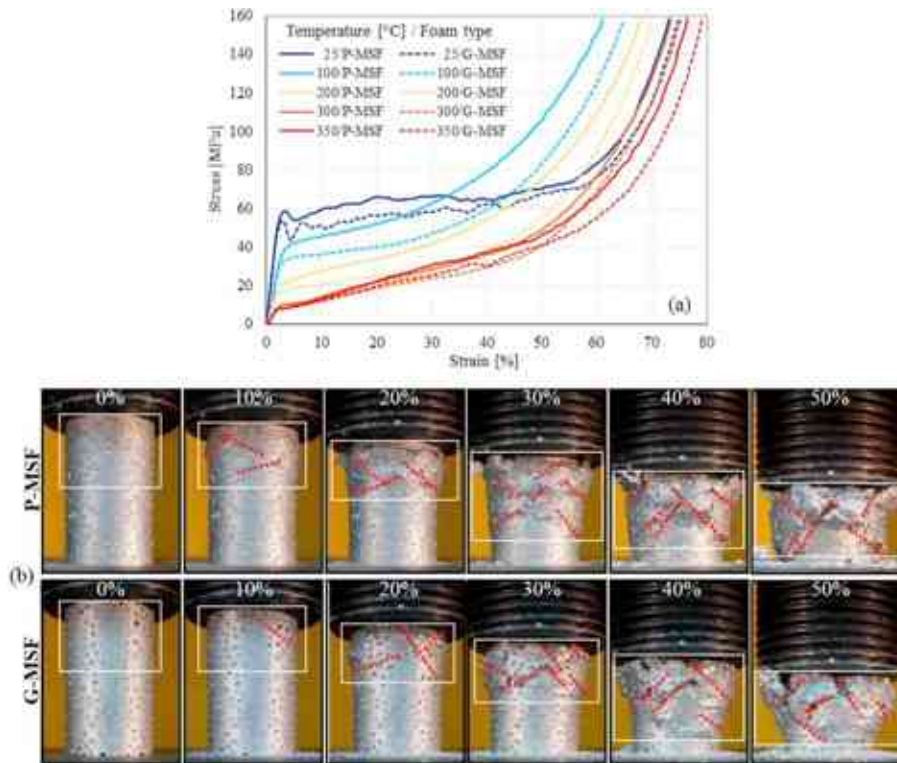
4. ábra A zömítés során készített metszeti felvételek [20].



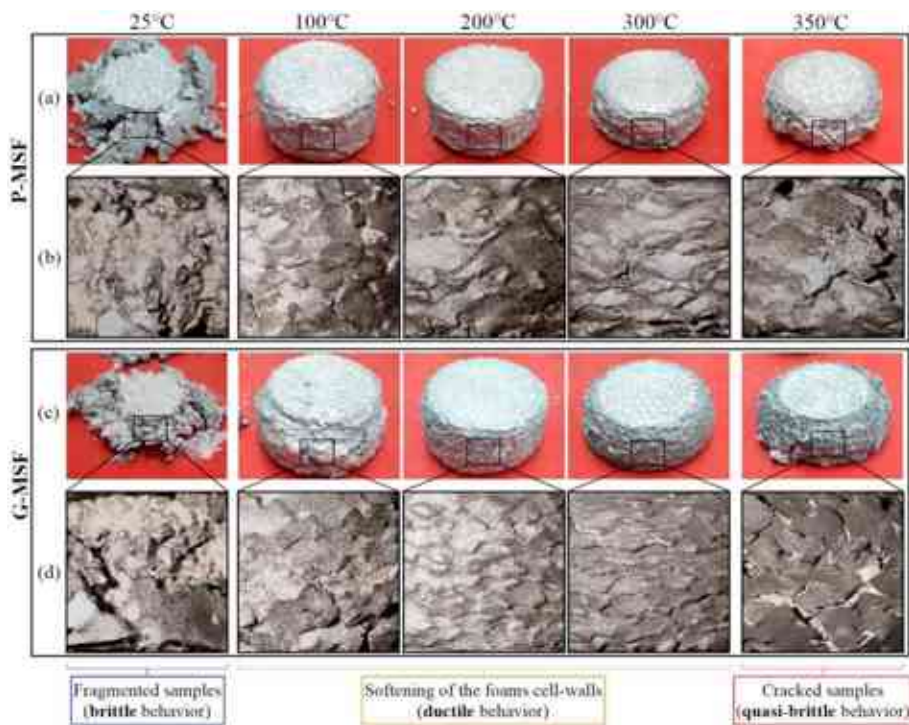
5. ábra Porozitás térfogataránya, és sérült gömbhéjak aránya az alakváltozás függvényében [20].

jelentősen lecsökkent, 25%-ra (5. ábra).

Linul és társai cink mátrixú szintaktikus habokat vizsgáltak különböző hőmérsékleteken zömítve [21]. A kísérlet során a duzzasztott perlit (P-MSF), valamint duzzasztott üveg (G-MSF) volt a töltőanyag, mátrixként pedig ZA27 cink-alumínium ötvözetet használtak. Szobahőmérsékleten végezve a zömítéseket, azt tapasztalták, hogy a lineáris alakváltozás után egy lokális csúcs jelenik meg a zömítő görbén (6. ábra). Ez a csúcs a hőmérséklet növekedésével eltűnt a zömítőgörbéről, valamint a plató értéke is csökkent. A 7. ábrán látható optikai és makroszkópikus felvételek jól mutatják, hogy szobahőmérsékleten mindkét hab ridegen viselkedik, azonban a hőmérséklet növelésével ez a viselkedés megváltozik, a felületen szívós törésre utaló jelleg alakul ki. Azonban 350°C-on a rideg törés ismét visszatér. A magyarázat a különböző törésmechanikákra a mátrixul szolgáló ötvözet szövetszerkezetében keresendő, ugyanis 100 °C-nál megindul a dinamikus újrakristályosodás a zömítés során. 300-350°C- körül az addig szívós α és η fázisok átalakulnak rideg β fázissá, így ez a magyarázat, hogy ismét a rideg törés dominál a tönkremenetel során.

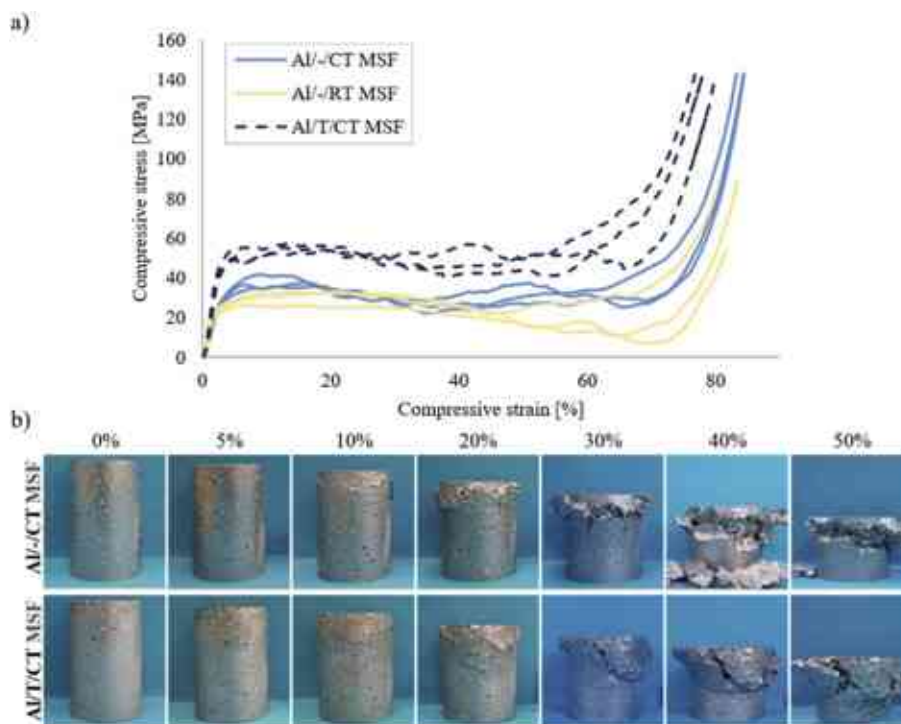


6. ábra a) Duzzasztott perlitet (P-MSF) és duzzasztott üveget (G-MSF) tartalmazó fémhabok zömítése különböző hőmérsékleteken, b) a deformációs sávok alakulása 25°-on [21]



7. ábra Zömített duzzasztott perlitet (P-MSF) és duzzasztott üveget (G-MSF) tartalmazó fémhabok makroszkópikus felvételei (a, c) valamint a 8x-os nagyítású optikai felvételek a mintadarabok felületéről (b, d) [21]

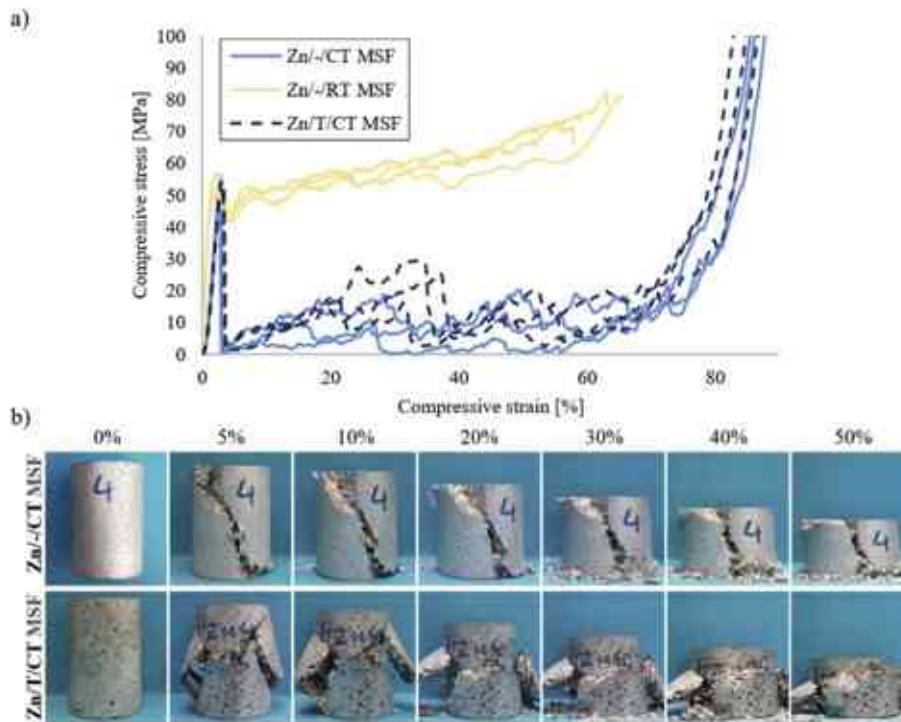
Fiedler ezt a vizsgálatot egészítette ki később kriogén (-196°C) körülmények között [22]. A mátrix anyaga továbbra is ZA27, amelybe duzzasztott üveg került töltőanyagként, valamint A356 összetételű alumínium mátrix-szal is elvégezték a kísérleteket. A vizsgált habok egy részét nemesítették is, hogy a mátrix mechanikai jellemzőit javítsák. Al mátrix esetén oldó hőkezelést végeztek 540°C -on 16 órán át, majd egy edző hatású hűtést követően 160°C -on öregítették 10 órán át, míg a Zn mátrixnál az oldó hőkezelés 365°C hőmérsékleten történt 1 órán át, és az edző hűtés után 140°C -on öregítették 24 órán keresztül. Az alumínium mátrix-szal készített fémhab szilárdsági görbéje a 8 ábrán látható, míg a cink mátrixot tartalmazó fémhab szilárdsági görbét a 9. ábra mutatja be.



8. ábra a) Szilárdág-alakváltozás függvény, b) optikai felvételek az Al mátrixú habszerkezetről a zömítés után (Al: A356 alumínium mátrix, T: hőkezelt minta, CT: kriogén hőmérséklet, RT: szobahőmérséklet) [22].

Jól látható, hogy az alumínium mátrix esetében a kriogén állapotban zömített mintáknál a legnagyobb a hab szilárdsága, valamint a platófeszültség is, azonban az energiaelnyelés hatékonysága nem változott jelentősen a szobahőmérsékletű mintához

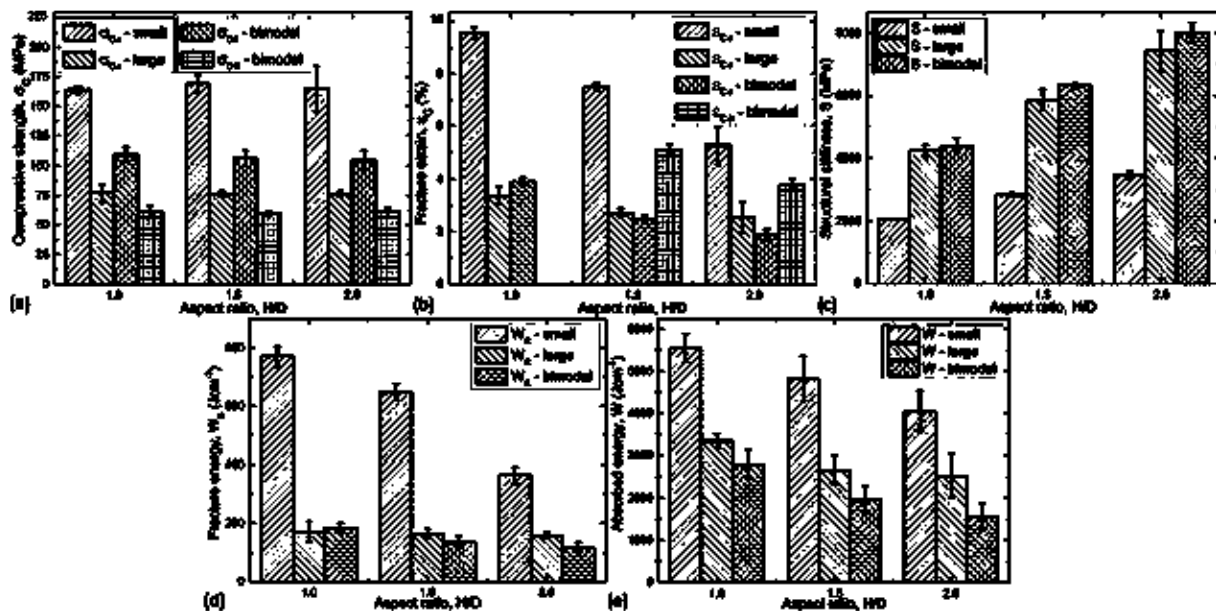
képest. A hőkezelt minta esetében megfigyelhető, hogy 20% alakváltozás környékén deformációs sávok alakulnak ki a mintában, amely nem jelenik meg a hőkezeletlen mintánál. Ezek alapján megállapítható, hogy az alakváltozási folyamatok kriogén körülmények között a mátrixban mennek végbe. Cink mátrix esetén a minta már kis alakváltozás hatására rideg viselkedést mutat, a minta azonnal kettétörik. a hőkezelt darabok esetében megfigyelhető egy másodlagos csúcs is 20 és 40% alakváltozás között, azonban végig rideg viselkedést láthatunk. A szobahőmérsékletű cink haboknál is visszaesik a feszültség az első csúcs után, de a minta egyben marad, és csak deformációs sávok alakulnak ki.



9. ábra a) Szilárdág-alakváltozás függvény, b) optikai felvételek a Zn mátrixú habszerkezetről a zömítés után (Zn: ZA27 cink mátrix, T: hőkezelt minta, CT: kriogén hőmérséklet, RT: szobahőmérséklet) [22].

Az eddig bemutatott tanulmányok alapján jól látható, hogy többféle mátrix/töltőanyaggal, különböző hőmérsékleteken, illetve különböző hőkezelési állapotokkal folyamatosan kutatások a kompozit fémhabokon. Azonban a legtöbb tanulmányban elismerik, hogy a bemutatott zömítőgörbék több párhuzamos mérésből származó átlagolt diagramok, valamint egyes esetekben jelentős eltérés is lehet két azonos gyártási paraméterekkel rendelkező minta között. Orbulov és társai [1] 2019-ben publikálták a

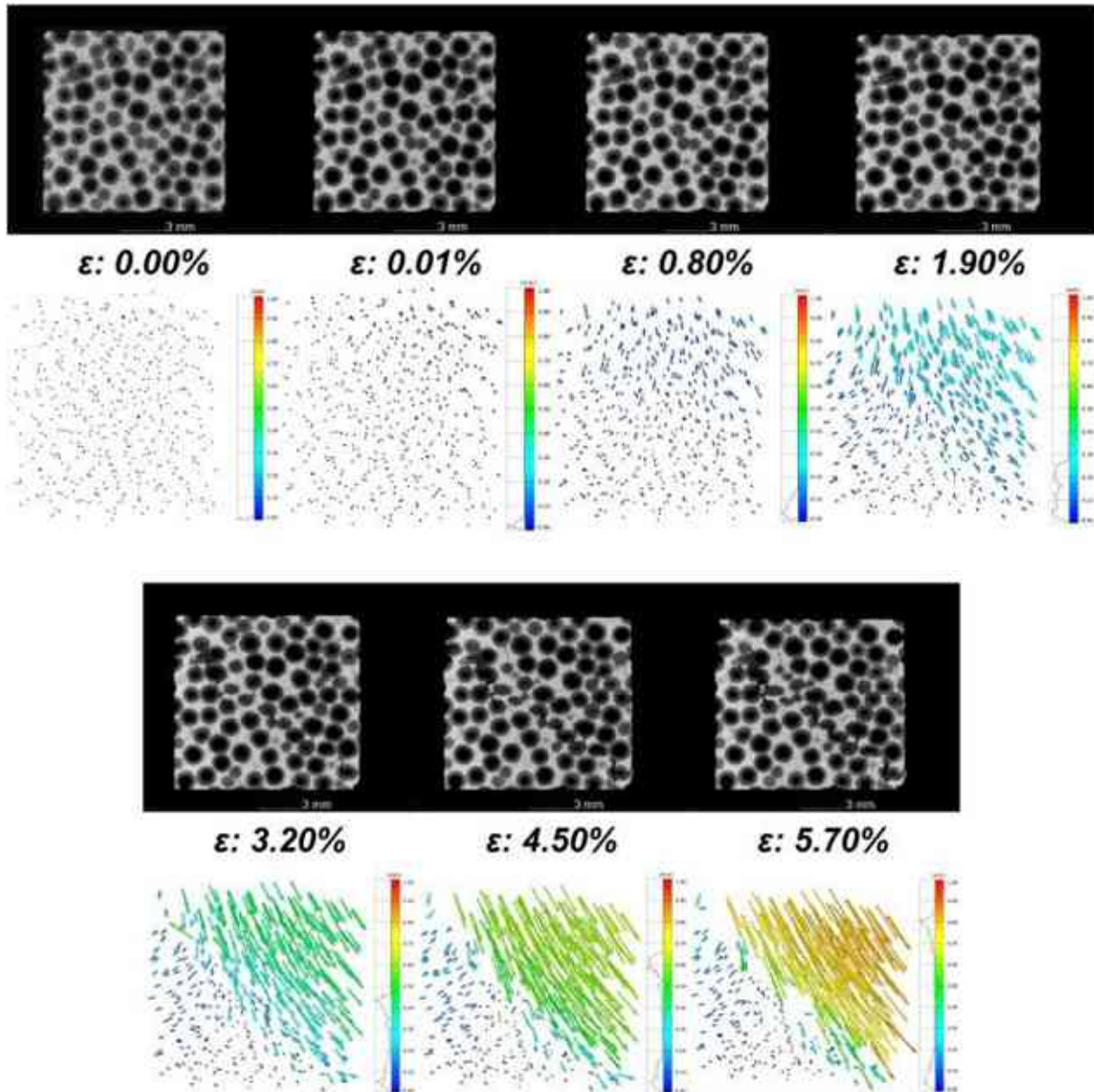
saját megfigyelésüket, amelyben bimodális (kétféle méreteloszlású, de azonos anyagminőségű részecskével töltött) kompozit fémhabokat zömítettek. A kutatás során a vizsgálat célja az azonos körülmények között gyártott, de eltérő geometriával kimunkált próbatestek (változó magasság/átmérő arány) esetén megállapítsák a tulajdonságok szórását. Az eredményekből megfigyelhető (10. ábra), hogy a kis gömbhéjakat tartalmazó 2H/D aránnyal rendelkező minta kifejezetten nagy szórást mutat, továbbá a bemutatott elnyert energia szórása szinte minden esetben jelentős.



10. ábra Fémhátrixú kompozit fémhabok mechanikai jellemzői (a) nyomószilárdság, (b) törési feszültség, (c) szerkezeti merevség, (d) törési energia és (e) elnyelt energia. [1]

A vonatkozó szakirodalmat megvizsgálva megállapítható, hogy a (kompozit) fémhabok vizsgálatának alapját a nyomó igénybevétel képezi. Azonban az elvégzett kiértékelő munka alapossága sokszor változó, és inkább csak leíró jellegű. Az olvasó számára a legtöbb szerző úgy igyekszik bemutatni a szerkezet változását, hogy valamilyen nagy felbontású digitális kamera segítségével a vizsgált mintadarab palástjáról készít felvételeket [11,14,22–24]. Mivel már több tanulmány is bemutatta [19,20], hogy a tönkremenetel a mintadarab belsejében indul meg, így ezen vizsgálatok a tönkremenetel kezdeti szakaszában nem szolgálnak elegendő, megbízható, kvantitatív információval.

A számítógépes tomográfia terjedésével azonban új vizsgálati lehetőségek nyílnak meg. Több tanulmány jelent már meg (1. táblázat), amelyben a fémhabok tönkremenetelének objektív kiértékeléséhez CT eredményeket is felhasználtak. Mivel a vizsgálat elvégzése nem jár a minta roncsolásával, így egy szakaszos zömítés vagy különleges esetben akár in-situ alkalmazással feltérképezhető a szerkezet viselkedése a terhelőerő hatására. Hangai a társaival [25] zárt cellás fémhabokat vizsgált μ CT segítségével. A pórusokat TiH_2 adagolásával hozták létre, ami könnyű és olcsó előállítást tesz lehetővé, azonban a kialakuló szerkezetet nehéz szabályozni. A CT segítségével azonban a zömítés hatására zsugorodó pórusokat végig tudták követni, folyamatosan figyelve a pórusok térfogatarányát. Jirouek és munkatársai [26] egy in-situ egytengelyű zömítőszerszámot terveztek, amellyel folyamatosan, egy kvázi-statisztikus vizsgálat közben tudták követni a szerkezet változásait. Az eredményekből egy végeselem (FE) modellt készítettek, amelyet utána további szimulációs kísérleteknél használtak fel bemenő paraméterként. Kader társaival [3] dinamikus igénybevételnek tette ki a vizsgálandó fémhabot, és így készített μ CT segítségével végeselem modellt. Az eredményeiből egy szerkezeti modellt állított elő, amely alkalmas a hirtelen erő hatására kialakuló repedések terjedésének szimulálására. Kozma és Zsoldos [27] kompozit fémhabok zömítővizsgálatához használta kiegészítésként a számítógépes tomográfiát. Kutatómunkájukban a töltőanyagként használt üreges kerámia gömbhéjak eltolási vektorait határozták meg (11. ábra), hogy a szerkezet térbeli változását alaposabban megismerjék. Leveles, és társai [20] is CT-t használtak a korábban bemutatott kutatómunkájukban, hogy a vizsgálni kívánt pórustérfogatok változását nyomon tudják követni.



11. ábra Pillanatképek a különböző alakváltozási értékeken továbbá az erősítő gömbhékák középpontjainak eltolási vektorai (AlSi12 mátrix, Al_2O_3 kerámia gömbhék). [27]

Összefoglalva, a fémhabok megfelelő alkalmazhatóságához szükséges azok mechanikai tulajdonságainak széleskörű vizsgálata a tervezhetőség szempontjából. A kutatások sok esetben azonban csak egyszerű zömítő vizsgálatot tartalmaznak, a tönkremenetel indikátorául szolgáló repedések pedig a legtöbb esetben rejtve maradnak egészen addig amíg ki nem jutnak a mintadarab felületére. A CT vizsgálatok azonban bemutatják, hogy komoly, kiaknázatlan területek (a tönkremenetel kezdete, viselkedés kis ($\epsilon < 10\%$) maradó alakváltozás esetén) rejlenek még a fémhabok szerkezetvizsgálatában.

Bimodális kompozit fémhab zömítés hatására kialakuló szerkezetének jellemzése
gépi tanulás segítségével | Bubonyi Tamás

1. táblázat Zömített fémhabok CT vizsgálata

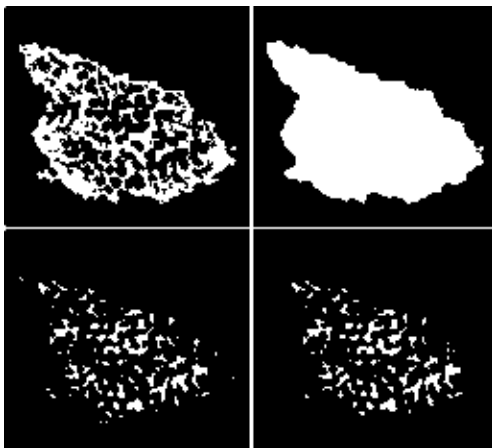
Hivatkozás	Alapanyag	Téma	A terhelés fajtája	CT eredmények használata	További eredmények a CT vizsgálat alapján
Hangai [25]	ADC12 alumínium ötvözet	Különböző TiH ₂ tartalmú fémhabok viselkedése	Kvázi-statikusan zömítés	Pórustérfogatok meghatározása	-
Jiroušek [26]	Alporas zárt cellás alumínium hab	Zárt cellás alumínium hab in-situ zömítő vizsgálata	Kvázi-statikusan zömítés	Végelem modell készítése digitális térfogatkorreláció vizsgálatához	Az elmozdulás meghatározása a tönkrement szerkezeten, a nagy terhelésnek kitett zónák azonosításához
Kader [3]	CYMAT zárt cellás alumínium hab	Közepes és nagy sebességű dinamikus zömítés	Dinamikus zömítés	Végelem modell készítése az ABAQUS/Explicit modulhoz	Kísérleti és szimulált eredmények készítése a szabad felületek sebességének és a deformációs hullámok terjedésének vizsgálatához
Kader [28]	CYMAT zárt cellás alumínium hab	Pórusdeformációs mechanizmusok vizsgálata	Kvázi-statikusan zömítés	Végelem modell készítése az ABAQUS/Explicit modulhoz	Részletes szerkezetanalízis, a makroszkópikus és mikroszkópikus deformációs mechanizmusok megfigyelése
Kozma [27]	Al99,5 + kerámia gömbhéjak	Kerámia erősítésű kompozit fémhab deformációs viselkedése	Kvázi-statikusan zömítés	CAD modell a CT eredmények alapján	A gömbhéjak elmozdulásának vizsgálata a GOM inspect segítségével
Leveles [20]	AlSi12 + kerámia gömbhéjak	Kerámia erősítésű kompozit fémhab deformációs viselkedése	Kvázi-statikusan zömítés	A zömítés során összetöredezett gömbhéjak jellemzése	A pórusok térfogatának változása, valamint a tönkremenetel mértékének számszerű vizsgálata

1.3 Gépi tanulás alkalmazhatóságának vizsgálata kompozit fémhabok esetén

Az előző fejezetben megállapítottam, hogy a CT-s eredmények jelenleg szinte csak akkor kerülnek elő, ha végeelem modell készítésénél bemenő paraméterként használják fel őket, azonban az előállított háromdimenziós képek óriási potenciált rejtegetnek még. Napjainkban a gépi látás, tanulás egy rohamosan fejlődő, sokszor kiaknázatlan terület, amely könnyedén átültethető akár az anyagtudományba is. A gépi tanulás (ML) például könnyen feltárhat nem triviális összefüggéseket is a gyártás, illetve a tönkremenetel oldaláról egyaránt, illetve a segítségével elméletben meghatározható a már korábban említett [3,26,27] gyártási bizonytalanság is. Az irodalom, illetve a tudomány jelenlegi iránya, hogy neurális hálóval (a legismertebb gépi tanuláshoz társított eljárás) próbálja megkeresni a megoldást a legtöbb felmerülő problémára. Ehhez geometriai modelleket kellene készítenem a habokról, majd abból, a különböző gyártási paraméterek, illetve a tönkremenetek függvényében akár lehetne is neurális hálót alkalmazni. A valóság, hogy ez az elméleti modell ilyen formában jelenleg még nem alkalmazható. Az első ok, amit Zhuang [29] mutatott be társaival: jelenleg még kifejezetten erőforrásigényes a háromdimenziós adatok bemenő paraméterként kezelése. A második nehézség pedig a rendelkezésre álló adatok mennyisége. Hart [30] munkatársaival egy átfogó irodalmi összefoglalást készített különböző fémötvözetek gépi tanulással történő vizsgálatáról, amelyben többek között bemutatta azt is, hogy a repedések megjelenését és terjedésének vizsgálatát a szerzők milyen módon közelítették meg. Az ezekre alkalmas technikák közül érdemes kiemelni a neurális hálót [31,32], neurofúziós hálót [33], Bayes hálót [34,35], főkomponens analízis és lineáris regressziót [36] amelyekről már készültek tanulmányok. Ezen módszerek közös tulajdonsága, hogy az általánosan elfogadott szignifikancia szinthez ($p = 95\%$) jelentős mennyiségű (akár 100+) bemenő adatra van szükség. Ez nem fenntartható irány sem a gyártás, sem a vizsgálat szempontjából. Feng [31] is erre a következtetésre jutott, és társaival egy olyan módszert dolgozott ki, amely egy úgynevezett előtanítást tartalmaz, így egy lehetséges megoldást kínál, ha valamilyen okból nem érhető el megfelelő számosságban a tanításhoz szükséges adathalmaz. A módszert korábban még nem validálták fémhabok esetén emiatt az alkalmazhatósága

megkérdőjelezhető. Ennek tisztázása hosszú és átfogó kutatást igényelne, a kétségesége miatt pedig inkább nem a közismert neurális háló irányából közelítettem a gépi tanulást, hanem a szerkezetben található objektumok bemenő paraméterként történő alkalmazhatóságát vizsgáltam meg.

Itt az alak meghatározása jelent kihívást (2. táblázat). A CT-vel együtt azonban a voxelelemző (voxel = térbeli pixel) szoftverek is megjelentek a piacon. Maroof [37] a munkatársaival össze is hasonlította az OnDemand3D-t az ingyenes, és szakirodalomban elfogadottan használt ImageJ-vel. Kutatásuk alapanyaga szemcsés minta volt, és a kör/gömbszerűséget, nyújtottságot, valamint felületi érdességet határozták meg a két szoftverrel. A vizsgálatból megállapították, hogy a 3D eredmények közelebb állnak a valósághoz. Az általános probléma azonban a voxelelemző szoftverekkel, hogy rendkívül drágák, specifikusak, ugyanakkor a tanulásuk, használatuk körülményes, külső segítség (betanítás) nélkül könnyen tévútra juthat az egyszeri felhasználó. A segítségükkel viszont előállíthatók azok a metszeti képek, amelyek már ismert, kipróbált módon feldolgozhatók. Zhou és munkatársai [4] karbonátos homok szemcsék közötti pórusrendszerét kívánták jellemezni. A megközelítésükben elvetették a voxelelemző szoftvereket, és 2D metszeti képeket kezdtek feldolgozni Matlab segítségével. Bináris kivonással elő-



12. ábra Egy tipikus karbonát részecske precíz, szemcsén belüli pórusszerkezetének rekonstrukciója: a) a bináris töltés és zárás előtt készített metszeti μ CT-kép, b) bináris töltés és zárás után kapott metszeti μ CT-kép, c) nyers szemcsén belüli pórusszerkezet és d) korrigált szemcsén belüli pórusszerkezet [4].

