



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

**Számítógépi tomográfia alkalmazása az öntvényekben
előforduló pórusok és a szakítóvizsgálattal
meghatározható mechanikai tulajdonságok közötti
kapcsolat elemzésére**

Doktori értekezés

Készítette:

Hargitai-Kazup Ágota, okleveles kohómérnök

Tudományos vezető:

Prof. Dr. Gácsi Zoltán

**2025
Miskolc**

Tartalomjegyzék

A disszertációban használt rövidítések jegyzéke.....	1
Témavezetői ajánlás	4
Bevezetés.....	5
1 Irodalmi áttekintés	6
1.1 Öntvényekben előforduló pórusok	6
1.2 Alacsony nyomású öntéstechnológia	8
1.3 Kvantitatív porozitás vizsgálati módszerek.....	8
1.4 Pórusok hatása a mechanikai tulajdonságokra	16
1.5 Gépi tanulás alkalmazása változók közötti összefüggések vizsgálatára	21
1.5.1 Feltáró adatelemzés	21
1.5.2 Regressziós modellezés	23
2 Tudományos nyitott kérdések	28
3 Csökkentett nyomáson dermedő próbák porozitása.....	30
3.1 Vizsgálatok.....	30
3.1.1 Háromdimenziós felvételek (CT).....	31
3.1.2 Kétdimenziós felvételek (CT, OM)	34
3.2 A porozitás vizsgálati módszerek alkalmazhatósága.....	35
3.3 Összegzés.....	44
4 Szakító próbatestek pórusszerkezete.....	45
4.1 Vizsgálatok.....	45
4.1.1 Számítógépi tomográfiás (CT) felvételek.....	46
4.1.2 Töretfelület jellemzése	50
4.1.3 Feltáró adatelemzés és regressziós modellezés	52
4.2 A pórusok és a mechanikai tulajdonságok kapcsolata.....	56
4.2.1 Prediktív regressziós modellek	56
4.2.2 A pórusszerkezet hatása a mechanikai tulajdonságokra	64
4.3 A pórusok jellemzőinek és a törés helyének összefüggése	67
4.4 Összegzés.....	70
5 Összefoglalás	72
6 Új tudományos eredmények.....	73
7 Az eredmények hasznosulása.....	80
Summary	81
Köszönetnyilvánítás	82
Az eredményekhez kapcsolódó írásbeli publikációk jegyzéke	83
Nyilatkozat a mesterséges intelligencia (MI) használatáról	83
Irodalomjegyzék.....	84

A disszertációban használt rövidítések jegyzéke

Általános és technológiai jelölések

Jelölés (mértékegység)	Megnevezés
RPT	Reduced pressure test, azaz csökkentett nyomáson dermedő próba.
A356	AlSi7Mg0,3 ötvözet.
LPDC	Low-pressure die-casting, azaz alacsony nyomású öntéstechnológiával előállított öntvény.
HPDC	High-pressure die-casting, azaz nagy nyomású öntéstechnológiával előállított öntvény.
G-DC	Gravity die-casting, azaz gravitációs öntéstechnológiával előállított öntvény.
AC	As-casted, azaz öntött állapotú öntvény (nem hőkezelt).
T6	T6 hőkezelés: homogenizálás után vízben edzés és öregbítés.
CT	Computed tomography, azaz számítógépi tomográfia.
OM	Optical microscopy, azaz optikai mikroszkópia.
ρ (g/cm ³)	Sűrűség.
m (g)	Tömeg.
V (mm ³)	Térfogat.
S (mm ²)	Felület.
A (mm ²)	Terület.
L (mm)	Kerület.
Spher (-)	Gömbszerűség.
Circ (-)	Körszerűség.

A csökkentett nyomáson dermedő próbák vizsgálatához kapcsolódó jelölések

$V_{V, clo}^{total-RPT}$ (%)	Számítógépi tomográfiával (CT) 3D-ben leképezett csökkentett nyomáson dermedő próbák (RPT) pórus térfogataránya öt ciklusú morfológiai transzformáció után (zárt). Alkalmazott módszer: 3D CT.
$V_{V, cyl-RPT}$ (%)	CT-vel leképezett RPT próbák belső, hengeres (virtuális módosítással létrehozott) térfogatának pórus térfogataránya. Alkalmazott módszer: 3D CT.
$V_{V, clo}^{cyl-RPT}$ (%)	CT-vel leképezett RPT próbák öt ciklusban zárt, belső, hengeres térfogatának pórus térfogataránya. Alkalmazott módszer: 3D CT.
$A_{A, CT}^{total-RPT}$ (%)	CT-vel leképezett RPT próbák teljes térfogatát érintő 2D-s tomográfias hosszmetsetek pórus területaránya. Alkalmazott módszer: 2D CT.
$A_{A, OM}^{total-RPT}$ (%)	Az optikai mikroszkóppal (OM) vizsgált teljes RPT próbák közép-hosszmetsetének pórus területaránya.
$\Delta_{rel} V_{V, clo-eff}^{RPT}$ (%)	A $V_{V, clo}^{cyl-RPT}$ (számlálóban) és a $V_{V, cyl-RPT}$ (nevezőben) közötti relatív pórus térfogatarány eltérés.
$\Delta_{rel} V_{V, vol-eff, RPT}$ (%)	A $V_{V, clo}^{cyl-RPT}$ (számlálóban) és a $V_{V, clo}^{total-RPT}$ (nevezőben) közötti relatív pórus térfogatarány eltérés.

A szakító próbatestek vizsgálatához kapcsolódó jelölések

Jelölés (mértékegység)	Megnevezés
l ; w és t	A szakító próbatest deformációs térfogának hossza (l), szélessége (w) és vastagsága (t).
V_{V}^{total} (%)	A szakító próbatest alakváltozó térfogatában (total) a pórusok térfogataránya.
V_{V}^{f-sm} (%)	A szakító próbatest törési szegmensében (f-sm) a pórusok térfogataránya.
S_{V}^{total} (mm ⁻¹)	A szakító próbatest alakváltozó térfogatában a pórusok fajlagos felülete.
S_{V}^{f-sm} (mm ⁻¹)	A szakító próbatest törési szegmensében a pórusok fajlagos felülete.
V_{max}^{total} (mm ³)	A szakító próbatest alakváltozó térfogatában a legnagyobb térfogatú pórus térfogata.
V_{max}^{f-sm} (mm ³)	A szakító próbatest törési szegmensében a legnagyobb térfogatú pórus térfogata (a szegmens határvonalával nem elmetsett, hanem a valós értéke).
$A_{Proj, V_{max}^{total}}$ (mm ²)	A szakító próbatest alakváltozó térfogatában a legnagyobb térfogatú pórus vetített területe a mechanikai igénybevétel irányára merőleges síkban.
$A_{Proj, V_{max}^{f-sm}}$ (mm ²)	A szakító próbatest törési szegmensében a legnagyobb térfogatú pórus vetített területe a mechanikai igénybevétel irányára merőleges síkban.
$Spher_{V_{max}^{total}}$ (-)	A szakító próbatest alakváltozó térfogatában a legnagyobb térfogatú pórus gömbszerűsége.
$Spher_{V_{max}^{f-sm}}$ (-)	A szakító próbatest törési szegmensében a legnagyobb térfogatú pórus gömbszerűsége.
A_A^{f-cs} (%)	A szakító próbatest törési keresztmetszetén (f-cs) a pórusok területaránya.
L_A^{f-cs} (mm ⁻¹)	A szakító próbatest törési keresztmetszetén a pórusok fajlagos kerülete.
A_{max}^{f-cs} (mm ²)	A szakító próbatest törési keresztmetszetén a legnagyobb területű pórus területe.
$Circ_{A_{max}^{f-cs}}$ (-)	A szakító próbatest törési keresztmetszetén a legnagyobb területű pórus körszerűsége.
CSC (-)	A szakító próbatest törési keresztmetszetén a repedés kialakulásának kockázatát jellemző „Cross-section classification”, azaz CSC paraméter.
$A_{A, Proj}^{f-sf}$ (%)	A szakító próbatest töretfelületén látható dendritközi pórusok, a mechanikai igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területaránya.
$R_{p0.2}$ (MPa)	A próbatest folyáshatára.
R_m (MPa)	A próbatest szakítószilárdsága.
ε (%)	A próbatest elszakadásáig bekövetkezett alakváltozás (szakadási nyúlás).

A statisztikai jellemzéshez és a prediktív modellezéshez kapcsolódó jelölések

r^2 (-)	Kétváltozós elemzéssel meghatározott determinációs együttható.
r_s (-)	Spearman korrelációs együttható.
p-érték (-)	A p-valószínűségi érték.
EDA	Exploratory data analysis, azaz feltáró adatelemzés.
ML	Machine learning, azaz gépi tanulás.
$inCSC$, illetve $inA_{A, Proj}^{f-sf}$	A CSC (-) és az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ (%) jellemzők független változók az adott modellben.
$exCSC$, illetve $exA_{A, Proj}^{f-sf}$	A CSC (-) és az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ (%) jellemzők nem független változók az adott modellben.
XGB	XGBoost modell.
GFs	Golden Features: A mért jellemzők alapján új jellemzők képzése matematikai transzformációkon, interakciókon, vagy statisztikai aggregációkon keresztül.
SFs	Selected Features: A becslések szempontjából kevésbé releváns jellemzők azonosítása és eltávolítása a független változók közül.
RMSE	Egy adott modell átlagos négyzetes eltérésének (hibájának) gyöke.
NRMSE (-)	A függő változó (mért) szórásával normalizált RMSE.
MAE	Egy adott modell átlagos abszolút hibája.
NMAE (-)	A függő változó (mért) maximum és minimum értékeinek különbségével normalizált MAE.
R^2 (-)	Lineáris regresszió elemzéssel meghatározott determinációs együttható.

Témavezetői ajánlás

Hargitai-Kazup Ágota **doktori értekezéséhez**

Hargitai-Kazup Ágota szakmai érdeklődése a kezdetektől az ötvözetek szövetszerkezetének különböző módszerekkel történő vizsgálatára irányult. Mindezt jól mutatja, hogy már MSc hallgatóként bekapcsolódott az Arconic-Köfém Kft. konzorciumi vezetésével működő ALUFORM projektbe, amelynek során, részt vett a projekt keretén belül telepített INDUTHERM CC3000 típusú félfolyamatos öntőmű beüzemelésében és működtetésében. Diplomamunkájában ezzel a berendezéssel öntött AlSi12 eutektikus összetételű alumínium ötvözet szövetszerkezetét fénymikroszkóp segítségével vizsgálta. Az elért eredményeket TDK dolgozatban és cikkekben is publikálta. 2018-ban a Műszaki Anyagtudományi Kar Tudományos Diákköri Konferenciáján II., míg 2019-ben I., az Országos Tudományos Diákköri Konferencián pedig 2021-ben I. helyezést ért el.

Doktorandusz hallgatóként az öntött anyagok térbeli szövetszerkezetének komputertomográfiai vizsgálatával kezdett el foglalkozni. Nagyon alaposan feltárta, példamutatóan rendszerezte és gondosan elemezte az öntött szövetszerkezetek vizsgálatával foglalkozó nemzetközi szakirodalmat, majd nyitott tudományos kérdéseket fogalmazott meg. Ipari körülmények között előállított öntvényekből kimunkált kísérleti próbadarabokon széleskörű vizsgálatokat végzett: az öntött ötvözetek porozitását pásztázó elektronmikroszkóp, optikai mikroszkóp és komputertomográfia segítségével jellemezte, míg a mechanikai tulajdonságait szakító kísérlettel határozta meg. A kapott adatokat az adatfeldolgozás legkorszerűbb módszereivel és a gépi tanulás segítségével elemezte.

Az eredményeiről több hazai és nemzetközi publikációban számolt be, köztük a Metallography, Microstructure and Analysis (Q2) és a Materials Science and Engineering A (D1) folyóiratban.

Összefoglalva: Hargitai-Kazup Ágota az öntvények mechanikai tulajdonságai és porozitása közötti kapcsolatot tudományos alaposággal feltárta, s a gyártási folyamat jellemzésére is alkalmazható módszert fejlesztett ki, ennek kapcsán új tudományos eredményekre jutott.

Miskolc, 2025. április 23.



Gácsi Zoltán

Bevezetés

A könnyűfém öntvények előállítására az alacsony nyomású öntéstechnológiát (LPDC) elterjedten alkalmazzák előnyös tulajdonságai miatt: gazdaságos, automatizálható, jól szabályozható, illetve segítségével kiváló termékminőség állítható elő [1, 2].

Az öntvények fontos minőségi jellemzője a bennük előforduló pórusok mennyisége és eloszlása, melyek csökkentik a teherbíró keresztmetszetet. Ezentúl a nagyméretű, összetett morfológiájú pórusok felületén heterogén feszültségállapotok alakulnak ki [3–7].

A számítógépi tomográfiás (CT) szerkezetvizsgálati módszer a metallográfiai vizsgálatokhoz képest előnyösebben alkalmazható, ugyanis az egyes fázisok térbeli kiterjedése hatékonyabban és pontosabban tárható fel, mely elengedhetetlen a pórusszerkezet és a mechanikai tulajdonságok közötti kapcsolat meghatározásához. Ennek megértéséhez, a megbízható eredményekhez az elemzési módszerek előnyeinek, korlátjainak, valamint alkalmazhatóságuk megismerése lényeges feladat [8].

Bár a porozitás mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával számos kutatómunka foglalkozik, az eredmények tekintetében nincs egyetértés. A pórusok jellemzői és az öntvények mechanikai tulajdonságai közötti mennyiségi összefüggések leírása jelenleg is intenzív kutatások tárgya [5, 7, 9–11]. A356 LPDC öntvények mechanikai, valamint a 3D-s, illetve 2D-s pórusszerkezeti jellemzőit korszerű statisztikai eszközökkel (gépi tanulóssal) elemeztem, amivel azonosítottam a folyáshatárra ($R_{p0,2}$ (MPa)), a szakítószilárdságra (R_m (MPa)), valamint az alakváltozásra (ε (%)) hatást gyakorló pórusjellemzőket [12]. A pórusoknak a próbatest keresztmetszetén való elhelyezkedését is vizsgáltam egy általam kifejlesztett paraméterrel (CSC (-)), amivel jellemezhető a repedés kialakulásának kockázata. A gépi tanulás módszere a tudományos munkákban egyre elterjedtebb [13–21], ugyanakkor ezen a kutatási területen még nem alkalmazták.

Az elért eredmények a pórus- illetve mechanikai jellemzők közötti mennyiségi megállapítások gazdagításán túl az öntvények minősítő módszereinek fejlesztéséhez járulnak hozzá, ugyanis a pórusszerkezet alapján a mechanikai tulajdonságok roncsolással járó vizsgálat nélkül becsülhetők, illetve a törés lokalizálható.

1 Irodalmi áttekintés

Az itt bemutatott irodalmi áttekintésben ismertetem a kutatómunkához kapcsolódó alapismereteket, illetve szakirodalmat, mely alapján nyitott kérdéseket fogalmaztam meg. Elsőként az öntvényekben előforduló pórusokat jellemzem, majd a szerkezetvizsgálati módszereket mutatom be és hasonlítom össze egymással, kitérve az előnyeikre és hátrányaikra. Ezt követően a pórusok mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását fejtem ki. Végül pedig a közöttük fennálló kapcsolatok vizsgálati módjairól számolok be.

1.1 Öntvényekben előforduló pórusok

Az öntvényekben előforduló porozitásnak különböző forrásai lehetnek. Az olvadék öntése közben a turbulens áramlással levegőbezáródások keletkezhetnek, melyeknek felületét – alumínium olvadék esetén – alumínium-oxid (Al_2O_3) hártya borítja. Ugyanis a levegőből származó oxigén (O_2) hatására alumínium-oxid hártya alakul ki, kettős hártya között pedig kis mennyiségű levegő reked meg [22–26]. Ez elősegíti az olvadékban atomosan oldott **hidrogén kiválását** (H_2), növelve a porozitást az olvadék kristályosodása során, ugyanis oldhatósága jelentősen lecsökken a hűlés hatására (20x kisebb szilárd állapotban) [23, 27–29]. Az önmagában kivált hidrogéngáz pórus alakja közel szabályos gömb (nyomás hatására kis mértékben lapult is lehet), mérete viszonylag kicsi (nagysága a néhány mikrométertől a néhány tíz mikrométerig terjed), belső felülete sima, tiszta, oxidoktól mentes [30–33]. Az olvadék hidrogén felvétele a környezetben lévő vízgőzből, annak bontása révén történik (1), gyorsan oldódó atomos hidrogén és oxigén képződik. Utóbbi az alumínium olvadékkal exoterm reakcióba lép, aminek során alumínium-oxid zárványok képződnek, szennyezve az olvadékot [22, 26, 32, 34–37].



Az olvadék gáztartalma többek között **csökkentett nyomáson dermedő próbák** (RPT, azaz *reduced pressure test*) öntésével vizsgálható [24–26, 29]. A minták hosszmeteszete vizuális összehasonlítással minősíthető (*fél-kvalitatív*), valamint a metszetről készült optikai mikroszkópos (OM) felvételek képelemzésével *kvantitatívan* vizsgálható [23]. További információval szolgál az úgynevezett sűrűség-index (DI, azaz Dichte-index vagy Density-index) mérőszám is, mely a csökkentett nyomáson (80 mbar) (RPT), illetve egy levegőn szilárdult (1 bar) referencia próba sűrűségeiből (ρ) számítható (2) [26, 38]. A próbák sűrűségét Arkhimédész törvénye alapján (3) vízbemerítéssel határozzák meg [39]. A hidrogén oldhatósága a vákuum miatt még inkább lecsökken, a képződő pórusok kitágulnak, méretük az RPT próbatestekben nagyobb, mint a levegőn kristályosodókban [23, 40, 41]. A próbák porozitását befolyásolják az öntési körülmények hűlési viszonyai, illetve az öntés magassága és sebessége.

$$\text{DI} = \frac{\rho_{\text{levegőn}} - \rho_{\text{vákuumban}}}{\rho_{\text{levegőn}}} 100 \quad (2)$$

ahol:

$\rho_{\text{levegőn}}$: 1 bar nyomáson kristályosodott próbatest sűrűsége (g/cm^3),

$\rho_{\text{vákuumban}}$: 80 mbar nyomáson kristályosodott próbatest sűrűsége (g/cm^3).

$$\rho = \frac{m_{\text{levegőn}}}{m_{\text{levegőn}} - m_{\text{folyadékban}}} \rho_{\text{folyadék}} \quad (3)$$

ahol:

ρ : a minta sűrűsége (g/cm^3),

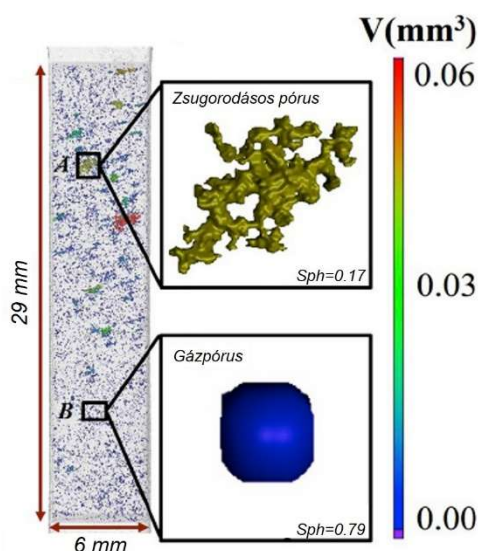
$m_{\text{levegőn}}$: a minta tömege levegőn mérve (g),

$m_{\text{folyadékban}}$: a minta tömege folyadékban (pl. desztillált vízben) mérve (g),

$\rho_{\text{folyadék}}$: a folyadék (pl. desztillált víz) sűrűsége (g/cm^3).

A gázpórusok mellett szintén anyaghiányt okoz a dendrites morfológiával kristályosodó α -szilárdoldat ágai közötti tér nem megfelelő, olvadékkal való kitápláltsága. A dendritágak között képződő üregek a **dendritközi pórusok** (mikroporozitás). Morfológiájuk a pórus felületén látható dendritágak miatt nagy mértékben összetett (hosszú, szabálytalan ágak jellemzik), méretük a néhány tíz mikrométertől a több száz mikrométerig terjed [22, 33, 37, 42]. Amennyiben kristályosodás közben a térfogatában zsugorodó, félig szilárd állapotú fém utántáplálása nem elégséges az egyre szűkülő és összenövő dendritközi csatornákon keresztül, dendritközi mikroporozitás alakul ki. Az olvadék utánpótlást a benne előforduló zárványok, intermetallikus vegyületek tovább gátolják [29, 30, 42–45].

A hidrogéngáz és a dendritközi pórusok – melyek a **porozitás két legfőbb forrása** – között méretük és morfológiájuk alapján lehet különbséget tenni. Minél nagyobb a pórus térfogata, annál kevésbé gömbszerű [9, 31, 37, 42, 46–48]. Az 1. ábrán egy kisebb méretű, szabályosabb gázpórus, illetve egy nagyobb, összetett (komplex) morfológiájú dendritközi pórus látható.



1. ábra: Szakító próbatestben méret (térfogat) és morfológia (gömböszerűség) alapján megkülönböztetett pórus [9].

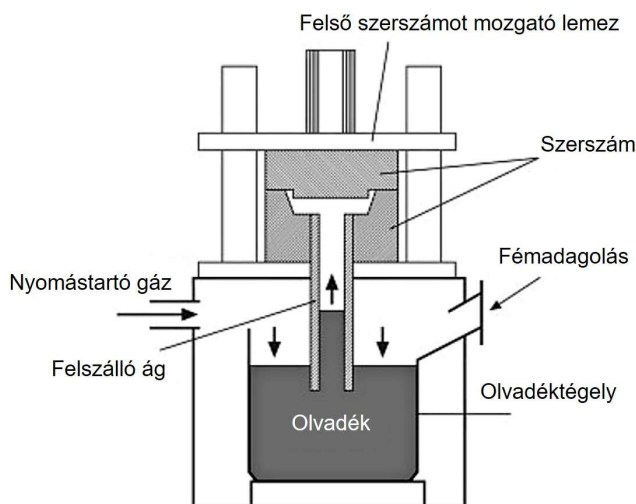
A kristályosodás sebessége hatással van a pórusok mennyiségére, minél lassabb a hűlés, a pórusok mérete annál nagyobb (mind a gázbuborékoké, mind a dendritközi pórusoké) [42, 49, 50]. A kristályosodási sebesség növekedése a gázpórusok csíráképződésének (leginkább zárványok mellett képződnek és a bezárt levegőbuborékokba diffundálva növekednek) kedvez, ellenben a pórusok növekedésének kevésbé. Az öntvények bizonyos részein az olvadék hidrogénben kimerülté válhat, így a közelében nem, vagy kevésbé képződik hidrogéngáz

porozitás, de ezt az olvadék szennyezettsége jelentős mértékben befolyásolja [22, 35, 42, 43, 49, 51]. Nagyobb hűlési sebesség esetén a α -szilárd oldat szekunder dendritágai közötti távolság rövidebb [10, 42, 43, 52, 53], melynek következtében a dendritközi kitápláltság mértéke nagyobb. Mindazonáltal a gázpórusok és a dendritközi pórusok nem teljesen elválaszthatóak egymástól, egyazon pórus esetében mindkét pórusképződési mechanizmus szerepet játszhat, mely a kialakuló pórus méretében és morfológiájában is megjelenik [28, 48].

1.2 Alacsony nyomású öntéstechnológia

Az alacsony nyomású öntéstechnológia (LPDC) a termelékenysége, az alacsonyabb megmunkálási és anyagköltségek (pl. nincs szükség tápfejre), valamint az automatizált folyamatirányítás miatt előnyös módszer az öntvények előállítására, különösen az A356 ötvözet esetében. Nagy hatékonysággal egyenletes, kiváló minőségű, összetett geometriájú öntvények előállítására alkalmas, ami nagyobb rugalmasságot biztosít különböző alkatrészek tömeggyártására. Tiszta olvadékminőségből lamináris formatöltés és szabályozott, illetve megfelelően optimalizált olvadékszilárdulás mellett történhet az öntés, amelyek javítják az öntvények minőségét. Így tehát kisebb porozitástartalmat, finomabb szemcseszerkezetet és az ötvözőelemek egyenletesebb eloszlását eredményezi, ami javítja az öntvények mechanikai tulajdonságait [1, 2, 11, 54].

Az alacsony nyomású öntés során 0,1 – 1 bar nyomású gázzal terhelik az olvadék felszínét (2. ábra). Az olvadék egy felszálló csatornán keresztül jut a formaüregbe. Az állandó nyomás következtében a formatöltés során az olvadék áramlása kis mértékben turbulens, így az olvadékba bezárt levegő és zárványok mennyisége jelentősen kisebb más öntéstechnológiákhoz képest. Az alacsony nyomással öntött öntvények gázporozitást is kisebb mértékben tartalmaznak és mivel az öntőtégely aljából vételezik az olvadékot, így az olvadék tetején lévő salak is kevésbé jut a formaüregbe [11, 54–58].



2. ábra: Az alacsony nyomású öntés sematikus ábrája ([57] nyomán).

1.3 Kvantitatív porozitás vizsgálati módszerek

A kvantitatív szerkezetvizsgálati módszerek megválasztásakor figyelmet kell fordítani azok előnyeire, illetve hátrányaira, ugyanis a mérési eredmények megbízhatóságát befolyásolják. A porozitás meghatározására alkalmas módszerek közül a testek **sűrűségmérését**

és a **röntgen radiográfiát** (2D) elsősorban az ipari minőségellenőrzésnél, míg a 3D-s **számítógépi tomográfiás** (CT) felvételek elemzését, valamint a **mikroszkópos felvételek** feldolgozását (2D) a technológiai fejlesztések során alkalmazzák. A módszerek mindegyikének megvannak a maga sajátosságai, így különböző a próbatestek kiterjedésének vizsgálhatósága (2D, 3D), a mérési pontosságuk, az eszközigényük, az időszükségletük, a költségük, illetve a vizsgálatok bonyolultsága. A főbb szempontok az 1. táblázatban láthatóak [8].

1. táblázat: A különböző porozitás, illetve pórusszerkezet vizsgálati módszerek bemutatása [8].

	Sűrűség mérése	Radiográfia (2D)	3D CT	2D CT	OM (2D)
Idő	Rövid	Rövid	Mérsékelt (mintaméret és kiértékelés függő)	Mérsékelt	Hosszú
Roncsolás mentes eljárás	Igen	Igen	Igen	Igen	Nem
Felbontás	Nem képalkotó módszer, így nincs felbontása.	100 – 300 µm	3,5 – 36 µm	3,5 – 36 µm	0,3 – 2,5 µm
Eredményt befolyásoló tényezők	A pórusok nyitottsága és inhomogenitása; A folyadékközeg típusa, tisztasága, hőmérséklete; A minta tisztasága, felületi minősége; A tömegmérés pontossága.	A vizsgálati darab mérete; A pórusok helye, összetettsége.	Az anyag minősége, vastagsága; Az alkalmazott teljesítmény, az expozíciós idő, a szkennelés típusa, a röntgensövény alkalmazott szűrő; A felvétel minősége: kontraszt, zajmentesség; A felvétel felbontása: nagyítás, mintaméret; A felvételek értékelési folyamata.	A felvétel felbontása; A nagyítás mértéke és a metszetek száma; A szerkezet összetettsége.	A nagyítás mértéke és a felvételek száma; A pórusok inhomogenitása: anizotróp szerkezet esetén több irányú metszeten történő vizsgálat javasolt.
Meghatározható jellemzők	Csak az összporozitás mérhető.	A pórus csak vizuálisan látható; A helye hozzávetőlegesen határozható meg.	Az összporozitás, pórusméret, alak, és térbeli eloszlás.	A minta teljes metszete vizsgálható; Az összporozitás, pórusméret, alak; Az eloszlás térben sorozatmetszetekkel határozható meg.	Az összporozitás, pórusméret, alak; Az eloszlás térben sorozat metszettel határozható meg.
Költség	Mérsékelt	Mérsékelt	Nagy	Nagy	Mérsékelt

A rövid időszükséglet miatt a minőségellenőrzés során leginkább a **sűrűségmérést** (3) alkalmazzák. A próbatestek porozitása a sűrűségből a (4) összefüggéssel számítható [8, 39].

$$V_V = \left(1 - \frac{\rho_{\text{próbatest}}}{\rho_{\text{ötvözet}}}\right) 100 \quad (4)$$

ahol:

V_V : a pórusok térfogathányada a mintában (%),

$\rho_{\text{próbatest}}$: a minta sűrűsége (g/cm^3),

$\rho_{\text{ötvözet}}$: az ötvözet sűrűsége (g/cm^3).

A módszerrel a próbatest teljes zárt pórusmennyisége rövid időn belül alacsony költséggel számítható, viszont a sűrűség mérésekor a pórusok nyitottsága, a méréshez használt

folyadék, illetve a minta felületi minősége befolyásolják az eredményt. A nyitott pórusokba a folyadék (pl. desztillált víz, etanol vagy acetone) beáramlik, melynek mértékét a pórusok nyitottsága, valamint a folyadék és a próba között fellépő felületi feszültség befolyásolja. A mérési pontosság növelése érdekében a mintákat hevítéssel lehet tisztítani, vízbe merítéskor pedig a felületen létrejövő levegőbuborékokat mechanikusan el lehet távolítani [59–61]. Az iparban előállított (a sűrűségméréshez túl nagy méretű) termékek minőségellenőrzésére gyakran alkalmazott módszer a radiográfiás vizsgálat, amely során a testeket röntgensugarakkal világítják át. A vetületi röntgenfelvételeken láthatóvá válnak az eltérő kontrasztot adó nagyobb alkotórészek, pl. az anyagfolytonossági hibák (repedések, pórusok). A megfigyelt objektumok térbeli elhelyezkedése csak hozzávetőlegesen azonosítható, valamint a készült felvétel kevésbé részletes [8, 33, 62].

Ugyancsak roncsolásmentes a **számítógépi tomográfiás szerkezetvizsgálati** módszer [63–65]. A vizsgált testről készült több száz vagy néhány ezer darabszámú vetületi röntgenfelvételek rekonstruálásával létrehozható a test térbeli virtuális megfelelője (3. ábra), melyben az eltérő kontrasztot adó kisebb részek (objektumok vagy fázisok) is láthatóvá válnak. Mennyiségük, alakjuk, méretük, térbeli kiterjedésük számszerűen jellemezhető képelemzés útján [33, 42, 61, 63, 66]. A vizsgálat pontosságát a felvétel minősége, felbontása, a felvételek számítógépes elemzésének a folyamata (szűrések, képátalakítások, detektálási küszöbérték) befolyásolja. A felvétel minőségét a fázisok közötti kontraszt mértéke, illetve az előforduló zajok mennyisége határozza meg. A felvétel kontrasztját az anyag minősége, vastagsága és a leképezés paraméterei befolyásolják. Minél részletesebb a felvétel (kisebb a teret alkotó voxelek¹ mérete), annál pontosabban határozhatóak meg a kontrasztot adó fázisok számszerű jellemzői [67]. A vizsgálat időigénye a leképezés típusától és a kiértékelés menetétől függ, ám összességében a többi módszerhez képest közepes, hátránya viszont, hogy költséges eszközt igényel [8, 60–62, 68].

A vizsgált tárgyról készült 3D-s CT felvétel nagyítását (M) a röntgenforrás-vetületi hely (detektor) távolságának (FDD) és a röntgenforrás-tárgy távolságának (FOD) aránya adja meg (5). A felvétel felbontását (voxel méretét) a nagyítás mértéke és a detektor felbontóképessége (d) határozza meg a (6) összefüggés szerint. A vizsgált test tengelyirányára (z) merőleges síkban körülírható kör átmérőjének és a fókuszfolt méretének növekedésével a felvételek felbontása csökken. Az ipari CT-nek 5-150 µm, a mikro-CT-nek 1-100 µm, illetve a nano-CT-nek 0,5 µm körüli a felbontóképessége [63, 64]. A CT berendezés főbb részeit és azok elrendezését a 3. ábra mutatja be.

$$M = \frac{FDD}{FOD} \quad (5)$$

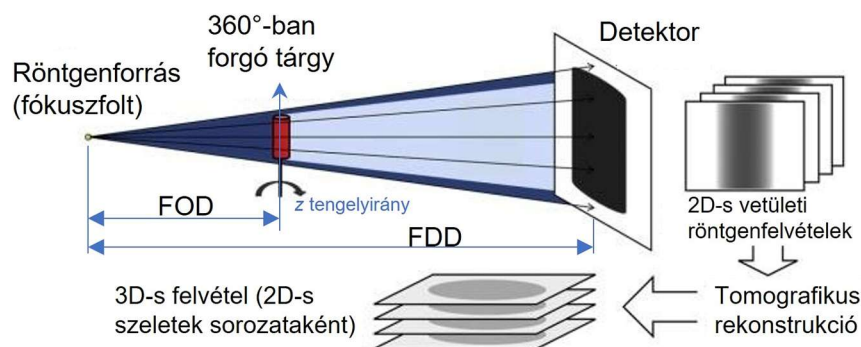
$$\text{Voxel méret} = \frac{d}{M} + \left(1 - \frac{1}{M}\right) S \quad (6)$$

ahol:

d: a detektor felbontóképessége (µm),

S: a fókuszfolt mérete (µm).

¹ A pixel térbeli megfelelője. Méretét a 3D-s egységnyi kocka élének hosszúsága adja, amiből felépül a 3D-s felvétel.



3. ábra: A számítógépi tomográf (CT) működési elvének sematikus ábrája ([69, 70] nyomán).

A vizsgált tárgy anyagminősége és vastagsága befolyásolja a rajta átjutó röntgensugarak mennyiségét. Minél nagyobb az anyag rendszáma és a falvastagság, annál inkább csökken a rajta átjutott sugarak intenzitása, melynek mennyiségét a detektor érzékeli. Kisebb intenzitás esetén halványabb árnyalatú a felvétel. A Lambert-Beer törvény (7) kimondja, hogy a detektor által érzékelt röntgensugarak intenzitása (I) a kezdeti röntgensugár intenzitástól (I_0), a lineáris csillapítási együtthatótól (μ) és a vizsgált test vastagságától függ (X). A lineáris csillapítási együttható a vizsgált anyag sűrűségétől, atomszámától és az alkalmazott röntgensugár energiájától függ [63, 64].

$$I = I_0 e^{-\mu X} \quad (7)$$

ahol:

I : a detektor által érzékelt röntgensugarak intenzitása,

I_0 a kezdeti röntgensugár intenzitás,

μ : a lineáris csillapítási együttható,

X : a vizsgált test vastagsága.

A **3D-ben leképezett próbatest metszeti (2D-s) röntgenfelvételei** is elemezhetőek, mely kétféleképpen történhet: vagy a 3D-s felvétel kiértékelési paramétereivel megegyezően egyazon szoftveren belül [61, 67, 71] vagy pedig a metszetek különböző képformátumba történő exportálásával és másik képelemző szoftverrel (pl. ImageJ) való elemzésével [10, 72]. A módszerrel a vizsgált darab teljes keresztmetszete vizsgálható. A mérés pontosságát a felvétel felbontása, a nagyítás mértéke és a metszetek száma befolyásolja. A 2D-s felvételek felbontását a 3D-s felvétel felbontása befolyásolja, nagyságától függően bizonyos mértékben nagyobb a 2D-s képek pixelmérete. A felvételeknek reprezentálniuk szükséges a térbeli szerkezetet annak érdekében, hogy statisztikailag helyes eredményt kapjunk. A mérés pontosságát tovább befolyásolja a detektálási küszöbérték megválasztása, a felvétel kontrasztja és a szerkezet összetettsége. A vizsgálat személyi időigénye közepes [8, 68].

A területarány (A_A) és a térfogatarány (V_V) között egzakt összefüggés van, átlagértékük azonos ($A_A = V_V$), amennyiben a felvételek kellően reprezentálják a szerkezetet, ezért a 2D-ben mért értékek a 3D-s eredményekkel összehasonlítható. A 2D-s vizsgálat statisztikailag akkor reprezentálja a 3D-s szerkezetet, ha a vizsgált fázis véletlenszerűen helyezkedik el és nincs orientáció. Ha a vizsgált fázis elhelyezkedése orientált, akkor több irányban szükséges metszeteket készíteni és vizsgálni azokat [8, 73–75].

A számítógépi tomográfias módszer mellett alkalmazott hagyományos vizsgálati módszer a roncsolással járó csiszolati metszetek **mikroszkópos felvételeinek** a képelemzése. A módszer nem igényel olyan költséges berendezést, mint pl. a CT, de a felvételek részletesebbek. A módszer hátránya, hogy a statisztikailag megfelelő számú felvétel (2D CT módszernél is több) elkészítése és elemzése időigényes. Inhomogén eloszlás esetén érdemes több irányú metszeten is elvégezni a vizsgálatot. Mivel a fázisoknak csak a 2D-s kiterjedése látható, ezért pl. az összetett morfológiájú, hosszú ágakat tartalmazó objektumok, mint a dendritközi pórusok, kisebb (az átvágott ágak méretének és alakjának megfelelő), csoportosan elhelyezkedő részecskék (pórusok) formájában láthatóak a felvételeken. Egy gömbszerű fázis esetén, mint a gázpórus a csiszolat irányfüggősége jelentősen kisebb [4, 60, 62, 71, 76–78]. A vizsgálat eredménye nemcsak a metszetek helyétől és számától, hanem a csiszolat előkészítésének minőségétől is függ. Egy komplex morfológiájú fázis több kisebb részben, akár körszerű keresztmetszettel is megjelenhet a metszeten [8].

Az anyagok szerkezetéről számítógépi tomográfiával két- és három dimenzióban, illetve mikroszkóppal készített felvételek számszerűen jellemezhetők **képelemzéssel** [74, 79, 80], mely során a rajta látható fázisok mennyisége, mérete és eloszlása határozható meg többek között. A kutatómunka szempontjából lényeges térfogatarány, területarány, fajlagos felület, fajlagos kerület a (8) – (11) összefüggésekkel számíthatóak. A fázisok morfológiája különböző alaktényezőkkel adható meg. A gömb- (12) és körszerűség (13) egy objektum teljesen szabályos gömb, illetve kör alakhoz való hasonlóságát fejezi ki, aminek értéke 0 és 1 közötti, ám sohasem nulla és ahol az 1 a teljesen szabályos gömb/kör morfológia [79, 81–83].

$$V_V = \frac{V_{\text{összes objektum}}}{V_{\text{teljes}}} 100 \quad (8)$$

$$A_A = \frac{A_{\text{összes objektum}}}{A_{\text{teljes}}} 100 \quad (9)$$

$$S_V = \frac{S_{\text{összes objektum}}}{V_{\text{teljes}}} \quad (10)$$

$$L_A = \frac{L_{\text{összes objektum}}}{A_{\text{teljes}}} \quad (11)$$

ahol:

V_V : a vizsgált fázis (objektumok) térfogataránya (%),

$V_{\text{összes objektum}}$: az objektumok össztérfogata a vizsgált térfogaton belül (mm^3),

V_{teljes} : a teljes vizsgált térfogat mérete (mm^3),

A_A : a vizsgált fázis (objektumok) területaránya (%),

$A_{\text{összes objektum}}$: az objektumok összterülete a vizsgált területen (mm^2),

A_{teljes} : a teljes vizsgált terület mérete (mm^2),

S_V : a vizsgált fázis (objektumok) fajlagos felülete (mm^{-1}),

$S_{\text{összes objektum}}$: az objektumok összfelülete a vizsgált térfogaton belül (mm^2),

L_A : a vizsgált fázis (objektumok) fajlagos kerülete (mm^{-1}),

$L_{\text{összes objektum}}$: az objektumok összkörülete a vizsgált területen (mm).

$$\text{Gömbszerűség} = \frac{S_{\text{ekv,gömb}}}{S_{\text{objektum}}} \quad (12)$$

$$\text{Körszerűség} = \frac{D_{\text{ekv,kör}}}{D_{\text{max,objektum}}} \quad (13)$$

ahol:

$S_{\text{ekv, gömb}}$: annak a gömbnek a felülete (mm^2), amelynek térfogata megegyezik a jellemezni kívánt objektum térfogatával (V_{objektum}),

S_{objektum} : a jellemezni kívánt objektum felülete (mm^2),

$D_{\text{ekv, kör}}$: annak a körnek az átmérője (mm), amelynek területe megegyezik a jellemezni kívánt objektum területével (A_{objektum}),

$D_{\text{max, objektum}}$: a jellemezni kívánt objektum befoglaló mérete (legnagyobb átmérője) (mm).

A módszerek összehasonlítása

Az 1. táblázatban bemutatott szerkezetvizsgálati módszereket (a radiográfiás vizsgálat kivételével) különböző szempontok szerint hasonlították össze az irodalomban. Leggyakrabban lézerrel olvasztott pormintákon végeztek vizsgálatokat [59, 61, 66, 71, 76, 84–86], de voltak közöttük nyomásos [62] és gravitációs öntvények [68], illetve 3D nyomtatott cementkötésű anyagok [87] is. A térfogat-, illetve területarány mellett relatív sűrűségben is kifejezték a porozitás mennyiségét. A 2. és 3. táblázatban összefoglaltam a publikációkban közölt eredményeket: összegeztem a vizsgált anyagminőségeket, az alkalmazott előállítási technológiákat, a vizsgálati módszereket, az általuk kapott eredmények összehasonlítását, valamint az eredmények eltéréseinek lehetséges okát.

2. táblázat: A különböző porozitás vizsgálati módszerekkel mért porozitás eredmények összehasonlítása [8].