állítottak egy összefüggő pórushálózatot (continuous pore size distribution, 12. ábra). Gondoskodtak róla, hogy a modell folyadék szempontjából átjárható legyen. Állításuk szerint a harmadik dimenzió elhagyásának legnagyobb hátránya, hogy az addig összefüggő pórusháló átjárhatóságát elveszítjük, de a teljes pórustérfogat kiadódik a metszetek összeadása után.

Ahogy korábban már megfogalmazta Zhuang [29], a háromdimenziós eljárások sokkal nagyobb számítási kapacitást igényelnek, mintha ugyanannak a szerkezetnek a metszetsorozatát

dolgoznom fel egymás után felolvasva a képeket. A metszetsorozattá bontásnak még egy elvitathatatlan előnye van a háromdimenziós elemzéssel szemben: statisztikailag jelentősen növeli a vizsgált objektumok számát. A háromdimenziós elemzésben csak a szerkezetet felépítő objektumokat tudom vizsgálni, azonban, ha metszetekre bontom őket, akkor egyetlen térbeli objektum akár 20 – 50 metszeti képen is megjelenhet, jelentősen javítva a statisztikai megbízhatóságát a vizsgálatnak. Zhou [4] csak tovább erősítette, hogy a kétdimenziós metszetek vizsgálata járható út, ugyanis a tanulmányukban bemutatott pórusok szinte tökéletesen egyeznek a kompozit fémhabok nem kívánt pórusaival. Ezen ismeretek birtokában a kutatómunkámban a kétdimenziós metszeti képek vizsgálata mellett döntöttem.

Alfrou [38] a felügyelet nélkül tanuló K-means csoportelemzést használt kombinálva az U-net architektúrával, hogy a gömbgrafitban található karbon szegmentálását javítsa. Az U-net architektúrát azért hozták létre, hogy a gépi tanuláshoz szükséges nagymennyiségű bemenő adat hiánya esetén a kevesebb adatból hatékonyan ki tudja szűrni a releváns információkat a kódolás szakaszban, majd a dekódolásnál lokalizálni tudja őket. Stan [39] társaival a már említett konvolúciós neurális hálót (CNN) használta, hogy dendrites szerkezetben a csíranövekedést, illetve a durvulást nyomon kövesse. Trejo Navas [40] azonban egy még egyszerűbb megközelítést választott. Mind az U-net, mind a CNN még kétdimenziós képek esetén is jelentős számítási kapacitást tud felémészteni, így Navas egy egyszerű bináris osztályozó algoritmust vezetett be, amely a vizsgálandó pixelek információtartalmát vizsgálta meg, és így döntötte el, hogy a szegmentált objektumhoz, vagy a háttérhez tartozik. A módszer példáját követve lehetőség nyílik az objektumokat egyszerű alakjellemzők segítségével osztályba sorolni, azonban szükséges a körülöttük található hatásövezetet is figyelembe venni.

Összefoglalva, az anyagtudományban is jelentős a gépi tanulás előretörése, azonban a hangzatos, máshol jól működő módszerek sokszor nem, vagy csak jelentős megkötéssel alkalmazhatók. A szakirodalom állapotából is látszik, hogy folyamatosan fejlődik a terület, ahol egy univerzális, egyszerű paraméterekkel operáló algoritmus akár jelentős népszerűsége is szert tehet a későbbiekben.

2. táblázat Alak meghatározása összetett anyagok esetén

Hivatkozás	Alapanyag	Téma	Képképzés forrása	A vizsgálat módszere	Következtetések
Maroof [37]	Kavics szemcsék	Szemcsés részecskék alakjának meghatározása térben/síkban	CT, Sztereomikroszkóp	OnDemand3D (3D), ImageJ (2D)	A 3D elemzés pontosabb eredményt ad, mint a 2D vizsgálat
Zhou [4]	Karbonátos homok	Összefüggő pórusrendszerek alakjának meghatározása	CT metszeti kép	2D metszeti képek feldolgozása Matlabbal	A harmadik dimenzió elhagyása a pórusok összefüggő hálózatát elveszíti, de a térfogatarányuk továbbra is kiadódik.
Alfrou [38]	Gömbgrafitos öntöttvas	Karbon gömbök szegmentálásának pontosítása.	Metallográfiai csiszolat, fénymikroszkóp	K-means csoportelemzés és U-net architektúra metallográfiai csiszolatokon	-
Stan [39]	Öntött alumínium	Dendrites szerkezet csíranövekedése és durvulásának követése	Metallográfiai csiszolat, fénymikroszkóp	Konvolúciós neurális háló metallográfiai csiszolaton	-
Trejo Navas [40]	EN-GJS-400 Gömbgrafitos öntöttvas	Automata szegmentáló algoritmusok, és „random forest” szegmentálás összehasonlítása	Metallográfiai csiszolat, fénymikroszkóp	Bináris döntőfákból összekapcsolt erdő (random forest)	A random forest döntés megfelelő példákkal történő tanítás után gyorsabb, mint a CNN vagy K-means

1.4 Módszerek a szerkezet morfológiai leírására

A hatásövezetek tanulmányozásához három különböző mozaikkészítő technikát vizsgáltam meg. Hatásövezet, vagy befolyásolási zóna néven azt a területet értem, amely a vizsgálni kívánt objektumhoz legközelebb található, valamilyen előzetes peremfeltétel alapján (későbbiekben mozaikelem). A peremfeltétel fogja megadni két objektum hatásövezete között húzódó határvonal pontos helyét, amit vizuálisan legkönnyebben egy úgynevezett mozaikrajzoló eljárással lehet megjeleníteni a képen.

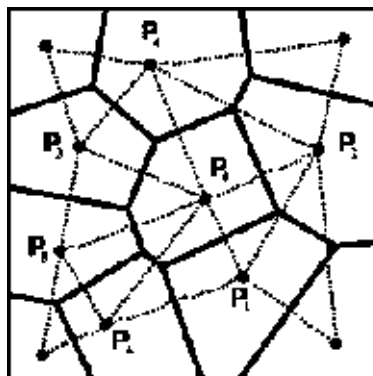
Voronoi mozaik

A mozaikkészítési technikák közül a legegyszerűbbnek a Voronoi mozaikot tekinthetjük. A kiindulási alap egy bináris kép, amelyen úgynevezett generátor pontokat helyezünk el. Ezek a generátor pontok anyagtudományi felhasználás esetén legtöbbször a vizsgálni kívánt objektumok súlypontjai. A generátor pontokat ezek után összekötjük, majd meghatározzuk a szakaszfelező merőlegesseket. A szakaszfelezők metszéspontjai pedig kirajzolják a Voronoi mozaik hálóját [41] (13. ábra). Ezzel az eljárással biztosítjuk, hogy egy mozaik minden pontja közelebb van az adott generátor ponthoz, mint a szomszédos generátor pontokhoz (1). Mivel az objektumot csak egyetlen pontként reprezentáljuk, a módszer nem tudja figyelembe venni a részecskék alakját, méretét. [42].

$$V_i = \{v_i: d(v_i, p_i) < d(v_i, p_{j \neq i})\} \quad (1)$$

Ahol

- V_i Voronoi-mozaik i -edik tartománya
- p_i Voronoi-mozaik i -edik tartományának egyes pontjai
- $d, (pixel)$ távolság az egyes pontok között.



13. ábra Generátor pontok ($P_0 \dots P_6$) és a köréjük rajzolt Voronoi mozaik hálója [41].

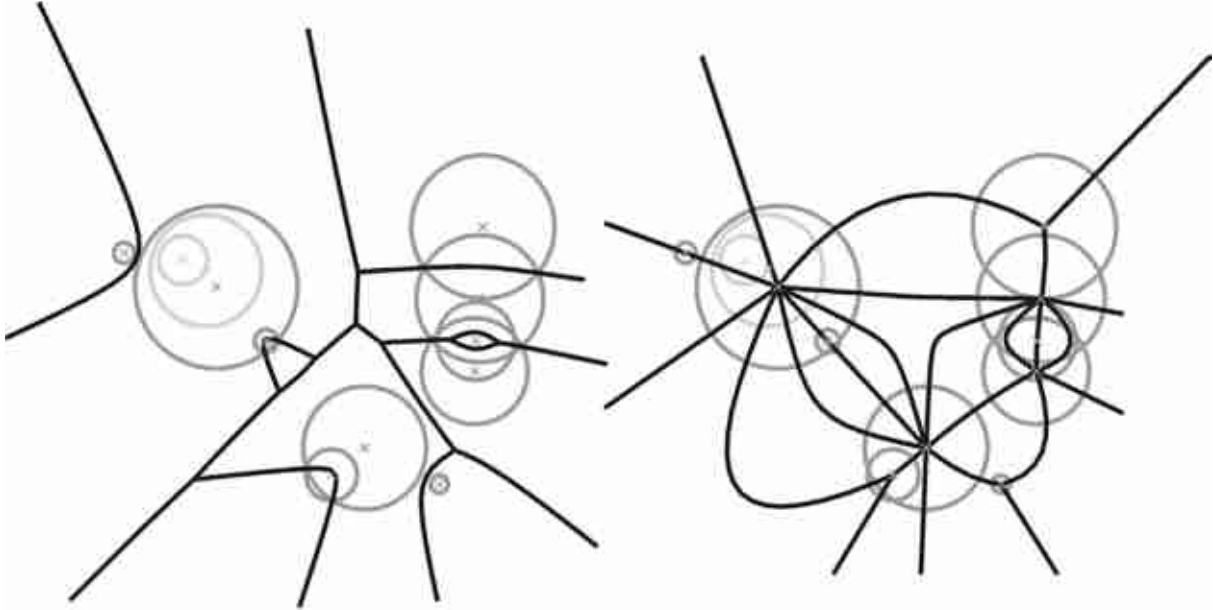
Apollonius ábra (súlyozott Voronoi mozaik)

A szakirodalom is felismerte már a hagyományos Voronoi módszer gyengéjét, és megjelentek olyan tanulmányok, ahol a részecskék méretét egy úgynevezett súlyfaktor segítségével figyelembe lehet venni. Morley [43] 2020-ban mutatott be egy tanulmányt, amelyben gömböket tartalmazó rendszerre készített 2D és 3D mozaikot. A módszer a gömbök átmérője alapján végzi el a súlyozást, azonban megállapította, hogy polidiszperz rendszereknél eltérés található a 2D súlyozott, valamint a súlyozatlan 3D mozaik között. Wang [44] szintén a súlyozott Voronoi mozaikot tanulmányozta. A kutatásában a súlyfaktort a generátor pontok közötti relatív távolságon alapult. A módszert generált szerkezetek előállítására kívánta használni, így a továbbiakban egy meghatározott célfüggvény segítségével iteratív módon a generátor pontok helyzetét változtatta. Kruglova és munkatársai [45] egy másik módszerrel közelítették meg a súlyozást. A bemutatott tanulmányban ők is a relatív távolságot használták súlyfaktornak, azonban a generátor pont mindig a két vizsgált objektum legközelebbi kontúrpontra volt. A szakirodalomban azonban egy újabb módszerre bukkantam Apollonius ábra néven [46]. Maga a módszer visszavezethető a Park-féle súlyozásos módszerhez [47], az elve pedig az ekvivalens körök felhasználásán alapszik. Minden objektumról készül egy ekvivalens kör egy transzformált képen, ahol az eredeti objektumok súlypontjai egybe esnek az ekvivalens körök középpontjával. Az algoritmus ezek után gördülő körök segítségével „végigmegy” a transzformált képen olyan módon, hogy a gördülő kör kontúrja folyamatosan érinti a két vizsgált objektum kontúrját. A hálót az objektumok között elhaladó gördülő kör középpontja által megtett út fogja alkotni (14. ábra) (2). Ha a két vizsgált objektum a transzformált képen azonos méretű körlapként jelenik meg, akkor a közöttük haladó gördülő kör útja egy egyenes, hasonlóan ahhoz, mintha a klasszikus Voronoi módszer segítségével állítanánk elő a diagramot. A módszer előnye a Voronoi mozaikkal szemben, hogy az ekvivalens átmérők kiszámításával az objektumok méretét már ugyan absztrakt módon, de figyelembe tudja venni.

$$A_i = \{a_i: d(a_i, q_i) + w_i < d(a_i, q_{j \neq i})\} \quad (2)$$

ahol

- A_i Apollonius ábra i -edik tartománya
- q_i Apollonius ábra i -edik tartományának egyes pontjai
- d , (pixel) távolság az egyes pontok között.
- w_i súly (az ekvivalens átmérők arányai alapján)



14. ábra Balra: 12-es ponthalmaz Apollonius ábrája. A látható pontok között kirajzolt háló fekete, a rejtett helyek pedig szürkével ábrázoltak. Jobbra: Az Apollonius gráf az előző pontokat felhasználva [48].

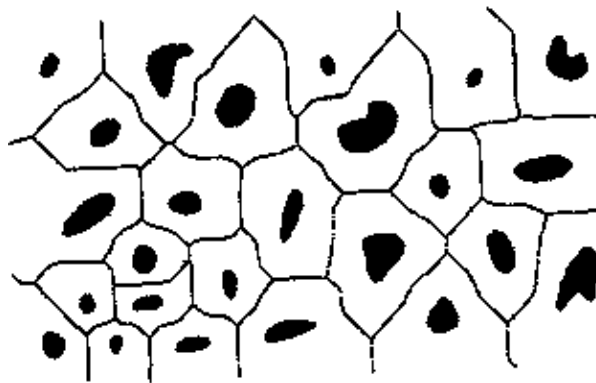
Morfológiai mozaik (SKIZ)

A morfológiai mozaik, vagy más néven hatósugár szerinti vázszerkezet (skeleton by influence zone, rövid.: SKIZ) ellentétben a Voronoi mozaikkal nem a vizsgálni kívánt objektumok súlypontját használja fel generátor pontoknak, hanem az objektumok kontúrjából indul ki [49] (15. ábra). A morfológiai mozaik szintén bináris képen dolgozik, azonban az objektumokat bináris dilatació segítségével kell növelni addig, amíg egy másik növekvő objektummal össze nem ér (3) [50]. Ebben az esetben a kialakult mozaikháló biztosan mindig a vizsgált objektumok kontúrján kívül esik majd. A módszer egyetlen hátránya az erőforrás igényesség. A dilataciót mindig csak pixelről pixelre lehet elvégezni, hogy a háló pontos helye megállapítható legyen, így egy jelentős metszet-sorozatnál (kb. 1400 kép) figyelembe kell venni az időt is, mint tényezőt.

$$M_i = \{m_i: d(m_i, P_i) < d(m_i, P_{j \neq i})\} \quad (3)$$

ahol:

- M_i a vázszerkezet i -edik tartományának elemei
- m_i Morfológiai mozaik i -edik tartományának egyes pontjai
- d , (pixel) a legközelebbi szomszéd kontúrjának távolsága
- $P_{i,j}$ a kontúr egyes elemei.



15. ábra Hatósugár szerinti vázszerkezet (SKIZ) módszerrel készített mozaik [49].

Kovariancia

A kovariancia egy matematikai fogalom, amely megadja két egymástól különböző változó együttmozgását. Mivel a digitális kép is értelmezhető matematikai függvényként, ezért a matematikai halmazműveletek is elvégezhetők a digitális képeken. A kovariancia már régről ismert képelemző módszer [51,52], azonban modern képfeldolgozó algoritmusoknak is (például mélységélesség meghatározása) alapját képezi [53]. Kutatásomban még a 2000-es évek eleji alkalmazását használtam fel a kovariancia vizsgálatának. A kovariancia, mint képelemző módszer, nagyon hatékony eszköz a kompozit anyagok szövetszerkezetének minősítésére. Segítségével feltérképezhető, hogy milyen kapcsolat található a második fázist alkotó részecskék között (méreteloszlás, csoportosulás, periodikusság vagy rendezettség) [50]. Az eredeti összefüggés szerint legyen egy bináris kép halmazának értelmezési tartománya \bar{B} . Ha a vizsgált képpont a háttérhez tartozik, akkor az értéke 0. Ha egy objektum része, akkor a pixel értéke 1 lesz. Ezek után

eltolom a \bar{B} képpont halmazt egy \vec{h} translációs vektorral. Az eredeti halmaz (\bar{B}) és az eltolt halmaz ($\bar{B} + \vec{h}$) szorzatának (metszetének) segítségével előállítható a kovariancia függvény (4) [50].

$$KOV(\bar{B}, \vec{h}) = E\{Mes[(\bar{B}) \cap (\bar{B} + \vec{h})]\} \quad (4)$$

Az egyenletben:

- \bar{B} : A tanulmányozni kívánt szövetelemek bináris képének pixelhalmaza
- \vec{h} : Transzlációs vektor
- Mes: Az 1 értékű képpontok száma
- E: Várható érték.

A módszert tovább is lehet fejleszteni, ami azt jelenti, hogy a vizsgált képet nem eltoljuk az eredeti képen, hanem elforgatjuk az eredeti képen fokról fokra. Ezzel a radiális kovariancia függvény is meghatározhatóvá válik, az egyenletben pedig a translációs vektort kell a forgatási tenzorral kicserélni (5) [50]:

$$KOV(\bar{B} \circ \bar{H}) = \{T[(\bar{B}) \cap (\bar{B} \circ \bar{H})]\} \quad (5)$$

Az összefüggésben:

- \bar{B} a szövetszerkezeti elemek bináris halmaza, pixel
- \bar{H} a forgatás tenzor, a forgatás szögének (φ) függvénye -
- φ az elforgatás szöge, °
- T a két bináris halmaz közös területe, pixel.

Szerkezet generálása

A valós szerkezetet a későbbiekben fontosnak találtam összehasonlítani ideális (generált) szerkezettel is, ahol az esetleges technikai korlátokon felülemelkedve nem jöhet létre a szerkezetben semmilyen nem kívánt pórus/hiba. Ehhez a diszkrét elemes szimulációt (DEM) hívtam segítségül [54]. A DEM egy numerikus szimulációs eljárás, amelyet leginkább kisméretű részecskék kölcsönhatásainak vizsgálatára hoztak létre. A vizsgálandó részecskék általában rideg, szilárd testként viselkednek, a módszer pedig nagy pontossággal számolja az érintkező felületeken (részecske – részecske, részecske – fal) ébredő mechanikai erőket, sőt, a gravitáció hatását szintén figyelembe tudjuk venni ezen eljárás segítségével, így ideális módszer a kerámia gömbhéjakat tartalmazó

bimodális szerkezet modellezésére. Összesen három módszer felelt meg a felállított kritériumainknak. Ezeket a 3. táblázat mutatja be. A három lehetőség közül a választásom a CemfDEM módszerre esett a preferált fejlesztői környezete, illetve a korábbi alkalmazási területe miatt. A modellt a teheráni Amirkabir University of Technology, Center of Engineering and Multiscale Modeling of Fluid flow (CEMF) kutatóintézet fejleszti. A módszer alkalmas mono és polidiszperz keverékek létrehozására is. A generáláshoz egy ejtő síkot kell definiálni, amelyen 30 db-os blokkokban jelennek meg részecskék, amíg az előre beállított részecskeszámot el nem érjük. polidiszperz eloszlás esetén a szoftver a 30-as blokkon belül is megtartja a keverési arányokat. A szimuláció során először egy definiálható kezdeti sebességgel beejtjük a gömböket egy előre definiált tégelybe ($D = 0,15 \text{ m}$, $H = 0,3 \text{ m}$), majd utána következik az iterációs szakasz, amikor a gravitáció segítségével a rendszer egy egyensúlyi állapotba kerül. A módszert több különböző tudományterületen már sikerrel alkalmazták, például részecskék közötti hőátadás szimulálásához [55], részecskék bevonatolásának szimulálására [56], keveredés szimulálására statikus keverőben [57], gáz – szilárd fluidágy szimulálására [58], de sikerrel alkalmazták folyadékkromatográfiás vizsgálatok esetén is [59].

3. táblázat Elvart kritériumok a polidiszperz szerkezet generálására alkalmas diszkrét elemes szimulációkkal szemben. Zöld: preferált. Sárga: elfogadható. Piros: kizáró paraméter.

Elvart kritérium	CemfDEM [57]	Packing Generation Project [60]	Yade [61]
Nyílt forráskódú	igen	igen	igen
Operációs rendszer	multi	multi	linux
Külső tényezők figyelembevétele (gravitáció, tégely mozgás)	igen	nem	igen
Polidiszperz	igen	igen	igen
Alkalmazhatóság valós anyagi folyamatokra	porok keverése extruder csigával	nincs	hókrisztályok 3D szimulálása

2 Tudományos nyitott kérdések

A szakirodalmi áttekintésem alapján megállapítottam, hogy kompozit fémhaboknál sok esetben nem történik meg a szerkezet alapos, feltáró vizsgálata, a szerzők csupán a darab palástját vizsgálva mutatnak rá a szerkezet változásaira. Ahol használnak számítógépi tomográfiát, ott a szerkezet digitális másának az elkészítése a cél, amely utána bemeneti paraméter lesz egy végeelem szimulációnál, azonban a képi anyagok mélyreható elemzése nincs jelen a szakirodalomban.

A fent kifejtett megállapítások és a szakirodalom feldolgozása alapján az alábbi tudományos nyitott kérdéseket fogalmaztam meg:

1. Milyen képelemző eljárás segítségével valósítható meg a bimodális kompozit fémhabok zömített szerkezetének leírása?
2. Hogyan jellemezhető kvantitatív módon a bimodális kompozit fémhabok szerkezetét felépítő objektumok a gyártást, valamint az alakítást követően?
3. Milyen szerkezeti változások történnek bimodális kompozit fémhabokban az alakítás hatására?
4. Mi a kapcsolat a bimodális kompozit fémhab tönkremenetele és a pórus-szerkezete között?
5. Milyen módszerrel lehet minősíteni a bimodális kompozit fémhab pórus-szerkezetében előforduló rendezettséget?

3 Kísérleti tevékenység és alkalmazott módszerek

3.1 A próbatestek, és a zömítés bemutatása

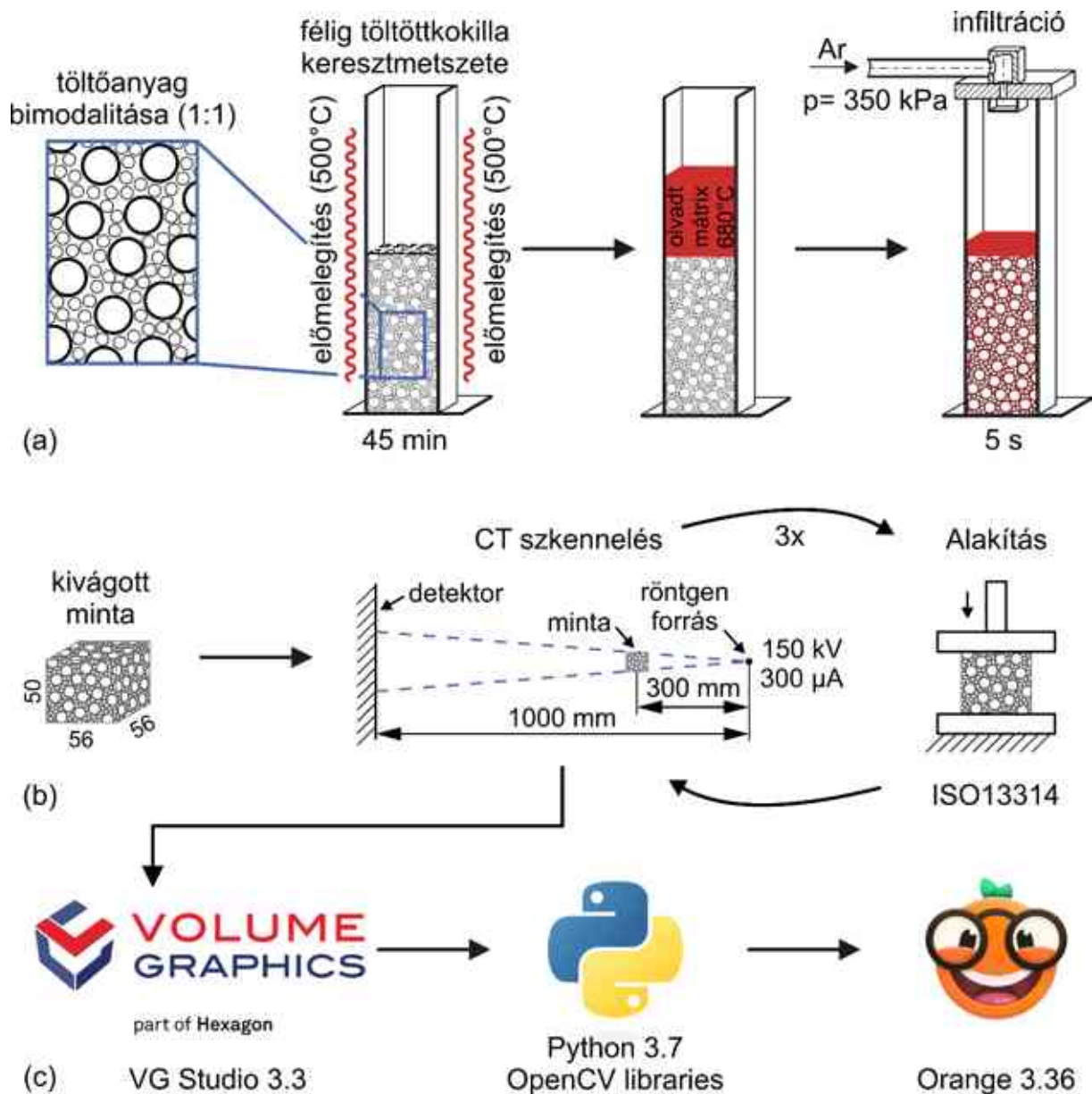
A vizsgált próbatestek a MTA–BME Lendület Kompozit Fémhabok Kutatócsoport (vezető: Orbulov Imre Norbert, jelenleg: MTA–BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport) készítette a számomra, közös tervezés után. A próbatestek gyártási körülményeit és vizsgálatát egy korábbi cikkben írtuk le [2]. A rendelkezésemre álló próbatestek mindegyike AlSi12 anyagminőségű ~0,8% stronciummal módosított, szintaktikus, bimodális (kétféle méreteloszlású töltőanyagal rendelkező) fémhab volt. A próbatestek töltőanyagául alumínium-oxid (Al_2O_3) üreges gömbhéjak szolgáltak. Az egyes próbatestek a töltőanyagok keverési arányaiban tértek el egymástól. Az arányok jelölésénél az első szám mindig a nagy gömbháj mennyiségére utal ($D_L=7$ mm), míg a második szám a kis gömbhéjakat jelenti ($d_s=2,4$ mm). Tehát 4:1 arányú keverék esetén a nagy gömbhéjak térfogataránya négyszer nagyobb, mint a kis gömbhéjak térfogataránya. A gyártás során az elméleti maximális kitöltés volt a cél, így a töltőanyagot a lehető legsűrűbben helyezték el a kokillában, arra figyelve, hogy ne törjenek el a gömbhéjak, majd pedig argon gáz segítségével, infiltrációs technikával állították elő a fémhabot. A próbatestekről készített felvételek a zömítés előtti és utáni állapotról a 16. ábrán láthatók, a teljes folyamatot pedig a gyártástól a feldolgozásig a 17. ábra mutatja be.



16. ábra Zömítés előtti(balra) és utáni (jobbra) felvételek a 4:1 keverékű fémhabról.

A zömítővizsgálatokat egy 56x56x50 mm dimenziójú próbatesteken hajtottam végre, ami egy nagyobb mintából (~120 mm) került kimunkálásra B0D25 gyémánt

vágótárcsa segítségével, egy Struers Discotom-10 gépen, $0,1 \text{ mm} \times \text{s}^{-1}$ előtolási sebességgel, 2850-es percnkénti fordulatszámom. A vizsgálatokat minden esetben a kokilla aljához közelebb eső 50 mm magas mintadarabon végeztem el.



17. ábra Sematikus ábra a gyártásról (a), fizikai tesztelésről (b), majd a képi információk kiemzéséről (c) Bubonyi és m. társai „Microstructural characterization of...” című cikk [62] 1. ábrája nyomán

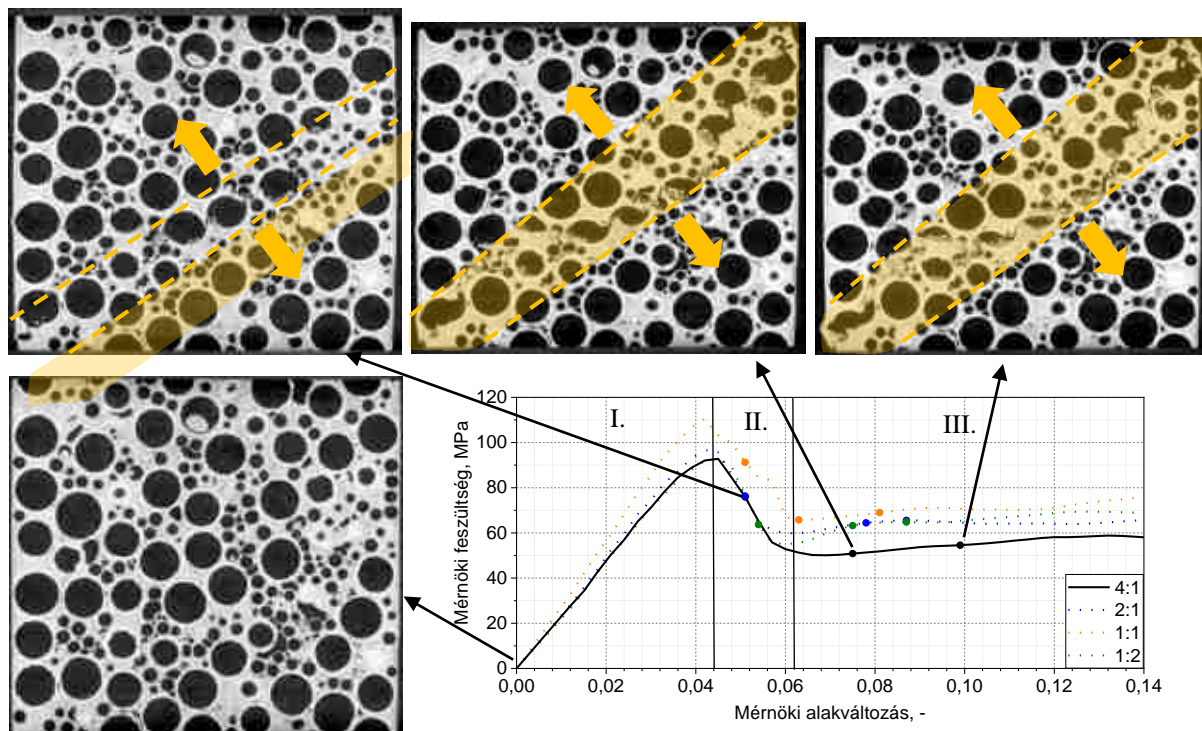
A póbatestekről először CT felvételeket készítettem, majd az intézetünk műhelycsarnokában található 400 kN-os hidraulikus prés segítségével nyomtam össze 3 lépésben. A zömítés során elért maradó alakváltozásokat, a 4. táblázat tartalmazza. Az egyes lépések között, valamint a 3. nyomás után az összetört próbatestekről ismét CT

felvételeket készítettem, amik a későbbiekben képelemzés és gépi tanulás segítségével dolgoztam fel.