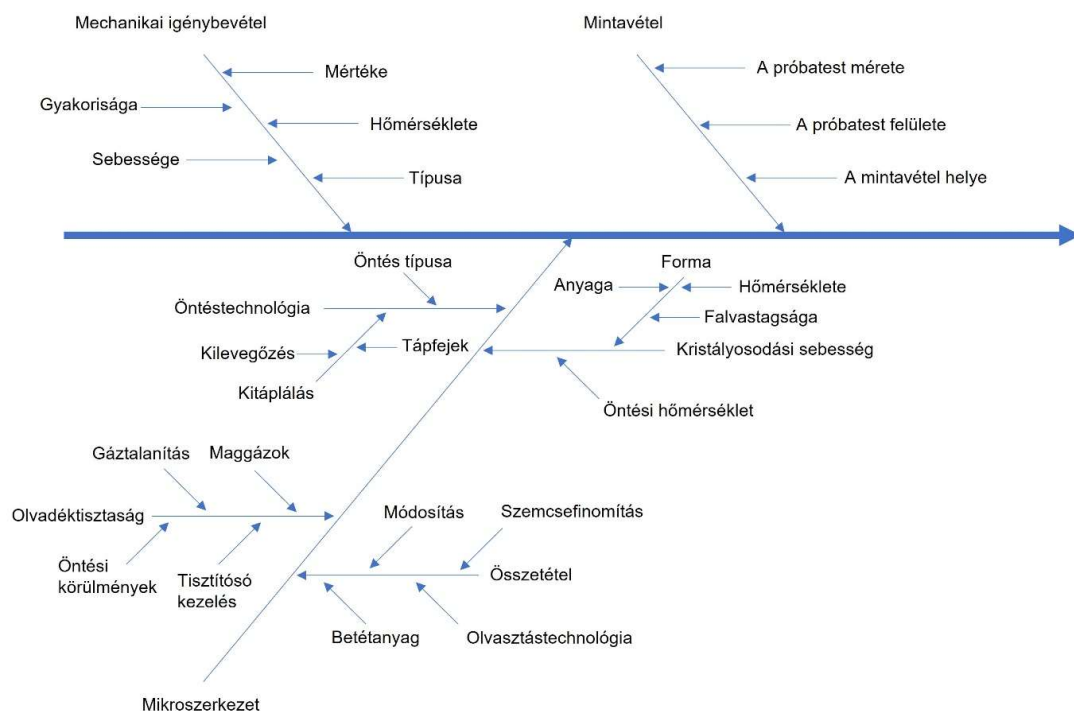
	Anyag, technológia	Alkalmazott vizsgálati módszerek	A módszerekkel mért porozitás összehasonlítása	A mért porozitás közötti különbség	A különbség lehetséges oka
[59]	Porból lézerrel olvasztott 316L rozsdamentes acél	Sűrűségmérés és OM elemzés	Sűrűségből > OM porozitás (%)	Max. 1%	Nem tárgyalták.
[61]	Porból lézerrel olvasztott Ti6Al4V	i) Sűrűségmérés és OM elemzés; ii) Sűrűségmérés és 3D CT elemzés	i) Sűrűségből > OM porozitás (%) ; ii) Sűrűségből > 3D CT porozitás (%)	i) Max. 1%; ii) Relatív sűrűség: max. 4%	Az ötvözet inhomogén sűrűsége; CT: a felbontás miatt a meg nem olvadt porszemcsék között lévő pórusok nem láthatók; Mintaelőkészítés: pórusdeformáció, porszemcsék távozása a felületből.
[62]	Nagy nyomással öntött A356 alumínium öntvények	3D CT és OM elemzés	3D CT > OM porozitás (%)	Max. 0,1%	Az inhomogén póruseloszlás és a komplex pórusmorfológia.
[66]	Porból lézerrel olvasztott AlSi10Mg	Sűrűségmérés és OM elemzés	Sűrűségből > OM porozitás (%)	Relatív sűrűség: max. 1%	A minta szélén lévő pórusokat figyelmen kívül hagyták.
[68]	Gravitációsan öntött, irányítottan kristályosított A356 alumínium öntvény	3D CT és OM elemzés	OM < 3D CT porozitás (%)	Max. 0,3%	A nem elegendő OM felvételek száma; Mintaelőkészítés: eltömődő kisebb pórusok.
[71]	Porból lézerrel olvasztott AlCu2Mg1,5Ni	3D CT és OM elemzés	3D CT < OM porozitás (%)	Max. 0,7%	A nem elegendő OM felvételek száma; A 3D és 2D felvételek felbontása különbözik.
[76]	Porból lézerrel olvasztott AlMg	Sűrűségmérés és 3D CT elemzés	Sűrűségből < 3D CT porozitás (%)	Relatív sűrűség: max. 2%	Nem tárgyalták.
[84]	Porból lézerrel olvasztott AlSi10Mg	OM és 3D CT elemzés	OM ≤ 3D CT porozitás (%)	i) 3D CT (eltérő V): max. 0,4- 0,6%; ii) OM (eltérő M): max. 0,3%; iii) 3D CT vs. OM: max. 2,2%	A csiszolati metszetek és az OM felvételek helye; A vizsgált terület/térfogat mérete és helye; A póruseloszlás.

3. táblázat: (folytatólagosan) A különböző porozitás vizsgálati módszerekkel mért porozitás eredmények összehasonlítása [8].

	Anyag, technológia	Alkalmazott vizsgálati módszerek	A módszerekkel mért porozitás összehasonlítása	A mért porozitás közötti különbség	A különbség lehetséges oka
[85]	Porból lézerrel olvasztott AlSi10Mg	Sűrűségmérés és OM elemzés	Sűrűségből > OM porozitás (%)	Relatív sűrűség: max. 5%	Az összetételbeli különbségek, így a mért sűrűségértékek eltérőek.
[86]	Porból lézerrel olvasztott Ni alapú szuperötvözet	Sűrűségmérés és OM elemzés	Sűrűségből > OM porozitás (%)	Relatív sűrűség: max. 3%	Nem tárgyalták.
[87]	3D nyomtatott mészkő és kalcinált agyag alapú keverékek	2D optikai felvételek, 2D CT elemzés	Minta 1 és Minta 2: i) OM-keresztmetszet > CT-keresztmetszet porozitás (%) ii) CT-keresztmetszet > CT-hosszmetszet porozitás (%)	Minta 1: i) 5%, ii) 0,5%; Minta 2: i) 1%, ii) 2,2%	Az inhomogén póruseloszlás; A felbontásbeli különbségek: az <i>OM-keresztmetszet/CT-keresztmetszet</i> módszerek között nagyobb az eltérés, mint a <i>CT-kereszt/CT-hosszmetszet</i> között; A különböző detektálási módszerek.
[88]	Plazmaszórt alumínium-oxid	3D CT és OM elemzés	3D CT < 2D CT porozitás (%)	Nem tárgyalták	A felbontásbeli különbségek.

1.4 Pórusok hatása a mechanikai tulajdonságokra

Az anyagok mechanikai tulajdonságait a szövetszerkezetük – beleértve a porozitást is – határozza meg, amit pedig az összetételük, tisztaságuk, illetve az előállításuk technológiai paraméterei (mint például öntvények esetén a kristályosodási viszonyok) befolyásolnak [50, 89–94]. Alacsony nyomású, illetve gravitációs öntés esetén az öntéstechnológia különbsége révén különböző szövetszerkezet és porozitástartalom alakul ki, így eltérő mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek az így előállított öntvények. A 4. ábrán látható Ishikawa diagramon bemutatom, hogy milyen ok-okozati kapcsolatok állnak fenn egy öntési folyamat során, melyek a végső mechanikai jellemzők kialakulásáért felelnek.



4. ábra: Az öntvények mechanikai jellemzőit befolyásoló tényezők [95].

A szövetszerkezeti fázisok közül a porozitás és a durva szemcséjű, illetve éles felületű fázisok (pl. Al-Si ötvözet esetén a tús morfológiájú, nagy méretű eutektikus Si [96], vagy az intermetallikus vegyületfázisok [90]) csökkentik a szakítóvizsgálattal meghatározható mechanikai jellemzőket és a kifáradási élettartamot. A fázisok minőségi (összetétel, kristályszerkezet) és mennyiségi (mennyiség, méret, morfológia és eloszlás) jellemzőitől függően terhelés hatására repedések alakulhatnak ki az anyagban azoktól a fázisoktól, melyeken jelentős mértékben koncentrálnak a feszültségek, majd ezek a repedések továbbterjedve a termékek tönkremeneteléhez vezethetnek.

Ezért tehát az öntvények fontos minőségi jellemzője a bennük előforduló pórusok mennyisége, mérete és eloszlása. A pórusok csökkentik az anyagok teherbíró keresztmetszetét, emellett a komplex morfológiájú pórusok felületén heterogén feszültségállapotok alakulnak ki [3–7, 77, 78, 97, 98]. Ily módon a dendritközi pórusok különösen hátrányosak, az öntvények mechanikai tulajdonságait nagyobb mértékben befolyásolják. Megállapították, hogy a

tönkremenetel leginkább rajtuk keresztül megy végbe és minél nagyobb a pórus mérete, annál inkább képez repedéseket [3, 6, 48, 99]. Megállapították azt is, hogy a kisebb, kompakt, de csoportosult pórusok hasonlóképpen kockázatot jelentenek [7, 100, 101]. Előfordulhat, hogy egy kisebb méretű, felületközelebi pórus károsabb, mint az öntvény belsejében lévő nagyobb pórus [102]. A repedés a többi pórus felé terjed tovább. Mindezek okán az öntvényekben előforduló pórusok vizsgálata lényeges a termékek minősége szempontjából. Az összetett pórusok és póruscsoportosulások számítógépi tomográfiával (CT) történő vizsgálata előnyösebb a metallográfiai vizsgálatokhoz képest, ugyanis térbeli kiterjedésük hatékonyabban és pontosabban tárható fel [8], mely elengedhetetlen a pórusszerkezet és a mechanikai tulajdonságok közötti kapcsolat meghatározásához.

Liu, valamint Zhang és munkatársai [5, 9] nagy nyomással öntött (HPDC) próbatestekben előforduló pórusok szerkezetének hatását vizsgálták. A szakítóvizsgálatok előtt többek között 3D-s CT vizsgálatokat végeztek, s a próbatestek tengelyiránya mentén meghatározták a póruseloszlást az alakváltozó térfogat több részre történő felosztásával. A szakítóvizsgálat után meghatározták a tönkremenetel helyét, valamint töretfelületi vizsgálatokat is végeztek.

Liu és munkatársai [5] a tanulmányukban meghatározták a tönkremenetel helyén a legnagyobb pórus méretét, a helyi porozitást, emellett az összes, illetve a legnagyobb vetített területű hiba (ami lehetett pórus, hidegfolyás vagy zárvány) területarányát a töretfelületen. Párkorrelációval vizsgálták az alakváltozó képesség kapcsolatát a pórusjellemzőkkel, s azt a megállapítást tették, hogy a tönkremenetel az esetek 90%-ában a legnagyobb méretű póruson (V_{max}) keresztül megy végbe, s a nyúlás nemlineáris módon függ össze a V_{max} -szal. Ez alapján a 3D-s CT felvételekkel a szakítóvizsgálat előtt lokalizálható a repedés helye, valamint becsülhető a megnyúlás mértéke. Emellett az alakváltozás a töretfelületi hibák mennyiségével is összefüggött. Kutatásuk során nem vették figyelembe a pórusok keresztmetszeti elhelyezkedését a próbatestek felületéhez képest, annak ellenére, hogy a keresztmetszet mentén heterogén volt a mikroszerkezet. Egyes próbatestekben extrém nagy méretű ($> 1 \text{ mm}^3$, de akár $1,8 \text{ mm}^3$ is) pórusok is előfordultak, ami feltehetően jelentősen befolyásolta a tönkremenetel folyamatát.

Zhang és munkatársai [9] szintén HPDC öntéstechnológiával előállított, de AM60 magnézium ötvözetben előforduló pórusok hatását vizsgálták. Megállapításuk szerint a törési szegmens legnagyobb pórusának mérete, illetve pórus térfogataránya volt hatással a nyúlásra, de úgy vélték, hogy a pórusok keresztmetszeti elhelyezkedése (hibasávon belüli/kívüli póruselhelyezkedés) is befolyásolhatta az alakváltozás mértékét. A pórusok nem egyenletes eloszlásúak voltak a próbatestekben. Ehhez kapcsolódóan viszont nem végeztek részletes vizsgálatot. A legnagyobb pórus mérete nagyságától függően lineáris, vagy nem-lineáris kapcsolatban állt a nyúlással. Adott méret feletti dendritközi pórusok (ami $V_V, V_{max}^{f-sm} > 0,3\%$) a nyúlás lineáris csökkenésének kiváltó oka. Véleményük szerint szakítóvizsgálat előtt a nyúlás a legtöbb pórust tartalmazó szegmens térfogati porozitása (V_V, max^{sm}) alapján lineáris módon becsülhető, a szegmens lokalizálásával a tönkremenetel helye meghatározható. Ám néhány esetben nem eszerint következett be a tönkremenetel. Ebben az esetben kimutatták, hogy nagyméretű pórusok voltak a próbatest szélén, melyek nagyobb feszültségkoncentrációt eredményeztek, így repedések alakultak ki.

Teng és munkatársai [3], akik LPDC öntéstechnológiával előállított AlSi9Mg0.3 ötvözetet vizsgáltak, párhuzamosítással arra a következtetésre jutottak, hogy a töretfelületen előforduló pórusok (a legnagyobb, illetve az összes pórus) ekvivalens átmérője lineáris kapcsolatban áll a nyúlással, viszont ezzel ellentétben a töretfelületi vetített pórus területarány esetén néhányan nemlineáris kapcsolatot állapítottak meg [72, 103–105]. A töretfelületi porozitás meghatározására irányuló módszert viszont részletesen nem ismertették. Ugyanis a töretfelületek egyenletlenek, a felvételeken az egyes részek között szűrkeségi szint átfedések vannak. Emiatt az a szűrkeségi szinteken alapuló képelemző módszerekkel nem határozható meg [106]. A nyúlás mellett vizsgálták a folyáshatár [103–105] és a szakítószilárdság [72, 103–105] kapcsolatát is a töretfelületi vetített pórus területarányával. A szakítószilárdsággal lineáris összefüggéseket állapítottak meg, míg a folyáshatárral nem találtak összefüggést.

Lordan [72] (DC, Al ötvözet), valamint Li és munkatársai [10] (HPDC, Mg ötvözet) szakító próbatestek tönkremeneteli helyét és töretfelületi porozitását becsülték meg 3D-s CT felvételek alapján eltérő módszerekkel és pontossággal, majd az eredményeket összehasonlították a mért adatokkal. Különböző pórusjellemzőkből kiindulva (azaz a legnagyobb Feret átmérőjű pórus; a pórusok legnagyobb vetített területe; a maximális vetített terület és a $\pm\sqrt{\text{terület}}/2$ keresési távolságon belüli metszeti felvételek uniója (együttese) [72]; illetve a repedés terjedési útjának maximális tartományában lévő metszeti felvételek uniója [10]) becsülték a szakítóvizsgálat után létrejövő töretfelületi pórus területarányt. Megállapították, hogy a pórusok 3D-s kiterjedésének figyelembevételével (az ún. Z-Project és Z-Propagation módszerekkel) pontosabban becsülhető a tönkremenetel helye a szakítóvizsgálatok előtt.

Yang és munkatársai [6] LPDC technológiával előállított A356-T6 ötvözet szövetszerkezetét és porozitását vizsgálták optikai, illetve pásztázó elektronmikroszkóppal. Megállapították, hogy a töretfelületen meghatározott porozitás (durva mikroszerkezet esetén) az átlagos folyáshatárra nincs hatással, a szakítószilárdságot kis mértékben, a nyúlást pedig jelentős mértékben befolyásolja, ám részletesen nem tértek ki az összefüggések feltárására. A pórusoktól mentes töretfelületek esetén vizsgálták a szövetszerkezet hatását is.

Többek között Szalva és munkatársai [107] megállapították, hogy a HPDC öntött próbatestek felületének közelében lévő öntési hibák (porozitás) szerepet játszottak a fáradásos tönkremeneteli repedések kialakulásában. A tönkremenetel helye jelentős mértékben függ a pórusok elhelyezkedésétől, abban az esetben is, ha ezek nem a legnagyobb méretű pórusok [89, 90, 97, 101, 108], de a szakirodalmi kutatások kevés figyelmet fordítottak a pórusok keresztmetszeten való elhelyezkedésére annak ellenére, hogy ennek fontosságát kiemelték [9]. Emellett nem található olyan kutatómunka, amely átfogóan mutatja be a pórusjellemzők hatását a mechanikai tulajdonságokra. Tovább nehezíti az eredmények interpretálását a vizsgált ötvözetek anyagminőségének és azok öntéstechnológiájának sokszínűsége, így a létrejövő pórusszerkezet struktúrája (mennyisége, mérete, eloszlása) jelentősen eltérhetnek egymástól, melyek szintén befolyásolhatják a mechanikai tulajdonságokkal és a tönkremenetellel való kapcsolatukat.

A 4. táblázatban összefoglaltam a mechanikai tulajdonságok (ε (%), R_m (MPa), illetve $R_{p0,2}$ (MPa)) és a különböző pórusjellemzők ($A_{A, Prof}^{f-sf}$ (%), V_V (%), V_{max} (mm³), illetve $A_{max, Prof}^{f-sf}$ (mm²)) kapcsolatának vizsgálatával foglalkozó publikációkban közölt eredményeket. Ezek

összehasonlításában a fő szempontot a **megállapított összefüggések jellege** (lineáris, közel-lineáris, illetve nemlineáris) adja. A folyáshatár esetén nem találtak összefüggést egyik pórusjellemzővel sem, míg a szakítószilárdság lineáris kapcsolatban állt a töretfelületi porozitással és a teljes porozitásmennyiséggel. A nyúlást vizsgálva eltérő eredményekre jutottak (lásd a 4. táblázatban). Ezeket a megfigyeléseket részletesebben is kifejtem a 4.2.2 *Pórusszerkezet hatása a mechanikai tulajdonságokra* című fejezetben összehasonlítva a saját kutatási eredményeimmel.

4. táblázat: A mechanikai tulajdonságok és a pórusjellemzők kapcsolatának vizsgálatával foglalkozó publikációkban közölt eredmények összehasonlítása ([12] nyomán).

	Anyag, technológia	Pórusszerkezet	Nyúlás (%)	Szakítószilárdság (MPa)	Folyáshatár (MPa)
[3]	AlSi9Mg0,3-AC; LPDC	$D_{ekv, \Sigma Proj}^{f-sf}$ és $D_{ekv, Amax, Proj}^{f-sf}$ normalizált skálán bemutatva.	- $D_{ekv, \Sigma Proj}^{f-sf}$: $r^2 = 0,78$, lineáris , - $D_{ekv, Amax, Proj}^{f-sf}$: $r^2 = 0,86$ (kiugró értékekkel 0,52), lineáris .	Nem vizsgálták.	Nem vizsgálták.
[9]	AM60, HPDC	- Sáv os pórus eloszlás és nagy mennyiségű porozitás, - $1,1\% V_{V, Vmax}^{f-sm} = 0,16 \text{ mm}^3$ V_{max}^{f-sm} , - V_V^{f-sm} : 0,44-2,88%.	- V_V^{f-sm} : $r^2 = 0,88$, lineáris , - $V_{V, Vmax}^{f-sm}$: $r^2 = 0,94$ (lineáris 0,3- 1,1% között), - $V_{V, Vmax}^{f-sm}$: $r^2 = 0,57$ (nemlineáris 0-0,3% között).	Nem vizsgálták.	Nem vizsgálták.
[10]	AZ91D & EA42, HPDC	- Sáv os pórus eloszlás, - $A_{A, Proj}^{f-sf}$: 0-13%.	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: jó korreláció a <i>logaritmikus szakadási nyúlással</i> (%).	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: jó korreláció a <i>valódi törési</i> <i>feszültséggel</i> (MPa).	Nem vizsgálták.
[5]	AlSi10Mn0,5Mg0.3- AC ill. T7, HPDC	- Sáv os pórus eloszlás és nagy mennyiségű porozitás, - $V_{max}^{total} \approx 0 - 2,0 \text{ mm}^3$.	$V_{max}^{total} = V_{max}^{f-sm}$, nemlineáris .	Nem vizsgálták.	Nem vizsgálták.
[72]	AlSi8Mn0,4Mg0,3; G-DC (manuálisan)	- Klaszter es pórus eloszlás, - $A_{A, Proj}^{f-sf}$: 4-29%.	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: nemlineáris korreláció a <i>valódi törési alakváltozással</i> (e).	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: lineáris korreláció a <i>valódi törési</i> <i>feszültséggel</i> (MPa).	Nem vizsgálták.
[105]	A356-T4, LPDC	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: 17-33% ... 22,5- 46%.	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: alakváltozási sebességtől függő korreláció.	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: közel-lineáris .	Nincs korreláció.
[103]	Al-xSi (x=2, 5; 8; 11), G-DC (manuálisan)	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: 7-50% ... 25-75%.	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: nemlineáris (Si% tartalomtól függő).	$A_{A, Proj}^{f-sf}$: lineáris .	Nincs korreláció.
[109]	AlSi10Cu2Mg0.4- AC ill. T6, Squeeze	V_V^{total} : 2,5-19% <i>sűrűségből meghatározva</i> .	V_V^{total} : közel-lineáris .	Nem vizsgálták.	Nem vizsgálták.
[104]	A356-T6, LPDC	- $A_{A, Proj}^{f-sf}$: $\approx 1,5$ -20%, - V_V^{total} : 0,2-0,95%, <i>sűrűségből meghatározva</i> .	- $A_{A, Proj}^{f-sf}$: nemlineáris , - V_V^{total} : lineáris .	- $A_{A, Proj}^{f-sf}$: lineáris , - V_V^{total} : lineáris .	Nincs korreláció.

1.5 Gépi tanulás alkalmazása változók közötti összefüggések vizsgálatára

A kutatás célja a mechanikai tulajdonságokat befolyásoló **pórusjellemzők azonosítása** volt, valamint annak meghatározása, **mely jellemzők vizsgálata indokolt** az öntészeti ipari minőségellenőrzés során. Mivel a szakirodalmi eredmények tekintetében nincs egyetértés, a pórusok mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgálva az összefüggéseket nemcsak kétváltozós elemzésekkel – ahogyan a bemutatott szakirodalomban is tették –, hanem a gépi tanulást alkalmazva **két- és többváltozós, lineáris és nemlineáris regressziós elemzésekkel** azonosítottam a hatást gyakorló pórusjellemzőket. Kiemelendő, hogy **nem konkrét matematikai összefüggések** megállapítása volt a cél. Ezen a kutatási területen ezt a korszerű statisztikai elemző módszert még nem alkalmazták, ezért újszerű. Az eljárás lehetővé teszi összetett rendszerekben **több független változó** (pórusjellemző) **együttes, párhuzamos hatásának nemlineáris feltárását** egy-egy becsült változóra (például a mechanikai tulajdonságokra) nézve. Ehhez első lépésben feltáró adatelemzést hajtottam végre, majd pedig a prediktív adat-vezérelt modellezést. Ebben az áttekintésben az elemzések módszereit mutatom be.

1.5.1 Feltáró adatelemzés

A **feltáró adatelemzés** kulcsfontosságú lépés a regressziós modellezésben [21, 110–113]. Az adatok vizsgálata segít a megfelelő elemzési technikák és a szükséges összetett gépi tanulási modellek kiválasztását [114]. Magába foglalja az adatok vizualizálását és összegzését a jellemzők megértése, a bennük felfedezhető mintázatok, a változók közötti kapcsolatok, illetve az anomáliák azonosítása érdekében. Ebbe tartoznak az alábbiak:

- a) **Az adatok (változók) szerkezetének megértése:** az adatállomány mérete, szerkezete és típusának (pl. numerikus, kategorikus, időbeli) azonosítása.
- b) **Az adatok statisztikai leírása:** eloszlás (pl. ferdeség, csúcsosság), középpértékek (pl. átlag, medián) és szóródás (pl. variancia, szórás, interkvartilis tartomány) elemzése, értéktartomány meghatározása.
- c) **Grafikus ábrázolás:** hisztogramok, boxplotok, szórásdiagramok, idősoros vonalábrák, keresztábrák segítségével vizsgálható a változók eloszlása és egymás közötti kapcsolata. Az adatvizualizációk segítenek az összefüggések gyors felismerésében.
- d) **A kiugró értékek és az anomáliák felismerése:** azoknak az értékeknek az azonosítása, amelyek jelentősen eltérnek az adathalmaz többi pontjától (pl. adatbeviteli hibák vagy valódi, de ritka események, melyek felismerése és kezelése kulcsfontosságú lehet).
- e) **A korreláció és a változók közötti kapcsolatok azonosítása:** Pearson, Spearman, vagy Kendall korrelációs együtthatókkal (korrelációs mátrix-szal szemléltetve) vizsgálhatóak az összefüggések, az erősen összefüggő (redundáns) változók azonosíthatók.
- f) **A hiányzó adatok kezelése:** pótlás vagy kihagyás.
- g) **A feltételezések ellenőrzése:** az adatok normál eloszlásának és a változók függőségének ellenőrzése.
- h) **A változók szelekciója, illetve előkészítése:** a legfontosabb változók meghatározhatóak, a szükségtelen (redundáns, vagy független) jellemzők elhagyhatóak a modellek

hatékonyságának növelése érdekében. Előkészítés lehet pl. skálázás vagy kategóriák kódolása.

Az adatok gyűjtése után elsőként egy-, illetve kétváltozós elemzéseket szükséges végezni. Előbbi az adatelemzés legegyszerűbb formája, minden változó elemzése külön-külön történik **statisztikai jellemzésük** céljából. Egy-egy változó statisztikai ábrázolására sűrűségfüggvények, kumulatív eloszlásfüggvények, illetve úgynevezett dobozdiagramok alkalmazhatóak, melyek hatékonyan kombinálnak több vizualizációs technikát. Általuk megismerhető az adatok eloszlása, a szimmetriája és ferdesége értékelhető, illetve a lehetséges kiugró értékek is láthatóvá válnak [115–117]. A dobozdiagrammal összefoglalható az adathalmaz öt fő jellemzője (minimum, Q1 (első kvartilis), medián, Q3 (harmadik kvartilis) és maximum érték). Az interkvartilis tartomány (IQR) a harmadik kvartilis és az első kvartilis különbsége (azaz $IQR = Q3 - Q1$). A kiugró értékek azok, amelyek nagyobbak, mint $Q3 + (1,5 \cdot IQR)$ vagy kisebbek, mint $Q1 - (1,5 \cdot IQR)$.

A **kétváltozós elemzés** két változó lineáris és nemlineáris kapcsolatának feltárása, mellyel az összefüggés módja, iránya és mértéke vizsgálható. Meghatározható, hogy milyen mértékben határozza meg az egyik változó a másikat, segít az adatokban lévő mintázatok megértésében. A statisztikai modellezésben kulcsfontosságú szerepet játszik. Két folytonos változó között az összefüggések – lineáris, nem lineáris vagy nincs – ábrázolása szórásdiagramok segítségével történik (ahol a független változó x , a függő változó y és minden egyes adatpont a két változó egy-egy értékpárját jelöli), függvényillesztésekkel és a determinációs együttható meghatározásával (r^2) (14) (illetve a korrelációs együtthatókkal – r) [12, 118–120].

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right)^2 (-) \quad (14)$$

ahol:

r^2 : a kétváltozós elemzéssel meghatározott determinációs együttható (-),

n : az esetek száma,

x_i : a független változó mért értékei,

$\bar{x}$: a független változó átlaga,

y_i : a függő változó mért értékei,

$\bar{y}$: a függő változó átlaga.

A **korrelációs együtthatóknak**, melyek statisztikai mérőszámok, több típusa alkalmazható az adatok jellegétől függően két változó közötti összefüggés vizsgálatára (számszerűsítésére). Amennyiben két változó nem lineáris módon függ össze, akkor előfordulhat, hogy az együttható gyenge összefüggést jelez, noha szakirodalmakban mégis sokszor alkalmazzák nemlineáris összefüggések jellemzésére a determinációs együtthatókat. A Pearson korrelációs együttható (r_P (-)) normál eloszlású adathalmazok esetében alkalmazható [21, 121], míg a Spearman rangkorrelációs együttható (r_S (-)) rangsorolt vagy nem normális eloszlású adatok összefüggéseinek meghatározására alkalmas [12, 118, 122]. Utóbbi monoton összefüggések erősségét és irányát méri, robusztus becslést adva a változó összefüggésekről. Az együtthatók értéke -1,0 és +1,0 között változhat, de sohasem nulla. $|0,5|$ érték alatt az

összefüggés erőssége gyenge, míg $|0,8|$ felett erős [117]. A nulla közeli érték az összefüggés hiányát jelenti. Az együttthatókkal nem tehető különbség a független és a függő változók között, így az ok-okozati kapcsolat nem állapítható meg. A meghatározott összefüggések ábrázolása **korrelációs mátrixokkal** (ún. hőtésképen) lehetséges. A pozitív előjelű együtttható azonos irányú, míg a negatív előjelű együtttható ellentétes irányú összefüggést jelez [115, 123, 124]. A korrelációs együtttható (r (-)) négyzete emelésével (r^2 (-)) az 5. táblázat szerint oszlik fel a változók közötti lineáris kapcsolat erőssége.

5. táblázat: A változók közötti lineáris kapcsolat erősségének meghatározása a determinációs együtttható (r^2) alapján.

A determinációs együtttható értéke	A kapcsolat erőssége
$0 < r^2 \leq 0,3 $	gyenge
$ 0,3 < r^2 \leq 0,6 $	mérsékelt
$ 0,6 < r^2 < 1,0 $	erős

A korrelációs együttthatókon túl a **p-valószínűségi érték** (-) jelzi a két változó közötti kapcsolat erősségét, és segít annak értékelésében, hogy a mérési módszer megbízható eredményeket produkál-e. Minél alacsonyabb a p-érték, annál nagyobb az eredmények statisztikai szignifikanciája (annál kisebb a véletlenszerűség valószínűsége). Általában a 0,05 vagy annál alacsonyabb p-értéket tekintik statisztikailag szignifikánsnak [12, 117, 125].

A gyenge összefüggést mutató, illetve nagy mértékben összefüggő (redundáns) irreleváns jellemzők többek között a korrelációs együttthatók alapján meghatározhatóak és szelektálhatóak (**Correlation-based Feature Selection**) [12, 126]. Ez az eljárás független változók számának optimalizálásával segít csökkenteni a modellek összetettségét és javítja az előrejelzés pontosságát, csökkenti a túlilleszkedés kockázatát, valamint növeli az eredmények általánosíthatóságát [120, 127]. A változók kiválasztásának módszere az adott vizsgálatnak megfelelően történik.

A változók közötti összefüggések megértése segíti a megfelelő regressziós modellek és a független változók kiválasztását, emellett biztosítja, hogy az adatok megfeleljenek a statisztikai tesztek követelményeinek.

1.5.2 Regressziós modellezés

A feltáró adatelemzést követően végezhető el a **prediktív adat-vezérelt modellezés** [111–113, 127–129], ami jellemzők közötti kapcsolatok megállapítására szolgál. A két- és többváltozós regressziós elemzések olyan fejlett adatelemzési technikák, amelyekkel az adatokban trendek kereshetőek, illetve amelyek előrejelzések készítésére alkalmazhatók.

A függő és a független változó(k) között lineáris és nemlineáris összefüggésekkel meghatározható, hogy hogyan befolyásolja egyik jellemző a másikat. **Kétváltozós lineáris regresszió** elemzés [130, 131] esetén minden egyes függő "y" változóhoz egyetlen független "x" változó tartozik (x_1, y_1), míg **többváltozós lineáris és nemlineáris** esetben [132, 133] több "x" változót tartalmaz a modell ($x_1, x_2, x_3 \dots x_m, y_1$). A lineáris és nemlineáris regressziós

modellek általánosan a (15) összefüggés szerint épülnek fel [12]. Részletesebben szemlélítve a kétváltozós lineáris regressziós modellek a (16), míg a többváltozós lineáris modellek a (17) összefüggés szerint épülnek fel [134, 135], ám ezek csak a regressziós modellezés koncepcióját hivatottak szemléltetni. Az alkalmazott nemlineáris gépi tanulási modellek azonban nem adnak egyedi regressziós együtthatókat.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (15)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 \quad (16)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_m x_m \quad (17)$$

ahol:

y: a becsült (függő) célváltozó,

x_m : az m -dik független változó,

m: a független változók száma egy adott regresszió elemzésben (-),

β_0 : konstans (tengelymetszet) (-),

β_m .: az m -dik független változó regressziós együtthatója (-).

A modellek teljesítményének javítása érdekében **összetett adattranszformációs, illetve jellemzőképző** (*Advanced Feature Engineering*) technikák alkalmazhatók [136]. Ilyen például az ún. *Golden Features* (GFs) koncepciója [137, 138], ahol a mért jellemzők alapján új jellemzők képezhetők matematikai transzformációkon, interakciókon keresztül (például összeadással, kivonással, szorzással és osztással), valamint statisztikai aggregációkkal. A transzformációk célja, hogy az eredeti, nem transzformált adathalmazban közvetve jelen lévő rejtett minták és változók közötti kölcsönhatások feltárásával a becslések teljesítménye növekedjen. Ezen túlmenően ún. *Feature Selection* (*Selected Features* – SFs) eljárások is alkalmazhatóak egy véletlenszerűen generált jellemző bevezetésével, illetve permutáció-alapú fontossági mérések alkalmazásával az előrejelzések szempontjából kevésbé releváns jellemzők azonosítására és elhagyására. A modellezés során különböző gépi tanulási algoritmusok alkalmazhatóak, mint például a *Linear*, *Random Forest*, *LightGBM* (Light Gradient Boosting Machine), *XGBoost* (Extreme Gradient Boosting), *CatBoost* (Categorical Boosting) és *NeuralNetwork* modellek [12, 18, 19, 112, 139, 140].

A **modellek teljesítményének értékelése** biztosítja, hogy a modell pontos és általánosítható eredményeket nyújtson, mely **statisztikai mérőszámokkal** írható le, mint például az átlagos négyzetes eltérés/hiba gyöke (RMSE) (18), az átlagos abszolút hiba (MAE) (19) és a determinációs együttható (R^2) (20). Ezek a szakirodalomban leggyakrabban használt mutatók [12, 15, 18, 19, 141]. A kisebb RMSE és MAE ($0 \dots +\infty$; $\neq 0$), valamint az abszolút értékben nagyobb R^2 ($-1,0 \dots +1,0$) értékű modellek teljesítménye tekinthető pontosabbnak, melyek alapján kiválaszthatóak a legjobb modellek. A mérőszámok segítenek elkerülni a túlillesztést, ezáltal az eredmények megfelelően általánosíthatók.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (18)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (19)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} (-) \quad (20)$$

ahol:

y_i : a valós (mért) érték,

$\hat{y}_i$: a becsült érték,

$\bar{y}$: a valós (mért) értékek átlaga,

n : az esetek száma,

R^2 : a lineáris regresszió elemzéssel meghatározott determinációs együttható (-).

a) **A modell átlagos négyzetes eltérésének (hibájának) gyöke** (RMSE) a tényleges és a becsült értékek átlagos különbségét méri. A négyzetre emelési folyamat miatt nagyobb súlyt ad a nagyobb hibáknak, így érzékenyebb a kiugró értékekre, mint más mérőszámok. Alkalmazásának előnye, hogy könnyen értelmezhető és differenciálható, ám mértékegységfüggő. Az RMSE a vizsgálati minta méretének növekedésével nő. Ez akkor jelent problémát, ha az eredmények különböző vizsgálati mintákra értendők (pl. az egyik vizsgálatban 24 mérési pont (eset), míg egy másik vizsgálatban 100 mérési pont található).

b) **A modell átlagos abszolút hibája** (MAE) a tényleges és a becsült értékek közötti abszolút eltérést jellemzi a különbségek átlagával. Az egyik leggyakrabban alkalmazott veszteségfüggvény (L1), modellteljesítményt leíró mutató. Alkalmazása egyszerű, nem érzékeny a kiugró értékek által okozott nagyobb hibákra. Hátránya, hogy skálafüggő (ahogyan az RMSE), nem használható különböző mértékegységeket használó adathalmazok összehasonlítására. Másik hátránya, hogy nem differenciálható nullánál.

c) Lineáris modellek esetén [142] **a determinációs együttható** (R^2) azt mondja meg, hogy a modellel alkotott függvénnyel a becsült értékek (független változó) mennyire, milyen mértékben magyarázhatóak a független változókkal. Másképp fogalmazva a tényleges pontok és a lineáris függvény pontjai közötti különbséget – variabilitást, változékonyságot – mondja meg. Alkalmazásával eltérő függő változók is összehasonlíthatóak, mivel ez egy standardizált érték, nem érzékeny a mértékegységekre. Nem lineáris függvények esetén inkább csak interpolált értékek becslésére alkalmazható megfelelően. Az R^2 -nek nem mindig van tiszta interpretációja, túlilleszt, pontatlan, amikor a modell túl bonyolulttá válik. Nagyobb mértékben alkalmazkodik a konkrét bevitt adatok specifikus jellemzőihez, ami csökkentheti a modell általánosíthatóságát. Mivel nemlineáris modelleknél a hibák és a modellhez való illeszkedés jelentősen bonyolultabb lehet, mint lineáris esetekben, ezért nem képes teljes mértékben kezelni a változások mértékét vagy a modellre jellemző torzításokat. Így tehát az R^2 nem ad mindig megbízható képet a nemlineáris modellek hibájáról. Emiatt más mérőszámok használatosak (pl. MSE, MAE), amelyek jobban képesek a modell tényleges teljesítményét értékelni.

A modellek robusztus teljesítményértékelésének biztosítására **keresztellenőrzés** alkalmazható [12, 15, 19, 111, 112, 120, 139–141]. Segítségével a becslés kevésbé torz, a túlillesztések pedig felismerhetők. Általánosíthatóbb modellek választhatóak ki azáltal, hogy

az adatok több részre bontását követően a modellek különböző kombinációkban tanítottak és teszteltek. A keresztellenőrzésre több módszer létezik, többek között a k -szoros keresztellenőrzés (melynek szintén több változata alkalmazható), ami a gépi tanulási modellek értékelésére használható (korlátozott adatmintán is) [143].

A **k -szoros keresztellenőrzés** (*K-fold Cross-validation*) során a modellek több részre osztott adathalmazok segítségével többszörösen tanítottak és értékelték [12, 143, 144]. Az adathalmaz véletlenszerűen k egyenlő méretű (nem átfedő) al-halmazra osztott (pl. $k = 5$) a minták darabszámának megfelelően. Minden egyes halmaz egyszer a modell tesztelésére szolgáló validációs adatokat tartalmazza, míg a fennmaradó $k - 1$ halmazban a tanulásra használt adatok vannak. A modellillesztés és az értékelés k -szor ismétlődik, ezáltal statisztikailag megbízhatóbb. A teljesítménymutatók ((18) – (20)) átlagai alapján így pontosabban értékelhetők a modellek teljesítménye, mint egy egyszeri tanításra/tesztelésre való felosztással. Mivel az R^2 matematikailag pontatlan a nemlineáris regressziós modellek értékelésénél és téves következtetésekhez vezethet [142], ezért csak a lineáris modellek esetében értékelhető. A k értékét úgy kell megválasztani, hogy az statisztikailag reprezentatív legyen, ugyanis a keresztvalidáció során meghatározó szerepe van, befolyásolja a modell teljesítményének értékelését és az általánosíthatósági képességét. Ez tipikusan 5 vagy 10, mert jó egyensúlyt biztosítanak a számítási idő és a teljesítménybecslés stabilitása között. A módszer előnye a hatékonysága, valamint kevésbé érzékeny az adatok eloszlására.

A teljesítménymutatók statisztikai adatokkal **normalizálhatóak** annak érdekében, hogy a különböző függő változók becslésére végzett modellezések eredményei összehasonlíthatóak legyenek [12, 145]. Az RMSE pl. a szórással (21), míg a MAE a maximum és minimum értékek különbségével (22) normalizálható. A kisebb NRMSE és NMAE értékű modellek tekinthetők pontosabbnak.

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\text{std}(y)} (-) \quad (21)$$

$$\text{NMAE} = \frac{\text{MAE}}{y_{\max} - y_{\min}} (-) \quad (22)$$

ahol:

$\text{std}(y)$: az y szórása,

$y_{\max}$ és $y_{\min}$: az y minimum és maximum értékei.

A modellek teljesítményének értékelése mellett a jellemzők fontosságának értékelése kulcsfontosságú. A **jellemző fontossági vizsgálat** (*Feature Importance*) átláthatóan vizsgálható, hogy mely független változók befolyásolják számottevően a függő változót [12, 113, 120]. Egy-egy modell esetén meghatározható, hogy az egyes bemeneti jellemzők milyen mértékben járulnak hozzá a célváltozó előrejelzéséhez. Az egyes bemeneti változók relatív fontossága a hozzájuk rendelt pontszámokkal (-) jelezhető az adott modell döntéshozatalában. Az elemzés során egy jellemző relatív fontossága a kiválasztás gyakoriságával növekszik (pl. döntési fákbán, mint például az *XGBoost* modellekben). A jellemzők fontosságának több meghatározási módja alkalmazható, de ezek közül kiemelendő a **permutáció-alapú jellemzőfontossági vizsgálat**. Egy jellemző értékeit véletlenszerűen permutálva (összekeverve) és a modell teljesítményének változását mérve adódnak a fontossági

pontszámok. Egész pontosan, ha egy adott jellemző fontos a modell számára, akkor annak véletlenszerű összekeverése csökkenti a modell teljesítményét. Ezzel szemben, ha egy jellemző nem lényeges, akkor az összekeverése nem, vagy csak minimálisan befolyásolja az eredményt [146, 147]. Működésének lépései az alábbiak:

1. **Az alapteljesítmény mérése:** a modell statisztikai mérőszámokkal (pl. RMSE, MAE) leírható teljesítményének meghatározása egy, a modell értékelésére alkalmas módszerrel, pl. *k-szoros keresztvalidációval*.
2. **A jellemzők permutációja:** Egyenként, külön-külön az egyes jellemzők értékeinek véletlenszerű permutációja az adathalmazban, aminek célja az adott jellemző és a célváltozó kapcsolatának megszakítása.
3. **A teljesítmény újramérése:** A permutált adatokat a modellbe történő visszatöltésük után a teljesítménymutató újra számolása.
4. **A fontosság meghatározása:** Az eredeti (*1. lépés*) és a permutált (*3. lépés*) modellteljesítmény közötti különbség mutatja meg, hogy az adott jellemző mennyire fontos. Ha a statisztikai mérőszámokkal kifejezett teljesítmény jelentősen csökkent, a jellemző fontosnak tekinthető.

A permutáció-alapú fontossági vizsgálat bármilyen predikciós modell esetén használható (képes kezelni a nemlineáris kapcsolatokat is), ám erősen korrelált változók esetén torzíthat.

2 Tudományos nyitott kérdések

A szakirodalom feldolgozása során összefoglaltam a különböző szerkezetvizsgálati módszerek – mind pozitív, mind negatív – jellemzőit, mely eljárások alkalmasak az öntvények pórusszerkezetének jellemzésére, amiket szintén bemutattam. Ezután összegeztem azokat a kutatási eredményeket, melyek a pórusok egyes jellemzőinek hatását írták le az öntvények mechanikai tulajdonságaira, ám a megállapítások csak kétváltozós összefüggésekre vonatkoztak. A kutatómunka újdonsága, hogy az összefüggéseket többváltozós regresszióval is fel kívánom tárni, melynek a vonatkozó módszerét is bemutattam. Tehát a szakirodalom feldolgozás egyik vonulata a szerkezetvizsgálati módszerek jellemzése és összehasonlítása az öntvények pórusszerkezetének megfelelő vizsgálati módszereinek kiválasztására, míg a másik a pórusszerkezet és a tönkremenetel kapcsolatának feltárása.

A szakirodalmi áttekintés alapján megállapítottam a bennük található ellentmondásokat és hiányosságokat, melyeket alább sorolok fel:

1. A szakirodalomban bemutatott különböző szerkezetvizsgálati módszerekkel meghatározható porozitás mennyisége eltérő, ugyanis azt a módszerek tulajdonságai, valamint az anyag pórusszerkezete befolyásolja.
2. A kutatások során nem vizsgálták egzakt módon a pórusok keresztmetszeti elhelyezkedését a próbatestek felületéhez képest, annak ellenére, hogy ennek fontosságát kiemelték.
3. A szakirodalomban nem vizsgálták a kétdimenziós keresztmetszeti pórusjellemzők hatását.
4. A szakirodalomban előfordult a kiugró értékek elhagyása, ami növelte a korrelációs együttható értékét. Ennek a módszernek az alkalmazása megkérdőjelezhető. A kiugró értékek elhagyásának módszertanával kapcsolatban különös figyelemmel kell eljárni.
5. A szerzők munkáit tekintve nincs egyetértés abban, hogy melyik pórusjellemző(k) alapján becsülhető a tönkremenetel helye a szakítóvizsgálatok előtt.
6. Ehhez kapcsolódóan nem található olyan kutatómunka sem, amely átfogóan mutatja be a pórusjellemzők hatását a mechanikai tulajdonságokra. Nincs egységes konklúzió, hogy milyen módon befolyásolják a pórusjellemzők a szakadási nyúlást.
7. A kutatásokban a pórus-, illetve a mechanikai jellemzők kapcsolatának vizsgálatára csak kétváltozós elemzéseket alkalmaztak.
8. A megfigyelt eredmények interpretálását nehezíti a vizsgált ötvözetek anyagminőségének és öntéstechnológiáinak sokszínűsége, így a létrejövő pórusszerkezet struktúrája (mennyisége, mérete, eloszlása), illetve szövetszerkezete. Ezek jelentősen eltérhetnek egymástól, így befolyásolva a mechanikai tulajdonságokat és a tönkremenetel módját.

A szakirodalom feldolgozása alapján az alábbi tudományos nyitott kérdéseket fogalmaztam meg:

1. Kérdés: Az egyes képalkotó módszerek (OM, 2D CT, 3D CT) alkalmazásának milyen előnyei és korlátjai vannak? Milyen kapcsolat van a módszerekkel meghatározott porozitás értékek között?
2. Kérdés: A mechanikai tulajdonságok és a pórusszerkezet közötti kapcsolatok feltárására melyik módszert (OM, 2D CT, 3D CT) célszerű alkalmazni?
3. Kérdés: A mechanikai tulajdonságok szempontjából a pórusok próbatest keresztmetszetén való elhelyezkedésének milyen jelentősége van és ezt hogyan lehet jellemezni?
4. Kérdés: A két- és háromdimenzióban meghatározott pórusjellemzők milyen kapcsolatban állnak a mechanikai tulajdonságokkal és milyen repedésképző szerepük van?
5. Kérdés: Többváltozós regressziós elemzéssel milyen összefüggések állapíthatók meg a pórus-, illetve a mechanikai jellemzők között?

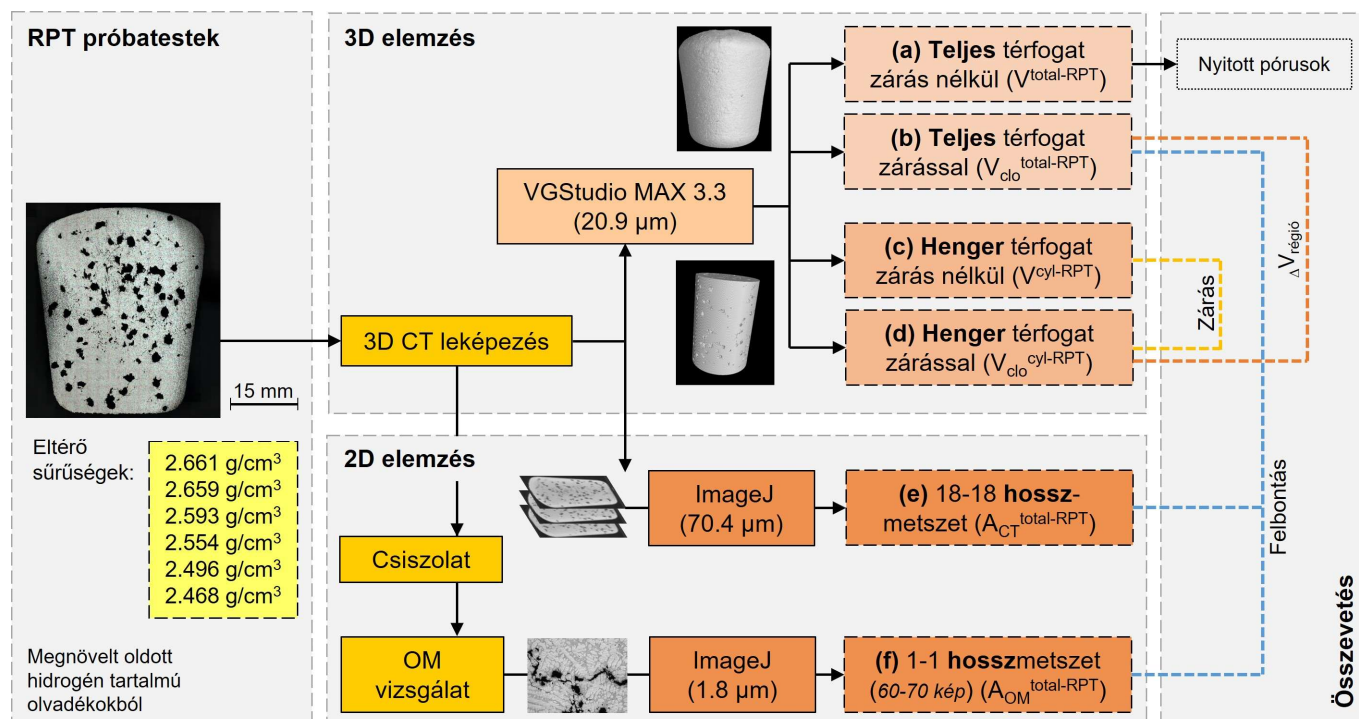
3 Csökkentett nyomáson dermedő próbák porozitása

A kutatómunka során elvégzett vizsgálatok két részre oszthatók. Elsőként meg kívántam határozni, hogy melyik szerkezetvizsgálati módszer a legmegfelelőbb a továbbiakban vizsgált öntvények pórusszerkezetének vizsgálatára, illetve melyik módszer milyen pontossággal alkalmazható.

Ehhez a pórusszerkezet vizsgálatára a szakirodalomban bemutatott módszereket (3D CT, 2D CT, OM) **jellemeztem és összehasonlítottam**. Meghatároztam azok **előnyeit, korlátjait**, illetve, hogy a különböző próbatestek **eltérő szerkezetét melyik módszer(ek)-kel és milyen eljárásokkal** lehet jellemezni a legpontosabban. A kitűzött cél végrehajtásához az ipari gyakorlatban az olvadékok oldott hidrogéntartalmának meghatározására szolgáló, AlSi7MgCu0,5 ötvözetből öntött csökkentett nyomáson dermedő próbákat vizsgáltam. Ezek szándékosan megnövelt oldott hidrogén tartalmú olvadékokból származtak, így eltérő mennyiségű porozitást tartalmaztak. A próbatestek sűrűségének meghatározása Arkhimédész elve szerint, MK3000 típusú berendezéssel történt (3) Dr. Fegyverneki György közreműködésével [8]. Az összesen hat darab próbatest sűrűségei a következők: 2,661; 2,659; 2,593; 2,554; 2,496 és 2,468 g/cm³.

3.1 Vizsgálatok

Az eltérő porozitás-tartalmú csökkentett nyomáson dermedő próbatesteken elvégzett vizsgálatok folyamatát az 5. ábra mutatja be. Az eredmények között különböző aspektusokból vontam párhuzamot.



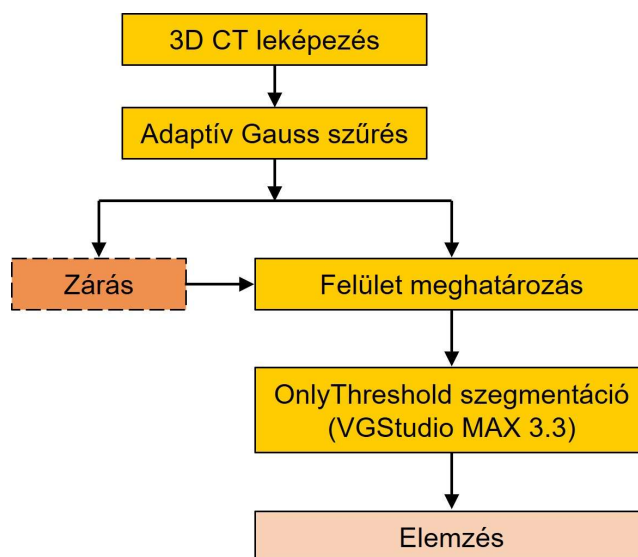
5. ábra: A csökkentett nyomáson dermedő próbákon végzett vizsgálatok, valamint a meghatározott porozitás eredmények összehasonlításának módjai: a felbontás, a morfológiai transzformáció (zárás) és a vizsgált térfogat (régió) méretének hatása ([8] nyomán).

Az RPT próbák CT vizsgálata

A komputertomográfias vizsgálatokhoz a 3D Finomszerkezet Vizsgáló Laboratóriumban található YXLON FF35 típusú μ -CT-t használtam. A próbatestek leképezése transzmissziós röntgensóval történt. A gyorsítófeszültség 125 kV, az áramerősség 70 μ A, míg a felvételek felbontása 20,9 μ m volt (a felbontás mindhárom irányban azonos volt), ami 6,67x-es nagyításnak felelt meg. A vetületi röntgenfelvételek rekonstruálásához az YXLON Reconstruction Workspace 1.4.4.0, a felvételek 3D-s megjelenítéséhez és értékeléséhez a VGStudio MAX 3.3 verzióját használtam.

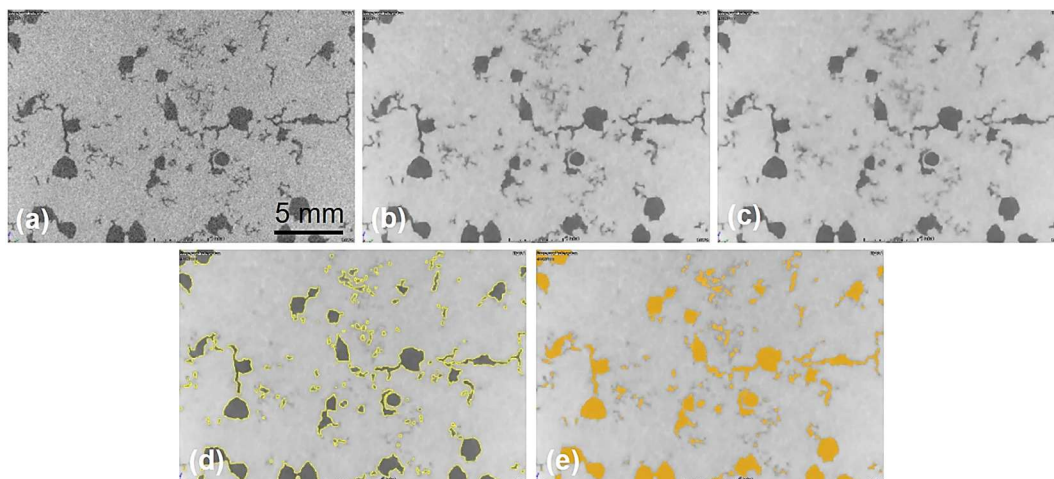
3.1.1 Háromdimenziós felvételek (CT)

A csökkentett nyomáson dermedő próbák 3D-s képelemzésének folyamatát a 6. ábra mutatja be. A felvételek minőségének javítása érdekében **adaptív Gauss** típusú, azaz a világosabb és sötétebb régiókhoz alkalmazkodó zajszűrést (képátalakítást) végeztem. Ezzel a felvételen látható (a röntgensugár detektálásából származó) zajokat elsimítottam, de a pórusok jól elhatárolhatóak maradtak. Szűréskor a szoftver által használt, képpontokból álló térbeli Kernel mátrix² a pontok szűrkeségi szint eloszlásának megfelelően, a benne lévő súlyok adaptív változtatásával szűrkeségi szint átlagot képez [74]. Ez az átlagérték a térbeli mátrix közepére eső voxel új, simított szűrkeségi szintje lesz. A simítás hatása a 7. ábra (a) és (b) részén látható. Ezután meghatároztam a pórusok felületét a pórusok és az alumínium fázis határán lévő voxelek szűrkeségi szintjének megadásával (7. ábra (d)). Következő lépésként a 7. ábra (e) részén látható módon detektáltam a pórusokat a kizárólag szűrkeségi küszöbértéken alapuló számítógépi algoritmussal (OnlyThreshold), majd a szoftver segítségével meghatároztam a pórusok térfogatát.



6. ábra: A CT felvételek 3D-s értékelésének folyamata ([8] nyomán).

² Egy szerkezeti elem, például egy 3x3x3 voxel méretű kocka térfogat (kétdimenziós felvételeken ez egy 3x3-as pixelméretű négyzet). Mérete és oldalaránya változhat.



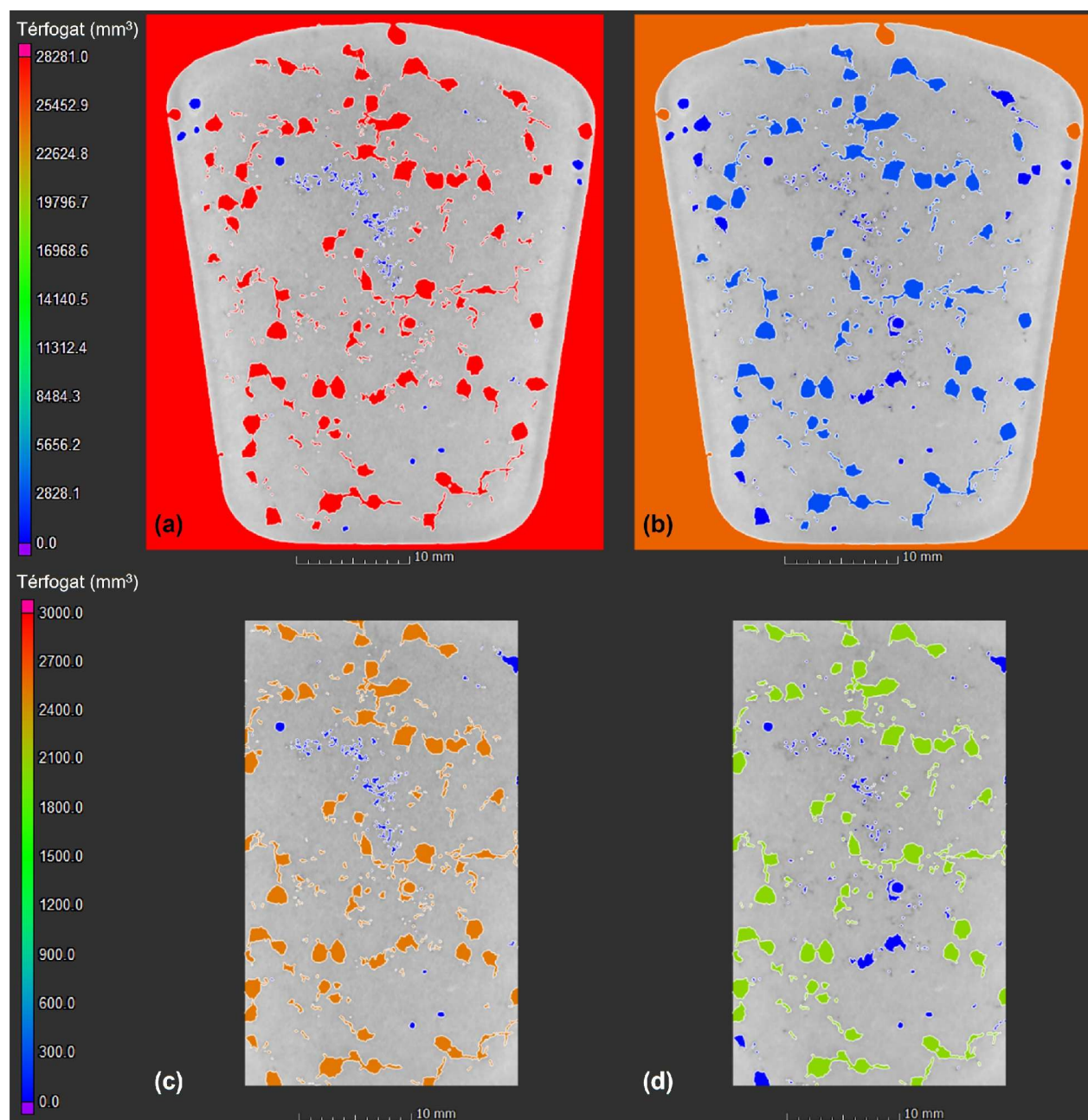
7. ábra: A CT felvételek 3D-s elemzésének lépései: (a) az eredeti, zajos felvétel; (b) az adaptív Gauss képátalakítás utáni zajmentes felvétel; (c) a pórusszerkezet a morfológiai transzformáció után; (d) a pórusok felületének meghatározása; (e) a pórusok detektálása [8].

A 3D-s elemzéseket elvégezve láthatóvá vált a szándékosan megnövelt, különböző oldott hidrogén tartalmú olvadékokból öntött próbatestek belső pórusszerkezete, mely az eredmények alapján a próbatestek felületére kifutó nyitott csatornákat tartalmaztak (8. ábra (a)). A pórusok összetett morfológiájúak voltak, póruscsatornákon keresztül kapcsolódtak össze. A nyitott pórusszerkezet miatt a nagyobb pórustérfogatok a próbatest körül lévő levegőt reprezentáló térfogattal összefüggtek. Így a mért porozitás eredmények nem voltak értékelhetőek (5. ábra (a)).

A probléma kiküszöbölésére az adaptív Gauss simított szürkefelvételeken további átalakításokat végeztem. Az irodalomban rendszerint alkalmazott **morfológiai transzformációt (zárást)** [148–151] hajtottam végre a 3D-s felvételeken ($V_{clo}^{total-RPT}$) (5. ábra (b)). Ez egy olyan képátalakítás, amivel a felhasználó számára szükséges adatok megbízhatóan kinyerhetővé válnak annak ellenére, hogy a felvételek egyes részletei módosulnak. Ilyen adat pl. többfázisú szerkezet esetén az egyes fázisok mennyisége, mérete, morfológiája és eloszlása.

A pórusokat összekötő csatornákat öt ciklusszámú morfológiai transzformációval lezártam a **teljes próbatestek térfogatában** ($V_{clo}^{total-RPT}$), ami öt lépésben az alumínium fázis **dilatációját**, majd ismét öt lépésben az **erózióját** jelenti (6. táblázat). Ugyanis ennek során az egyes képpontok szürkeségi szintje a szomszédos képpontok szürkeségi szintjétől függően változik meg. Az erózió és a dilatáció egymással komplementer műveletek. A figyelembe vett szomszedság méretét és alakját – ahogyan az adaptív Gauss képátalakításnál is – a Kernel mátrix határozza meg. Így tehát a 3D-s szürkekép dilatációja egy-egy voxel értékének helyettesítése az önmaga és a térben 26 Moor-féle szomszédja [152, 153] által alkotott csoport szürkeségi értékeinek maximumával, míg az erózió során a minimumával [74, 80]. A dilatáció folyamán a detektált objektumok felületi képpontjainak szürkeségi szintje növekszik, tehát jelen esetben az alumínium fázist jellemző voxelek száma növekedett. Az erózió során a detektált fázisok felületi képpontjainak szürkeségi szintje csökken, tehát az alumíniumot jellemző voxelek száma csökkent. A zárás irreverzibilis képátalakítás, ezért segítségével a **nyitott póruscsatornák bezárhatóak** a 7. ábra (b) és (c), illetve a 8. ábra (b) részén látható módon. Az átalakítás után zárt pórusszerkezet jött létre, a pórusok nem, vagy csekély mértékben

érintkeztek a próbatest környezetével, így a porozitás mennyiségét meg lehetett határozni a **teljes próbatestek térfogatában** ($V_{V, clo}^{total-RPT}$). A 3D-s CT felvételek kiértékelése során a legkisebb pórustérfogat, amit figyelembe vettem $0,001 \text{ mm}^3$ volt. A próbatestben lévő pórusok térfogathányadát ($V_{V, clo}^{total-RPT}$) százalékos formában határoztam meg (8). A 6. táblázatban összefoglaltam az alkalmazott vizsgálati módszerek főbb jellemzőit.



8. ábra: A vizsgált testek 3D-s elemzésének eredményei hosszsz metszeti ábrákon bemutatva: (a) morfológiai transzformáció (zárás) nélkül, felületre kifutó nyitott pórusokkal; (b) morfológiai transzformáció után zártak a pórusok; (c) a henger térfogat zárás nélkül; (d) a henger térfogat zárás után [8].

6. táblázat: A porozitás meghatározására alkalmazott két- és háromdimenziós vizsgálatok főbb jellemzői ([8] nyomán).

Jellemzők	3D CT felvételek elemzése	2D CT felvételek elemzése	OM felvételek elemzése
Mintaelőkészítés	Nincs	Nincs	Vágás, csiszolás, polírozás, felvételek elkészítése.
Elemzett metszetek száma	Nincs metszet	18 felvétel/próbatest ($A_{CT}^{total-RPT}$)	60-70 felvétel/ 1 csiszolat/próba ($A_{OM}^{total-RPT}$)
Elemzett régió méretváltozása	Vizsgált	Nem vizsgált	Nem vizsgált
Felbontás	20,9 μm	70,4 μm	1,8 μm
Képatalakítás típusa	Adaptív Gauss típusú szűrés, majd - $V_{clo}^{total-RPT}$: 5-5 lépésben; - $V_{cyl-RPT}$: zárás nélkül; - $V_{clo}^{cyl-RPT}$: 5-5 lépésben, végül detektálás.	Adaptív Gauss típusú szűrés, majd zárás nélkül detektálás.	Szürkekép átalakítás nélkül detektálás.
A mért pórusjellemző	V_V (%)	A_A (%)	A_A (%)

A morfológiai transzformáció és a vizsgált régió méretének hatása

Mivel a morfológiai transzformációs folyamat csökkenti a pórusok térfogatát, így ennek hatását, valamint szerkezetvizsgálati alkalmazhatóságát is tanulmányozni kívántam (*ami kutatás közben felmerült nyitott kérdés*). Ehhez a próbatestek **belső hengeres**, virtuálisan kivágással **módosított térfogatát** vizsgáltam a pórusszerkezet **morfológiai transzformációjával** ($V_{clo}^{cyl-RPT}$), **illetve anélkül** ($V_{cyl-RPT}$) (5. ábra, illetve 8. ábra (c) és (d), valamint 6. táblázat). A két módszerrel történő elemzés eredményeit összehasonlítottam annak érdekében, hogy képet kapjak a transzformáció után detektálható pórusmennyiség változásáról, ami jellemzi a pórusok összetettségét is. Ugyanis mivel a zárás a fázisok felületén megy végbe, konvex morfológia esetén a változás kisebb, míg konkáv szerkezet esetén ez a változás jelentősebb [80].

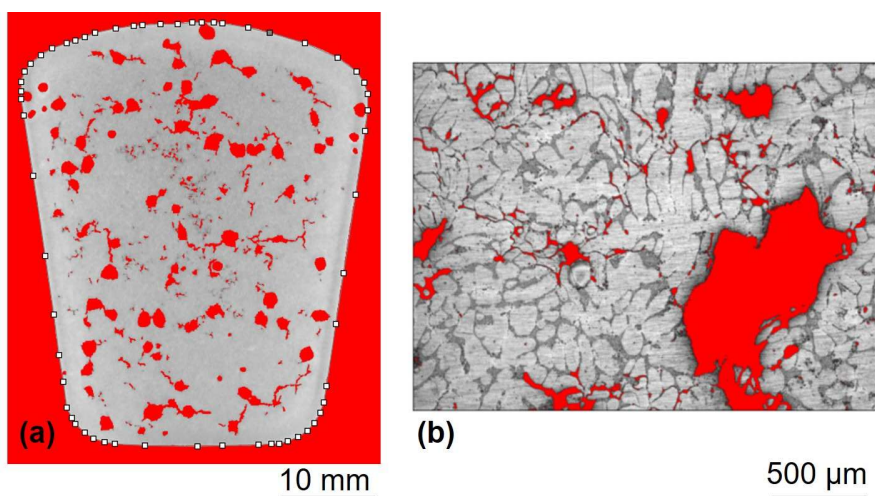
Emellett mivel a vizsgált régiók mérete és helye befolyásolja a detektálható porozitást [59, 62, 66, 84, 87], ezért a térfogatmódosítás hatását és szerkezetvizsgálati alkalmazhatóságát (*ami szintén kutatás közben felmerült nyitott kérdés*) is vizsgáltam a $V_{clo}^{total-RPT}$ és $V_{clo}^{cyl-RPT}$ térfogatokat összehasonlítva (5. ábra, illetve 8. ábra (b) és (d)).

3.1.2 Kétdimenziós felvételek (CT, OM)

A próbatestek 3D-s CT-s felvételeiből a teljes próbatestek pórusszerkezetét reprezentáló 18-18 db hosszirányú, egymástól 2-2 mm-re lévő, adaptív Gauss szűréssel átesett sorozatmetszeti felvételt készítettem (5. ábra (e)). A felvételek felbontása 70,4 μm volt. A 2D-s felvételek képelemzéséhez az ImageJ képelemző szoftvert használtam [154, 155]. A porozitás meghatározáshoz (A_A , $CT^{total-RPT}$ (9)) a felvételeken a megfelelő szűrkeségi szint

megválasztásával detektáltam a pórusokat. A 9. ábra (a) részén a teljes próbatest legnagyobb hosszsmetszetének detektált felvétele látható.

Az optikai mikroszkópos vizsgálatokhoz (5. ábra (f)) a teljes próbatestek legnagyobb hosszsmetszeteinek előkészítése csiszolással (220-as, 320-as, 500-as és 800-as csiszolópapíron) és posztón, 3 μm -es gyémánpaszta polírozással történt. A pórusok tisztaságának érdekében ultrahangos tisztítást is végeztem. A csiszolatokról 50x-es nagyításban 60-70 db felvételt készítettem egy Zeiss Axio Imager M1m típusú mikroszkóppal. A felvételek felbontása 1,8 μm volt. A porozitás ($A_{A, OM}^{\text{total-RPT}}$) meghatározása szintén az ImageJ képelemző szoftverrel történt. A detektált pórusokat a 9. ábra (b) része mutatja. A 6. táblázatban összefoglaltam a vizsgálati módszerek főbb paramétereit.

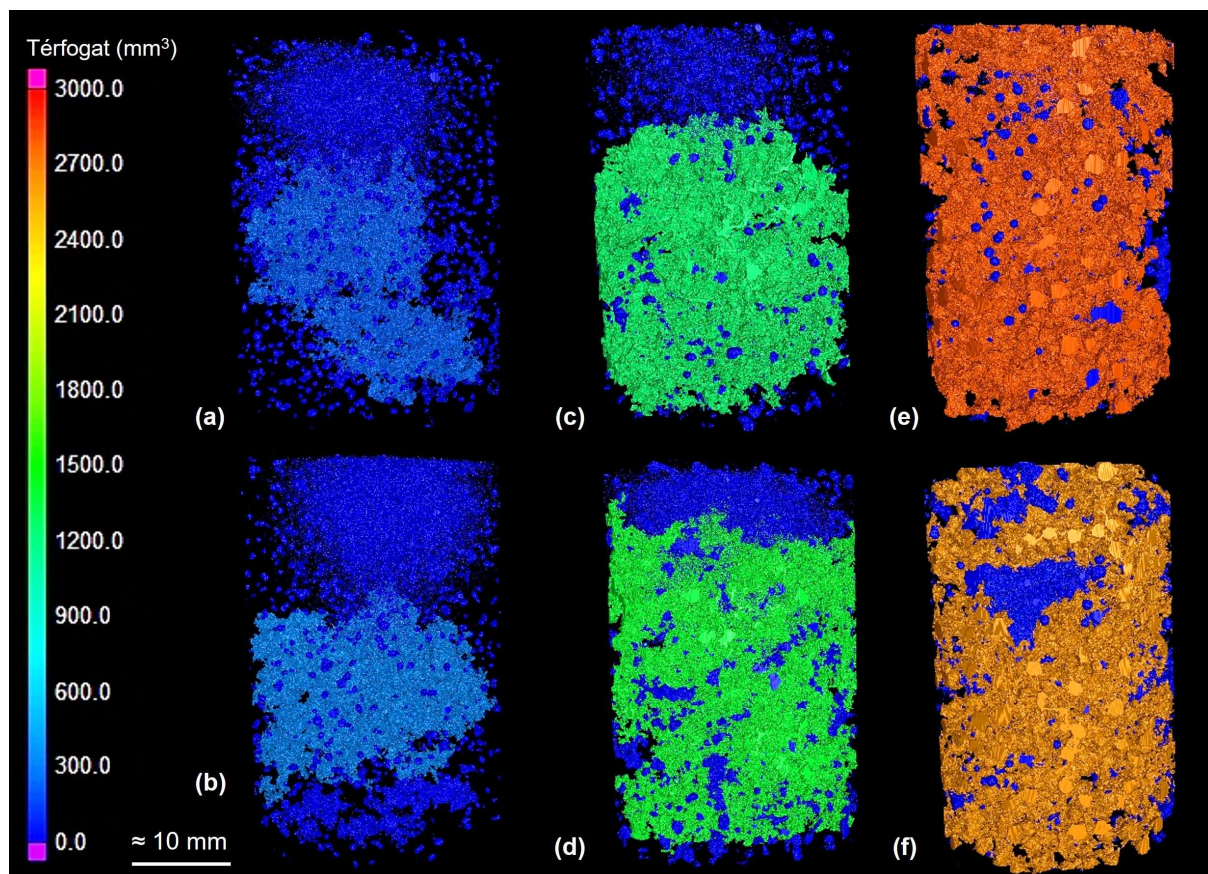


9. ábra: Az ImageJ képelemzővel történt 2D-s elemzések: (a) a teljes próbatest hosszirányú sorozatmetszeteinek ($A_{A, CT}^{\text{total-RPT}}$) és (b) a teljes próbatest közép-hosszsmetszetéről készült mikroszkópos felvételeinek ($A_{A, OM}^{\text{total-RPT}}$) elemzése ([8] nyomán).

3.2 A porozitás vizsgálati módszerek alkalmazhatósága

A mérési eredményeket befolyásoló tényezőket (a módszerek jellemzői (pl. a felbontás), pórusok mérete, alakja, eloszlása és nyitottsága) és a módszerekkel meghatározott porozitás adatok összefüggését a következőkben ismertetem. A morfológiai transzformáció és a vizsgált térfogat változásának hatását is meghatároztam.

A próbatestekben előforduló pórusok szerkezetét a morfológiai transzformáció nélküli hengeres térfogaton ($V_{\text{cyl-RPT}}$) mutatom be a 10. ábrán, míg a mért porozitásértékeket és a pórusszerkezet leírását a 7. táblázatban foglaltam össze.



10. ábra: A detektált 3D-s pórusszerkezet a hengeres térfogatokban morfológiai transzformáció nélkül ($V_{\text{cyl-RPT}}$). A próbatestek sűrűsége: (a) $2,661 \text{ g/cm}^3$; (b) $2,659 \text{ g/cm}^3$; (c) $2,593 \text{ g/cm}^3$; (d) $2,554 \text{ g/cm}^3$; (e) $2,496 \text{ g/cm}^3$; (f) $2,468 \text{ g/cm}^3$ ([8] nyomán).

7. táblázat: A sűrűség, a porozitás és a pórusszerkezet közötti kapcsolat ([8] nyomán).

A próbák sűrűsége (g/cm^3)	Porozitás ($V_{\text{cyl-RPT}}$)	Pórusmorfológia	A pórusok mérete és eloszlása
2,661	2%	Összetettebb „dendritközi” jellegű pórusok csatornákkal.	Egy kisebb összetett és több kisebb különálló pórus.
2,659	3%		Egy nagyobb összetett és néhány kisebb, többé-kevésbé különálló pórus.
2,593	6%		Egy nagy összetett és számos kisebb különálló pórus.
2,554	7%		
2,496	12%	Részben gömbszerű, kevésbé konkáv pórusok, vastagabb csatornákkal.	Egy nagy, teljes térfogatra kiterjedő összetett és néhány közepes méretű, de egyszerűbb morfológiájú pórus.
2,468	13%		

A transzformáció nélküli hengeres térfogatban ($V_{\text{cyl-RPT}}$) megállapított 2-3 v/v% porozitás tartalmú próbatestek póruscsatornákkal összekapcsolt, összetett, dendritközi pórusokhoz hasonló morfológiájú pórusokat tartalmaznak. A $2,661 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű próbatest (10. ábra (a)) egy kisebb összetett morfológiájú pórust és több kisebb különálló pórust tartalmaz, míg a $2,659$

g/cm^3 sűrűségű test (10. ábra (b)) egy nagyobb összetett pórust és néhány kisebb, többé-kevésbé különálló pórust tartalmaz. A **6-7 v/v%** porozitás tartalmú próbadarabok ($V_{cyl-RPT}$) (10. ábra (c) és (d)) a 2-3 v/v%-os darabokhoz hasonlóan összetett morfológiájú pórusokat tartalmaznak, amelyeket póruscsatornák kötnek össze. A térfogatban egy nagy komplex és több kisebb, különálló pórus fordul elő. A **12-13 v/v%** porozitás tartalmú próbatestekben ($V_{cyl-RPT}$) (10. ábra (e) és (f)) több részben gömbszerű, kevésbé konkáv pórus fordul elő, amelyeket vastagabb póruscsatornák kötnek össze. Így a darabok egy nagy, teljes térfogatra kiterjedő komplex, illetve néhány közepes méretű, de egyszerűbb morfológiájú pórust tartalmaznak.

A módszerekkel meghatározott porozitás összehasonlítása

A kutatás során megfigyelt pórusszerkezet (méret, morfológia, eloszlás) lehetővé tette a különböző módszerek alkalmazhatóságának, előnyeinek és hátrányainak tanulmányozását. A 8. táblázatban összefoglaltam, hogy a különböző pórusszerkezetek milyen vizsgálati módszerekkel mennyire megbízhatóan mérhetők (megbízhatóan mérhető, mérhető vagy kevésbé mérhető). Az összehasonlítás alapját az egyes módszerek adottságai (aktuális felbontása, térbelisége), valamint a pórusok szerkezete (póruscsatornák mérete, pórusok eloszlása és a próbatest felületére nyitott csatornák nyitottságának mértéke) adja.

8. táblázat: A különböző pórusszerkezetek vizsgálati lehetőségei a különböző módszerekkel ([8] nyomán).

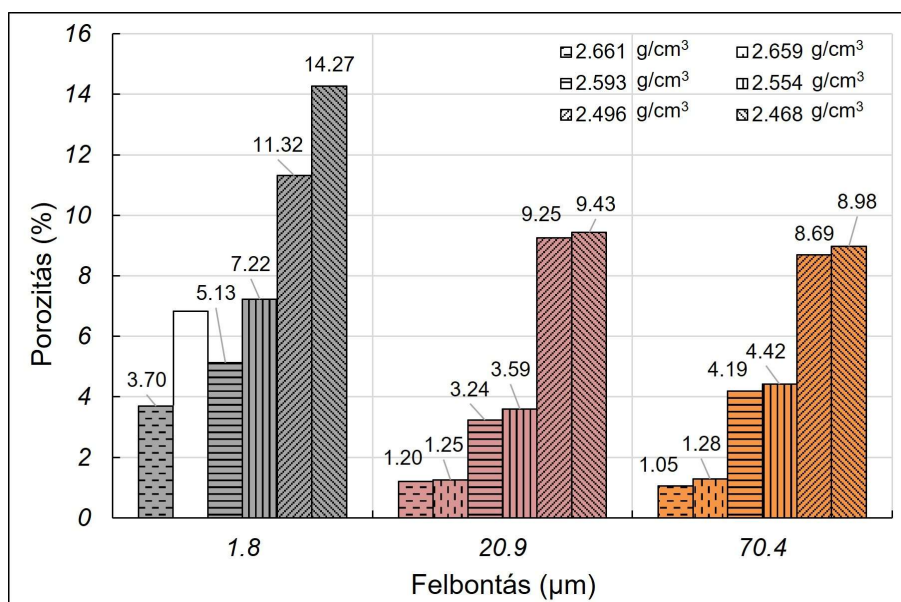
Pórusszerkezet	3D CT módszer 20,9 μm felbontás esetén	2D CT módszer 70,4 μm felbontás esetén	OM módszer 1,8 μm felbontás esetén
Vékony póruscsatornás pórusok ($D_{csatorna}^{minimum}$: 70,4 – 2×70,4 μm)	Mérhető	Kevésbé mérhető	Megbízhatóan mérhető
Vastag póruscsatornás pórusok ($D_{csatorna}^{minimum}$ > 2×70,4 μm)	Megbízhatóan mérhető	Mérhető	Megbízhatóan mérhető
Kicsi, különálló pórusok ($D_{pórus}^{minimum}$: 70,4 μm – 2×70,4 μm)	Mérhető	Kevésbé mérhető	Megbízhatóan mérhető
Nagy, különálló pórusok ($D_{pórus}^{minimum}$ > 2×70,4 μm)	Megbízhatóan mérhető	Mérhető	Megbízhatóan mérhető
Inhomogén póruseloszlás	A módszer térbelisége miatt megbízhatóan mérhető	Sorozatmetszetekkel mérhető	A csiszolatkészítés miatt kevésbé mérhető
Nyitott pórusszerkezet (térfogatmódosítás nélkül)	A próbatest felületére kifutó póruscsatorna minimális átmérőjétől függően mérhető	Nincs hatása, ezért megbízhatóan mérhető	Nincs hatása, ezért megbízhatóan mérhető

A **kisebb**, vékonyabb (ahol a legkisebb póruscsatorna átmérő – $D_{csatorna}^{minimum}$: 70,4 – 2×70,4 μm) póruscsatornákkal összekapcsolt, illetve a különálló pórusok (ahol a legkisebb

pórusátmérő – $D_{\text{pórus}}^{\text{minimum}}$: $70,4 \mu\text{m} - 2 \times 70,4 \mu\text{m}$) megbízhatóan mérhetők az optikai mikroszkópos (OM) felvételeken, de a 2D CT és a 3D CT módszerekkel már kevésbé az eltérő felbontás miatt (a vékony csatornák kevésbé, vagy nem láthatók). A **nagyobb**, vastagabb póruscsatornával ($D_{\text{csatorna}}^{\text{minimum}} > 2 \times 70,4 \mu\text{m}$) összekötött, illetve különálló pórusok ($D_{\text{pórus}}^{\text{minimum}} > 2 \times 70,4 \mu\text{m}$) mindhárom módszerrel mérhetők, a CT-s felvételek felbontása kevésbé befolyásolja a mérési eredményeket. A mikroszkópos felvételek esetében a nagyítást a pórusok méretének megfelelően kell megválasztani, hogy azok a lehető legjobban illeszkedjenek a látómezőbe, és a kisebbek is jól láthatóak legyenek (azaz a felbontás itt is szerepet játszik).

Inhomogén póruseloszlás esetén a porozitást OM-felvételek elemzésével a legnehezebb meghatározni (megfelelő számú, különböző irányú sorozatmetszetek elemzésével), ezért a 3D vagy a 2D CT módszer a legmegfelelőbb ennek vizsgálatára. A próbatest felületére **nyitott pórusok** problémát jelenthetnek a 3D CT-s felvételek elemzésekor, ha a vizsgált test körüli térfogat nem hagyható figyelmen kívül az elemzés során. A felszínre futó póruscsatornák teljes térfogatra kiterjedő globális lezárása megoldást jelenthet, de ez csökkenti a mérhető porozitást.

A 11. ábra a különböző sűrűségű próbatestekben mért porozitás értékeket mutatja be a képek felbontása függvényében ($1,8 \mu\text{m}$, $20,9 \mu\text{m}$ és $70,4 \mu\text{m}$). A legtöbb porozitást az $1,8 \mu\text{m}$ felbontású optikai mikroszkópos felvételek elemzésével határoztam meg, a legkevesebbet pedig a $70,4 \mu\text{m}$ felbontású 2D CT felvételek elemzésével. A $20,9 \mu\text{m}$ -es közepes felbontású 3D CT-felvételek elemzésével mért porozitás mennyisége közepes. Tekintettel arra, hogy a vizsgált szerkezet morfológiai átalakuláson ment keresztül (csökkent a mérhető pórustérfogat), a $2,554 \text{ g/cm}^3$ és $2,593 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű próbadarabok porozitásértékei kissé alacsonyabbak, a legnagyobb, $2,659 \text{ g/cm}^3$ és $2,661 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű daraboké pedig közel azonosak a metszeti CT felvételeken mértékhez képest.



11. ábra: A különböző sűrűségű próbatestekben mért porozitás a vizsgálati módszerek felbontásának függvényében (az OM módszerrel mért $2,659 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű test porozitás értéke kiugró adat, ezért azt külön ábrázoltam) [8].

Az optikai mikroszkópos felvételek arányaiban nagyobb mennyiségű porozitást mutattak, mint a 3D CT-felvételek. A szakirodalomban hasonló megfigyeléseket tettek [71], de az adatok nem konzisztensek [62, 68, 84]. Az OM módszerrel szintén nagyobb mennyiségű porozitás volt meghatározható, mint a 2D CT felvételekkel. Hasonló eredményeket mutattak be [61, 87], bár a [61]-es publikációban leírtak esetében a 2D metszeti CT felvételeket ugyanazokkal a paraméterekkel (felbontással) elemezték, mint a 3D-s térfogatot. A 3D és 2D módszerek közötti különbséget kevésbé vizsgálták. Amsellem és munkatársai [88] a 2D módszerrel, míg a saját kutatásom során a 3D CT módszerrel detektáltam több porozitást.