4. táblázat A zömítés során elért maradó alakváltozás százalékos formában

	Kezd	1	2	3
4:1	0%	2,5%	5,4%	7,9%
2:1	0%	2,4%	4,9%	6,0%
1:1	0%	2,0%	4,1%	5,8%
1:2	0%	2,4%	4,7%	6,0%

Korábbi kutatási eredményekből [2] ismertem, hogy ezen típusú kompozit fémhabok mechanikai tulajdonságai egy-egy keverési arányon belül is jelentős szórást mutatnak. Emiatt a bizonytalanság miatt csak becsülni tudtam a megszakítások tartományait. Az első megszakítást a feszültségcsúcs utáni tranzien zónában ejtettem meg (ahogy a feszültség az első feszültségcsúcs után csökkenni kezd), a következő két megszakítást pedig az induló plató szakasz elején eszközöltem (18. ábra, ahogy a tranzien zóna végén a feszültség ismét növekedésnek indul).



18. ábra Mérnöki feszültség – alakváltozás diagramok a különböző keverékek esetén. A példaként szolgáló 4:1 keverék folytonos vonallal jelölve. I. zóna: rugalmas tartomány. II zóna: tranzien szakasz. III zóna: feszültségplató. A zömítés előrehaladásával a sárgával jelölt alakítási sáv szélesedésnek indul. Bubonyi és m. társai „Microstructural characterization of...” című cikk [62] 2. ábrája nyomán

3.2 Számítógépes tomográfia és metszetsorozatok előkészítésének bemutatása

A metszetsorozatok elkészítéséhez egy YXLON FF35 típusú μ CT berendezést használtam. A vizsgálat során 4140 vetületi kép készült egy teljes 360° -os körbeforgatás alatt, míg a volfrám katódot használó röntgenső 150 kV-os gyorsítófeszültségen, 300 μ A fűtőárammal üzemelt. A beérkező röntgensugarakat egy 4 megapixeles Varian 2530HE síkdetektor fogadta 2 Hz-es mintavételezéssel. A sugárkeményedés csökkentéséhez egy 0,5 mm vastag réz lemezt használtam szűrőként. A kapott vetületi képeket a berendezés saját rekonstrukciós szoftverével fűztem össze háromdimenziós képpé (YXLON Reconstruction Workspace 1.4.4.0). A már említett metszetsorozatokat a Volume Graphics Studio MAX 3.3-as szoftver segítségével állítottam elő. Az egyes szeletek közötti távolság 41,7 μ m, ami megfelel a voxelméretnek is. A további képi feldolgozást, elemzést a Python 3.7-es verziójában végeztem el, az OpenCV könyvtárat felhasználva.

A megfelelő feldolgozáshoz szükséges volt a habot elválasztani a háttértől. Mivel a vizsgálni kívánt objektumok (kerámia gömbhéjak) levegővel vannak töltve, ezért a szürkeségi szintjük megegyezik a habot körülvevő levegő szürkeségi szintjével. Így nem tudtam egyszerűen a szürkeségi szintek alapján meghatározni egy küszöbértéket, úgyhogy más megoldást kerestem. A szegmentálás elvégzéséhez először egy téglalap segítségével körbe vágtam a habot, így már el tudtam végezni a szürke szint szerinti elválasztást. Mivel a téglalap mindenképp bele fog vágni a habszerkezetbe, ezért a lehető legnagyobb területet kívántam meghatározni, ami még biztonságosan vizsgálható. A vizsgálatához először előállítottam a bináris képet az Otsu-módszert [63] használva. Ez a módszer a két kétkomponensű (sötét háttéren világos objektumok, vagy fordítva) hisztogramon keresi azt a küszöbértéket, amely minimalizálja az osztályon belüli varianciát. Utána megkerestem minden metszeti képen a habszerkezet középső pontját, majd onnan vízszintes és függőleges irányban is megvizsgáltam az átmeneteket (világos területből sötét). A mérőkeret meghatározásához így a rövidebb távolságokat vettem alapul mindkét irányban. Ezt követően kétszeres bináris zárást alkalmaztam, amivel a digitális zajt igyekeztem csökkenteni. Az előkészítést követően megtörtént az egyes objektumok címkézése, ami két azonosítót tartalmazott. Az első jelöli, hogy a képsorozat hányadik

tagján található az objektum, a második pedig bal fentről indulva megadja, hogy adott metszeti képen hányadik objektumot vizsgálom. A vizsgálni kívánt objektumok paramétereit ezen azonosítók segítségével inentől már könnyen adatbázisba rendezhettem.

A leggyakrabban vizsgált alakjellemzők a körszerűség (R, 6) valamint az átmérő (D, 8), [4,37,38,40]. Ezt kiegészítve, a nyújtottságot (E, 9) továbbá a szerkezetben található hibás/félig kitöltött gömbhéjak miatt a kitöltöttségi tényezőt is figyelembe vetttem, ami nem más, mint a legkisebb köré írható téglalap kitöltöttsége (F, 10). További kiegészítésként beemeltem még a morfológiai mozaikot (a mozaik területéből számolt ekvivalens átmérőt) is a meghatározandó objektumparaméterek sorába (M, 3) [49,50].

$$R = \sqrt{4\pi \frac{A}{P^2}}, - \quad (6)$$

$$D_{eq.} = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}}, pixel \quad (7)$$

$$D = \max(d_i), d_i = \sqrt{(x_{c,u} - x_{c,v})^2 + (y_{c,u} - y_{c,v})^2}, pixel \quad (8)$$

$$E = \frac{H}{W}, - \quad (9)$$

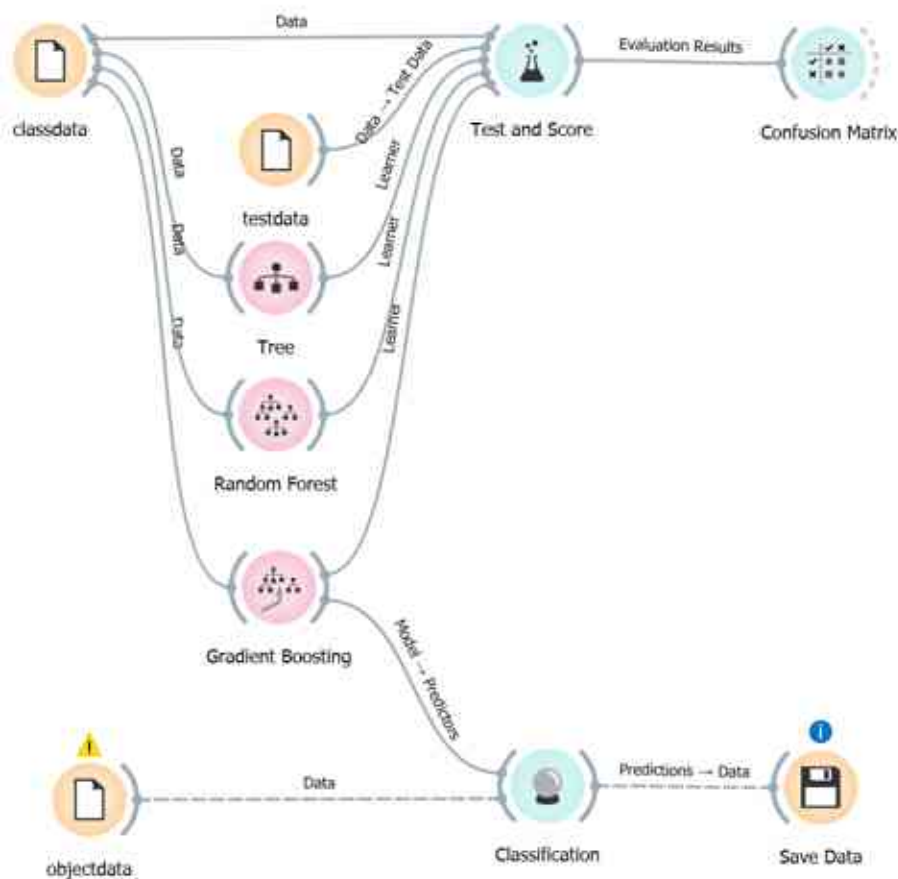
$$F = \frac{A}{WH}, - \quad (10)$$

Ahol

- A , (pixel²) a vizsgált objektum területe
- D , (pixel) az adott objektum átmérője
- $D_{eq.}$, (pixel) az adott objektum ekvivalens körátmérője
- P , (pixel) ugyanazon objektum kerülete
- W , (pixel) a legkisebb köré írható téglalap szélessége
- H , (pixel) a legkisebb köré írható téglalap magassága.
- $(x, y)_{c,u}, (x, y)_{c,v}$: Az objektum kontúrjának különböző kontúrpointjai ($u \neq v$).

3.3 Gépi tanulás

Az osztályozás elvégzéséhez felügyelt gépi tanulást alkalmaztam. A gépi tanuló algoritmusokat tradicionálisan két nagy osztályra lehet bontani: felügyelt és felügyelet nélküli tanulás [64]. A fő különbség a két módszer között az egyedi osztályok megadásának módja. A felügyelet nélküli tanuló algoritmusnál csak annyit szükséges megadni, hogy hány osztály található az adathalmazon belül, a tanulás történhet a teljes adathalmazon. Jellemzően csoportok meghatározásához használt algoritmusok tartoznak a felügyelet nélküli tanulás alá (pl. K-Means). Ezzel szemben a felügyelt tanuló algoritmusoknak szükségük van egy úgynevezett tanuló adathalmazra, amit olyan módon kell összeállítani, hogy utána önállóan megtörténhessen az osztályozás az ismeretlen, vizsgálni kívánt adatsoron (pl. a tanuló adatsorban minden egyes objektumról megmondom, hogy melyik osztályba tartozik). Ilyen felügyelt tanuló algoritmus például a felkapott neurális háló (Neural Network), vagy a bináris osztályozók is (Tree Classifier, Random Forest). Az osztályozáshoz az Orange 3.36 [65] szoftvert választottam (19. ábra), amely szinte minden, ma ismert és alkalmazott jelentősebb gépi tanuló algoritmust tartalmaz, továbbá könnyedén implementálható az alkalmazott python környezetbe.



19. ábra A későbbiekben bemutatott és alkalmazott osztályozás elvi felépítése. A classdata tartalmazza a tanuláshoz készített objektumokat osztállyal együtt (1649 db), az objectdata pedig a szerkezet összes objektumát. Az osztályozás a gradient boosting operátor segítségével történik, majd az előállított modellt a classification használja fel az objektumadatbázis (objectdata) osztályozásához.

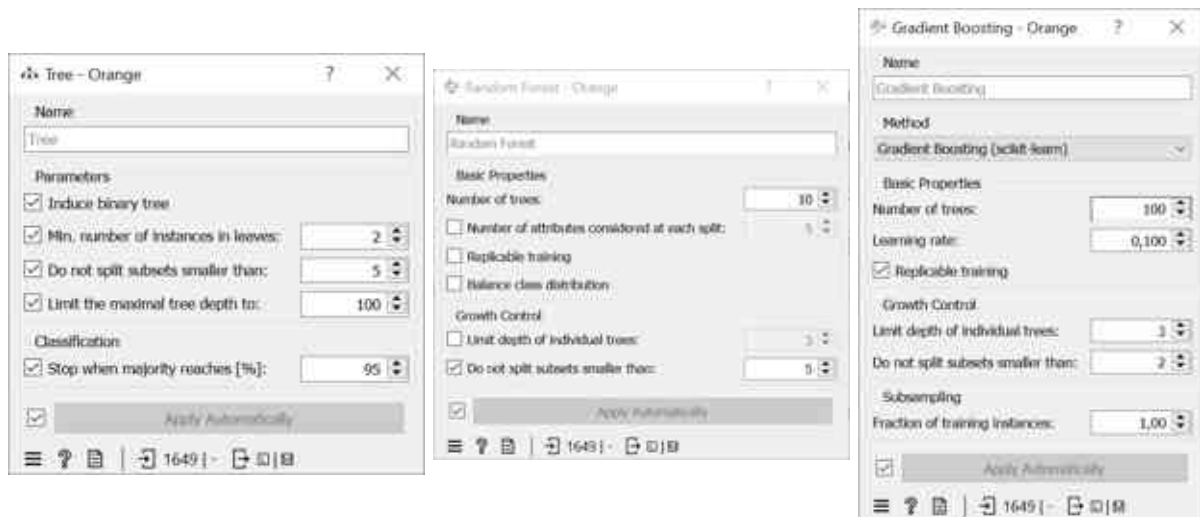
A gépi tanulás bevezetése előtt vizuális jellemzők alapján már meghatároztam, hogy hét különböző osztályt keresek a szerkezetben. Ez a felügyelt tanuló módszerek felé billentette a kutatás irányát. A választásom a bináris osztályozó eljárásokra esett, mivel a kézzel elvégzett első osztályozásoknál már sikerrel meghatároztam néhány osztályhatárt, ami az ezen osztályozókra jellemző igaz/hamis feltételrendszeren alapult. A módszerek hatékonysága továbbá, hogy a merev határokkal szemben (kézi osztályhatárok) ismétlődően alkalmasak egy-egy paramétert felülvizsgálni.

Három módszert hasonlítottam össze; döntőfa, random forest (véletlenszerű erdő), valamint gradient boosted random forest (döntési előzményen alapuló véletlenszerű erdő). A bináris döntőfa egy Y elágazások sokaságából felépített fára hasonlító kapcsolatrendszer, amely egy gyökértől (root) indul, és egy-egy ág mentén végig haladva rekonstruálható, hogy milyen feltételek teljesülésével jutott az adott eredményre.

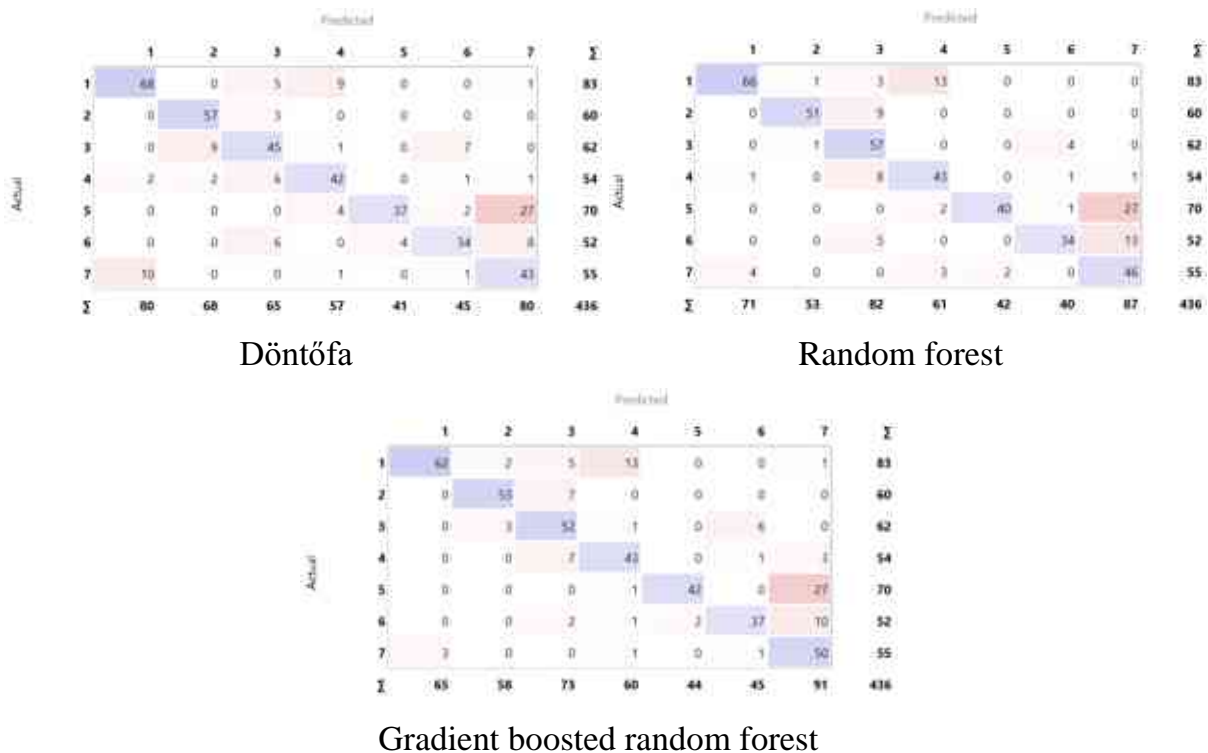
A módszer nagy veszélye, hogy specifikus adatokkal könnyen túl lehet tanítani, így a tanuló adatsoron szinte tökéletes osztályozás érhető el a döntőfával, azonban egy korábban nem látott valós adatsoron lehet, hogy lényegesen rosszabbul teljesít, mint az elvárt. A random forest egy döntőfákból létrehozott „erdő”, amely a túltanulás veszélyét képes csökkenteni azáltal, hogy több döntőfát hoz létre, amelyek egymástól függetlenül, párhuzamosan osztályoznak úgy, hogy a tanuló adatsort véletlenszerűen felosztják. A módszer hátránya, hogy számítási kapacitásban sokkal nagyobb igénye van, mint a hagyományos döntőfának, és aszimmetrikus adathalmazon könnyen lehet, hogy a többség javára fog dönteni [66]. A gradient boosted random forest (máshol gradient boosted tree) a hagyományos random forest eljárást hivatott tovább pontosítani azáltal, hogy nem független döntőfákból építi fel az erdőt, hanem szekvenciálisan, az előző fák döntéseit pontosítja minden egyes lépésben [66]. A módszer nagy előnye a random foresttel szemben, hogy aszimmetrikus adathalmazon is jól teljesít. A két legfontosabb paramétere a learning rate valamint az erdőt alkotó fák száma. A learning rate határozza meg, hogy mennyire tanuljon agresszíven az adott döntőfa. Minél kisebb ez az érték, annál nehezebben tanul (weak learner), azonban így elkerülhető a túltanulás veszélye. A fák számának növelésével lehet a kis learning rate-et ellensúlyozni, azonban a túl sok fa szintén a túltanulást kockáztatja. Ennek elkerülése érdekében a program által felkínált alapbeállításokat használtam.

Első lépésben a tanuláshoz szükséges adatbázist állítottam elő. Ehhez saját szoftvert alkalmaztam szintén, ami egy SQLite alapokra épülő Python program volt. Célja, hogy a leképezéshez összerendezi az adatbázisból a kiválasztott objektumhoz tartozó alakjellemzőket. A tanításhoz használt adatbázist a 4:1 arányú keverék felhasználásával készítettem el, a kiinduló, valamint a három alakított szerkezetből. A szerkezetekből minden kb. 100. metszetet (100., 200., 300., ...) vizsgáltam, továbbá ezeken a képeken véletlenszerűen választottam ki objektumokat (osztályonként 3-4 db, ha rendelkezésre állt), amelyeknek a vizuális megjelenésük alapján megadtam a hozzájuk társítandó osztályt. A tanításnál törekedtem, hogy minden osztály megfelelő mértékben, reprezentatív módon jelen legyen. Az előállított adathalmaz végül 1649 egyedi objektum osztályozásából állt elő. A teszteléshez használt adatsor ezzel szemben teljesen véletlenszerű adatokat tartalmaz, szintén mind a négy különböző állapot megtalálható benne, azonban a képek

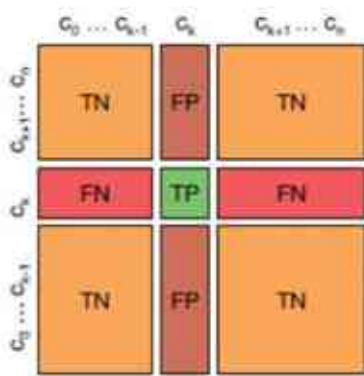
kiválasztásánál teljesen véletlenszerűen jártam el, egyedül csak arra törekedtem, hogy az egy-egy metszeti képen osztályonként 3-4 db objektumot tartalmazzon, amennyiben azok rendelkezésre állnak. Az osztályonkénti teszttel az adatbázis végül 436 objektum adatait tartalmazza. A tanításnál minden esetben a szoftverben felkínált alapbeállításokat használtam (20. ábra), majd a tesztadatbázis segítségével elkészítettem a confusion mátrixot (21. ábra).



20. ábra A tanítás során használt három algoritmus (döntőfa - balra, random forest - középen és gradient boosted random forest - jobbra) paramétereit. Mindhárom esetben a szoftver által felkínált alap beállításokat használtam.



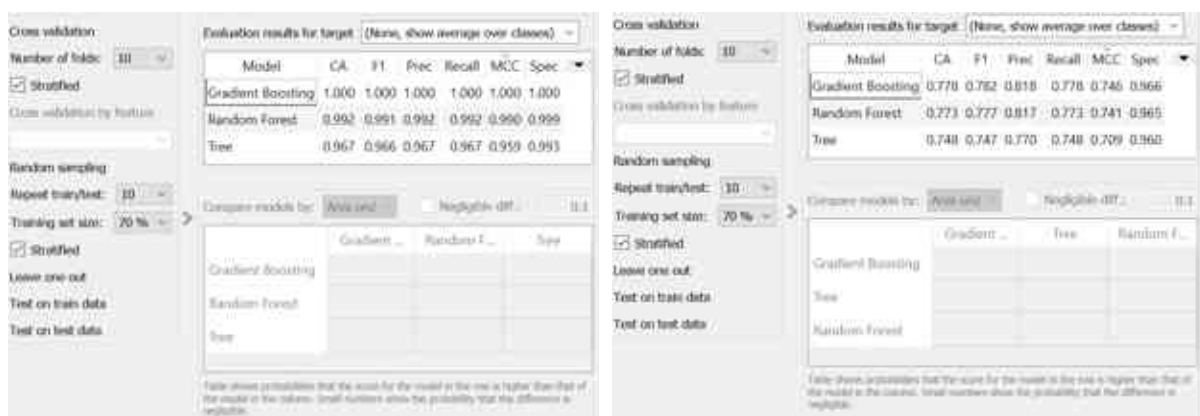
21. ábra Confusion mátrixok a három vizsgált algoritmus (döntőfa, random forest és gradient boosted random forest) esetén. A cellákban az előfordult esetek láthatók darabszámban.



22. ábra Confusion mátrix értelmezése kettőnél több osztály esetén [66]

A mátrixot négy elem építi fel (22. ábra); valós pozitív, valós negatív, fals pozitív és fals negatív. A valós pozitív jelenti a találatot, amikor az osztályozó által prediktált osztály megegyezik a tényleges osztállyal. A valós negatív jelenti a megfelelő elutasítást, amikor a vizsgált osztály szempontjából eltérő osztályba sorolja az algoritmus, és a valóságban is másik osztályban található a vizsgált objektum. A fals pozitív az I-es típusú hiba vagy túlbecsülés, amikor a vizsgált osztály szempontjából pozitívnak (osztályba tartozónak) prediktálja az algoritmus, a valóságban azonban másik osztályba tartozik. A fals negatív pedig a II-es típusú hiba, vagy alulbecsülés, amikor a valóságban a vizsgált osztályba tartozik az objektum, azonban az algoritmus más osztályba sorolná azt.

A confusion mátrixok után pedig minősítettem az osztályozó algoritmusokat, szintén a szoftverben megtalálható mérőszámok segítségével. A vizsgálatot először a tanuló adatsoron végeztem el, ahol a Gradient Boosted Random Forest tökéletes eredményt ért el mind a hat mérőszám szerint. A teszt adatsoron megismételve már jól látható, hogy az ismeretlen adatsoron nem tökéletes az osztályozás, de továbbra is a Gradient Boosted Random Forest szolgáltatja a legjobb eredményeket, így a gépi tanuláshoz a továbbiakban ezt az algoritmust használom fel.



23. ábra A három vizsgált osztályozó algoritmus (döntőfa, random forest és gradient boosted random forest) teljesítménye a tanuló és teszt adatbázisokon történt osztályozás után. A Gradient Boosted Random Forest tökéletes eredményt ért el a tanuló adatbázison, de ez az algoritmus szerepelt a legjobban a véletlenszerűen összeállított teszt adatbázison is.

A minősítés mérőszámaihoz használt egyenleteket a (11) - (16) egyenletek mutatják be, az értelmezésüket a 5. táblázat tartalmazza:

$$CA: \frac{\text{Valós pozitív} + \text{Valós negatív}}{\text{Valós pozitív} + \text{Fals pozitív} + \text{Fals negatív} + \text{Valós negatív}} \quad (11)$$

$$F1: \frac{2 * \text{Precision} * \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (12)$$

$$\text{Precision: } \frac{\text{Valós pozitív}}{\text{Valós pozitív} + \text{Fals pozitív}} \quad (13)$$

$$\text{Recall: } \frac{\text{Valós pozitív}}{\text{Valós pozitív} + \text{Fals negatív}} \quad (14)$$

$$Mcc: \frac{Vn * Vp - Fn * Fp}{\sqrt{(Vp + Fp) * (Vp + Fn) * (Vn + Fp) * (Vn + Fn)}} \quad (15)$$

$$\text{Specificity: } \frac{\text{Valós negatív}}{\text{Valós negatív} + \text{Fals negatív}} \quad (16)$$

5. táblázat A gépi tanulás minősítéséhez használt mérőszámok angol és magyar elnevezései, továbbá definíciói.

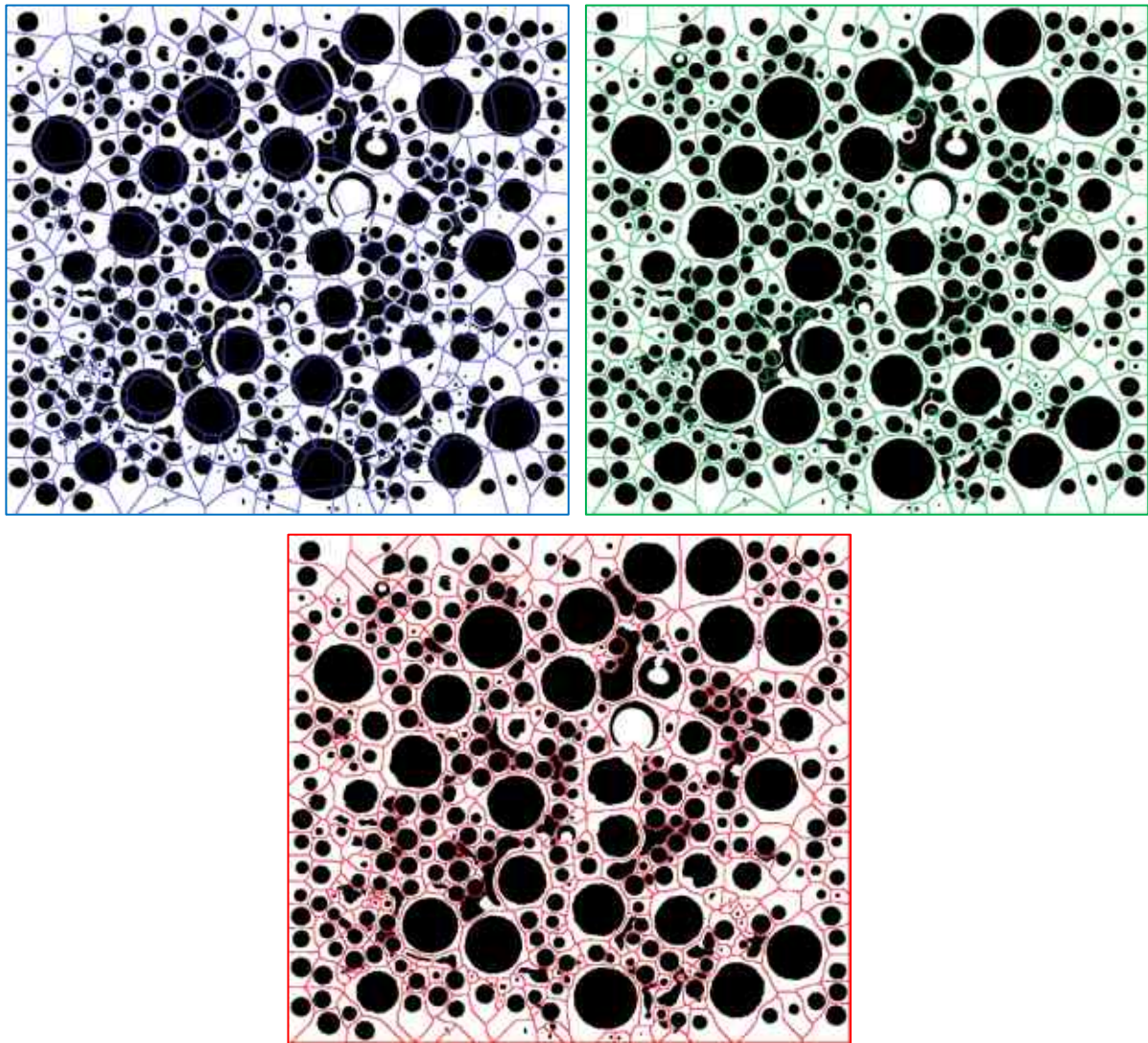
Angol név	Magyar név	Definíció
CA	Pontosság	Megadja a helyes osztályba sorolt objektumok arányát az összes objektum függvényében.
F1	F1	Megadja a pontosság (accuracy) és precizitás (precision) egyensúlyát.
Precision	Precizitás	Megadja a helyes osztályba sorolt objektumok arányát az összes pozitív (valós és fals) objektum függvényében.
Recall (Sensitivity)	Érzékenység	Megadja az összes pozitív objektumból mekkora a valós pozitív döntés aránya.
MCC (Matthew Correlation Coefficient)	MCC	-1 és +1 közötti szám, az osztályozás jóságát vizsgálja. 0: random találat. 1: lineáris kapcsolat a predikció és a valós között, -1: fordított kapcsolat
Specificity	Specifikusság	Megadja az összes negatív predikcióból mekkora arányú a valós negatív.