A megfigyelt porozitás különbségek nem csupán az alkalmazott vizsgálati módszerek sajátosságainak, hanem a próbatestek eltérő pórusszerkezetének is tulajdoníthatók. Mindezt figyelembe véve a kisméretű, illetve vékony póruscsatornákat tartalmazó szerkezetek esetében a felbontás jelentős hatással van az eredményekre. Nagyszámú metszeti adatok gyűjtésére a 2D-s metszeti CT-s felvételek elemzése az OM felvételekhez képest jelentősen egyszerűbben kivitelezhető, ezért van létjogosultsága. A 3D CT módszer leglényegesebb tulajdonsága pedig, hogy segítségével a pórusok térbeli kiterjedése és eloszlása egyszerűen vizsgálható.

A morfológiai átalakítás (zárás) hatása

A morfológiai transzformáció következtében a próbatest felületére nyitott póruscsatornák bezárultak. Ennek hatására a próbatest teljes térfogatra vonatkozóan a pórusok térfogata csökkent. Ezzel párhuzamosan a nagyobb méretű konvex pórusok morfológiája és térfogata nem változott. Ezért meghatároztam, hogy a pórustérfogat milyen mértékben változott a különböző pórusszerkezetek esetén. A hengeres térfogat transzformált ($V_{\text{clo}}^{\text{cyl-RPT}}$) pórusszerkezetének elemzésével – kisebb-nagyobb mértékben – kevesebb porozitást detektáltam, mint a transzformáció nélküli hengeres térfogat ($V_{\text{V}}^{\text{cyl-RPT}}$) elemzésével.

Mivel a zárási folyamat a fázisok felületén történik, a pórusok felületének konvex, illetve konkáv jellege befolyásolta a csökkenés mértékét, ami összefüggésben van a pórusok morfológiájával (összetettségének mértékével).

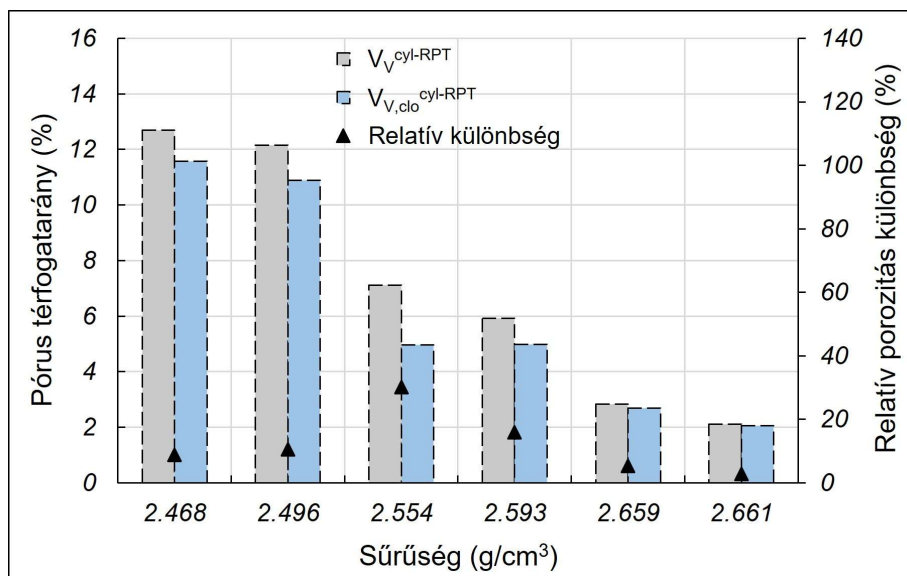
A 12. ábra a mért porozitásértékeket és a (23) összefüggéssel meghatározott relatív porozitáskülönbséget ($\Delta_{\text{rel}} V_{\text{V, clo-eff}}^{\text{RPT}}$) mutatja. A próbatestek zárt pórusszerkezetét a 13. ábra mutatja.

$$\Delta_{\text{rel}} V_{\text{V, clo-eff}}^{\text{RPT}} = \left| 100 - \left(\frac{V_{\text{V, clo}}^{\text{cyl-RPT}}}{V_{\text{V}}^{\text{cyl-R}}} \right) 100 \right| \quad (23)$$

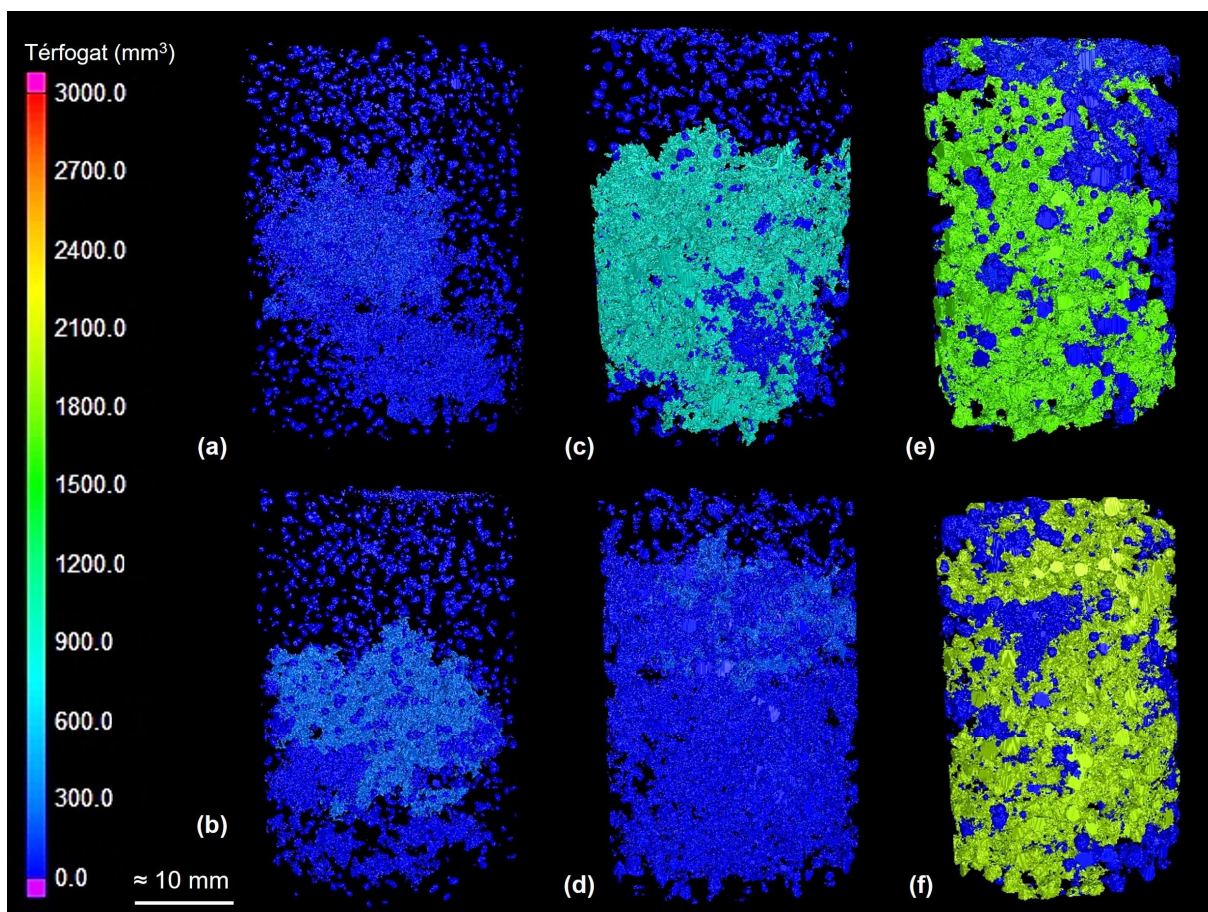
ahol:

$V_{\text{V, clo}}^{\text{cyl-RPT}}$: a próbatest öt ciklusban zárt, belső, hengeres térfogatának pórus térfogataránya (%),

$V_{\text{V}}^{\text{cyl-RPT}}$: a próbatest (nem transzformált) belső, hengeres térfogatának pórus térfogataránya (%).



12. ábra: A mért porozitás (V_v) és a relatív porozitás különbségek ($\Delta_{\text{rel}} V_v$): a morfológiai transzformáció hatása ($V_{\text{clo}}^{\text{cyl-RPT}}$) ([8] nyomán).



13. ábra: A detektált 3D-s pórusszerkezet a hengeres térfogatokban morfológiai transzformációval ($V_{\text{clo}}^{\text{cyl-RPT}}$). A próbatestek sűrűsége: (a) $2,661 \text{ g/cm}^3$; (b) $2,659 \text{ g/cm}^3$; (c) $2,593 \text{ g/cm}^3$; (d) $2,554 \text{ g/cm}^3$; (e) $2,496 \text{ g/cm}^3$; (f) $2,468 \text{ g/cm}^3$ ([8] nyomán).

A zárással bekövetkező relatív porozitáscsökkenés mértékét a próbatestek porozitástartalma, a bennük található pórusok mérete és morfológiája határozza meg. Hasonló porozitásmennyiség, ám összetettebb pórusmorfológia esetén a porozitás nagyobb mértékben csökkent (12. ábra).

A transzformáció nélküli hengeres térfogatban ($V^{\text{cyl-RPT}}$) megállapított **2-3 v/v%** porozitástartalmú darabok (10. és 13. ábra (a) és (b)) közül a $2,659 \text{ g/cm}^3$ sűrűségűben, míg a **6-7 v/v%** porozitástartalmú minták ((c) és (d)) esetében a $2,554 \text{ g/cm}^3$ sűrűségűben voltak összetettebbek a pórusok.

A **12-13 v/v%** hasonló porozitástartalmú $V^{\text{cyl-RPT}}$ próbadarabokban (10. és 13. ábra (e), illetve (f)) lévő pórusok morfológiája az előzőkhez képest különböztek, részben gömbszerű, kevésbé konkáv pórusok voltak, melyek vastagabb csatornákkal kapcsolódtak össze. Annak ellenére, hogy több porozitást tartalmaztak, a relatív porozitás csökkenés mértéke kicsi, a 2-3 v/v%-os darabokéhoz hasonló volt.

A 2-3 v/v%-os próbatestek kisebb relatív porozitáscsökkenést mutattak, mint a 6-7 v/v%-os testek. A legtöbb vékony póruscsatorna a $2,554 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű próbatestben volt. Minél nagyobb volt a vékony póruscsatornák mennyisége, annál nagyobb volt a pórusok térfogatsökkenése a zárás hatására. Emiatt a morfológiai transzformáció alkalmas a pórusszerkezet morfológiájának jellemzésére. Amennyiben azonos porozitás mellett a zárás következtében a pórustérfogat kis mértékben csökken, akkor a szerkezetben kisebb valószínűséggel vannak jelen kisebb méretű, illetve vékony póruscsatornák – összetett morfológiájú – pórusok.

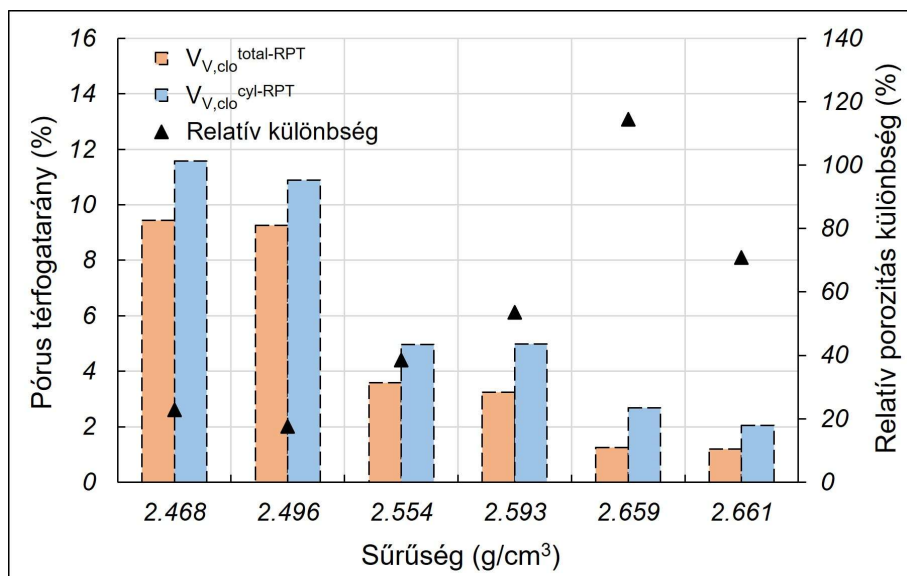
A vizsgált térfogat méretének hatása

A kutatás során vizsgáltam az elemzett térfogat méretének hatását a detektálható porozitás mennyiségére vonatkozóan. A hengeres térfogatok ($V_{\text{clo}}^{\text{cyl-RPT}}$) a teljes térfogat ($V_{\text{clo}}^{\text{total-RPT}}$) 55-62%-a volt. A 14. ábra a mért porozitásértékeket és a (24) összefüggéssel meghatározott relatív porozitáskülönbséget ($\Delta_{\text{rel}} V_V^{\text{vol-eff, RPT}}$), míg a 15. ábra a teljes próbatestek zárás utáni teljes térfogatának pórusszerkezetét mutatja. A hengeres térfogatok zárt pórusszerkezet a 13. ábrán látható.

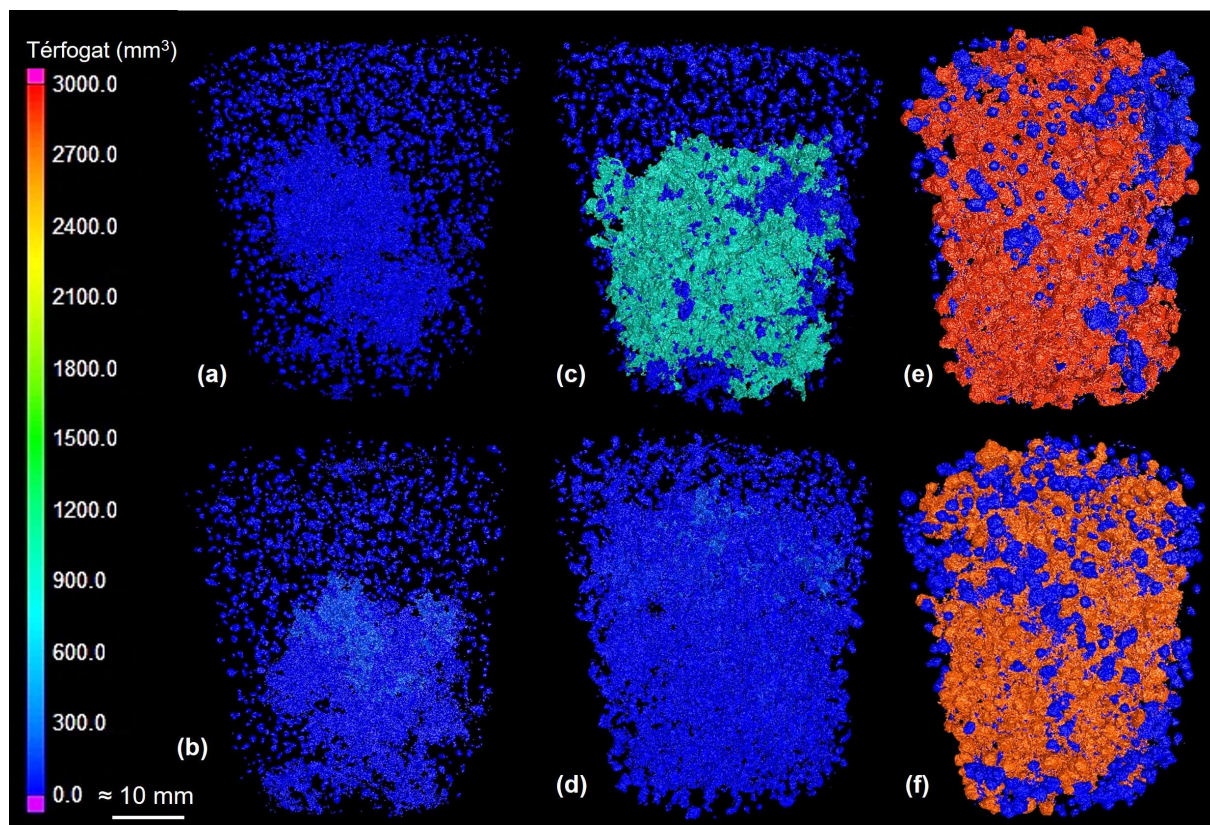
$$\Delta_{\text{rel}} V_V^{\text{vol-eff, RPT}} = \left| 100 - \left(\frac{V_{V,\text{clo}}^{\text{cyl-RPT}}}{V_{V,\text{clo}}^{\text{total-RPT}}} \right) 100 \right| \quad (24)$$

ahol:

$V_{V,\text{clo}}^{\text{cyl-RPT}}$: a próbatest öt ciklusban zárt belső, hengeres térfogatának pórus térfogataránya (%),
 $V_{V,\text{clo}}^{\text{total-RPT}}$: a próbatest öt ciklusban zárt teljes térfogatának pórus térfogataránya (%).



14. ábra: A mért porozitás (V_v) és a relatív porozitás különbségek ($\Delta_{rel} V_v$): a vizsgált térfogat változásának hatása ($^{vol-eff, RPT}$) ([8] nyomán).



15. ábra: A detektált 3D-s pórusszerkezet a teljes térfogatokban morfológiai transzformációval ($V_{clo}^{total-RPT}$). A próbatestek sűrűsége: (a) $2,661 \text{ g/cm}^3$; (b) $2,659 \text{ g/cm}^3$; (c) $2,593 \text{ g/cm}^3$; (d) $2,554 \text{ g/cm}^3$; (e) $2,496 \text{ g/cm}^3$; (f) $2,468 \text{ g/cm}^3$ ([8] nyomán).

A hengeres térfogatokban mért porozitás mind a hat próbatest esetén nagyobb volt, mint a teljes térfogatokban, de az eltérések mértéke eltérő volt az egyes esetekben. Ez a jelenség 3D-s pórusszerkezetben megfigyelt inhomogén póruseloszlással függött össze. Korábbi

publikációkban is említették, hogy a vizsgált térfogat mérete befolyásolhatja a mérési eredményeket az inhomogén pórusszerkezet miatt [59, 66, 84, 87, 104].

A **két legnagyobb sűrűségű** próbadarab pórusszerkezete hasonló (15. ábra (a) és (b)). Bennük leginkább egy összefüggő pórus látható, amelyet több kisebb pórus vesz körül. A 3D-s felvételek alapján a porozitás eloszlása **inhomogén**. A térfogat módosításával a nagyobb pórus körüli kisebb pórusok jelentős hányada kiesett az elemzésből. A $2,661 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű darab porozitása kisebb mértékben nőtt, mivel a közepén lévő nagyobb méretű pórus kisebb volt, mint a $2,659 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű darabban (14. ábra).

A **két közepes sűrűségű** próbadarab pórusszerkezete különböző, bár a mért porozitásértékek közel azonosak. A $2,554 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű test (15. ábra (d)) pórusszerkezete kevésbé összefüggő, több kisebb pórust tartalmaz és szinte a teljes térfogatot lefedi. Csak néhány apró, különálló pórus látható a darab felső 1/6-án és az oldalsó peremén. A porozitás eloszlása viszonylag **homogén**. A $2,593 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű test (15. ábra (c)) alsó 2/3-ában, teljes szélességére kiterjedő, póruscsatornákkal összekapcsolt összetett morfológiájú pórus látható. Ezt néhány kisebb, helyenként előforduló pórus veszi körül, amelyek a próbatest felső 1/3-ában sokasodnak. A pórusok eloszlása **inhomogén**, a relatív porozitásváltozás nagyobb volt, mint a homogén eloszlású próbadarabban (14. ábra). A térfogatváltozás nem változtatta meg jelentősen az összefüggő pórus méretét. A széleken előforduló különálló pórusok estek ki az elemzett régióból.

A **két legkisebb sűrűségű** próbatest (15. ábra (e) és (f)) pórusszerkezete hasonló, mindkettő összetett. A részben gömbszerű, kevésbé konkáv pórusok vastagabb póruscsatornákon keresztül kapcsolódnak egymáshoz a teljes térfogatot lefedve, amit néhány kisebb pórus vesz körül. A 3D-s felvételek viszonylag **homogén** eloszlást mutatnak. Az elemzett térfogat változása következtében az összetett szerkezetű pórus térfogata csökkent, valamint a kisebb pórusok egy része esett ki az elemzett régióból. A relatív porozitásváltozás ezeknél a próbadaraboknál volt a legkisebb (14. ábra).

Az eredmények alapján a három kisebb sűrűségű próbatestben a pórusszerkezet inkább homogén, míg a három nagyobb sűrűségű próbatestben inkább inhomogén. A viszonylag homogén póruseloszlás esetén a térfogatcsökkenés miatt bekövetkezett relatív porozitásnövekedés kisebb mértékű volt. Minél inkább inhomogén volt a póruseloszlás, annál nagyobb volt a porozitás növekedésének mértéke.

A vizsgált térfogat méretének változása befolyásolhatja a mért eredményeket (pozitív vagy negatív irányba), a vizsgált szerkezet homogenitásától (pórusméret és -eloszlás) függően. Amennyiben nagyobb pórus volt a vizsgált régióban, akkor a térfogatváltozás miatt jelentős porozitáskülönbségek adódtak (amint azt a 15. ábra (a) és (b) részein látható próbatestek pórusai is mutatják).

A vizsgált térfogat méretének változtatása alkalmas a porozitás eloszlásának meghatározására. Ha a porozitás azonos a kisebb és a nagyobb vizsgált régiókban, akkor a pórusok eloszlása homogén.

3.3 Összegzés

Az öntészeti iparban az oldott hidrogéntartalom meghatározására a sűrűségmérés módszerét használják, míg a minőségellenőrzéshez és a technológiai fejlesztésekhez a porozitás vizsgálatára a metallográfia és a számítógépi tomográfia a leggyakrabban alkalmazott módszerek. A pórusszerkezet (méret, morfológia, eloszlás) befolyásolja az egyes módszerek alkalmazhatóságát. A disszertációmnak ebben a részében a módszerek gyakorlati alkalmazhatóságát és mérési pontosságát hasonlítottam össze. Emellett vizsgáltam a morfológiai képtárolás és a vizsgált régió nagyságának hatását az eredményekre. Ezek alapján az alábbi következtetésekre jutottam [8]:

- i. Az **optikai mikroszkópos felvételek** elemzésével a kiváló ($1,8\ \mu\text{m}$) felbontás miatt a CT felvételek felbontása ($20,9\ \mu\text{m}$) körüli, illetve alatti méretű pórusok és póruscsatornák ($D_{\text{csatorna vagy pórus}}^{\text{minimum}}$) megbízhatóan mérhetők. A próbatest felületére nyitott pórusok jelenléte nem jelent problémát a mérés pontossága szempontjából. Inhomogén (pórus-) eloszlás esetén időigényes metszetsorozat készítésével vizsgálható az eloszlás, valamint egyetlen metszeten belül is nagy mennyiségű képfeldolgozásra van szükség. A módszer hátrányát tehát az adja, hogy a pórusok térbelisége, pontos eloszlása nehezen vizsgálható.
- ii. A pórusok térbeliségét és az inhomogén póruseloszlást legjobban a **3D CT módszerrel** lehet értékelni, azonban az OM módszerhez képest kevésbé részletes felbontással. Amennyiben a próbatest felületére nyitott pórusok vannak jelen, az eljárás pontossága a nyitottság mértékétől függ. Ekkor alternatív megoldásra van szükség: virtuális térfogatmódosításra vagy morfológiai transzformációra, melyeket körültekintően kell alkalmazni.
- iii. A **2D CT módszerrel** a nagyobb pórusok és a vastagabb póruscsatornák ($D_{\text{csatorna vagy pórus}}^{\text{minimum}} > 2 \times 70,4\ \mu\text{m}$) jól mérhetők, míg a kisebbek és vékonyabbak ($D_{\text{csatorna vagy pórus}}^{\text{minimum}}: 70,4 - 2 \times 70,4\ \mu\text{m}$) kevésbé. A pórusok eloszlásának elemzése kevésbé időigényes ezzel a módszerrel, mint az OM-felvételek elemzésével, illetve a sorozatmetszetek készítése is egyszerűsödik.
- iv. A próbatest felületére nyitott pórusszerkezet esetében n számú mintában a legkisebb csatornavastagságok közül a legnagyobb vastagságával megegyező méretű póruscsatornák **morfológiai transzformációval** zárt pórusokká alakíthatók. A pórusok mennyisége, mérete és összetettsége befolyásolja az átalakítással bekövetkező – ám a vizsgálat szempontjából szükségeszerű – póruscsökkenés mértékét. Minél összetettebb a pórusszerkezet – azaz minél nagyobb térfogatú tagolt pórusrészek egyre több, illetve keskenyebb összekötő csatornákon keresztül kapcsolódnak össze –, annál jelentősebb a pórustérfogat relatív csökkenése. Ezért a morfológiai transzformáció alkalmas a pórusszerkezetek összetettségének jellemzésére.
- v. A **vizsgált térfogat méretének változtatásával** jellemezhető a **pórusok eloszlása**: **inhomogén** póruseloszlás esetén a vizsgált térfogat méretének változtatása **számottevő** mértékben befolyásolja az eredményt (nagyobb a relatív porozitás változás), míg **homogén** póruseloszlás esetén a vizsgált térfogat méretváltoztatásának lényegesen **kisebb** a hatása.

4 Szakító próbatetek pórusszerkezete

Az ipari gyakorlatban a mechanikai tulajdonságok meghatározására szakítóvizsgálatokat végeznek, ám hogy közben hol következik be a repedés és milyen formában megy végbe a törés, az a szakítóvizsgálat előtt, előre nem megállapítható. Ezek alapján célszerű a teljes alakváltozó térfogatra vonatkozóan elvégezni a porozitás vizsgálatot, ugyanis – a szakirodalommal összhangban [10, 72] – ebben az esetben nagyobb valószínűséggel lehet előre jelezni a tönkremenetel helyét és módját. A teljes alakváltozó térfogat vizsgálatára a **számítógépi tomográfia** kiváló módszer. A kutatómunka során a pórusszerkezet és a tönkremenetel, illetve a mechanikai tulajdonságok kapcsolatát vizsgáltam.

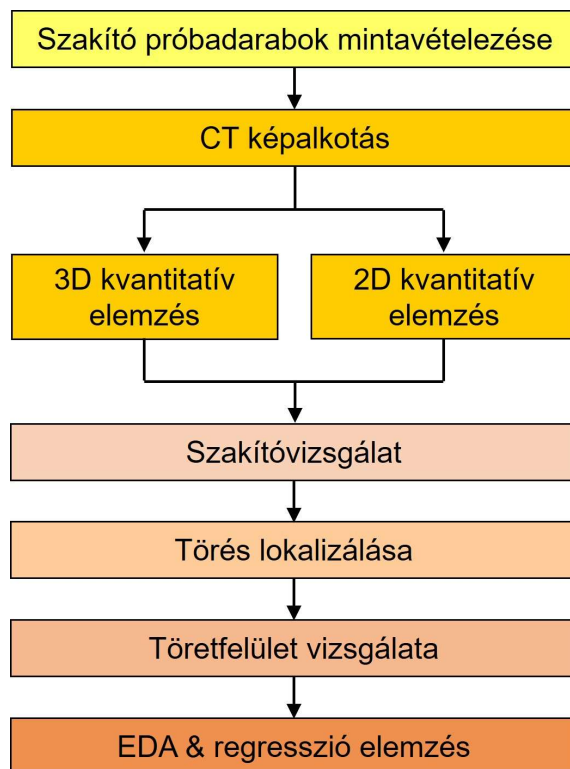
Kutatómunkám során összesen 48 darab, A356 ötvözetből (AlSi7Mg0,3) **ipari körülmények között alacsony nyomású öntéstechnológiával** (LPDC) előállított és T6 hőkezelt – összesen nyolc darab – **futómű alkatrészekből** kimunkált, s az ipari gyakorlatban **minőségellenőrzésre** használatos lapos szakító próbatestet vizsgáltam. Ezek közül (3D CT módszerrel meghatározva) az alakváltozó térfogatban a legalább 0,02% térfogati porozitást ($V_V^{total} (\%)$) tartalmazó (ami a szakirodalomban vizsgált próbatestekhez képest egy nagyságrenddel kisebb porozitás tartalmú) próbatesteket – 24 darabot – választottam ki és vizsgáltam részletesen a kitűzött feladat végrehajtásához: a pórusszerkezet és a mechanikai tulajdonságok kapcsolatának vizsgálatára.

Az általam vizsgált öntvények **szimmetrikus** geometriájúak, melyből **jobb és baloldaltól is ugyanazon pozíciókból, de három eltérő régióból** munkálnak ki és vizsgálnak szakító próbatesteket (tehát öntvényenként összesen hat darabot) az ipari gyakorlatban. Ezek közül két régióban fémforma oldalfalai között történik a dermedés, viszonylag közel az olvadék formába történő beömlési pontjához, valamint a harmadik régióban fémforma és homokmag oldalfalai között szilárdul az olvadék viszonylag távolabb a beömlési ponttól. Ennek ellenére **azonos szövetszerkezet alakul ki mind a hat régióban**. Minimális volt az eltérés az eutektikus szilícium mennyiségében (9-11%), méretében ($5-6,2 \mu\text{m}^2$) és morfológiájában (Circ_{eutSi} 0,7 (-)), valamint a szekunder dendritág távolságában ($17,4-18,8 \mu\text{m}$) [156]. A próbatestek méretei $2 \text{ mm (t)} \times 15 \text{ mm} \times 108 \text{ mm}$, a deformációs térfogat hossza 37 mm (l) , minimális szélessége pedig 10 mm (w) [12].

4.1 Vizsgálatok

A kutatás célja **azoknak a pórusjellemzőknek a feltárása volt, amelyek hatással vannak a szakítóvizsgálattal meghatározható mechanikai tulajdonságokra**, ezáltal célszerű azokat az öntészeti ipari minőségellenőrzés során vizsgálni. Erre azért is szükség van, mert a jellemzők kapcsolatának leírása jelenleg is intenzív kutatások tárgya. A szakirodalomban nincs egyetértés az egyes jellemzők jelentőségét illetően. A kutatás során a térben és a töretfelületen meghatározható pórusjellemzőkön túl a szakirodalomban nem vizsgált kétdimenziós keresztmetszeti jellemzőket (pl. a pórus területarány ($A_A (\%)$), vagy a legnagyobb területű pórus ($A_{max} (\text{mm}^2)$)) is vizsgáltam. Továbbá jellemeztem a pórusoknak a próbatest keresztmetszetén való elhelyezkedését (ún. CSC (-) paraméterrel). A pórus-, illetve a mechanikai jellemzők kapcsolatának vizsgálatára **nemcsak kétváltozós elemzéseket** – ahogyan a szakirodalomban is tették –, **hanem prediktív adat-vezérelt, két- és többváltozós,**

lineáris, illetve nemlineáris regressziós modellezést is alkalmaztam. Az ipari körülmények között LPDC technológiával öntött öntvényekből kimunkált, az alakváltozó térfogatban legalább 0,02% térfogati porozitást (V_v^{total}) tartalmazó 24 darab szakító próbatesten elvégzett, a pórusok 2D-s és 3D-s szerkezetének leírását célzó vizsgálatok folyamatát a 16. ábrán mutatom be. Az így meghatározott pórusjellemzők mechanikai tulajdonságokkal való kapcsolatának meghatározására feltáró adatelemzést (EDA) végeztem, majd végrehajtottam a regressziós modellezést gépi tanulás segítségével. Fontos kiemelni, hogy a kutatás nem konkrét matematikai összefüggések meghatározására irányult, hanem a releváns pórusjellemzők azonosítása volt a cél.



16. ábra: Az elvégzett vizsgálatok folyamatának bemutatása [12].

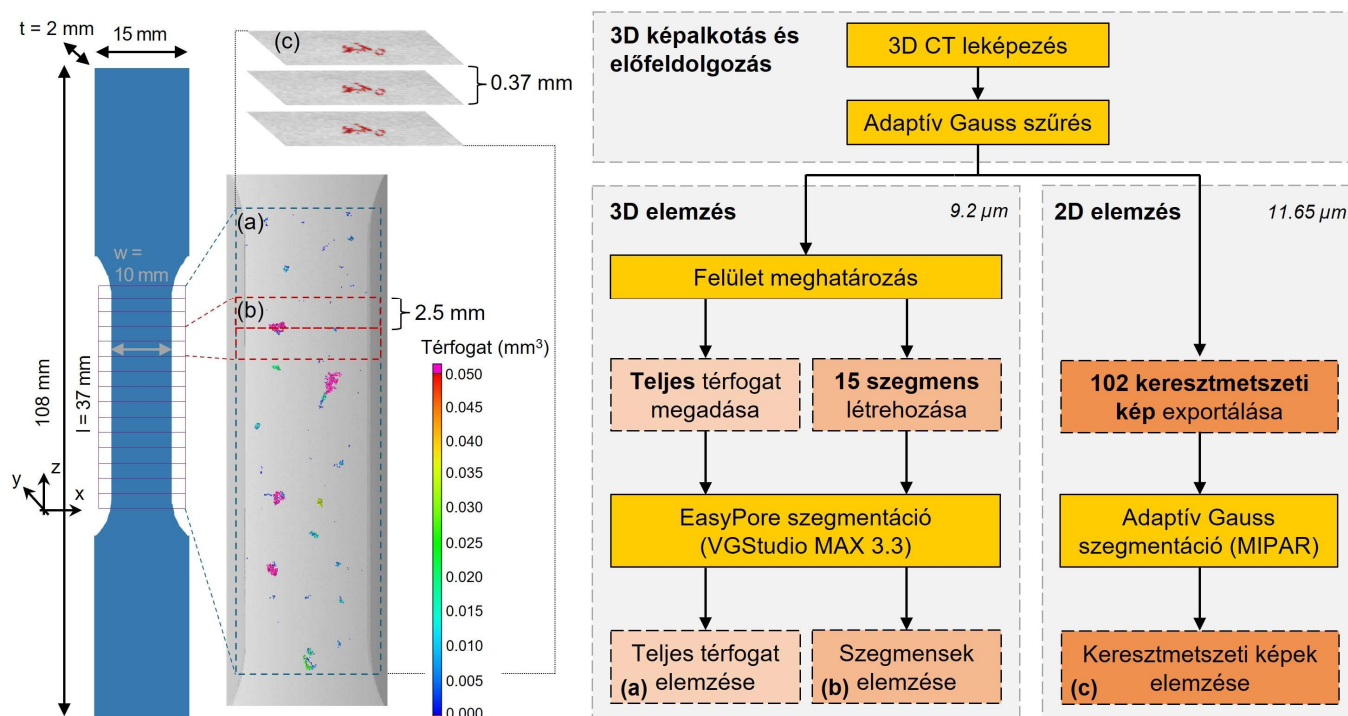
4.1.1 Számítógépi tomográfiás (CT) felvételek

A szakítóvizsgálat előtt a próbatesteket számítógépi tomográfiával (CT) vizsgáltam az YXLON FF35 μ -CT berendezéssel, ahogyan a csökkentett nyomáson dermedő próbákat is. A leképezések során 125 kV-os feszültséget és 70 μ A-es áramerősséget alkalmaztam. A 15,12x-es nagyított 3D-s felvételek térbeli felbontása 9,2 μ m volt (a felbontás mindhárom irányban azonos volt). A rekonstrukcióhoz és a kiértékeléshez szintén az YXLON Reconstruction Workspace 1.4.4.0, illetve a VGStudio MAX 3.3 szoftvereket használtam, utóbbi folyamatát a 17. ábra (a) és (b) része mutatja be.

A CT felvételek 3D-s elemzése

A 3D-s felvételeken – ahogyan az RPT próbatestek esetében is tettem – adaptív Gauss típusú, azaz a környező voxelek szűrkeségi intenzitását figyelembe vevő zajszűrést végeztem.

Ezt követően a próbatetek felületének meghatározása után az EasyPore típusú 3D-s képelemző algoritmussal detektáltam a pórusokat. A legkisebb figyelembe vett pórustérfogat $6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3$ (8 voxel) volt. A szakítóvizsgálat során az alakváltozó régiót „total” elnevezéssel láttam el (17. ábra (a)). Meghatároztam a 9. táblázatban feltüntetett pórusjellemzőket, ahol a pórusok térfogatarányát a (25), a fajlagos felületét a (26), illetve az egyedi pórusok morfológiáját leíró gömbszerűséget a (27) összefüggésekkel definiáltam.



17. ábra: A szakító próbatetek méretei és a CT-felvételek elemzett régiói (az ábra bal oldalán), valamint a 3D-s és 2D-s képelemzési eljárások (az ábra jobb oldalán): (a) a teljes térfogat, b) a 15 szegmens, és c) a keresztmetszeti képek [12].

9. táblázat: A meghatározott pórusjellemzők a teljes térfogatban (*total*) és a szegmensekben (*sm*), ahogyan a törési szegmensben (*f-sm*) is [12].

A pórusok jellemzői a teljes térfogatban	A pórusok jellemzői a törési szegmensben	A jellemzők definíciója
$V_V^{\text{total}} (\%)$	$V_V^{\text{f-sm}} (\%)$	A pórusok térfogataránya.
$S_V^{\text{total}} (\text{mm}^{-1})$	$S_V^{\text{f-sm}} (\text{mm}^{-1})$	A pórusok fajlagos felülete.
$V_{\text{max}}^{\text{total}} (\text{mm}^3)$	$V_{\text{max}}^{\text{f-sm}} (\text{mm}^3)$	A legnagyobb térfogatú pórus.
$A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{\text{total}} (\text{mm}^2)$	$A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{\text{f-sm}} (\text{mm}^2)$	A legnagyobb térfogatú pórus, mechanikai igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területe.
$\text{Spher}_{V_{\text{max}}}^{\text{total}} (-)$	$\text{Spher}_{V_{\text{max}}}^{\text{f-sm}} (-)$	A legnagyobb térfogatú pórus gömbszerűsége.

$$V_{V\text{total}} = \frac{V_{\Sigma\text{pórusok}}}{V_{\text{total}}} 100 (\%), \text{ illetve } V_{V\text{sm}} = \frac{V_{\Sigma\text{pórusok}}}{V_{\text{sm}}} 100 (\%) \quad (25)$$

$$S_{V\text{total}} = \frac{S_{\Sigma\text{pórusok}}}{V_{\text{total}}} (\text{mm}^{-1}), \text{ illetve } S_{V\text{sm}} = \frac{S_{\Sigma\text{pórusok}}}{V_{\text{sm}}} (\text{mm}^{-1}) \quad (26)$$

$$\text{Spher} = \frac{S_{\text{ekv.gömb}}}{S_{\text{pórus}}} (-) \quad (27)$$

ahol:

$V_{\Sigma\text{pórusok}}$: a pórusok össztérfogata az adott térfogaton belül – total/sm (mm^3),

V_{total} : a teljes alakváltozó térfogat (mm^3),

V_{sm} : az adott szegmens térfogata (mm^3),

$S_{\Sigma\text{pórusok}}$: a pórusok összfelülete az adott térfogaton belül – total/sm (mm^2),

$S_{\text{ekv. gömb}}$: annak a gömbnek a felülete (mm^2), amelynek térfogata megegyezik a jellemzett pórus térfogatával ($V_{\text{pórus}}$),

$S_{\text{pórus}}$: a jellemzett pórus felülete (mm^2).

A próbatestek alakváltozó térfogatrészét további szegmensekre osztottam a pórusjellemzők eloszlásának vizsgálata és a szakítóvizsgálat után a törési szegmens pórusjellemzőinek meghatározása céljából (17. ábra (b)). Előzetes szakítóvizsgálatok alapján a repedés kiterjedése hosszanti irányban 2 - 3 mm volt, ezért a szegmensek magasságát 2,5 mm-re választottam meg. A 37 mm hosszú teljes szakaszból így 14 darab 2,5 mm-es és egy darab 2 mm-es szegmens adódott. Az így létrehozott szegmenseket is elemeztem 3D-ben. Amennyiben a szakítóvizsgálat után a repedéssel érintett hosszanti szakasz nem egy, hanem két vagy három szegmenst is érintett, abban az esetben azt a szegmenst neveztem törési szegmensnek ($f\text{-sm}$), melyben a $V_{V\text{sm}}$, $S_{V\text{sm}}$ és $V_{\text{max}}^{\text{sm}}$ pórusjellemzők értéke a legnagyobb volt. A nem térfogategységre vonatkoztatott jellemzők esetén (V_{max} , $\text{Spher}_{V\text{max}}$ és $A_{\text{Proj, } V\text{max}}$) azok teljes, a szegmensek határvonalával nem elmetezett értékeit dolgoztam fel.

A 9. táblázatban látható jellemzőkön túl meghatároztam, hogy a 15 szegmens és a teljes alakváltozó térfogatban az egyedi pórusok közül, nagyságrendi sorba rendezés után a törési szegmensben mért egyes pórusjellemzők értékei hol helyezkednek el a sorban. Ezután kiszámítottam, hogy a 24 próbatest esetén hány alkalommal ment végbe a tönkremenetel a legnagyobb, a második legnagyobb, illetve a harmadik legnagyobb értéknél. Ezzel a módszerrel a pórusszerkezeti tulajdonságok repedésképződésre gyakorolt hatása vizsgálható.

A CT felvételek 2D-s elemzése

A pórusok keresztmetszeti jellemzőinek vizsgálatára a fő feszültségtengelyre merőleges irányban kétdimenziós röntgentomográfiás sorozatmetszeteket nyertem ki (17. ábra (c)). Összesen 102 db, a teljes alakváltozási térfogat pórusszerkezetét reprezentáló metszetet készítettem próbatestenként. A metszetek 0,37 mm távolságra voltak egymástól (40 voxel), mely érték a 24 próbatestben a 3D CT módszerrel meghatározott átlagos pórusátmérő (D_{max} (mm)) szórásának felső határa. A felvételek felbontása 11,65 μm volt, melyeket a MIPAR képelemző szoftver segítségével elemeztem. A keresztmetszeti pórusokat adaptív Gauss szegmentációs eljárással detektáltam, mellyel a felvételt alkotó pixelek elválasztása a környező pixelek szürkességi intenzitásától függ egy statisztikai paraméter szerint, ami jelen esetben az

intenzitások Gauss eloszlásának átlaga volt. A pixelek abban az esetben voltak szegmentálva, amennyiben azok szürkességi intenzitása kisebb volt, mint a helyi megválasztott 30×30-as Kernel ablakban lévő pixelek Gauss eloszlás átlagának 86%-a [157].

A keresztmetszeti röntgenfelvételeken meghatároztam a 10. táblázatban szereplő pórusjellemzőket, ahol a pórusok területarányát a (28), a fajlagos kerületét a (29), illetve az egyes pórusok körszerűségét a (30) összefüggésekkel definiáltam. A szakítóvizsgálatok után a repedések lokalizációját követően a repedéssel érintett metszetek közül azt a keresztmetszetet neveztem el törési keresztmetszetnek (*f-cs*), amelyen az A_A^{cs} , L_A^{cs} és A_{max}^{cs} pórusjellemzők értéke a legnagyobb volt. Emellett, ahogyan azt a törési szegmenseknél is tettem, meghatároztam, hogy a 102 metszet közül nagyságrendi sorba rendezés után a törési keresztmetszeten mért egyes pórusjellemzők értékei hol helyezkednek el a sorban. Megállapítottam, hogy hány alkalommal ment végbe a tönkremenetel a legnagyobb, a második legnagyobb, illetve a harmadik legnagyobb értéknél.

10. táblázat: A meghatározott pórusjellemzők a keresztmetszeti (*cs*) képeken, valamint a törési keresztmetszeteken (*f-cs*) [12].

A pórusjellemzők	A jellemzők definíciója
A_A^{f-cs} (%)	A pórusok területaránya.
L_A^{f-cs} (mm ⁻¹)	A pórusok fajlagos kerülete.
A_{max}^{f-cs} (mm ²)	A legnagyobb területű pórus.
$Circ_{A_{max}^{f-cs}}$ (-)	A legnagyobb területű pórus körszerűsége.

$$A_A = \frac{A_{\Sigma \text{pórusok}}}{A^{cs}} 100 \text{ (%)}$$
 (28)

$$L_A = \frac{L_{\Sigma \text{pórusok}}}{A^{cs}} \text{ (mm}^{-1}\text{)}$$
 (29)

$$Circ = \frac{D_{ekv, kör}}{D_{max, pórus}} \text{ (-)}$$
 (30)

ahol:

$A_{\Sigma \text{pórusok}}$: a pórusok összterülete az adott keresztmetszeten (mm²),

A^{cs} : az adott keresztmetszet területe (mm²),

$L_{\Sigma \text{pórusok}}$: a pórusok összkörülete az adott keresztmetszeten (mm),

$D_{ekv, kör}$: annak a körnek az átmérője (mm), amelynek területe megegyezik a jellemzett pórus területével ($A_{pórus}$),

$D_{max, pórus}$: a jellemzett pórus legnagyobb átmérője (mm).

A keresztmetszetek esetében bevezettem a repedés kialakulásának kockázatát jellemző, az ún. „Cross-section Classification” paramétert (*CSC* (-)). Ezzel osztályoztam a keresztmetszeten a pórusok elhelyezkedését aszerint, hogy a szakítóvizsgálat közben a felületről meginduló repedés kockázata mekkora. A törési keresztmetszeten:

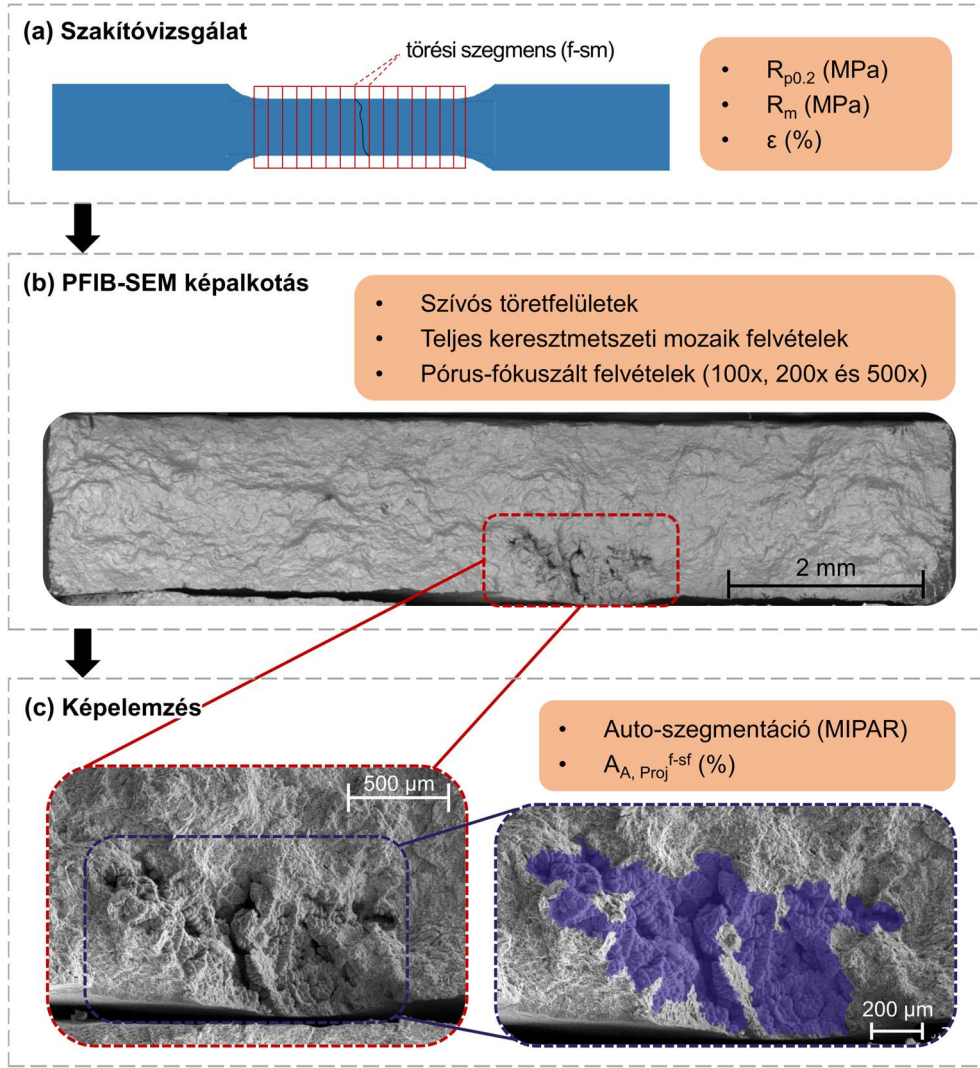
- i. $CSC = 1$, ha nincs pórus a törési keresztmetszeten,
- ii. $CSC = 2$, ha a törési keresztmetszet belső részén fordul elő porozitás, ami a teherviselő keresztmetszetet csökkenti, ezért a repedés kialakulásának kockázatát növeli,
- iii. $CSC = 3$, ha a törési keresztmetszet külső részén (amit a próbatest felületétől maximálisan 0,20 mm mély rétegvastagságban definiáltam, ami a próbatest vastagságának a 10%-a) fordul elő a pórusoknak bármely pontja, ami a terhelt keresztmetszetet csökkenti, valamint a repedés kialakulásának kockázatát tovább növeli a felületi és/vagy felülethez közeli elhelyezkedése miatt,
- iv. $CSC = 4$, ha a törési keresztmetszet külső és belső részén is előfordulnak pórusok így ebben az esetben a repedés kialakulását fokozó hatások erősítik egymást.

4.1.2 Töretfelület jellemzése

A szakítóvizsgálatok maximálisan 100 kN terhelőerőre képes Instron 5982 elektromechanikus univerzális anyagvizsgáló berendezéssel történtek. A próbatestek vizsgálat közbeni alakváltozásának mérése video extenzométerrel, a mért adatok rögzítése pedig a Bluehill 3 szoftver segítségével történt. A vizsgálatok során az előterhelés 5 MPa, a kezdeti terhelési sebesség 30 mm/perc volt, majd a szakítási folyamatok 3 mm/perc húzási sebességgel mentek végbe. A vizsgálatok Dr. Mikó Tamás segítségével történtek, aki meghatározta a próbatestek folyáshatárát ($R_{p0,2}$ (MPa)), szakítószilárdságát (R_m (MPa)), valamint a szakadáshoz tartozó teljes nyúlást (ϵ (%)) (18. ábra (a)) [106].

A szakítóvizsgálatok után a töretfelületek (*f-sf*) helyének meghatározása az alakváltozási térfogat alsó síkjától mérve történt, majd a 3D-s CT felvételeken megállapítottam a repedéssel érintett szegmens(ek)e)t és keresztmetszeteket. A töretfelületeket egy Helios G4 PFIB CXe (Thermo Scientific) plazmafókuszált ionsugaras pásztázó elektronmikroszkóppal (PFIB-SEM), Dr. Koncz-Horváth Dániel közreműködésével vizsgáltam 100x, 200x és 500x-os nagyításokban, szekunder elektronokkal (18. ábra (b)). A teljes töretfelület vizsgálatához mozaikfelvételek készültek [106].

A felületeken látható dendritközi pórusokat a MIPAR képelemző szoftver segítségével, az auto-szegmentációs algoritmussal vizsgáltam (18. ábra (c)) [106]. A felvételek felbontása a nagyítástól függően 1,36 μm (100x), 0,68 μm (200x) és 0,27 μm (500x) volt. A pórusok detektálása a pixelek szürkeségi szintjei alapján nem volt lehetséges a töret jelentős mértékű egyenetlen felülete miatt. Emiatt szürkeségi szint átfedések voltak a pórusok és a háttérterületek között. Az auto-szegmentációs eljárással manuális úton hozzávetőleg megjelöltem a detektálandó pórusterületek határát, illetve a háttérter, amitől el kívántam választani őket, majd az algoritmus a kijelölés alapján felismerte a pórusok határvonalait. A képelemzés módszerét részletesebben a [106] publikációban mutattam be: az auto-szegmentációs eljárások közül az ún. *Smart Find* algoritmust alkalmaztam, ami a képen látható élek keresésével szegmentálja a felvételen látható objektumokat [157–160] a manuálisan meghatározott körvonal alapján.



18. ábra: (a) A szakítóvizsgálatokat követően a töretfelületeket ($f-sf$) PFIB-SEM-mel vizsgáltam két módon – (b) a teljes keresztmetszetről mozaik, illetve (c) pórusfókuszált felvételek készültek –, majd a pórusfókuszált, 100x, 200x és 500x nagyítású képek képelemzését automatikus szegmentálási eljárást alkalmazva végeztem el [12].

Szintén a MIPAR képelemző szoftverrel a teljes keresztmetszetet ábrázoló, mozaik eljárással készült képeken megmértem a töret keresztmetszetének területét ($A_{Proj}^{f-sf-total}$) (31), valamint a pórusok vetített területét az alakváltozás irányára merőleges síkban ($A_{Proj \sum pórusok}^{f-sf}$), majd meghatároztam a töretfelületen látható pórusok vetített területarányát ($A_{A, Proj}^{f-sf}$) a (32) összefüggés szerint [106].

$$A_{Proj}^{f-sf-total} = w t \text{ (mm}^2\text{)} \quad (31)$$

$$A_{A, Proj}^{f-sf} = \frac{A_{Proj \sum pórusok}^{f-sf}}{A_{Proj}^{f-sf-total}} 100 \text{ (%) } \quad (32)$$

ahol:

w : a töretfelület szélessége (mm),

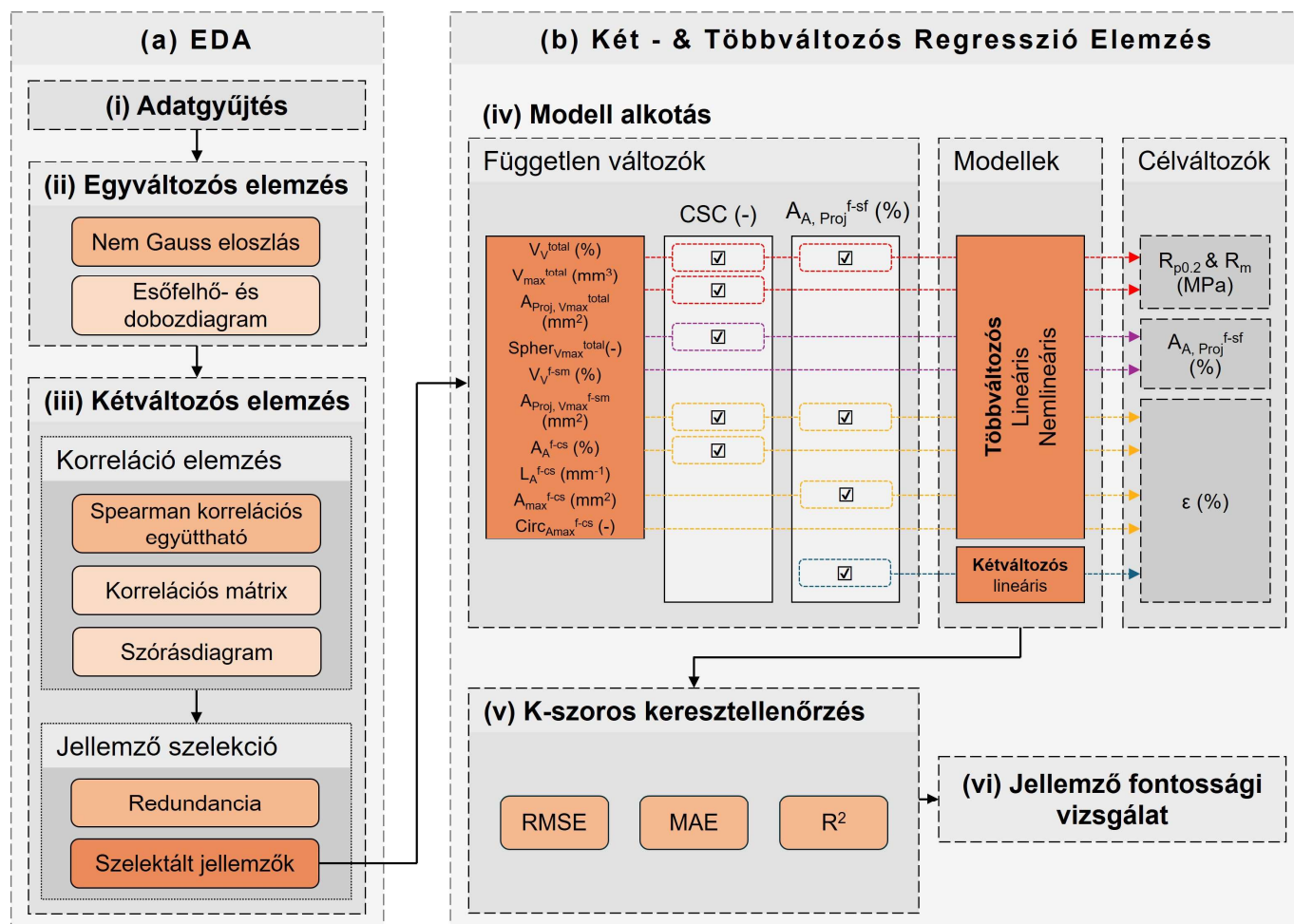
t : a töretfelület vastagsága (mm),

$A_{Proj}^{f-sf-total}$: a töret keresztmetszetének területe (mm²),

$A_{Proj \sum pórusok}^{f-sf}$: a pórusok össz-vetített területe a töretfelületen (mm²).

4.1.3 Feltáró adatelemzés és regressziós modellezés

A pórusszerkezeti, illetve mechanikai jellemzőkön feltáró adatelemzést végeztem. Ezt követően prediktív adat-vezérelt modellezéssel megállapítottam a mechanikai tulajdonságok és a pórusjellemzők között lévő összefüggéseket. Az adatelemzés és a regressziós modellezés folyamatát a 19. ábra foglalja össze.



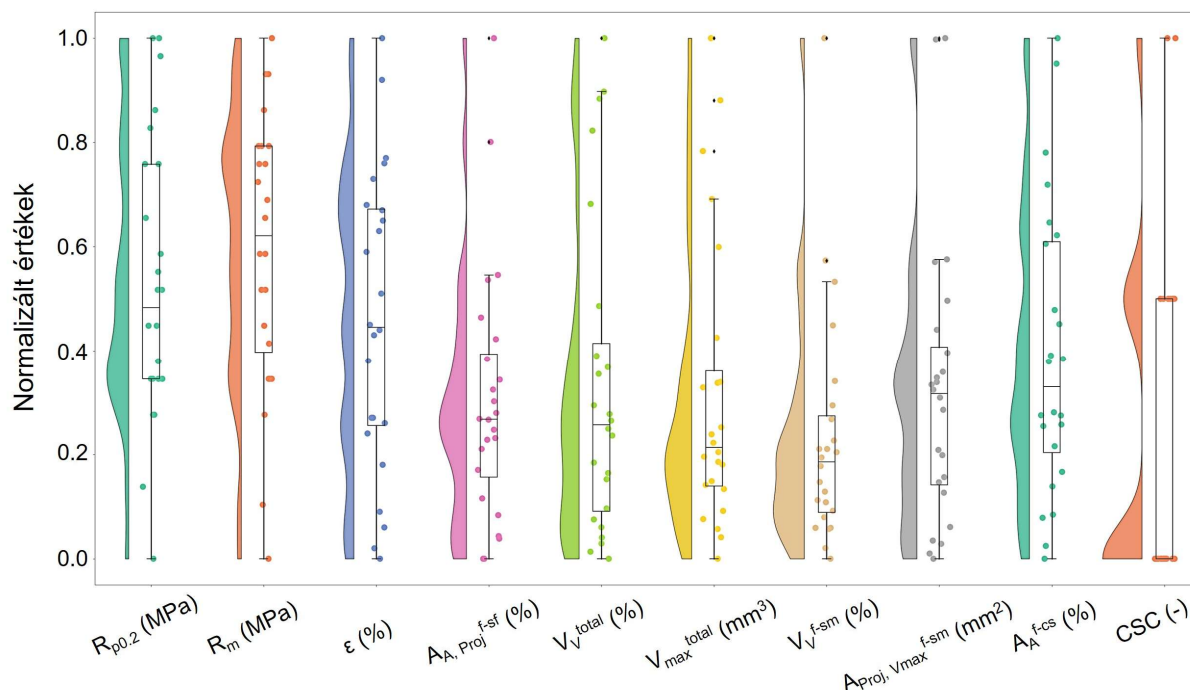
19. ábra: Az (a) feltáró adatelemzés során az adatgyűjtést követően (i) egyváltozós, illetve (ii) kétváltozós elemzéseket végeztem. Ezután a (b) prediktív adat-vezérelt modellezés során (iii) több modellt állítottam fel és értékeltem (iv) keresztellenőrzéssel, valamint (v) fontossági vizsgálattal értékeltem a független jellemzőket [12].

A feltáró adatelemzés során (19. ábra (a)) egy- (ii), illetve kétváltozós elemzéseket (iii) végeztem. A 20. ábrán esőfelhő- és dobozdiagrammokon látható a mechanikai jellemzők, illetve az eredmények alapján néhány fontosnak bizonyult pórusjellemző eloszlása. A 11. táblázat tartalmazza ezeknek a jellemzőknek a főbb statisztikai értékeit (átlag, szórás, minimum és maximum érték).

Mivel több vizsgált jellemző ($R_m (MPa)$, $\varepsilon (\%)$, $A_{A, Proj}^{f-sf} (\%)$, $V_V^{total} (\%)$, $A_A^{f-cs} (\%)$) értékeinek eloszlása – vizuális megfigyelés útján meghatározva – nem normál eloszlású, így a kétváltozós összefüggések számszerűsítésére a Spearman korrelációs együtthatót ($r_s (-)$)

határoztam meg, amelynél Dr. Garami Attila működött közre. Az együtthatókat a 21. ábrán a korrelációs mátrix tartalmazza.

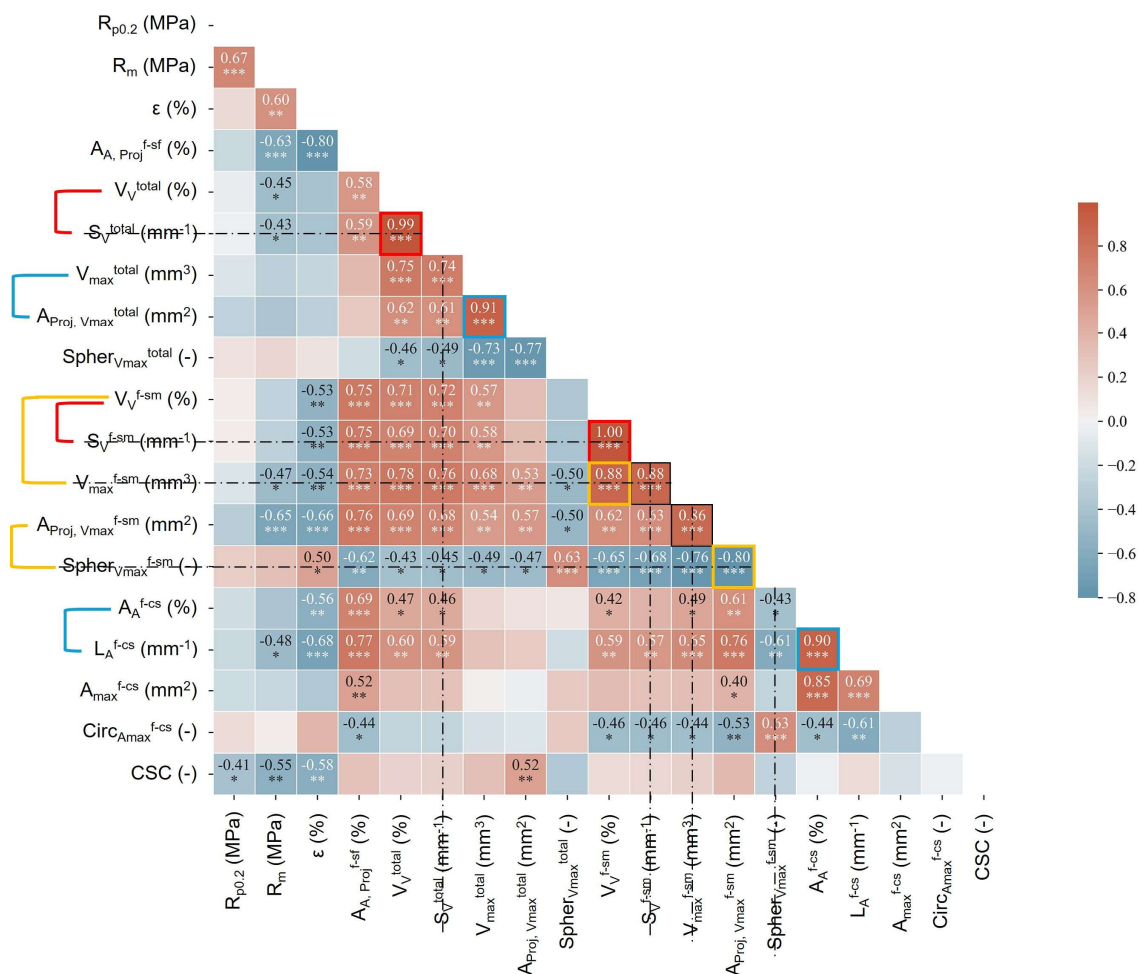
Egy-egy független és függő változók között fennálló kapcsolatokat szórásdiagramokon szemléltetem, melyeket az eredményeknél mutatok be. Függvények illesztésével meghatároztam determinációs együtthatókat (r^2 – *kisbetűvel írva*) (14), melyek alapján megállapítható, hogy a függő változó milyen függvény szerint milyen mértékben áll kapcsolatban a független változóval.



20. ábra: A mechanikai tulajdonságok és néhány pórusjellemző eloszlása 0 és 1 között normalizált skálán ábrázolva [12].

11. táblázat: A 20. ábrán látható jellemzők statisztikai értékei [12].

	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	ε (%)	$A_{A, Proj}^{f-sf}$ (%)	V_v^{total} (%)	V_{max}^{total} (mm ³)	V_v^{f-sm} (%)	$A_{Proj, V_{max}}^{f-sm}$ (mm ²)	A_A^{f-cs} (%)	CSC (-)
Átlag	197,38	255,13	9,38	1,90	0,04	0,07	0,12	0,30	0,36	2,46
Szórás (+/-)	7,92	7,68	2,87	1,51	0,02	0,05	0,11	0,22	0,23	0,66
Minimum	182,00	238,00	4,80	0,00	0,02	0,01	0,01	0,04	0,04	2,00
Maximum	211,00	267,00	14,80	6,23	0,10	0,19	0,50	0,85	0,86	4,00



21. ábra: A mechanikai- és pórusjellemzők között meghatározott Spearman-féle korrelációs együtthatók (r_s (-)). A csillagok a statisztikai szignifikanciát jelzik három általánosan használt szinten. A 0,05-nél kisebb p-értéket (*), a 0,01-nél kisebbet (**) és a 0,001-nél kisebbet (***) jelöli. Az ábrán jelöltem a tulajdonságok kiválasztásában résztvevő értékeket és jellemzőket [12].

A Spearman korrelációs együtthatók alapján paraméter (jellemző) szelekciót hajtottam végre (19. ábra (iii)). Ennek célja a modellekhez használt független változók számának optimalizálása volt az erősen korrelált jellemzők elhagyásával, aminek segítségével a modellek összetettsége redukálható, hibája csökkenthető. Az $r_s > |0,80|$ erős korrelációt mutató jellemzőkből kívántam szelektálni a bemeneti paraméterek számának csökkentésére. A térfogatarány (V_V) és a fajlagos felület (S_V) között $r_s > 0,99$ volt, mind a teljes alakváltozó térfogatra, mind a törési szegmensre vonatkozóan, így a térfogatarányt tartottam meg, mivel a szakirodalomban is ezt a jellemzőt alkalmazták. A V_V^{f-sm} és a V_{max}^{f-sm} jellemzők r_s értéke 0,88 volt, míg az $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ és a $Spher_{Vmax}^{f-sm}$ jellemzők korrelációs együtthatója 0,80, ahol a V_V^{f-sm} és az $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ jellemzőket választottam meg független jellemzőknek, szintén szakirodalmi megfontolás alapján.

A $r_s > |0,80|$ feltétel alól kivételt képeztek a V_{max}^{total} és az $A_{Proj, Vmax}^{total}$ jellemzők. r_s értékük ugyan 0,91 volt, ám a szakirodalomban [5, 72] kifejtették, hogy a legnagyobb pórus

mérete és térbeli kiterjedésük nagysága (az igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területben kifejezve) jelentős mértékben befolyásolják a nyúlást és a tönkremenetel helyének kialakulását. Ezért ezeket a pórusjellemzőket is számításba vettem a vizsgálatok során. Emellett az A_A^{f-cs} és az L_A^{f-cs} jellemzők r_s értéke 0,90 volt, de mivel ezeket a jellemzőket még nem vizsgálták korábban, így újdonságuk miatt alkalmaztam őket a regressziós elemzések során. A korreláció-alapú paraméter szelekcióval tehát négygyel (S_v^{total} , S_v^{f-sm} , V_{max}^{f-sm} , $Spherv_{max}^{f-sm}$) csökkent a független változók száma.

A feltáró adatelemzést követően volt elvégezhető a prediktív adat-vezérelt modellezés (19. ábra (b)), amely a Python ML (Machine Learning) szoftver [136] segítségével történt Dr. Garami Attila közreműködésével. Az egyes folyamatok módszerét az 1.5.2 *Regressziós modellezés* fejezetben tárgyaltam. A két- és többváltozós, lineáris és nemlineáris **regressziós elemzések célja** a mechanikai jellemzőkre hatást gyakorló **pórusjellemzők azonosítása** volt (nem konkrét matematikai összefüggések megállapítása).

- **Függő változók** voltak a szakítóvizsgálattal meghatározott mechanikai jellemzők ($R_{p0,2}$ (MPa), R_m (MPa), illetve ε (%)), valamint a töretfelületi porozitás ($A_A, Proj^{f-sf}$ (%)).
- **Független változók** voltak azok a pórusjellemzők, amelyeket a teljes alakváltozó térfogatban (*total*), a törési szegmensben (*f-sm*) és a törési keresztmetszeten (*f-cs*) határoztam meg, valamint a töretfelületi porozitás ($A_A, Proj^{f-sf}$ (%)) és a törési keresztmetszeten a repedés kialakulásának kockázatát jellemző CSC (-) paraméter (19. ábra (iv)).

Összesen 9 regressziós modellt terveztem a függő és a független változók számától függően, különös figyelemmel az $A_A, Proj^{f-sf}$ és a CSC jellemzőkre. A folyáshatár és a szakítószilárdság vizsgálatokkor 11–12 ($A_A, Proj^{f-sf}$ -vel, illetve anélkül), míg a töretfelületi porozitás ($A_A, Proj^{f-sf}$) vizsgálatokkor 10–11 (CSC-vel, illetve anélkül) független változót tartalmaztak a többváltozós modellek. A nyúlás modellezése során több esetet is vizsgáltam: $A_A, Proj^{f-sf}$ -vel, illetve anélkül, valamint CSC-vel és anélkül. Tehát a 10 *standard* független pórusjellemző mellett az $A_A, Proj^{f-sf}$, illetve a CSC *kiemelt* független változók hatását modelleztem. Többféle algoritmust alkalmaztam, melyek a következők: *Linear*, *XGBoost*, *CatBoost* és *RandomForests*. A modellek teljesítményének javítása érdekében az *Advanced Feature Engineering* technikák közül a *Golden Features* (GFs), valamint a *Feature Selections* (Selected Features – SFs) eljárásokat is alkalmaztam. A többváltozós modellek mellett kétváltozós lineáris regresszióval is vizsgáltam az $A_A, Proj^{f-sf}$ és az ε közötti összefüggést.

A modellek teljesítményét az RMSE és a MAE (illetve lineáris esetben az R^2 -tel is) statisztikai mérőszámokkal írtam le, melyeket a **k-szoros keresztellenőrzéssel** (másképpen kereszt-validálással) **határoztam meg** (19. ábra (v)), ami biztosítja, hogy noha a minta elemszáma kicsi (24 db), alkalmazásával a túlillesztés mérsékelhető. Így a gépi tanulás módszerével **kis adathalmazon is megfelelő** módon azonosíthatók a célváltozót befolyásoló lehetséges releváns független változók, ami pontosítja a szakirodalomban eddig alkalmazott kétváltozós statisztikai megközelítések eredményeit. Az RMSE-t az y szórására (21), míg a MAE-t az y értéktartományára (22) normalizáltam annak érdekében, hogy a különböző függő változókra végzett becslések eredményei összehasonlíthatóak legyenek. Ezek alapján a

legjobban teljesítő algoritmussal becsült modelleket választottam ki, mely az *XGBoost* volt, egy döntésfa típusú nemlineáris algoritmus [15, 140].

A modellek teljesítményértékelése mellett a független változók (pórusjellemzők) szerepét **permutáció-alapú paraméter fontossági vizsgálattal** (19. ábra (vi)) vizsgáltam, ahol $k = 5$ volt. Segítségével meghatároztam, hogy mely pórusjellemzők függenek össze erőteljesen a célváltozókkal, melyek befolyásolják azokat.

4.2 A pórusok és a mechanikai tulajdonságok kapcsolata

4.2.1 Prediktív regressziós modellek

A többváltozós regresszióelemzés során az *XGBoost* döntésfa típusú [15, 140], – röviden *XGB* –, nemlineáris modellek bizonyultak a legjobbaknak. A kétváltozós regresszióelemzéssel lineáris, vagy lineárisra visszavezethető összefüggések határozhatók meg, ekkor a döntésfa típusú modellek nem alkalmazhatóak. A mechanikai tulajdonságok ($R_{p0,2}$, R_m , ε) és a töretfelületi porozitás ($A_{A, Proj}^{f-sf}$) becslésére végzett modellezés eredményeit alább mutatom be a 12. táblázatban a független változókkal, különös tekintettel a kiemelt változókra (*inCSC* és *inA_{A, Proj}^{f-sf}*). Az RMSE és MAE értékek a modellek összehasonlítására szolgálnak egy adott függő változó becslése esetén. Az egyes jellemzőkre végzett becslések az NRMSE és NMAE értékek alapján hasonlíthatók össze.

12. táblázat: A prediktív regressziós modellek értékelésére szolgáló, keresztvalidációval meghatározott RMSE, NRMSE, MAE és NMAE értékek (*a nyúlás esetén kiemeltem a megbízhatóbb eredményt mutató modelleket*) ([12] nyomán).

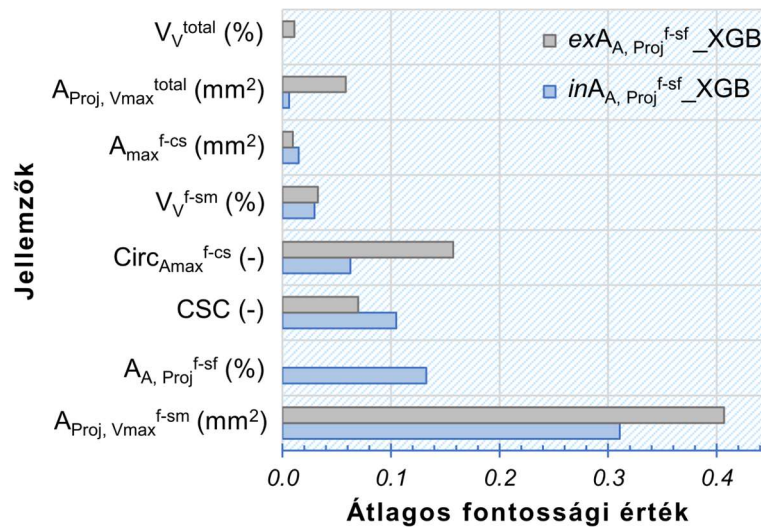
Regressziós modellek	Becsült (függő) változók	Alap független változók	Különbségek a <i>kiemelt</i> független változóknak		Modell típus	RMSE	NRMSE	MAE	NMAE
			<i>inCSC</i> (-)	<i>inA_{A, Proj}^{f-sf}</i> (%)					
Többváltozós Lineáris és Nemlineáris	$R_{p0,2}$ (MPa)	V_V^{total} (%)	☑	☑	XGB	7,16	0,90	5,78	0,20
			☑	☒		6,97	0,88	5,64	0,19
	R_m (MPa)	V_{max}^{total} (mm ³)	☑	☑		5,68	0,74	4,66	0,16
		$A_{Proj, Vmax}^{total}$ (mm ²)	☑	☒		5,74	0,75	4,72	0,16
	$A_{A, Proj}^{f-sf}$ (%)	$SpherV_{max}^{total}$ (-)	☑			0,92	0,61	0,56	0,09
		V_V^{f-sm} (%)	☒			0,93	0,62	0,57	0,09
	ε (%)	$A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ (mm ²)	☑	☑	XGB-GFs-SFs	1,49	0,52	1,20	0,12
		A_A^{f-cs} (%)			XGB	1,70	0,59	1,43	0,14
		L_A^{f-cs} (mm ⁻¹)	☑	☒	XGB-GFs-SFs	1,74	0,61	1,42	0,14
					XGB	2,04	0,71	1,79	0,18
		A_{max}^{f-cs} (mm ²)	☒	☑	XGB-SFs	1,98	0,69	1,57	0,16
		$Circ_{Amax}^{f-cs}$ (-)			XGB	2,15	0,75	1,65	0,16
			☒	☒	XGB	2,36	0,82	2,05	0,20
Kétváltozós Lineáris				☑	Linear	1,85	0,65	1,58	0,16

A folyáshatár ($R_{p0,2}$) és a szakítószilárdság (R_m) becslése

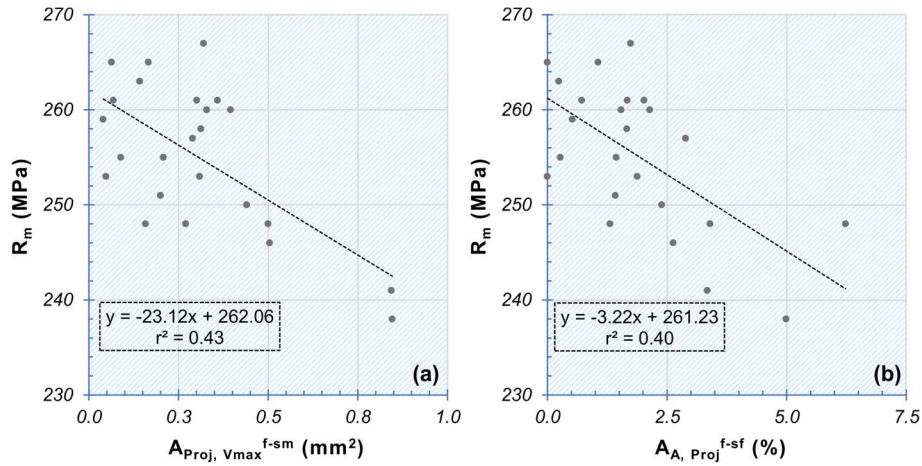
A folyáshatár és a szakítószilárdság becslésekor vizsgáltam az összes, paraméter (jellemző) szelektálással (*Correlation-based Feature Selection*) kiválasztott 12 pórusjellemző hatását. Mivel az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ a szakítóvizsgálat után határozható meg, ennek használata nélküli modellt ($exA_{A, Proj}^{f-sf}$) is felállítottam azoknak a jellemzőknek a megállapítására, amelyekkel előre becsülhető a folyáshatár és a szakítószilárdság.

A folyáshatár esetén az RMSE 7,16 MPa, a MAE 5,78 MPa volt, míg az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ független változó nélkül a modell teljesítménye nem javult jelentős mértékben (12. táblázat). Azaz az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ nem befolyásolja a folyáshatárt, enélkül a modell hibája minimálisan csökkent. A normalizált mutatók alapján (NRMSE = 0,88) megállapítható, hogy a pórusjellemzők és a folyáshatár között nincs közvetlen kapcsolat.

A szakítószilárdság becslésekor a folyáshatárhoz képest a kisebb hiba (NRMSE = 0,74) arra enged következtetni, hogy a pórusjellemzőknek van hatása. Az RMSE 5,68 MPa, a MAE 4,66 MPa volt ($inA_{A, Proj}^{f-sf}$), míg az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ nélküli modell esetén az RMSE 5,74 MPa, a MAE pedig 4,72 MPa volt (12. táblázat). A regressziós modellezéssel kapott eredményekből megállapítható, hogy a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területe ($A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$) jelentősen, míg a töretfelületi porozitás ehhez képest kevésbé befolyásolja a szakítószilárdságot (22. ábra). A kétváltozós elemzés eredményei szerint az R_m az $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ -val $r^2 = 0,43$, illetve a töretfelületi porozitással $r^2 = 0,40$ lineáris összefüggést mutat (23. ábra), amely mérsékelt kapcsolatot jelez (azaz $0,5 \leq r < 0,8$ [117]).



22. ábra: A szakítószilárdság (R_m (MPa)) becslése az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ független változóval ($inA_{A, Proj}^{f-sf}$), illetve nélkül ($exA_{A, Proj}^{f-sf}$): az egyes független változók fontossága a modellekben.



23. ábra: A szakítószilárdságot (R_m (MPa)) befolyásoló pórusjellemzők diagramjai: (a) $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ (0,04–0,85 mm² között) és (b) $A_{A, Proj}^{f-sf}$ (0–6,23% között).

A teljes alakváltozás (ϵ) becslése

A teljes alakváltozás becslésekor vizsgáltam egyrészt az összes pórusjellemző, másrészt a kiemelt CSC és $A_{A, Proj}^{f-sf}$ jellemzők hatását a modellek teljesítményére. Megállapítottam, hogy melyek azok a jellemzők, amelyek leginkább kapcsolatban állnak a próbatestek alakváltozásával és amelyekkel így becsülhető annak mértéke.

A teljesítménymutatókat figyelembe véve (12. táblázat) a legjobb eredményt a szelekciót és jellemző interakciót (kombinációt) alkalmazó modell adta (GFs-SFs), amelyekben mindkét kiemelt pórusjellemző szerepelt ($inCSC$ és $inA_{A, Proj}^{f-sf}$), ekkor az RMSE értéke 1,49% volt, a MAE pedig 1,20%. A modellhez tartozó, valós (mért) és becslő értékeket a 24. ábra (a) mutatja be. Amennyiben az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ nem volt független változó (24. ábra (b)), az RMSE és a MAE érték növekedett (1,74%, illetve 1,42%). A modell teljesítménye (ami már csak jellemző szelekciót használt) tovább csökkent a CSC elhagyásával (az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ helyett, 24. ábra (c)), (RMSE = 1,98%, MAE = 1,57%). Ebből arra lehet következtetni, hogy a CSC nagyobb szerepet játszhat a nyúlás értékének változásában, mint az $A_{A, Proj}^{f-sf}$, de utóbbi is lényeges pórusjellemző. Amennyiben egyik kiemelt jellemző sem volt független változó (24. ábra (d)), úgy a modell teljesítménye jelentősen lecsökkent (RMSE = 2,36%, miközben a mért adatok szórása $\pm 2,87\%$ volt). A nyúlás becslése esetén az alap *XGBoost* modellek jellemzően 0,15-0,3 RMSE%-kal nagyobb hibát eredményeztek, mint a szelekciót és kombinációt alkalmazó modellek (12. táblázat).

A kétváltozós lineáris modell (Kétváltozós_Lineáris) R^2 értéke 0,57, RMSE értéke 1,85% volt (24. ábra (a-d)). Amennyiben ezt a modellt összehasonlítom a kiemelt jellemzőkkel kombinált modellekkel, megállapítható, hogy a modell hibája 0,11 RMSE%-kal nagyobb, mint az $inCSC-exA_{A, Proj}^{f-sf}$ (XGB-GFs-SFs) esetben (a MAE értékben 0,01% a különbség a két modell között), de 0,13%-kal kisebb, mint az $exCSC-inA_{A, Proj}^{f-sf}$ (XGB-SFs) modellnél. Ez azt jelenti, hogy a többi pórusjellemző mellett a CSC-nek nagyobb volt a szerepe a nyúlás változásában, míg amennyiben ez nem szerepelt független változóként a modellben (de az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ továbbra is), a többi pórusjellemzővel lefuttatott modell nagyobb hibát eredményezett.