4 Eredmények és következtetések

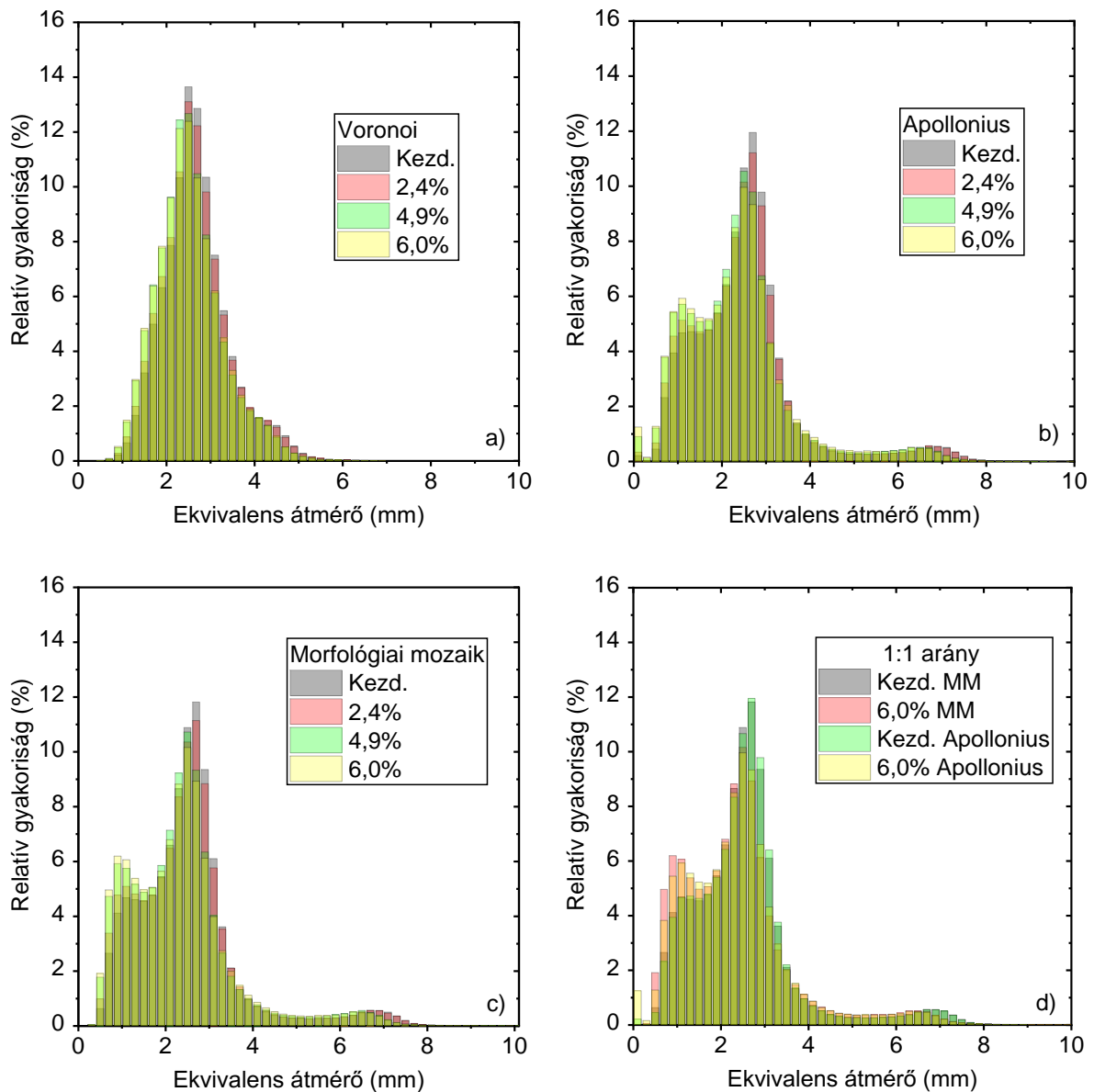
4.1 A szerkezet leírása, osztályozás kidolgozása

4.1.1 Kvantitatív leírás

Kutatómunkám célja röviden összefoglalva egy olyan algoritmus/módszer kidolgozása, amely bimodális kompozit fémhabok esetén a tönkremenetel korai szakaszában megbízható eredményekkel szolgál a tönkremeneteli folyamatokról, továbbá a segítségével növelhető a gyártási megbízhatóság. Az irodalom bemutatja, hogy az alakváltozás a mátrixot is jelentősen érinti, így ezen az irányon indultam el én is. Elsőként megvizsgáltam, hogy a különböző mozaikkészítő algoritmusok (Voronoi, Apollonius ábra, Morfológiai mozaik) hogyan adják vissza az alakváltozást (24. ábra).



24. ábra Különböző technikával előállított mozaik szerkezetek egyberajzolva az eredeti bináris képpel 1:1 keverési arány esetén. a) Voronoi mozaik, b) Apollonius ábra, c) Morfológiai mozaik



25. ábra Relatív gyakoriság – Ekvivalens átmérő függvények 1:1 keverési arány esetén. a) Voronoi mozaik, b) Apollonius ábra, c) Morfológiai mozaik, d) Morfológiai mozaik vs Apollonius ábra. Jól látszik, hogy bár a kezdeti állapotban szinte együtt fut a két hisztogram, a harmadik alakításnál már nagy eltérés figyelhető meg a két módszer között.

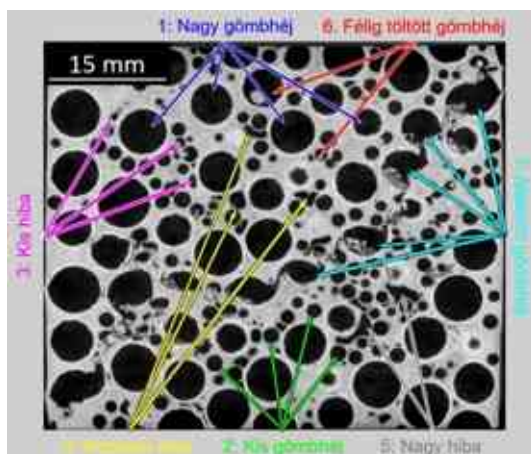
A könnyebb érthetőség, illetve ábrázolhatóság kedvéért az egyes mozaikok területéből visszaszámoltam az ekvivalens átmérőket, és azok relatív gyakoriságának változását vizsgáltam. Disszertáciomban minden mozaik esetén az ekvivalens átmérőre hivatkozok innentől. Megfigyelhető, hogy a példaként bemutatott 1:1 keverék esetén a Voronoi mozaik képi ábrázolásban nem adja vissza a szerkezet bimodális jellegét, így ezt a későbbiekben elvetem, mint alkalmazható technikát. Az Apollonius ábra már jobb eredményt nyújt, azonban mivel az ekvivalens körökön alapul a súlyozása, így a

szerkezetben található hosszúkás objektumokat hiányosan adja vissza. Összehasonlítva azonban a morfológiai mozaikkal, alig található eltérés a relatív gyakoriságok esetenkéntben, de az alakítás előrehaladtával már megfigyelhető különbség a két módszer között. Mivel azonban elsősorban megbízható, objektív minősítő módszert szeretnék kidolgozni, így a továbbiakban a morfológiai mozaikot vettem alaposabb vizsgálat alá. A hisztogramokon jól látszik a szerkezet bimodális jellege is, valamint jól visszaadják az alakítások közötti különbséget. A szerkezet ismeretében néhány változást könnyen meg is lehet magyarázni. A legnagyobb csúcs ~ 7 mm-es ekvivalens átmérőnél található. Ez a nagy gömbhéjak névleges átmérője, így logikus, hogy az alakváltozás során ahogy azok alakváltoznak a relatív gyakoriságuk csökkenni fog, valamint az ekvivalens átmérők értéke csökken (a mozaik terület összemege). Hasonló jelenséget figyeltem meg a következő csúcsnál, ami $\sim 2,4$ mm-es ekvivalens átmérőnél látható. Ez a kis gömbhéjak névleges átmérője, így szintén azt feltételezem, hogy a kisebb gömbhéjak is először közelednek egymáshoz, majd összetöredeznek. Érdekes azonban, hogy 1 mm-es ekvivalens átmérőnél is látható egy kiugró szélső érték, amit már nem lehet triviális szerkezeti jellemzőkhöz kötni. Első hipotézisként feltételeztem, hogy az alakítás hatására létrejövő törmelék, repedés jelenik meg ilyen módon. Bizonyításként feltételeztem, hogy a szerkezetben található egyes objektumok előfordulási gyakorisága Gauss eloszlást követ, így a kapott ekvivalens átmérő – relatív gyakoriság függvényt fel tudom bontani különböző komponensekre, amit már az ekvivalens átmérőket felhasználva egyes szerkezeti jellemzőkhöz kapcsolhatok. Bimodális haboknál biztosan lesz nagy gömbhéj, valamint kis gömbhéj, ahogy azt megállapítottam a 7 mm-es és 2,4 mm-es ekvivalens átmérőknél. Mivel az alumínium-oxid gömbhéjak rosszul nedvesítik az olvadt alumíniumot [67,68], így a gömbhéjak mellett összefüggő pórushálózatok alakulhatnak ki, továbbá számolni lehet az olyan általános öntési technológiából adódó szerkezeti hibákkal is, mint például a szívódási üregek létrejötte. A külső terhelés hatására a szerkezet törni fog, így törött gömbhéjak is megjelennek majd a későbbiekben (kicsi és nagy egyaránt). A szétválasztáshoz a Fityk 1.3.1 szoftvert használtam [69], amit Gauss függvények illesztésére hoztak létre. A morfológiai mozaikból kapott függvény lefutását egyre több Gauss függvénnyel próbáltam közelíteni, amíg a differenciálfüggvény el nem ért egy általam meghatározott minimum értéket. Mivel három lokális szélsőértéke van a

függvénynek, így három Gauss függvénnyel kezdtem az illesztést, majd sorra adtam hozzá újabb függvényeket, amíg a differenciafüggvény szélső értéke 0,05 alá nem esett. Ehhez összességében nyolc különböző Gauss függvényt használtam fel. Mivel nincs ilyen jellegű tapasztalat még a szakirodalomban, így nem tudom meghatározni, hogy a nyolc függvény illesztése mennyire jó, azonban kijelenthető, hogy a morfológiai mozaik vizsgálatával az alakváltozást jellemezni lehet. A kapott szélső értékek esetén a kis- és nagy gömbhéjak mellett a legkisebb ekvivalens átmérővel rendelkező csúcs nem feleltethető meg egyértelműen a törmeléknek, hanem további több csoport található a szerkezetben. Ezen csoportok számossága szintén kérdéses. Ahhoz, hogy ezt tisztázhassam egy kiterjedt csoportelemzésre, osztályozásra van szükség.

4.1.2 Osztályozás manuálisan

Az osztályozás felépítéséhez először meg kell határozni, hogy hány osztály található a szerkezetben, ami vizuálisan a szerkezet és a felételezett tönkremeneteli folyamat ismeretében könnyen elvégezhető. A szemlélő rá tud ismerni a szerkezet különbözőségeire, ahogy azt a 26. ábra mutatja. A nagy gömbhéjak látványosan eltérnek a kicsiktől a méretük miatt, miközben mindkettő közel tökéletes kör. A nyomás hatására összetört gömböknek szintén jellemző alakjuk van, ahogy a kitöltött gömbhéjknál is jellegzetes az olvadék csepp alakja, továbbá az üreg sarlóssága. Az öntési hibák is könnyedén azo-

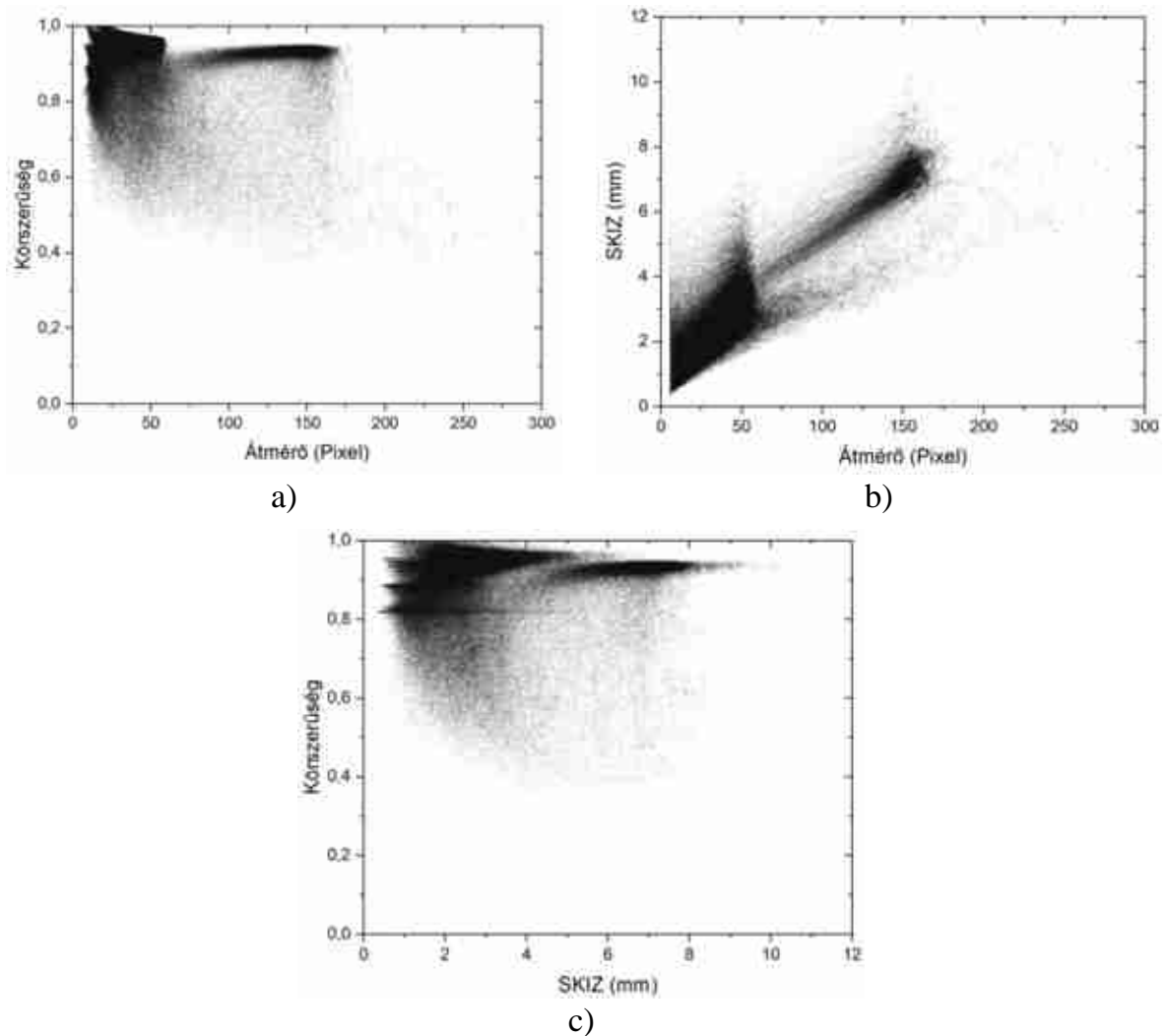


26. ábra Különböző szerkezeti jellemzők vizuális megjelenése a 4:1 keverék esetén 5,4% maradó alakváltozást követően. Bubonyi és m. társai „Microstructural characterization of...” című cikk [62] 3. ábrája nyomán

nosíthatók hiszen eltérnek a szabályos köröktől. Azonban a méretük meghatározása már összetettebb feladat, hiszen ezen csoport méreteloszlása mozog a legszélesebb skálán, továbbá nincs jól definiált jellemző paraméterük. A megkülönböztethetőség miatt három különböző osztályba soroltam őket, amelyeket méret szerint választottam el egymástól. A kis hibák kategóriájába tartozik, amelyik méretében közel összevethető a kis gömbhéjak átmérőjével ($d \sim 50$ pixel, skálázás nélkül). Nagy hibának

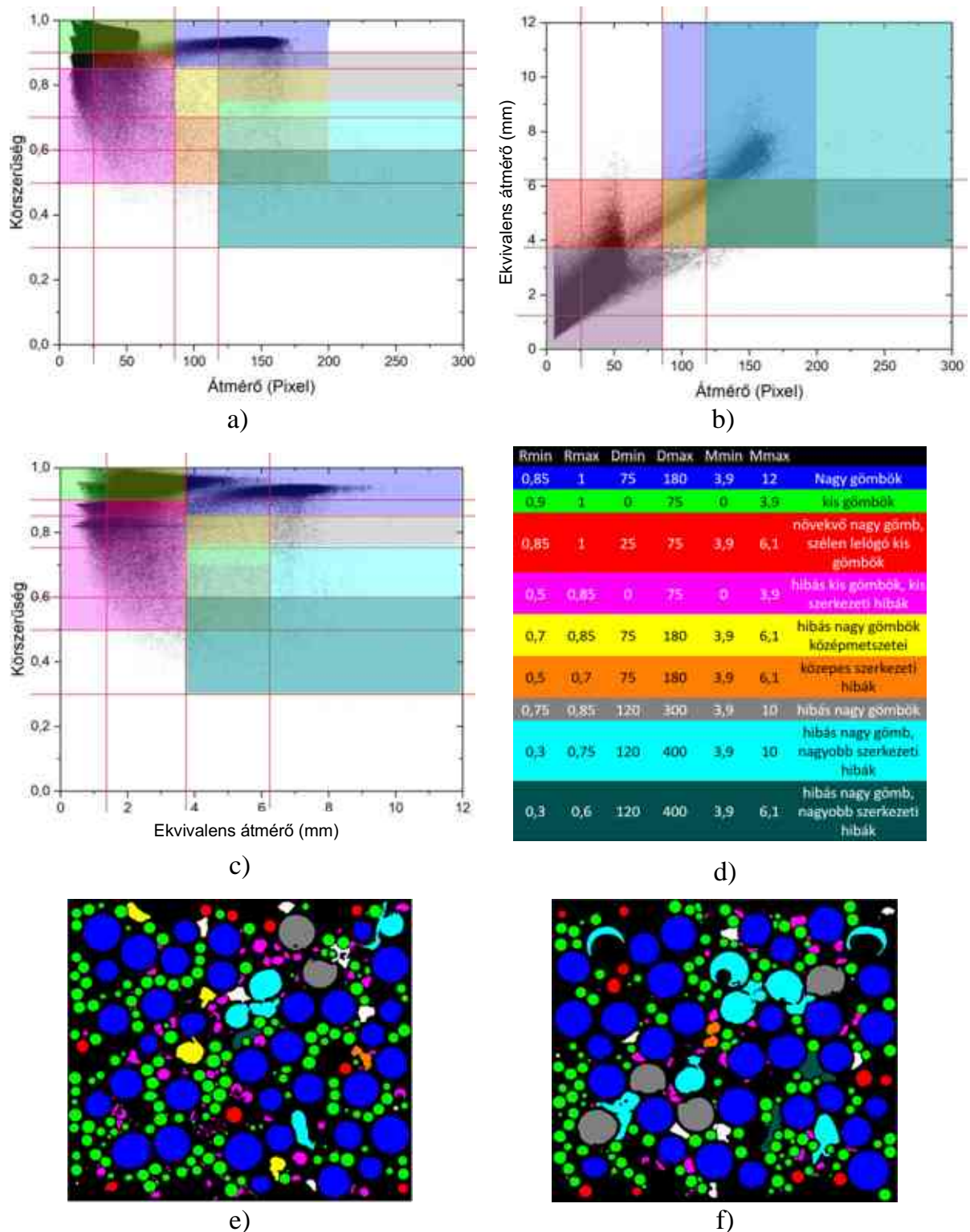
tekintem, azokat a hibákat, amelyek méretükben összevethetők a nagy gömbhéjakkal ($d \sim 100$ pixel, skálázás nélkül). A kettő közötti tartományt pedig a közepes hibák foglalják el. Ezen megállapítások alapján a szerkezetet hét különböző osztályba soroltam:

1. Nagy gömbhéj
2. Kis gömbhéj
3. Kis szerkezeti hiba
4. Közepes szerkezeti hiba
5. Nagy szerkezeti hiba
6. Részlegesen kitöltött gömbhéj
7. Alakított nagy gömbhéj.



27. ábra Szerkezeti jellemzők eloszlása az elsődlegesen felállított háromdimenziós paraméterterben (az első vizsgálatnak a kitöltöttség és nyújtottság még nem volt része). Bár van látható különbség az osztályok között, a határok felállítása nem triviális ezen paraméterek alapján.

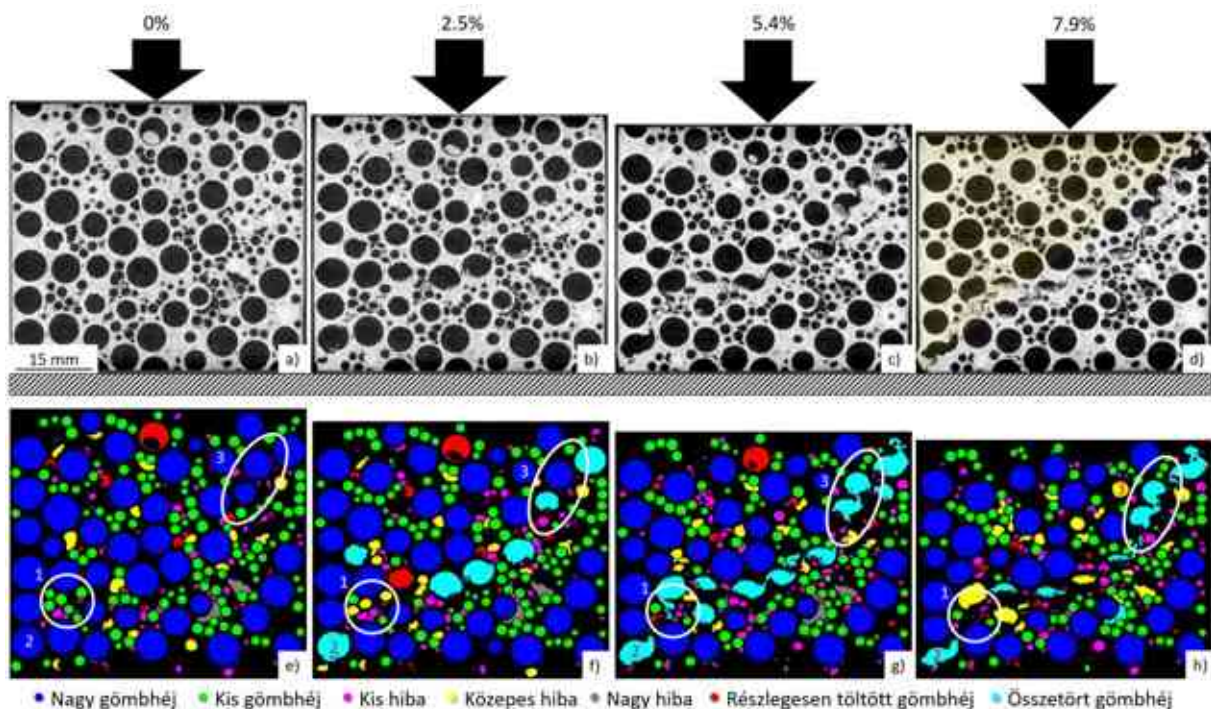
A csoportok határainak megkeresésére egy paraméterter létrehozását tűztem ki célul. Ezen jellemzőket olyan módon választottam meg, hogy azok egymástól minél inkább függetlenek legyenek. Az átmérő és a körszerűség figyelembe vétele így adott volt. Azonban, mivel metszeti képeket dolgozok fel, egy nagyon fontos jelenséget tisztáznom kellett. Mégpedig, hogy mi történik, ha az objektumokat nem a középvonal mentén metszem el a metszősíkkal. Saltykov már 1958-ban leírta [70], hogy ha egy térbeli objektumot például gömböt nem a középvonalánál metszünk el, akkor arányosan a középvonal távolságától egyre kisebb lesz a metszett kör lap átmérője. Erre biztosított egy matematikai formulát, aminek segítségével meghatározható, hogy mennyi a valószínűsége, hogy egy kis átmérővel rendelkező kör lap valójában egy nagy gömbnek a kis metszete. A képelemzés fejlődésének köszönhetően azonban egy új ötlettel álltam elő. A korábbi vizsgálatból már elkészült a morfológiai mozaik a szerkezetre, így azt használok fel harmadik paraméterként, megoldva a nagy objektumok kis metszetének kérdését is. Mivel jelentős a méretbeli különbség a vizsgált nagy, illetve kis gömbhéjak között ($D_L \sim 3d_s$), továbbá ki tudom használni azt a tényt, hogy sugár és a gömbhéj falvastagságának aránya ugyanakkora a nagy és a kis gömbhéj esetén is, így bizonyítható, hogy a nagy gömbhéjak kis metszetei esetén, bár átmérőben, illetve körszerűségben közel azonosak a kis gömbhéjakkal, a közvetlen környezetükben nem található egyéb objektum, mivel a nagy gömbhéj vastagabb fala miatt a szomszédos objektum távolabb lesz. Az így kapott háromalkotós paraméterter egyes metszeteit a 27. ábra szemlélteti. Ezt követően szemrevételezéssel megpróbáltam szétválasztani az egyes objektumokat egymástól, továbbá szín alapján jelölni az összetartozó csoportokat. Az első osztályozást a 28. ábra mutatja be. A d) képen látható, hogy milyen határokat állítottam fel az osztályok meghatározásához, továbbá az a) - c) részek mutatják be, hogy mennyire sikerült lefedni a vizsgálni kívánt paraméterteret. Megállapítottam, hogy a metszeti képek miatt sokkal több alosztály szükséges, hogy minden objektumot a megfelelő osztályba soroljak, továbbá látható, hogy az éles határvonal felállítása két osztály között hibás eredményt fog hozni, továbbá, szükséges a paraméterteret még legalább a nyújtottság és a kitöltöttség vizsgálatával kibővíteni, ugyanis az előző három jellemző nem ad elegendő biztonságot az egyes osztályok szétválasztásához. Ezen információhalmaz már kellően komplex a gépi tanulás alkalmazásához, így ezt választottam a kutatásom folytatásaként.



28. ábra a) - c): A paramétertér manuális felbontása téglalapok segítségével. d): az egyes téglalapok definiálása, a szerkezetben található elemek segítségével. e), f): az osztályozás során készített metszeti képek. Bár a nagy és kis gömbhéjak, illetve a kis hibák (a kép szélét leszámítva) jól elkülönülnek, az alakított gömbök illetve a szerkezeti hibák méretük, alakjuk változatossága okán szinte lehetetlen kézzel megtalálni az egyes osztályokat elválasztó határvonalakat.

4.1.3 Osztályozás gépi tanulással

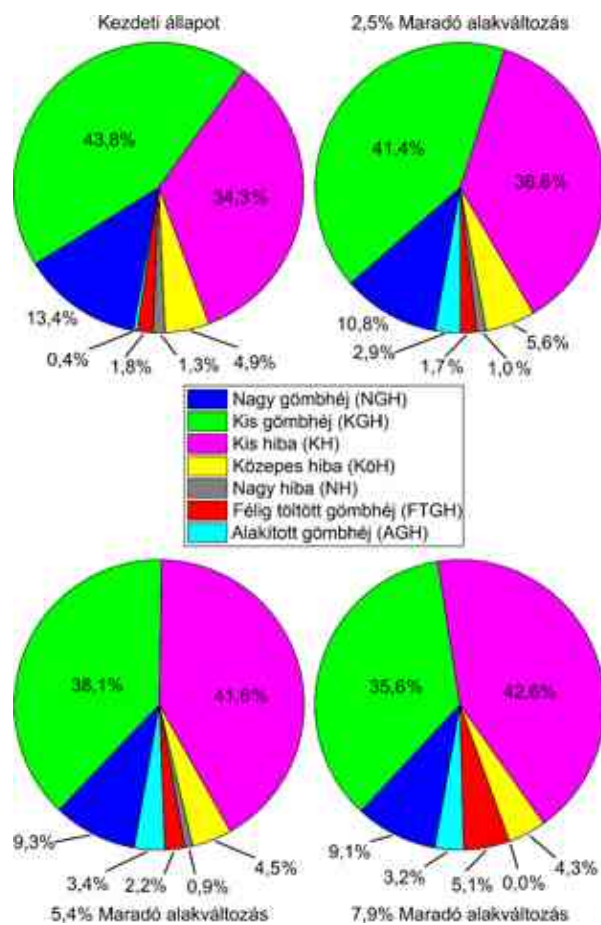
Folytatásként a tanuláshoz szükséges adatbázist kellett összeállítanom. Ehhez először címkéztem az objektumokat, majd a szerkezetben található összes elemet megvizsgáltam. Az adatbázis tartalmazza még a méretet, átmérőt, körszerűséget, nyújtottságot, kitöltöttséget, valamint az objektumhoz tartozó morfológiai mozaikelem ekvivalens átmérőjét. A vizsgálatok elvégzéséhez az intézetünkben fejlesztett Cprob [71] nevű képelemző szoftvert alkalmaztam. Ezt követte maga a tanítás. Az adatbázis struktúrájának köszönhetően könnyedén vissza azonosítható 1-1 objektum, így véletlenszerűen (de a metszeti képeket szisztematikusan) kiválasztottam ~1650 objektumot a 4:1 keverék mind a négy állapotából, majd a vizuális jellemzői alapján besoroltam őket a korábban meghatározott hét osztály egyikébe. A tanuló algoritmus ezt az adatsort kapta meg, majd a tanulás után elvégezte a teljes szerkezet (~400 000 objektum) osztályozását. A kapott eredmény sokkal meggyőzőbb, mint a kézi osztálykeresés eredménye (29. ábra).



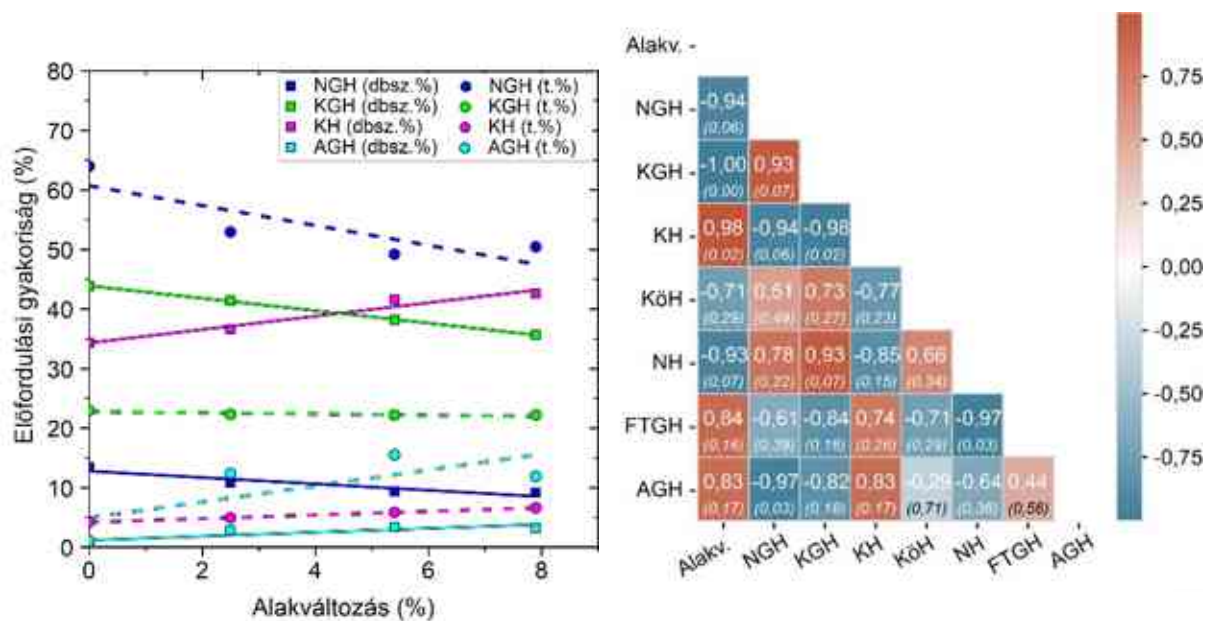
29. ábra Törési vonal kialakulása és fejlődése a 4:1 keverék esetén ugyanazon látótérben belül. A felső háromszög az alakítás során a frontális síkban is elmozdul (sárgával jelzett terület). a)-d): ugyanazon régió metszeti képei. e)-h): Feldolgozott, és osztályozott objektumok a régióban. 1. terület: kis gömbhéjak alakváltozása kis hibákká. 2. terület: Különálló nagy gömbhéj alakváltozása. 3. terület: két nagy gömbhéj alakváltozásának fázisai. Egyedi törés, összeérés, átalakulás egy objektummá. Bubonyi és m. társai „Microstructural characterization of...” című cikk [62] 4. ábrája nyomán

A kapott osztályokat már nem csak vizuálisan, de számszerűen is elemeztem. A 30. ábra mutatja be az egyes osztályok egymáshoz viszonyított relatív eloszlását is. Fontos megjegyezni a teljesség igényéért, hogy a szerkezet tartalmaz törött kis gömbhéjakat is, azonban méretük, és felületi részletességük nem tette lehetővé, hogy a kis hibáktól elkülönítsem őket. Viszont, megvizsgálva az arányok alakulását egyértelműen megállapítható, hogy amennyivel csökken a kis gömbhéjak osztályának gyakorisága, szinte pontosan annyival növekszik a kis hibák gyakorisága (1,5% az összegük közötti legnagyobb különbség a 4 különböző vizsgálati szakaszban). A 29. ábra 1. területe be is mutatja ezt a folyamatot. Az első alakítás hatására már épphogy, de a közepes hiba osztályába is beférnek, de amint egy picit több terhelés éri őket, összeroskadnak, és vagy a törött nagy gömbhéj részévé válnak, vagy kis hibaként maradnak a szerkezetben. A nagy hibák hagyományos zártcellás fémhabként fognak viselkedni, tehát egy kritikus pont mentén behajlanak, majd a területarányuk a zömítés előrehaladtával folyamatosan csökken (átalakulnak közepes hibává). A félig kitöltött gömbhéjak esetén egy jelentős növekedést figyeltem meg a harmadik alakváltozás után. Ennek magyarázata az, hogy az alakítás hatására a gömbhéj falai összetöredeznek, majd elkezdik kitölteni az üreget, nagyon hasonló módon, mint amikor az olvadt alumínium tölti ki a gömbhéj belsejét. Az elemzésből már csak a nagy gömbhéjak, illetve a törött gömbhéjak maradtak ki. Az alakítás hatására a nagy gömbök a testátló mentén elrepednek, majd a két félgömb elcsúszik egymáson (29. ábra 2. terület). Azonban sokszor előfordul az az eset is, amikor a nagy gömbhéjak a félbetörés után csúszás közben összeérnek, esetleg egyéb szerkezeti hibával találkoznak (29. ábra 3. terület). A képelemzés szempontjából ekkor az eddigi objektumok megszűnnek létezni, és egy teljesen új objektum jön létre. Így lehetséges, hogy kevesebb törött gömbhéjat tartalmaz a szerkezet a harmadik alakítás végén, mint amennyit a kiinduló nagy gömbhéjmennyiség előre vetítene. Ezen okból újra megvizsgáltam az objektumokat, és most a darabszámuk helyett a területarányukat vettem figyelembe az osztályok alakulásának vizsgálatánál. A 31. ábra (bal) tartalmazza az összehasonlítást a darabszám, illetve a térfogatarányok alapján kis- valamint nagy gömbhéj esetén, továbbá a kis hibák és törött gömbhéjak esetén. Az összehasonlítást a kis gömbhéj – kis hiba párosával kezdtem, ugyanis az előzőleg bemutatott eredmények alapján ott egyértelmű volt a kapcsolat. A zöld és rózsaszín folytonos vonalak jelölik a

darabszám szerinti összehasonlítást, míg a szaggatott vonalak a területarány szerinti eredményeket. A darabszámok összehasonlítása ebben az esetben jobban szemlélteti a folyamatot, ugyanis a területarányoknál megfigyelhető, hogy a zöld szaggatott vonal (kis gömbhéjak területaránya) szinte változatlan a teljes folyamat alatt, míg a kis hibák értéke enyhén, de növekszik. Az illesztések jóságát megvizsgálva arra jutottam, hogy a kis gömbhéjak esetén a korrigált R^2 érték 0,999, míg a darabszámra számolva csupán 0,593. a kis hibák illesztésének jósága 0,935 területarányra számolva és 0,999, ha a darabszámot veszem alapul.



30. ábra Az osztályozás eredményei 4:1 keverék esetén. A különböző osztályok változása az előfordulási gyakoriságukból számolva. Bubonyi és m. társai „Microstructural characterization of...” című cikk [62] 5. ábrája nyomán



31. ábra Balra: Darabszámok aránya (folyamatos vonal) szemben a területarányokkal (szaggatott vonal) kis- és nagy gömbhék, kis hibák, és alakított nagy gömbhék esetén. A darabszámok aránya annak ellenére mutat jobb korrelációt, hogy a nagy gömbhék elvesznek az alakítás során, mivel az összeérés után egy már nem kezeljük különálló objektumokként őket. Jobbra: Pearson-féle korrelációs mátrix a bemutatott gyakoriságokból számolva, alatta zárójelben jelölve a szignifikancia szinteket Bubonyi és m. társai „Microstructural characterization of...” című cikk [62] 5. ábrája nyomán

A nagy gömbhék – deformált gömbhék összehasonlításnál a területarányra illesztett trendvonalak mutatnak nagyobb változást (kék szaggatott vonal a nagy gömbhék esetén, illetve cian szaggatott vonal az alakított gömbök esetén). Megvizsgálva azonban az illesztés jóságát, illetve a korrelációt az alakítással, a területarány rosszabb eredményeket nyújtott a darabszám változásához képest. Az illesztés során a korrigált R^2 értéke a nagy gömbhék esetén 0,815, ha a darabszám változását illesztettem, de csak 0,578, ha a területarány változását. A törött gömbhékénél sokkal rosszabb a helyzet, a területarányt illesztve csupán 0,295 az illesztés megfelelése, ha a darabszámot vizsgálom, akkor már 0,523. A probléma gyökere a jelentősen eltérő méretbeli különbségekből adódik. Mivel a nagy gömbhék megközelítőleg háromszor nagyobb átmérővel rendelkeznek a kis gömbhékénél, így a területük és annak változása minden esetben felül reprezentált lesz, míg a kis gömbhék a méretükből adódóan alul reprezentáltak lesznek.

Végezetül elkészítettem a Pearson féle korrelációs mátrixot is az egyes osztályok darabszámának változását alapul véve (31. ábra, jobb). A korrelációs mátrix értékei megfelelően alátámasztják az osztályok átalakulásánál tett megfigyeléseket. A

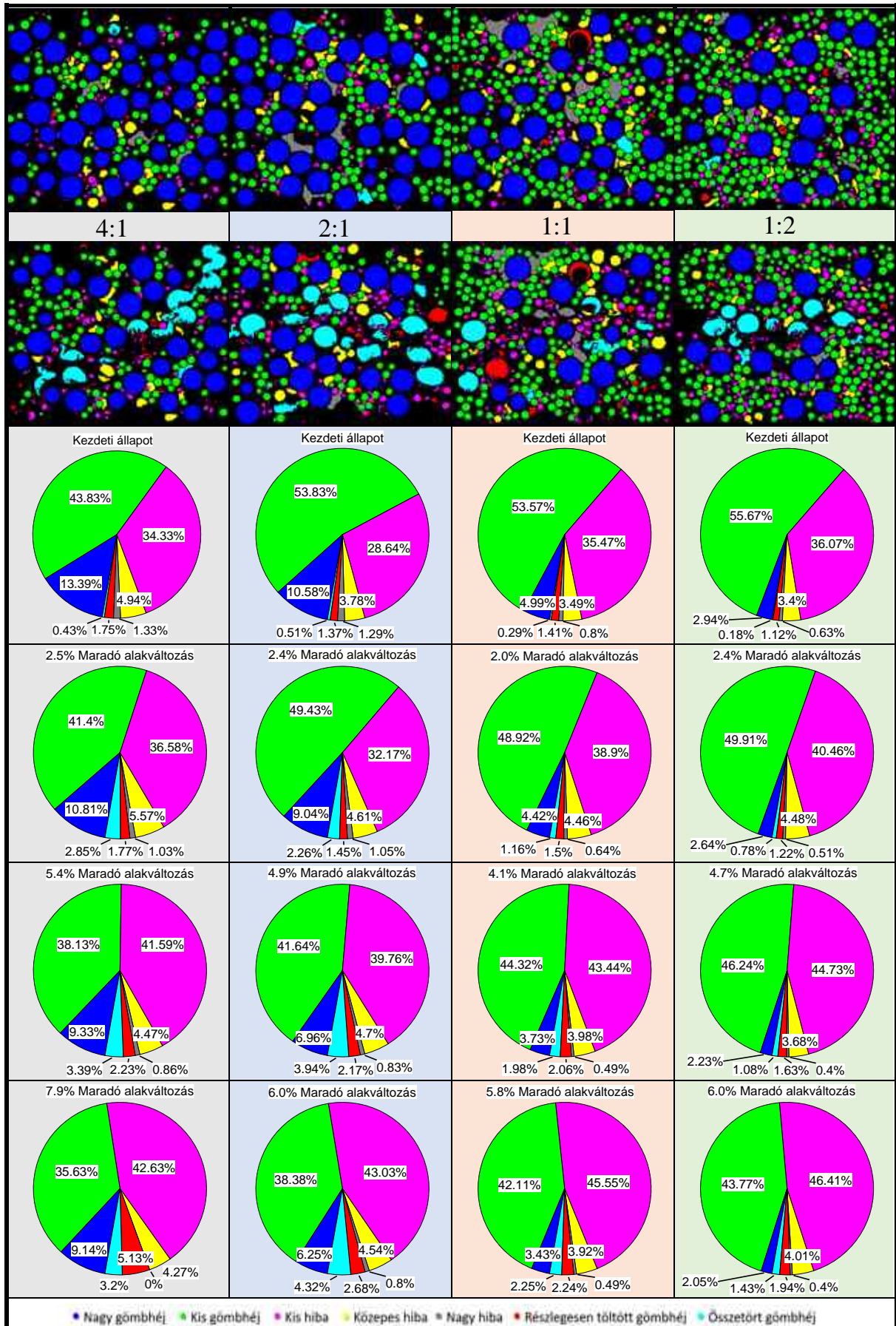
gömbhéjak változása fordítottan erősen arányos az alakítás mértékével, illetve a nagyméretű hibák számának csökkenésével. Az alakítás mértékével azonban majdnem egyenesen arányosan növekszik a kis hibák aránya, valamint a törött gömbhéjak megjelenése. A kis hibák itt is szinte tökéletes fordított arányosságot mutatnak a kis gömbhéjakkal nagyon alacsony p érték (szignifikancia szint) mellett. A leggyengébb korreláció a közepes hibák osztályában figyelhető meg, ami azt jelenti, hogy az alakítás hatására stagnál a közepes hibák száma. Megvizsgálva a szignifikancia szinteket is (zárójelben jelölt számok) megállapítható, hogy általánosan a közepes gömbhéjak körül a legnagyobb a bizonytalanság, azonban a két feketével jelölt kiugró értéket az alakított gömbhéjaknál találhatjuk. A kevés adat miatt 0,5-ös szignifikancia szintnél húztam meg a határt, így ahol ezt meghaladó érték jött ki, ott nem vizsgálom a korrelációs együttható értékét.

Összefoglalva, a Voronoi mozaik alkalmatlan bimodális kompozit fémhabok esetében az alakítás hatására végbemenő változások jellemzésére, azonban a morfológiai mozaik megfelelően bemutatja azt. Az apollonius illetve a morfológiai mozaik függvényeinek elemzésénél néhány paraméter egyértelműen köthető a szerkezethez (kis- illetve nagy gömbhéjak), míg a harmadik, 1 mm-es ekvivalens átmérőnél található csúcs nem feleltethető meg egyértelműen. A Gauss szétválasztás megmutatta, hogy az elemezni kívánt függvény biztosan több, mint három komponensű. Az egyes komponenseket osztályozással szét lehet választani egymástól a vizuális megjelenésük alapján. A nagy gömbhéjak kis metszeteinek megfelelő osztályba sorolásához a morfológiai mozaikot is bevettem az alakjellemzők közé, azonban kézzel meghatározni az egyes csoportokat (alcsoportokat) körülményes. Az osztályozáshoz így gépi tanulást választottam. Az alkalmazott előzményen alapuló véletlenszerű erdő módszer (gradient boosted random forest) kis számítási igény mellett is könnyedén, nagy pontossággal határozta meg az egyes osztályok határait. Hatalmas előnye a manuális határkereséssel szemben, hogy egy-egy alakjellemzőt újra és újra meg tud vizsgálni a feltételek változása esetén. A tanítás felügyelet mellett történt, és a 4:1 keverék mind a négy különböző állapotából tartalmazott véletlenszerűen kiválasztott objektumokat. Összesen 1649 egyedi objektumból épült fel a tanító adatbázis. Ezeket az objektumokat minden esetben a vizuális megjelenésük alapján soroltam be az előre definiált hét különböző osztály egyikébe. Az

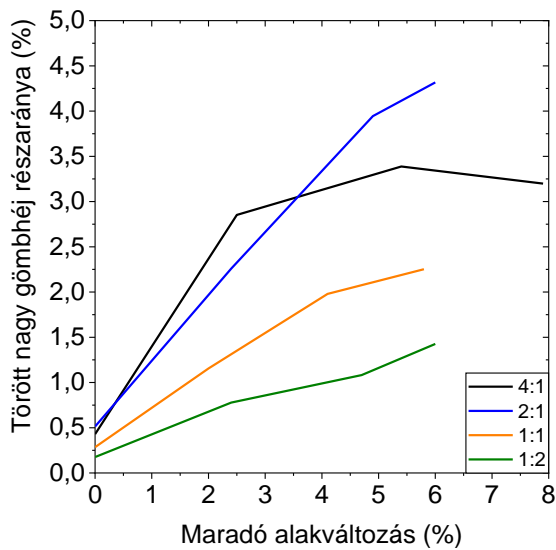
osztályozás alapjául a darabszám változását vettem, és megállapítottam, hogy a kis gömbhéjak kis hibákká fognak átalakulni. A nagy hibák először közepes hibákká fognak zsugorodni, majd a további alakítás hatására a közepes hibák is kis hibákká fognak alakulni. A félig kitöltött gömbhéjak száma jelentős növekedésnek indul a harmadik zömítés után, ennek oka, hogy az összetöredezett gömbhéjak beesnek az üreg aljára, hasonlóan megváltoztatva a kitöltöttségi tényezőt, mint a gyártás során behatoló alumínium. A törött nagy gömbhéjakból kevesebb lesz, mint azt a nagy gömbhéjak száma előre vetítené, ugyanis az alakítás hatására a nagy gömbhéjak eltörnek, majd elcsúsznak egymáson, amíg összeérve új objektumot alkotnak. Ez az elemzés szempontjából csupán egy objektumnak számít, míg a valóságban akár két – három nagy gömbhéj maradékból épül fel. A területarány elemzése nem hozta el a várt javulást, melynek oka a kis- és nagy gömbhéjak átmérőbeli nagy különbsége. Mivel megközelítőleg háromszor nagyobb a nagy gömbhéj átmérője, így a területarány esetén minden nagy gömbhéj felülreprezentált, míg minden kis gömbhéj alulreprezentált lesz. Az eredmények alapján kijelenthetem, hogy az osztályokba tartozó objektumok darabszámának vizsgálata bár hibával terhelt (egyes osztályok a módszer jellege miatt nagyobb szórást mutatnak), de összességében megbízhatóbb eredményekkel szolgál, mint az egyes osztályok területarányának vizsgálata.

4.2 Osztályozás különböző keverékek esetén

Az előző fejezetben bemutattam, hogy milyen úton jutottam el a gépi tanuláson alapuló osztályozó algoritmusig, aminek segítségével már kvantitatív, és objektív módon jellemezhető a tönkremenetel korai szakasza. Azonban nemcsak 4:1 keverékben készültek kompozit fémhabok, hanem 2:1, 1:1 továbbá 1:2 arányban is. Mivel az egyes próbatestek csak a bennük található gömbhéjak térfogatarányában tértek el egymástól, így ezen szerkezetek vizsgálatához is felhasználtam az előző fejezetben már bemutatott osztályozó algoritmust. Az eredményeket a 32. ábra mutatja be. Csupán a kezdeti állapotok vizsgálatával már minősíteni lehet a gyártás jóságát, ugyanis mind 4:1, 1:1 és 1:2 arányok esetén a szerkezet ~40%-át alkotja valamilyen hiba, míg a 2:1 keverék a legjobban sikerült gyártás, hiszen csak ~34% hiba (nem kívánt pórus) található a szerkezetben. Ez fontos visszajelzés a gyártónak is, és akár az egyes gyártást befolyásoló paraméterek hatását (keverés, tégely rázása) vizsgálni lehet. Az osztályozott metszeti képeket megvizsgálva jól látható, hogy a keverési arány változtatása nem okozott problémát az osztályok azonosításában, 1-1 objektumtól eltekintve mindegyik a helyes osztályba került a tanuló adatbázis számára ismeretlen szerkezeteken is.



32. ábra Osztályozás különböző térfogatarányban kevert bimodális fémhabok esetén. A felső képsor a metszetsorozatok mediánjait mutatja be kezdeti állapotban, míg az alsó ugyanezen metszeti képek legnagyobb alakváltozást elszenvedett párjai. A kördiagramok oszlopok szerint rendezve mutatják be az osztályok arányait a kezdeti állapotban, illetve azok változását az alakítás egyes lépéseinek hatására.

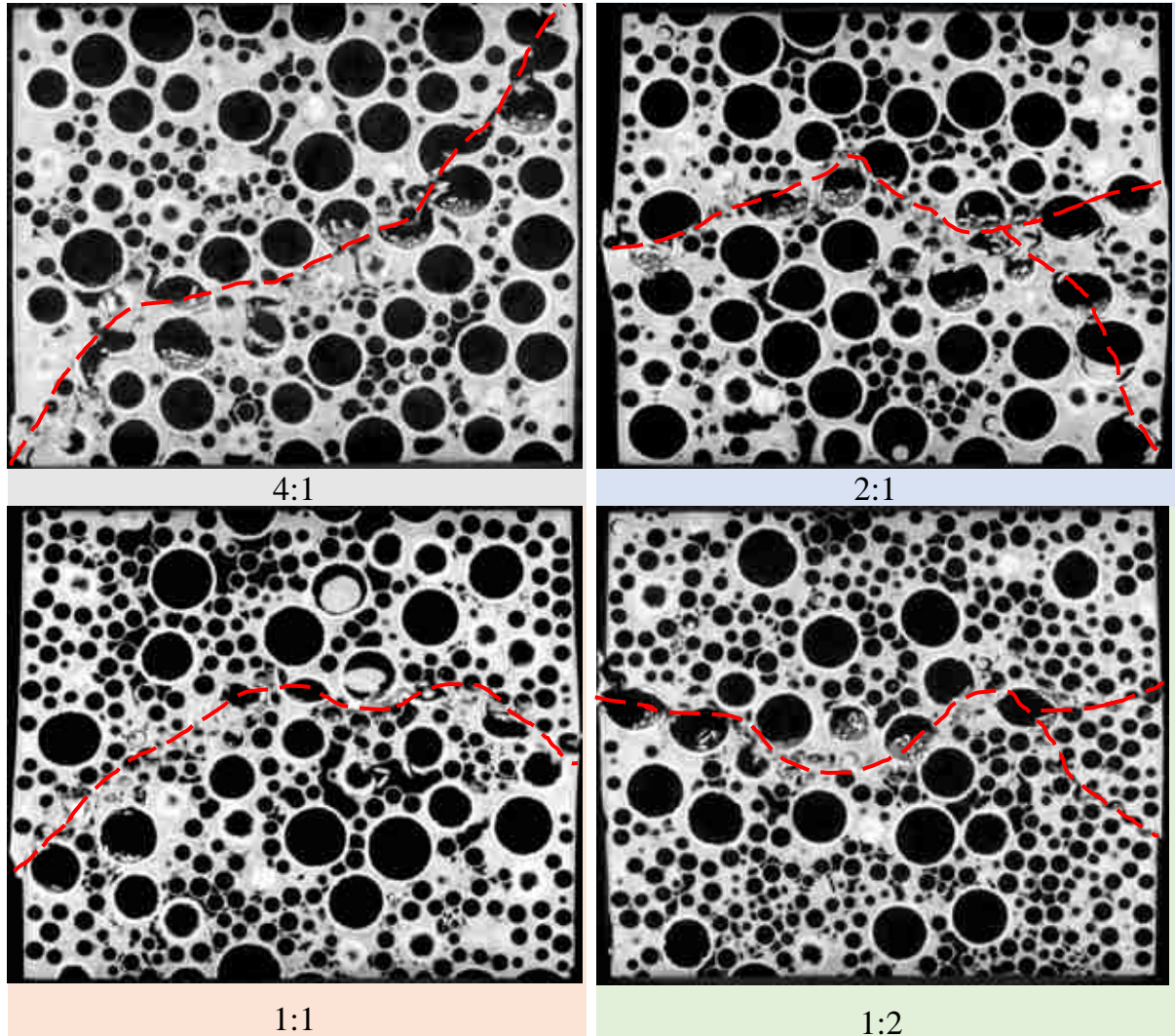


33. ábra Törött nagy gömbhéjak részarányának alakulása az alakváltozás hatására a különböző keverékek esetén.

Az egyes osztályok változásában a közepes szerkezeti hibáktól eltekintve mindenhol lineáris trend figyelhető meg. Ez alól a megállapítás alól egyedül a 4:1 keveréknél a törött nagy gömbhéjak részaránya kivétel. Összehasonlítva a többi keverék törött nagy gömbhéjainak részarányával (33. ábra), bár azok kisebb alakítást kaptak, kijelenthető, hogy a görbék változása monoton növekvő. Ezzel szemben a 4:1 keverék az első, tranziciens zónában megállított igénybevételnél még a

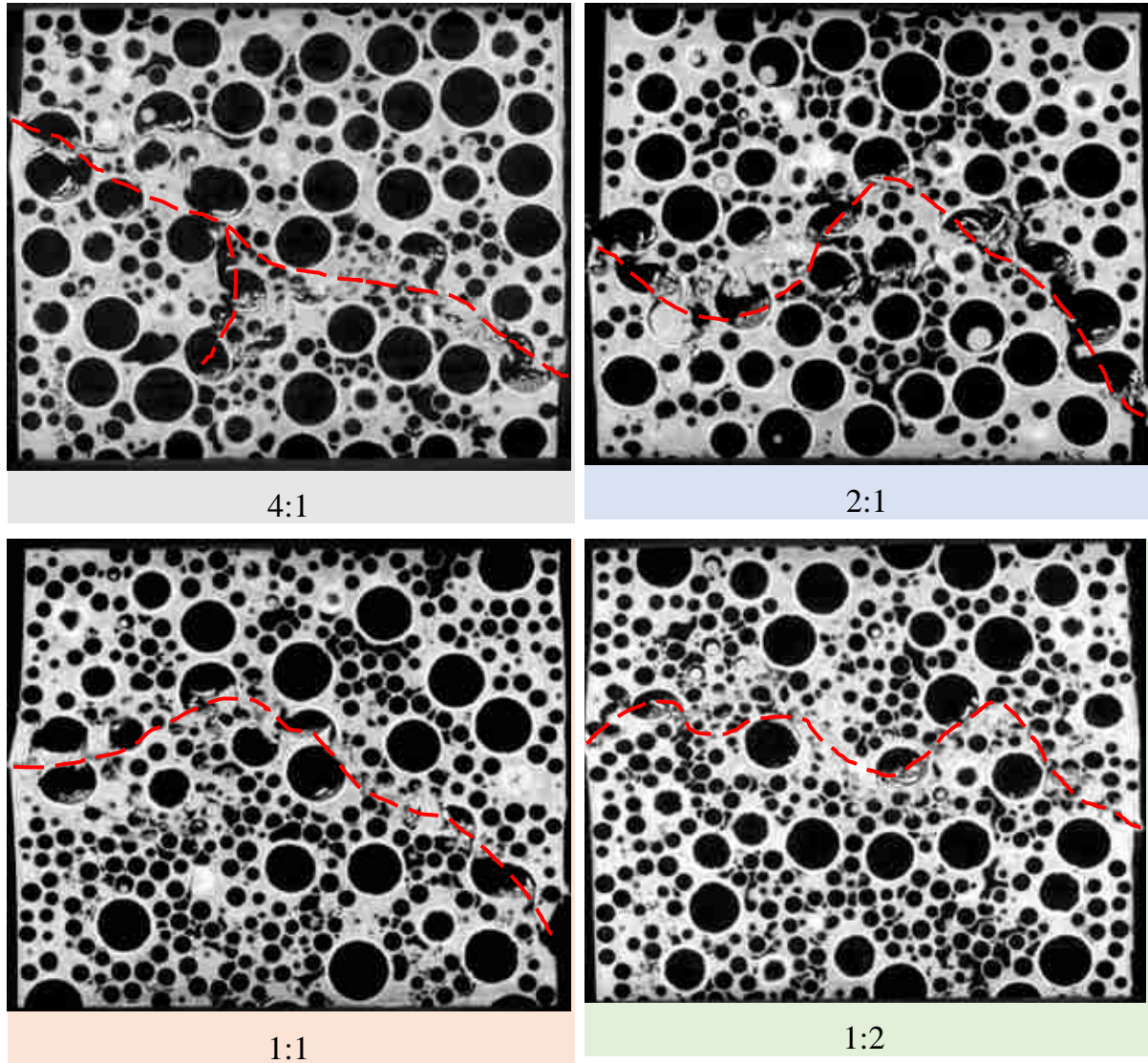
legtöbb törött nagy gömbhéjjal rendelkezett, de amint a plató tartományába ért az alakítás, a hetedik osztályba eső objektumok száma jelentősen csökken, majd folytatva az igénybevételt, a trend megfordul, és kevesebb nagy gömbhéj törik össze.

Az irodalom alapján [19,20] a törés először a darab közepén kell, hogy meginduljon, majd a testátló mentén jelenik meg egy repedési sáv, ami a további alakítás hatására kiszélesedik. Ez összhangban van azzal az általánosan elfogadott modellel, miszerint az alakváltozás során nyomó kúpok alakulnak ki a testátló mentén. Megtekintve a tönkremenetel során készített metszeti képeket, azonban eltérés figyelhető meg az egyes keverékek tönkremeneteli mechanizmusában (34. ábra). A bemutatott felvételek minden esetben a metszetsorozat mediánjai, a legnagyobb maradó alakváltozás után készült sorozatból. Megfigyelhető, hogy a 4:1 keverék esetén a mintában a szakirodalomnak megfelelően kialakul a testátlóhoz közeli nyírás sáv. Azonban a többi metszetet megfigyelve, már szembetűnő eltérést figyeltem meg a tönkremeneteli mechanizmusokban. A többi keverék esetén nem a testátló mentén halad az alakváltozás, az 1:1 és 1:2 keverékek esetén szinte majdnem csak a vízszintes középvonalra korlátozódik.



34. ábra Különböző keverékek frontális metszetsorozatának mediánjai. Piros szaggatott vonal jelöli a törés útját. A 4:1 keveréknél az irodalommal egybevágó a viselkedés, de az 1:1 és 1:2 esetén közel vízszintes a törési sík. A 2:1 keveréknél a vízszintes törési sík megfigyelhető, de a 45°-os alakítás is majdnem kirajzolódott.