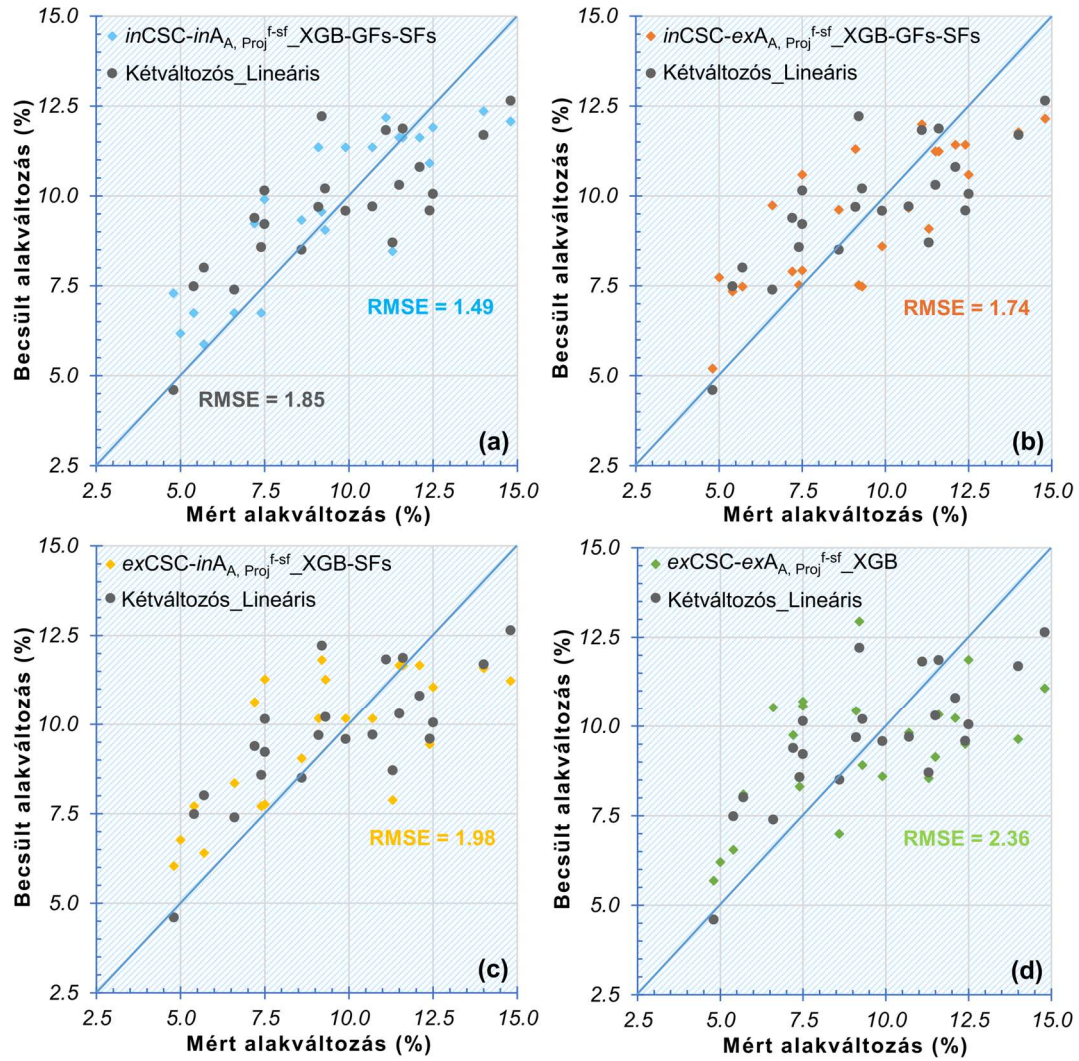
A normalizált teljesítménymutatókat összehasonlítva (12. táblázat), a nyúlás becslésére, a szelekciót és kombinációt alkalmazott modellek jobban teljesítettek (NRMSE = 0,52-0,69,

NMAE = 0,12-0,16), mint a folyáshatárra (NRMSE = 0,88, NMAE = 0,19) és a szakítószilárdságra (NRMSE = 0,74, NMAE = 0,16) alkalmazott modellek.

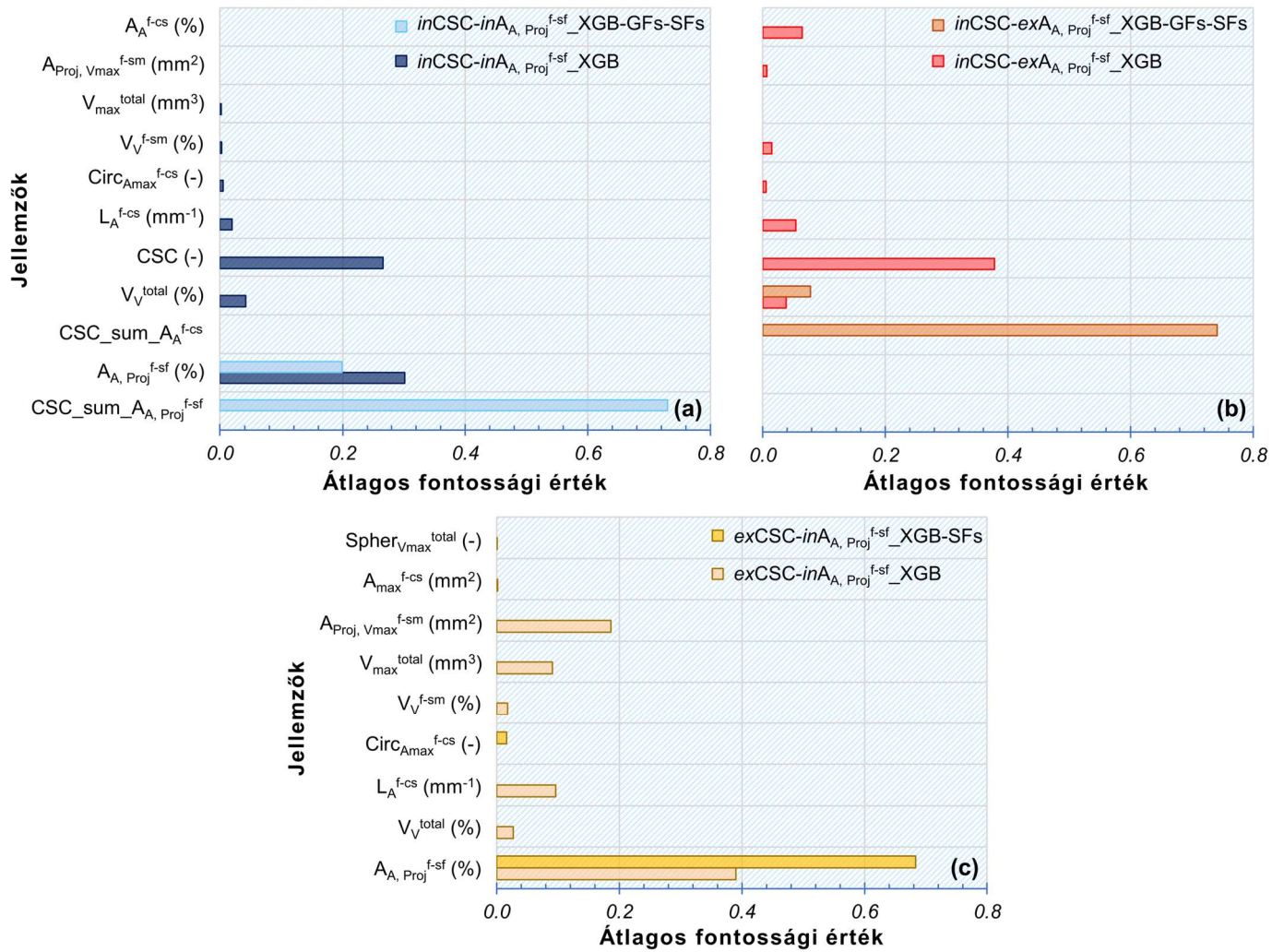
Miután kiválasztottam a legjobban teljesítő GFs-SFs és SFs modelleket, valamint azok alapmodelljeit, a független jellemzőik fontossági értékeit összehasonlítottam, melyet a 25. ábra mutat be. Az egyes modellekhez tartozó jellemzők fontossági értékei **csak egy modellen belül** értelmezhetők. A fontossági számok értékelése során megállapítottam, hogy:

- i. amennyiben mindkét kiemelt pórusjellemző ($inCSC$ és $inA_{A, Proj}^{f-sf}$) is független változó volt a modellben, úgy a $CSC_sum_A_{A, Proj}^{f-sf}$, az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ és a CSC jellemzők voltak hangsúlyosak, míg az alapmodell szerint, – ugyan kisebb mértékben – de a V_V^{total} jellemző is hatással volt a modellel becsült, töréshez tartozó alakváltozásra (25. ábra (a)),
- ii. ha a többi jellemző mellett az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ nem volt független változó, a $CSC_sum_A_A^{f-cs}$ és a V_V^{total} jellemzők bizonyultak nyúlást befolyásoló változóknak. Az alapmodellel a CSC mellett kisebb mértékben az A_A^{f-cs} és az L_A^{f-cs} jellemzőknek is volt befolyása (25. ábra (b)),
- iii. abban az esetben, ha a CSC nem volt független változó, akkor leginkább az $A_{A, Proj}^{f-sf}$, kisebb mértékben pedig az $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ bizonyult fontos jellemzőnek (25. ábra (c)).

Tehát a töréshez tartozó alakváltozást a töretfelületi porozitás mellett a törési keresztmetszeten a pórusok elhelyezkedése befolyásolja a legnagyobb mértékben, míg az alakváltozó térfogat teljes porozitása, a törési szegmens keresztmetszeteinek legnagyobb mértékű porozitása, illetve a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területe kisebb mértékben van rá hatással.

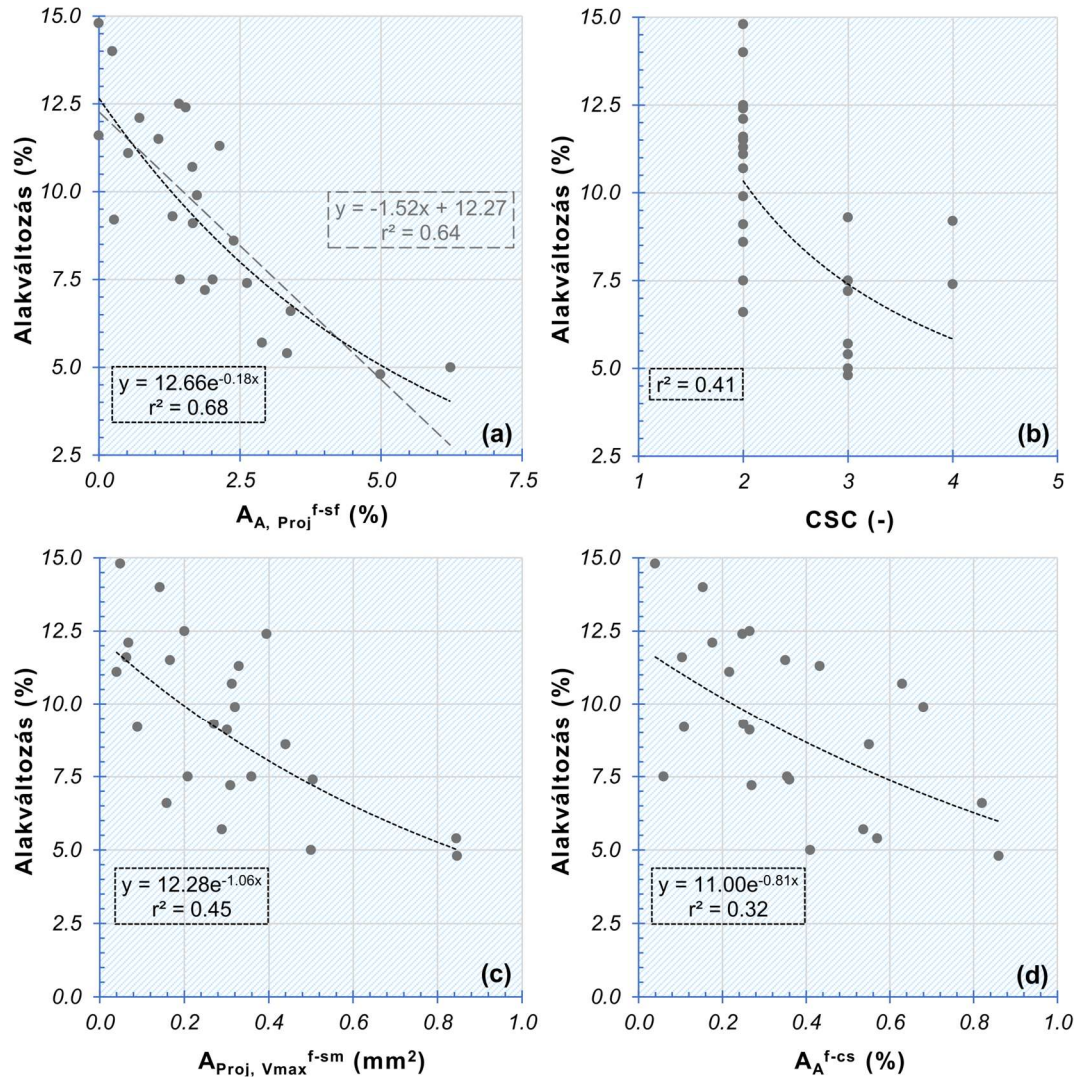


24. ábra: Az alakváltozás (ϵ (%)) mért és becsült értékeinek összehasonlítása a kiemelt jellemzők (CSC és $A_{A, Proj}^{f-sf}$) egyes kombinációival felépített modellek esetén: (a) $inCSC-inA_{A, Proj}^{f-sf}$, (b) $inCSC-exA_{A, Proj}^{f-sf}$, (c) $exCSC-inA_{A, Proj}^{f-sf}$ és (d) $exCSC-exA_{A, Proj}^{f-sf}$. Az ábrarészek tartalmazzák a lineáris kétváltozós (Kétváltozós_Lineáris) modellel becsült értékeket is [12].



25. ábra: Az alakváltozás (ε (%)) becslése során a független változók szerepének meghatározása paraméter fontossági vizsgálattal: (a) $inCSC-inA_{A, Proj}^{f-sf}$, (b) $inCSC-exA_{A, Proj}^{f-sf}$ és (c) $inCSC-inA_{A, Proj}^{f-sf}$. Megjegyzendő, hogy az egyes modellek átlagos fontossági értékei csak az egyes modellek kontextusában értékelhetők [12].

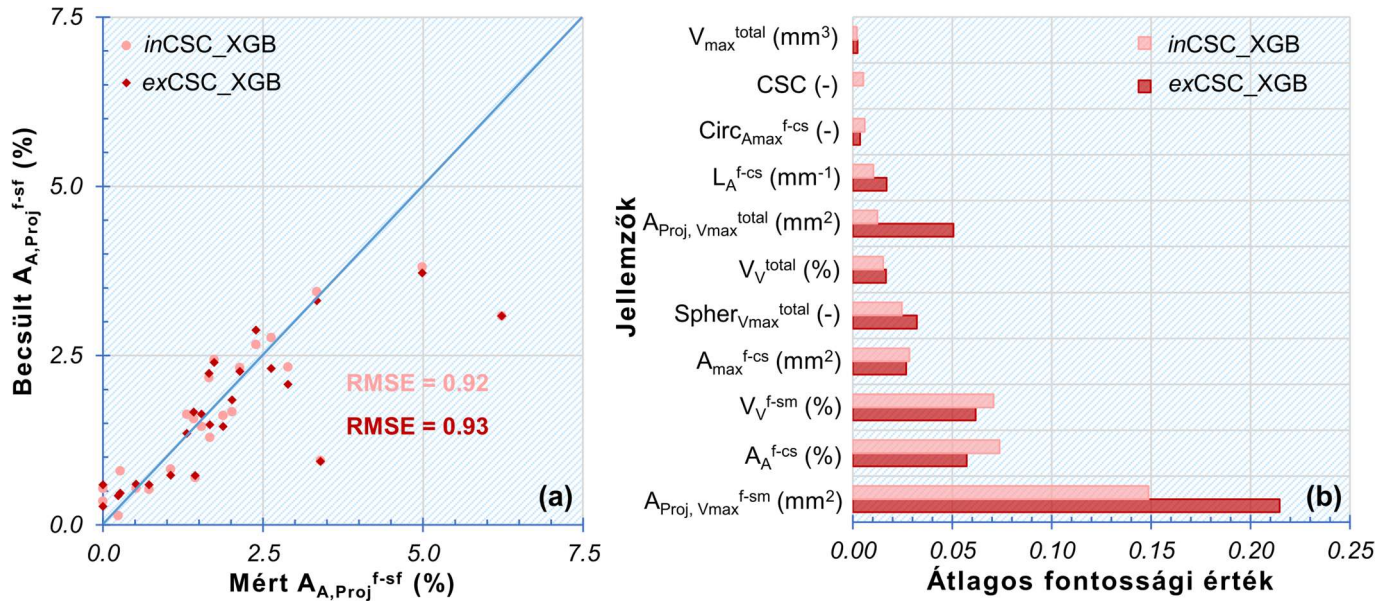
A regressziós modellek alapján a nyúlással összefüggést mutató pórusjellemzők kétváltozós kapcsolatát a 26. ábra diagramjain szemléltetem. Az alakváltozás az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ -vel $r^2 = 0,68$ (lineáris esetben $r^2 = 0,64$), a CSC-vel $r^2 = 0,41$, az $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ -mel $r^2 = 0,45$, az A_A^{f-cs} -vel pedig $r^2 = 0,32$ nemlineáris összefüggést mutat. A determinációs együtthatók (r^2) nem mutatnak jelentős kapcsolatot, de rávilágítanak arra, hogy ezek a pórusjellemzők a legfontosabbak a nyúlás szempontjából. Bár a CSC-vel meghatározott r^2 viszonylag kicsi, ám a gépi tanulással történő prediktív adat-vezérelt regressziós modellezés során ez a független változó volt az egyik legjelentősebb hatással a nyúlásra.



26. ábra: A regressziós modellezéssel meghatározott, az alakváltozást (ε (%)) leginkább befolyásoló pórusjellemzők diagramjai: (a) $A_{A, Proj}^{f-sf}$ (0–6,23% között), (b) CSC, (c) $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ (0,04–0,85 mm² között) és (d) A_A^{f-cs} (0,04–0,86% között) [12].

A töretfelületi porozitás ($A_{A, Proj}^{f-sf}$) becslése

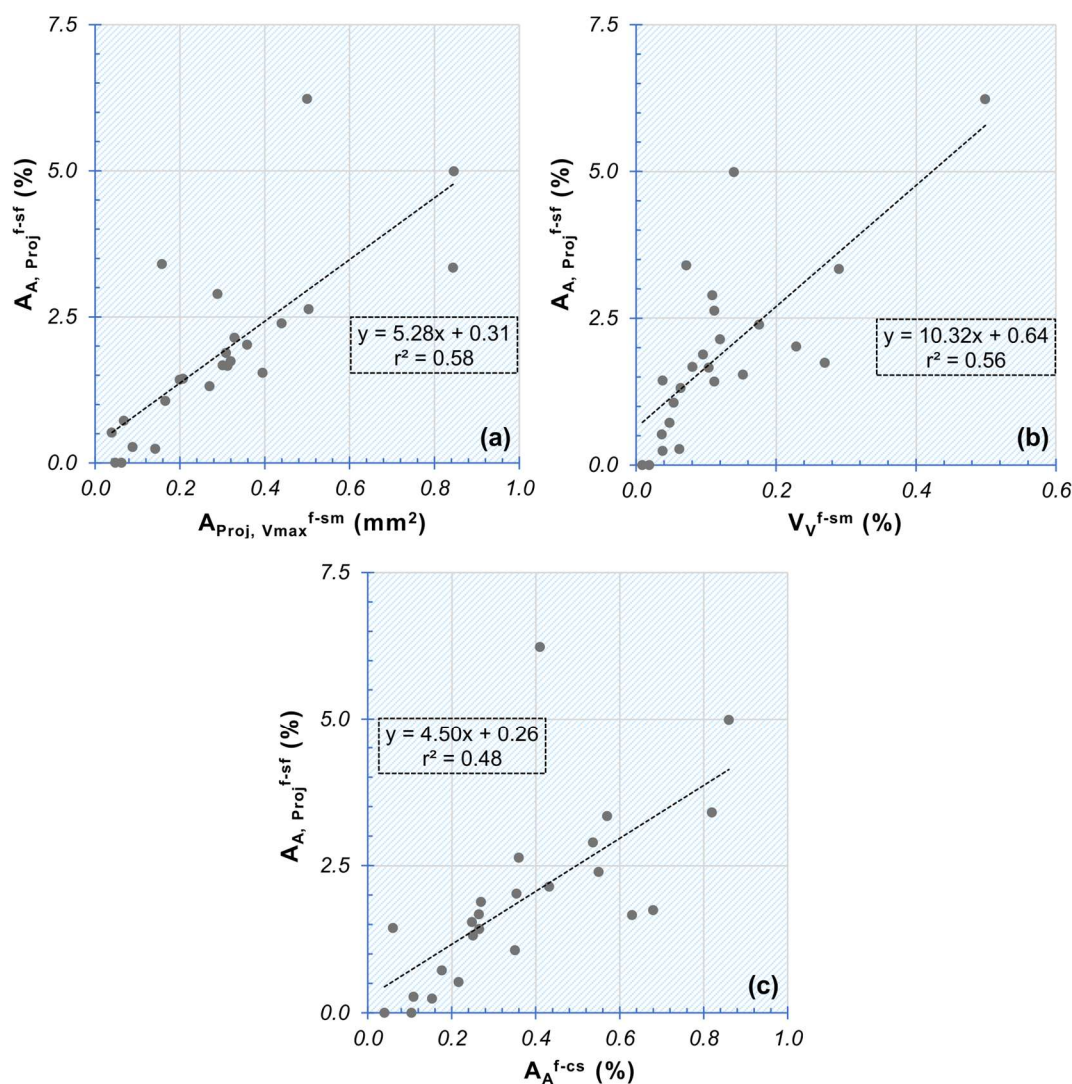
Mivel a nyúlás jelentős kapcsolatban állt a töretfelületi porozitással, így erre a jellemzőre is elvégeztük (Dr. Garami Attila segítségével) a regressziós modellezést. Az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ becslésekor, amennyiben a CSC bemeneti változó volt, az RMSE 0,92%, a MAE pedig 0,56% volt (12. táblázat és 27. ábra (a)). Mivel ehhez képest a CSC nélküli modell teljesítménymutatói nem változtak, ezért a töretfelületi porozitás nem áll kapcsolatban a CSC-vel, vagyis a pórusok mennyiségét nem befolyásolja azok elhelyezkedése a próbatest keresztmetszetén. A normalizált teljesítménymutatókat figyelembe véve (NRMSE = 0,62; az NMAE a legkisebb; 0,09) a modellek hibája legalább olyan kicsi, mint a nyúlás előrejelzésekor.



27. ábra: A töretfelületi porozitás ($A_{A, Proj}^{f-sf} (%)$) becslése a kiemelt CSC független változóval (*inCSC*), illetve nélkül (*exCSC*): (a) a mért és becslült értékek összehasonlítása, illetve (b) az egyes független változók fontossága a modellekben [12].

Ezt a megállapítást a 27. ábra (b) részén látható paraméter fontossági vizsgálat eredménye (*inCSC_XGB*) is alátámasztotta. A CSC fontossági értéke jelentéktelen az $A_{Proj, V_{max}}^{f-sm}$, a V_V^{f-sm} és az A_A^{f-cs} jellemzőkhöz képest, melyek viszont összefüggnek a töretfelületi porozitással. Megjegyzendő, hogy a két modell fontossági értékei közvetlenül nem összehasonlíthatók, ahogyan a 25. ábrán sem, azok egy modellen belül értelmezhetők. A 28. ábrán látható kétváltozós diagramokon szemléltetem a modell szerint összefüggést mutató pórusjellemzők kapcsolatát a becslült $A_{A, Proj}^{f-sf}$ -vel. Az $A_{Proj, V_{max}}^{f-sm}$ 0,58 (a), a V_V^{f-sm} 0,56 (b), az A_A^{f-cs} pedig 0,48 (c) r^2 értéket mutatnak a töretfelületi porozitással lineáris összefüggés esetén. Ezek alapján megállapítható, hogy ezek a pórusjellemzők külön-külön, de hasonló mértékben vannak hatással a töretfelület kialakulásának helyére. Ezek a jellemzők egymást erősítve befolyásolják a töretfelületi porozitás nagyságát. A tönkremenetel szempontjából kritikus zónában minél nagyobb a pórusok vetített területe, a helyi térfogati porozitás és a helyi legnagyobb keresztmetszeti porozitás, annál inkább fog a repedés a pórusokon keresztülhaladni, ezzel növelve a töretfelületi porozitást.

Amennyiben visszatekintünk a nyúlás modelljeihez, észrevehető, hogy ezek közül az $A_{Proj, V_{max}}^{f-sm}$ és az A_A^{f-cs} jellemzők ugyan kisebb jelentőséggel bírnak a nyúlás változásában, mint a CSC, de a fontossági vizsgálat során lényegesnek bizonyultak, éppen ezért a nyúlást közvetetten befolyásolják.



28. ábra: A regressziós modellezés során meghatározott, a töretfelületi porozitást ($A_{A, Proj}^{f-sf}$ (%)) leginkább befolyásoló pórusjellemzők diagramjai: (a) $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ (0,04–0,85 mm² között), (b) V_V^{f-sm} (0,01–0,50% között) és (c) A_A^{f-cs} (0,04–0,86% között) [12].

4.2.2 A pórusszerkezet hatása a mechanikai tulajdonságokra

A publikációkban ismertett eredményeket összehasonlítva a saját eredményeimmel (13. táblázat), megállapítottam, hogy **a nyúlás a töretfelületi porozitás mennyiségével ($A_{A, Proj}^{f-sf}$) szoros kapcsolatban áll** (25. és 26. ábra), ahogyan azt a [10, 72, 103–105] publikációkban is leírták. Mivel ez mechanikai anyagvizsgálat után meghatározható adat, arra törekedtem, hogy a törési folyamatot és az alakváltozást a **szakítóvizsgálat előtti jellemzők alapján lehessen megmagyarázni**, ezért szükség volt annak megállapítására is, hogy mely egyéb pórusjellemzők befolyásolják ezeket. Arra a következtetésre jutottam, hogy a törés vonalával érintett keresztmetszetek közül a maximális porozitás (A_A^{f-cs}), illetve a törési szegmensben található legnagyobb térfogatú pórus vetített területe ($A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$) a **töretfelület kialakulási útján keresztül** (27. ábra (b) és 28. ábra) közvetetten befolyásolják a szakadási nyúlást. A pórusok repedésképző szerepét elhelyezkedésük jellemzésével (CSC) vettem figyelembe. Ehhez hasonló jellemző az irodalomban nem található, a jelenséget csak kvalitatív módon írják le [5,

9, 72]. A szakadáshoz tartozó teljes alakváltozás ezzel a négy jellemzővel ($A_{A, Proj}^{f-sf}$, CSC, A_A^{f-cs} , $A_{Proj, V_{max}^{f-sm}}$) nemlineáris összefüggésben állt (25. ábra és 26. ábra).

Más kutatók a **sűrűségből meghatározott térfogati porozitás** [104, 109, 161], illetve a **törési szegmens porozitása** (V_V^{f-sm}) [9] esetében lineáris összefüggést állapítottak meg a nyúlással (13. táblázat). Mindezek mellett a **legnagyobb térfogatú pórus** (V_{max}^{total}) kis térfogataránya esetén (0-0,3%) gyengébb, míg nagyobb mennyisége esetén (0,3-1,1%) erősebb lineáris összefüggés adódott [9], ahol a 0,3% 0,043 mm³ térfogatú pórusnak felelt meg. Liu és munkatársai szintén a legnagyobb térfogatú pórust (V_{max}^{total} : $\approx$ 0-2,0 mm³ méretű pórusokra vonatkozóan) határozták meg a nyúlást leginkább befolyásoló jellemzőnek [5], annak ellenére, hogy ebben az esetben egy nagyságrenddel nagyobbak voltak.

A regressziós elemzés eredményei alapján azt találtam, hogy az **alakváltozó térfogat porozitása** (V_V^{total}) kis mértékben nemlineáris, míg a V_V^{f-sm} és a V_{max}^{total} nem állt kapcsolatban az alakváltozással (25. ábra). Fontos kiemelni, hogy a [9]-es publikációban vizsgált próbatestekben a pórusok mérete ($V_{max}^{f-sm} = 0,16$ mm³) ugyan az általam meghatározottakhoz (V_{max}^{total} : 0,01-0,19 mm³) hasonló volt, de a közölt CT felvételek alapján nagyobb mennyiségű porozitást (V_V^{f-sm} : 0,44-2,88%) tartalmaztak és az eloszlásuk sem volt véletlenszerű, hanem sávosan helyezkedtek el a próbatesten belül (13. táblázat). A [104]-es és a [109]-es publikációkban pedig a **térfogati porozitás** egy, illetve két nagyságrenddel nagyobb volt az általam meghatározotthoz (V_V^{total} : 0,02-0,10%) képest.

13. táblázat: A póru szerkezet és a mechanikai jellemzők között az általánosan, illetve a szakirodalomban meghatározott eredmények különböző öntéstechnológiával előállított, eltérő ötvözetű és póru szerkezetű öntvények esetén [12].

	Anyag, technológia	Póru szerkezet	Mechanikai jellemzők	Összefüggés a nyúlással (ϵ , %)	Összefüggés a szakítószilárdsággal (R_m , MPa)
[12]	A356-T6, LPDC	- Véletlenszerű eloszlás, - $V_{\max}^{\text{total}}$: 0,01-0,19 mm ³ , - V_V^{total} : 0,02-0,10%, - $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: 0,0-6,23%, - $A_{\text{Proj}, V_{\max}}^{f\text{-sm}}$: 0,04-0,85 mm ² , - $V_V^{f\text{-sm}}$: 0,01-0,5%, - $A_A^{f\text{-cs}}$: 0,04-0,86%.	- R_m : 238-267 MPa, - ϵ : 4,8-14,80%.	- $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: $r^2 = 0,68$; nemlineáris , - CSC: $r^2 = 0,41$; nemlineáris , - $A_{\text{Proj}, V_{\max}}^{f\text{-sm}}$: $r^2 = 0,45$; nemlineáris , - $A_A^{f\text{-cs}}$ nemlineáris , - V_V^{total} nemlineáris .	- $A_{\text{Proj}, V_{\max}}^{f\text{-sm}}$: $r^2 = 0,43$; lineáris , - $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: $r^2 = 0,40$; lineáris .
[3]	AlSi9Mg0,3-AC; LPDC	- $D_{\text{ekv}, \Sigma \text{Proj}, \max}^{f\text{-sf}}$, - $D_{\text{ekv}, A_{\max}, \text{Proj}, \max}^{f\text{-sf}}$.	- ϵ : 2,5-16,60%.	- $D_{\text{ekv}, \Sigma \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: $r^2 = 0,78$; lineáris , - $D_{\text{ekv}, A_{\max}, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: $r^2 = 0,86$ (kiugró értékekkel 0,52); lineáris .	Nem vizsgálták.
[9]	AM60, HPDC	- Sávós póru eloszlás és nagy mennyiségű porozitás, - 1,1% $V_V, V_{\max}^{f\text{-sm}} = 0,16$ mm ³ $V_{\max}^{f\text{-sm}}$, - $V_V^{f\text{-sm}}$: 0,44-2,88%.	- ϵ : 0,75-13%.	- $V_V^{f\text{-sm}}$: $r^2 = 0,88$; lineáris , - $V_V, V_{\max}^{f\text{-sm}}$ (0,3-1,1% között): $r^2 = 0,94$; lineáris , - $V_V, V_{\max}^{f\text{-sm}}$ (0-0,3% között): $r^2 = 0,57$; nemlineáris .	Nem vizsgálták.
[5]	AlSi10Mn0,5Mg0,3-AC ill. T7, HPDC	- Sávós póru eloszlás és nagy mennyiségű porozitás, - $V_{\max}^{\text{total}}$: $\approx 0 - \approx 1,84-2,0$ mm ³ .	- R_m : 194-206 MPa (T7), - ϵ : 4,5-12% (T7).	$V_{\max}^{\text{total}} = V_{\max}^{f\text{-sm}}$, nemlineáris .	Nem vizsgálták.
[72]	AlSi8Mn0,4Mg0,3; G-DC (manuálisan öntve)	- Klaszteres póru eloszlás, - $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: 4-29%.	- 140-210 MPa, - 0,006-0,047.	$A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: nemlineáris korreláció a valódi törési alakváltozással.	$A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: lineáris korreláció a valódi törési feszültséggel.
[105]	A356-T4, LPDC	$A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: 17-33% ... 22,5-46%.	- R_m : 200-234 MPa, - ϵ : 6,25-14,25%.	$A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: alakváltozási sebességtől függő korreláció.	$A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: közel-lineáris .
[103]	AlSix ($x=2, 5; 8; 11$ wt%), G-DC (manuálisan öntve)	$A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: 7-50% ... 25-75%.	- R_m : 80-100 MPa ... 128-200 MPa, - ϵ : 1,5-13,5%.	$A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: nemlineáris (Si% tartalomtól függő).	$A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: lineáris .
[109]	AlSi10Cu2Mg0,4-AC ill. T6, Squeeze öntés	V_V^{total} : 2,5-18% (T6), - 19%(AC) – mért sűrűségből.	- ϵ : 0,42-1,5% (AC), - ϵ : 0,58-1,6% (T6).	V_V^{total} : közel-lineáris .	Nem vizsgálták.
[104]	A356-T6, LPDC	- $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: $\approx 1,5-20\%$, - V_V^{total} : 0,2-0,95% – mért sűrűségből.	- R_m : 220-310 MPa, - ϵ : 0,3-7,6%.	- $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: nemlineáris , - V_V^{total} : lineáris .	- $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$: lineáris , - V_V^{total} : lineáris .

Mint már említettem, több publikációban is megállapítást nyert, hogy a teljes alakváltozás a töretfelületi porozitástól ($A_{A, Proj}^{f-sf}$) nemlineáris módon függ (13. táblázat), annak ellenére, hogy maximálisan 6,23% porozitást határoztam meg, míg más kutatásokban 20%, de akár 75% is volt [72, 103, 104]. A kutatásom során $r^2 = 0,68$ nemlineáris, illetve $r^2 = 0,64$ lineáris összefüggést állapítottam meg a 24 próbatestre vonatkozóan (26. ábra (a)). Teng és munkatársai [3] viszont a vetített töretfelületi pórusterületeket ekvivalens körátmérőkben fejezték ki (a próbatestek átmérője 6 mm volt). A többi kutatási eredménytől eltérően, normalizált skálán bemutatva lineáris összefüggést ($r^2 = 0,78$) figyeltek meg az alakváltozás és a töretfelületi összes vetített pórusterület ekvivalens átmérője ($D_{equ, \Sigma Proj}^{f-sf}$) között, amennyiben a *kiugró értékeket* (melyek a töretfelületen éles hasadást mutató próbatestek eredményei voltak) kihagyták a számításból. *Amennyiben számításba vették azokat is*, az összefüggés erőssége csökkent ($r^2 = 0,58$). Ez az összehasonlítás kiválóan szemlélteti a pórusszerkezetek közötti különbségek hatását a feltárható összefüggésekre. Tehát amennyiben a ridegen hasadt próbatestek kiugró eredményeit nem vették figyelembe, az összefüggés mértéke megváltozott [3]. Így a korrelációs együtthatók mellett szükséges feltüntetni, hogy az milyen pórusszerkezetre vonatkozik (mennyiség, méret, eloszlás). Kutatásom során minden esetben **szívós töret** jött létre, s a felületen a dendritközi pórusok mellett nem volt jelentős mennyiségű gázpórus. Ugyanezen próbatestek metallográfiai csiszolatain megállapítást nyert, hogy **a szövetszerkezetben**, azaz az eutektikus szilícium mennyiségében, méretében és morfológiájában, valamint a szekunder dendritág távolságában **minimális volt az eltérés** [156], így a mechanikai tulajdonságok változását a pórusszerkezet okozta.

A kétváltozós elemzések eredményeként a szakítószilárdság a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területével ($A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$) ($r^2 = 0,43$) és a töretfelületi porozitással ($r^2 = 0,40$) mérsékelt összefüggést mutatott. A két pórusjellemző szerepét a nemlineáris regressziós modellezés megerősítette (22. ábra). Más szerzők azt találták, hogy a teljes térfogati porozitással (0,2-1,0% és 0,4-1,2% között [104, 161], illetve a töretfelületi porozitással [72, 104, 105] lineáris összefüggés áll fenn (13. táblázat).

A folyáshatár esetében nem volt tapasztalható összefüggés a különböző pórusjellemzőkkel: a kétváltozós elemzés alapján: a törési keresztmetszeten a pórusok elhelyezkedését leíró CSC paraméterrel $r^2 = 0,17$, valamint a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területével $r^2 = 0,10$ volt, míg a többváltozós regresszió elemzéssel a modellek hibája nagy volt (12. táblázat). Az eredményeimhez hasonlóan Lee és munkatársai is azt a következtetést vonták le (4. táblázat), hogy sem a sűrűségből meghatározott térfogati porozitással (ahogyan azt a [161]-es publikációban is megállapítják), sem a töretfelületi porozitással nem áll kapcsolatban a folyáshatár [103–105].

4.3 A pórusok jellemzőinek és a törés helyének összefüggése

Az elvégzett vizsgálatokkal megállapítást nyert, hogy minél nagyobbak a töretfelületi porozitást befolyásoló pórusjellemzők ($A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$, V_V^{f-sm} , és az A_A^{f-cs}) (27. és 28. ábra), annál inkább érinti a kialakuló repedés ezek a pórusokat tartalmazó térfogatokat, melyek így kritikus zónáknak tekintendők. A témával foglalkozó szakirodalomban CT felvételek alapján megállapították, hogy a **tönkremenetel helyét** egyrészt a teljes térfogat legnagyobb helyi porozitása ($V_{V, max}^{sm}$, ami azonos/közel azonos a törési zóna porozitásával: V_V^{f-sm}) [9], másrészt

a legnagyobb térfogatú pórusa ($V_{\max}$) [5] alapján **meg lehet becsülni**. A szakirodalmi megfigyelések igazolására meghatároztam, hogy az alakváltozási térfogat (*total*) 15 szegmense közül, illetve 102 keresztmetszete közül nagyságrendi sorba rendezés után a törési szegmensben, illetve a törési keresztmetszeten mért egyes pórusjellemzők értékei **hány alkalommal** voltak az **első, a második, illetve a harmadik legnagyobbak** a 15 szegmens (14. táblázat (a)), a teljes alakváltozó térfogatban az egyedi pórusok (b), illetve a 102 keresztmetszet (c) közül. Ebből arra következtettem, hogy **mekkora a jellemzők repedésképző szerepe**. Az eredményeket százalékos formában közlöm a 14. táblázatban.

14. táblázat: A pórusjellemzők nagyságrendi sorában az *első, második, illetve harmadik* legnagyobb értékű jellemzőnél bekövetkezett tönkremenetel aránya a kijelölt törési szegmensben és törési keresztmetszeten, ahol a 100%-ot a 24 (-) szakító próbatest jelenti ([12] nyomán).

(a) Pórusjellemzők		$V_V^{f-sm} (\%)$	$S_V^{f-sm} (mm^{-1})$	%
A 15 szegmens három legnagyobb értéke:	első	37,5	33,3	
	második	25,0	29,2	
	harmadik	0,0	0,0	
	Összesen	62,5	62,5	

(b) Pórusjellemzők	$V_{\max}^{f-sm} (mm^3)$	$Spher_{V_{\max}}^{f-sm} (-)$	$A_{Proj, V_{\max}}^{f-sm} (mm^2)$	%
A teljes alakváltozó térfogatban a három legnagyobb érték:	első	41,7	37,5	
	második	16,7	29,2	
	harmadik	16,7	4,2	
	Összesen	75,1	70,9	

(c) Pórusjellemzők	$A_A^{f-cs} (\%)$	$L_A^{f-cs} (mm^{-1})$	$A_{\max}^{f-cs} (mm^2)$	$Circ_{A_{\max}}^{f-cs} (-)$	%
A 102 keresztmetszet három legnagyobb értéke:	első	29,2	29,2	37,5	
	második	4,2	8,3	16,7	
	harmadik	16,7	8,3	0,0	
	Összesen	50,1	45,8	54,2	

A törési szegmensben meghatározott legnagyobb térfogatú pórus vetített területe ($A_{Proj, V_{\max}^{f-sm}}$) az esetek 58,3%-ban megegyezett a teljes térfogaton belüli legnagyobb – az alakváltozás irányára merőleges síkban – vetített területtel ($A_{Proj, \max}^{total}$). A pórusok vetített területének szerepét a [72] szakirodalom is alátámasztja, miszerint a töretfelületi porozitás a pórusok vetített területe alapján becsülhető. Emellett megállapítottam azt is, hogy 71%-ban (17 esetben) a teljes alakváltozó térfogatban a legnagyobb térfogatú pórusoknak ($V_{\max}^{total}$) volt a legnagyobb a vetített területe ($A_{Proj, \max}^{total}$) is. A fennmaradó 7 esetben eltéréseket tapasztaltam, aminek az oka a próbatest tengelyirányában nyújtott pórusmorfológia lehetett.

A legnagyobb térfogatú pórus mentén 41,7%-ban következett be a tönkremenetel. A meghatározott arányok a szakirodalmi adatokhoz [5, 9] képest kisebbek, aminek oka az eltérő pórusszerkezet, ugyanis az általam vizsgált próbatestekben a pórusok mennyisége kevesebb,

méretük kisebb, míg eloszlásuk véletlenszerű volt (13. táblázat). A legnagyobb detektált pórus a teljes alakváltozó térfogaton belül ($V_{\max}^{\text{total}}$) $0,19 \text{ mm}^3$, átlagosan pedig $0,07 \text{ mm}^3$ ($\pm 0,05 \text{ mm}^3$ szórással) volt, a legnagyobb teljes térfogati porozitás (V_v^{total}) pedig $0,10\%$ (átlagosan $0,04\%$, $\pm 0,02\%$ szórással), míg a szakirodalomban vizsgált próbatestekben akár $0,4 \text{ mm}^3$ -es [9], illetve $1,84 \text{ mm}^3$ -es [5] pórus is található volt. Liu és munkatársai megállapítása szerint a legnagyobb pórus környezetében következett be a tönkremenetel [5]. A teljes térfogatban nem határozták meg a porozitást, de a törési zónában a legnagyobb térfogatú pórus a szegmens ($D = 7,94 \text{ mm}$, $H = 1 \text{ mm}$) $4,2\%$ -át tette ki. Ezzel szemben a kutatómunkám során azt találtam, hogy a maximális porozitás a törési szegmensben ($V_v^{\text{f-sm}}$) $0,50\%$ volt, ahol a szegmens térfogata $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2,5 \text{ mm}$ volt. A Zhang és munkatársai [9] által vizsgált próbatestekben $0,19 \text{ mm}^3$ -nél nagyobb térfogatú pórusok is előfordultak, a teljes térfogatban ők sem határozták meg a porozitást, ám a törési szegmens térfogati porozitása maximálisan $2,88\%$ volt, ahol a szegmensek mérete $6 \text{ mm} \times 2,4 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ volt. Amennyiben nem a legnagyobb térfogati porozitást tartalmazó szegmensben ment végbe a törés, a szerzők arra a megállapításra jutottak, hogy a pórusok elhelyezkedésével volt összefüggésbe hozható a tönkremenetel. Hasonlóképpen a [37] szakirodalomban ismertetett észrevételek alapján sem feltétlenül a legnagyobb helyi porozitású szegmensben következett be a tönkremenetel, hanem a zsugorodásos pórusok voltak a repedés keletkezésének a fő forrásai. A 14. táblázatban látható módon a szakító próbatestek 75% -a a három legnagyobb térfogatú pórus ($V_{\max}$) egyikén, illetve szintén 75% -a a három legnagyobb vetített területű pórus ($A_{\text{Proj, max}}$) egyikén keresztül tört el. Fontos kiemelni, hogy a 24 eset közül *egy esetben* fordult elő, hogy a pórusjellemzők legnagyobb értékű törési szegmense mellett, a törésvonallal érintett szegmensben volt a második legnagyobb érték, illetve *még egy esetben*, amikor a harmadik legnagyobb érték.

Ezt a két jellemzőt ($A_{\text{Proj, max}}$ és $V_{\max}$) figyelembe véve a 24 próbatestből hatnál egyik sem szerepelt az első három legnagyobb érték között, melyekből két ($2/6$) esetben voltak a próbatestek szélén pórusok. További három ($3/6$) próbatestben a pórusok mennyisége és mérete kicsi, eloszlásuk pedig egyenletes volt. Fontos említést tenni arról, hogy e-három darab közül kettőben a kiemelkedően nagyobb térfogatú pórusok a jeltáv pontján helyezkedtek el, csoportosulva egymás mellett. Ez magyarázza, hogy miért nem a pórusokkal leginkább érintett térfogat közelében következett be a tönkremenetel. Az eredményekből arra következtettek, hogy a vizsgált pórusjellemzőknek együttesen van hatása a törés helyének kialakulására, de emellett egyértelműen kijelenthető a legnagyobb térfogatú és a legnagyobb, az alakváltozás irányára merőlegesen vetített területű pórusok jelentősebb repedésképző szerepe. Ugyanakkor mérvadó a pórusok elhelyezkedése is a próbatest felületéhez képest.

4.4 Összegzés

A kutatás célja a szakítóvizsgálattal meghatározható **mechanikai tulajdonságokat befolyásoló pórusjellemzők azonosítása** volt, valamint annak meghatározása, **mely jellemzők vizsgálata indokolt** az öntészeti ipari minőségellenőrzés során. A kutatómunka keretében összesen 48 darab – ipari körülmények között alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356 öntvényekből kimunkált és az ottani minőségellenőrzésre szolgáló – szakító próbatest közül a **legalább 0,02% térfogati porozitást (V_V^{total}) tartalmazó (24 db) próbatestek** pórusszerkezete és mechanikai tulajdonságai közötti kapcsolatot vizsgáltam. Ezt a szakirodalomban alkalmazott kétváltozós elemzéssel, valamint ezen a területen újnak minősülő gépi tanulóssal végzett többváltozós regressziós modellezéssel végeztem el. Az eljárás lehetővé tette **több pórusjellemző együttes hatásának feltárását** a mechanikai tulajdonságokra nézve. Emellett tanulmányoztam, hogy a pórusjellemzők milyen hatással vannak a szakító próbatestek tönkremenetelére, a kialakuló repedésekre. A pórusjellemzőket a teljes alakváltozó térfogatban és a 15 szegmensben (9. táblázat), a töretfelületen ($A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$), illetve a 102 db keresztmetszeten (10. táblázat) határoztam meg a 24 próbatestre vonatkozóan. A vizsgálatok eredményeit [12] az alábbiakban foglalom össze:

- i. A gépi tanulóssal végzett többváltozós regressziós modellezés – fontossági vizsgálattal elvégezve – alkalmas a kétváltozós elemzéssel meghatározott összefüggések pontosítására. A módszerrel egyértelműen kimutatható a pórusjellemzők (független változók) szerepe.
- ii. A folyáshatár és a porozitás között nincs közvetlen kapcsolat ($r^2 = 0,17$), mely állítás összhangban van a szakirodalmi adatokkal, míg a szakítószilárdságra vonatkozó megállapítások részben egyeznek a szakirodalmi megállapításokkal. Ugyanis nemcsak a töretfelületi porozitás ($A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$), hanem a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területe ($A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}}$) is hatással van a szakítószilárdságra.
- iii. A szakadáshoz tartozó alakváltozásra a pórusoknak a törési keresztmetszeten való elhelyezkedését jellemző – az irodalomban nem szereplő, általam bevezetett – CSC paraméter és a töretfelületi porozitás ($A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}}$) van számottevő hatással. Emellett az alakváltozó térfogat teljes porozitásának (V_V^{total}), a törés vonalával érintett keresztmetszeten található legnagyobb mértékű porozitásnak ($A_A^{f\text{-cs}}$), illetve a törési szegmensben lévő legnagyobb térfogatú pórus vetített területe ($A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}}$) is szerepet játszik a szakadási nyúlás változásában.
- iv. A töretfelületi porozitást az irodalomban nem vizsgálták. Megállapításaim alapján a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területe ($A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}}$), a törés vonalával érintett keresztmetszetek közül a legnagyobb pórus-területarány ($A_A^{f\text{-cs}}$) és a törési szegmensben lévő pórusok térfogataránya ($V_V^{f\text{-sm}}$) befolyásolja azt.
- v. A szakítóvizsgálat során a teljes alakváltozó térfogat első három legnagyobb térfogatú pórusának és legnagyobb (az alakváltozás irányára merőleges síkban mérhető) vetített területű pórusának van leginkább repedésképző hatása összességében a próbatestek 75-75%-ában (a két halmaz nem teljesen fedi át egymást). E-két jellemző három legnagyobb értékének egyikénél következett be a tönkremenetel. Ilyen jellegű megállapítás nem

található a szakirodalomban, ezért ennek kiemelkedő szerepe van az öntészeti ipar minőségellenőrzési módszertanának kialakítása szempontjából.

- vi. Az irodalomban kevésbé hangsúlyos, hogy a mechanikai tulajdonságok, illetve a repedés keletkezése és a pórusszerkezet között meghatározott összefüggések érvényességi tartományát a vizsgált próbatestekben előforduló pórusok mennyiségi intervalluma és eloszlása határozza meg (13. táblázat). Az általam vizsgált alacsony nyomású technológiával az iparban előállított öntvényekből kimunkált próbatestekben a pórusok eloszlása véletlenszerű volt, illetve a 24 próbatestre nézve az alakváltozó térfogatban a legnagyobb térfogatú pórus $0,01-0,19 \text{ mm}^3$, míg a térfogati porozitás $0,02-0,10\%$ volt. Így a megállapítások az ipari technológiára és az alkalmazott minőségellenőrzésre érvényesek a vizsgált pórusjellemzők értelmezési tartományán belül.

5 Összefoglalás

A kutatómunka során különböző pórusszerkezetű, csökkentett nyomáson dermedő (RPT) próbatestek vizsgálatával meghatároztam, hogy a 3D CT, 2D CT és OM szerkezetvizsgálati módszerek milyen pontossággal és milyen pórusszerkezetek vizsgálatára alkalmazhatóak. Összehasonlítottam a segítségükkel megállapított porozitás értékeket, valamint vizsgáltam a morfológiai képátalakítás (zárás) és a vizsgált régió méretcsökkentésének hatását is.

Ennek során azt tapasztaltam, hogy ugyan az **optikai mikroszkópos felvételek** elemzésével a kiváló felbontás miatt a kis pórusok és a vékonyabb póruscsatornák megbízhatóan mérhetők, ám inhomogén eloszlású pórusok körülményesen, míg térbeli szerkezetük nehezen vizsgálhatóak. Utóbbiakat a **3D CT módszerrel** célszerű értékelni annak ellenére, hogy a térbeli felvétel felbontása kevésbé részletes, mint a mikroszkópos felvételeké. A **2D CT módszer** előnye, hogy nagyszámú metszeti adatok gyűjtésével a póruseloszlás elemzés időigénye jelentősen kisebb, mint mikroszkópos felvételek elemzésével, a sorozatmetszetek készítése nagymértékben egyszerűbb. A 3D-s elemzések során felismertem, hogy az alkalmazott morfológiai transzformáció alkalmas a pórusszerkezetek jellemzésére, míg a vizsgált térfogat méretének változtatásával a porozitás eloszlása jellemezhető.

A tapasztaltak alapján a **számítógépi tomográfias szerkezetvizsgálati módszer bizonyult** a legmegfelelőbb eljárásnak az A356 ötvözetű LPDC öntvények pórusszerkezetének vizsgálatára, aminek a mechanikai tulajdonságokkal való kapcsolatát vizsgáltam kétváltozós elemzésekkel, valamint **gépi tanulás segítette regressziós modellezéssel**. Ennek újszerűsége mellett a szakirodalomban széleskörűen vizsgált térbeli és a töretfelületi pórusjellemzőkön túl a keresztmetszeten mérhető jellemzőket és elhelyezkedésüket (CSC) is vizsgáltam. A kutatási eredmények alapján megállapítottam, hogy a fontossági vizsgálattal együtt a gépi tanulással végzett többváltozós regressziós modellezés alkalmas a kétváltozós elemzéssel meghatározott összefüggések pontosítására.

A szakirodalmi megállapításokkal összhangban azt a következtetést vontam le, hogy **folyáshatár** és a porozitás között nincs közvetlen kapcsolat, viszont a **szakítószilárdságra** vonatkozó megállapítások csak részben egyeznek azokkal. Nemcsak a töretfelületi porozitás, hanem a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területe is hatással van a szakítószilárdságra.

A szakadáshoz tartozó **alakváltozás** esetén arra jutottam, hogy a pórusok keresztmetszeti elhelyezkedése és a **töretfelületi porozitás** van rá számottevő hatással. Utóbbi a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának vetített területe, a törés vonalát érintő keresztmetszetek maximális pórus-területaránya és a törési szegmens térfogati porozitása befolyásolja.

Emellett megállapítottam azt is, hogy a legnagyobb térfogatú pórusoknak és az alakváltozás irányára merőleges síkban mérhető legnagyobb vetített területű pórusoknak van leginkább **repedésképző** hatásuk a szakítóvizsgálatok során.

6 Új tudományos eredmények

A disszertációban bemutatott kutatómunka eredményei és következtetései alapján az alábbi új tudományos téziseket fogalmaztam meg:

1. Tézis

Az ipari gyakorlatban az alumínium olvadékok oldott hidrogéntartalmának meghatározására szolgáló, AlSi7MgCu0,5 ötvözetből, különböző oldott hidrogén tartalmú olvadékból (így eltérő mennyiségű porozitást tartalmazó) öntött csökkentett nyomáson (80 mbar) dermedő próbák (RPT) pórusszerkezetének vizsgálatával az irodalomban eddig nem szereplő összehasonlító módszert fejlesztettem ki. Ennek lényege, hogy a különböző vizsgálati eljárásokkal (3D CT, 2D CT és OM) szisztematikusan mérhető a porozitás térfogataránya és területaránya, illetve a 3D-s pórusszerkezet (morfológiai jellemzői és eloszlása). Ezeket összehasonlítva megállapítható a módszerek alkalmazhatóságának feltételei:

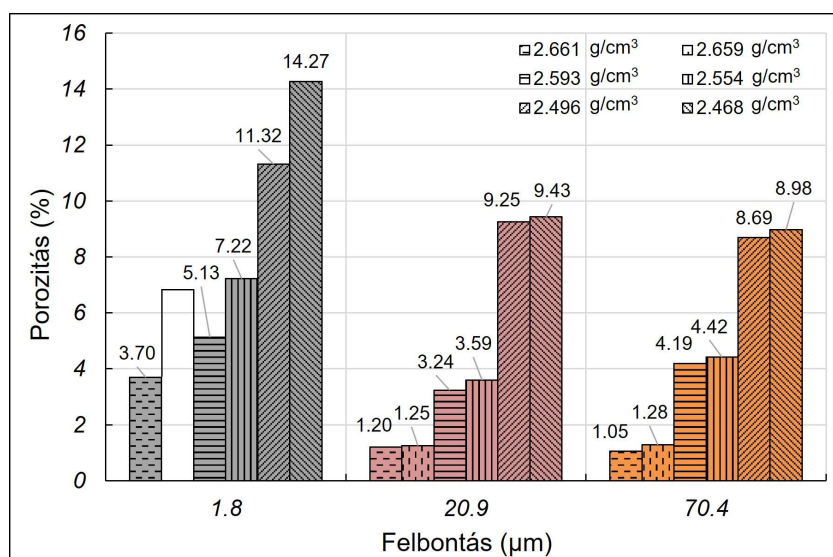
a) Az **optikai mikroszkópos (OM) felvételek** elemzésével a kiváló felbontás (**1,8 μm**) miatt a **kisebb** pórusok és vékonyabb póruscsatornák ($D^{\text{minimum}}: 70,4 - 2 \times 70,4 \mu\text{m}$) **megbízhatóan** mérhetők, ám **inhomogén** eloszlás esetén csak **időigényes** metszetsorozatok készítésével és nagy mennyiségű képfeldolgozással vizsgálható a pórusszerkezet (T1.a. táblázat és T1.a. ábra). A módszer további hátránya, hogy a pórusok **térbeli** méretei, morfológiája és pontos eloszlása **nehezen vizsgálható**.

A pórusok térbeli méreteit, morfológiáját és pontos eloszlását (így az inhomogén póruseloszlást is) legjobban a **3D CT módszerrel** lehet értékelni, azonban kevésbé részletes felbontással (**20,9 μm**). Amennyiben a **próbatest felületére nyitott pórusok** vannak jelen, a 3D CT eljárás pontossága a **nyitottság mértékétől**, azaz a próbatest felületére kifutó póruscsatorna minimális átmérőjétől ($D_{\text{csatorna}}^{\text{minimum}} (\mu\text{m})$) **függ**. Ekkor alternatív megoldásra van szükség: a vizsgált régió méretének csökkentésére vagy morfológiai transzformációra ($D_{\text{csatorna}}^{\text{minimum}} = 2 \text{ voxel} \times \text{zárási ciklusszám} (-)$), amelyek értékelésekor figyelembe kell venni, hogy a kapott eredményeket az átalakítás módosítja.

A **2D CT módszerrel** az exportált felvételek felbontásának megfelelően (**70,4 μm**), a vastagabb póruscsatornák és nagyobb különálló pórusok ($D^{\text{minimum}} > 2 \times 70,4 \mu\text{m}$) két dimenzióban vizsgálhatóak, míg a tőlük vékonyabbak és kisebbek ($D^{\text{minimum}}: 70,4 - 2 \times 70,4 \mu\text{m}$) kevésbé. A pórusok eloszlásának elemzése **kevésbé időigényes**, mint az optikai mikroszkópos felvételek elemzésével, ugyanis a sorozatmetszetek készítése **egyszerűsödik**. Ez az eljárás **hatékonyabban alkalmazható** kétdimenziós adatok kinyerésére, mint az OM módszer.

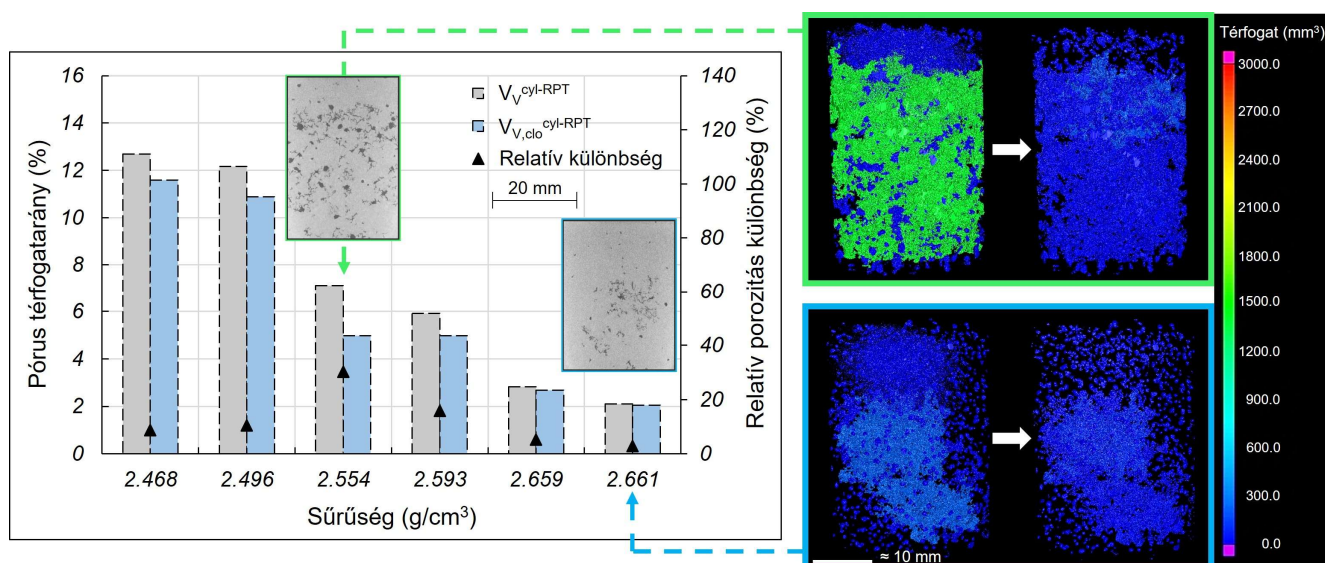
T1.a. táblázat: A különböző típusú pórusszerkezetek vizsgálati lehetőségeinek értékelése az egyes módszerek adottságai (aktuális felbontása, térbelisége), valamint a pórusok szerkezete (póruscsatorna mérete, pórusok eloszlása és a csatornák nyitottsága) alapján.

Pórusszerkezet	3D CT módszer 20,9 μm felbontás esetén	2D CT módszer 70,4 μm felbontás esetén	OM módszer 1,8 μm felbontás esetén
Vékony póruscsatornás pórusok ($D_{\text{csatorna}}^{\text{minimum}}: 70,4 - 2 \times 70,4 \mu\text{m}$)	Mérhető	Kevésbé mérhető	Megbízhatóan mérhető
Vastag póruscsatornás pórusok ($D_{\text{csatorna}}^{\text{minimum}} > 2 \times 70,4 \mu\text{m}$)	Megbízhatóan mérhető	Mérhető	Megbízhatóan mérhető
Kicsi, különálló pórusok ($D_{\text{pórus}}^{\text{minimum}}: 70,4 \mu\text{m} - 2 \times 70,4 \mu\text{m}$)	Mérhető	Kevésbé mérhető	Megbízhatóan mérhető
Nagy, különálló pórusok ($D_{\text{pórus}}^{\text{minimum}} > 2 \times 70,4 \mu\text{m}$)	Megbízhatóan mérhető	Mérhető	Megbízhatóan mérhető
Inhomogén póruseloszlás	A módszer térbelisége miatt megbízhatóan mérhető	Sorozatmetszetekkel mérhető	A csiszolatkészítés miatt kevésbé mérhető
Nyitott pórusszerkezet (térfogatmódosítás nélkül)	A próbatest felületére kifutó póruscsatorna minimális átmérőjétől függően mérhető	Nincs hatása, ezért megbízhatóan mérhető	Nincs hatása, ezért megbízhatóan mérhető



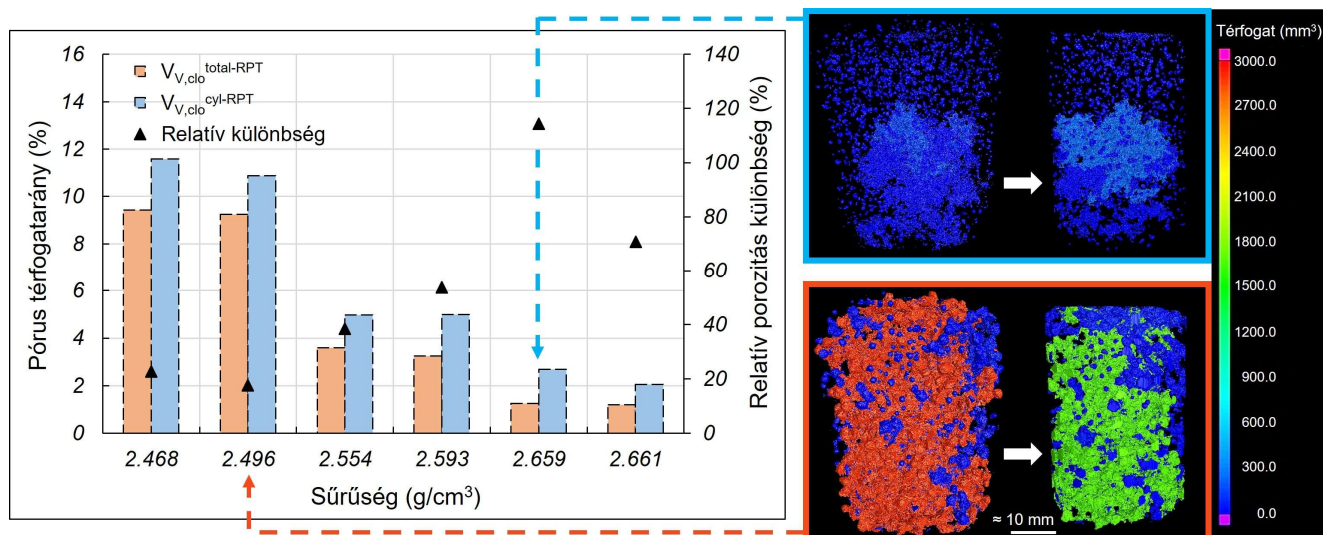
T1.a. ábra: A különböző sűrűségű csökkentett nyomáson dermedő (RPT) próbatestekben található pórusok térfogat-, illetve területaránya a vizsgálati módszerek felbontásának függvényében: 1,8 μm – OM; 20,9 μm – 3D CT ($V_{\text{clo}}^{\text{total-RPT}}$ (mm^3) térfogaton mérve); 70,4 μm – 2D CT módszer.

b) Póruscsatornákat tartalmazó minták 3D-s CT felvételén elvégzett, n számú (-) mintában a legkisebb csatornavastagságok (azaz a legkisebb minimális átmérők ($D_{csatorna}^{minimum} (\mu m)$) közül a legnagyobb vastagságának megfelelő ciklusú (vastagság $(\mu m) = 2 \text{ voxel} \times \text{zárási ciklusszám} (-)$) **morfológiai transzformáció hatására** bekövetkező **pórusmennyiség változás** alkalmas a pórusszerkezetek **összetettségének** (csatornák vastagságának) **jellemzésére: minél összetettebb**, azaz minél nagyobb térfogatú tagolt pórusrészek egyre több, illetve keskenyebb összekötő csatornákon keresztül kapcsolódnak össze, **annál jelentősebb a pórustérfogat csökkenése**. Ezt csökkentett nyomáson dermedő próbák (RPT) vizsgálati eredményei igazolták (T1.b. ábra). Ugyanis 5 ciklusú morfológiai transzformáció hatására bekövetkező relatív porozitás változásban ($\Delta_{rel} V_{V, clo-eff}^{RPT} (\%)$) számottevő eltérés volt tapasztalható: az összetettebb pórusokat tartalmazó próbatestben ($2,554 \text{ g/cm}^3$) a porozitás csökkenés jelentősebb volt ($\Delta_{rel} V_{V, clo-eff}^{RPT} = 30,20\%$), mint a kevésbé összetett pórusokat tartalmazó próbatest ($2,661 \text{ g/cm}^3$) esetén ($\Delta_{rel} V_{V, clo-eff}^{RPT} = 2,81\%$).



T1.b. ábra: A mért pórus térfogatarány ($V_V (\%)$) és a morfológiai transzformáció (zárás) hatására bekövetkező relatív porozitás különbség ($\Delta_{rel} V_{V, clo-eff}^{RPT} (\%)$).

c) A 3D CT módszerrel **vizsgált térfogat méretének változtatásával** jellemezhető a **pórusok eloszlása: inhomogén** póruseloszlás esetén a vizsgált térfogat méretének változtatása **számottevő** mértékben befolyásolja az eredményt, míg **homogén** póruseloszlás esetén a vizsgált térfogat méretváltoztatásának lényegesen **kisebb** a hatása. Ezt csökkentett nyomáson dermedő próbák (RPT) vizsgálati eredményei igazolták (T1.c. ábra). Ugyanis a vizsgált teljes térfogat méretét 55-62%-ra csökkentve inhomogén póruseloszlás ($2,659 \text{ g/cm}^3$) esetén jelentősen ($\Delta_{rel} V_V^{vol-eff, RPT} = 114,4\%$), míg homogén póruseloszlás esetén kisebb mértékben ($\Delta_{rel} V_V^{vol-eff, RPT} = 17,62\%$) változott a relatív porozitás különbség. **Ezzel a módszerrel a próbatestekben található porozitás homogén/inhomogén jellege számszerűen jellemezhető.**



T1.c. ábra: A mért pórus térfogatarány (V_V (%)) és a vizsgált térfogat méretváltozásának hatására bekövetkező relatív porozitás különbség ($\Delta_{\text{rel}} V_V^{\text{vol-eff, RPT}}$ (%)).

2. Tézis

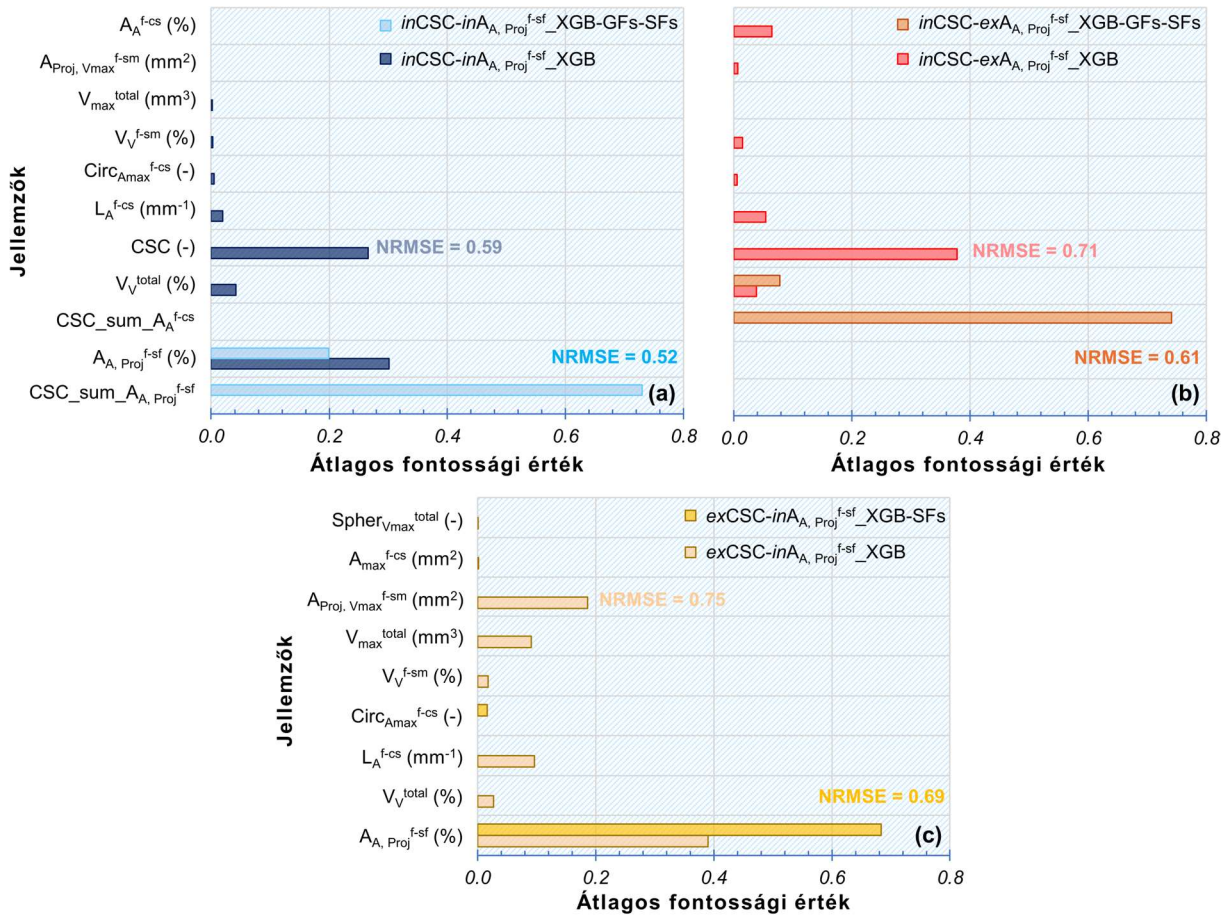
Ipari körülmények között **alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356** öntvényekből kimunkált szakító próbatestek segítségével a mechanikai tulajdonságok ($R_{p0,2}$ (MPa), R_m (MPa), ε (%)) és a 3D CT, illetve a 2D CT módszerrel jellemzett pórusszerkezet kapcsolatát többváltozós regressziós modellezéssel (XGBoost algoritmusokkal) vizsgálva **bevezettem** a szakirodalomban nem szereplő **CSC** (*Cross-Section Classification* (-)) paramétert. Ezzel a paraméterrel **a pórusok**, 2D CT módszerrel meghatározható, törési keresztmetszeten (f -cs) való **elhelyezkedése osztályozható**, ami alkalmas a felületről meginduló **repedés kockázatának jellemzésére**, valamint **a szakadási nyúlásra (ε (%)) jelentős hatást gyakorol**. A CSC paraméter definíciója az alábbi:

- CSC = 1, ha nincs pórus a törési keresztmetszeten,
- CSC = 2, ha a törési keresztmetszet belső részén fordul elő porozitás, ami a teherviselő keresztmetszetet csökkenti, ezért a repedés kialakulásának kockázatát növeli,
- CSC = 3, ha a törési keresztmetszet külső részén (amit a próbatest felületétől maximálisan 0,20 mm mély rétegvastagságban definiáltam, ami a próbatest vastagságának a 10%-a) fordul elő a pórusoknak bármely pontja, ami a terhelt keresztmetszetet csökkenti, valamint a repedés kialakulásának kockázatát tovább növeli a felületi és/vagy felülethez közeli elhelyezkedése miatt,
- CSC = 4, ha a törési keresztmetszet külső és belső részén is előfordulnak pórusok így ebben az esetben a repedés kialakulását fokozó hatások erősítik egymást.

3. Tézis

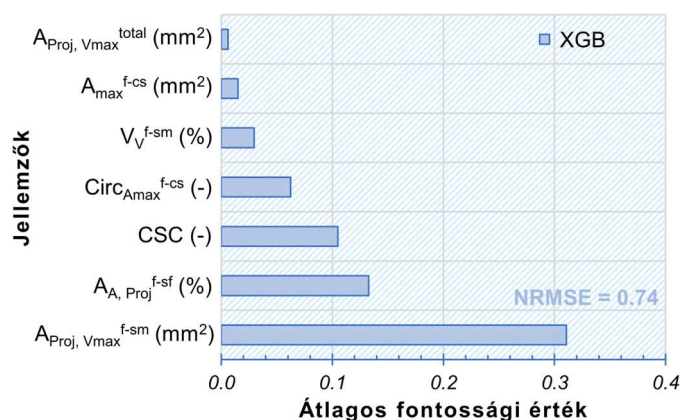
Ipari körülmények között alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356 öntvényekből kimunkált szakító próbatestek – 2D CT, illetve 3D CT módszerekkel jellemzett – pórusszerkezetének, töretfelületi porozitásának ($A_{A, Proj}^{f-sf}$ (%)), valamint mechanikai tulajdonságainak (R_m (MPa), ε (%)) kapcsolatát gépi tanulással támogatott, paraméter fontossági vizsgálattal (*Feature Importance*) végzett többváltozós nemlineáris regressziós modellezés segítségével (XGBoost algoritmusokkal) elemezve azonosíthatóak azok a pórusjellemzők, amelyek befolyásolják a mechanikai tulajdonságokat.

a) A **szakadási nyúlást** ($\varepsilon = 4,8\text{--}14,80\%$) a töretfelületi porozitás ($A_{A, Proj}^{f-sf} = 0,0\text{--}6,23\%$), valamint az általam bevezetett **CSC** paraméter ($CSC = 2, 3$ vagy 4 (-)) befolyásolja jelentősen. Emellett az alakváltozó térfogat teljes térfogati porozitása ($V_V^{total} = 0,02\text{--}0,10\%$), a törési keresztmetszet porozitása ($A_A^{f-cs} = 0,04\text{--}0,86\%$) és a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának az igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területe ($A_{Proj, Vmax}^{f-sm} = 0,04\text{--}0,85\text{ mm}^2$) is szerepet játszik a szakadási nyúlás változásában (T3.a. ábra).



T3.a. ábra: A többváltozós regressziós modellezéssel (nemlineáris alap XGBoost (XGB), illetve *Selected features* (SFs) és *Golden Features* (GFs) modellekkel) kapott eredmények a független változók szerepét mutatják. Az $A_{A, Proj}^{f-sf}$ (%), CSC (-), V_V^{total} (%), $A_{Proj, Vmax}^{f-sm}$ (mm²) és A_A^{f-cs} (%) jellemzők befolyásolják leginkább a szakadási nyúlást (ε (%)): (a) $inCSC-inA_{A, Proj}^{f-sf}$, (b) $inCSC-exA_{A, Proj}^{f-sf}$ és (c) $inCSC-inA_{A, Proj}^{f-sf}$ modell konstrukció.

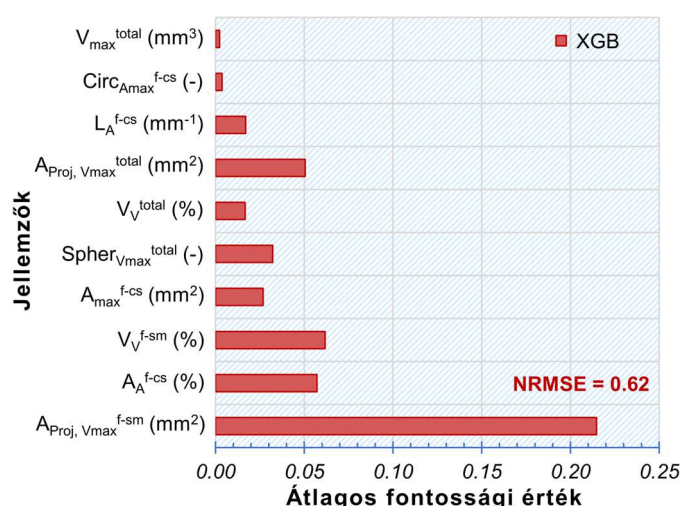
- b) A **szakítószilárdságra** ($R_m = 238\text{--}267\text{ MPa}$) a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának az igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területe ($A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}} = 0,04\text{--}0,85\text{ mm}^2$) jelentős hatással van, emellett a töretfelületi porozitásnak ($A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}} = 0,0\text{--}6,23\%$) kisebb a hatása (T3.b. ábra).



T3.b. ábra: A szakítószilárdság (R_m (MPa)) többváltozós regressziós modellezésével (nemlineáris alapmodellel: XGBoost (XGB)) kapott eredmények a független változók szerepét mutatják, ahol kiemelkedő az $A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}} (\text{mm}^2)$ és az $A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}} (\%)$ hatása.

4. Tézis

Ipari körülmények között alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356 öntvényekből kimunkált szakító próbatestek – 2D CT, illetve 3D CT módszerekkel jellemzett – pórusszerkezetének és a próbatestek **töretfelületi porozitásának** ($A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}} = 0,0\text{--}6,23\%$) kapcsolatát gépi tanulással támogatott, paraméter fontossági vizsgálattal (*Feature Importance*) végzett **többváltozós nemlineáris regressziós modellezés segítségével** (XGBoost algoritmusokkal) **elemezve** megállapítható, hogy: a töretfelületi porozitást a törési szegmens legnagyobb térfogatú pórusának az igénybevétel irányára merőleges síkban vetített területe ($A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}} = 0,04\text{--}0,85\text{ mm}^2$), valamint a törési szegmens porozitása ($V_V^{f\text{-sm}} = 0,01\text{--}0,50\%$), illetve a törési keresztmetszet porozitása ($A_A^{f\text{-cs}} = 0,04\text{--}0,86\%$) **befolyásolja** (T4. ábra).



T4. ábra: A szakító próbatestek töretfelületi porozitásának ($A_{A, \text{Proj}}^{f\text{-sf}} (\%)$) többváltozós regressziós modellezésével (nemlineáris alapmodellel: XGBoost (XGB)) kapott eredmények a független változók szerepét mutatják, ahol kiemelkedő az $A_{\text{Proj}, V_{\text{max}}}^{f\text{-sm}} (\text{mm}^2)$, az $A_A^{f\text{-cs}} (\%)$ és a $V_V^{f\text{-sm}} (\%)$ hatása.

5. Tézis

Alacsony nyomáson öntött (LPDC) A356 öntvények 2D CT, illetve 3D CT módszerekkel meghatározott pórusjellemzői közül **jelentős mértékben (összességében 75–75%-ban)** a teljes alakváltozó térfogat *első, második, illetve harmadik* legnagyobb térfogatú pórusainak ($V_{max} \text{ (mm}^3\text{)}$), valamint az *első, második, illetve harmadik*, az alakváltozás irányára merőleges síkban mérhető legnagyobb vetített területű pórusainak ($A_{Proj, max} \text{ (mm}^2\text{)}$) van **repedésképző szerepe** (T5. táblázat). Az így meghatározott két halmaz elemei részben azonosak.

T5. táblázat: A pórusjellemzők nagyságrendi sorában az *első, második, illetve harmadik* legnagyobb értékű jellemzőnél bekövetkezett tönkremenetel aránya a kijelölt törési szegmensben ($f\text{-sm}$) és törési keresztmetszetben ($f\text{-cs}$), ahol a 100%-ot a 24 (-) szakító próbatest jelenti.

(a) Pórusjellemzők		$V_V^{f\text{-sm}} \text{ (%)}$	$S_V^{f\text{-sm}} \text{ (mm}^{-1}\text{)}$	%
A 15 szegmens három legnagyobb értéke:	első	37,5	33,3	
	második	25,0	29,2	
	harmadik	0,0	0,0	
	Összesen	62,5	62,5	

(b) Pórusjellemzők		$V_{max}^{f\text{-sm}} \text{ (mm}^3\text{)}$	$Spher_{V_{max}}^{f\text{-sm}} \text{ (-)}$	$A_{Proj, V_{max}}^{f\text{-sm}} \text{ (mm}^2\text{)}$	%
A teljes alakváltozó térfogatban a három legnagyobb érték:	első	41,7	37,5	58,3	
	második	16,7	29,2	12,5	
	harmadik	16,7	4,2	4,2	
	Összesen	75,1	70,9	75,0	

(c) Pórusjellemzők		$A_A^{f\text{-cs}} \text{ (%)}$	$L_A^{f\text{-cs}} \text{ (mm}^{-1}\text{)}$	$A_{max}^{f\text{-cs}} \text{ (mm}^2\text{)}$	$Circ_{A_{max}}^{f\text{-cs}} \text{ (-)}$	%
A 102 keresztmetszet három legnagyobb értéke:	első	29,2	29,2	37,5	8,3	
	második	4,2	8,3	16,7	4,2	
	harmadik	16,7	8,3	0,0	8,3	
	Összesen	50,1	45,8	54,2	20,8	

7 Az eredmények hasznosulása

A disszertációban ismertetett szerkezetvizsgálati módszerek elősegítik az alumínium öntvényekben előforduló pórusok szerkezetének részletes és objektív leírását. Az eredmények felhasználásával az adott célra leginkább alkalmazható vizsgálati eljárás(ok) kiválasztható(k).

A bemutatott többváltozós adat-vezérelt modellezés paraméter fontossági vizsgálattal együtt alkalmas a kétváltozós elemzéssel meghatározott összefüggések pontosítására, amivel egyszerre több független változó együttes hatása is vizsgálható.

A kutatási eredmények részletes képet adnak a pórusszerkezet hatásáról a törési folyamatokra és a mechanikai tulajdonságokra nézve, különösen alacsony nyomású öntéstechnológiával előállított, A356 ötvözetű alumínium öntvények esetén.

A CT-s vizsgálatok elősegítik az öntészeti minőségellenőrzést, ugyanis a pórusok általam meghatározott szerkezeti jellemzői révén (CSC (-), V_V^{total} (%), V_V^{sm} (%), $A_{Proj, V_{max}^{sm}}$ (mm^2), $A_{A^{cs}}$ (%), illetve a V_{max} (mm^3) és $A_{Proj, max}$ (mm^2)) első három legnagyobb értéke a teljes térfogatban) – figyelembe véve a keresztmetszet vastagságát – meghatározhatóak a kritikus régiók. Ezáltal a kutatómunka hozzájárul az öntvények minősítési módszereinek fejlesztéséhez.

Summary

In this work, I determined by testing reduced pressure test specimens (RPT) with different pore structures, the applicability of 3D CT, 2D CT and OM structural investigation methods and which pore structures they can be used to test. I compared the porosity values obtained with their help and also investigated the effect of morphological image transformation (closing) and size reduction of the region of interest.

In the process, I found that while small pores and thinner pore channels can be measured well by **optical microscopy** due to the high resolution, inhomogeneously distributed pores and their spatial structure are difficult to measure and study. The latter should be evaluated by the **3D CT method** despite the fact that the resolution of the spatial image is less detailed than that of microscopic images. The **2D CT method** has the advantage that by collecting a large number of sectional images, the time required for pore distribution analysis is significantly less than for microscopic analysis, and the preparation of serial sections is much easier. During the 3D analyses, I recognized that the morphological transformation used is suitable for characterizing pore structures, while the porosity distribution can be described by varying the size of the volume under investigation (region of interest).

Based on the experiences, the **computed tomography structural analysis** method was found to be the most suitable method to investigate the pore structure of A356 alloy LPDC castings, the relationship of which with mechanical properties was investigated by bivariate analysis and **machine learning-assisted regression modeling**. In addition to this novelty, not just the spatial and fractured surface pore features (that have been extensively studied in the literature), but I have also investigated cross-sectional pore features and pore location (CSC). According to the results, I found that multiple regression modeling with Feature Importance testing is suitable for refining the relationships determined by bivariate analysis.