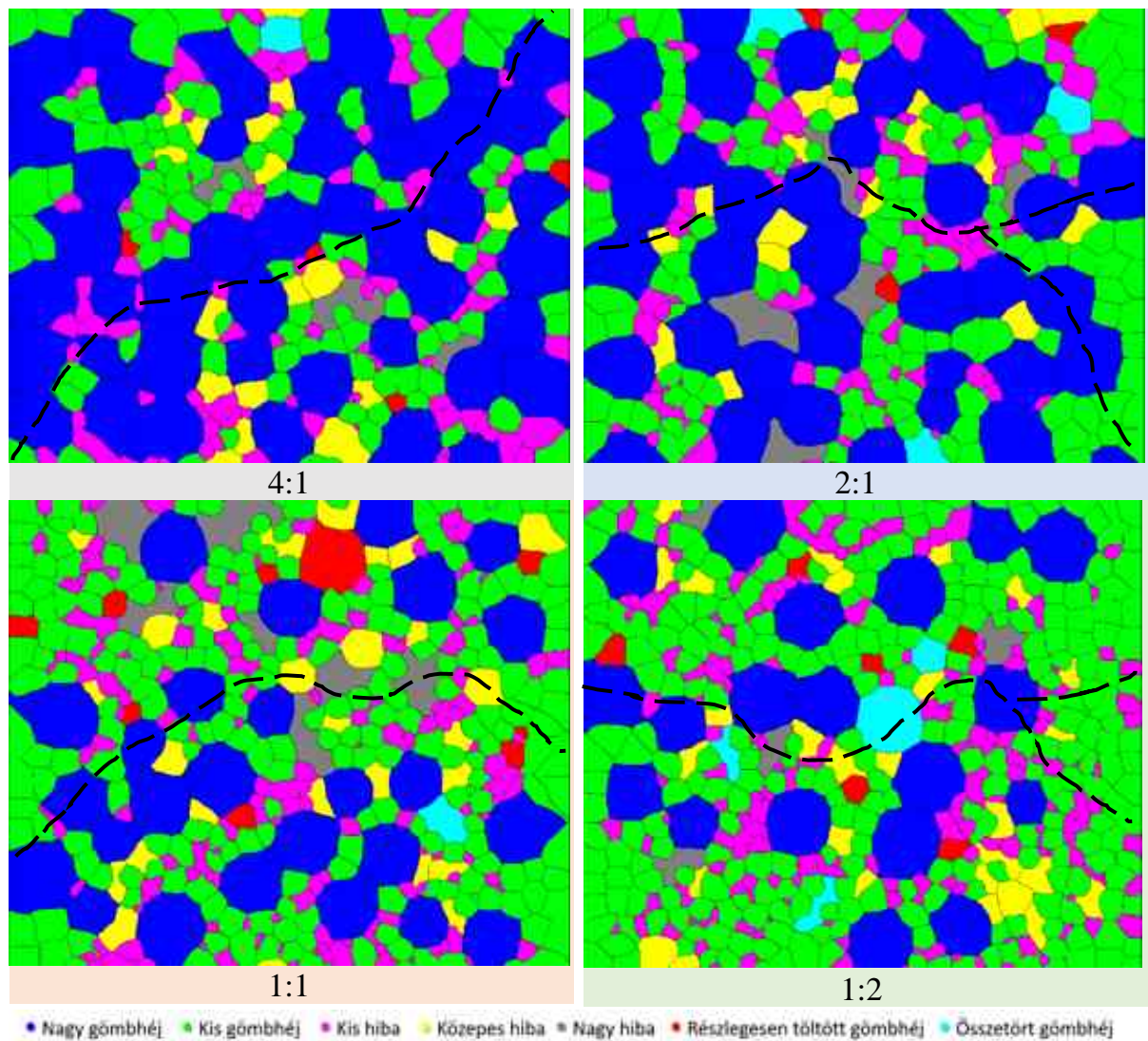
Feltételezve, hogy a tönkremenetel továbbra is nagy gömbhéjról nagy gömbhéjra terjed tovább a kezdeti szakaszban, arra a következtetésre jutottam, hogy mivel csökken a nagy gömbhéjak térfogataránya, így azon irányban fog elsődlegesen kialakulni a törési vonal, amelyik a legközelebb áll a darabban kialakuló nyomási gúla alkotójához, illetve ahol a legkisebb a nagy gömbhéjak távolsága. Hipotézisem felállításához a vertikális síksorozatot is megvizsgáltam. Szintén a sorozatok mediánjait ábrázoltam a 35. ábraán, bizonyítva, hogy bimodális kompozit fémhabok esetén nem mindig a 45°-os testátló mentén alakul ki a törési sáv.



35. ábra Különböző keverékek vertikális metszetsorozatának mediánjai. Piros szaggatott vonal jelöli a törés útját. A 4:1 keveréknél közel áll a törési sáv a 45°-os irodalmi esethez, míg a 2:1 keveréknél a metszet jobb oldalán megvan a 45°, de a bal oldalon nem ér végig, hanem egy nagy kanyar után a darab közepén jut a felszínre. Az 1:1 és 1:2 keverékek esetén minimális az eltérés a frontális síkon látottakhoz képest.

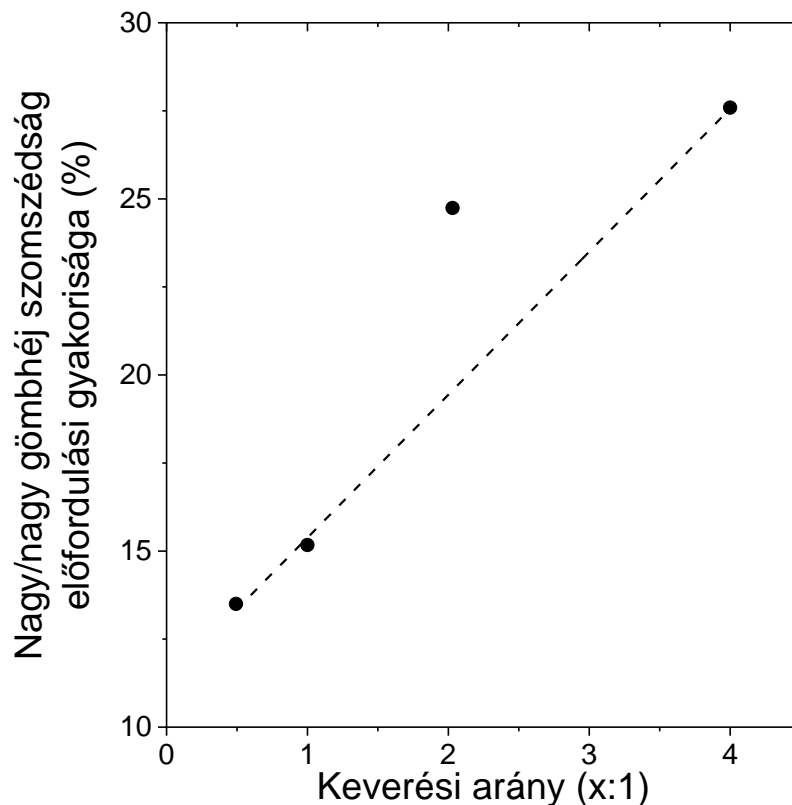
A vertikális síksorozatok vizsgálatából látható, hogy ezen síkon a 4:1 arányú keverék sem a 45°-os átló mentén törik el, azonban a négy vizsgált keverék közül ez a szerkezet áll hozzá itt is a legközelebb. Hipotézisem, miszerint a törés a nagy gömbhéjak mentén a testátlóhoz legközelebbi, nagy gömbhéjakkal leginkább kitöltött irány mentén fog haladni, egy objektív mérőszám kidolgozásához kezdtem. Ehhez tovább vittem az osztályozásból kapott eredményeket, és megvizsgáltam, hogy mekkora az előfordulási gyakorisága annak, hogy egy nagy gömbhéjnak nagy gömbhéj lesz a szomszédja egy-egy adott keverék esetén a *kiinduló* szerkezeten.

A módszer kidolgozásához a hatósugár szerinti vázszerkezetet használtam fel, és az egyes mozaikokhoz hozzárendeltem az alapjukat képző objektumok osztályát, továbbá, a már korábban bemutatott színekkel vizuálisan is elkülönítettem az egyes osztályokat egymástól (36. ábra). A jobb szemléltetés érdekében a megrajzolt törési vonalat ráillesztettem a kiszínezett mozaikra, így már szembetűnő, hogy 4:1 keverék esetén a törés szinte kizárólag a kékekkel színezett területeken halad át (nagy gömbhék hatósugara). Ugyanez az állítás azonban már nem áll fenn a többi keverék esetén.



36. ábra Különböző keverékek frontális metszetsorozatának mediánjai. Fekete szaggatott vonal jelöli a törés útját (34. ábra nyomán). A 4:1 keveréknél szinte egybefüggően a kékekkel színezett (nagy gömbhék hatósugara) területen halad a törés. A többi keverék esetén ez már nem jelenthető ki egyértelműen. Az egyes színek az osztályozott objektumok hatósugarát jelölik.

Ezek után összeszámoltam, hogy mekkora az előfordulási gyakorisága az egyes keverékek esetén annak, hogy egy vizsgált nagy gömbhéjnak nagy gömbhéj szomszédja legyen. Először a metszeti képek esetét átlagoltam, utána a metszeti képek átlagos értékeit átlagoltam még egyszer, hogy meghatározzam, mekkora az átlagos előfordulási gyakoriság az egyes keverékek esetén. Az eredményekből megállapítható, hogy a nagy gömbhéjak térfogatarányának növelésével arányosan fog növekedni a nagy/nagy gömbhéj szomszédság valószínűsége is (37. ábra). 1:2 arány esetén ez a valószínűség csupán csak 13,5%. 1:1 aránynál már meghaladja a 15%-ot, 2:1 aránynál pedig egy jelentős különbség tapasztalható, hirtelen közel 25% lesz a gyakoriság. Tovább növelve a nagy gömbhéjak térfogatarányát (4:1), ez az ugrásszerű növekedés jelentősen visszaesik, csupán 28% a valószínűsége, hogy a nagy gömbhéj szomszédságában szintén nagy gömbhéj található.



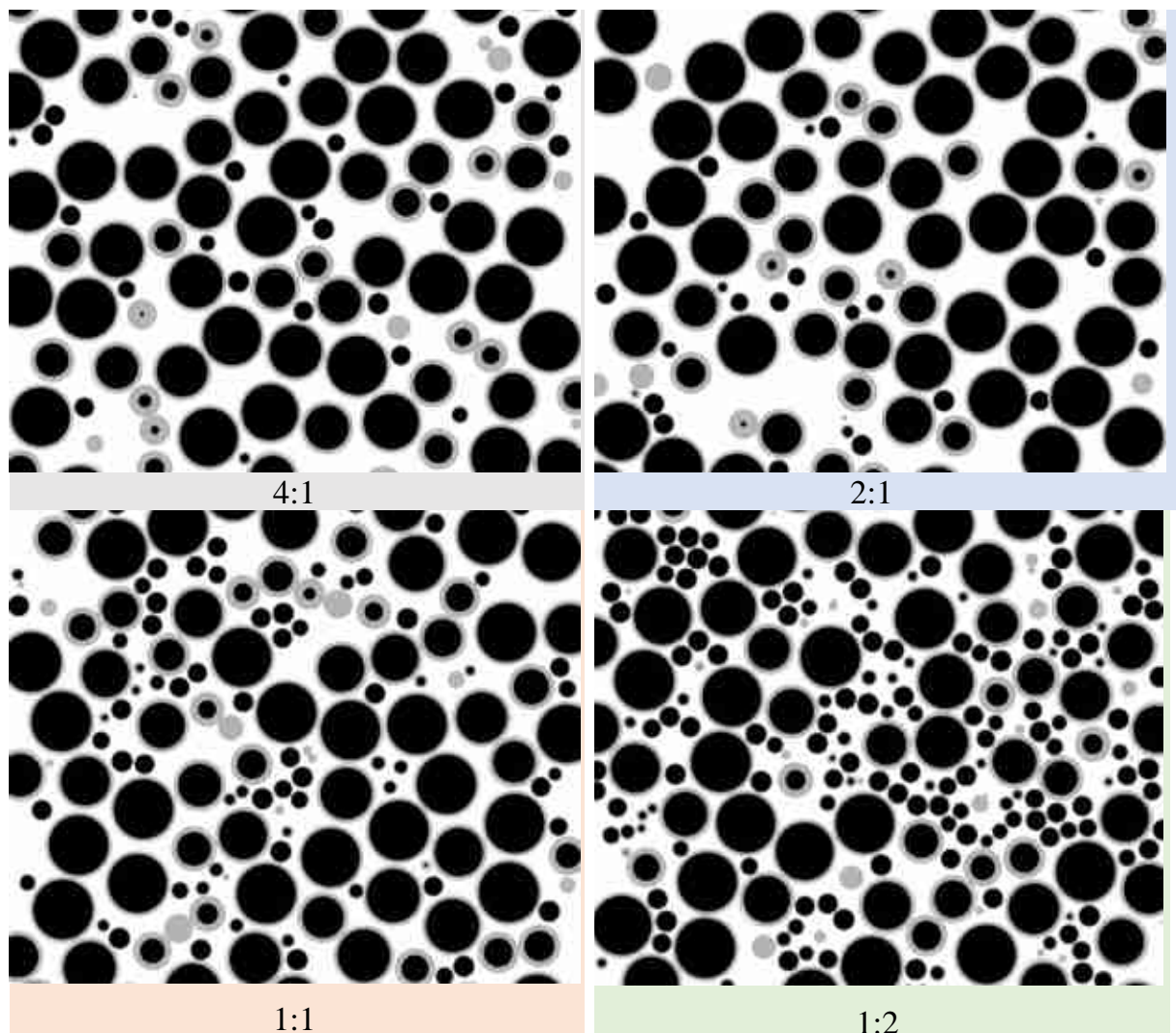
37. ábra Nagy/nagy gömbhéj szomszédság előfordulási gyakorisága a térfogatarány változtatásának függvényében. A lineáris trendből egyedül a 2:1 keverék esik ki.

A kapott pontokra függvényt illesztve megfigyeltem, hogy a 2:1 keveréket kivéve mindegyik jól illeszthető egy sima lineáris függvényvel. Azt feltételezem, hogy a trendből azért esik ki a 2:1 keverék, mert míg a többi esetben ~40% volt a szerkezetben található hibák térfogataránya, addig ennél a keveréknél csupán ~34% származott a kis-közepes- vagy nagy hibáktól.

Összefoglalva, a korábban bemutatott osztályozó eljárást sikerrel alkalmaztam különböző keverési arányok esetén is, újratanulás nélkül. Az osztályozás eredményéből megállapítottam, hogy a közepes hibáktól eltekintve minden osztály változása monoton, ez alól egyedül a 4:1 keverék törött gömbhéjai képeznek kivételt, ahol egy maximumos függvényvel írható le az alakítás hatására bekövetkező változás. A metszeti képeket megvizsgálva azonban arra jutottam, hogy egyedül ez a keverék követi az irodalomban leírt, és általánosan elfogadott alakítási elméletet, miszerint az alakítás hatására kialakulnak a 45°-os nyomógútlák a darabban, és a tönkremenetel ezen 45°-os sáv mentén indul meg. A többi keverék esetén mind a frontális, mind a vertikális metszetsorozat esetén látható, hogy nem jön létre ez a 45°-os átló, hanem a vízszinteshez sokkal közelebb alakul ki a deformációs sáv, amely affinitást mutat a nagy gömbhéjak irányába. Mivel az irodalom alapján a nagyobb gömbhéj megy tönkre hamarabb a terhelés kezdeti szakaszában, ezért objektív módon (a morfológiai mozaik segítségével) meghatároztam a kiinduló szerkezeteken, hogy mekkora a valószínűsége annak, hogy az egyes keverékek esetén nagy/nagy gömbhéj szomszédság alakuljon ki, amely egyértelműen preferált a törés terjedése szempontjából. A később kialakuló törés útvonalát ráillesztve az osztályok szerint színezett morfológiai mozaikra, megállapítottam, hogy egyedül a 4:1 keverék esetén áll fenn, hogy a ~45°-os átló mentén eljuthat a törés a próbatest egyik sarkából az átellenes sarokba. 2:1 keverék esetén megfigyelhető, hogy a tönkremenetel mechanikája megváltozik, bár elkezd kialakulni a törés a 45°-os átló mentén is, azonban a közel vízszintes irányban hamarabb végighalad a darabon. 1:1 és 1:2 keverékek esetén már nincs összefüggő nagy gömbhéj szomszédság, így ott csak a vízszintes mentén halad a törés a vizsgált kezdeti szakaszban. A szomszédok valószínűségét vizsgálva megállapítottam, hogy a keverési aránnyal együtt lineárisan növekszik a valószínűség, hogy kialakul nagy/nagy gömbhéj szomszédság. Ez alól a 2:1 keverék képez kivételt, amelyben a vártanál jelentősen több a vizsgált szomszédság kialakulásának valószínűsége.

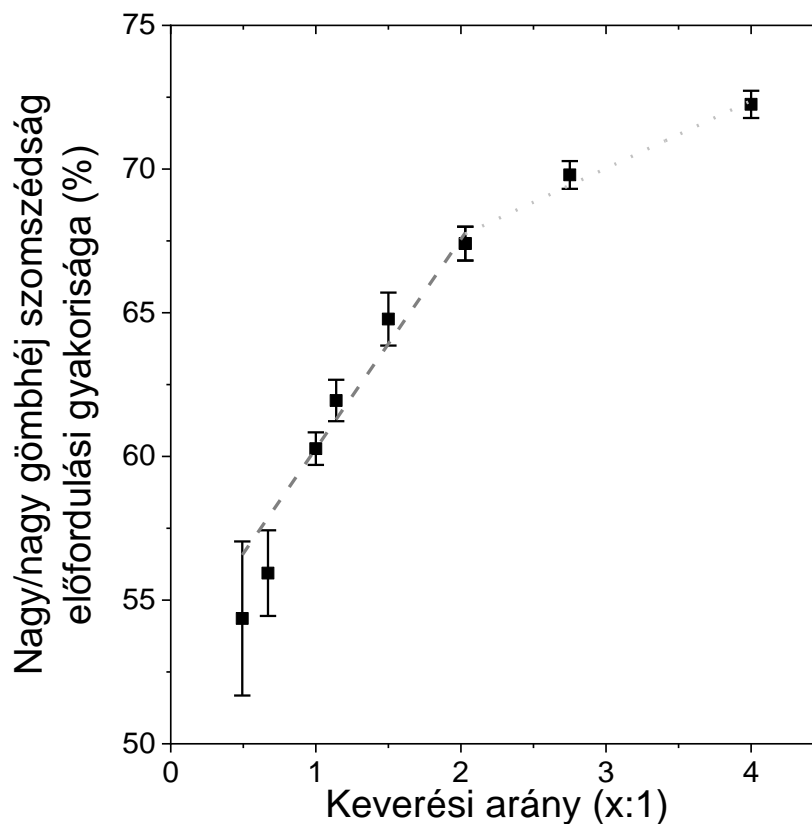
4.3 Validálás generált szerkezetek segítségével

Ahhoz, hogy a hibák szerkezetre gyakorolt hatását izolálhassam, ideális, úgynevezett generált szerkezeteket hoztam létre a teheráni Amirkabir University of Technology, Center of Engineering and Multiscale Modeling of Fluid flow (CEMF) intézetében fejlesztett diszkrét elemes szoftver (CemfDEM) segítségével. A generáláshoz összesen 15 000 gömbhéjat ejtettem egy 7,5 cm átmérőjű, 20 cm hosszú csőbe. A 15 000 gömbhéj szintén bimodális eloszlású volt, a valós szerkezetnek megfelelően bontottam őket két részre, például 2:1 keverék esetén 10 000 nagy gömbhéjat, és 5 000 kis gömbhéjat tartalmazott a rendszer.



38. ábra Különböző keverékek generált, vertikális irányú metszetsorozatának mediánjai.

A szimuláció során szintén a lehető legnagyobb térkitöltés létrehozása volt a cél. Az elkészült modellből kiexportáltam a gömbhéjak középpontjainak koordinátáit, továbbá ismert volt a hozzájuk tartozó átmérő is, így el tudtam készíteni a rekonstruált képeket a szimulációról (38. ábra). A generált képek esetén már nem volt szükség az osztályozásra, mivel a kétféle gömbhéjat az átmérőjük alapján könnyedén el lehet választani, így azonnal meg tudtam határozni a nagy/nagy gömbhéj szomszédság előfordulási gyakoriságát (39. ábra).



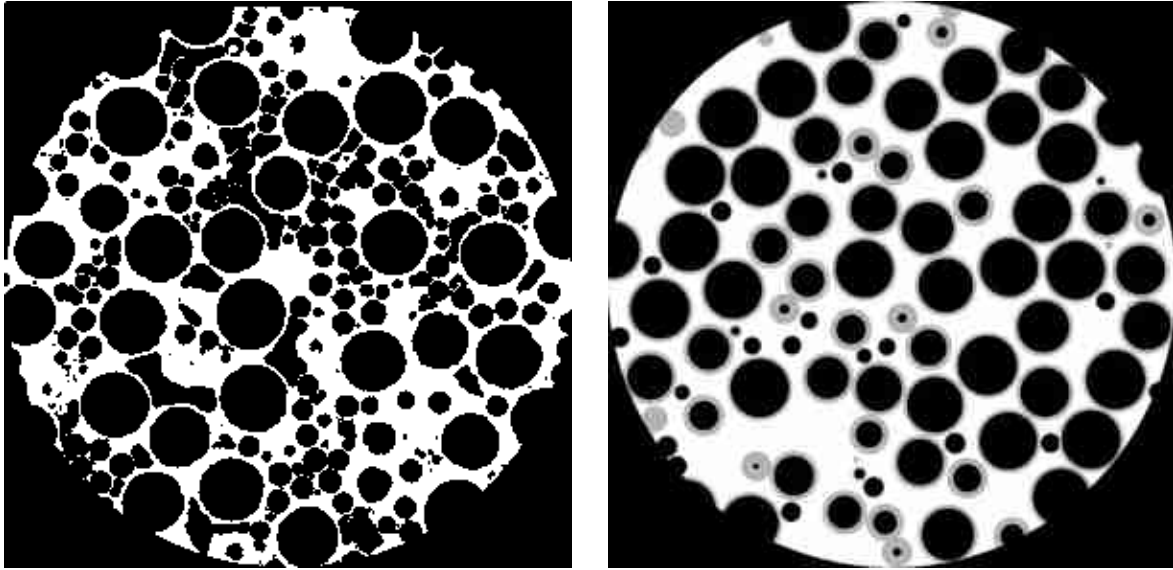
39. ábra Nagy/nagy gömbhéj szomszédság előfordulási gyakorisága generált szerkezet esetén a térfogatarány változtatásának függvényében. A függvényen már kétféle trend figyelhető meg, az egyik az 1:2, 1:1 illetve 2:1 keverékekre szinte tökéletesen illeszkedik a trendvonal, egyedül a 4:1 keverék tér el jelentősen.

A kapott eredményből megállapítható, hogy a generált szerkezet esetén is fennáll az a monoton növekvő trend, hogy a nagy gömbhéjak arányának növelésével a nagy/nagy gömbhéj szomszédság előfordulási gyakorisága is növekszik. Azonban ebben az esetben is a legnagyobb növekedés a relatív gyakoriságban az 1:2 és 2:1 arány között tapasztalható. Alaposabban megvizsgálva, ezt a szakaszt, a kezdeti 1:2

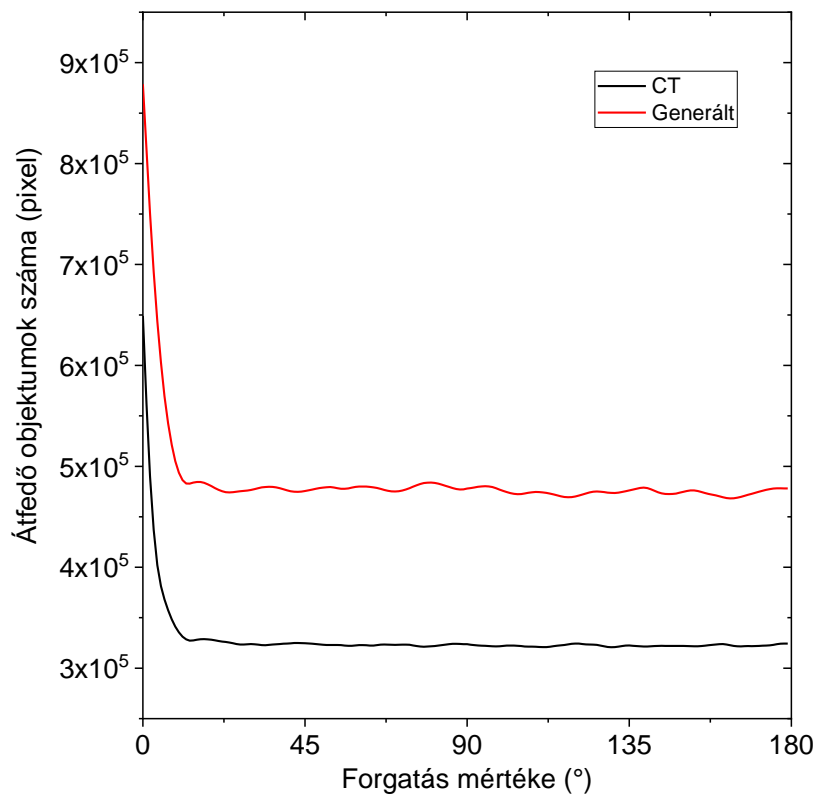
keveréknek a legnagyobb a szórása, majd mire eljutunk a 2:1 keverékig, a szórás jelentősen lecsökken, és utána a többi keverék esetén állandósul. A trendeket megfigyelve, ugyanúgy két részre lehet bontani a függvényt, amelyből az egyik az 1:2 – 2:1 szakasz, egy meredekebb növekedéssel, majd ezt követi a 2:1 – 4:1 szakasz, ahol a monoton növekedő trend megmarad, ám a meredeksége észrevehetően csökken. Ez egy komoly eltérés a valós szerkezetben tapasztaltakkal szemben, így alaposabban megvizsgáltam a valós és a generált szerkezet közötti hasonlósági kapcsolatot.

4.3.1 Valós és generált szerkezetek hasonlóságának vizsgálata radiális kovariancia segítségével

Ebben az alfejezetben arra a kérdésre keresem a választ, hogy a generált szerkezet valóban hasonlít-e a valósra, illetve ennek következményeként a szomszédsági viszonyban állítottak összevethető-e. Ennek a kérdésnek a vizsgálatához a kovarianciát használtam fel, és a vizsgálathoz a 2:1 arányú keverékre esett a választásom, mivel az előző fejezetben látottak alapján ebben a szerkezetben mind a két tönkremeneteli folyamat jelen lehet. Bár a fémhab önmagában a véletlen keverésnek köszönhetően izotrópnak tekinthető, a vizsgálat szempontjából is olyan módszert választottam, ami független a betekintés irányától, így a hagyományos kovariancia értelmezése helyett (4) a forgatási kovarianciát (5) használtam fel. Mivel a vizsgált mintadarabom megközelítőleg egy kocka, így $n \cdot 90^\circ$ -onként a sarkokból adódó átfedés torzítaná a kovariancia függvényt. Emiatt a forgatáshoz a négyzet alakú habokból kört vágtam ki. Ehhez ugyanazt az eljárást használtam fel, mint amikor a háttérrel választottam el a habokról, azonban a mérőkerethez most mind a négy főirányban mért távolságból a legkisebbet választottam ki. Ez fogja alkotni a mérőkeret sugarát. A bináris kép létrehozásához szintén az Otsu-módszert használtam fel. Az elkészült képen a gömbök, hibák értéke 1, míg az alumínium értéke 0 lett (40. ábra).



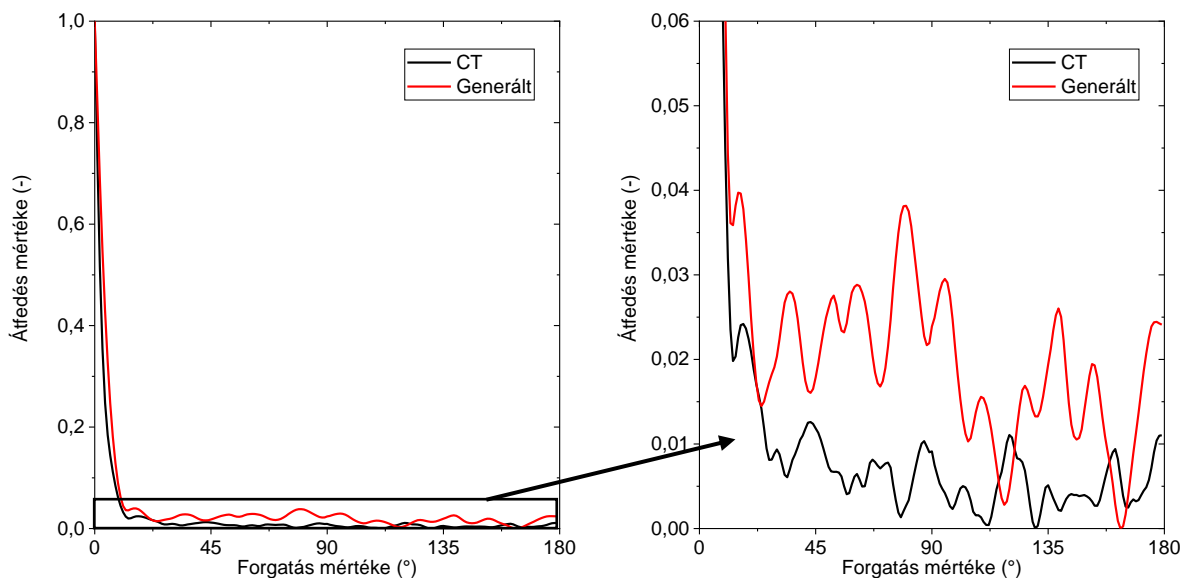
40. ábra Bináris képek a radiális kovariancia elemzéshez valós (balra), és generált (jobbra) szerkezet esetében.



41. ábra Valós és generált szerkezet (2:1 keverék) radiális kovariancia függvényei

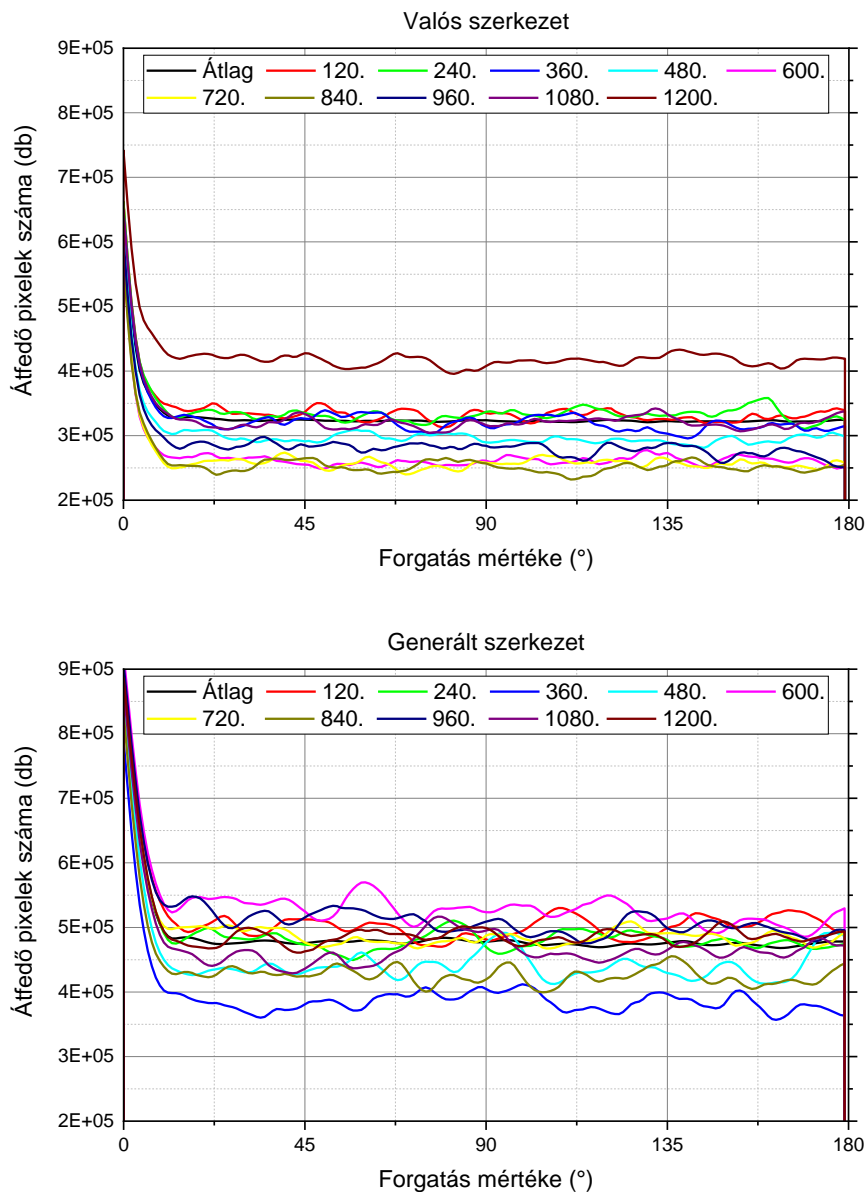
A 41. ábra mutatja be az átlagos radiális kovariancia függvényeket mind a valós, mind pedig a generált szerkezet esetében. Jól látható a különbség az átfedő objektumok számában, ennek pedig az egyszerű magyarázata, hogy a két vizsgált kép nagyítása (felbontása) nem azonos. Ennek geometriai okai vannak. A valós hab méretei 56x56x50

mm. Ahhoz, hogy reprezentatív legyen a vizsgálat, az ISO 13314:2011 szabvány alapján a legnagyobb gömbhøj átmérőjénél 10x nagyobb oldalfal javasolt. Korábbi kutatómunkákból már bizonyított, hogy 7x nagyobb oldalfalig még reprezentatívan viselkedik a hab, így a vizsgálhatóság szempontjából választottam az 56x56 mm-es alaplmetret. A generált szerkezet esetében azonban nem volt ilyen vizsgálat, így a rekonstrukciónál nagyobb befoglaló méretet határoztam meg, hogy biztosan reprezentatív legyen a generált szerkezet a későbbiekben. Ez a skálázásbeli különbség itt megjelenik, azonban egy állandó, skalár skálafaktor segítségével könnyedén fedésbe hoztam a két függvényt, továbbá normáltam az átfedő objektumok számát 0 és 1 közé (42. ábra).