In line with the findings in the literature, I concluded that there is no direct relationship between **yield strength** (YS with 0.2% offset) and porosity, but that the findings on **ultimate tensile strength** (UTS) are just partially consistent with those. I found relationships between UTS and the projected area of the largest volume pore of the fracture segment and with the porosity of the fracture surface.

For the **total elongation at rupture**, I found that the cross-sectional location of the pores and the **porosity of the fracture surface** have a significant effect on it. The latter is influenced by the projected area of the largest volume pore of the fracture segment, the largest pore area ratio of the cross-sections of the fracture segment, and the volumetric porosity of the fracture segment.

I also established that pores with the largest volume and with the largest projected area of the largest pores of the fracture segments (measured in a plane perpendicular to the direction of deformation) have the **most crack-forming effect** in tensile tests.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani **Dr. Gácsi Zoltán** témavezetőmnek, akire az évek során mindig számíthattam, folyamatosan mentorált, szakmailag támogatott és hitt bennem.

Szintén hálával tartozom

- **Dr. Fegyverneki Györgynek** és **Molnár Zsoltnak**, hiszen a kutatás végrehajtásához szükséges próbatesteket ők biztosították számomra, illetve
- **Dr. Mikóné Mádi Laurának**, aki pedig a kutatás kezdeti fázisában biztosított számomra mintákat a 3D-s CT vizsgálatok elsajátításához;
- **Boda Sándornak**, **Márkus Zoltánnak** és **Márkus Zoltánnénak**, akik a metallográfiai csiszolatok elkészítésében voltak segítségemre;
- **Filep Ádámnak** és **Dr. Bubonyi Tamásnak**, akiktől elsajátíthattam a CT berendezés működtetését és a 3D-s elemzések módszereit;
- **Dr. Mikó Tamásnak** a mechanikai anyagvizsgálatok elvégzésében való segítségéért;
- **Dr. Koncz-Horváth Dánielnek** a PFIB-SEM vizsgálatok elvégzésében nyújtott segítségéért;
- **Dr. Garami Attilának** a regressziós modellezésekért, akitől elsajátíthattam a gépi tanulás alapjait is. Közös folyóiratcikkünk kapcsán pedig külön köszönöm konstruktív szerepét.

S nem utolsó sorban köszönök mindennemű segítséget és támogatást az Anyag- és Vegyészmérnöki Kar Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében jelenleg, illetve az elmúlt években dolgozó valamennyi kollégának, akik bármilyen formában hozzájárultak a kutatómunkához és a disszertáció sikeres elkészítéséhez.

A kutatómunkát az évek során elnyert Új Nemzeti Kiválóság Programok (ÚNKP), illetve a 2024. évi Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Pályázat (EKÖP) is támogatta.

Az eredményekhez kapcsolódó írásbeli publikációk jegyzéke

[F1] **Ágota Kazup**, György Fegyverneki, Zoltán Gácsi, Evaluation of the Applicability of Computer-Aided Porosity Testing Methods for Different Pore Structures, *Metallography, Microstructure, and Analysis* 11 (2022) 774–789. <https://doi.org/10.1007/s13632-022-00892-5>

Q2; Nyilvános idéző összesen: 8, Független: 5, Független: 3

[F2] **Kazup Ágota**, Koncz-Horváth Dániel, Gácsi Zoltán, Dendritközi porozitás töretfelületen történő kvantitatív vizsgálata, *Anyagvizsgálók Lapja* 2024/I. (2024) 10–14.

[F3] **Ágota Kazup**, Attila Garami, Zoltán Gácsi, Prediction of the tensile properties of A356 casted alloy based on the pore structure using machine learning, *Materials Science & Engineering A* 935 (2025) 148338. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2025.148338>
Q1 (SJIR Scopus - Condensed Matter Physics: D1)

Nyilatkozat a mesterséges intelligencia (MI) használatáról

A dolgozat elkészítése során a nyelvhelyességi és stilisztikai javításokon kívül a mesterséges intelligencia szolgáltatásait a következő fejezetekben a következő eredmények elérése céljából vettem igénybe:

A **4.2.1 Prediktív regressziós modellek** c. fejezetben a gépi tanuló algoritmusok segítette prediktív adat-vezérelt regressziós modellezés a Python ML (Machine Learning) szoftver segítségével történt. A kapott adatokat saját magam dolgoztam fel és vontam le a tudományos következtetéseket. A modellezés működésének elvét a megfelelő szakirodalmi hivatkozásokkal együtt részletesen leírtam a disszertációban.

Irodalomjegyzék

- [1] F. Bonollo, J. Urban, B. Bonatto, M. Botter, Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: a technical and economical benchmark (2005) Accessed: Oct. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.fracturae.com/index.php/aim/article/view/610>
- [2] M. Merlin, G. Timelli, F. Bonollo, G.L. Garagnani, Impact behaviour of A356 alloy for low-pressure die casting automotive wheels, *J. Mater. Process. Technol.* 209(2) (2009) 1060–1073. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.027.
- [3] X. Teng, H. Mae, Y. Bai, T. Wierzbicki, Pore size and fracture ductility of aluminum low pressure die casting, *Eng. Fract. Mech.* 76 (8) (2009) 983–996. doi: 10.1016/j.engfracmech.2009.01.001.
- [4] S. Fintová, G. Anzelotti, R. Konečná, G. Nicoletto, Casting Pore Characterization by X-Ray Computed Tomography and Metallography, *Archive of Mechanical Eng.* 57(3) (2010) 263–273. doi: 10.2478/v10180-010-0014-y.
- [5] R. Liu *et al.*, Influence of pore characteristics and eutectic particles on the tensile properties of Al–Si–Mn–Mg high pressure die casting alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 783 (2020) 139280. doi: 10.1016/j.msea.2020.139280.
- [6] B.-C. Yang *et al.*, Effects of microstructure coarsening and casting pores on the tensile and fatigue properties of cast A356-T6 aluminum alloy: A comparative investigation, *Mater. Sci. Eng. A* 857 (2022) 144106. doi: 10.1016/j.msea.2022.144106.
- [7] S. Streck *et al.*, Influence of pores on the lifetime of die cast aluminium alloys studied by fracture mechanics and X-ray computed tomography, *Eng. Fract. Mech.* 284 (2023) 109243. doi: 10.1016/j.engfracmech.2023.109243.
- [8] Á. Kazup, G. Fegyverneki, Z. Gácsi, Evaluation of the Applicability of Computer-Aided Porosity Testing Methods for Different Pore Structures, *Metallogr. Microstruct. Anal.* 11 (2022) 774–789. doi: 10.1007/s13632-022-00892-5.
- [9] Y. Zhang *et al.*, Porosity quantification for ductility prediction in high pressure die casting AM60 alloy using 3D X-ray tomography, *Mater. Sci. Eng. A* 772 (2020) 138781. doi: 10.1016/j.msea.2019.138781.
- [10] Z. Li *et al.*, Characterization on the formation of porosity and tensile properties prediction in die casting Mg alloys, *J. Magnes. Alloys* 10(7) (2022) 1857–1867. doi: 10.1016/j.jma.2020.12.006.
- [11] G. Dong *et al.*, Process optimization of A356 aluminum alloy wheel hub fabricated by low-pressure die casting with simulation and experimental coupling methods, *J. Mater. Res. Technol.* 24 (2023) 3118–3132. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.03.214.
- [12] Á. Kazup, A. Garami, Z. Gácsi, Prediction of the tensile properties of A356 casted alloy based on the pore structure using machine learning, *Mater. Sci. Eng. A* 935 (2025) 148338. doi: 10.1016/j.msea.2025.148338.
- [13] T. Fushiki, Estimation of prediction error by using K-fold cross-validation, *Stat. Comput.* 21(2) (2011) 137–146. doi: 10.1007/s11222-009-9153-8.
- [14] A. Kaveh, A. Dadras Eslamlou, S.M. Javadi, N. Geran Malek, Machine learning regression approaches for predicting the ultimate buckling load of variable-stiffness composite cylinders, *Acta Mech.* 232(3) (2021) 921–931. doi: 10.1007/s00707-020-02878-2.
- [15] A. Kopper, R. Karkare, R.C. Paffenroth, D. Apelian, Model Selection and Evaluation for Machine Learning: Deep Learning in Materials Processing, *Integr. Mater. Manuf. Innov.* 9(3) (2020) 287–300. doi: 10.1007/s40192-020-00185-1.
- [16] D. Cemernek *et al.*, Machine learning in continuous casting of steel: a state-of-the-art survey, *J. Intell. Manuf.* 33(6) (2022) 1561–1579. doi: 10.1007/s10845-021-01754-7.

- [17] B. Aksoy, M. Koru, Estimation of Casting Mold Interfacial Heat Transfer Coefficient in Pressure Die Casting Process by Artificial Intelligence Methods, *Arab. J. Sci. Eng.* 45(11) (2020) 8969–8980. doi: 10.1007/s13369-020-04648-7.
- [18] R. Rajput, A. Raut, S. Gangi Setti, Prediction of mechanical properties of aluminium metal matrix hybrid composites synthesized using Stir casting process by Machine learning, *Mater. Today Proc.* 59 (2022) 1735–1742. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.316.
- [19] S. Chen, T. Kaufmann, Development of Data-Driven Machine Learning Models for the Prediction of Casting Surface Defects, *Metals (Basel)* 12(1) (2021) 1. doi: 10.3390/met12010001.
- [20] M.-J. Kim *et al.*, Prediction of the Temperature of Liquid Aluminum and the Dissolved Hydrogen Content in Liquid Aluminum with a Machine Learning Approach, *Metals (Basel)* 10(3) (2020) 330. doi: 10.3390/met10030330.
- [21] A. Jakab-Nácsa *et al.*, Towards Machine Learning in Heterogeneous Catalysis—A Case Study of 2,4-Dinitrotoluene Hydrogenation, *Int. J. Mol. Sci.* 24(14) (2023) 11461. doi: 10.3390/ijms241411461.
- [22] P. Jónás, *Könnnyűfém öntészeti ötvözetek*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
- [23] G. Gyarmati, G. Fegyverneki, T. Mende, M. Tokár, Characterization of the double oxide film content of liquid aluminum alloys by computed tomography, *Mater. Charact.* 157 (2019) 109925. doi: 10.1016/j.matchar.2019.109925.
- [24] M. Uludağ, R. Çetin, D. Dispınar, M. Tiryakioğlu, The effects of degassing, grain refinement & Sr-addition on melt quality-hot tear sensitivity relationships in cast A380 aluminum alloy, *Eng. Fail. Anal.* 90 (2018) 90–102. doi: 10.1016/j.engfailanal.2018.03.025.
- [25] B. Farhoodi, R. Raiszadeh, M.-H. Ghanaatian, Role of Double Oxide Film Defects in the Formation of Gas Porosity in Commercial Purity and Sr-containing Al Alloys, *J. Mater. Sci. Technol.* 30(2) (2014) 154–162. doi: 10.1016/j.jmst.2013.09.001.
- [26] J. Lazaro-Nebreda, J.B. Patel, Z. Fan, Improved degassing efficiency and mechanical properties of A356 aluminium alloy castings by high shear melt conditioning (HSMC) technology, *J. Mater. Process. Technol.* 294 (2021) 117146. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117146.
- [27] M. Tiryakioğlu, The Myth of Hydrogen Pores in Aluminum Castings, in: M. Tiryakioğlu, W. Griffiths, M. Jolly (Eds.), *Shape Casting, the Minerals, Metals & Materials Society* (2019) 143–150. doi: 10.1007/978-3-030-06034-3_14.
- [28] P. Yousefian, M. Tiryakioğlu, Pore Formation During Solidification of Aluminum: Reconciliation of Experimental Observations, Modeling Assumptions, and Classical Nucleation Theory, *Metallurgical Mater. Trans. A* 49(2) (2018) 563–575. doi: 10.1007/s11661-017-4438-6.
- [29] L. Zhao, Y. Pan, H. Liao, Q. Wang, Degassing of aluminum alloys during re-melting, *Mater. Lett.* 66(1) (2012) 328–331. doi: 10.1016/j.matlet.2011.09.012.
- [30] D. Dispınar *et al.*, Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356, *Mater. Sci. Eng. A* 527(16–17) (2021) 3719–3725. doi: 10.1016/j.msea.2010.01.088.
- [31] D. Dispınar, J. Campbell, Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings, *Mater. Sci. Eng. A* 528(10–11) (2011) 3860–3865. doi: 10.1016/j.msea.2011.01.084.
- [32] V. Shmelev, H. Yang, C. Yim, Hydrogen generation by reaction of molten aluminum with water steam, *Int. J. Hydrogen Energy* 41(33) (2016) 14562–14572. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.277.
- [33] S. Shukla, Study of Porosity Defect in Aluminum Die Castings and its Evaluation and Control for Automotive Applications, *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)* 7(7) (2020) 2122–2142.
- [34] E. Riedel *et al.*, Industrial suitable and digitally recordable application of ultrasound for the environmentally friendly degassing of aluminium melts before tilt casting, *Procedia CIRP* 98 (2021) 589–594. doi: 10.1016/j.procir.2021.01.159.

- [35] J.P. Anson, J.E. Gruzleski, The Quantitative Discrimination between Shrinkage and Gas Microporosity in Cast Aluminum Alloys Using Spatial Data Analysis, *Mater. Charact.* 43(5) (1999) 319–335. doi: 10.1016/S1044-5803(99)00059-5.
- [36] P.N. Mayer, A.E. Mayer, Effect of hydrogen- and oxygen-containing heterogeneities on the tensile strength of solid and molten aluminum, *Comput. Mater. Sci.* 196 (2021) 110563. doi: 10.1016/j.commatsci.2021.110563.
- [37] Z. Li *et al.*, Study of 3D Pores and Its Relationship with Crack Initiation Factors of Aluminum Alloy Die Castings, *Metallurgical Mater. Trans. B* 50(3) (2019) 1204–1212. doi: 10.1007/s11663-019-01550-y.
- [38] G. Gyarmati *et al.*, The Effect of Rotary Degassing Treatments with Different Purging Gases on the Double Oxide- and Nitride Film Content of Liquid Aluminum Alloys, *Metallurgical Mater. Trans. B* 53(2) (2022) 1244–1257. doi: 10.1007/s11663-021-02414-0.
- [39] J. Nampoothiri *et al.*, Porosity alleviation and mechanical property improvement of strontium modified A356 alloy by ultrasonic treatment, *Mater. Sci. Eng. A* 724 (2018) 586–593. doi: 10.1016/j.msea.2018.03.069.
- [40] M. Bubenkó, M. Tokár, G. Fegyverneki, Investigations to Reduce the Inclusion Content in Al-Si Foundry Alloys, *Mater. Sci. Eng.* 42(1) (2017) 13–20.
- [41] D. Dispinar, J. Campbell, Critical assessment of reduced pressure test. Part 2: Quantification, *Int. J. Cast Metals Res.* 17(5) (2004) 287–294. doi: 10.1179/136404604225020704.
- [42] C. Gu, Y. Lu, A.A. Luo, Three-dimensional visualization and quantification of microporosity in aluminum castings by X-ray micro-computed tomography, *J. Mater. Sci. Technol.* 65 (2021) 99–107. doi: 10.1016/j.jmst.2020.03.088.
- [43] C. Gu *et al.*, Predicting gas and shrinkage porosity in solidification microstructure: A coupled three-dimensional cellular automaton model, *J. Mater. Sci. Technol.* 49 (2020) 91–105. doi: 10.1016/j.jmst.2020.02.028.
- [44] H. Puga *et al.*, Low pressure sand casting of ultrasonically degassed AlSi7Mg0.3 alloy: Modelling and experimental validation of mould filling, *Mater. Des.* 94 (2016) 384–391. doi: 10.1016/j.matdes.2016.01.059.
- [45] G. Gyarmati, G. Fegyverneki, M. Tokár, T. Mende, The Effects of Rotary Degassing Treatments on the Melt Quality of an Al–Si Casting Alloy, *Int. J. Metalcasting* 15(1) (2021) 141–151. doi: 10.1007/s40962-020-00428-z.
- [46] M. De Giovanni, J.M. Warnett, M.A. Williams, P. Srirangam, 3D imaging and quantification of porosity and intermetallic particles in strontium modified Al-Si alloys, *J. Alloys Compd.* 727 (2017) 353–361. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.08.146.
- [47] Y. Zhao, Z. Wang, C. Zhang, W. Zhang, Synchrotron X-ray tomography investigation of 3D morphologies of intermetallic phases and pores and their effect on the mechanical properties of cast Al-Cu alloys, *J. Alloys Compd.* 777 (2019) 1054–1065. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.10.334.
- [48] X. Li, S.M. Xiong, Z. Guo, Correlation between Porosity and Fracture Mechanism in High Pressure Die Casting of AM60B Alloy, *J. Mater. Sci. Technol.* 32(1) (2016) 54–61. doi: 10.1016/j.jmst.2015.10.002.
- [49] M. Zhu *et al.*, Cellular Automaton Modeling of Microporosity Formation during Solidification of Aluminum Alloys, *ISIJ International* 54(2) (2014) 384–391. doi: 10.2355/isijinternational.54.384.
- [50] E. Aghion, N. Moscovitch, A. Arnon, The correlation between wall thickness and properties of HPDC Magnesium alloys, *Mater. Sci. Eng. A* 447(1–2) (2007) 341–346. doi: 10.1016/j.msea.2006.10.065.
- [51] J. Campbell, Entrainment Defects, *Mater. Sci. Technol.* 22(2) (2006) 127–145. doi: 10.1179/174328406X74248.

- [52] C. Gu, C.D. Ridgeway, A.A. Luo, Examination of Dendritic Growth During Solidification of Ternary Alloys via a Novel Quantitative 3D Cellular Automaton Model, *Metallurgical Mater. Trans. B* 50(1) (2019) 123–135. doi: 10.1007/s11663-018-1480-8.
- [53] C. Gu *et al.*, Predicting grain structure in high pressure die casting of aluminum alloys: A coupled cellular automaton and process model, *Comput. Mater. Sci.* 161 (2019) 64–75. doi: 10.1016/j.commatsci.2019.01.029.
- [54] A. Vergnano, H. Rezvanpour, M. Spessotto, F. Leali, Robustness Assessment in the Optimization of Low-Pressure Die Casting Subject to Variations in Secondary Alloy Composition, *Int. J. Metalcasting* (2024). doi: 10.1007/s40962-024-01504-4.
- [55] J. Campbell, Casting, in *Complete Casting Handbook*, Elsevier (2011) 939–1011. doi: 10.1016/B978-1-85617-809-9.10016-7.
- [56] R. Kusnowo *et al.*, Optimizing Low-Pressure Die Casting of A356 Aluminum Alloy Wheel Rims: A Novel Side Core With Integrated Cooling System, *J. Appl. Eng. Technological Sci. (JAETS)* 6(1) (2024) 281–299. doi: 10.37385/jaets.v6i1.5122.
- [57] H. Yamagata, The cylinder, in *The Science and Technology of Materials in Automotive Engines*, Elsevier (2005) 10–52. doi: 10.1533/9781845690854.10.
- [58] B.M. Reddy, T. Nallusamy, Degassing of Aluminum Metals and Its Alloys in Non-ferrous Foundry, (2021) 637–644. doi: 10.1007/978-981-15-8319-3_63.
- [59] T. de Terris *et al.*, Optimization and comparison of porosity rate measurement methods of Selective Laser Melted metallic parts, *Addit. Manuf.* 28 (2019) 802–813. doi: 10.1016/j.addma.2019.05.035.
- [60] P. Hermanek, S. Carmignato, Porosity measurements by X-ray computed tomography: Accuracy evaluation using a calibrated object, *Precis. Eng.* 49 (2017) 377–387. doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.03.007.
- [61] W.W. Wits, S. Carmignato, F. Zanini, T.H.J. Vaneker, Porosity testing methods for the quality assessment of selective laser melted parts, *CIRP Annals* 65(1) (2016) 201–204. doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.054.
- [62] A. Nourian-Avval, A. Fatemi, Characterization and Analysis of Porosities in High Pressure Die Cast Aluminum by Using Metallography, X-Ray Radiography, and Micro-Computed Tomography, *Materials* 13(14) (2020) 3068. doi: 10.3390/ma13143068.
- [63] L. Vásárhelyi, Z. Kónya, Á. Kukovecz, R. Vajtai, Microcomputed tomography–based characterization of advanced materials: a review, *Mater. Today Adv.* 8 (2020) 100084. doi: 10.1016/j.mtadv.2020.100084.
- [64] Á. Kazup, T. Bubonyi, Á. Filep, Z. Gácsi, Komputertomográfia alkalmazása a gyakorlatban, *Anyagvizsgálók Lapja* 4 (2021) 12–17.
- [65] B. Leszczyński *et al.*, Three dimensional visualisation and morphometry of bone samples studied in microcomputed tomography (micro-CT), *Folia Morphol. (Warsz)* 73(4) (2014) 422–428. doi: 10.5603/FM.2014.0064.
- [66] T. Yang *et al.*, Laser powder bed fusion of AlSi10Mg: Influence of energy intensities on spatter and porosity evolution, microstructure and mechanical properties, *J. Alloys Compd.* 849 (2020) 156300. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.156300.
- [67] Y. Nikishkov, L. Airoidi, A. Makeev, Measurement of voids in composites by X-ray Computed Tomography, *Compos. Sci. Technol.* 89 (2013) 89–97. doi: 10.1016/j.compscitech.2013.09.019.
- [68] O. Lashkari, L. Yao, S. Cockcroft, D. Maijer, X-Ray Microtomographic Characterization of Porosity in Aluminum Alloy A356, *Metallurgical Mater. Trans. A* 40(4) (2009) 991–999. doi: 10.1007/s11661-008-9778-9.

- [69] K.S. Lim, M. Barigou, X-ray micro-computed tomography of cellular food products, *Food Res. Int.* 37(10) 1001–1012. doi: 10.1016/j.foodres.2004.06.010.
- [70] F.J. Alvarez-Borges, D.J. Richards, C.R.I. Clayton, S.I. Ahmed, Application of X-ray computed tomography to investigate pile penetration mechanisms in chalk, in *Engineering in Chalk*, ICE Publishing (2018) 565–570. doi: 10.1680/eiccf.64072.565.
- [71] T. Zikmund *et al.*, Computed tomography based procedure for reproducible porosity measurement of additive manufactured samples, *NDT & E Int.* 103 (2019) 111–118. doi: 10.1016/j.ndteint.2019.02.008.
- [72] E. Lordan *et al.*, On the relationship between internal porosity and the tensile ductility of aluminium alloy die-castings, *Mater. Sci. Eng. A* 778 (2020) 139107. doi: 10.1016/j.msea.2020.139107.
- [73] Z. Gácsi, The Application of Digital Image Processing to Materials Science, *Mater. Sci. Forum* 414–415 (2003) 213–220. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.414-415.213.
- [74] Z. Gácsi *et al.*, *Szttereológia és képelemzés*. Miskolc: WellPress, Phare, 2001.
- [75] R.T. DeHoff, F.N. Rhines, *Quantitative Microscopy Materials Science and Engineering Series*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [76] D. Svetlizky *et al.*, Directed energy deposition of Al 5xxx alloy using Laser Engineered Net Shaping (LENS®), *Mater. Des.* 192 (2020) 108763. doi: 10.1016/j.matdes.2020.108763.
- [77] G. Nicoletto, R. Konečná, S. Fintova, Characterization of microshrinkage casting defects of Al–Si alloys by X-ray computed tomography and metallography, *Int. J. Fatigue* 41 (2012) 39–46. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2012.01.006.
- [78] G. Nicoletto, G. Anzelotti, R. Konečná, X-ray computed tomography vs. metallography for pore sizing and fatigue of cast Al-alloys, *Procedia Eng.* 2(1) (2010) 547–554. doi: 10.1016/j.proeng.2010.03.059.
- [79] Á. Kazup, Alumínium ötvözet félfolyamatos öntésekor kialakuló szövetszerkezetének vizsgálata, Diplomamunka, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2020.
- [80] Z. Gácsi, P. Barkóczy, *Számítógépi képelemzés*. Miskolc: Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
- [81] Volume Graphics, VGStudio MAX 3.3 Reference Manual, Dec. 2019, *Volume Graphics GmbH*.
- [82] MIPAR, User manual: Feature Measurements, <https://www.manula.com/manuals/mipar/user-manual/v4.5/en/topic/feature-measurements>. (2024. 01. 30.)
- [83] A. Vaško, Evaluation of Shape of Graphite Particles in Cast Irons by a Shape Factor, *Mater. Today Proc.* 3(4) (2016) 1199–1204. doi: 10.1016/j.matpr.2016.03.006.
- [84] J.C. Hastie *et al.*, Classifying shape of internal pores within AlSi10Mg alloy manufactured by laser powder bed fusion using 3D X-ray micro computed tomography: Influence of processing parameters and heat treatment, *Mater. Charact.* 163 (2020) 110225. doi: 10.1016/j.matchar.2020.110225.
- [85] H. Hyer *et al.*, Understanding the Laser Powder Bed Fusion of AlSi10Mg Alloy, *Metallogr. Microstruct. Anal.* 9(4) (2020) 484–502. doi: 10.1007/s13632-020-00659-w.
- [86] T. Huynh *et al.*, Microstructural Development in Inconel 718 Nickel-Based Superalloy Additively Manufactured by Laser Powder Bed Fusion, *Metallogr. Microstruct. Anal.* 11(1) (2022) 88–107. doi: 10.1007/s13632-021-00811-0.
- [87] Y. Chen *et al.*, Characterization of air-void systems in 3D printed cementitious materials using optical image scanning and X-ray computed tomography, *Mater. Charact.* 173 (2021) 110948. doi: 10.1016/j.matchar.2021.110948.
- [88] O. Amsellem *et al.*, Best Paper in Journal of Thermal Spray Technology: 3D Analysis in Microstructure of Thermal Spray Coatings, *Metallogr. Microstruct. Anal.* 2(3) (2013) 196–201. doi: 10.1007/s13632-013-0077-5.

- [89] S. Dezecot *et al.*, In situ 3D characterization of high temperature fatigue damage mechanisms in a cast aluminum alloy using synchrotron X-ray tomography, *Scr. Mater.* 113 (2016) 254–258. doi: 10.1016/j.scriptamat.2015.11.017.
- [90] A. Brueckner-Foit *et al.*, On the role of internal defects in the fatigue damage process of a cast Al-Si-Cu alloy, *Procedia Structural Integr.* 7 (2017) 36–43. doi: 10.1016/j.prostr.2017.11.058.
- [91] X. Jiao *et al.*, On the characterization of microstructure and fracture in a high-pressure die-casting Al-10 wt%Si alloy, *Progress in Natural Science: Mater. Int.* 30(2) (2020) 221–228. doi: 10.1016/j.pnsc.2019.04.008.
- [92] J.M. Boileau, J.E. Allison, The effect of solidification time and heat treatment on the fatigue properties of a cast 319 aluminum alloy, *Metallurgical Mater. Trans. A* 34(9) (2003) 1807–1820. doi: 10.1007/s11661-003-0147-4.
- [93] C. Bharambe *et al.*, Analyzing casting defects in high-pressure die casting industrial case study, *Mater. Today Proc.* 72 (2023) 1079–1083. doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.166.
- [94] K.Ch. Apparao, A.K. Birru, Optimization of Die casting process based on Taguchi approach, *Mater. Today Proc.* 4(2) (2017) 1852–1859. doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.029.
- [95] Á. Kazup, V. Kutatószemináriumi dolgozat, Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, 2022, Miskolc.
- [96] T. Hosch, R.E. Napolitano, The effect of the flake to fiber transition in silicon morphology on the tensile properties of Al-Si eutectic alloys, *Mater. Sci. Eng. A* 528(1) (2010) 226–232. doi: 10.1016/j.msea.2010.09.008.
- [97] N. Dahdah *et al.*, Influence of the Casting Process in High Temperature Fatigue of A319 Aluminium Alloy Investigated By In-Situ X-Ray Tomography and Digital Volume Correlation, *Procedia Structural Integr.* 2 (2016) 3057–3064. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.382.
- [98] S. Dezecot, V. Maurel, J.-Y. Buffiere, F. Szymtka, A. Koster, 3D characterization and modeling of low cycle fatigue damage mechanisms at high temperature in a cast aluminum alloy, *Acta Mater.* 123 (2017) 24–34. doi: 10.1016/j.actamat.2016.10.028.
- [99] L. Wang *et al.*, Influence of pores on crack initiation in monotonic tensile and cyclic loadings in lost foam casting A319 alloy by using 3D in-situ analysis, *Mater. Sci. Eng. A* 673 (2016) 362–372. doi: 10.1016/j.msea.2016.07.036.
- [100] J. Song, S.-M. Xiong, M. Li, J. Allison, In situ observation of tensile deformation of high-pressure die-cast specimens of AM50 alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 520(1–2) (2009) 197–201. doi: 10.1016/j.msea.2009.05.042.
- [101] M. Luetje *et al.*, 3D characterization of fatigue damage mechanisms in a cast aluminum alloy using X-ray tomography, *Int. J. Fatigue* 103 (2017) 363–370. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.06.020.
- [102] A. Rotella *et al.*, Influence of defect morphology and position on the fatigue limit of cast Al alloy: 3D characterization by X-ray microtomography of natural and artificial defects, *Mater. Sci. Eng. A* 785 (2020) 139347. doi: 10.1016/j.msea.2020.139347.
- [103] C. Lee, J. Youn, Y. Lee, Y. Kim, Effect of eutectic Si particles on the defect susceptibility of tensile properties to microporosity variation in Al-xSi binary alloys, *Mater. Sci. Eng. A* 678 (2016) 227–234. doi: 10.1016/j.msea.2016.09.111.
- [104] C. Do Lee, Effects of microporosity on tensile properties of A356 aluminum alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 464(1–2) (2007) 249–254. doi: 10.1016/j.msea.2007.01.130.
- [105] C. Lee, J. Youn, Y. Kim, Effect of strain rate on the defect susceptibility of tensile properties to porosity variation, *Mater. Sci. Eng. A* 683 (2017) 135–142. doi: 10.1016/j.msea.2016.12.007.
- [106] Á. Kazup, D. Koncz-Horváth, Z. Gácsi, Dendritközi porozitás töretfelületen történő kvantitatív vizsgálata, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2024(1) (2024) 10–14.

- [107] P. Szalva, I.N. Orbulov, Fatigue testing and non-destructive characterization of AlSi9Cu3(Fe) die cast specimens by computer tomography, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 43(9) (2020) 1949–1958. doi: 10.1111/ffe.13249.
- [108] S. Dezecot, M. Brochu, Microstructural characterization and high cycle fatigue behavior of investment cast A357 aluminum alloy, *Int. J. Fatigue* 77 (2015) 154–159. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2015.03.004.
- [109] C. Do Lee, Effect of damage evolution of Si particles on the variability of the tensile ductility of squeeze-cast Al–10%Si–2%Cu–0.4%Mg alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 527(13–14) (2010) 3144–3150. doi: 10.1016/j.msea.2010.01.061.
- [110] M. Khosravi *et al.*, Simultaneous Prediction of Stream-Water Variables Using Multivariate Multi-Step Long Short-Term Memory Neural Network, (2023) doi: 10.20944/preprints202302.0086.v2.
- [111] M.K. Alkharisi, H.A. Dahish, O. Youssf, Prediction models for the hybrid effect of nano materials on radiation shielding properties of concrete exposed to elevated temperatures, *Case Studies in Construction Mater.* 21 (2024) e03750. doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03750.
- [112] J. Li *et al.*, Comparative analysis of machine learning techniques for accurate prediction of unfrozen water content in frozen soils, *Cold Reg. Sci. Technol.* 227 (2024) 104304. doi: 10.1016/j.coldregions.2024.104304.
- [113] D. Tarwidi, S.R. Pudjaprasetya, D. Adytia, M. Apri, An optimized XGBoost-based machine learning method for predicting wave run-up on a sloping beach, *MethodsX* 10 (2023) 102119. doi: 10.1016/j.mex.2023.102119.
- [114] D. Lord, X. Qin, S.R. Geedipally, Exploratory analyses of safety data, in *Highway Safety Analytics and Modeling*, Elsevier (2021) 135–177. doi: 10.1016/B978-0-12-816818-9.00015-9.
- [115] Andy Field, *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*, 6th ed. SAGE Publications Ltd, 2024.
- [116] C. Chatfield, *Statistics for Technology: A Course in Applied Statistics*, 3rd ed. New York: Routledge, 2018. doi: 10.1201/9780203738467.
- [117] D.C. Montgomery, G.C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 6th ed. Wiley, 2014.
- [118] C. Xiao, J. Ye, R.M. Esteves, C. Rong, Using Spearman’s correlation coefficients for exploratory data analysis on big dataset, *Concurr. Comput.* 28(14) (2016) 3866–3878. doi: 10.1002/cpe.3745.
- [119] A.P. King, R.J. Eckersley, Descriptive Statistics II: Bivariate and Multivariate Statistics, in *Statistics for Biomedical Engineers and Scientists*, Elsevier (2019) 23–56. doi: 10.1016/B978-0-08-102939-8.00011-6.
- [120] S. Ma, Y. Rao, X. Huang, S. Ju, High-throughput discovery of metal oxides with high thermoelectric performance via interpretable feature engineering on small data, *Mater. Today Phys.* 45 (2024) 101457. doi: 10.1016/j.mtphys.2024.101457.
- [121] Peter X.-K. Song, *Correlated Data Analysis: Modeling, Analytics, and Applications*, 1st ed. New York, NY: Springer New York, 2007. doi: 10.1007/978-0-387-71393-9.
- [122] W.-Y. Zhang, Z.-W. Wei, B.-H. Wang, X.-P. Han, Measuring mixing patterns in complex networks by Spearman rank correlation coefficient, *Physica A: Statist. Mech. Applic.* 451 (2016) 440–450. doi: 10.1016/j.physa.2016.01.056.
- [123] G. Rajesh, A. Chaturvedi, Correlation analysis and statistical characterization of heterogeneous sensor data in environmental sensor networks, *Computer Networks* 164 (2019) 106902. doi: 10.1016/j.comnet.2019.106902.

- [124] M. Bermudez-Edo, P. Barnaghi, K. Moessner, Analysing real world data streams with spatio-temporal correlations: Entropy vs. Pearson correlation, *Autom. Constr.* 88 (2018) 87–100. doi: 10.1016/j.autcon.2017.12.036.
- [125] R.A. García-León *et al.*, Statistical significance of the sliding wear test parameters under lubricated conditions on borided AISI 316 L-SS samples, *Tribol. Int.* 192 (2024) 109248. doi: 10.1016/j.triboint.2023.109248.
- [126] Q. Qiao, A. Yunusa-Kaltungo, R.E. Edwards, Feature selection strategy for machine learning methods in building energy consumption prediction, *Energy Reports* 8 (2022) 13621–13654. doi: 10.1016/j.egy.2022.10.125.
- [127] Q. Wang *et al.*, A data-driven model for predicting fatigue performance of high-strength steel wires based on optimized XGBOOST, *Eng. Fail. Anal.* 164 (2024) 108710. doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108710.
- [128] B. Kiyak, H.F. Öztıp, F. Ertam, İ.G. Aksoy, An intelligent approach to investigate the effects of container orientation for PCM melting based on an XGBoost regression model, *Eng. Anal. Bound. Elem.* 161 (2024) 202–213. doi: 10.1016/j.enganabound.2024.01.018.
- [129] P. Pramanik, R.K. Jana, I. Ghosh, AI readiness enablers in developed and developing economies: Findings from the XGBoost regression and explainable AI framework, *Technol. Forecast Soc. Change* 205 (2024) 123482. doi: 10.1016/j.techfore.2024.123482.
- [130] B. Pratikno, L. Sulistia, Saniyah, The bivariate regression model and its application, *J. Phys. Conf. Ser.* 983 (2018) 012109. doi: 10.1088/1742-6596/983/1/012109.
- [131] R.D. Retherford, M.K. Choe, Bivariate Linear Regression, in *Statistical Models for Causal Analysis*, Wiley, ch.1 (1993) 1–28. doi: 10.1002/9781118033135.ch1.
- [132] R.J. Freund, W.J. Wilson, D.L. Mohr, Multiple Regression, in *Statistical Methods*, Elsevier (2010) 375–471. doi: 10.1016/B978-0-12-374970-3.00008-1.
- [133] D.L. Mohr, W.J. Wilson, R.J. Freund, Multiple Regression, in *Statistical Methods*, Elsevier (2022) 351–444. doi: 10.1016/B978-0-12-823043-5.00008-4.
- [134] A.W. Moore, B. Anderson, K. Das, W.-K. Wong, Combining Multiple Signals for Biosurveillance, in *Handbook of Biosurveillance*, Elsevier (2006) 235–242. doi: 10.1016/B978-012369378-5/50017-X.
- [135] A.F. Siegel, Multiple Regression, in *Practical Business Statistics*, Elsevier (2012) 347–416. doi: 10.1016/B978-0-12-385208-3.00012-2.
- [136] Inc. MLJAR, AutoML mljar-supervised, <https://supervised.mljar.com>. (2024. 12. 09.)
- [137] G. Katz, E.C.R. Shin, D. Song, ExploreKit: Automatic Feature Generation and Selection, in *2016 IEEE 16th Int. Conf. Data Mining (ICDM)*, IEEE (2016) 979–984. doi: 10.1109/ICDM.2016.0123.
- [138] I. Roshanski, M. Kalech, L. Rokach, Automatic Feature Engineering for Learning Compact Decision Trees, *Expert Syst. Appl.* 229 (2023) 120470. doi: 10.1016/j.eswa.2023.120470.
- [139] P. Jiang, J. Chen, Displacement prediction of landslide based on generalized regression neural networks with K-fold cross-validation, *Neurocomputing* 198 (2016) 40–47. doi: 10.1016/j.neucom.2015.08.118.
- [140] M. H. Mosallanejad *et al.*, A novel feature engineering approach for predicting melt pool depth during LPBF by machine learning models, *Addit. Manufact. Letters* 10 (2024) 100214. doi: 10.1016/j.addlet.2024.100214.
- [141] A. Rohani, M. Taki, M. Abdollahpour, A novel soft computing model (Gaussian process regression with K-fold cross validation) for daily and monthly solar radiation forecasting (Part: I), *Renew. Energy* 115 (2018) 411–422. doi: 10.1016/j.renene.2017.08.061.

- [142] A. Foard, The Analytics PAIN: How to Interpret Trend Lines and Greek Letters, <https://thestatsninja.com/2018/11/01/interpreting-trend-lines-and-greek-letters/>. (2024. 12. 01.)
- [143] Scikit-Learn, 3.1. Cross-validation: evaluating estimator performance, https://scikit-learn.org/stable/modules/cross_validation.html (2025. 01. 15.)
- [144] H. Trevor, T. Robert, J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning*, 2nd ed. New York, NY: Springer New York, 2009. doi: 10.1007/b94608.
- [145] Y.-S. Kim *et al.*, Investigating the Impact of Data Normalization Methods on Predicting Electricity Consumption in a Building Using different Artificial Neural Network Models., *Sustain. Cities Soc.* (2024) 105570. doi: 10.1016/j.scs.2024.105570.
- [146] Z. Yaniv, Permutation Importance (PI): Explain Machine Learning Predictions, <https://www.aporia.com/learn/feature-importance/explain-ml-models-with-permutation-importance/>.
- [147] Scikit-Learn, 5.2. Permutation feature importance, https://scikit-learn.org/stable/modules/permutation_importance.html (2025. 01. 15.)
- [148] H. Talbot, B. Appleton, Efficient complete and incomplete path openings and closings, *Image Vis. Comput.* 25(4) (2007) 416–425. doi: 10.1016/j.imavis.2006.07.021.
- [149] H. Hassanpour, N. Samadiani, S.M. Mahdi Salehi, Using morphological transforms to enhance the contrast of medical images, *The Egyptian J. Radiology and Nuclear Medicine* 46(2) (2015) 481–489. doi: 10.1016/j.ejrm.2015.01.004.
- [150] F.L.E. Usseglio-Viretta *et al.*, Concavity-based local erosion and sphere-size-based local dilation applied to lithium-ion battery electrode microstructures for particle identification, *Comput. Mater. Sci.* 251 (2025) 113758. doi: 10.1016/j.commatsci.2025.113758.
- [151] W.E. Synder *et al.*, Closing gaps in edges and surfaces, *Image Vis. Comput.* 10(8) (1992) 523–531.
- [152] L. You *et al.*, A study of pedestrian evacuation model of impatient queueing with cellular automata, *Phys. Scr.* 95(9) (2020) 095211. doi: 10.1088/1402-4896/abaf14.
- [153] P. Barkóczy, A sejtautomata működésének és sajátosságainak hatása a fázisátalakulások szimulációiban, A Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetek Műszaki-Természettudományi Habilitációs Tanács, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2020.
- [154] C.A. Schneider, W.S. Rasband, K.W. Eliceiri, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nat. Methods* 9(7) (2012) 671–675. doi: 10.1038/nmeth.2089.
- [155] ImageJ, ImageJ Homepage, <https://imagej.net>. (2021. 09. 15.)
- [156] G. Bozsonyi, AlSi7Mg0,3 öntvény szövetszerkezetének és mechanikai tulajdonságainak in situ komputertomográfiás vizsgálata, MSc Diplomamunka, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2024.
- [157] MIPAR, User Manual: Segmentation - Adaptive Threshold and Auto Segmentation, <https://www.manula.com/manuals/mipar/user-manual/latest/en/topic/segmentation>. (2024. 01. 30.)
- [158] MathWorks, Lazy Snapping, https://au.mathworks.com/help/images/ref/lazysnapping.html?fbclid=%20IwAR2J9Pa4oUPgNONBTnFC9MG2R6wlFmvKYBHxuy0azu25CY0TH_%20bB6Q6vHfM. (2024. 01. 30.)
- [159] Y. Li, J. Sun, C.-K. Tang, H.-Y. Shum, Lazy snapping, *ACM Trans. Graph.* 23(3) (2004) 303–308. doi: 10.1145/1015706.1015719.
- [160] Z. Lin *et al.*, Sequential interactive image segmentation, *Comput. Vis. Media (Beijing)* 9(4) (2023) 753–765. doi: 10.1007/s41095-022-0302-8.
- [161] P. Szalva, I.N. Orbulov, The Effect of Vacuum on the Mechanical Properties of Die Cast Aluminum AlSi9Cu3(Fe) Alloy, *Int. J. Metalcasting* 13(4) (2019) 853–864. doi: 10.1007/s40962-018-00302-z.