42. ábra Bal oldal: Valós és generált szerkezet (2:1 keverék) normált radiális kovariancia függvényei. Jobb oldal: ugyanazon függvények nagyítása.

A nagyított kovariancia függvényeken jól látható, hogy a mért szerkezet meredekebben esik, illetve kisebb is lesz az átfedés mértéke, mivel több hiba található a szerkezetben. A periodikusságot megvizsgálva azonban jól látható, hogy az egyes inflexiós pontok közötti távolság megegyezik a generált illetve a valós szerkezet esetén is. A valós mintán nincsenek akkora kiugró maximum értékek, mint a generált esetén, de ez szintén visszavezethető a különböző szerkezeti hibákra.



43. ábra Átlagos radiális kovariancia függvény, valamint a teljes metszetsorozatból 10, egymástól egyenlő távolságra található metszet radiális kovariancia függvényei valós (fent) és generált (lent) szerkezeteken.

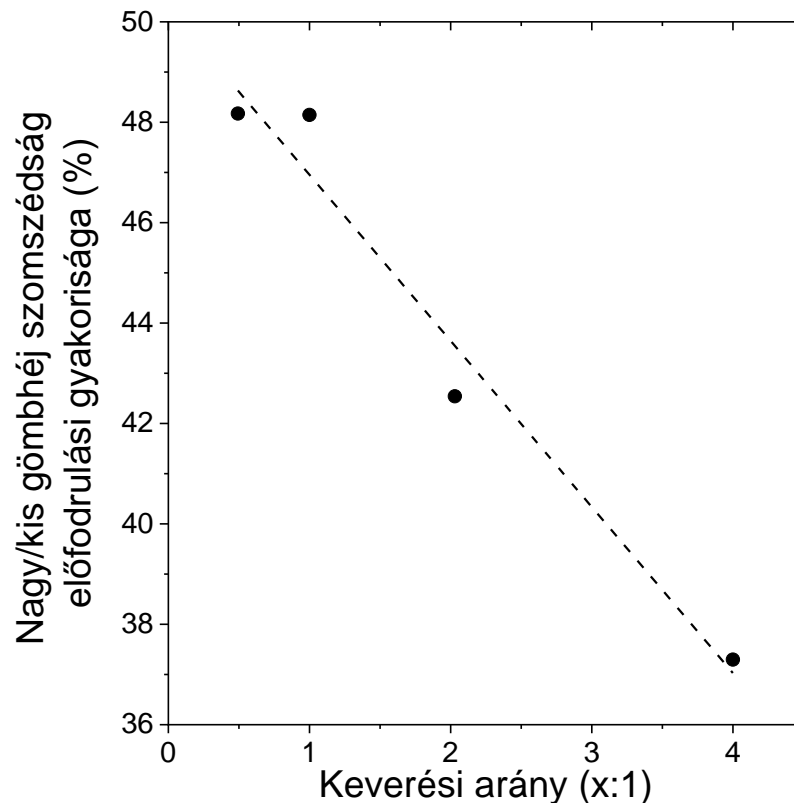
A kovariancia függvényeket ezek után egymás mellett ábrázoltam mind a valós, mind a generált szerkezetek esetében, ahol a 0 helyen az átlagos kovariancia függvény található, attól távolodva pedig minden 120. metszeti kép függvénye látható (43. ábra). A függvényeket vizsgálva megállapítható, hogy nincs igazi különbség a két szerkezet között. Ezt alátámasztja az eltérések négyzetösszegének vizsgálata is, amely egy nagyságrenddel kisebb, mint az átfedő objektumok száma ($SST_{\text{valós}} = 49162,56$, míg az átlagosan átfedő objektumok száma $\sim 322754,86$, $SST_{\text{generált}} = 43270,07$, míg az átlagosan átfedő objektumok száma $\sim 473595,95$). A

generált szerkezeteken látható, hogy a metszeteken belül előfordulnak nagyobb csúcsok, azonban nincs egyértelműen, a metszeteken átívelő rend vagy szimmetria a szerkezetekben, így kijelenthetem, hogy a véletlenszerű szerkezet létrehozása mind valós, mind generált szerkezetek esetén sikeres volt. Mivel mind a valós, mind a generált szerkezetesetén is az eltérés négyzetösszege hasonló, ennek következtében a rendezetlenség is hasonló, tehát a generált szerkezet hasonló a valós szerkezethez. Ezzel bebizonyítottam, hogy ha az elrendeződés hasonló, akkor a szomszédsági relációk is hasonlóak lesznek, tehát felhasználható a generált szerkezet esetében tett megállapításom a valós szerkezet szomszédsági relációjának vizsgálatánál.

Összefoglalva, radiális kovariancia segítségével összehasonlítottam a generált és valós 2:1 arányban kevert szerkezeteket. A vizsgálat során meghatároztam mindkét esetben az adott szerkezetre jellemző radiális kovariancia függvényeket. Ezekről kijelenttem, hogy hasonlóak, tehát a két szerkezet ennek megfelelően hasonló lesz. Az eltérések négyzetösszegének vizsgálatából megállapítottam, hogy a rendezetlenség is hasonló, így tehát ha az átlagos szerkezet is hasonló, valamint az átlagos rendezetlenség is hasonló, akkor a szomszédsági relációk is hasonlóak lesznek, így a generált szerkezeteknél tett megállapítás igaz kell, hogy legyen a valós szerkezetek esetén is.

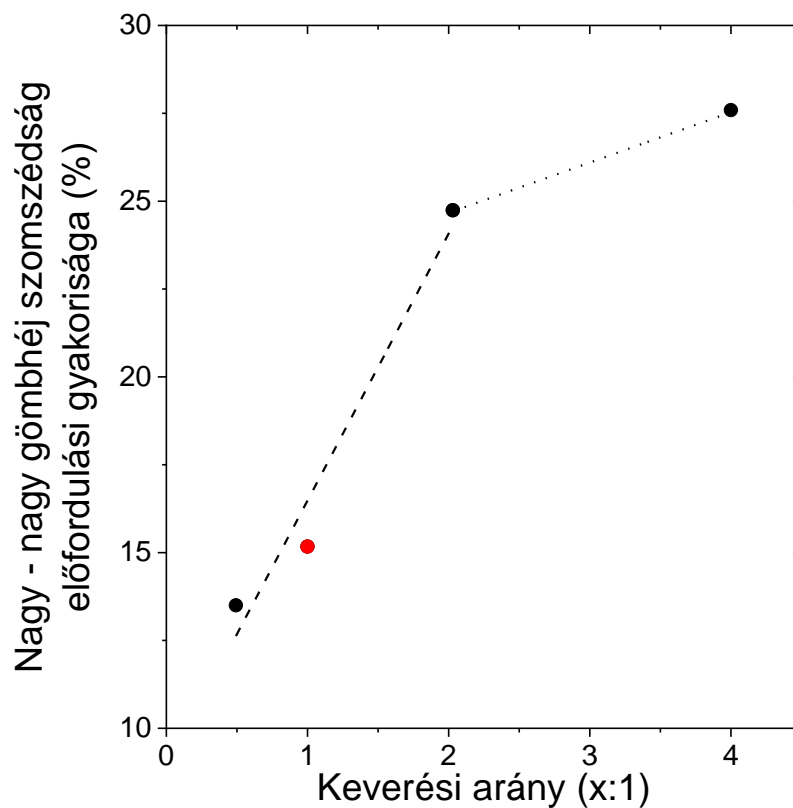
4.3.2 Deformációs mechanizmusok azonosítása a generált szerkezetek segítségével

Az előző fejezetekben megállapítottam, hogy a valós és generált szerkezetekben eltérés található, ha a nagy/nagy gömbhéj szomszédság előfordulási gyakoriságát vizsgálom. A generált szerkezeteken több keverési arány vizsgálata alapján sikerült a szomszédsági viszonyok előfordulási gyakoriságát, illetve az abban található kétféle kialakulási mechanizmust azonosítani. Ebből következőleg a valós szerkezetek esetén hibás a feltételezésem, ami egyetlen lineáris kapcsolatot feltételez a nagy/nagy gömbhéjszomszédságok között (37. ábra). Mivel szinte a legnagyobb térfogatarányban kis gömbhéjak vannak jelen, így megvizsgáltam a nagy/kis gömbhéj előfordulási gyakoriságot is (45. ábra).



44. ábra Nagy/kis gömbhéj szomszédság előfordulási gyakorisága a nagy gömbhéj térfogatarányának változásának függvényében. Jól látható, hogy a trendet itt az 1:1 arányú keverék torzítja el, mivel közel ugyanannyi a nagy/kis gömbhéj szomszédság előfordulási gyakorisága, mint az 1:2 keverék esetén.

Értelemszerű, hogy a nagy gömbhék arányának növelésével a nagy/nagy gömbhék szomszédság növekedni fog, a nagy/kis gömbhéjszomszédság valószínűségének viszont csökkenni kell. Ebben az esetben azonban az 1:2 arányú keverék esetén 48,17% a valószínűsége, hogy a nagy gömbhék szomszédságában kis gömbhék található, az 1:1 keverék esetén is megmarad 48,15% a valószínűség! Mivel a vizsgálatot a kokilla aljához közelebb eső mintákon végeztem el, így feltételezem, hogy ez a jelenség a gyártási folyamatokkal állhat kapcsolatban.



45. ábra Nagy/nagy gömbhék szomszédság előfordulási gyakorisága valós szerkezeten a térfogatarány változtatásának függvényében. A generált szerkezetek vizsgálatából meghatározott trendek alapján már sokkal jobb az illeszkedés, az 1:1 arány feltételezhetően lokálisan eltért a gyártás során, így a pirossal jelölt ponton a valós keverés ~0,9:1.

Ezen ismeretek birtokában újra megvizsgáltam a trendeket a valós szerkezet nagy/nagy gömbhék szomszédsági viszonylatában (45. ábra). Az ábrán pirossal jelöltem a trendet torzító 1:1 keveréket, amelyről így azt feltételezem, hogy a valós keverési aránya közelebb állhat a 0,9:1-hez. A két részből összeadódó trendvonalak már sokkal jobb illeszkedést mutatnak, illetve jó összhangban van a képi információkkal is, miszerint a

4:1 keverék esetén kialakul az összefüggő útvonal, amelynek mentén a repedés a 45° -os átló mentén a minta egyik sarkából el tud jutni a másik sarkába. 1:2, valamint 1:1 minták esetén már nincs összefüggő útvonal, így ott a vízszinteshez közel halad a repedés, mindig a legközelebbi nagy gömbhéj irányába. A váltás a két tönkremeneteli mechanizmus között a 2:1 keverék környékén található, mivel a 45° -os átló mentén is elegendő nagy gömbhéj található a szerkezetben, hogy meginduljon a repedés, viszont még a darab középvonalában vízszintesen is terjed, és ezek egymással versenyeznek, hogy melyik alakít ki hamarabb összefüggő hálózatot a darab egyik szélétől a másikig.

Összefoglalva, diszkrét elemes szimuláció segítségével létrehoztam a valós szerkezetek keverési arányával megegyező ideális, hibáktól mentes (generált) szerkezeteket. Ezen generált szerkezetek esetében is elvégeztem a szomszédsági viszonyok vizsgálatát, és megállapítottam, hogy kétféle trend található a szerkezetben. A keverési arány növelésével meredeken növekszik a nagy/nagy gömbhéj szomszédság előfordulási valószínűsége, majd a váltás a 2:1 keverék környékén figyelhető meg, onnantól hiába növekszik drasztikusan a nagy gömbhéjak térfogataránya, a szomszédságok előfordulási valószínűsége már csak kis mértékben növekszik. Az ellentmondás feloldására megvizsgáltam a valós szerkezeteknél a nagy/kis gömbhéj szomszédság előfordulási gyakoriságát is, és megállapítottam, hogy az 1:1 keverék esetében a várttól eltérően szinte egyáltalán nem csökkent a nagy/kis gömbhéj szomszédság gyakorisága annak ellenére, hogy a nagy/nagy gömbhéj szomszédság gyakorisága némiképp növekedett. Mivel a vizsgált próbatest egy hosszabb darabból került kimunkálásra, így feltételezem, hogy a keverési arány a gyártás közben inhomogén lett a darabon belül, így a vizsgált alsó mintadarab valós keverési aránya az 1:1 helyett közelebb áll a 0,9:1-hez. A felismert kétféle tönkremeneteli mechanizmusban a 2:1 keverék környékén történik a váltás.

5 Összefoglalás

Kutatómunkám során bimodális kompozit fémhabok zömítés hatására bekövetkező szerkezetváltozását vizsgáltam. A szakirodalom a zömítővizsgálatot alap vizsgálatnak tekinti ezen szerkezetek esetében, ám a feldolgozás mélysége sokszor megkérdőjelezhető. Számítógépi tomográfiával kiegészítve a szerkezet változása (megfelelő mintaméret esetén) akár in-situ is követhető, amely új távlatokat nyit meg a szerkezetből kinyerhető információk terén. Kutatómunkámban a szerkezetek viselkedésének alaposabb megértésére fókuszáltam, ezért először gépi tanulás segítségével kidolgoztam egy osztályozó algoritmust, amellyel az egyes jellemző szerkezeti alkotóelemek elkülöníthetők egymástól. Az osztályok segítségével a gyártás is jellemezhető, azonban a tönkremeneteli folyamatok is nyomon követhetők a segítségével.

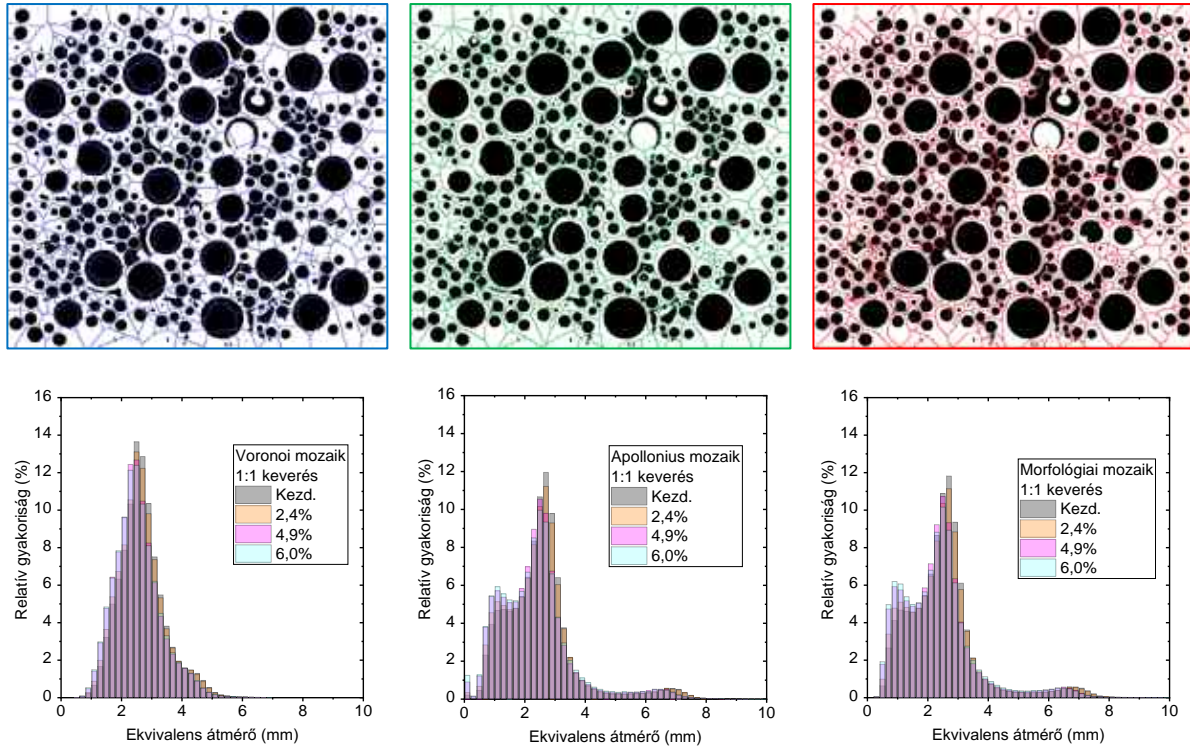
Különböző keverékek esetén is megbízhatóan működik az algoritmus, továbbá a segítségével sikerült azonosítanom, hogy a kétféle töltőanyag keverésének függvényében eltérő törési mechanizmusok fognak érvényesülni a szerkezetben. Az állításom alátámasztásához számítógéppel generált szerkezeteket hoztam létre, és megvizsgáltam, hogy hogyan hatnak az egymás szomszédságában található gömbhéjak egymásra. 4:1 keverési aránynál megállapítottam, hogy a szakirodalomnak megfelelően a 45° -os testátló irányában a nagy gömbhéjak mentén halad a törés. 1:2, valamint 1:1 minták esetén már nincs összefüggő útvonal, így ott a vízszinteshez közel halad a repedés, mindig a legközelebbi nagy gömbhéj irányába. A váltás a két tönkremeneteli mechanizmus között a 2:1 keverék környékén található, mivel a 45° -os átló mentén is elegendő nagy gömbhéj található a szerkezetben, hogy meginduljon a repedés, viszont még a darab középvonalában vízszintesen is terjed, így itt a két mechanizmus egymással versenyez.

Végezetül a 2:1 keverék esetén radiális kovariancia vizsgálatot végeztem a generált és a valós szerkezeteken is. Bebizonyítottam, hogy az átlagos szerkezet hasonló, valamint az átlagos rendezetlenség is hasonló, emiatt a szomszédsági relációk is hasonlóak lesznek, tehát a generált szerkezeteknél tett megállapítás igaz kell, hogy legyen a valós szerkezetek esetén is.

6 Új tudományos eredmények

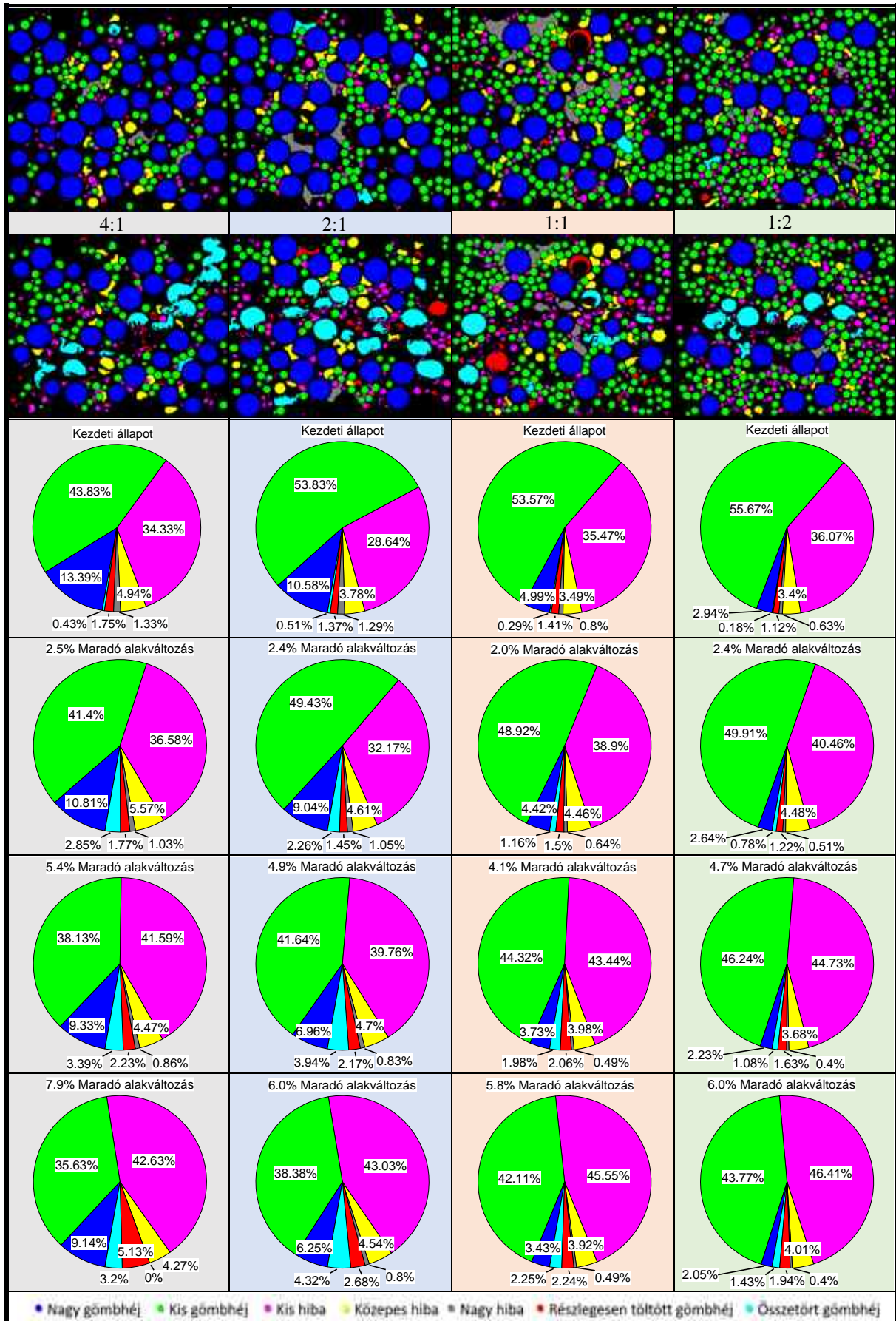
Bimodális kompozit fémhabok számítógépi tomográfias metszeti képeit felhasználva az alábbi új tudományos eredményeket fogalmaztam meg:

- 1) Bimodális kompozit fémhabok kismértékű zömítés ($\epsilon < 8\%$) hatására végbe-menő szerkezetváltozásának jellemzésével – a szövetszerkezetben az alakváltozás hatására megjelenő és változó objektumok (törött gömbhéj, repedés, pórusok, gömbhéjak elmozdulása) leírásával – kapcsolatban a következőket igazoltam:
 - a. Az objektumok tömegközéppontja köré rajzolt Voronoi mozaik nem használható, mivel az egyedi objektumok morfológiájának változása csak részlegesen jelenik meg az mozaik területéből készített ekvivalens átmérő sűrűségfüggvényén.
 - b. Az Apollonius ábra, vagyis az objektumok területéből számolt ekvivalens körlapok köré rajzolt hatósugár szerinti vázszerkezet segítségével (az elnyújtott, szélsőséges objektumok kivételével) meghatározott mozaikterületből készített ekvivalens átmérő sűrűségfüggvénye alapján a szerkezet változása nyomon követhető.
 - c. Az objektumok kontúrvonalát felhasználva készített morfológiai mozaik (illetve mozaik területéből készített ekvivalens átmérő sűrűségfüggvénye) anyagtudományi szempontból hitelesen tükrözi a szerkezet változását.



T. I. ábra Különböző mozaikkészítő technikákkal készült mozaikok illeszkedése bináris képeken (Kék – Voronoi, Zöld – Apollonius, Piros – Morfológiai), továbbá a hozzájuk tartozó ekvivalens átmérő – előfordulási gyakoriság sűrűségfüggvény.

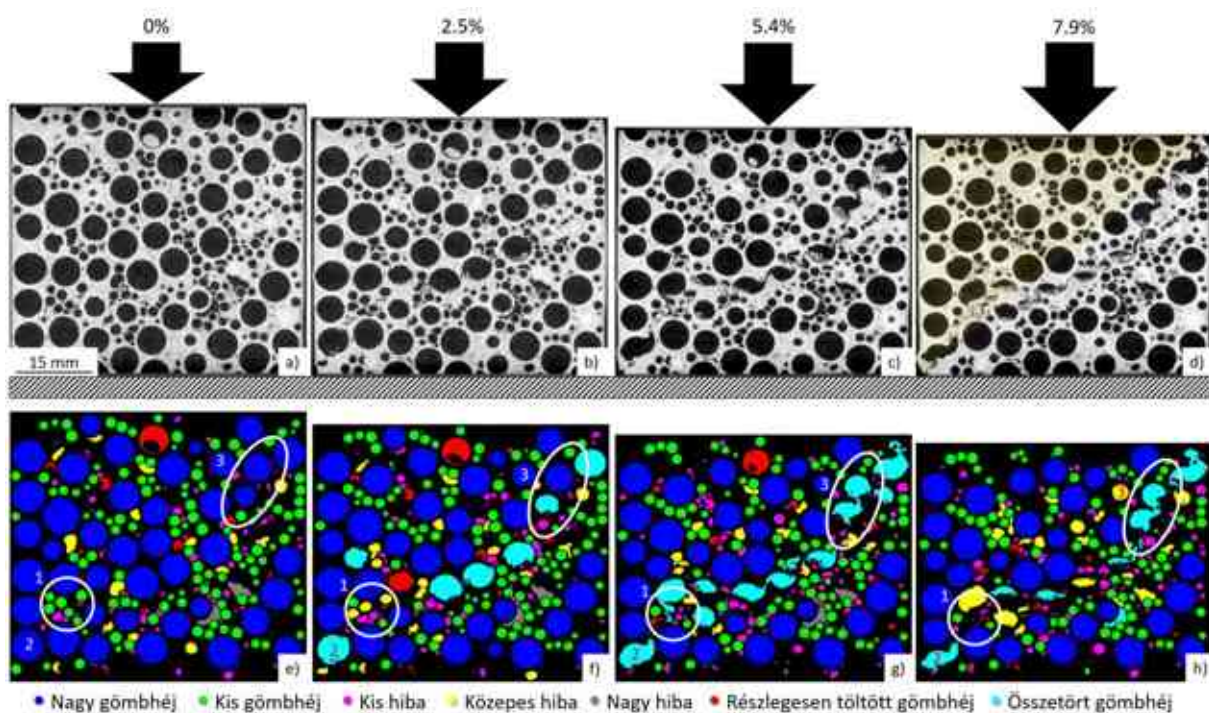
- 2) Igazoltam, hogy a bimodális kompozit fémhabok alakváltozása közben a szerkezetet felépítő objektumok (nagy gömbhéjak, kis gömbhéjak, kis hibák, közepes hibák, nagy hibák, részlegesen töltött gömbhéjak, összetört gömbhéjak) egyedi osztályokba sorolhatók.
 - a. Az objektumok jellemzésére a következő morfológiai paramétereket célszerű használni: körszerűség (R), ekvivalens átmérő(D), nyújtottság (E), legkisebb köré írható téglalap kitöltöttsége (F), valamint az objektumok hatósugara (elhelyezkedése) miatt szükséges figyelembe venni a morfológiai mozaikot (M) is.
 - b. Felügyelt gépi tanulás segítségével (1649 objektumot felhasználva, a kezdeti és alakított állapotok minden 100. metszetén osztályonként 3-4 objektum megjelölésével) a döntési előzményen alapuló véletlenszerű erdő (Gradient Boosted Random Forest, GBRF) módszer 0,1 es tanulási ráta (learning rate) esetén 100 döntőfából álló erdőt használva (a fa maximum 3 szintű, valamint a legkisebb felbontási egység 2) az egyes osztályok elválaszthatók egymástól.



T. II. ábra. Osztályozás különböző térfogatarányban kevert bimodális kompozit fémhabok esetén. A felső képsor a metszetsorozatok mediánjait mutatja be kezdeti állapotban, míg az alsó ugyanezen metszeti képek legnagyobb alakváltozást elszenvedett párjai. A

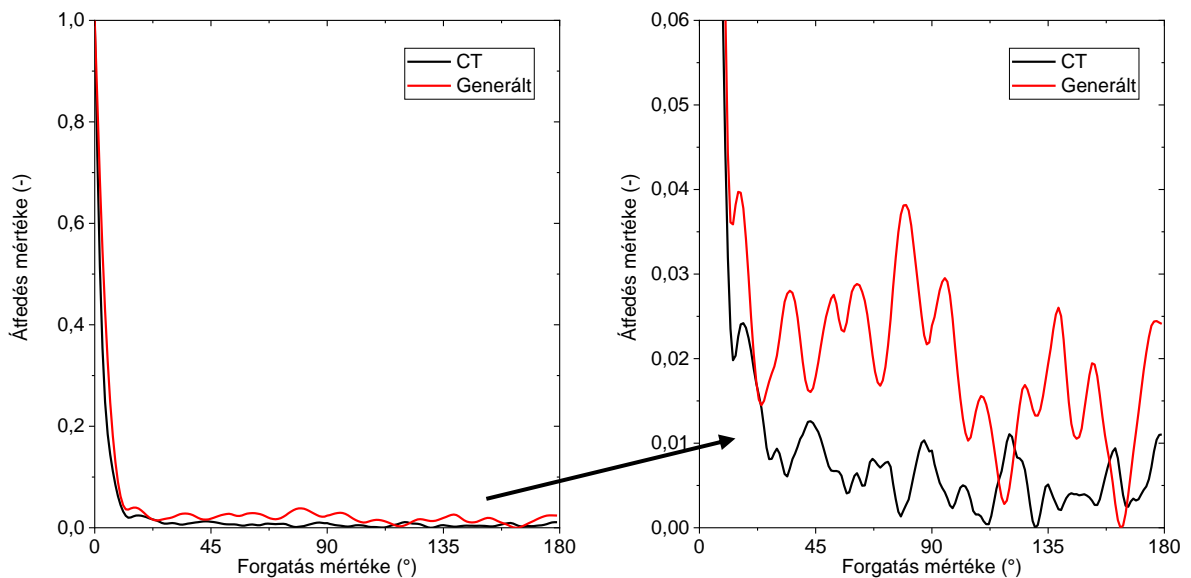
kördiagramok oszlopok szerint rendezve mutatják be az osztályok arányait a kezdeti állapotban, illetve azok változását az alakítás egyes lépéseinek hatására.

- 3) A döntési előzményen alapuló véletlenszerű erdő segítségével igazoltam, hogy a bimodális kompozit fémhab kismértékű zömítésekor ($\epsilon < 8\%$) létrejövő szövetszerkezet az egyes osztályba tartozó objektumok darabszámának változása alapján írható le: a kis gömbhéjak kis hibákká alakulnak át; a nagy hibák először közepes hibákká, a későbbiekben kis hibákká zsugorodnak; a nagy gömbhéjak pedig összetört gömbhéjakká alakulnak át. 4:1 keverési arány esetén a félig kitöltött gömbhéjak gyakorisága a $\epsilon \sim 8\%$ alakítás hatására jelentősen növekszik, mert a gömbhéjak összetörése megnöveli a kitöltöttségi tényezőt. Az osztályozás eredményéből megállapítottam, hogy a közepes hibáktól eltekintve minden osztály változása monoton, kivéve a 4:1 keverék törött gömbhéjait, ahol egy maximumos függvénnyel írható le az alakítás hatására bekövetkező változás.



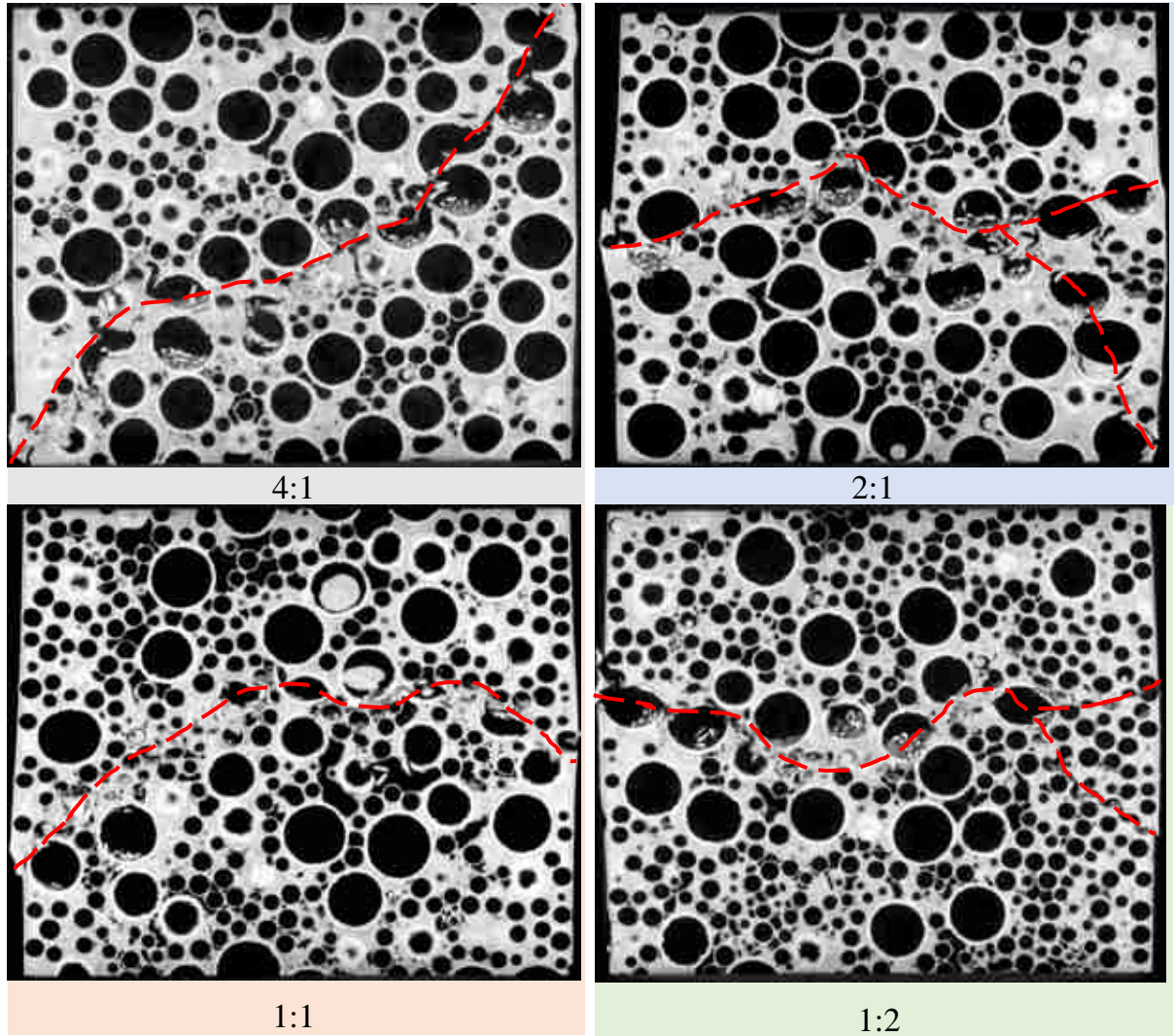
T. III. ábra Törési vonal kialakulása és fejlődése a 4:1 keverék esetén ugyanazon látótéren belül. A felső háromszög az alakítás során a frontális síkban is elmozdul (sárgával jelzett terület). a) -d): ugyanazon régió metszeti képei. e) -h): Feldolgozott, és osztályozott objektumok a régióban. 1. terület: kis gömbhéjak alakváltozása kis hibákká. 2. terület: Különálló nagy gömbhéj alakváltozása. 3. terület: két nagy gömbhéj alakváltozásának fázisai. Egyedi törés, összeérés, átalakulás egy objektummá. Bubonyi és m. társai „Microstructural characterization of...” című cikk [61] 4. ábrája nyomán

- 4) A radiális kovariancia alkalmas a valós és generált szerkezetek (CemfDEM, 15 000 gömböt ejtve egy 0,15 m átmérőjű, 0,3 m magas tégelybe előre definiált kétféle méreteloszlással) összehasonlítására.
- a generált és valós szerkezetek radiális kovariancia függvénye matematikailag hasonló.
 - a radiális kovariancia függvényeknek a generált és a valós szerkezetek esetén számolt eltérései négyzetösszege alapján megállapítottam, hogy mindkét szerkezet rendezetlensége, ebből következőleg a szomszédsági viszonyaik is hasonlóak.

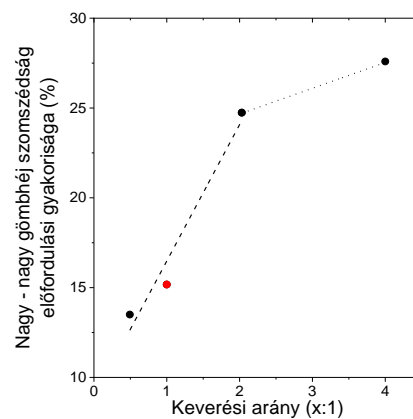
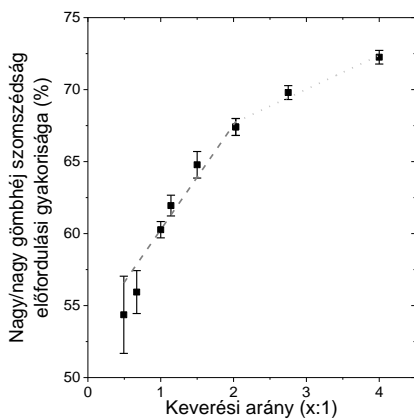


T. IV. ábra 2:1 arányban kevert valós és generált szerkezet átlagos radiális kovariancia függvénye.

- 5) A zömítés irányát tartalmazó két fősíkban (ZX és ZY) készített számítógépi tomográfias metszeti felvételeket elemezve az objektumok szomszédsági relációit vizsgálva a törési folyamat leírható. A módszer segítségével a különböző arányban kevert bimodális kompozit fémhabok tönkremenetelével kapcsolatban az alábbiakat igazoltam:
- a. Az irodalomban leírt, és általánosan elfogadott alakítás elmélettel ellentétben (miszerint a darabban 45° -os nyomógútlák alakulnak ki, továbbá a tönkremenetel rendszerint ebben a 45° -os sávban valósul meg) a deformációs sáv nem kizárólag a testátló mentén jön létre. A morfológiai mozaikot felhasználva igazoltam, hogy a repedés a nagy gömbhéjak térbeli elhelyezkedését követi.
 - b. A 4:1 keverék esetén a testátló mentén halad a repedés. A 1:2, 1:1 keverékek esetén nincs összefüggő gömbhéjszomszédság a 45° -os átlóban, így ott nincs kitüntetett irány a repedés terjedésénél sem.
 - c. A diszkrét elemes szimuláció segítségével (CemfDEM, 15 000 gömböt ejtve egy 0,15 m átmérőjű, 0,3 m magas téglébe előre definiált kétféle méreteloszlással) generált szerkezetek felhasználásával igazoltam, hogy a keverési arány növelésével meredeken, lineárisan növekszik a valószínűsége a nagy/nagy gömbhéj szomszédság kialakulásának. A váltás a 2:1 keverék környékén figyelhető meg, onnantól hiába növekszik drasztikusan a nagy gömbhéjak térfogataránya, a nagy/nagy szomszédság előfordulási valószínűsége már csak kis mértékben növekszik.



T. V Különböző keverékek frontális metszetsorozatának mediánjai. Piros szaggatott vonal jelöli a törés útját. A 4:1 keveréknél az irodalommal egybevágó a viselkedés, de az 1:1 és 1:2 esetén nincs kitüntetett irány. A 2:1 keveréknél a vízszintes törési sík is megfigyelhető, de a 45°-os átlóban is majdnem vágig ér a deformáció.



T. VI. ábra Nagy/nagy gömbháj szomszédság előfordulási gyakorisága generált (balra), valamint valós (jobbra) szerkezetek esetén. A két trend közötti átmenet a 2:1 keverési aránynál található.

7 Tudományos eredmények hasznosulása

A disszertációban ismertetett eljárások elősegíthetik a (bimodális) kompozit fémhabok gyártástechnológiájának alaposabb megértését, finomítását. A bemutatott osztályozó algoritmus segítségével objektíven minősíthető a szerkezet, akár a gyártást követően azonnal, a mintadarab roncsolása nélkül.

A tönkremeneteli folyamatok ismeretében, azok előrejelzésével egyedi igényekhez igazíthatók az elkészült szerkezetek, amelyek tovább segítik a nagyteljesítményű kompozit fémhabok elterjedését.

Az osztályozás során létrehozott algoritmus könnyedén bővíthető további alakjellemzőkkel, megfelelő tanítás után pedig bármilyen kompozit szerkezet második fázisának osztályozására alkalmassá tehető.

Summary

In this research, I investigated the structural change of bimodal composite metal foams due to compaction. The literature considers compaction testing as the primary test for these structures, but the processing depth often needs improvement. Complemented by computer tomography, structural changes (if the sample size is suitable) can even be followed in situ, which opens up new horizons in the extractable information from the structure. In my research work, I focused on a more thorough understanding of the behavior of structures, so I first developed a classification algorithm with the help of machine learning, which can be used to separate the individual characteristic structural components from each other. With the help of classes, production can also be characterized. Moreover, leading deformation processes can also be monitored with its help.

The algorithm works reliably even with different mixtures. With its help, I could identify that different fracture mechanisms will prevail in the structure depending on the mixing of the two types of fillers. I created computer-generated structures to support my statement and examined how the adjacent spherical shells would interact. At a mixing ratio of 4:1, I found that, following the literature, the fracture proceeds along the large spherical shells in the direction of the 45° diagonal plane. In the case of 1:2 and 1:1 samples, there is no longer a continuous path, so the crack moves close to the horizontal line, always in the direction of the nearest large spherical shell. The switch between the two fracture mechanisms is found around the 2:1 mixture since there is enough large spherical shell in the structure even along the 45° diagonal to initiate the crack, but it also propagates horizontally close to the center line, so here the two mechanisms compete with each other.

Finally, in the case of the 2:1 mixture, I performed a radial covariance analysis on both the generated and the real structures. I proved that the average structure is similar, as well as the average disorder is similar. Because of this, the neighborhood relations will also be similar, so the statement made for generated structures must be true for real structures as well.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Gácsi Zoltánnak és Dr. Barkóczy Péternek az évek során biztosított türelmes és kitartó témavezetésért, mentorálásáért és szakmai koordinálásáért.

Hálával tartozom Dr. Orbulov Imrének, amiért részt vehettem az MTA – BME Lendület Kompozit Fémhabok kutatócsoport, valamint az NKFIH OTKA-FK_21 138505 kutatócsoport munkájában, továbbá köszönöm Dr. Kemény Alexandrának a kutatásomhoz használt mintadaraboknál, illetve a kutatás eredményeként elkészült színvonalas ábráknál nyújtott közreműködését.

Hálával tartozom családomnak és barátaimnak a folytonos támogatásukért, amely nélkül ez a dolgozat nem készülhetett volna el.

A kutatómunkámból készített publikációk, illetve szakmai anyagok bemutatása részben az OTKA-FK_21 138505 projekt keretében, részben pedig a kutatási tevékenységem során elnyert Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP) keretein belül valósult meg.

A témához kapcsolódó publikációk

[2] Kemény, A., Leveles, B., Bubonyi, T., és Orbulov, I.N. (2021) Effect of particle size and volume ratio of ceramic hollow spheres on the mechanical properties of bimodal composite metal foams. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, **140**, 106152.

[20] Leveles, B., Kemény, A., Bubonyi, T., és Orbulov, I.N. (2021) Manufacturing and Comparison of Sr Modified or Unmodified AlSi12 Eutectic Alloy Matrix Unimodal and Bimodal Composite Metal Foams. *Adv. Eng. Mater.*, 2100384.

[62] Bubonyi, T., Barkóczy, P., Kemény, A., és Gácsi, Z. (2024) Microstructural characterization of bimodal composite metal foams under compression with machine learning. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, 108292.

Tudományos előadások:

a) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Gácsi Zoltán: „*Számítógéppel generált és komputertomográffal készített felvételek összehasonlítása*” Országos Anyagtudományi Konferencia, 2021, Balatonkenese

b) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*Válós habszerkezetek vizsgálata*” Országos Röntgentomográfiai Fórum 2022, Veszprém

c) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*In situ tomográfia alkalmazásának előnyei a szerkezetvizsgálatba*” XXX. Hőkezelő és Anyagtudomány a Gépgyártásban Országos Konferencia és Szakkiállítás 2022, Balatonfüred

d) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*Quantitative analysis of Composite metal foams*” Országos Röntgentomográfiai Fórum 2023, Balatonalmádi

e) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*Kompozit fémhab szerkezetének kvantitatív vizsgálata*” Országos Anyagtudományi Konferencia, 2023, Balatonkenese

f) Bubonyi Tamás, Barkóczy Péter, Kemény Alexandra, Gácsi Zoltán: „*Bimodális kompozit fémhab zömítés hatására kialakuló szerkezetének jellemzése gépi tanulás segítségével*” Országos Röntgentomográfiai Fórum 2024, Veszprém

Irodalomjegyzék

1. Orbulov, I.N., Kemény, A., Filep, Á., és Gácsi, Z. (2019) Compressive characteristics of bimodal aluminium matrix syntactic foams. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, **124**, 105479.
2. Kemény, A., Leveles, B., Bubonyi, T., és Orbulov, I.N. (2021) Effect of particle size and volume ratio of ceramic hollow spheres on the mechanical properties of bimodal composite metal foams. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, **140**, 106152.
3. Kader, M.A., Islam, M.A., Hazell, P.J., Escobedo, J.P., Saadatfar, M., Brown, A.D., és Appleby-Thomas, G.J. (2016) Modelling and characterization of cell collapse in aluminium foams during dynamic loading. *Int. J. Impact Eng.*, **96**, 78–88.
4. Zhou, B., Ku, Q., Wang, H., és Wang, J. (2020) Particle classification and intra-particle pore structure of carbonate sands. *Eng. Geol.*, **279**, 105889.
5. Singh, S., és Bhatnagar, N. (2018) A survey of fabrication and application of metallic foams (1925–2017). *J. Porous Mater.*, **25** (2), 537–554.
6. Banhart, J. (2018) 4.14 Production of Metal Foams, in *Comprehensive Composite Materials II*, Elsevier, o. 347–363.
7. Kulshreshtha, A., és Dhakad, S.K. (2020) Preparation of metal foam by different methods: A review. *Mater. Today Proc.*, **26**, 1784–1790.
8. García-Moreno, F. (2016) Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production. *Materials*, **9** (2), 85.
9. Changdar, A., és Chakraborty, S.S. (2021) Laser processing of metal foam - A review. *J. Manuf. Process.*, **61**, 208–225.
10. Hernández-Nava, E., Smith, C.J., Derguti, F., Tammam-Williams, S., Léonard, F., Withers, P.J., Todd, I., és Goodall, R. (2015) The effect of density and feature size on mechanical properties of isostructural metallic foams produced by additive manufacturing. *Acta Mater.*, **85**, 387–395.

11. Movahedi, N., Conway, S., Belova, I.V., Murch, G.E., és Fiedler, T. (2019) Influence of particle arrangement on the compression of functionally graded metal syntactic foams. *Mater. Sci. Eng. A*, **764**, 138242.
12. Bazzaz Bonabi, S., Kahani Khabushan, J., Kahani, R., és Honarbakhsh Raouf, A. (2014) Fabrication of metallic composite foam using ceramic porous spheres “Light Expanded Clay Aggregate” via casting process. *Mater. Des.*, **64**, 310–315.
13. Orbulov, I.N., Szlancsik, A., Kemény, A., és Kincses, D. (2020) Compressive mechanical properties of low-cost, aluminium matrix syntactic foams. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, **135**, 105923.
14. Movahedi, N., Murch, G.E., Belova, I.V., és Fiedler, T. (2020) Manufacturing and compressive properties of tube-filled metal syntactic foams. *J. Alloys Compd.*, **822**, 153465.
15. Wright, A., és Kennedy, A. (2017) The Processing and Properties of Syntactic Al Foams Containing Low Cost Expanded Glass Particles. *Adv. Eng. Mater.*, **19** (11), 1600467.
16. Marx, J., és Rabiei, A. (2017) Overview of Composite Metal Foams and Their Properties and Performance. *Adv. Eng. Mater.*, **19** (11), 1600776.
17. Su, M., Wang, H., Hao, H., és Fiedler, T. (2020) Compressive properties of expanded glass and alumina hollow spheres hybrid reinforced aluminum matrix syntactic foams. *J. Alloys Compd.*, **821**, 153233.
18. Luong, D.D., Strbik, O.M., Hammond, V.H., Gupta, N., és Cho, K. (2013) Development of high performance lightweight aluminum alloy/SiC hollow sphere syntactic foams and compressive characterization at quasi-static and high strain rates. *J. Alloys Compd.*, **550**, 412–422.
19. Sahu, S., Ansari, Mohd.Z., Mondal, D.P., és Cho, C. (2019) Quasi-static compressive behaviour of aluminium cenosphere syntactic foams. *Mater. Sci. Technol.*, **35** (7), 856–864.

20. Leveles, B., Kemény, A., Bubonyi, T., és Orbulov, I.N. (2021) Manufacturing and Comparison of Sr Modified or Unmodified AlSi12 Eutectic Alloy Matrix Unimodal and Bimodal Composite Metal Foams. *Adv. Eng. Mater.*, 2100384.
21. Linul, E., Marsavina, L., és Kováčik, J. (2017) Collapse mechanisms of metal foam matrix composites under static and dynamic loading conditions. *Mater. Sci. Eng. A*, **690**, 214–224.
22. Fiedler, T., Al-Sahlani, K., Linul, P.A., és Linul, E. (2020) Mechanical properties of A356 and ZA27 metallic syntactic foams at cryogenic temperature. *J. Alloys Compd.*, **813**, 152181.
23. Linul, E., Lell, D., Movahedi, N., Codrean, C., és Fiedler, T. (2019) Compressive properties of zinc syntactic foams at elevated temperatures. *Compos. Part B Eng.*, **167**, 122–134.
24. Hangai, Y., Saito, K., Utsunomiya, T., Kuwazuru, O., és Yoshikawa, N. (2014) Fabrication and compression properties of functionally graded foam with uniform pore structures consisting of dissimilar A1050 and A6061 aluminum alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, **613**, 163–170.
25. Hangai, Y., Takahashi, K., Yamaguchi, R., Utsunomiya, T., Kitahara, S., Kuwazuru, O., és Yoshikawa, N. (2012) Nondestructive observation of pore structure deformation behavior of functionally graded aluminum foam by X-ray computed tomography. *Mater. Sci. Eng. A*, **556**, 678–684.
26. Jiroušek, O., Doktor, T., Kytýř, D., Zlámal, P., Fíla, T., Koudelka, P., Jan-dejsek, I., és Vavřík, D. (2013) X-ray and finite element analysis of deformation response of closed-cell metal foam subjected to compressive loading. *J. Instrum.*, **8** (02), C02012–C02012.
27. Kozma, I., és Zsoldos, I. (2019) CT-based tests and finite element simulation for failure analysis of syntactic foams. *Eng. Fail. Anal.*, **104**, 371–378.

28. Kader, M.A., Islam, M.A., Saadatfar, M., Hazell, P.J., Brown, A.D., Ahmed, S., és Escobedo, J.P. (2017) Macro and micro collapse mechanisms of closed-cell aluminium foams during quasi-static compression. *Mater. Des.*, **118**, 11–21.
29. Zhuang, W., Wang, E., és Zhang, H. (2023) Prediction of compressive mechanical properties of three-dimensional mesoscopic aluminium foam based on deep learning method. *Mech. Mater.*, **182**, 104684.
30. Hart, G.L.W., Mueller, T., Toher, C., és Curtarolo, S. (2021) Machine learning for alloys. *Nat. Rev. Mater.*, **6** (8), 730–755.
31. Feng, S., Zhou, H., és Dong, H. (2019) Using deep neural network with small dataset to predict material defects. *Mater. Des.*, **162**, 300–310.
32. Abbassi, F., Belhadj, T., Mistou, S., és Zghal, A. (2012) Parameter identification of a mechanical ductile damage using Artificial Neural Networks in sheet metal forming. *Mater. Des.*, **45**, 605–615.
33. Schooling, J.M., Brown, M., és Reed, P.A.S. (1999) An example of the use of neural computing techniques in materials science—the modelling of fatigue thresholds in Ni-base superalloys. *Mater. Sci. Eng. A*, **260** (1), 222–239.
34. Rovinelli, A., Guilhem, Y., Proudhon, H., Lebensohn, R.A., Ludwig, W., és Sangid, M.D. (2017) Assessing reliability of fatigue indicator parameters for small crack growth via a probabilistic framework. *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, **25** (4), 045010.
35. Rovinelli, A., Sangid, M., Proudhon, H., Guilhem, Y., Lebensohn, R., és Ludwig, W. (2018) Predicting the 3D Fatigue Crack Growth Rate of Short Cracks Using Multimodal Data via Bayesian Network: in-situ Experiments and Crystal Plasticity Simulations. *J. Mech. Phys. Solids*, **115**, 208–229.
36. Paulson, N.H., Priddy, M.W., McDowell, D.L., és Kalidindi, S.R. (2018) Data-driven reduced-order models for rank-ordering the high cycle fatigue performance of polycrystalline microstructures. *Mater. Des.*, **154**, 170–183.

37. Maroof, M.A., Mahboubi, A., Noorzad, A., és Safi, Y. (2020) A new approach to particle shape classification of granular materials. *Transp. Geotech.*, **22**, 100296.
38. Alrfou, K., Kordijazi, A., Rohatgi, P., és Zhao, T. (2022) Synergy of unsupervised and supervised machine learning methods for the segmentation of the graphite particles in the microstructure of ductile iron. *Mater. Today Commun.*, **30**, 103174.
39. Stan, T., Thompson, Z.T., és Voorhees, P.W. (2020) Optimizing convolutional neural networks to perform semantic segmentation on large materials imaging datasets: X-ray tomography and serial sectioning. *Mater. Charact.*, **160**, 110119.
40. Trejo Navas, V.M., Buljac, A., Hild, F., Morgeneyer, T., Helfen, L., Bernacki, M., és Bouchard, P.-O. (2019) A comparative study of image segmentation methods for micromechanical simulations of ductile damage. *Comput. Mater. Sci.*, **159**, 43–65.
41. Ferenc, J.-S., és Néda, Z. (2007) On the size distribution of Poisson Voronoi cells. *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, **385** (2), 518–526.
42. Gácsi Z. (2003) AZ ANYAGOK SZÖVETSZERKEZETÉNEK MORFOLÓGIAI ANIZOTRÓPIÁJA ÉS RENDEZETTSÉGE. *MTA Doktori Értek.*, 164.
43. Morley, D.O., és Wilson, M. (2020) Voronoi diagrams in quasi-2D hard sphere systems. *J. Stat. Mech. Theory Exp.*, **2020** (9), 093201.
44. Wang, X., Gong, J., An, A., Zhang, K., és Nie, Z. (2019) Random generation of convex granule packing based on weighted Voronoi tessellation and cubic-polynomial-curve fitting. *Comput. Geotech.*, **113**, 103088.
45. Kruglova, A., Roland, M., Diebels, S., Dahmen, T., Slusallek, P., és Mücklich, F. (2017) Modelling and characterization of ductile fracture surface in Al-Si alloys by means of Voronoi tessellation. *Mater. Charact.*, **131**, 1–11.

46. CGAL 5.5.1 - 2D Apollonius Graphs (Delaunay Graphs of Disks): User Manual.
47. Park, J., és Shibutani, Y. (2007) Weighted Voronoi tessellation technique for internal structure of metallic glasses. *Intermetallics*, **15** (2), 187–192.
48. Emiris, I.Z., és Karavelas, M.I. (2006) The predicates of the Apollonius diagram: Algorithmic analysis and implementation. *Comput. Geom.*, **33** (1–2), 18–57.
49. Preteux, E. (1992) Watershed and skeleton by influence zones: A distance-based approach. *J. Math. Imaging Vis.*, **1** (3), 239–255.
50. Gácsi Zoltán, Simon Andrea, és Pázmán Judit (2011) *Fémkompozitok*, Miskolci Egyetem, Miskolc.
51. Świdarska-Środa, A., Wejrzanowski, T., Kurzydłowski, K.J., és Wyrzykowski, J.W. (2003) Quantitative analysis of Al₂O₃ particles in Al₃Ti/Al₂O₃/Al composites. *Mater. Charact.*, **51** (2–3), 141–146.
52. Rozniatowski, K., Wejrzanowski, T., Gorny, G., és Raczka, M. (2009) Description of the homogeneity of material microstructures: using computer-aided analysis. *Int. J. Microstruct. Mater. Prop.*, **4** (2), 207.
53. Dexheimer, E., és Davison, A.J. Learning a Depth Covariance Function.
54. Che, W., Liu, J., Li, H., He, C., Bai, Y., Song, Z., Wang, Y., Qian, W., és Chen, Z. (2021) Experimental investigation and discrete element method simulation on mechanical properties and failure mechanism of polymer-stabilized sand. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, **81** (1), 22.
55. Pichler, M., Haddadi, B., Jordan, C., Norouzi, H., és Harasek, M. (2021) Effect of particle contact point treatment on the CFD simulation of the heat transfer in packed beds. *Chem. Eng. Res. Des.*, **165**, 242–253.
56. Norouzi, H.R. (2020) Simulation of pellet coating in Wurster coaters. *Int. J. Pharm.*, **590**, 119931.

57. Göbel, F., Golshan, S., Norouzi, H.R., Zarghami, R., és Mostoufi, N. (2019) Simulation of granular mixing in a static mixer by the discrete element method. *Powder Technol.*, **346**, 171–179.
58. Okhovat-Alavian, S.M., Shabanian, J., Norouzi, H.R., Zarghami, R., Chaouki, J., és Mostoufi, N. (2019) Effect of interparticle force on gas dynamics in a bubbling gas–solid fluidized bed: A CFD-DEM study. *Chem. Eng. Res. Des.*, **152**, 348–362.
59. Bagheri, M., Norouzi, H.R., Hossienizadeh, S.M.J., Es-haghi, A., és Ghassempour, A. (2018) Development and modeling of two-dimensional fast protein liquid chromatography for producing nonstructural protein-free foot-and-mouth disease virus vaccine. *J. Chromatogr. B*, **1096**, 113–121.
60. Baranau, V., és Tallarek, U. (2017) Another resolution of the configurational entropy paradox as applied to hard spheres. *J. Chem. Phys.*, **147** (22), 224503.
61. Šmilauer, V., Catalano, E., Chareyre, B., Dorofeenko, S., Duriez, J., Dyck, N., Eliáš, J., Er, B., Eulitz, A., Gladky, A., Guo, N., Jakob, C., Kneib, F., Kozicki, J., Marzougui, D., Maurin, R., Modenese, C., Scholtès, L., Sibille, L., és Yuan, C. (2015) *Yade Documentation 2nd ed.*
62. Bubonyi, T., Barkóczy, P., Kemény, A., és Gácsi, Z. (2024) Microstructural characterization of bimodal composite metal foams under compression with machine learning. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, 108292.
63. Bindu, H., és Prasad, K. (2012) An Efficient Medical Image Segmentation Using Conventional OTSU Method. *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, **38**.
64. Alzubi, J., Nayyar, A., és Kumar, A. (2018) Machine Learning from Theory to Algorithms: An Overview. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1142** (1), 012012.
65. Demšar, J., Curk, T., Erjavec, A., Gorup, Č., Hočevár, T., Milutinovič, M., Možina, M., Polajnar, M., Toplak, M., Starič, A., Štajdohar, M., Umek, L., Žagar, L.,

Žbontar, J., Žitnik, M., és Zupan, B. (2013) Orange: Data Mining Toolbox in Python. *J. Mach. Learn. Res.*, **14**, 2349–2353.

66. Kowalek, P., Loch-Olszewska, H., és Szwabiński, J. (2019) Classification of diffusion modes in single-particle tracking data: Feature-based versus deep-learning approach. *Phys. Rev. E*, **100**.

67. Shen, P., Fujii, H., Matsumoto, T., és Nogi, K. (2004) Critical Factors Affecting the Wettability of α -Alumina by Molten Aluminum. *J. Am. Ceram. Soc.*, **87** (11), 2151–2159.

68. Shao, N., Dai, J.W., Li, G.Y., Nakae, H., és Hane, T. (2004) Effect of La on the wettability of Al₂O₃ by molten aluminum. *Mater. Lett.*, **58** (14), 2041–2044.

69. Wojdyr, M. (2010) Fityk: a general-purpose peak fitting program. *J. Appl. Crystallogr.*, **43** (5–1), 1126–1128.

70. Saltykov, S.A. (1958) Stereometric metallography. *Metall. Mosc.*, **267**.

71. Póliska, C., Gácsi, Z., és Barkóczy, P. (2006) The Effect of Melt Flow on the Dendrite Morphology. *Mater. Sci. Forum*, **508**, 169–174.

Melléklet